



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,  
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI



Imię i nazwisko studenta: Kacper Zubiel  
Nr albumu: 155354  
Studia pierwszego stopnia  
Forma studiów: stacjonarne  
Kierunek studiów: Elektronika i telekomunikacja  
Profil: Inżynieria mikrofalowa i antenowa

## PROJEKT DYPLOMOWY INŻYNIERSKI

Tytuł projektu w języku polskim: Radar z głowicą obrotową

Tytuł projektu w języku angielskim: Radar with rotary head

Potwierdzenie przyjęcia projektu	
Opiekun projektu	Kierownik Katedry
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
Dr inż. Łukasz Kulas	Prof. dr hab. inż. Michał Mrozowski

Data oddania projektu do dziekanatu:



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,  
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI



## **OŚWIADCZENIE dotyczące pracy dyplomowej zatytułowanej: Radar z głowicą obrotową**

Imię i nazwisko studenta: Kacper Zubiel  
Data i miejsce urodzenia: 28.10.1995, Gdańsk  
Nr albumu: 155354  
Wydział: Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki  
Kierunek: elektronika i telekomunikacja  
Poziom kształcenia: pierwszy  
Forma studiów: stacjonarne

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2017 poz. 880 z późn. zm.) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz.U. 2017 poz. 2183 z późn. zm.),<sup>1</sup> a także odpowiedzialności cywilnoprawnej oświadczam, że przedkładana praca dyplomowa została opracowana przeze mnie samodzielnie.

Niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem tytułu zawodowego.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. pracy dyplomowej, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy dyplomowej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia .....

.....  
*podpis studenta*

---

<sup>1</sup> Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym:

Art. 214 ustęp 4. W razie podejrzenia popełnienia przez studenta czynu podlegającego na przypisaniu sobie autorstwa istotnego fragmentu lub innych elementów cudzego utworu rektor niezwłocznie poleca przeprowadzenie postępowania wyjaśniającego.

Art. 214 ustęp 6. Jeżeli w wyniku postępowania wyjaśniającego zebrany materiał potwierdza popełnienie czynu, o którym mowa w ust. 4, rektor wstrzymuje postępowanie o nadanie tytułu zawodowego do czasu wydania orzeczenia przez komisję dyscyplinarną oraz składa zawiadomienie o popełnieniu przestępstwa.



## STRESZCZENIE

Celem niniejszej pracy było stworzenie systemu radarowego, umożliwiającego wykrycie pobliskich obiektów oraz określenie ich odległości. Docelowy radar miał się charakteryzować zdolnością wykonania dookólnego skanowania przestrzeni poprzez zastosowanie obrotowej głowicy. Zadanie polegało na wyborze najbardziej odpowiedniej techniki przeprowadzania pomiarów radarowych dla zakładanych celów, ustaleniu struktury sprzętowej systemu oraz opracowaniu oprogramowania, które zapewni osiągnięcie zakładanej funkcjonalności.

Warstwę sprzętową części radarowej ograniczono do zastosowania kompletnego frontendu firmy RFbeam, dołączonego do układu firmy National Instruments, odpowiedzialnego za przetwarzania sygnałów. Głowica obrotowa została zbudowana na bazie silnika krokowego. Całość oprogramowania stworzono przy użyciu graficznego środowiska programowania LabView.

W wyniku powyższych działań udało się otrzymać poprawnie działający radar krótkiego zasięgu. Zastosowanie zaproponowanego systemu pozwala na rozszerzenie informacji na temat stanu infrastruktury krytycznej, takiej jak porty czy zakłady petrochemiczne, o lokalizację obiektów czy weryfikację danych przestrzennych z innych systemów. Ponadto może posłużyć jako niezwykle użyteczne wsparcie w pracy w środowiskach o ograniczonej widoczności lub jako baza do dalszego rozwoju zaproponowanej koncepcji.

Dziedzina nauki OECD: 2.2. Elektrotechnika, elektronika, inżynieria informatyczna  
Słowa kluczowe: radar, FMCW, obrotowa głowica, LabView, DSP

## ABSTRACT

The aim of this project was to create radar system, capable of detecting nearby objects and providing distance measurements. The final product was expected to be omni-directional, due to the usage of a rotary head. The task consisted of several stages, including determining the most relevant technique of achieving expected features, designing the hardware system structure and developing the software.

