

Sygnały radiolokacyjne i metody ich przetwarzania

Semestr 2023L

Jan Jędrzejewski
16 czerwca 2023 r.

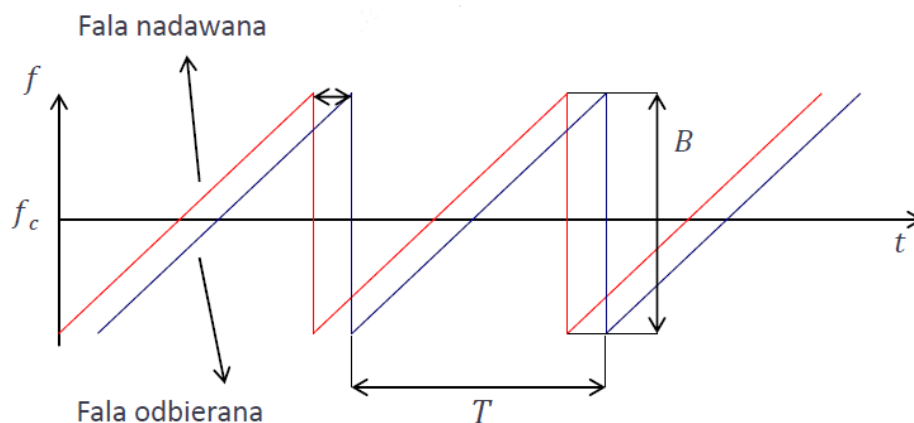
Temat projektu

Na podstawie sygnału odebranego przez radar z falą ciągłą modulowaną FMCW sporządzić obrazy typu Range-Doppler. Na jednej osi odległość, na drugiej prędkość (częstotliwość dopplerowska), intensywność koloru określa poziom odebranego sygnału w skali logarytmicznej.

Radar FMCW

Jest radarem z falą ciągłą, oznacza to że sygnał jest wysyłany bez przerwy. Nie ma podziału na wysyłanie sygnału z anteny a następnie na odbiór jak w radarach impulsowych. Fala którą wysyłamy - FM (Frequency-Modulated), podobnie jak w klasycznym radarze jest liniowo modulowana. Wyróżniamy podstawowe parametry takiego radaru:

- f_c - częstotliwość nośna
- B - pasmo sygnału nadawanego
- T - okres modulacji (w tym przypadku sweep'a nie impulsu)

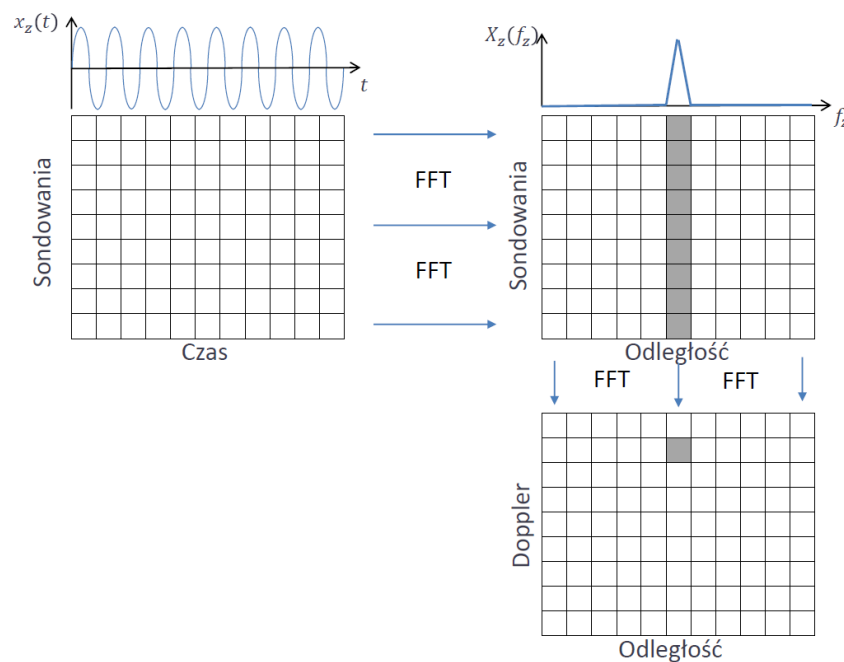


Sposób działania

Fala odebrana jest porównywana z falą nadawaną. Na podstawie przesunięcia fazowego (częstotliwości dopplerowskiej) jesteśmy w stanie określić prędkość obiektu, na podstawie opóźnienia czasowego pomiędzy falami wyznaczamy odległość od obiektu.

