

Zadanie nr 3 - Splot, filtracja i korelacja sygnałów

Cyfrowe Przetwarzanie Sygnałów

Dominik Gałkowski, 247659 Jan Śladowski, 247806

20.05.2025

1 Cel zadania

Celem zadania jest zapoznanie się z operacjami splotu dyskretnego i korelacji dyskretniej, zaimplementowaniu tych operacji oraz wykorzystaniu ich przy tworzeniu i zapoznawaniu się z filtrami o skończonej odpowiedzi impulsowej.

2 Wstęp teoretyczny

Jest to usprawniony program z zadania 1 oraz 2, dostosowany do instrukcji z zadania trzeciego [1].

Zadanie polegało na zaimplementowaniu algorytmu, który umożliwi projektowanie filtrów dolnoprzepustowych żądanej liczbie współczynników żądanej częstotliwości obcięcia z wykorzystaniem okien:

- (O1) okno Hamminga,
- (O2) okno Hanninga,
- (O3) okno Blackmana,
- (O4) okno prostokątne,

Ponadto, w ramach realizacji ćwiczenia należało zaprojektować filtr z możliwością wyboru funkcji okna i parametrów filtra jak wyżej:

- (F1) pasmowoprzepustowy,
- (F2) górnoprzepustowy,

Należało także zaimplementować operacje filtracji podstawiając odpowiedź impulsowa filtra do wzoru na splot, zademonstrować efekt filtracji na arbitralnie wybranych sygnałach testowych. Ponadto, wymagana jest implementacja operacji korelacji dla dowolnych dwóch sygnałów dyskretnych o arbitralnie podanych ilościach próbek wzbogacone o dwa obligatoryjne warianty:

- implementacje bezpośrednia,
- implementacje z użyciem splotu,

Celem części zadania związanej z zastosowaniem analizy korelacyjnej (pomiaru długości) była symulacja działania korelacyjnego czujnika odległości.

3 Materiały i metody

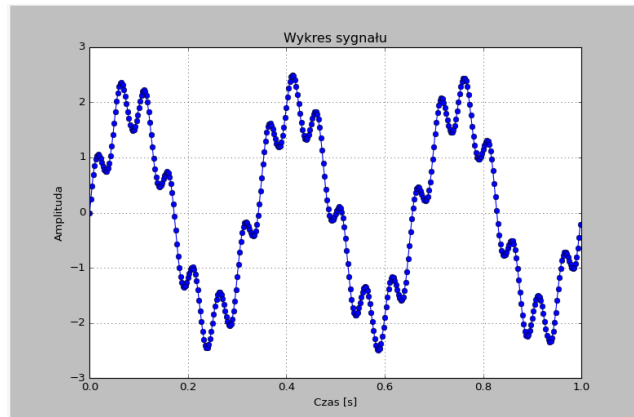
3.1 Splot i korelacja sygnałów dyskretnych

Pojedynczy eksperyment składał się z kilku kroków. Najpierw wygenerowano wybrane sygnały ciągłe (wykorzystano funkcję \sin , kwadratową i trójkątną), następnie spróbowano je z ustaloną częstotliwością i na wynikach próbkowania przeprowadzono operację splotu lub korelacji.

3.2 Filtracja sygnałów dyskretnych

W każdym eksperymencie mającym na celu prezentację procesu filtrowania wykorzystany został inny filtr, który uprzednio wygenerowano wykorzystując wybrane parametry. Sygnał filtrowany natomiast wykorzystano ten sam, dla wszystkich eksperymentów. Jest to suma dwóch sygnałów sinusoidalnych s_1 i s_2 o następujących parametrach:

- częstotliwość $f_{s_1} = 3Hz$
- amplituda $A_{s_1} = 2$
- częstotliwość $f_{s_2} = 20Hz$
- amplituda $A_{s_2} = 0.5$
- czas trwania $1s$
- częstotliwość próbkowania $f_s = 400Hz$



Rysunek 1: Sygnał filtrowany

Każdorazowo po wygenerowaniu filtru obliczony został jego spłot z sygnałem filtrowanym. Dla każdego eksperymentu zaprezentowano parametry i typ generowanego filtru, sam filtr oraz wynik spłotu.

3.3 Wykorzystanie analizy korelacyjnej do pomiaru odległości

W przypadku wykorzystania analizy korelacyjnej do pomiaru odległości wykorzystano niezależną funkcjonalność aplikacji, jaką jest symulator korelacyjnego czujnika odległości. Każdy eksperyment wykonany został poprzez jednokrotne uruchomienie symulatora. Udokumentowane zostały parametry wejściowe i parametry wyjściowe z kilku chwil czasu. Wykorzystane zostały następujące oznaczenia parametrów wejściowych:

- $V_s[m/s]$ - prędkość sygnału w ośrodku
- $V_p[m/s]$ - prędkość przedmiotu

- $T_s[s]$ - okres sygnału sondującego
- $f_s[Hz]$ - częstotliwość próbkowania czujnika odległości
- l - długość bufora czujnika odległości

Okres raportowania dla wszystkich ekspeymentów wynosi 0.5s, natomiast jednostka czasowa wynosi 0.1s.

Wykorzystane zostały następujące oznaczenia parametrów wyjściowych:

- $t[s]$ - chwila czasu
- $d_r[m]$ - odległość rzeczywista do przedmiotu
- $d_m[s]$ - odległość obliczona przez czujnik odległości

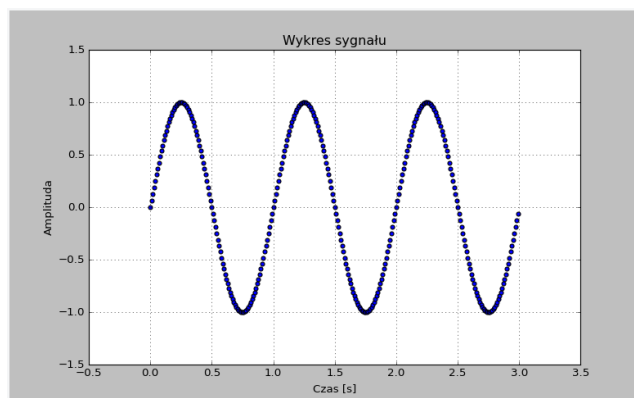
4 Eksperymenty i wyniki

4.1 Splot i korelacja sygnałów dyskretnych

4.1.1 Splot sygnałów sinusoidalnych

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	0s	3s	1	100

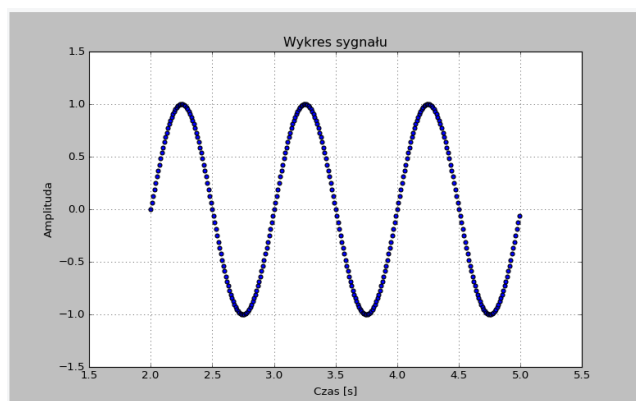
Tabela 1: Parametry wejściowe dla sygnału nr 1



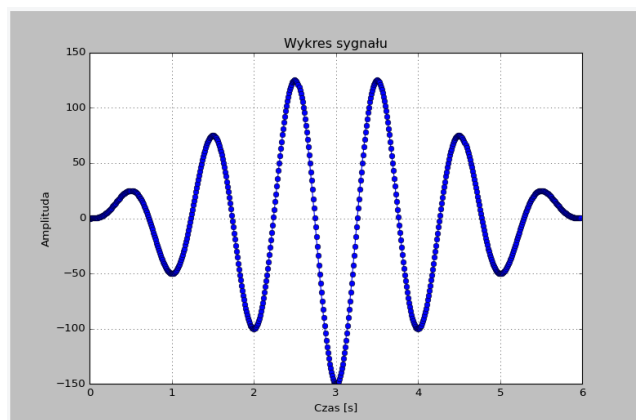
Rysunek 2: Wykres sygnału numer 1

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	2s	3s	1	100

Tabela 2: Parametry wejściowe dla sygnału nr 2



Rysunek 3: Wykres sygnału numer 2

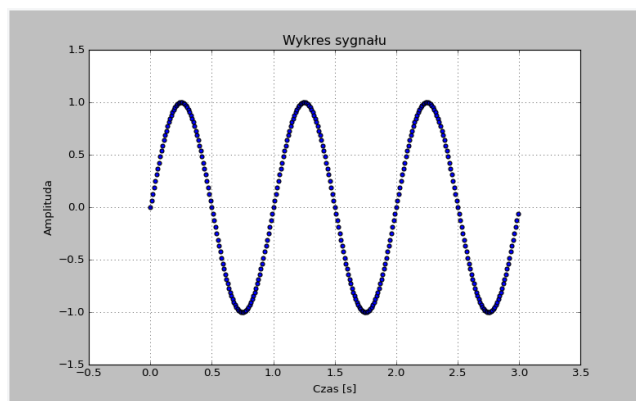


Rysunek 4: Wykres sygnału po operacji splotu

4.1.2 Splot sygnałów sinusoidalnego oraz sinusoidalnego wyprostowanego jednopółkowo

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	0s	3s	1	100

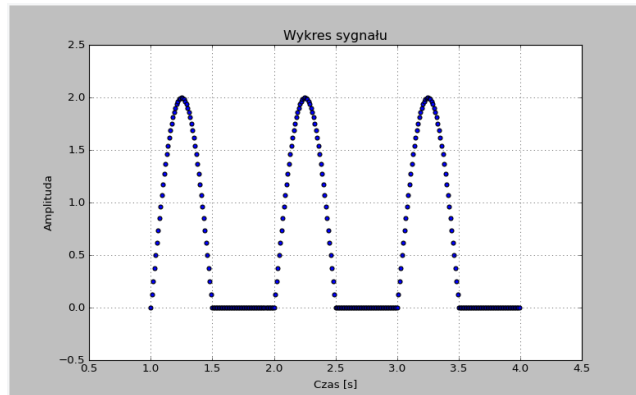
Tabela 3: Parametry wejściowe dla sygnału nr 1



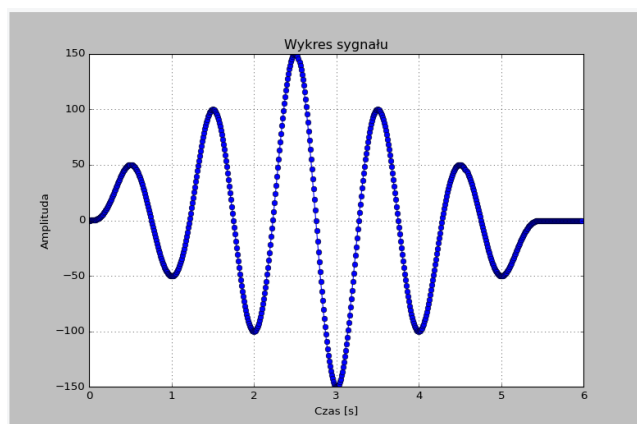
Rysunek 5: Wykres sygnału numer 1

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
2	1s	3s	1	100

Tabela 4: Parametry wejściowe dla sygnału nr 2



Rysunek 6: Wykres sygnału numer 2

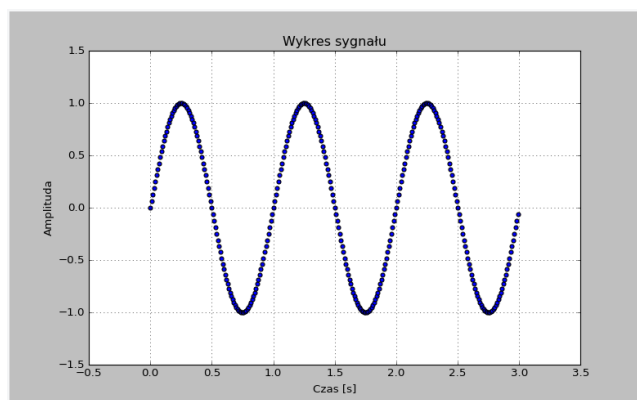


Rysunek 7: Wykres sygnału po operacji splotu

4.1.3 Splot sygnałów sinusoidalnego oraz trójkątnego

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	0s	3s	1	100

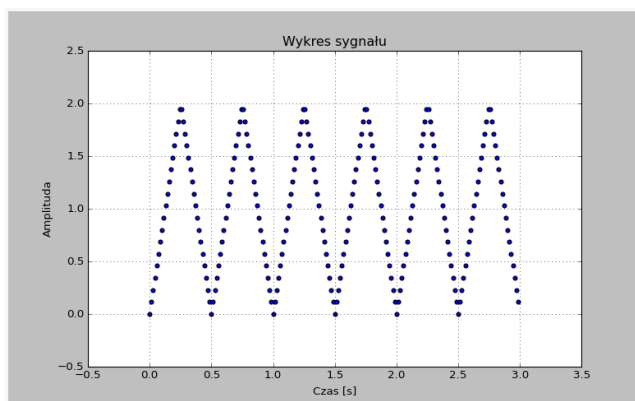
Tabela 5: Parametry wejściowe dla sygnału nr 1



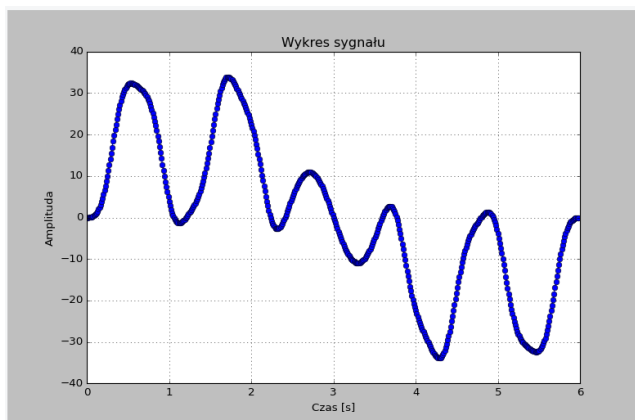
Rysunek 8: Wykres sygnału numer 1

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Współczynnik wypełnienia	Częstotliwość próbkowania
2	0s	3s	0.5	0.5	70

Tabela 6: Parametry wejściowe dla sygnału nr 2



Rysunek 9: Wykres sygnału numer 2

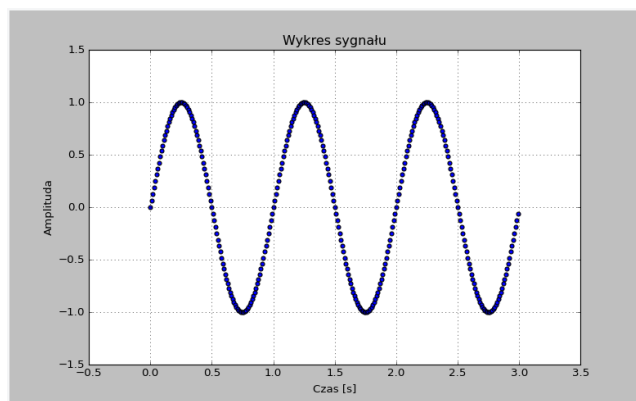


Rysunek 10: Wykres sygnału po operacji splotu

4.1.4 Korelacja bezpośrednia sygnałów sinusoidalnych

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	0s	3s	1	100

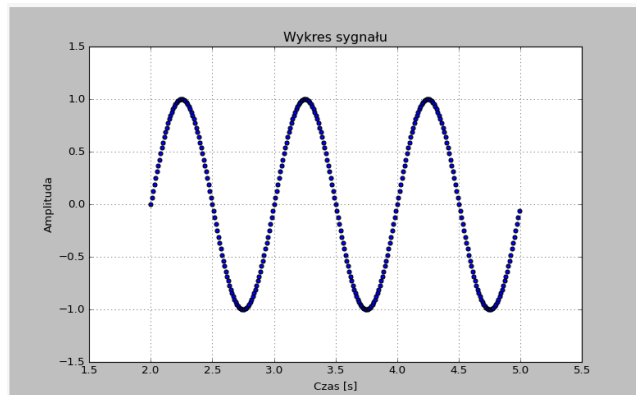
Tabela 7: Parametry wejściowe dla sygnału nr 1