Hardware layer was significantly reduced by applying the highly integrated radar frontend RFbeam K-MC1, attached to the National Instruments board, that is executing digital signal processing algorithms. The rotary head is based on a stepper motor. The entire software was created using LabView, the graphical programming environment.

All actions mentioned above resulted in getting a correctly working short range radar system, that is proving highly accurate measurements. It may be applied in order to obtain extended information about the state of critical infrastructure, like shipyards or petrochemical plants. Furthermore it may be used in vision denied environments or serve as a basis for further modifications of the proposed concept.

OECD field of science: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information

Keywords: radar, FMCW, rotary head, LabView, DSP



*SCOTT ([www.scott-project.eu](http://www.scott-project.eu)) has received funding from the Electronic Component Systems for European Leadership Joint Undertaking under grant agreement No 737422. This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Austria, Spain, Finland, Ireland, Sweden, Germany, Poland, Portugal, Netherlands, Belgium, Norway.*



## SPIS TREŚCI

<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>4</b>
<b>SPIS TREŚCI .....</b>	<b>5</b>
<b>WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW.....</b>	<b>6</b>
<b>WSTĘP.....</b>	<b>7</b>
<b>1. WPROWADZENIE.....</b>	<b>8</b>
<b>2. PODSTAWY TEORETYCZNE .....</b>	<b>10</b>
2.1. Radar FMCW .....	10
2.2. Równanie radarowe .....	11
2.3. Główne czynniki wpływające na wydajność systemu radarowego .....	12
2.3.1. Szumy.....	12
2.3.2. Zakłócenia bierne oraz interferencje .....	12
<b>3. ARCHITEKTURA SYSTEMU .....</b>	<b>14</b>
3.1. Ogólne założenia.....	14
3.2. Wymagania dotyczące warstwy sprzętowej.....	15
3.3. Realizacja sprzętowa systemu.....	16
<b>4. IMPLEMENTACJA SYSTEMU.....</b>	<b>18</b>
4.1. Bloki oprogramowania części radarowej.....	18
4.2. Szczegółowy opis działania oprogramowania części pomiarowej.....	19
4.3. Bloki oprogramowania części sterującej .....	21
4.4. Szczegółowy opis działania części sterującej .....	22
<b>5. TESTY SYSTEMU .....</b>	<b>25</b>
5.1. Metodologia testów .....	25
5.2. Środowisko przeprowadzania testów .....	25
5.3. Test algorytmów przetwarzania sygnałów .....	26
5.4. Testy kompletnego systemu.....	27
<b>6. WNIOSKI KOŃCOWE .....</b>	<b>32</b>
<b>WYKAZ LITERATURY .....</b>	<b>33</b>



## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

CFAR	–	Constant False Alarm Rate
CSV	–	Comma Separated Values
DSP	–	Digital Signal Processing
EIRP	–	Equivalent Isotropic Radiated Power
FAR	–	False Alarm Rate
FIFO	–	First In First Out
FFT	–	Fast Fourier Transform
FMCW	–	Frequency Modulated Continuous Wave
FPGA	–	Field Programmable Gate Array
ISM	–	Industrial, Scientific, Medical
RCS	–	Radar Cross Section
VCO	–	Voltage Controlled Oscillator
WLAN	–	Wireless Local Area Network

## WSTĘP

Nieustanna ekspansja rynku technologicznego skutkuje dynamicznym napływem innowacji, a także pojawianiem się w elektronice użytkowej rozwiązań dotychczas wysoce specjalistycznych. Radary doskonale wpisują się w ten trend. Urządzenia te do niedawna były spotykane niemal wyłącznie w zastosowaniach militarnych. Teraźniejszy rozwój techniki sprawił jednak, iż stały się dużo bardziej dostępne, a co za tym idzie uległy znacznemu rozpowszechnieniu, znajdując zastosowania w rozmaitych dziedzinach. Stanowią między innymi nierozłączny element jednej z najintensywniej wdrażanych obecnie koncepcji, jaką są samochody autonomiczne. Są także kluczowym komponentem systemów bezpieczeństwa przestrzeni przemysłowych.