Przetwarzanie dwuwymiarowe - tworzenie mapy

Z odebranego sygnału tworzymy macierz sondowań. W rzędach ustawiamy kolejnych n sweepów dla których stworzymy zagregowaną mapę. W kolumnach mamy czas po którym sygnał dotarł z powrotem do radaru. Za pomocą transformaty fouriera przekształcamy czas na odległość, a kolejne sondowania na częstotliwość dopplerowską a następnie skalujemy częstotliwość na prędkość radialną.



Dane radarowe do projektu

Do sprawdzenia zaimplementowanej metody wykorzystałem rzeczywiste nagrania uczelnianym radarem FMCM. Konkretnie nagrania gestów wykonywanych rękami. Nagrania miały długość 5 sekund, były wykonywane dla następujących parametrów radaru: $F_c = 25.26 \text{ GHz}$; $B = 1 \text{ GHz}$; $PRF = 1 \text{ kHz} \Rightarrow T = 1 \text{ ms}$; $liczbaSampliNaImpuls = 1000$

Rozdzielczość mapy

Rozróżnialność odległościowa: $\Delta R = \frac{c}{2B} \Rightarrow \Delta R = \frac{3 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^9} = 0.3 \text{ m}$

W rzeczywistości rozróżnialność odległościowa na mapie jest zależna od liczby sampli w jednym impulsie. Na ilustracji z poprzedniej strony widzimy że czas zamienia się w odległość, im więcej sampli w jednym okresie tym większa gęstość punktów na mapie w osi odległości.

Rozróżnialność częstotliwościowa: $\Delta f = \frac{1}{T}$

Ponownie przy rzeczywistym tworzeniu mapy to liczba sondowań bezpośrednio wpływa na rozdzielczość częstotliwościową a następnie prędkościową. Im większa liczba sondowań tym większa rozdzielczość. Zatem $\Delta f = \frac{PRF}{liczbaImpulsów} = 10 \text{ Hz}$. Nie możemy jednak dowolnie zwiększać liczby sondowań, ponieważ za bardzo byśmy utrudniali odebrany sygnał z różnych momentów w czasie. Możemy także wyznaczyć rozdzielczość prędkościową: $\Delta v = \Delta f \frac{\lambda}{4} = \Delta f \frac{c}{4Fc} = 10 \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 25.26 \cdot 10^9} = 2.97 \cdot 10^{-2} = 2.97 \text{ cm}$.

Zakres wartości na mapie

Maksymalna odległość: $R_{max} = \frac{F_s c}{4\beta}$

Gdzie: F_s - częstotliwość samplowania (Sample Rate), β - szybkość modulacji. Dla naszego radaru: $F_s = PRF * liczbaSampliNaImpuls = 10^6$; $\beta = \frac{B}{T} = 10^{12}$. Wówczas maksymalny zasięg radaru wynosi: $R_{max} = \frac{10^6 * 3 * 10^8}{4 * 10^{12}} = \frac{3}{4} 10^2 = 75 \text{ m}$.

Maksymalna prędkość: $v_{max} = \pm \frac{f_{d-max} \lambda}{2} = \pm \frac{PRF \lambda}{4}$

Maksymalna częstotliwość dopplerowska jest równa połowie częstotliwości modulacji. Zmieniając częstotliwość wykorzystując długość fali otrzymujemy maksymalną prędkość na mapie: $V_{max} = \frac{PRF c}{4Fc} = \frac{10^3 * 3 * 10^8}{4 * 25.26 * 10^9} = 2.97 \text{ m}$.