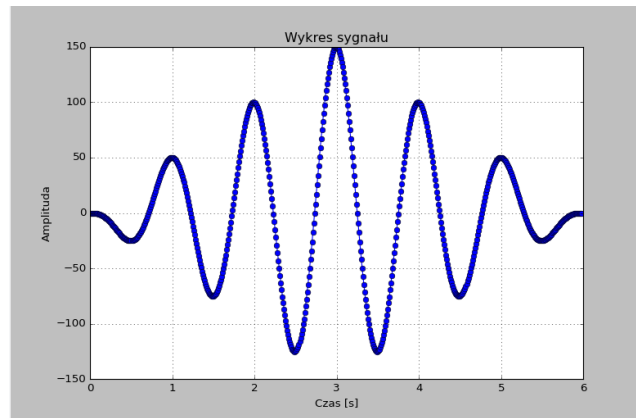
Rysunek 11: Wykres sygnału numer 1

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	2s	3s	1	100

Tabela 8: Parametry wejściowe dla sygnału nr 2



Rysunek 12: Wykres sygnału numer 2

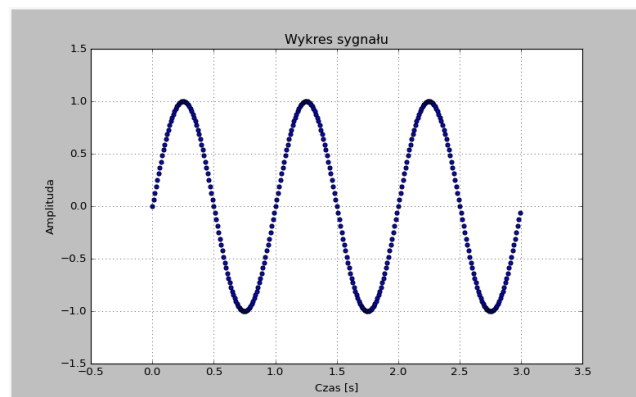


Rysunek 13: Wykres sygnału po operacji korelacji

4.1.5 Korelacja bezpośrednia sinusoidalnego oraz sinusoidalnego wyprostowanego jednopółkowo

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	0s	3s	1	100

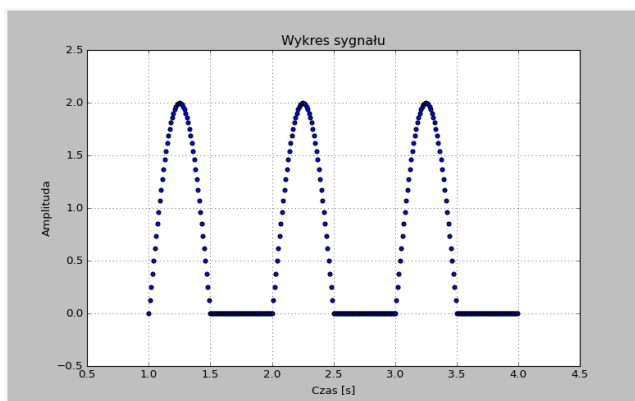
Tabela 9: Parametry wejściowe dla sygnału nr 1



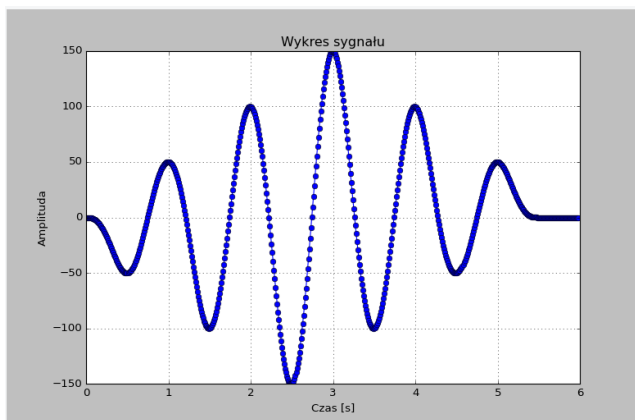
Rysunek 14: Wykres sygnału numer 1

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
2	1s	3s	1	100

Tabela 10: Parametry wejściowe dla sygnału nr 2



Rysunek 15: Wykres sygnału numer 2

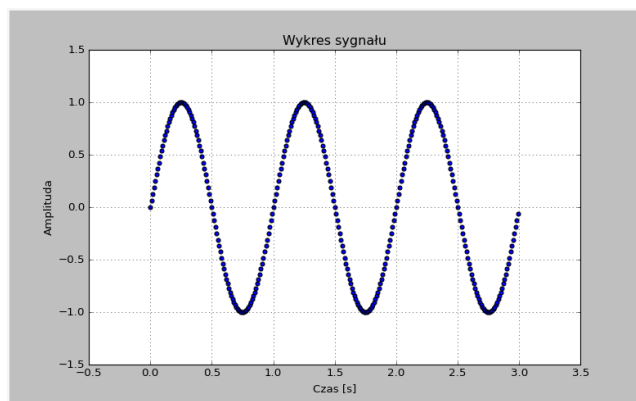


Rysunek 16: Wykres sygnału po operacji korelacji

4.1.6 Korelacja bezpośrednia sygnałów sinusoidalnego oraz trójkątnego

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	0s	3s	1	100

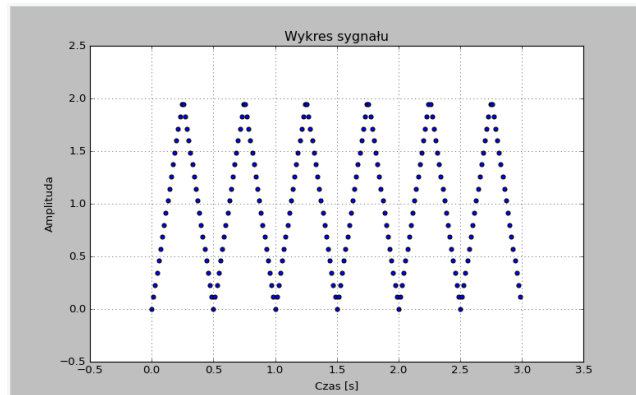
Tabela 11: Parametry wejściowe dla sygnału nr 1



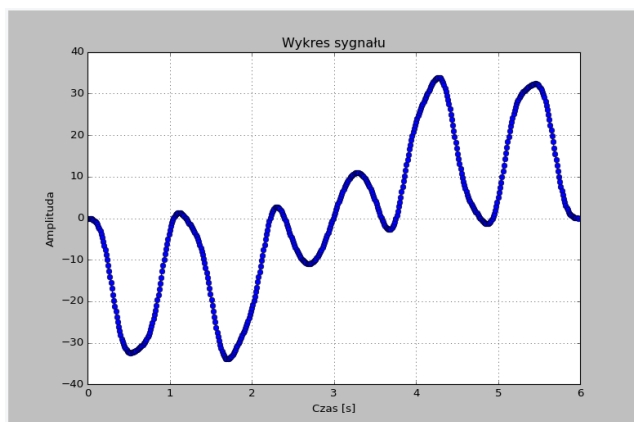
Rysunek 17: Wykres sygnału numer 1

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Współczynnik wypełnienia	Częstotliwość próbkowania
2	0s	3s	0.5	0.5	70

Tabela 12: Parametry wejściowe dla sygnału nr 2



Rysunek 18: Wykres sygnału numer 2

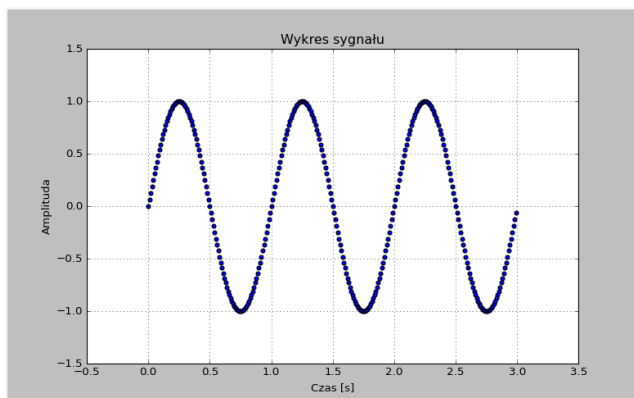


Rysunek 19: Wykres sygnału po operacji korelacji

4.1.7 Korelacja z użyciem splotu sygnałów sinusoidalnych

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	0s	3s	1	100

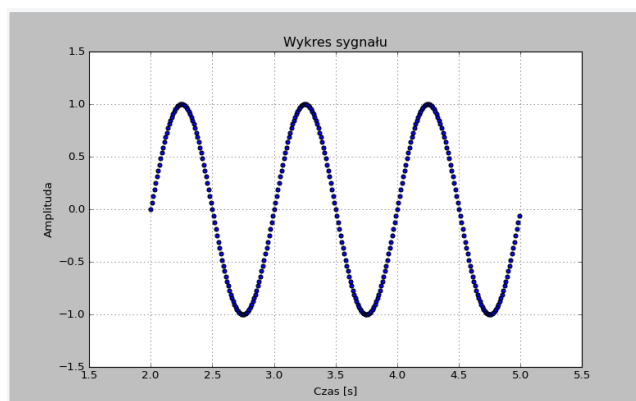
Tabela 13: Parametry wejściowe dla sygnału nr 1



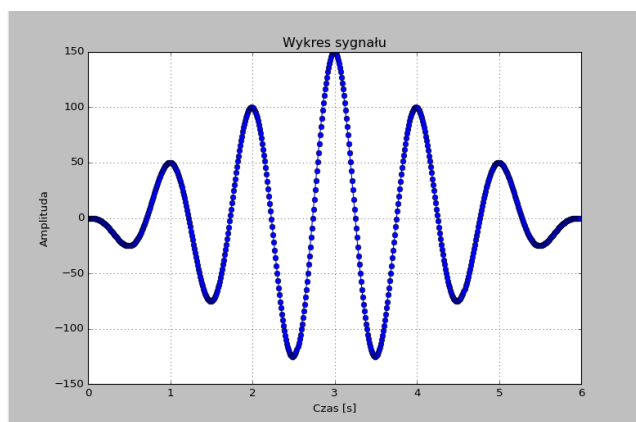
Rysunek 20: Wykres sygnału numer 1

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	2s	3s	1	100

Tabela 14: Parametry wejściowe dla sygnału nr 2



Rysunek 21: Wykres sygnału numer 2

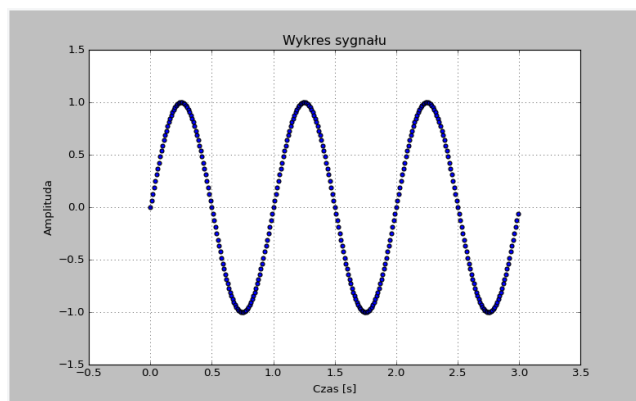


Rysunek 22: Wykres sygnału po operacji korelacji

4.1.8 Korelacja z użyciem splotu sinsoidalnego oraz sinusoidalnego wyprostowanego jednopółkowo

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	0s	3s	1	100

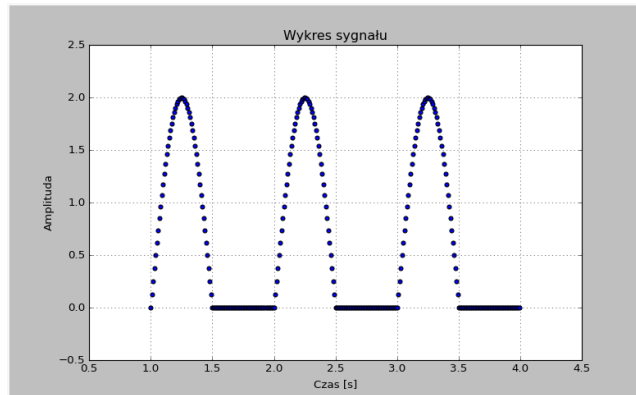
Tabela 15: Parametry wejściowe dla sygnału nr 1



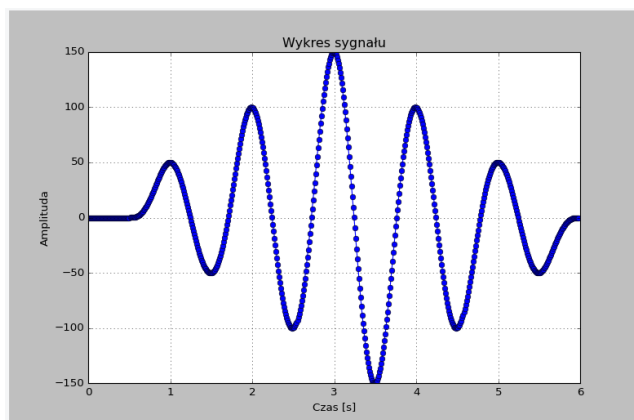
Rysunek 23: Wykres sygnału numer 1

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
2	1s	3s	1	100

Tabela 16: Parametry wejściowe dla sygnału nr 2



Rysunek 24: Wykres sygnału numer 2

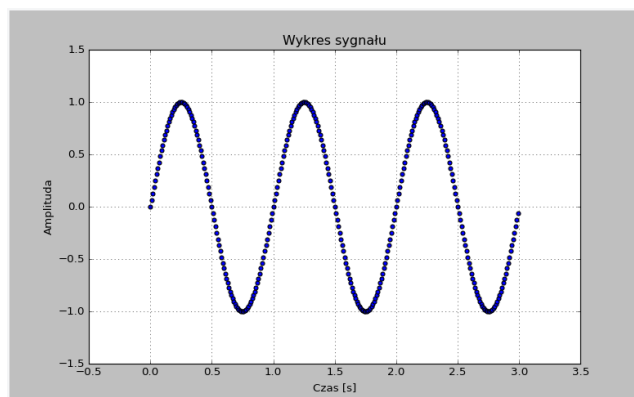


Rysunek 25: Wykres sygnału po operacji korelacji

4.1.9 Korelacja z użyciem splotu sygnałów sinusoidalnego oraz trójkątnego

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Częstotliwość próbkowania
1	0s	3s	1	100

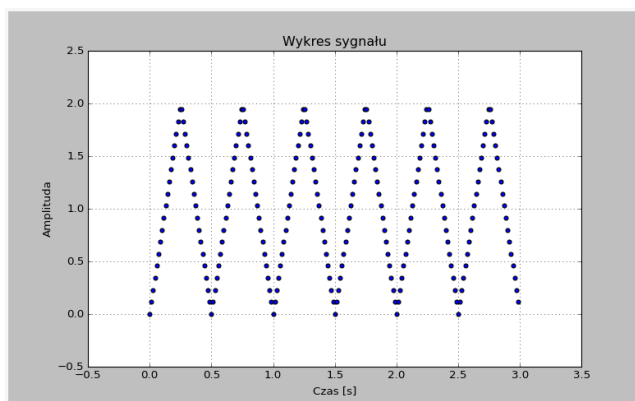
Tabela 17: Parametry wejściowe dla sygnału nr 1