W niniejszych pracy podjęto się stworzenia systemu radarowego, zdolnego do dookólnego skanowania przestrzeni przy użyciu obrotowej głowicy. Potencjalnym przeznaczeniem docelowego projektu miałyby być obrazowanie w środowiskach o ograniczonej widoczności na potrzeby rozszerzenia informacji dotyczących obiektów znajdujących się w wyznaczonych strefach. Taka informacja może być wykorzystywana jako uzupełniający mechanizm bezpieczeństwa systemów autoryzacji i autentykacji, bazujących na informacji przestrzennej.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do niniejszej pracy, zawiera ogólny opis działania radarów. Rozdział drugi bardziej szczegółowo przedstawia zjawiska leżące u podstaw pomiarów radiolokacyjnych. W rozdziale trzecim zaprezentowano założenia dotyczące architektury projektowanego systemu oraz budowę klasycznego układu nadawczo-odbiorczego, wykorzystywanego w radarach. Kolejny rozdział poświęcono szczegółom dotyczącym implementacji przedstawionych wcześniej koncepcji i założeń. Rozdział piąty opisuje przeprowadzone testy, mające na celu walidację wykonanego projektu oraz weryfikację jego teoretycznych parametrów. Ostatni rozdział stanowi podsumowanie niniejszej pracy wraz z konkluzjami dotyczącymi sposobu realizacji, efektów oraz ewentualnych możliwości w przyszłości.

## 1. WPROWADZENIE

Radar jest urządzeniem służącym do wykrywania obiektów przy pomocy fal elektromagnetycznych. Podstawowym zjawiskiem, które wykorzystuje w tym celu, jest odbicie fal radiowych. Stąd też bierze się nazwa „radar”, będąca akronimem terminu „Radio Detection And Ranging”, oznaczającego detekcję obiektu oraz wyznaczania odległości przy pomocy fal radiowych [1]. Radary można zatem określić mianem sensorów elektromagnetycznych.

Przez wiele lat podstawową i właściwie jedyną, rolą radarów była detekcja obiektów w technice wojskowej. Wraz z biegiem lat technologia ta została znacząco rozwinięta, co poskutkowało znalezieniem zastosowań dla urządzeń tego typu w licznych dziedzinach, takich jak meteorologia, nawigacja czy kontrola ruchu zarówno naziemnego, wodnego jak i powietrznego. W zależności od wybranej techniki, mogą one służyć nie tylko do pomiaru odległości od obiektu lecz także jego prędkości, kierunku ruchu lub nawet do obrazowania skanowanego terenu. Od pewnego czasu radary odgrywają również bardzo znaczącą rolę w poprawie bezpieczeństwa w motoryzacji. Umożliwiły też gwałtowny rozwój technologii związanych z samochodami autonomicznymi. Ponadto mogą zostać wykorzystane jako jedno ze źródeł informacji dotyczących pozycji obiektów w multimodalnych systemach pozycjonowania. Pozwalają one na lokalizowanie obiektów w obszarach, w których systemy satelitarne, jak GPS, okazują się nieskuteczne lub zwiększają ich dokładność [2].

Jedną z zalet systemów radarowych jest fakt, iż w przeciwieństwie do systemów wizyjnych, pozwalają na obrazowanie nawet w obszarach o bardzo ograniczonej widoczności. W środowiskach tego typu, jak na przykład wysoce zadymione wnętrza budynków, pożądane byłoby wykorzystanie robotów do wykonywania różnorodnych prac. Jednakże niezwykle kłopotliwym okazuje się fakt, iż znaczna większość przenośnych sensorów, służących do mapowania przestrzeni, wykorzystuje kamery lub LIDAR, zatem ich niezawodność jest silnie ograniczona w środowiskach tego typu. Z pomocą w takich sytuacjach przychodzą systemy radarowe [3].

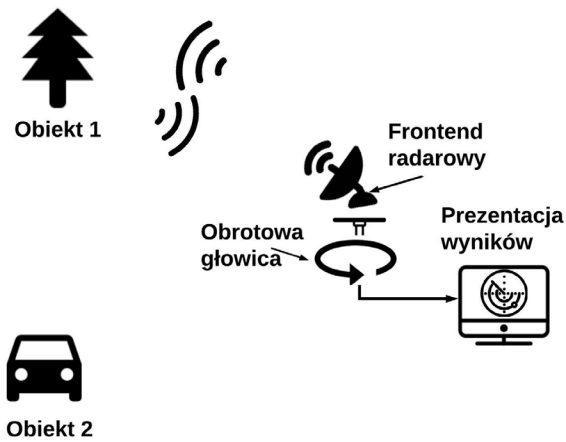
Spośród różnych rodzajów radarów, jednym z najpopularniejszych obecnie jest radar wykorzystujący technikę FMCW (ang. Frequency Modulated Continuous Wave), czyli częstotliwościową modulacją fali ciągłej. Została ona zastosowana także w niniejszym projekcie. Umożliwia określenie odległości obiektów, zarówno statycznych jak i ruchomych, ze stosunkowo wysoką rozdzielczością. Wykorzystując tę technikę można mierzyć nawet bardzo niewielkie odległości. Ponadto w radarach FMCW możliwy jest również jednoczesny pomiar prędkości lokalizowanych obiektów.