Implementacja w Matlabie

Przyjęte stałe

```
% Parametry nagrania
PRF = 1000;
Fc = 25.26e9;
B = 1e9;
samplesInPulse = 1000;
T = 1/PRF;
% Pozostałe stałe
c = physconst('LightSpeed');
numPulses = 100; % liczba sondowań do jednej mapy
k = 100;          % przesunięcie - od którego sondowania zaczynamy
```

Wczytanie sygnału

```
[X, ch0, ch1] = readSignal('Nagrania_gesty/Output23.bin');
```

Gdzie X - sygnał zespolony, ch0 - część rzeczywista, ch1 - część urojona

Tworzenie macierzy sondowania/czas

```
rx_puls = zeros(samplesInPulse, numPulses);
for i = 1:numPulses
    rx_puls(:,i) = ch0(k*SamplesInPulse+(i-1)*SamplesInPulse+1 :
    (k*SamplesInPulse+i*SamplesInPulse));
end
```

Dwuwymiarowa transformata i skala logarytmiczna

```
rx_fft2 = fft2(rx_puls);
rx_fft2 = 20*log10(abs(rx_fft2));
```

Przekształcenie obrazu, aby wyśrodkować punkt (0, 0)

```
%% Zamiana lewej strony z prawą (aby zerowa prędkość była na środku)
tmp = rx_fft2(:, numPulses/2+1:numPulses);
rx_swapped = zeros(samplesInPulse, numPulses);
for i = 1:samplesInPulse
    rx_swapped(i, :) = cat(2, tmp(i, :), rx_fft2(i, 1:numPulses/2)); end
%% Zamiana górnej połowy z dolną (aby zerowa odległość była na środku)
tmp = rx_swapped(samplesInPulse/2+1:samplesInPulse, :);
rx_swapped2 = zeros(samplesInPulse, numPulses);
for i = 1:numPulses
    rx_swapped2(:, i) = cat(1, tmp(:, i), rx_swapped(1:samplesInPulse/2, i)); end
```

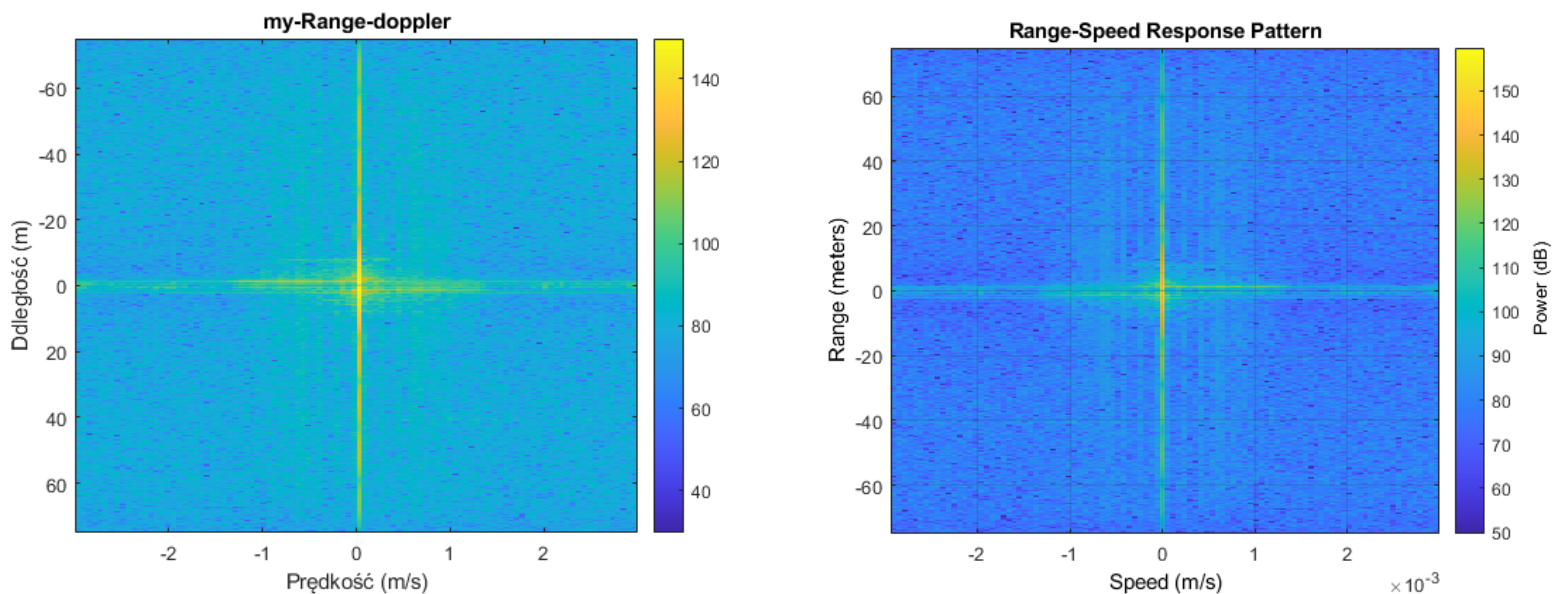
Wyznaczenie zakresu mapy

```
v_max = PRF * c / (4 * Fc);  
range_max = c * SamplesInPulse * PRF / (4 * B / T);
```

Referencyjna metoda z Matlaba

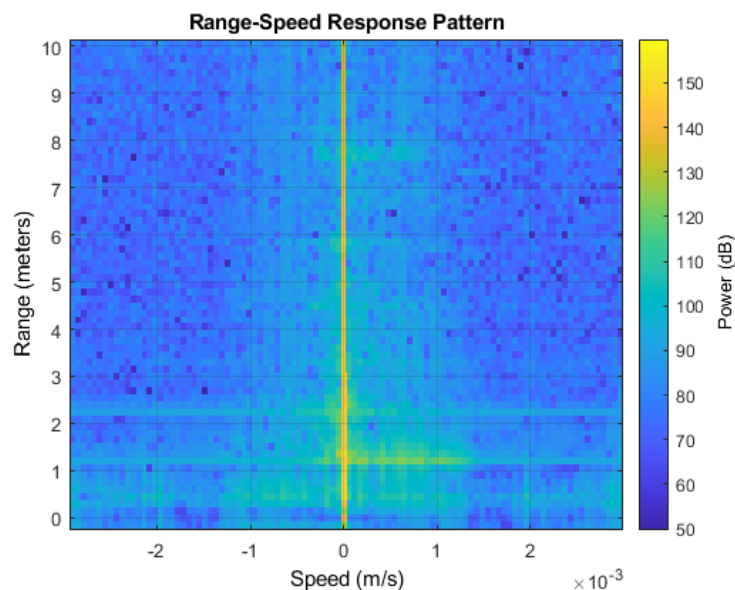
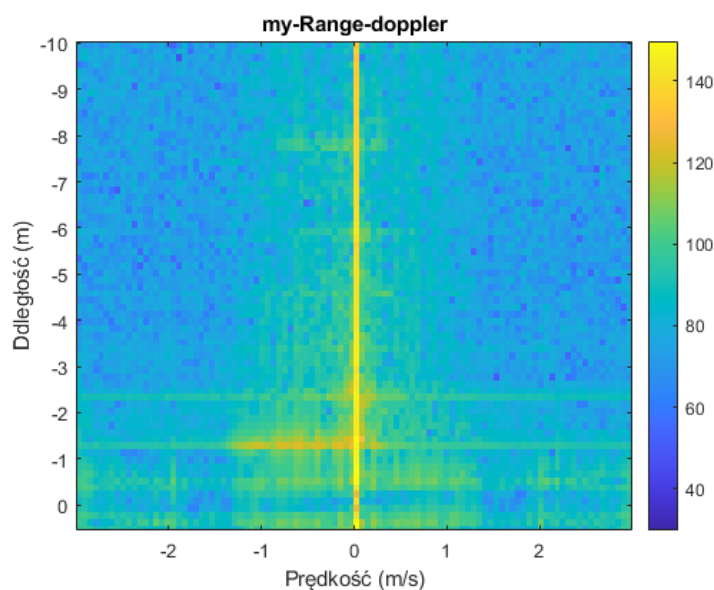
Do porównania i ewaluacji mojej metody i wykorzystam wbudowaną metodę z toolboxa Phased Array - `phased.RangeDopplerResponse()`.

Wyniki

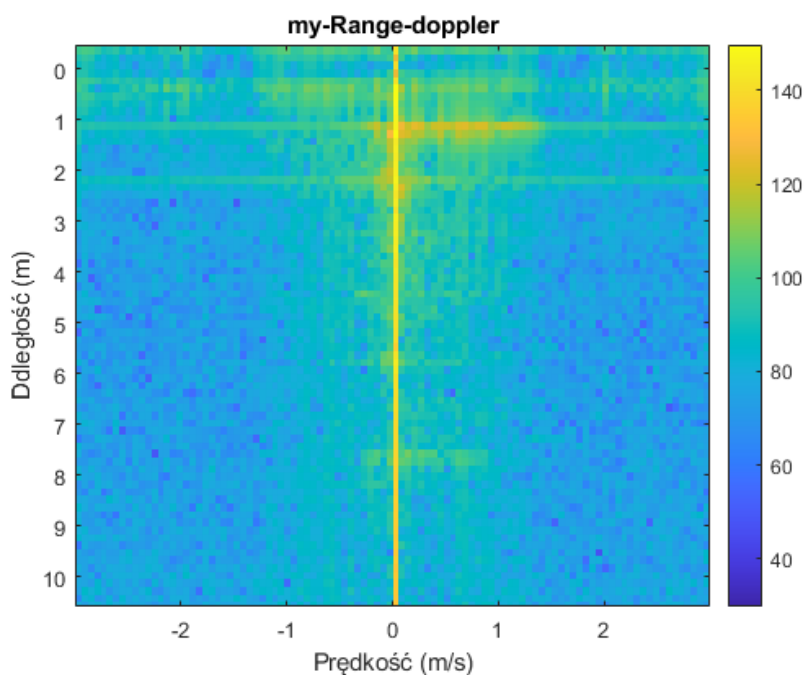


Za pomocą zaimplementowanej funkcji otrzymałem obraz bardzo zbliżony do obrazu z referencyjnej metody. Jest różnica w wyskalowaniu poziomego sygnału, może to być spowodowane innym przelicznikiem lub po prostu wartości są identyczne a tylko dobranie skali kolorów jest nieznacznie przesunięte.

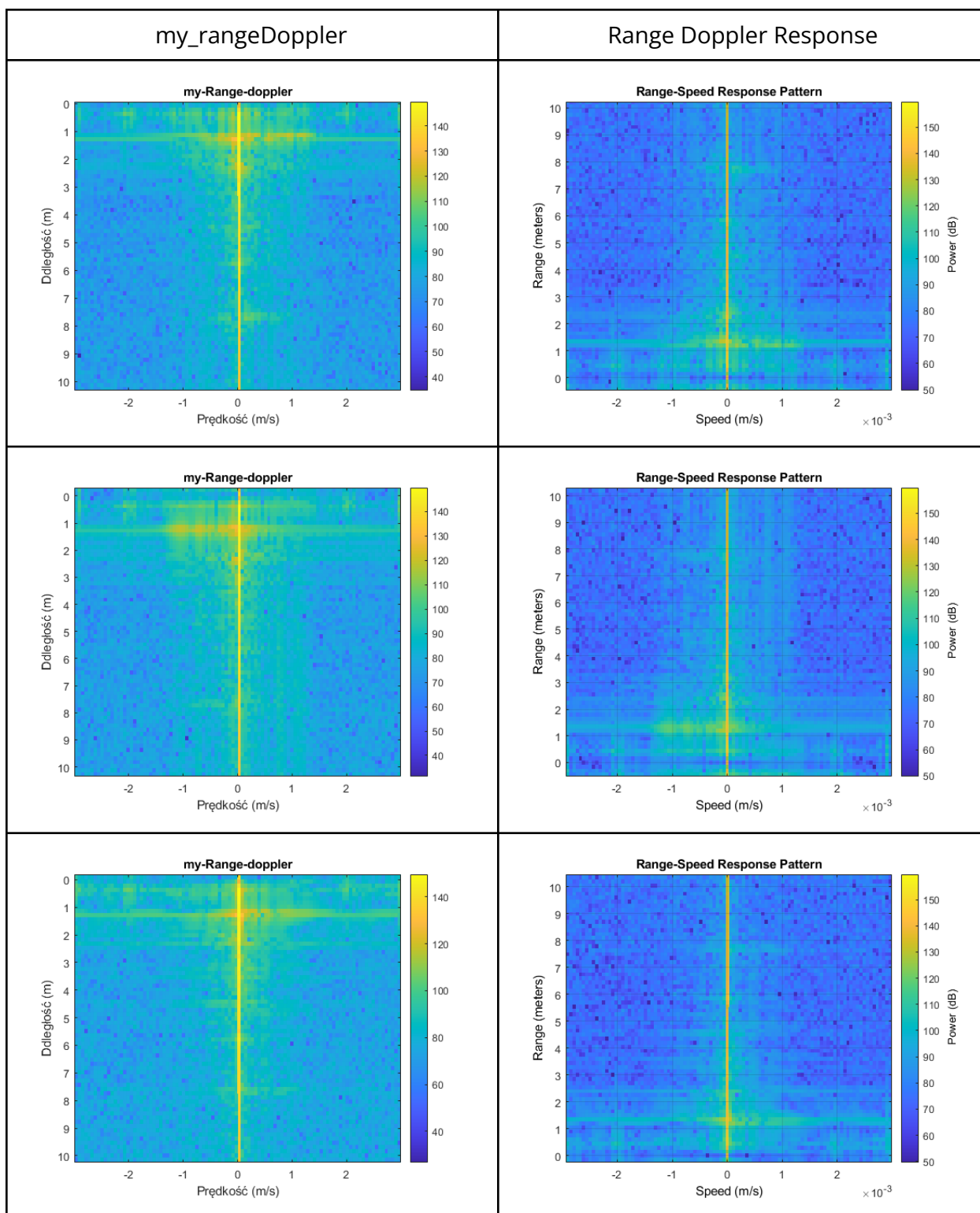
Obserwujemy podobny clutter w pobliżu odległości i prędkości równej zero. Po lewej i prawej stronie od środka powstają identyczne prążki pionowe. Zważywszy na to że nagrania dotyczyły gestów rękami (prawdopodobnie w niewielkiej odległości) przybliżmy zakres i przyjrzyjmy się szczegółowo.



Z bliska widać że prawdopodobnie osie zostały zamienione (obserwujemy lustrzane odbicie). Po lewej stronie w odległości około 1,2 metra widać obiekt przemieszczający się z prędkościami około 1 m/s. Na prawym obrazie podobny obiekt znajduje się po dodatniej stronie prędkości. Warto odnotować że osie pionowe są także przeciwnie ustawione. Porównajmy z dolną częścią obrazu.



Oprócz głównego obiektu widać jeszcze mniejsze odbicia w okolicach 6 i 8 metrów od radaru. Mogą to być też fragmenty clutteru - niewielkie przedmioty lub podmuchy powietrza poruszające się w tle, występują na obydwu obrazach.



W powyższej tabeli zamieściłem obrazy z kolejnych chwil. Odpowiednio z 200, 300, 400 modulacji. Można zaobserwować efekt "machanie ręką". Obiekt przyjmuje prędkości dodatnie, następnie ujemne i z powrotem dodatnie.

Wnioski

Zaimplementowana metoda tworzenia obrazów typu range doppler dobrze radzi sobie z przetwarzaniem sygnału na obraz. Zachowuje poprawną rozdzielczość i zakres wartości. Słabą stroną jest orientacja osi układu. Metoda wymaga odpowiedniego wyskalowania z rzeczywistością i poprawienia widoczności obiektów zdetekowanych, aby bardziej się wyróżniały spośród szumu.

Zamieszczone pliki projektu

- readSignal.m - funkcja do czytania pliku binarnego (sygnału z radaru)
- my_RangeDoppler.m - zaimplementowana funkcja zwracająca mapę range-doppler
- plot_my_RangeDoppler.m - skrypt wyświetlający obraz zaimplementowaną metodą
- rangeDopplerResponse.m - skrypt wyświetlający referencyjny obraz
- plik binarny Output.23 - nagranie machania ręką przed radarem
- pliki png - wykresy zamieszczone w sprawozdaniu

Praca inżynierska

Ten projekt jest fragmentem pracy inżynierskiej o temacie "Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do klasyfikacji obiektów radarowych". Obrazy typu range-doppler jako przetwarzanie wstępne sygnału dla modeli sieci neuronowych analizujących obrazy lub sekwencje obrazów i klasyfikujące obiekty radarowe automatycznie.

Źródła

1. Materiały wykładowe z przedmiotu SRMP
2. Matlabowe tworzenie obrazów Range-Doppler
<https://www.mathworks.com/help/phased/ug/range-doppler-response.html>
3. Dokumentacja matlaba na oficjalnej stronie MathWorks
4. <https://dsp.stackexchange.com/questions/81113/range-doppler-map-to-range-velocity-map-conversion>
5. <https://e2e.ti.com/support/sensors-group/sensors/f/sensors-forum/764359/awr1243boost-issues-about-the-equation-of-the-maximum-range-of-fmcw-radars>