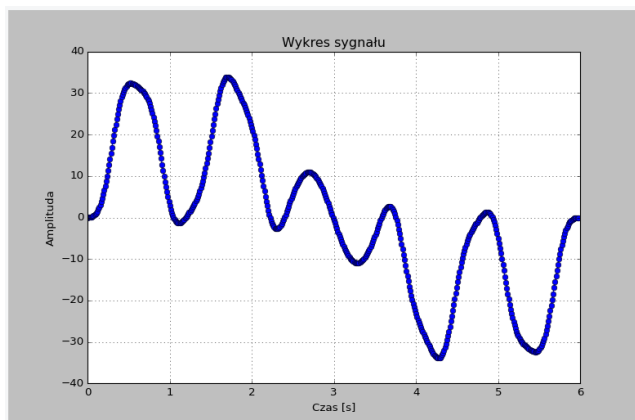
Rysunek 26: Wykres sygnału numer 1

Amplituda	Czas początkowy	Czas trwania sygnału	Okres podstawowy	Współczynnik wypełnienia	Częstotliwość próbkowania
2	0s	3s	0.5	0.5	70

Tabela 18: Parametry wejściowe dla sygnału nr 2



Rysunek 27: Wykres sygnału numer 2



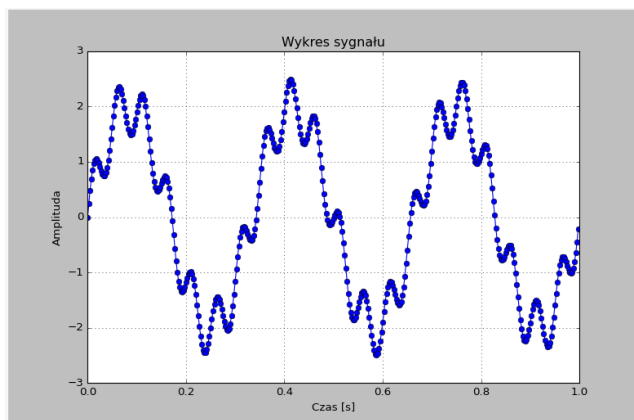
Rysunek 28: Wykres sygnału po operacji korelacji

4.2 Filtracja sygnałów dyskretnych

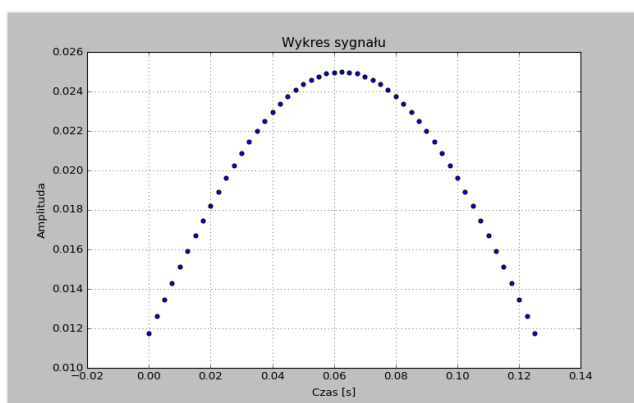
4.2.1 Eksperyment 1

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odcięcia	Typ okna
Dolnoprzepustowy	51	5	rectangular

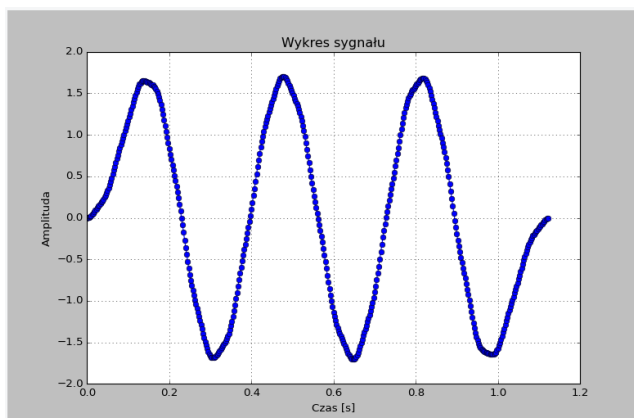
Tabela 19: Parametry filtra



Rysunek 29: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 30: Wykres filtra

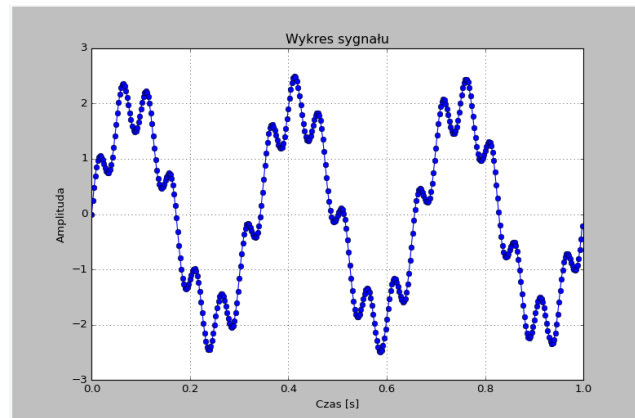


Rysunek 31: Wykres sygnału po filtracji

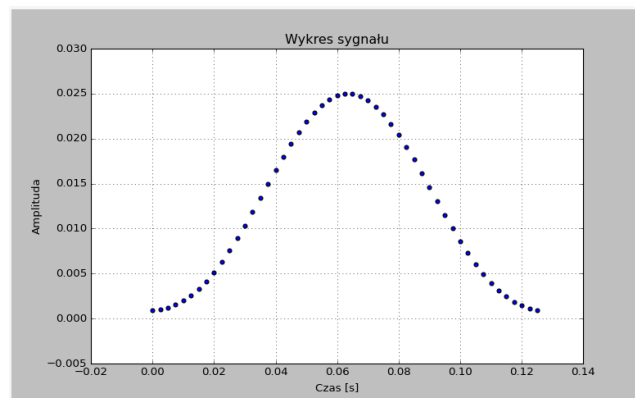
4.2.2 Eksperyment 2

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odciecia	Typ okna
Dolnoprzepustowy	51	5	hamming

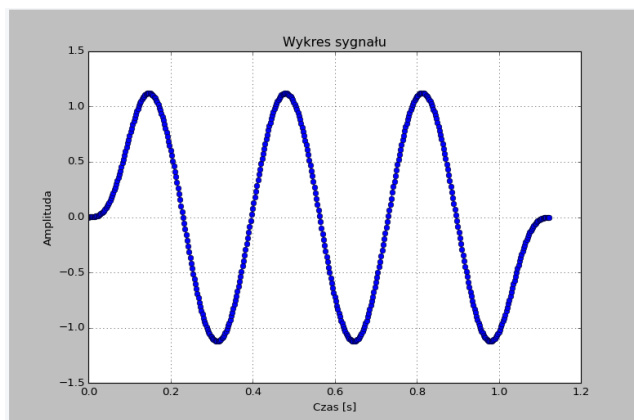
Tabela 20: Parametry filtra



Rysunek 32: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 33: Wykres filtra

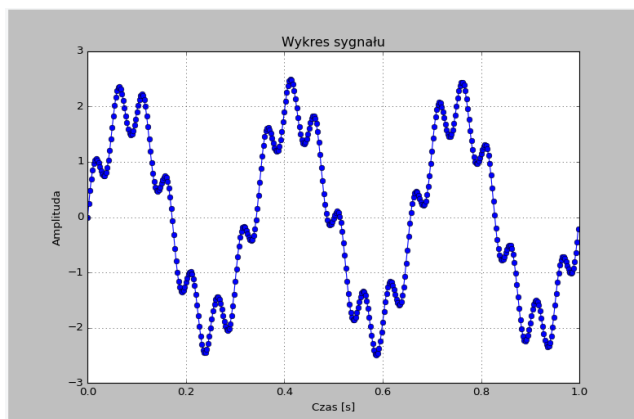


Rysunek 34: Wykres sygnału po filtracji

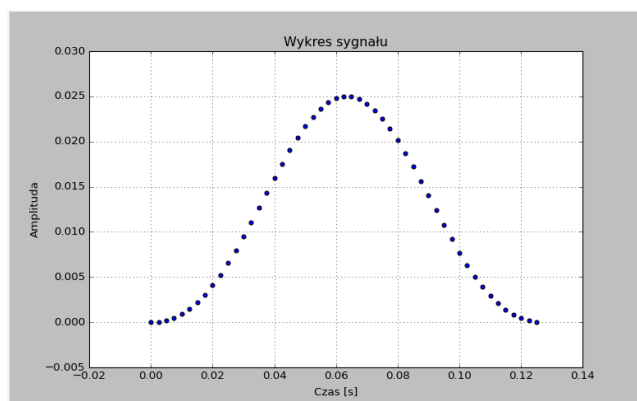
4.2.3 Eksperyment 3

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odciecia	Typ okna
Dolnoprzepustowy	51	5	hanning

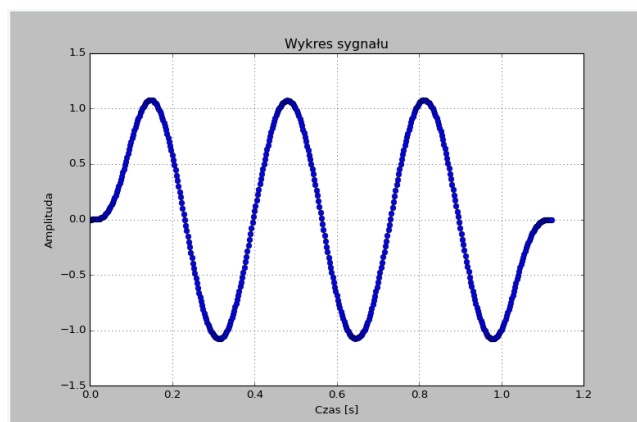
Tabela 21: Parametry filtra



Rysunek 35: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 36: Wykres filtra

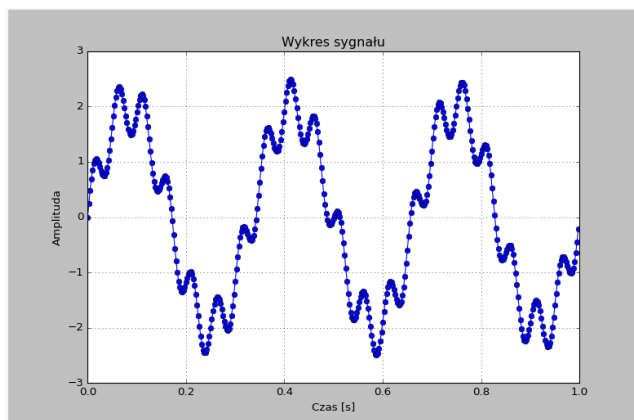


Rysunek 37: Wykres sygnału po filtracji

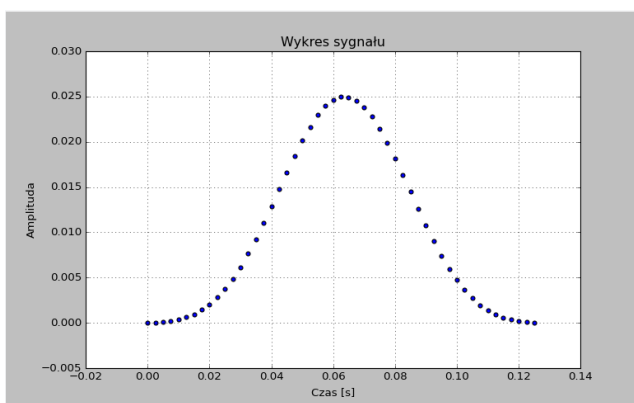
4.2.4 Eksperyment 4

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odcięcia	Typ okna
Dolnoprzepustowy	51	5	blackman

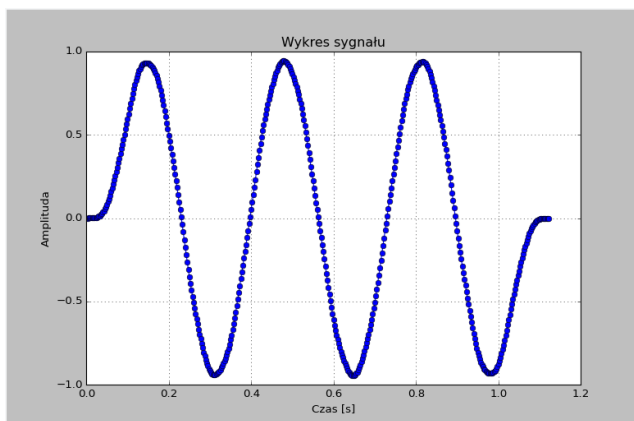
Tabela 22: Parametry filtra



Rysunek 38: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 39: Wykres filtra

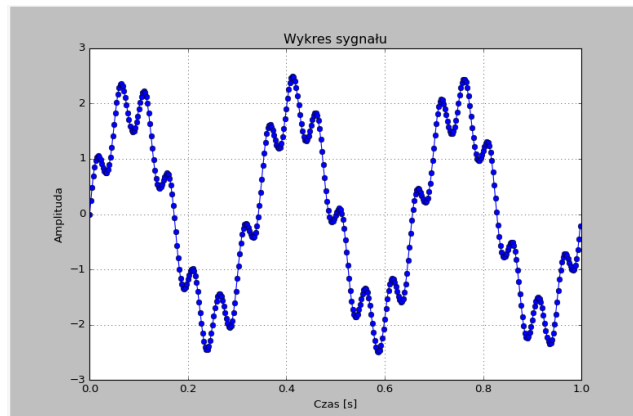


Rysunek 40: Wykres sygnału po filtracji

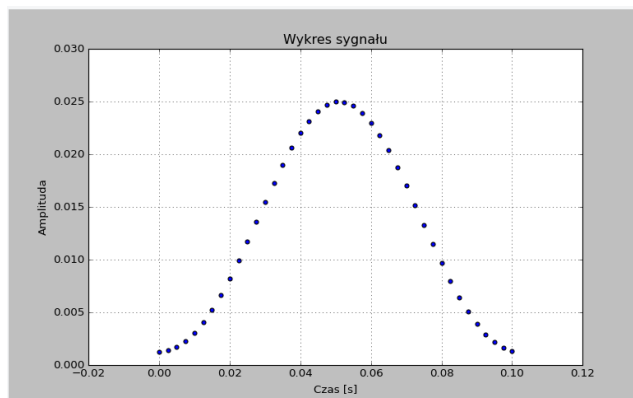
4.2.5 Eksperyment 5

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odciecia	Typ okna
Dolnoprzepustowy	41	5	hamming

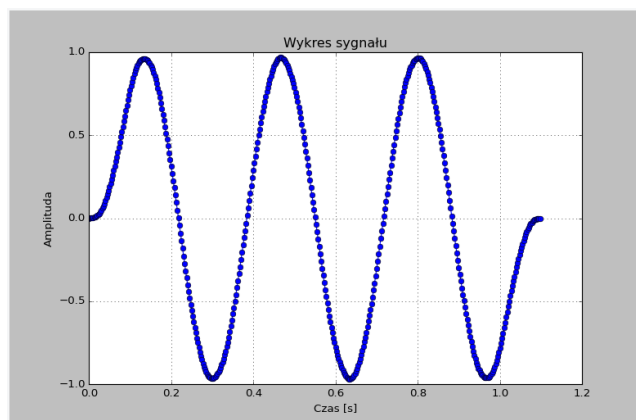
Tabela 23: Parametry filtra



Rysunek 41: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 42: Wykres filtra

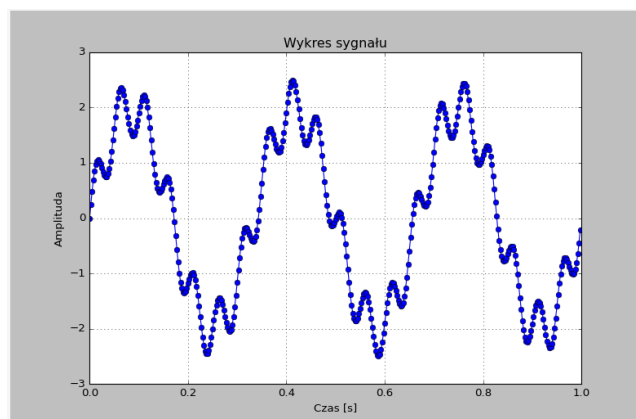


Rysunek 43: Wykres sygnału po filtracji

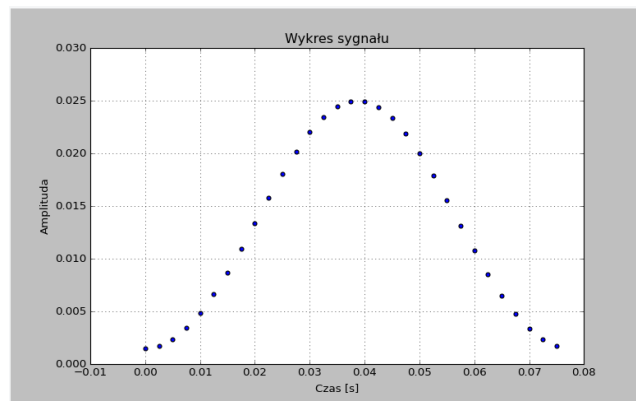
4.2.6 Eksperyment 6

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odcięcia	Typ okna
Dolnoprzepustowy	31	5	hamming

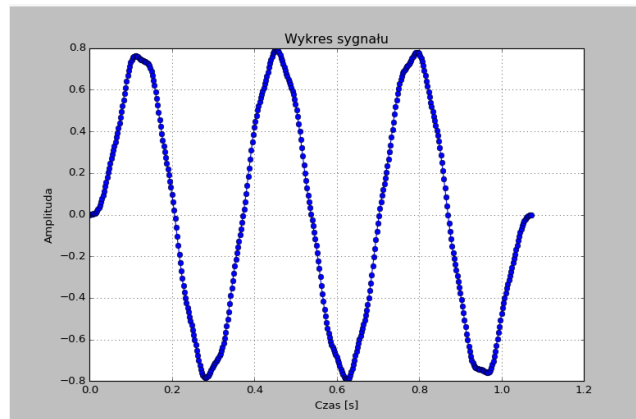
Tabela 24: Parametry filtra



Rysunek 44: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 45: Wykres filtra

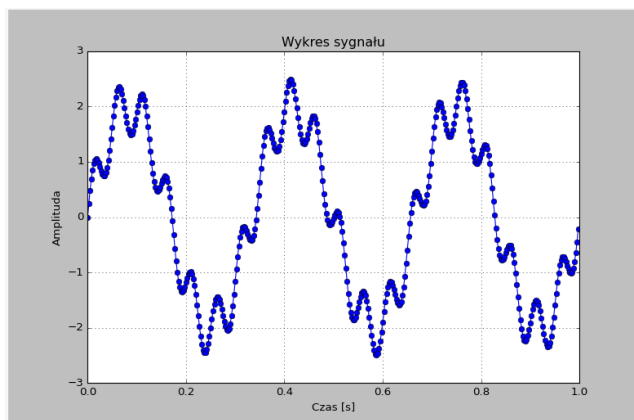


Rysunek 46: Wykres sygnału po filtracji

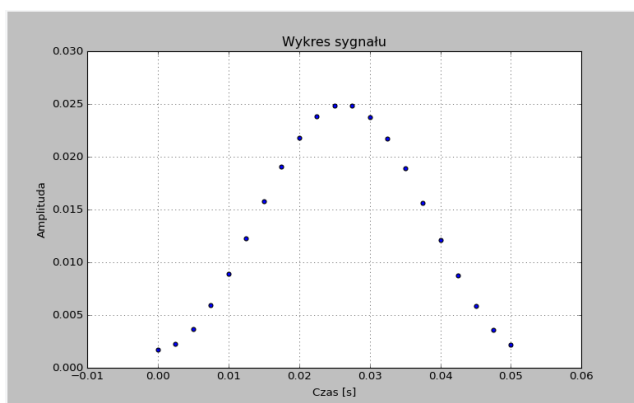
4.2.7 Eksperyment 7

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odciecia	Typ okna
Dolnoprzepustowy	21	5	hamming

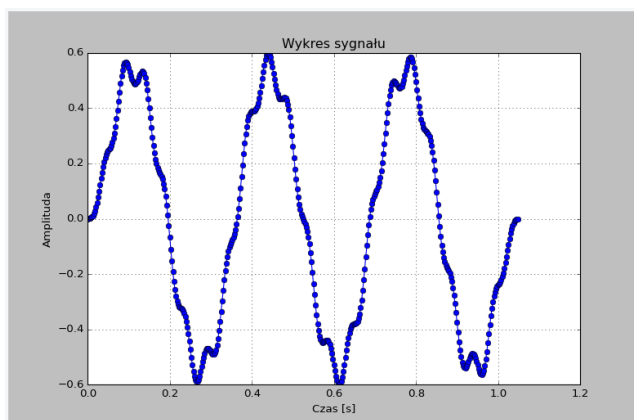
Tabela 25: Parametry filtra



Rysunek 47: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 48: Wykres filtra

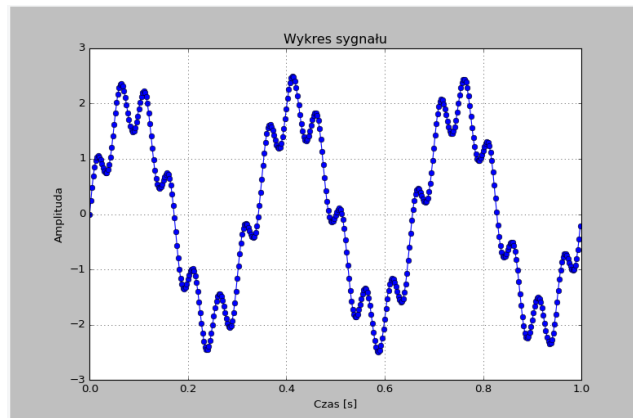


Rysunek 49: Wykres sygnału po filtracji

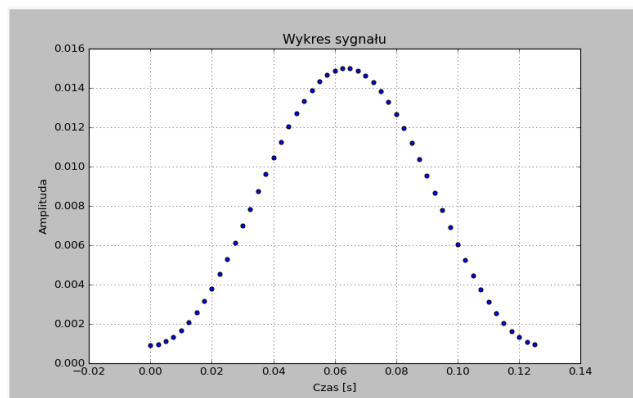
4.2.8 Eksperyment 8

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odciecia	Typ okna
Dolnoprzepustowy	51	3	hamming

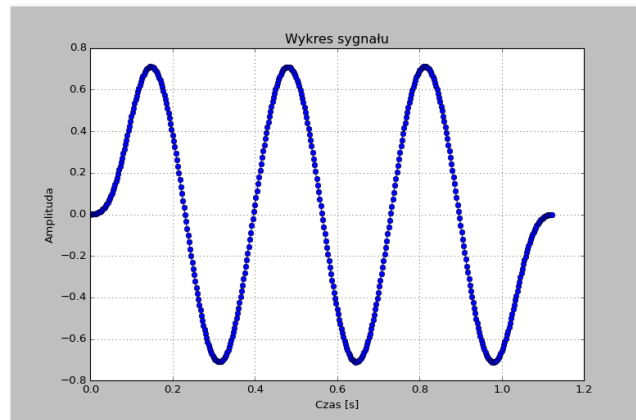
Tabela 26: Parametry filtra



Rysunek 50: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 51: Wykres filtra

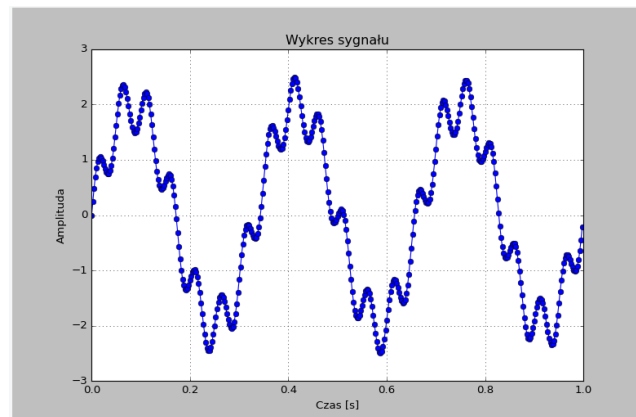


Rysunek 52: Wykres sygnału po filtracji

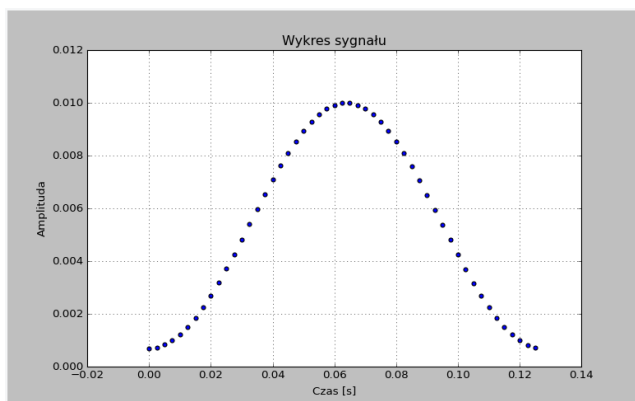
4.2.9 Eksperyment 9

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odciecia	Typ okna
Dolnoprzepustowy	51	2	hamming

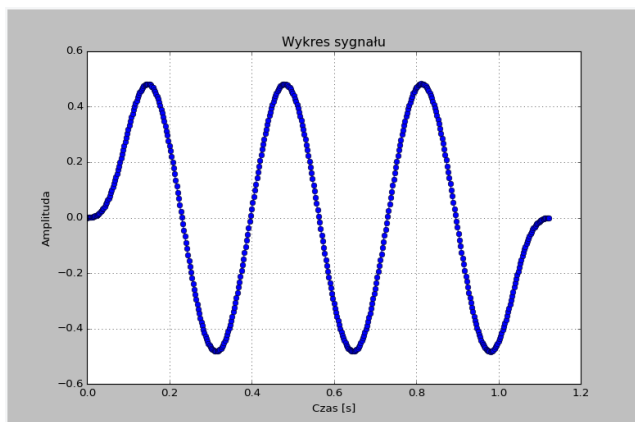
Tabela 27: Parametry filtra



Rysunek 53: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 54: Wykres filtra

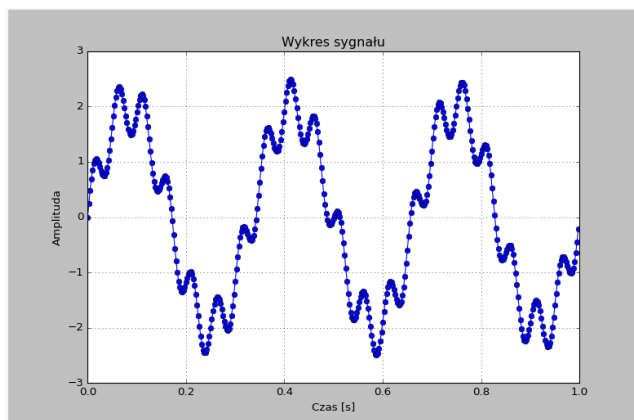


Rysunek 55: Wykres sygnału po filtracji

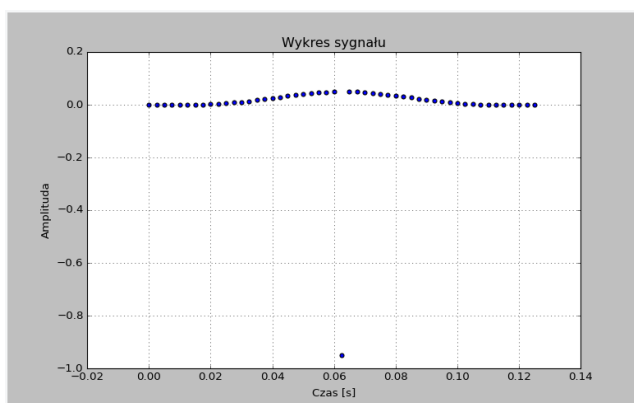
4.2.10 Eksperyment 10

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odcięcia	Typ okna
Górnoprzepustowy	51	190	hamming

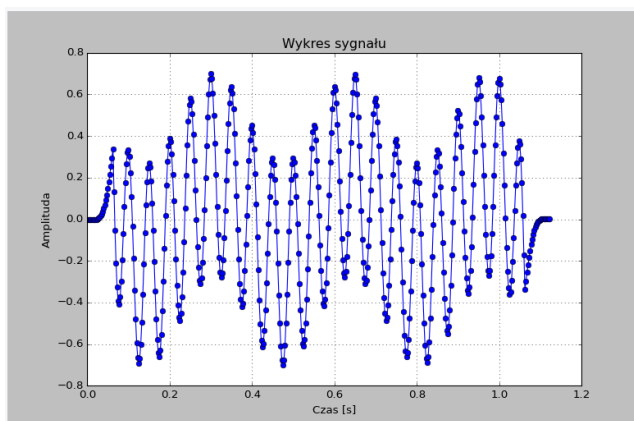
Tabela 28: Parametry filtra



Rysunek 56: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 57: Wykres filtra

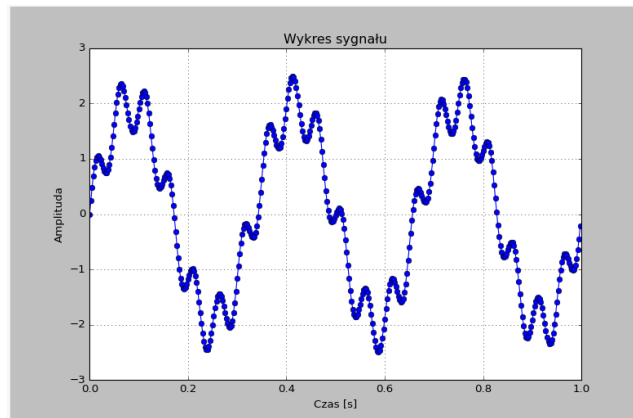


Rysunek 58: Wykres sygnału po filtracji

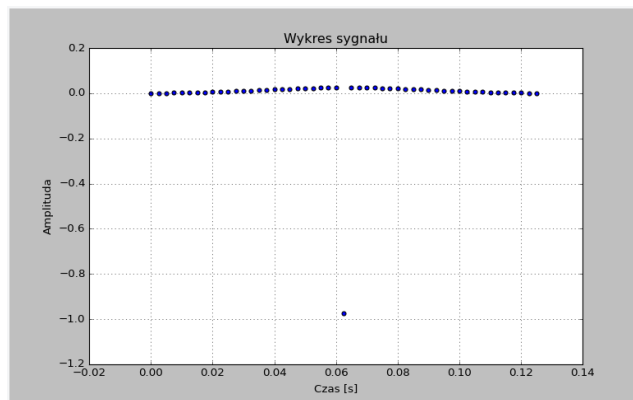
4.2.11 Eksperyment 11

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odcięcia	Typ okna
Górnoprzepustowy	51	195	hamming