W wielu spotykanych systemach radarowych wymaganiem jest detekcja obiektów nie tylko w wąskim sektorze przestrzeni, lecz dookólnie. Skanowanie otoczenia w tym celu może być osiągnięte poprzez umieszczenie anteny na obrotowej głowicy, jak zostało to wykonane w niniejszym projekcie, lub poprzez skanowanie elektroniczne przy pomocy anteny z przełączaną wiązką. Ogólna idea działania systemów tego typu została przedstawiona poniżej, na rys.1.1.

Celem niniejszej pracy było stworzenie kompletnego systemu radarowego,



umożliwiającego detekcję obiektów w odległości od kilku do kilkudziesięciu metrów, wykorzystującego głowicę obrotową.



Rys. 1.1. Ogólna idea działania docelowego systemu

Zasadę działania radaru, w najogólniejszy sposób można przedstawić następująco:

- antena radaru wypromieniowuje energię w postaci fali elektromagnetycznej,
- obiekt znajdujący się w pewnej odległości od radaru, stojący na drodze fali przechwytuje pewną ilość jej energii, odbijając ją w różnych kierunkach
- część energii odbitej (echo) trafia z powrotem do anteny radaru, w którym po wzmocnieniu i odpowiednim przetworzeniu zostaje podjęta decyzja o detekcji obiektu i jego lokalizacji.

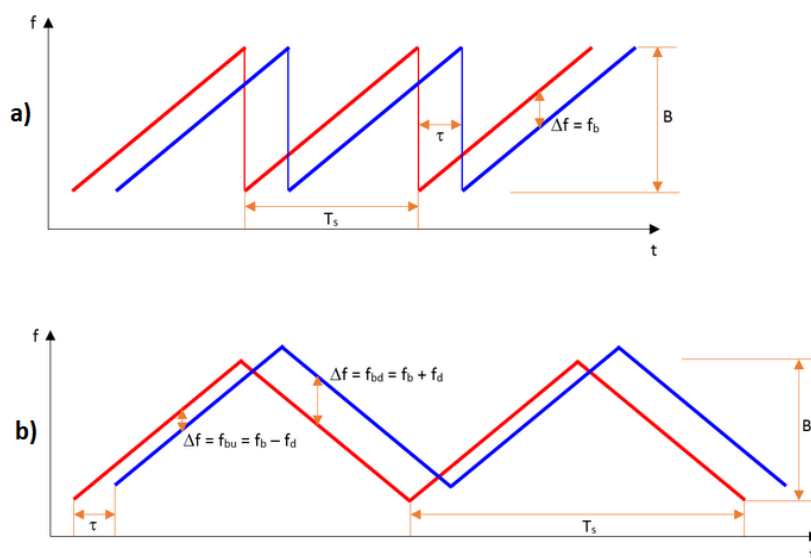
Projektowany w niniejszej pracy radar będzie pracował w paśmie częstotliwościowym 24GHz. Jest to podyktowane łatwą dostępnością komponentów przeznaczonych do zastosowania w tym zakresie. Wynika to z dużej popularności tego pasma w nowoczesnych radarach, szczególnie z branży motoryzacyjnej.

## 2. PODSTAWY TEORETYCZNE

### 2.1. Radar FMCW

Ważnym kryterium, pod względem którego dokonuje się klasyfikacji radarów jest rodzaj fali, z którą pracują. Dokonuje się rozróżnienie przede wszystkim na radary pracujące w trybie impulsowym oraz z falą ciągłą. Pierwsze z nich wymagają uzyskania bardzo wysokiej amplitudy generowanego sygnału, co stawia wysokie wymagania zarówno co do źródła promieniowania, jak i stosowanej anteny, która powinna charakteryzować się dobrą odpowiedzią impulsową [4]. Ponadto sygnały o tak wysokiej amplitudzie mogą wpływać niekorzystnie na inne systemy radiotelekomunikacyjne oraz na organizmy żywe [5], przez co w większości cywilnych systemów spotyka się radary pracujące z falą ciągłą, aczkolwiek radary impulsowe wciąż sprawdzają się w wielu dziedzinach, takich jak penetracja gruntu [6] oraz radary detekcyjne dalekiego zasięgu.

Radary wykorzystujące falę ciągłą mogą pracować z falą niezmodulowaną, umożliwiając wyłącznie pomiar prędkości obiektu poprzez detekcję przesunięcia Dopplera, lub z falą zmodulowaną. Drugi rodzaj, nazywany FMCW, jest obecnie najczęściej spotykany. Technika ta polega na tym, że nadawany sygnał posiada stałą amplitudę, lecz zmodulowaną częstotliwość. Umożliwia to zarówno pomiar prędkości obiektu, jak i jego odległości, niezależnie od tego czy znajduje się w ruchu czy w położeniu statycznym. Wymienione wartości określa się na podstawie przesunięcia częstotliwości sygnału odebranego, w stosunku do nadawanego. Jako sygnał modulujący stosuje się sygnał piłokształtny lub rampę. Wykorzystanie drugiego z nich pozwala na separację przesunięcia Dopplera od przesunięcia wynikającego z odległości obiektu, a co za tym idzie na rozróżnienie obu wartości i ich osobny pomiar.



Rys. 2.1. Sygnały modulujące: a) sygnał piłokształtny b) rampa [7]

## 2.2. Równanie radarowe

Niezależnie od zastosowanej techniki poniższe równania będą prawdziwe dla niemal wszystkich systemów radarowych. Przedstawiają one zjawiska leżące u podstaw radiolokacji. Poniższe zależności pozwalają na wyznaczenie równania radarowego, które jest fundamentalne podczas projektowania radarów. Zakładając, iż obiekt jest umieszczony w pewnej odległości od anteny oraz że jest to antena izotropowa to zależność opisującą gęstość mocy w odległości  $R$  od anteny izotropowej można przedstawić następująco:

$$S_t = \frac{\text{moc transmitowana}}{4\pi R^2} \quad (2.1)$$

Moc wypromieniowaną przez antenę nadawczą w kierunku obiektu, oznaczaną jako EIRP (ang. Equivalent Isotropic Radiated Power, Równoważna Moc Wypromieniowana Izotropowo), można zapisać zgodnie z zależnością 2.2 [8]. EIRP jest rozumiane jako moc jaką musi wypromieniować izotropowa antena nadawcza, aby w odbiorniku uzyskać ten sam poziom mocy, jaki wystąpiłby w przypadku zastosowania anteny kierunkowej, w kierunku jej maksymalnego zysku.

$$EIRP = P_{TX} G_{TX} \quad (2.2)$$

$P_{TX}$  – moc sygnału doprowadzonego do anteny nadawczej

$G_{TX}$  – zysk anteny nadawczej

Na podstawie powyższych zależności otrzymujemy równanie opisujące gęstość mocy, pochodzącej od anteny nadawczej radaru, w lokalizacji obiektu:

$$S_t = \frac{EIRP}{4\pi R^2} = \frac{P_{TX} G_{TX}}{4\pi R^2} \quad (2.3)$$

$R$  – odległość obiektu od anteny nadawczej radaru

Wprowadzając do wzoru 2.3 radarowy przekrój poprzeczny, RPP, oznaczany symbolem  $\sigma$ , otrzymamy zależność 2.4 opisującą wartość mocy odbitej od obiektu. Współczynnik ten, często określany również jako RCS, ang. Radar Cross Section, jest miarą zdolności obiektu do odbicia sygnału pochodzącego z anteny nadawczej radaru w kierunku anteny odbiorczej. Jego wartość zależy między innymi od kształtu obiektu, materiału z jakiego został wykonany, od położenia względem radaru, a także od częstotliwości fali padającej [9].

$$P_t = S_t \sigma = \frac{P_{TX} G_{TX}}{4\pi R^2} \sigma \quad (2.4)$$

Analogicznie do 2.1 oraz 2.3 można z wykorzystaniem zależności 2.4 określić gęstość mocy w położeniu anteny odbiorczej, która pochodzi od energii odbitej od obiektu. W celu uproszczenia obliczeń zakłada się geometrię mono- lub quasi-monostatyczną. