

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, W-4/K7

OCENA PRACY:

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

Spis treści

1	Wstęp	3
1.1	Cel i założenia	3
2	Analiza problemu	5
2.1	TDOA	5
2.2	Beamforming — opóźnienie i sumowanie	6
3	Specyfikacja projektu	9
3.1	Matryca mikrofonów	9
3.2	Detektor obwiedni	10
3.3	Mikrokontroler	11
4	Projekt i realizacja modułu kierunku przylotu sygnału akustycznego	13
4.1	Założenia działania modułu	13
4.2	Schemat układu	14
4.2.1	Sekcja zasilania	14
4.2.2	Sekcja mikrofonów	14
4.2.3	Sekcja detektora obwiedni	14
4.2.4	Sekcja mikrokontrolera	15
5	Implementacja programowa metody wyznaczania kierunku przylotu sy-	17
	gnału	
5.1	Konfiguracja i oprogramowanie mikrokontrolera	17
5.2	Implementacja Beamforming	17
6	Testy i eksperymenty	21
6.1	Testy mikrofonów i detektorów obwiedni	21
6.2	Testy działania programu	22
6.3	Testy końcowe	24
7	Podsumowanie	27
	Bibliografia	27

Rozdział 1

Wstęp

Problem lokalizacji źródła dźwięku dotyczy wielu aspektów życia. Poczynając od psychoakustyki, która zajmuje się badaniem zjawisk biologicznych związanych z odczuwaniem fali akustycznej, po badania techniczne transformatorów, w których niechciane prądy upływowe generują dźwięk. W pracy zaproponowano jedną z możliwych metod wyznaczenia kierunku przylotu sygnału. Polega ona na implementacji algorytmu *sum and delay beamforming*. W wyniku pracy zostanie stworzony układ, który sprawdzi się w wielu dziedzinach robotyki, takich jak robot podążający za źródłem dźwięku. Urządzenie takie, oprócz wykorzystania w projektach rekreacyjnych, mogłoby znaleźć zastosowanie przy robotach asystujących w poszukiwaniach ludzi - na przykład po trzęsieniu ziemi.

1.1 Cel i założenia

Głównym celem pracy jest stworzenie matrycy mikrofonów, która przy użyciu metody *beamforming* będzie w stanie wyznaczyć kierunek przylotu fali akustycznej. Aby osiągnąć ten cel należy:

- określić pasmo sygnału, czas jego trwania oraz parametry,
- stworzyć projekt urządzenia oraz je wykonać,
- ustalić poprawność działania urządzenia na podstawie wykonanych eksperymentów i testów.

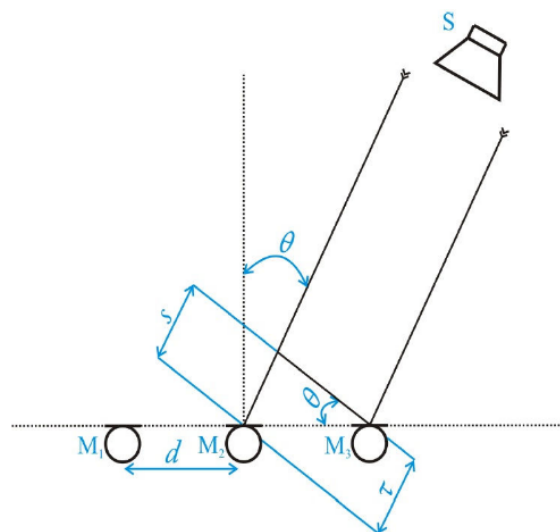
Rozdział 2

Analiza problemu

Źródłem dźwięku jest ciało wytwarzające 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 τ . Kolejny etap to obliczenie położenia źródła dźwięku na podstawie geometrii matrycy mikrofonów [5].



Rysunek 2.1 Liniowa matryca mikrofonów[5]

Posiadając dane takie jak opóźnienie sygnału oraz odległość między mikrofonami, można wyznaczyć kąt θ za pomocą wzoru,

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

gdzie τ to opóźnienie sygnału, V_a to prędkość sygnału w danym ośrodku, d to odległość między mikrofonami [5].

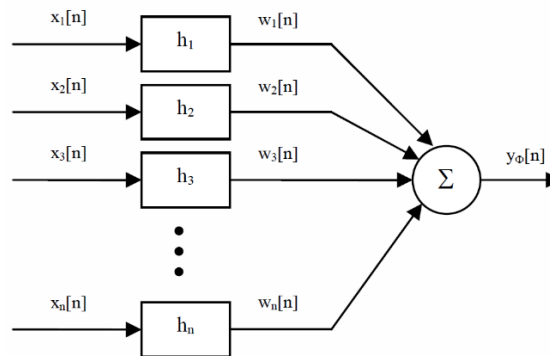
2.2 Beamforming — opóźnienie i sumowanie

Metoda *beamforming* pierwotnie została stworzona na potrzeby kształtowania wiązki sygnału emitowanej przez nadajniki. Zauważono że może być ona wykorzystywana w przypadku odbiorników do przetwarzania danych pozyskanych z matrycy czujników w celu wyznaczenia obrazu kierunkowego natężenia 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* wymaga wiele większej wydajności obliczeniowej. Konieczne też jest odpowiednie umieszczenie mikrofonów na matrycy, by uniknąć aliasingu przestrzennego.

Tego niekorzystnego zjawiska 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 [4]:

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

Najprostsze podejście związane z formowaniem wiązki sygnału opiera się na algorytmie DAS (Delay and Sum). W podejściu tym sygnały otrzymane z każdego z mikrofonów jest podawany na wejście osobnego bloku, który wprowadza odpowiednie opóźnienie. Otrzymane w ten sposób sygnały z wyjść wspomnianych bloków są sumowane [4]. Układ taki określany jest mianem *beamformer* (patrz rys. 2.2).



Rysunek 2.2 Schemat blokowy reprezentujący metodę DAS [4]

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

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

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 [4]:

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

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

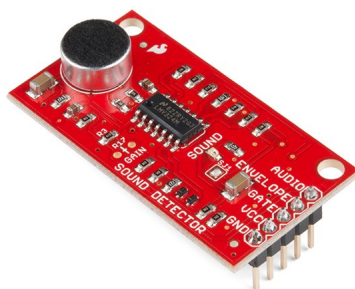
Projekt nie przewidywał budowy matrycy mikrofonów wraz z konstrukcją toru wzmocnienia, dlatego zdecydowano się na zakup gotowego rozwiązania. Na rynku dostępny jest duży wybór czujników mikrofonowych wraz z dedykowanymi układami wzmacniaczy, dwa z nich zdawały się być najbardziej odpowiednie.

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

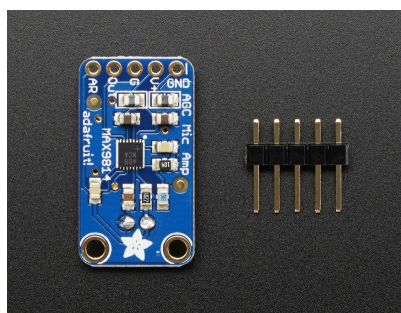
- Audio – analogowy sygnał audio,
- Envelope – analogowy sygnał umożliwiający pomiar amplitudy sygnału,
- Gate – sygnał cyfrowy pozwalający na detekcję przekroczenia ustalonego poziomu amplitudy.

Drugie rozwiązanie to moduł czujnika dźwięku ze wzmacniaczem MAX9814 produkowany przez firmę Adafruit (patrz rys. 3.2), w jego skład wchodzi mikrofon elektretowy umożliwiający pomiary w zakresie 20-20000 Hz. 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 40,50,60 dB,
- ustawienie współczynnika Attack/Release,
- sygnał wyjściowy na poziomie 2 Vpp.



Rysunek 3.1 SparkFun SEN-14262 [3]

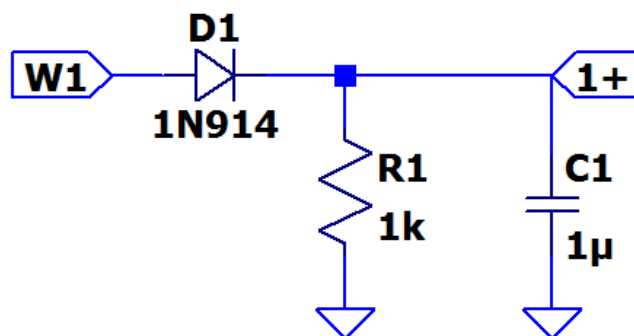


Rysunek 3.2 Adafruit MAX9814 [2]

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%. MAX9814 posiada również o wiele niższą gęstość szumów.

3.2 Detektor obwiedni

Czujnik firmy Adafruit nie posiada wyjścia umożliwiającego bezpośredni pomiar amplitudy. Dlatego też 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, którego budowa została przedstawiona na rys. 3.3.



Rysunek 3.3 Schemat detektora obwiedni [1]

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 dolno-przepustowy. Do zbudowania układu użyto diody 1N914 ze względu na jej dużą szybkość przełączania (4 ns) i wysoką przewodność.

3.3 Mikrokontroler

Kolejnym krokiem przetwarzania sygnału uzyskanego z matrycy mikrofonów jest jego próbkowanie oraz konwersja do postaci cyfrowej. Chcąc nie zwiększać ilości elementów 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 to, że dostępne są:

- aplikacja CubeMX, która generuje szkielet projektu i przyspiesza pracę związane z konfiguracją mikrokontrolera,
- wiele darmowych narzędzi oraz przejrzyste IDE SW4,
- biblioteka HAL ułatwiająca pracę z peryferiami,
- aplikacja STM Studio, która umożliwia proste debuggowanie.

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:

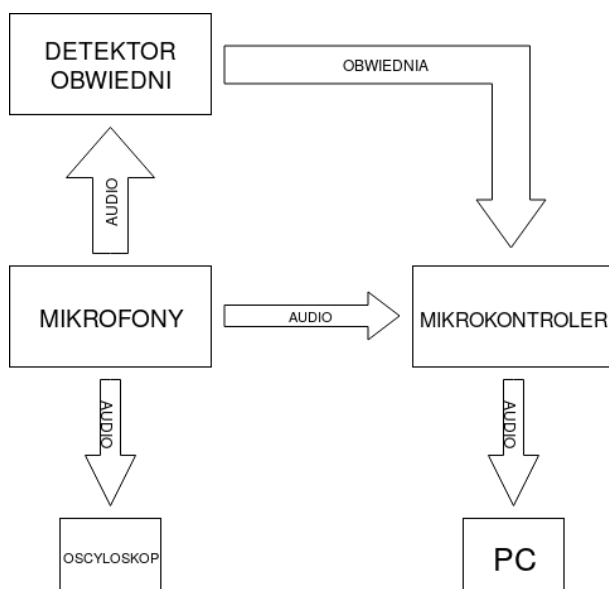
- Częstotliwość taktowania do 180MHz.
- Trzy przetworniki ADC o rozdzielczości 12 bitów.
- 16-strumieniowy kontroler DMA.
- 6 interfejsów UART, które pozwolą na monitorowanie każdego z mikrofonów przy przeprowadzaniu testów.

Rozdział 4

Projekt i realizacja modułu kierunku przylotu sygnału akustycznego

4.1 Założenia działania modułu

Moduł został zaprojektowany, tak by mógł składać się z trzech oddzielnych członów opisanych we wcześniejszym rozdziale. Zasadę ich wspólnego działania opisuje schemat blokowy przedstawiony na rys. 4.1. Wzmocniony sygnał audio pochodzący z mikrofonów zostaje



Rysunek 4.1 Schemat blokowy modułu

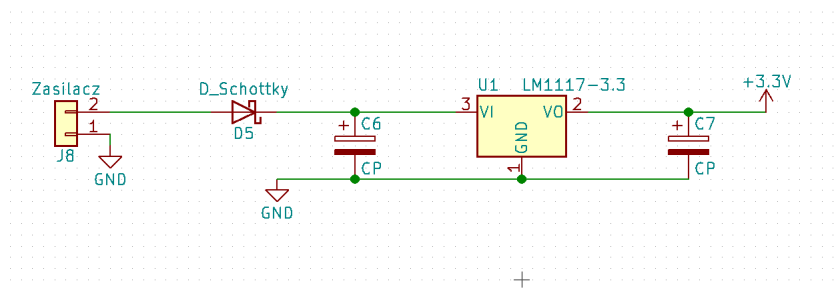
podany na wejście mikrokontrolera i detektora obwiedni. Dodatkowo możliwe też jest bezpośrednie podłączenie do układu oscyloskopu, który jest pomocny podczas fazy testowej modułu. Wyjście detektora obwiedni podłączono do mikrokontrolera. Dane z mikrokontrolera wysyłane są za pomocą interfejsu UART. Sygnały tego interfejsu przekierowane są do układu MSX FT232RL, który do komunikacji z komputerem udostępnia interfejs USB. Porównanie sygnałów audio otrzymanych przez mikrofony oraz mikrokontroler posłuży do sprawdzenia poprawności działania układu.

4.2 Schemat układu

Do zaprojektowania schematu elektronicznego oraz płytki PCB zostało użyte oprogramowanie KiCad.

4.2.1 Sekcja zasilania

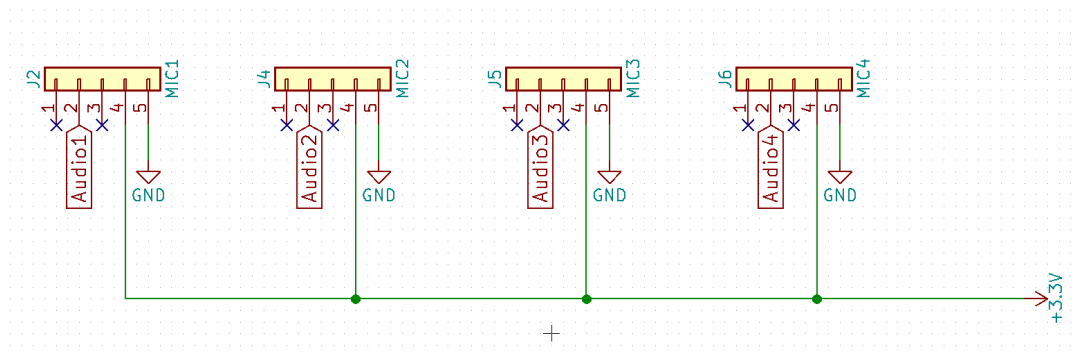
Moduł został zasilony napięciem stałym 5V pochodzącym z zewnętrznego zasilacza sieciowego. Jednak z uwagi na to że mikrokontroler oraz systemy mikrofonowe powinny zostać zasilone napięciem 3,3V, do modułu zaimplementowano stabilizator liniowy LM1117(patrz rys. 4.2).



Rysunek 4.2 Stabilizator liniowy

4.2.2 Sekcja mikrofonów

Ze względu na fakt, że mikrofony znajdują się na gotowych komercyjnych PCB, zostaną one przylutowane do płytki głównej poprzez goldpin. Zasilane są one napięciem 3,3V (patrz rys. 4.3).

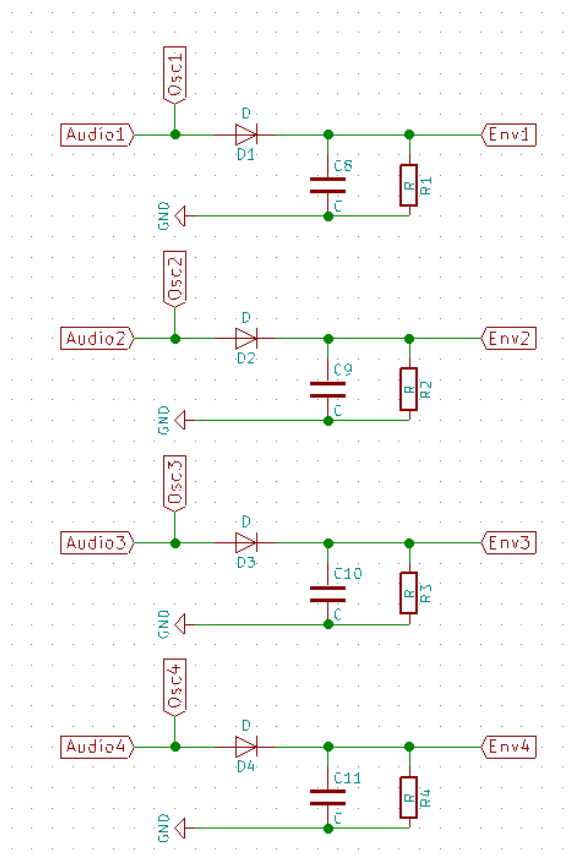


Rysunek 4.3 Moduły mikrofonów

4.2.3 Sekcja detektora obwiedni

Detektor obwiedni został zaprojektowany na zasadzie diody oraz rezystora i kondensatora połączonych do niej równolegle (patrz rys. 4.4).

W tej sekcji zrealizowano również wyprowadzenie używane przy podłączeniu oscyloskopów (patrz rys. 4.5).



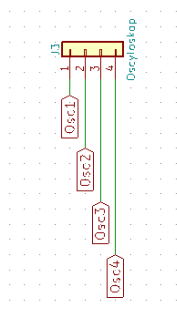
Rysunek 4.4 Schemat detektorów obwiedni

4.2.4 Sekcja mikrokontrolera

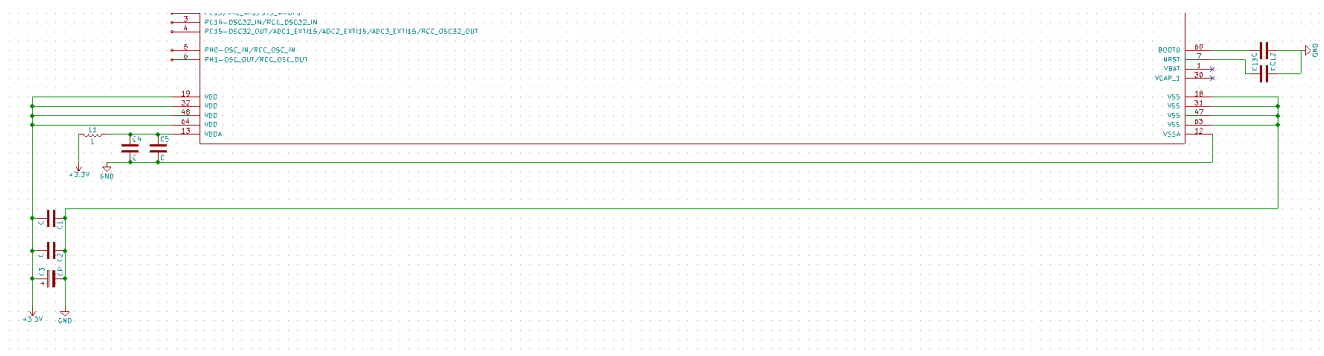
Mikrokontroler został zasilony napięciem 3.3 V, dodatkowo przy jego sekcji zasilania zastosowano filtry tak aby całkowicie wyeliminować wpływ ewentualnych tętnień na jego pracę (patrz rys. 4.6).

Kolejną częścią tej sekcji jest podłączenie do przetwornika ADC mikrokontrolera sygnałów otrzymanych z detektora obwiedni oraz mikrofonów (patrz rys. 4.7).

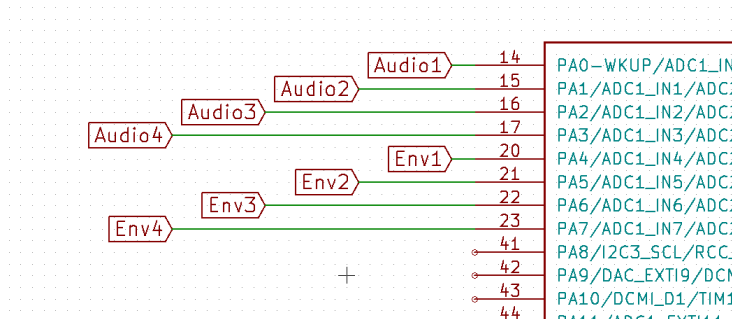
Wyprowadzono także złącze programatora i interfejsu USART, służą one do programowania mikrokontrolera, debugowania za pomocą STM Studio i wysyłania danych testowych do komputera (patrz rys. 4.8).



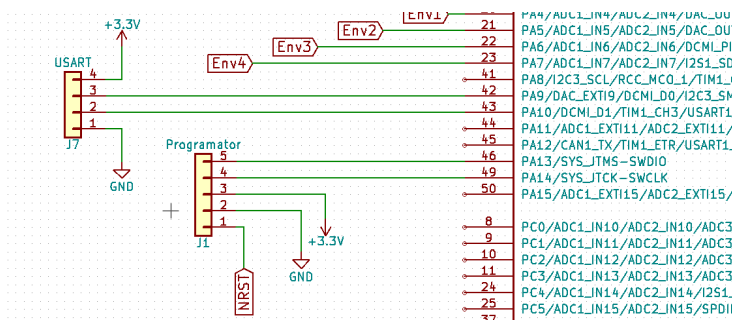
Rysunek 4.5 Złącza testowe oscyloskopu



Rysunek 4.6 Zasilanie mikrokontrolera



Rysunek 4.7 Wejścia ADC



Rysunek 4.8 Złącze programatora

Rozdział 5

Implementacja programowa metody wyznaczania kierunku przylotu sygnału

Dzięki zastosowaniu mikrofonów z wbudowanym torem wzmocnienia oraz prostych detektorów obwiedni, zadanie stworzenia systemu zostało uproszczone do odebrania przez mikrokontroler danych z czujników, wysyłania ich poprzez UART i poprawnej implementacji algorytmu *beamforming*. Zarówno do implementacji algorytmu jak i zaprogramowania mikrokontrolera wykorzystano język C.

5.1 Konfiguracja i oprogramowanie mikrokontrolera

Mikrokontroler otrzymuje z detektorów obwiedni sygnał w postaci analogowej. W przetworniku ADC następuje jego dyskretyzacja. Taktowanie głównego zegara zostało ustawione na 8 Mhz. Natomiast przetwornik jest taktowany częstotliwością 4 Mhz, a jego rozdzielczość wynosi 12 bitów. Ilość cykli konwersji to 480, taka konfiguracja pozwala uzyskać czas konwersji jednego kanału na poziomie 246 μ s. Przydatnym okazało się także użycie kontrolera DMA (Direct Memory Access), który ułatwił obsługę peryferiów oraz przyspieszyło transfer danych między nimi a pamięcią mikrokontrolera.

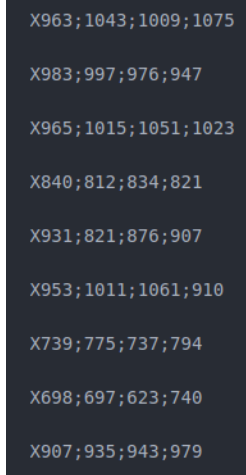
Każda z próbek jest następnie wysyłana do portu szeregowego komputera za pomocą interfejsu USART ustawionego na tryb asynchroniczny. Ramka wysyłanych danych wygląda w sposób przedstawiony w poniższej tabeli.

Znak początku ramki	mikrofon 1	znak	mikrofon 2	znak	mikrofon 3	znak	mikrofon 4	znak końca ramki
X	1000	;	1001	;	1002	;	1003	\n

5.2 Implementacja Beamforming

Program odbiera dane z portu szeregowego oraz je parsuje. Przykładowy ciąg odebranych danych przedstawiono na rys 5.1.

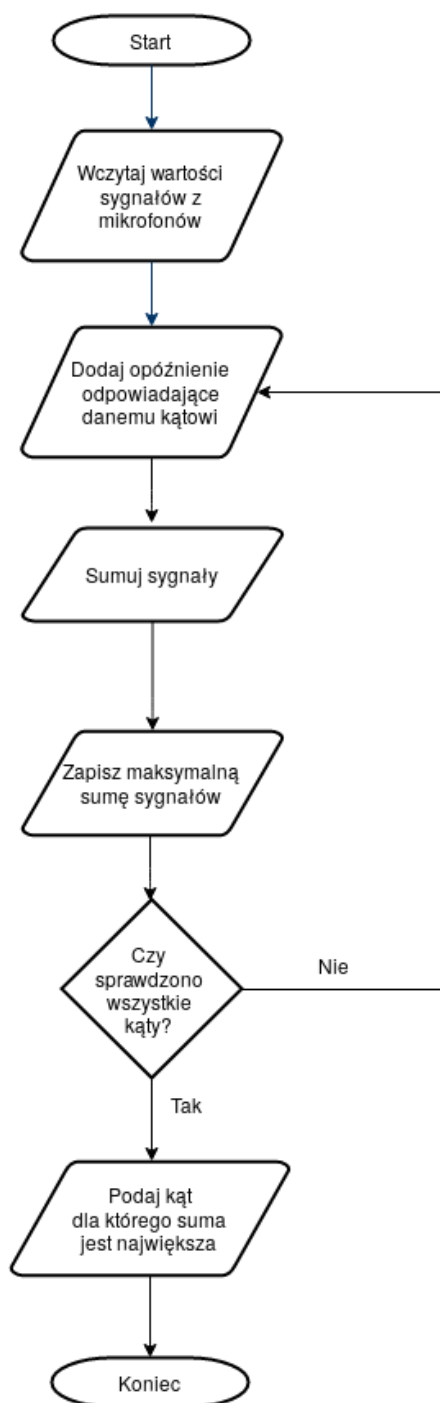
Następnie próbki sygnału zapisywane są do tablic, które reprezentują go w algorytmie. Działanie algorytmu zostało przedstawione na schemacie blokowym (patrz rys. 5.2).



```
X963;1043;1009;1075  
X983;997;976;947  
X965;1015;1051;1023  
X840;812;834;821  
X931;821;876;907  
X953;1011;1061;910  
X739;775;737;794  
X698;697;623;740  
X907;935;943;979
```

Rysunek 5.1 Przykładowy ciąg danych

Po wczytaniu przez program czterech tablic zawierających sygnał z mikrofonów następuje dodanie do każdego z nich opóźnienia odpowiadającego kątowi który aktualnie jest sprawdzany. Tablice są następnie sumowane. Z uwagi na fakt że przechowują one sygnał pod postacią dyskretną, aby dokładnie wyznaczyć jego wartość musi zostać przeprowadzona interpolacja liniowa. Każda kolejna iteracja algorytmu to kąt pod którym może znajdować się źródło dźwięku. Faktyczny kąt padania fali akustycznej to maksimum sumy sygnałów dla każdej z iteracji.



Rysunek 5.2 Schemat blokowy

Rozdział 6

Testy i eksperymenty

6.1 Testy mikrofonów i detektorów obwiedni

W celu sprawdzenia poprawności działania układu, przeprowadzono testy działania mikrofonów oraz detektorów obwiedni. Do analizy sygnału użyto oscyloskopu. W pierwszej kolejności zbadano przebieg sygnału w ciszy. Miało to na celu sprawdzenie w jakim stopniu szumy tła mogą wpłynąć na wyniki pomiarów. Wyniki przedstawiono na rys. 6.1. Sygnał oznaczony kolorem zielonym jest wyjściem mikrofonu, natomiast kolorem pomarańczowym oznaczono wyjście detektora obwiedni.



Rysunek 6.1 Szumy tła

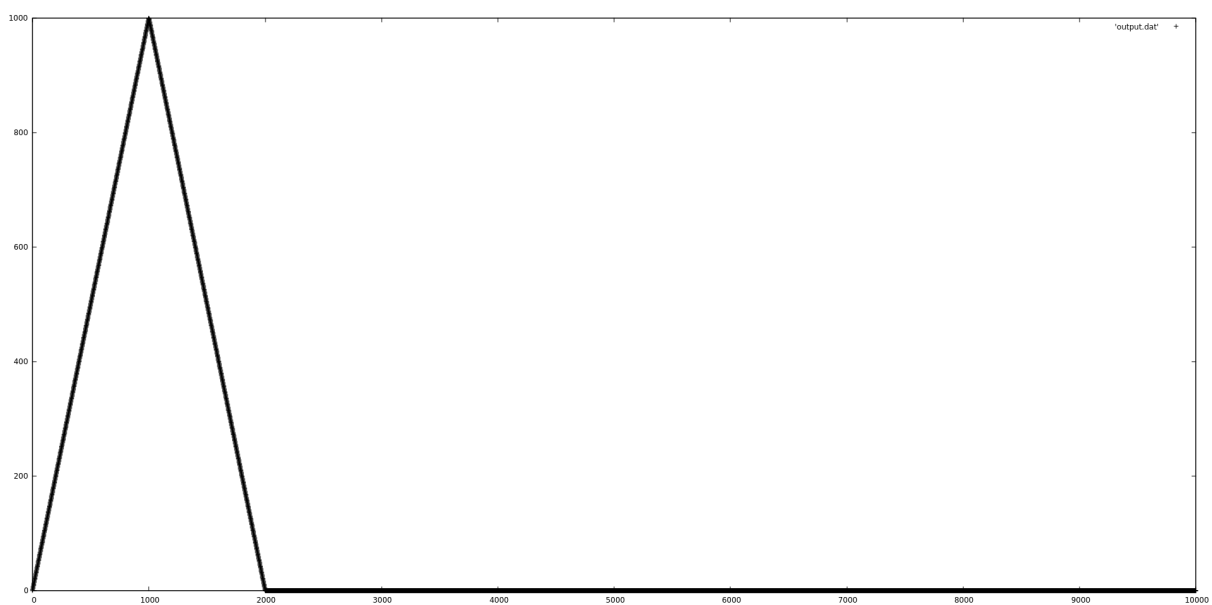
Kolejnym krokiem było sprawdzenie poprawności działania detektora obwiedni, aby każda próba była powtarzalna nagrano dźwięk pstryknięcia palcami i odtwarzano go w równych odstępach czasu. Pierwsza próba dowiodła poprawności działania diody prostowniczej w układzie, jednak analizując przebieg można było dojść do wniosku, że filtr dolnoprzepustowy został źle dobrany, dlatego z każdą kolejną próbą zwiększano pojemność kondensatora aż do osiągnięcia satysfakcjonującego wyniku (patrz rys. 6.2).



Rysunek 6.2 Pierwsza próba detektora obwiedni

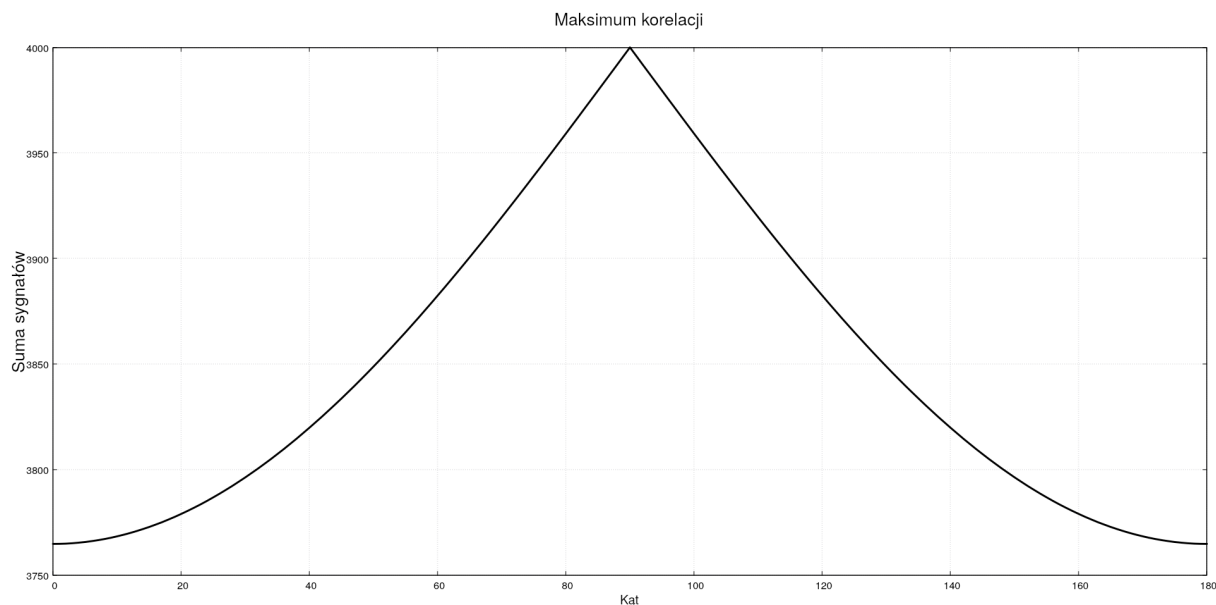
6.2 Testy działania programu

Pierwsze testy działania programu zostały przeprowadzone bez podłączania systemu mikrofonów. Miało to na celu sprawdzenie działania algorytmu w hermetycznym środowisku. Dzięki takiemu działaniu można było założyć że wszystkie błędy wynikały z niepoprawnej implementacji Sum and Delay Bemaforming. Na wejście algorytmu został podany sygnał o przebiegu trójkątnym (patrz rys.6.3).



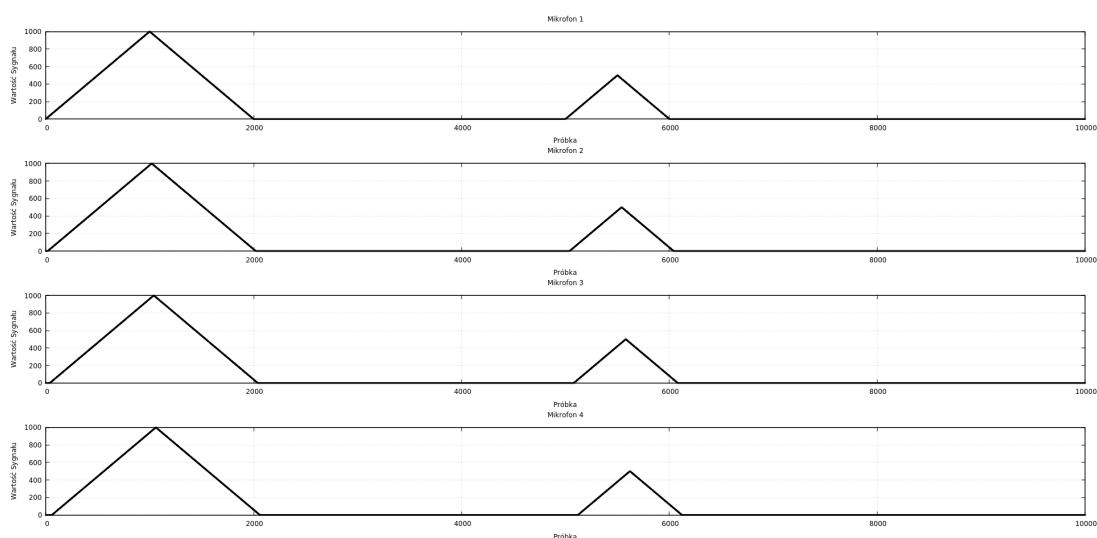
Rysunek 6.3 Sygnał podany na wejście algorytmu

Założono że każdy z mikrofonów otrzymał ten sam sygnał który nie jest opóźniony. Dla takich danych poprawnie działający algorytm powinien zwrócić maksymalną wartość korelacji w punkcie odpowiadającym kątowi 90 stopni. Wyniki eksperymentu można zaobserwować na poniższym wykresie (patrz rys.6.4). Wykres dowodzi poprawności działania programu, ponieważ widać na nim jak w miarę zbliżania się wartości kąta do 90 stopni rośnie wartość współczynnika korelacji.



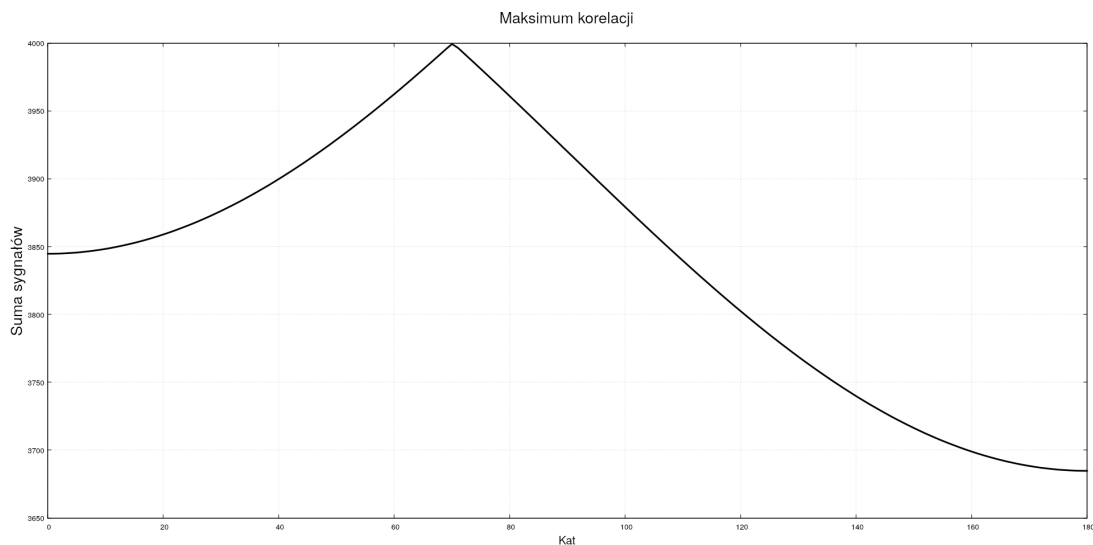
Rysunek 6.4 Wartości korelacji

Następnie, aby sprawdzić poprawność działania algorytmu dla sygnałów opóźnionych na wejście algorytmu podano cztery różne sygnały opóźnione w taki sposób aby symulowały kąt przybycia fali akustycznej równy 70 stopni. Dodatkowo aby upewnić się, że szumy otoczenia nie wpływają na wynik końcowy dodano do sygnału zakłócenie którego opóźnienie sugeruje, że znajduje się on pod kątem 120 stopni względem matrycy (patrz rys.6.5).



Rysunek 6.5 Symulowane sygnały

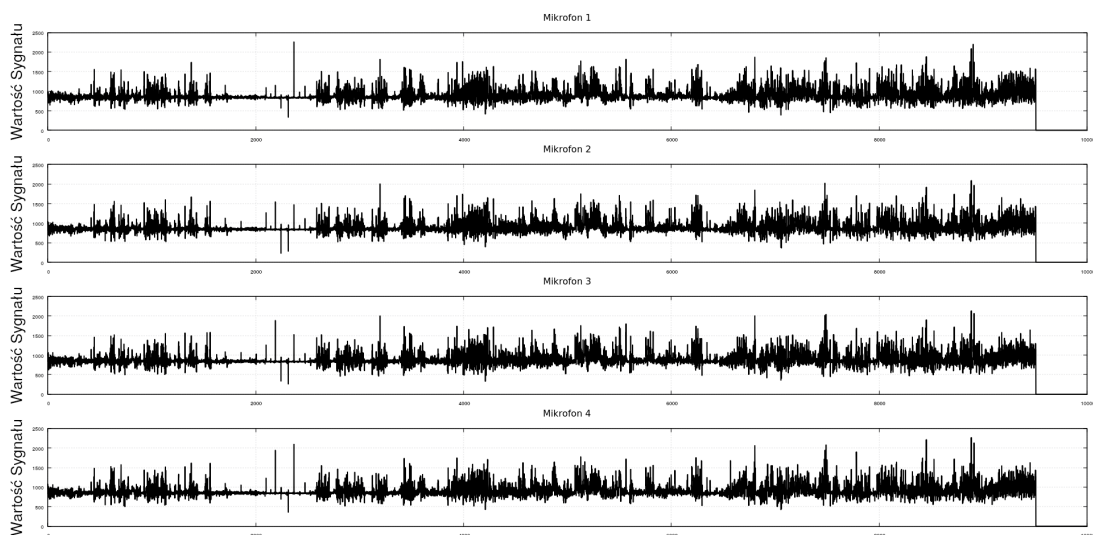
Wynikiem tego testu jest wykres korelacji sygnału, który potwierdza, że zaimplementowany algorytm Sum and Delay Beamforming działa poprawnie, ponieważ maksimum korelacji sygnałów odpowiada kątowi 70 stopni (patrz rys.6.6). [?]



Rysunek 6.6 Wartości korelacji dla sygnałów opóźnionych

6.3 Testy końcowe

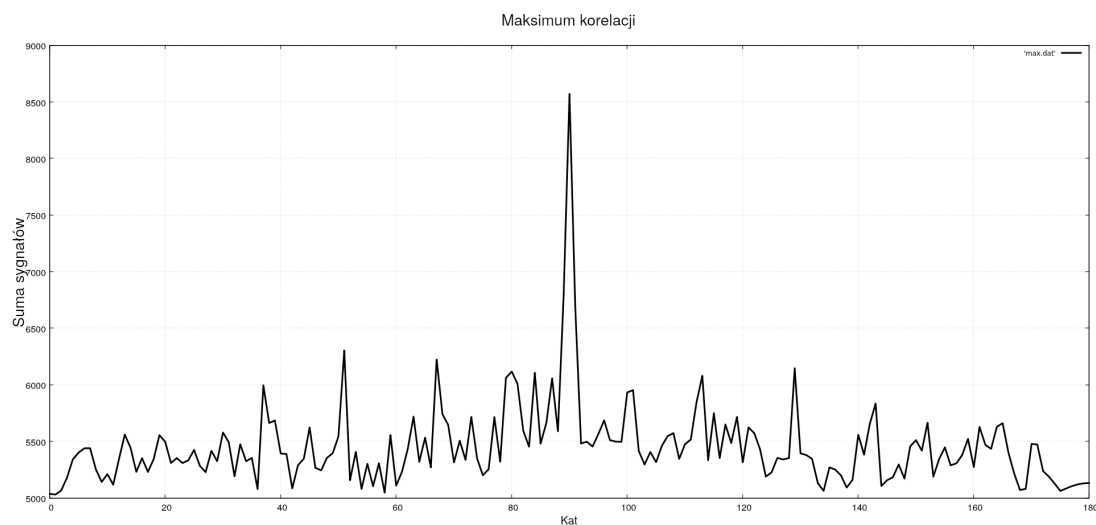
Po przeprowadzeniu testów mikrofonów okazało się, że nawet w momencie kiedy dźwięk został nagrany i odtworzony, wartości sygnału na wyjściu detektorów różniły się od siebie. Z uwagi na ten fakt chcąc zapewnić dokładną powtarzalność testów zdecydowano się na pobranie próbek i zapisanie ich do pliku tekstowego. Sygnał zapisany w pliku przedstawiono na rysunku 6.7. Źródło dźwięku było oddalone o około 15 cm od matrycy



Rysunek 6.7 Sygnał z mikrofonów

mikrofonów i zostało ustawione pod kątem 90 stopni. Dźwiękiem było cykliczne klikanie w klawisz syntezatora odpowiadający nucie C_5 , taki zabieg pozwolił określić częstotliwość

sygnału. Dla nuty C_5 częstotliwość tonu podstawowego wynosi 523.25 Hz, co mieści się w zakresie odbieranym przez mikrofony. Otrzymany w ten sposób wykres korelacji posiada maksimum w punkcie 90 stopni (patrz rys. 6.8). Potwierdza to poprawność działania algorytmu dla danych otrzymywanych bezpośrednio z matrycy czujników.



Rysunek 6.8 Wartości korelacji dla sygnału z mikrofonów

Rozdział 7

Podsumowanie

Bibliografia

- [1] <https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/electronics-lab-envelope-detector>. [dostęp: 2019-11-20].
- [2] <https://www.adafruit.com/product/1713>. [dostęp: 2019-11-20].
- [3] <https://www.sparkfun.com/products/14262>. [dostęp: 2019-11-20].
- [4] M. PAPEZ, K. VLCEK. Acoustic source localization based on beamforming. *Recent Advances in Systems Science*, strony 259–264, 2013.
- [5] M. L. Seltzer. Microphone array processing for robust speech recognition. *CMU, Pittsburgh PA, PhD Thesis*, 2003.