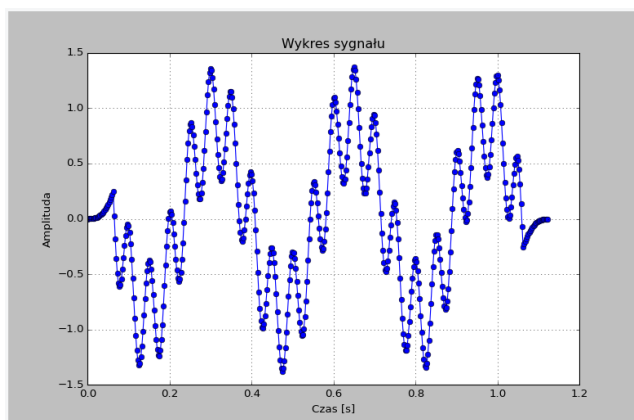
Tabela 29: Parametry filtra



Rysunek 59: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 60: Wykres filtra

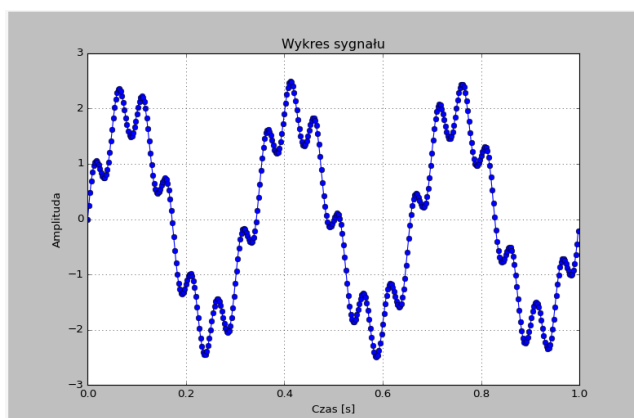


Rysunek 61: Wykres sygnału po filtracji

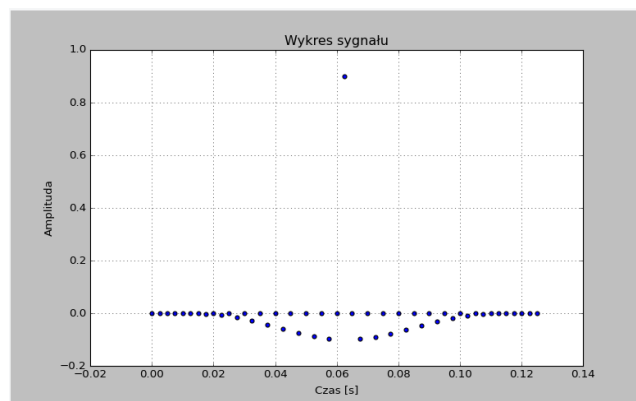
4.2.12 Eksperyment 12

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odciecia	Typ okna
Pasmowy	51	90	hamming

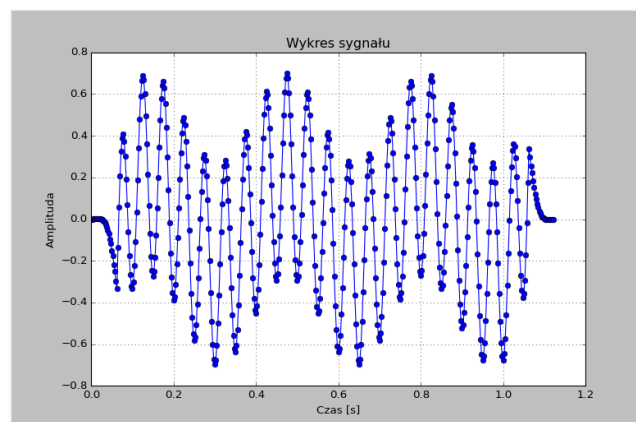
Tabela 30: Parametry filtra



Rysunek 62: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 63: Wykres filtra

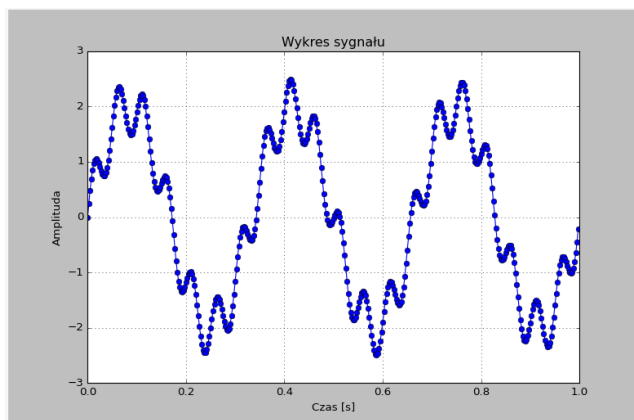


Rysunek 64: Wykres sygnału po filtracji

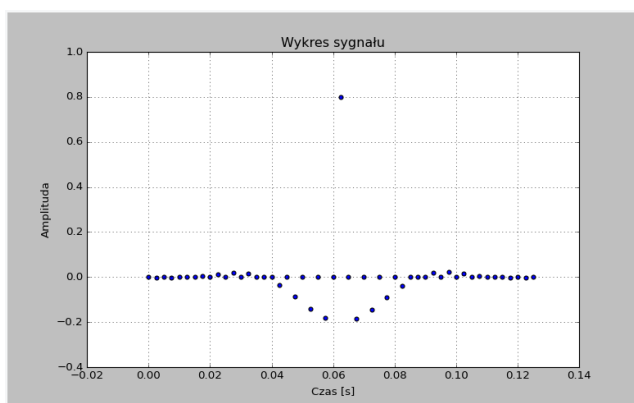
4.2.13 Eksperyment 13

Typ filtra	Rząd filtra	Częstotliwość odciecia	Typ okna
Pasmowy	51	80	hamming

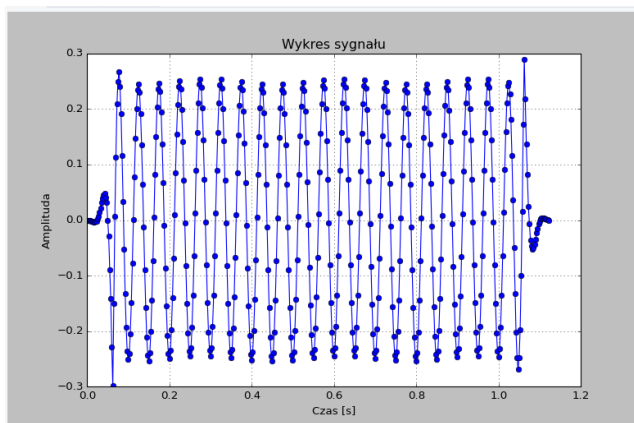
Tabela 31: Parametry filtra



Rysunek 65: Wykres sygnału przed filtracją



Rysunek 66: Wykres filtra



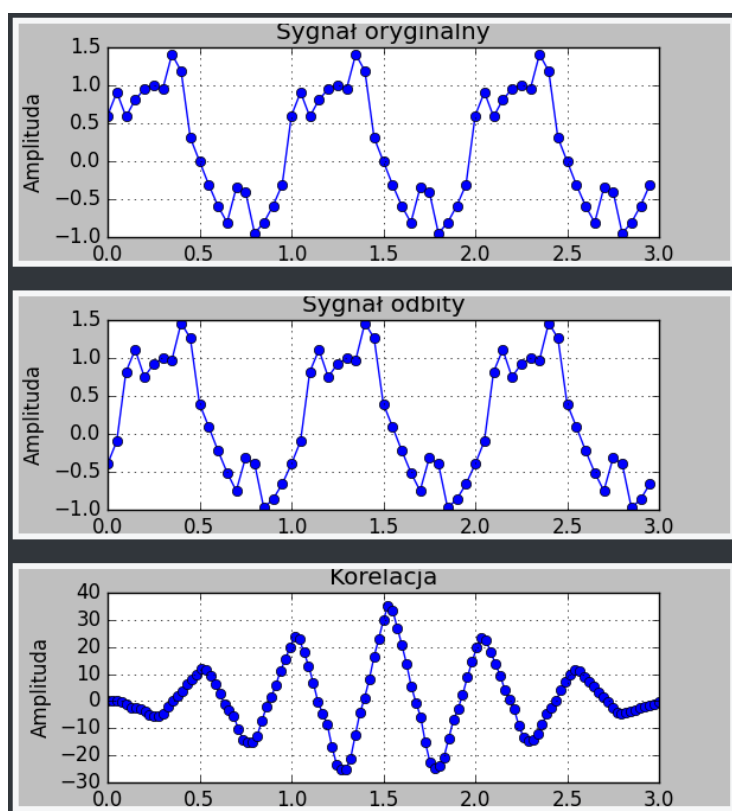
Rysunek 67: Wykres sygnału po filtracji

4.3 Wykorzystanie analizy korelacyjnej do pomiaru odległości

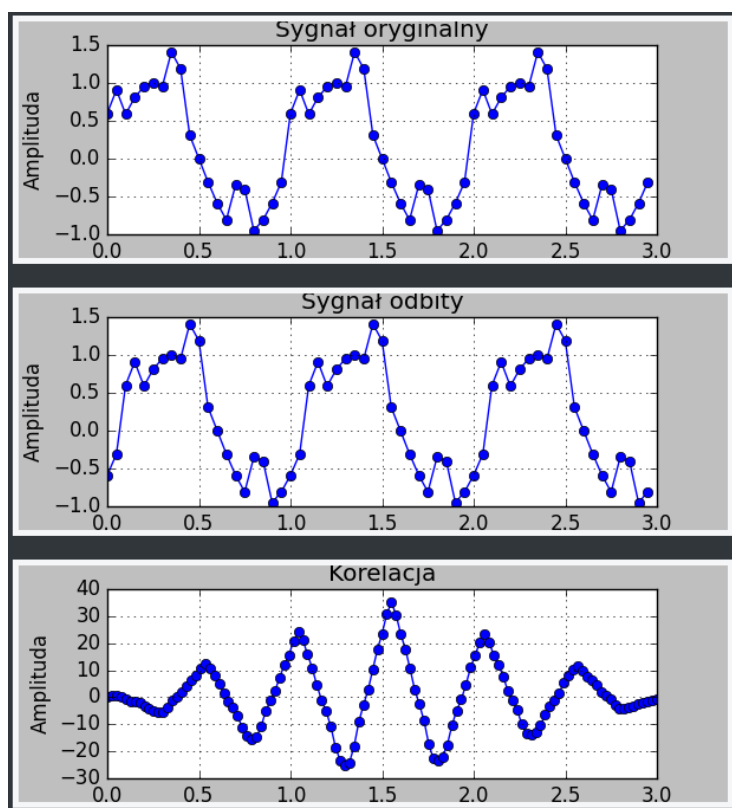
4.3.1 Eksperyment 1

$V_s[m/s]$	$V_p[m/s]$	$T_s[s]$	$f_s[Hz]$	l
100	0.5	1	20	60

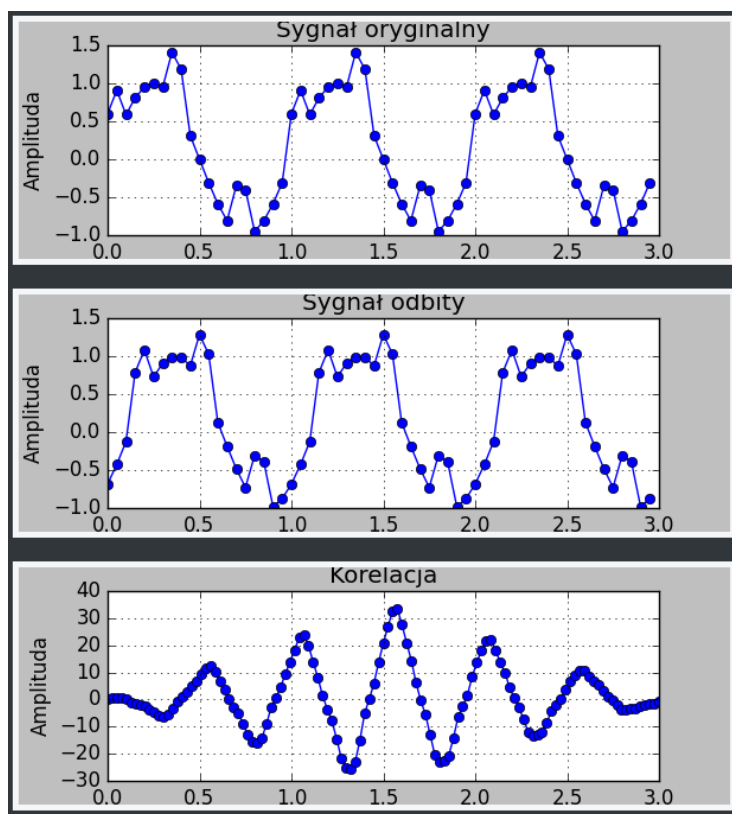
Tabela 32: Parametry wejściowe symulatora



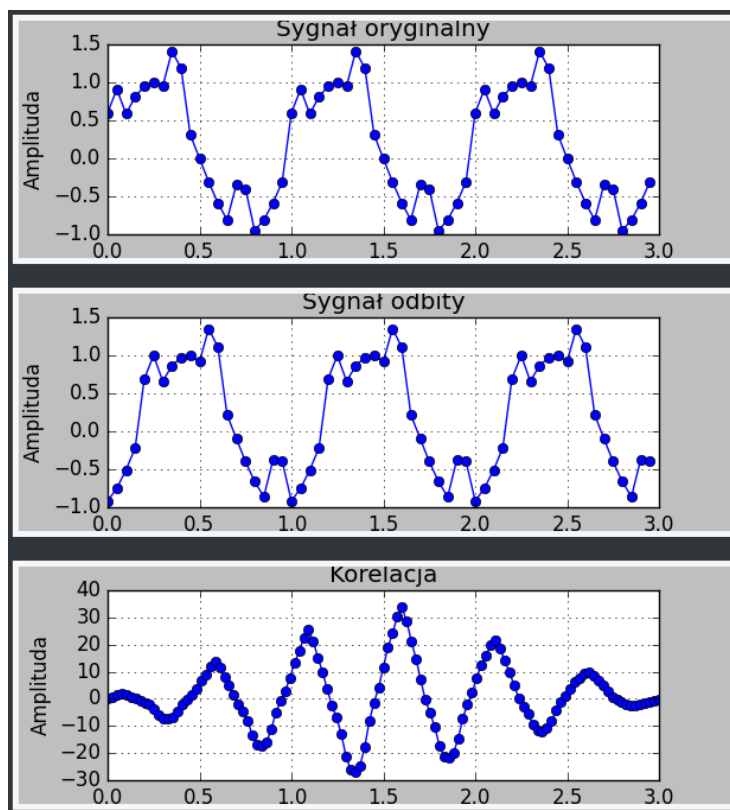
Rysunek 68: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 6.5



Rysunek 69: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 10



Rysunek 70: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 12



Rysunek 71: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 18.5

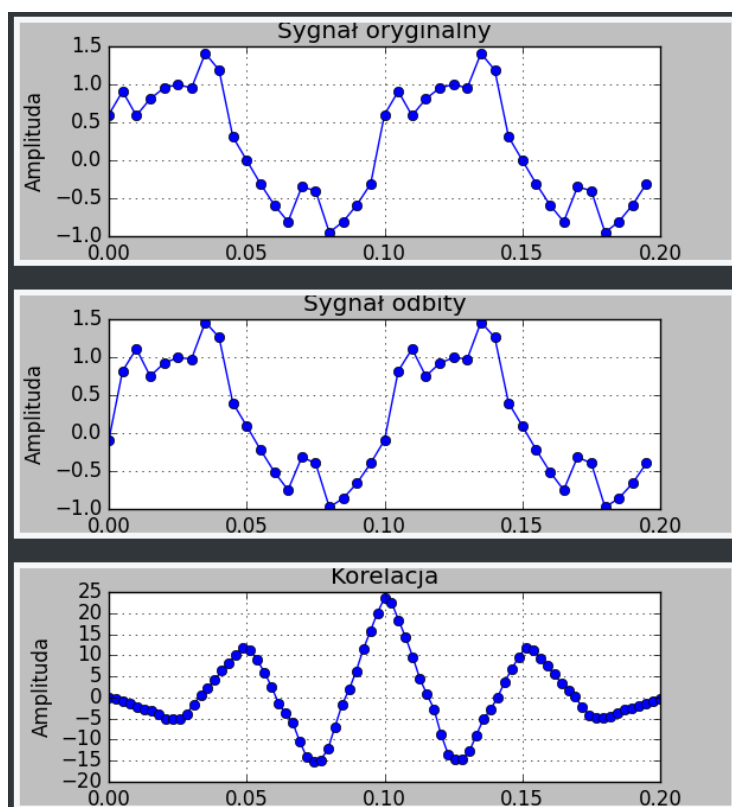
$t[s]$	$d_r[m]$	$d_m[m]$
06.50	3.250	2.500
10.00	5.000	5.000
12.00	6.000	7.500
18.50	9.250	10.000

Tabela 33: Wyniki działania symulatora

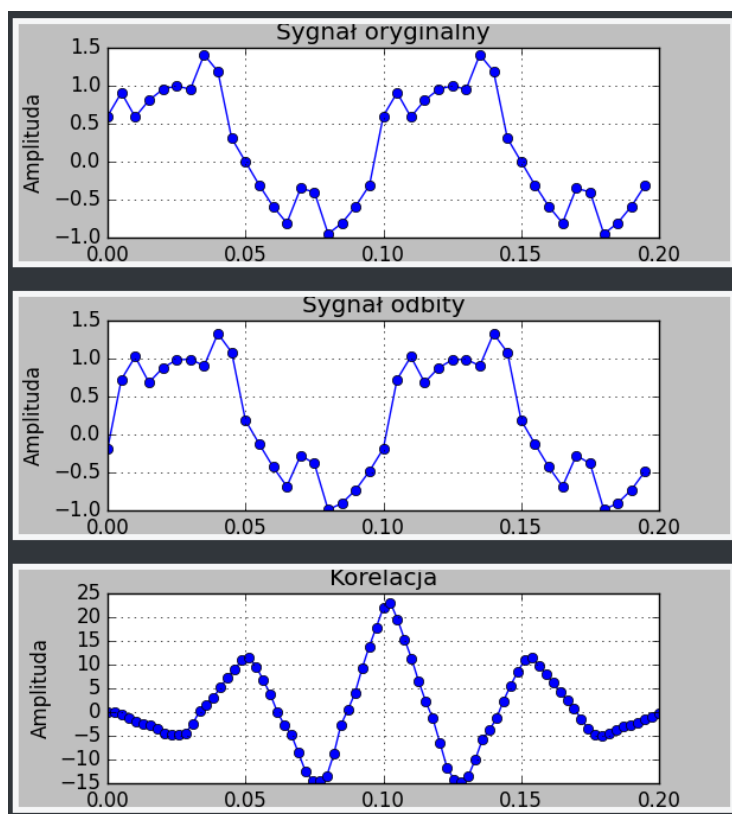
4.3.2 Eksperyment 2

$V_s[m/s]$	$V_p[m/s]$	$T_s[s]$	$f_s[Hz]$	l
1000	0.5	0.1	200	40

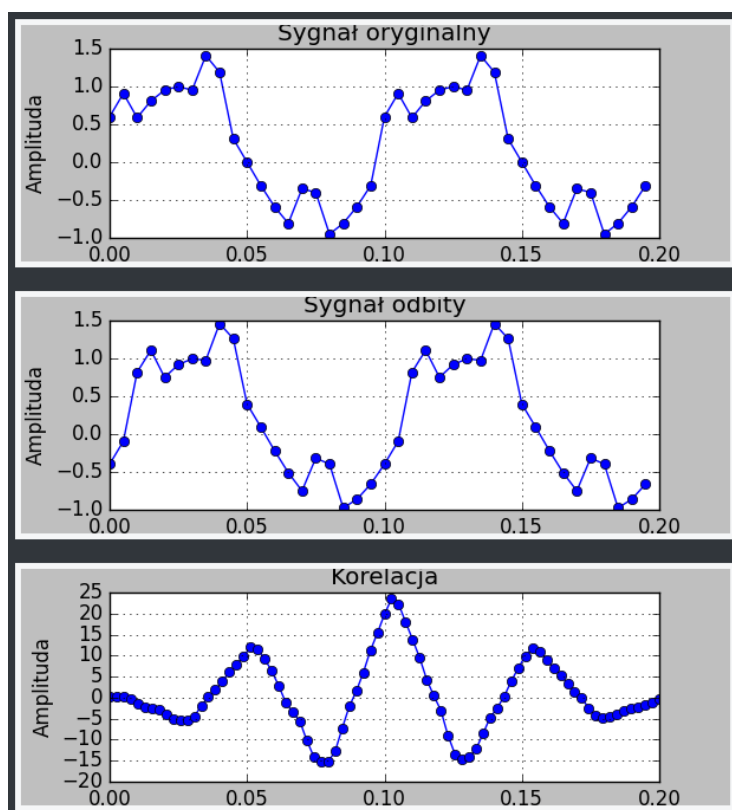
Tabela 34: Parametry wejściowe symulatora



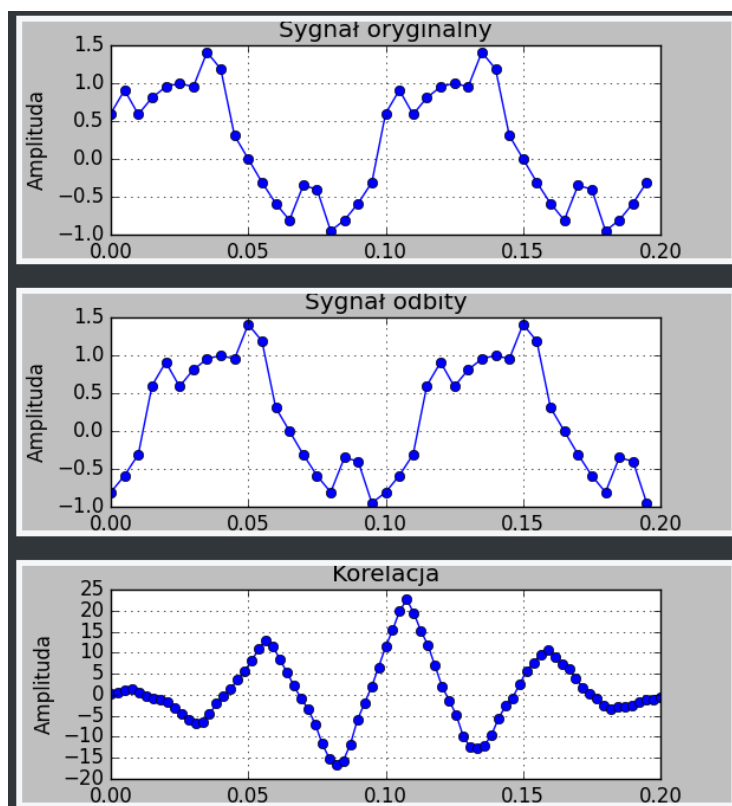
Rysunek 72: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 1.5



Rysunek 73: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 3



Rysunek 74: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 6.5



Rysunek 75: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 15

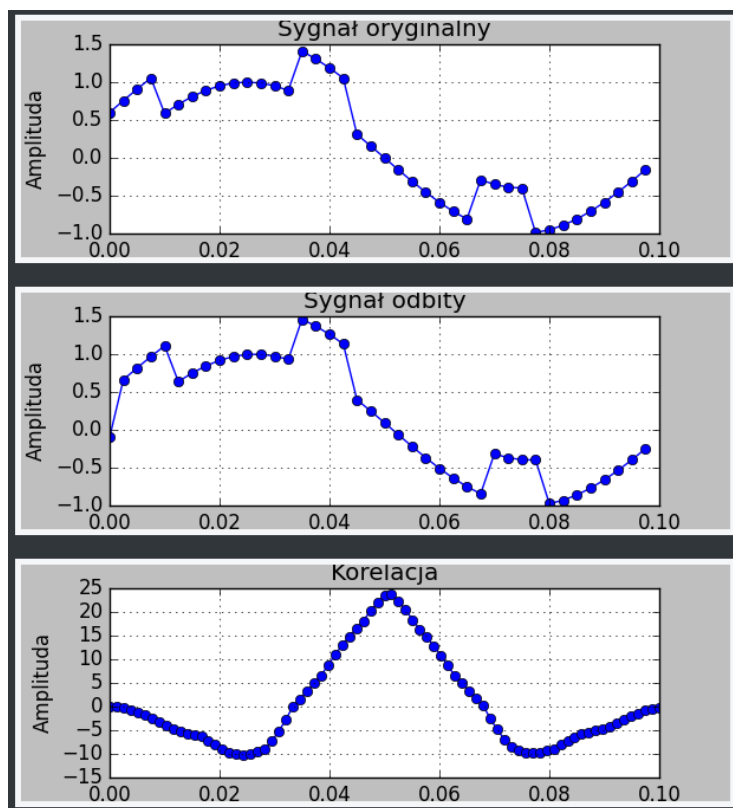
$t[s]$	$d_r[m]$	$d_m[m]$
01.50	0.750	0.000
03.00	1.500	2.500
06.50	3.250	2.500
15.00	7.500	7.500

Tabela 35: Wyniki działania symulatora

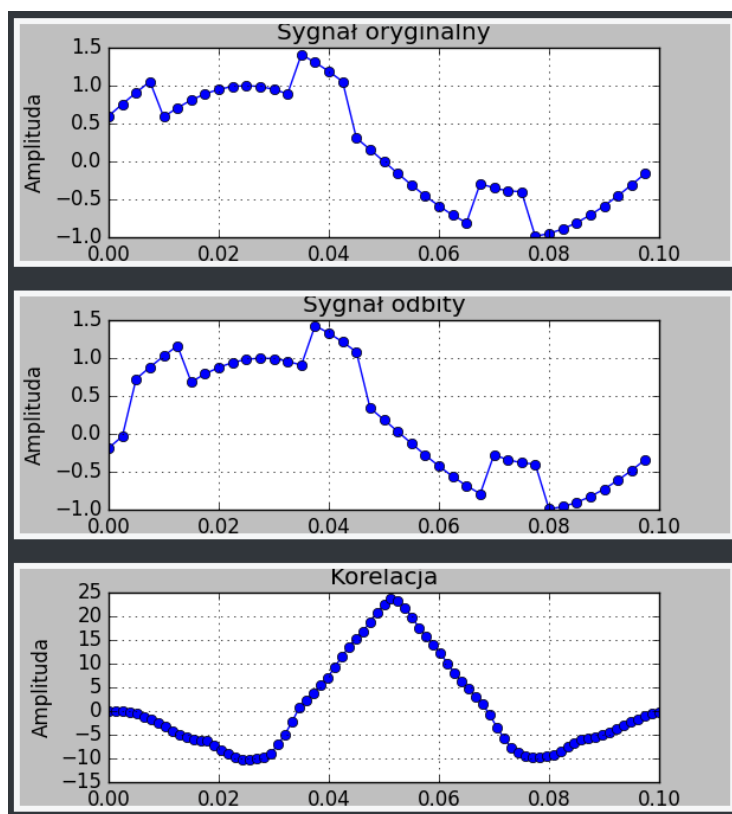
4.3.3 Eksperyment 3

$V_s[m/s]$	$V_p[m/s]$	$T_s[s]$	$f_s[Hz]$	l
1000	0.5	0.1	400	40

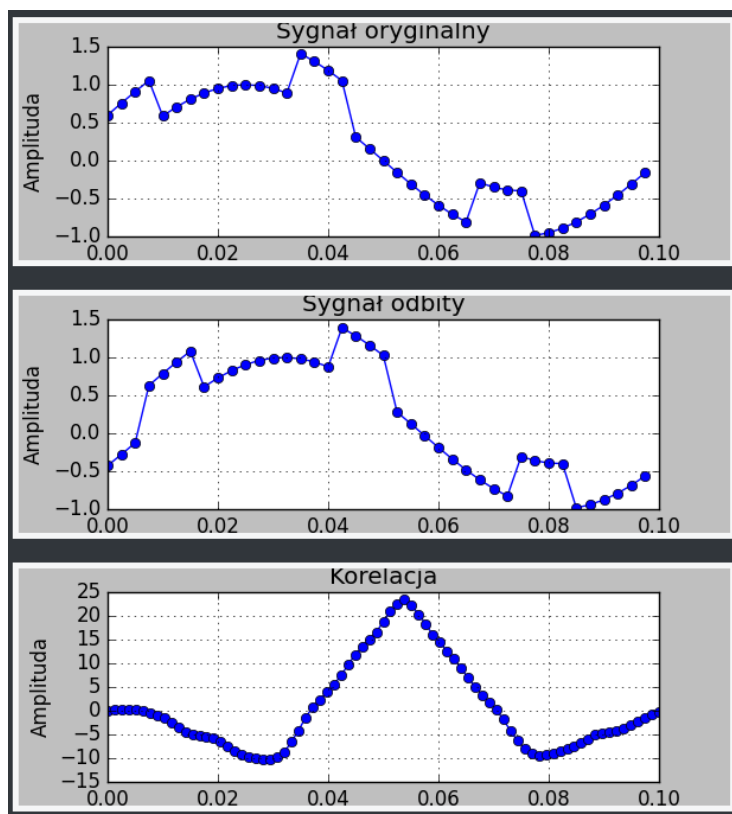
Tabela 36: Parametry wejściowe symulatora



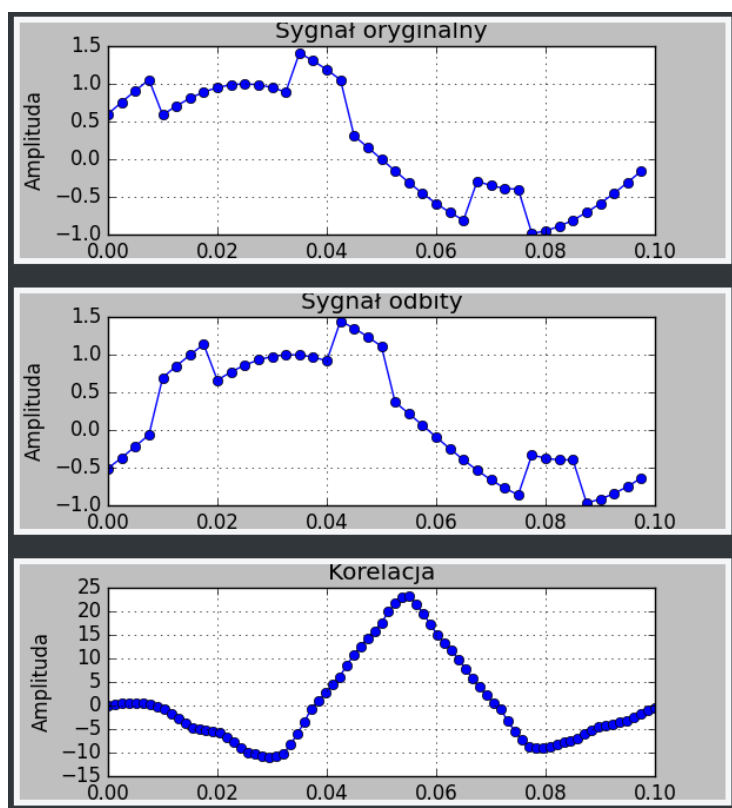
Rysunek 76: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 1.5



Rysunek 77: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 3



Rysunek 78: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 7



Rysunek 79: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 8.5

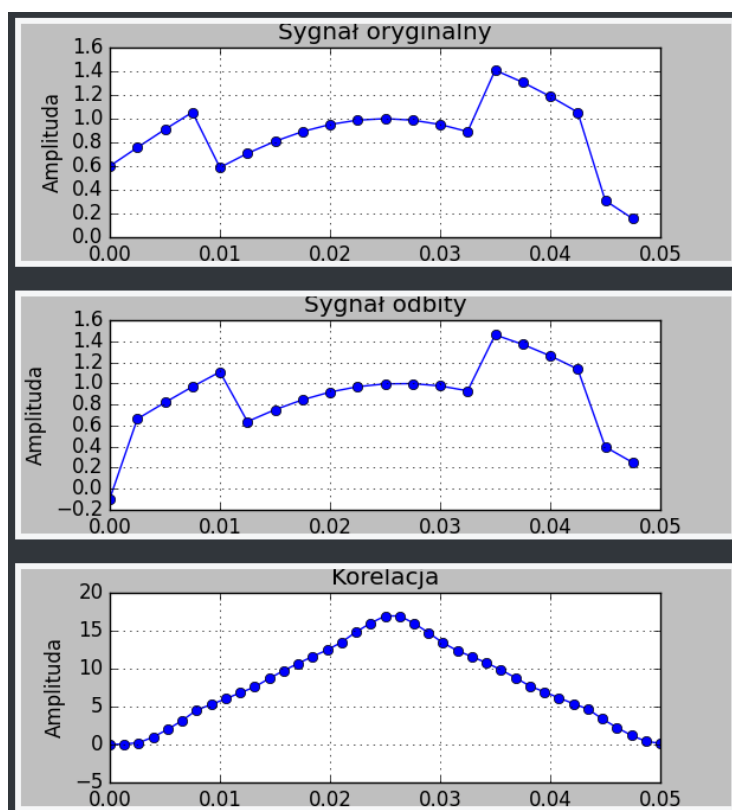
$t[s]$	$d_r[m]$	$d_m[m]$
01.50	0.750	1.250
03.00	1.500	1.250
07.00	3.500	3.750
08.50	4.250	5.000

Tabela 37: Wyniki działania symulatora

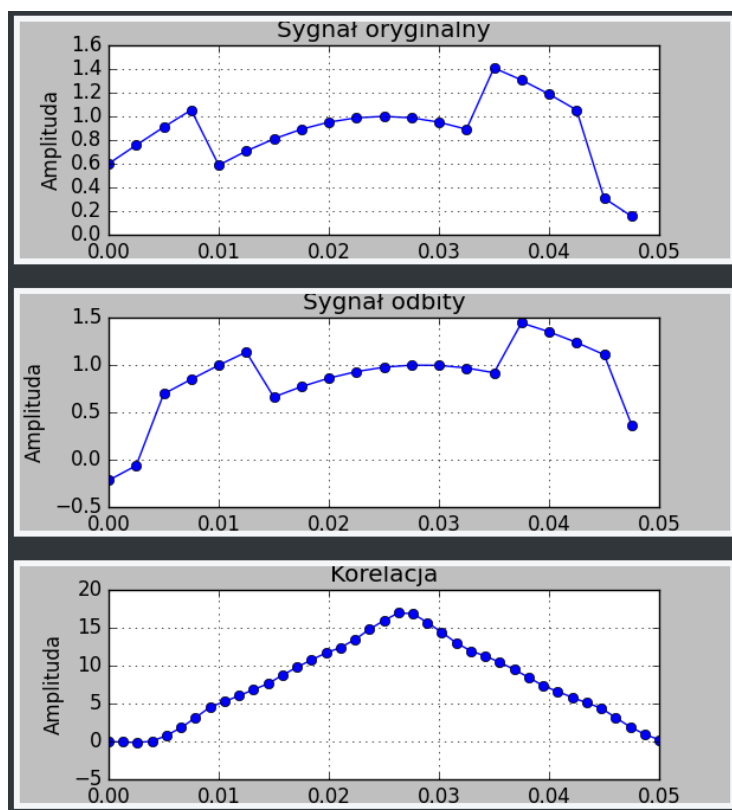
4.3.4 Eksperyment 4

$V_s[m/s]$	$V_p[m/s]$	$T_s[s]$	$f_s[Hz]$	l
1000	0.5	0.1	400	20

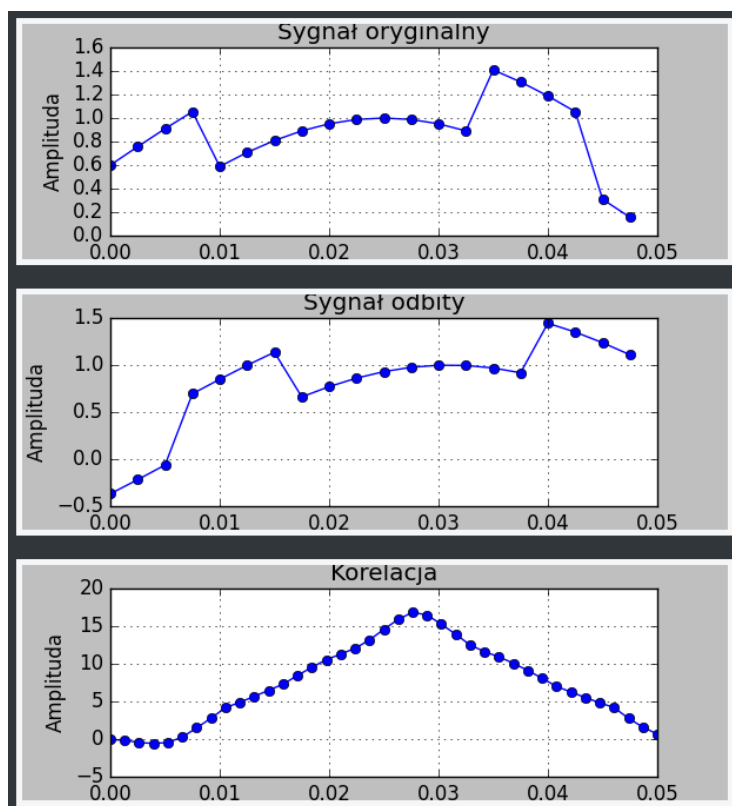
Tabela 38: Parametry wejściowe symulatora



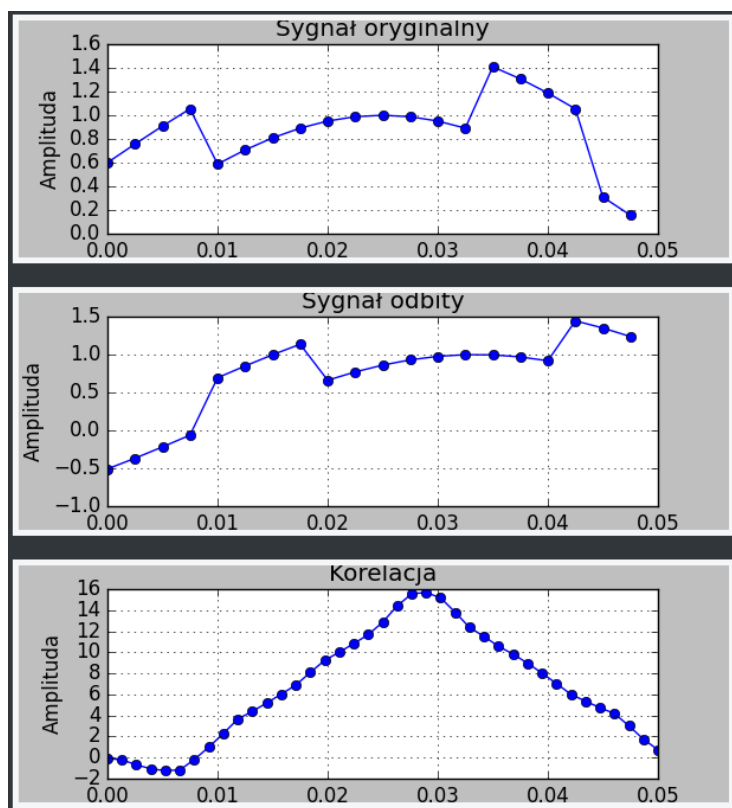
Rysunek 80: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 1.5



Rysunek 81: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 3.5



Rysunek 82: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 6



Rysunek 83: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 8.5

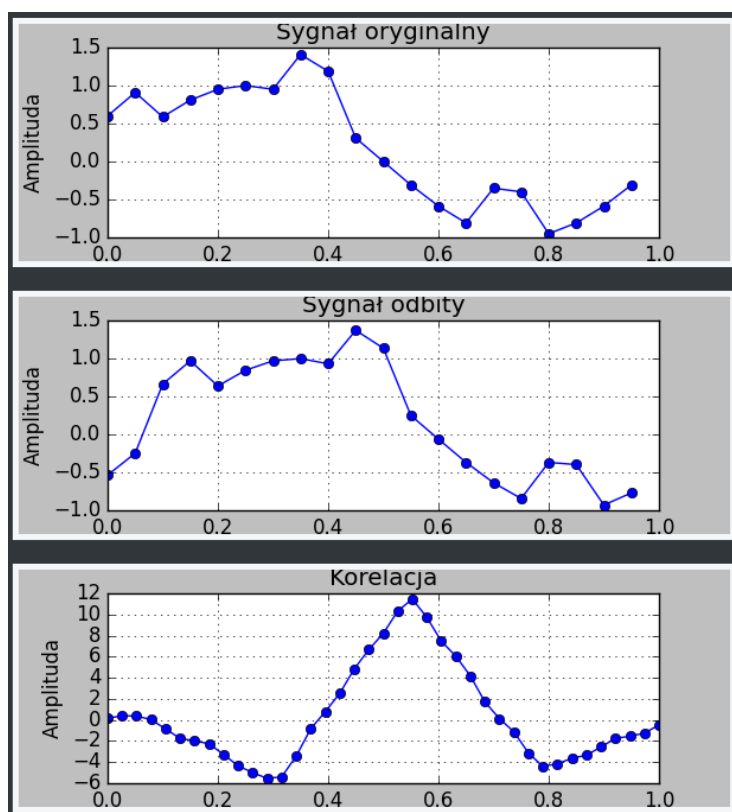
$t[s]$	$d_r[m]$	$d_m[m]$
01.50	0.750	1.250
03.50	1.750	1.250
06.00	3.000	2.500
08.50	4.250	3.750

Tabela 39: Wyniki działania symulatora

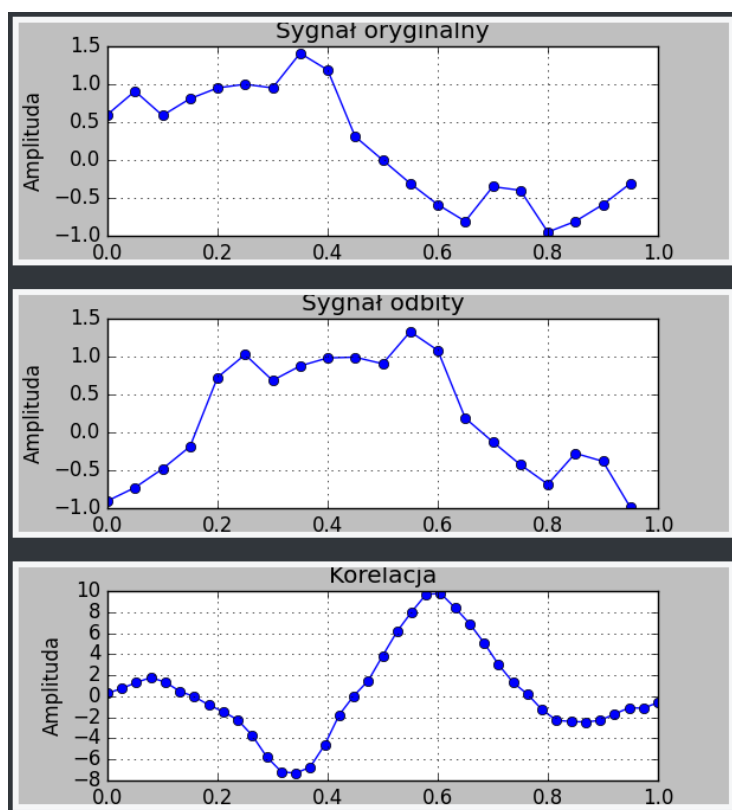
4.3.5 Eksperyment 5

$V_s[m/s]$	$V_p[m/s]$	$T_s[s]$	$f_s[Hz]$	l
100	3.0	1	20	20

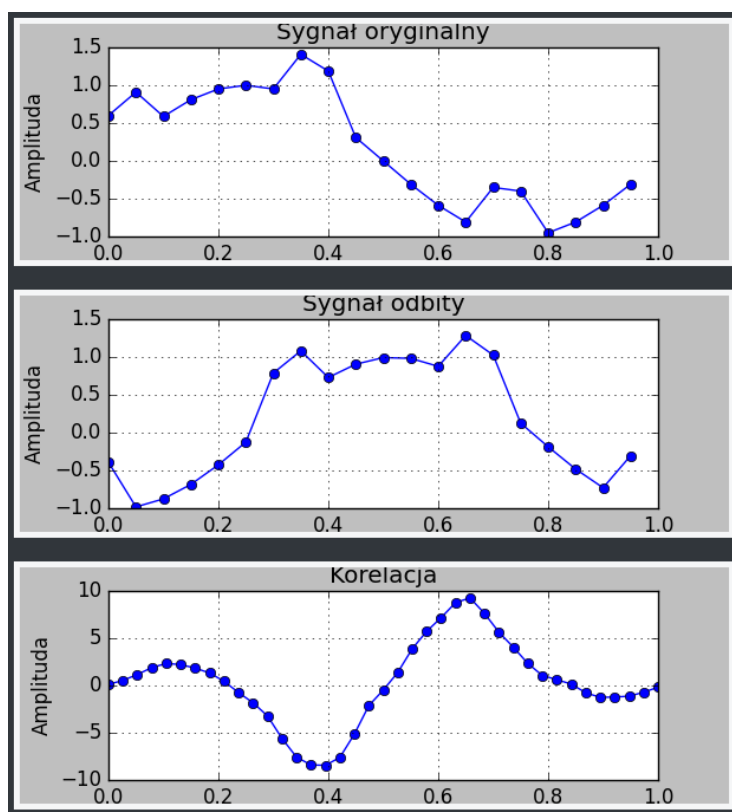
Tabela 40: Parametry wejściowe symulatora



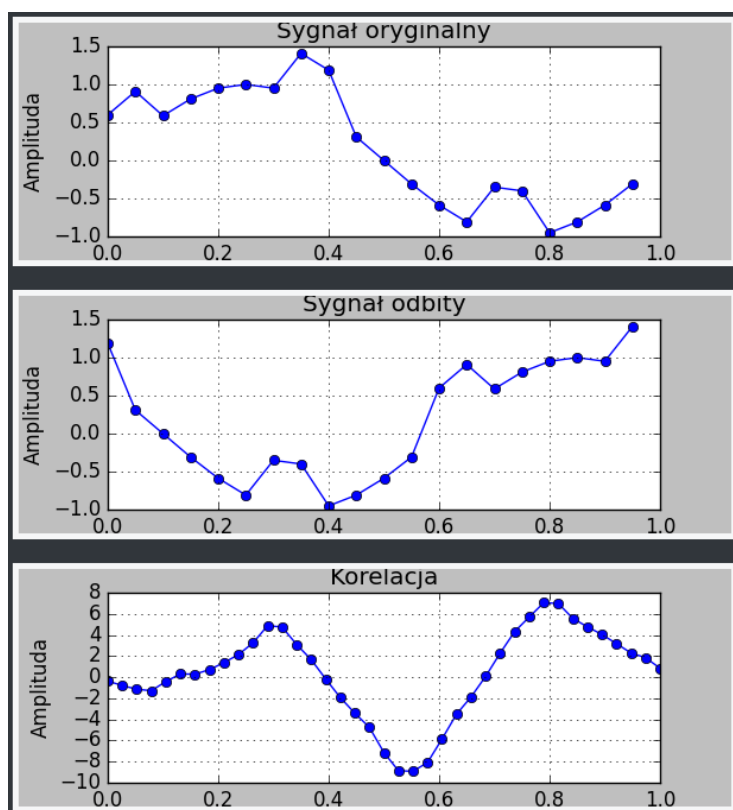
Rysunek 84: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 1.5



Rysunek 85: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 3



Rysunek 86: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 4.5



Rysunek 87: Sygnały w symulatorze czujnika odległości = 10

$t[s]$	$d_r[m]$	$d_m[m]$
01.50	4.500	5.000
03.00	9.000	10.000
04.50	13.500	15.000
10.00	27.500	30.000

Tabela 41: Wyniki działania symulatora

5 Dyskusja

5.1 Splot i korelacja sygnałów dyskretnych

Pierwsza wykonana seria eksperymentów jest poświęcona operacji splotu i korelacji sygnałów dyskretnych, które to operacje należało zaimplementować w ramach wykonywanego zadania. Eksperymenty od 4.1.1 do 4.1.3 prezentują wyniki operacji splotu, a eksperymenty od 4.1.4 do 4.1.6 wyniki operacji korelacji. Dokumentacja każdego pojedynczego doświadczenia zawiera wykresy oraz parametry dwóch sygnałów na których operacja została wykonana, a także wykres sygnału wynikowego. W pierwszym doświadczeniu 4.1.1 wykorzystano dwa praktycznie takie same sygnały sinusoidalne, różniące się jedynie momentem rozpoczęcia, który to parametr nie ma wpływu na wynik splotu. Można więc uznać że wykonano splot dwóch takich samych sygnałów sinusoidalnych. Symetryczny kształt sygnału wynikowego wskazuje na to, że rzeczywiście sygnały wejściowe były takie same. Ciekawe okazuje się porównanie z wynikami doświadczenia 4.1.4, w którym to te same sygnały zostały ze sobą skorelowane. Wynik tego eksperymentu jest odbiciem lustrzanym eksperymentu 4.1.1 względem osi czasu, co wskazuje na pewne podobieństwo i związek między operacją splotu i korelacji sygnałów. W doświadczeniach 4.1.2 i 4.1.5 wykorzystano parę funkcji sinus i sinus wyprostowany jednopółkowo. Wynik okazuje się w obu doświadczeniach bardzo podobny. Tym razem jednak odkrywamy, że jest to odbicie symetryczne nie tylko względem osi poziomej, ale również osi pionowej, czego ze względu na symetrię wykresu nie dało się zauważyć w poprzednio omawianej parze doświadczeń. W ostatniej parze eksperymentów 4.1.3 oraz 4.1.6 wykorzystano połączenie funkcji sinus z funkcją trójkątną. Wynik jest wizualnie ciekawy, w stosunku do wyników poprzednich. Okazuje się praktycznie identyczny dla splotu i korelacji ze względu na to, iż jest symetryczny względem swojego środka.

5.2 Filtracja sygnałów dyskretnych

Druga grupa eksperymentów poświęcona jest filtrom o skończonej odpowiedzi impulsowej. Na początku wygenerowany został sygnał przeznaczony do filtrowania, jak opisano w 3.2. Następnie w każdym kolejnym eksperymencie utworzony został nowy filtr, na którym wykonano splot ze wspomnianym wcześniej sygnałem złożonym. Dla każdego doświadczenia zaprezentowano wykres i parametry filtru oraz wykres sygnału po filtracji. Warto jeszcze przed analizą wyników zauważyć, że filtrowany sygnał posiada dwie, dające się wizualnie wyróżnić składowe, jedna o częstotliwości $20Hz$ a druga o częstotliwości $3Hz$.

Pierwsze cztery eksperymenty poświęcone są badaniu wpływu wybranej funkcji okna na jakość filtracji. Tak więc kolejno zastosowane zostały okno kwadratowe, okno hamminga, okno hanninga i okno blackmana. W każdym przypadku wykorzystano tutaj filtr dolnoprzepustowy rzędu 51 i częstotliwość odcięcia $5Hz$. Doświadczalnie stwierdzono, że przy tych parametrach różnica w wykorzystaniu okien staje się widoczna. I tak dla wspomnianych parametrów wizualnie daje się stwierdzić, że najlepszą jakość filtracji osiągnięto dla okna hamminga, a najgorszą dla okna kwadratowego. Przy czym wyniki dla okna hanninga i hamminga niewiele się różnią, przy oknie blackmana daje się zauważyć, że jakaś inna częstotliwość składowa kiedyś istniała. Natomiast w przypadku

okna prostokątnego składowa o wyższej częstotliwości wyraźnie się zaznacza. Warto jednak wspomnieć, że w każdym przypadku udało się tą wyższą składową wyraźnie lub całkowicie wytłumić.

Kolejne trzy eksperymenty pokazują wpływ rzędu filtra (liczby jego próbek) na jakość filtrowania. Każdorazowo wykorzystano tutaj również filtr dolnoprzepustowy, częstotliwość odcięcia $5Hz$ i okno hamminga. Wyniki okazują się zgodne z intuicją. Czym większy rząd filtra tym silniej udaje się wytłumić częstotliwość $20Hz$. Za pierwszym razem (rzęd 41) wyższa składowa wytłumiona zostaje praktycznie całkowicie. Za drugim razem jest wyraźnie zauważalna, choć słabsza niż w sygnale oryginalnym. Wynik trzeciego doświadczenia (rzęd 21) wizualnie niewiele różni się od sygnału filtrowanego.

W ostatniej serii doświadczeń (od 8 do 13) wykorzystane zostały różne częstotliwości odcięcia jak i różne typy filtrów. W eksperymentach 8 i 9 zastosowano częstotliwość odcięcia mniejszą i równą najniższej częstotliwości składowej sygnału, przy wykorzystaniu filtru dolnoprzepustowego. W wyniku wyższa składowa została wytłumiona całkowicie a niższa odpowiednio dla wyższej częstotliwości odcięcia - wytłumiona słabiej, natomiast dla niższej częstotliwości odcięcia - wytłumiona silniej. Odfiltrowywana była bowiem częstotliwość niższa, a pozostawiona częstotliwość wyższa - $20Hz$. W eksperymencie 10 zastosowano filtr górnoprzepustowy a częstotliwość odcięcia f_o wynosiła 190, co dla tego filtru przekłada się na częstotliwość $f_{o2} = 200Hz/2 - 190Hz = 10Hz$. Na wykresie wynikowym widać, że faktycznie częstotliwość $3Hz$ została prawie całkowicie wytłumiona, da się jednak zauważyć jej obecność w nieznacznych "wahaniach" całego wykresu w górę i w dół. Przy zastosowaniu częstotliwości odcięcia $f_o = 195Hz$ dla tego samego filtra, wspomniana niższa częstotliwość zaznacza się znacznie wyraźniej. W obu przypadkach można jednak spokojnie stwierdzić, że składowa niższa jest słabsza niż składowa wyższa. Ostatnie dwa eksperymenty wykonano za pomocą filtra pasmowoprzepustowego, ustawiono częstotliwość odcięcia $f_o = 90Hz$, co dla tego filtra oznacza, że pasmo przepustowe mieściło się między $10Hz$ a $190Hz$. W pierwszym z dwóch eksperymentów niższa częstotliwość została prawie całkowicie wytłumiona. W ostatnim przypadku częstotliwość niższa została wytłumiona tak, że nie jest już zauważalna na wykresie.

5.3 Wykorzystanie analizy korelacyjnej do pomiaru odległości

Ostatnia część eksperymentów została poświęcona badaniu zachowania korelacyjnego czujnika odległości. Dla każdego eksperymentu zostały przedstawione parametry wejściowe symulatora, wykresy sygnałów sondującego, powrotnego i ich korelacji oraz kilka pomiarów czujnika razem z rzeczywistymi odległościami. Pierwszy eksperyment został przeprowadzony dla prędkości sygnału $100m/s$ i odległości do przedmiotu około $30m$. Przedmiot oddala się nieznacznie z prędkością $0.5m/s$. Okres sygnału sondującego wynosi 1s. Próbek w buforze jest 60, co przy częstotliwości próbkowania $20Hz$ oznacza trzy pełne okresy. Okaże się, czy jest potrzeba przechowywać tyle próbek. Po przyjrzeniu się wynikom widać, że najogólniej mówiąc czujnik działa poprawnie, natomiast ma ograniczoną dokładność pomiaru do ok $2.5m$. Dokładność ta może być zadowalająca lub nie, w zależności od wymagań czujnika.

Zakres działania czujnika jest pierwszą rzeczą, na którą warto zwrócić uwagę. Można zastanowić się co ma na ten zakres decydujący wpływ. Rozważmy prędkość sygnału. Kolejny eksperyment (2) pokazuje, że sama prędkość nie wpływa w żaden sposób na dokładność pomiaru, gdyż przy prędkości $1000m/s$ uzyskaliśmy tę samą dokładność, co przy prędkości $100m/s$. Ważny jest natomiast stosunek prędkości do okresu sygnału. Okres sygnału sondującego wyznacza zakres opóźnień, sygnału powrotnego, dla których uda się poprawnie obliczyć odległość. W idealnym przypadku, opóźnienie musi być oczywiście mniejsze niż okres, bo przy analizie korelacyjnej nie będzie się dało w żaden sposób stwierdzić, czy sygnał powrotny jest opóźniony o $kT + x$, czy tylko o x , gdzie kT to dowolna całkowita wielokrotność okresu a x to pewne opóźnienie sygnału. W praktyce granica ta zależy od jeszcze wielu innych czynników, jak charakterystyka samego sygnału sondującego oraz liczba okresów sygnału przechowywana w buforze. W eksperymencie 5 okazało się, że już gdy opóźnienie stało się większe niż ok 0.4 część okresu, to czujnik nie był w stanie określić faktycznej odległości i zaczął znowu "od zera". Ostateczny wniosek jest więc taki, że na zakres działania czujnika ma wpływ stosunek prędkości sygnału sondującego do jego okresu. Sam okres wyznacza zakres opóźnień a prędkość decyduje o tym, jaki zakres odległości będzie odpowiadał danemu zakresowi opóźnień.

Dokładność działania czujnika zależy w decydującej mierze od częstotliwości próbkowania. A dokładnie nie od samej bezwzględnej wartości częstotliwości ale od liczby próbek przypadającej na okres. Czym więcej próbek na okres tym z większą dokładnością można stwierdzić, jakie jest opóźnienie sygnału powrotnego. Eksperyment 3 pokazuje, że po zwiększeniu częstotliwości próbkowania (co skutkowało zwiększeniem liczby próbek przypadających na okres sygnału), uzyskaliśmy większą dokładność niż w eksperymencie 2. Zostaje jeszcze do rozważenia ostatni parametr, a mianowicie długość bufora, którą od razu możemy przełożyć na faktycznie mającą znaczenie - liczbę okresów sygnału w buforze. Wartość ta jest bardzo istotna i eksperyment 4 pokazuje, że jeżeli będzie zbyt mała, to po prostu czujnik przestanie działać, gdyż analiza korelacyjna nie wykaże żadnego lokalnego maksimum korelacji. Pojawia się pytanie jaka powinna być wartość tego parametru. Oczywiście chcielibyśmy, żeby była jak najmniejsza, ponieważ czym mniej próbek w buforze, tym szybciej można przeprowadzić obliczenia, a czym szybciej znajdujemy wynik korelacji tym większą częstotliwość próbkowania możemy uzyskać, co w konsekwencji skutkuje większą dokładnością czujnika. W eksperymentach 1, 2 i 3 kolejno wartość ta była zmniejszana od trzykrotności okresu do pojedynczego okresu sygnału sondującego. Za żadnym razem zmniejszenie tej wartości nie wpłynęło negatywnie na analizę korelacyjną. Można więc na podstawie doświadczeń stwierdzić, że wystarczy w buforze przechowywać jeden okres. Okazuje się jednak, że nie jest to zasada, gdyż przy zastosowaniu mniej złożonej funkcji (np. czysty sinus), wartość ta była już za mała (niestety nie udokumentowano tego w tym sprawozdaniu). Można więc wysnuć wniosek, że charakter funkcji sondującej jest bardzo istotny, ponieważ od kształtu tej funkcji zależy, jaką minimalną wielokrotność (lub część) okresów trzeba przechować w buforze, aby poddana analizie korelacyjnej dała poprawne wyniki. Jak już wcześniej wspomniano, ma to decydujący wpływ na dokładność pomiaru.

6 Wnioski

- Operacje splotu i korelacji sygnałów dyskretnych są do siebie bardzo zbliżone
- Okno prostokątne najgorzej wpływa na jakość filtracji sygnału
- Czym większy rząd filtra tym lepsza jakość filtracji
- Jeżeli pasmo przepustowe nie obejmuje żadnej składowej to wszystkie składowe są tłumione, tym bardziej, im dalej znajdują się od granicy pasma przepustowego
- Korelacyjny czujnik odległości ma ograniczony zakres pomiaru wyznaczony przez stosunek prędkości sygnału sondującego do okresu tego sygnału
- Dokładność pomiaru korelacyjnego czujnika odległości jest zdeterminowana przez liczbę próbek przypadającą na jeden okres
- Charakterystyka sygnału sondującego ma duże znaczenie zarówno dla zakresu pomiaru czujnika korelacyjnego (charakterystyka wyniku korelacji), jak i dla dokładności pomiaru (minimalna długość bufora potrzebna do uzyskania poprawnego wyniku)

Literatura

- [1] Politechnika Łódzka, *Instrukcja do zadania 3*, Dostęp online: <https://ftims.edu.p.lodz.pl/mod/url/view.php?id=6495>, [dostęp: 10 maja 2025].
- [2] Python Software Foundation, *Python Documentation*, Dostęp online: <https://docs.python.org/3/>, [dostęp: 10 maja 2025].
- [3] Python Software Foundation, *Tkinter Documentation*, Dostęp online: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>, [dostęp: 10 maja 2025].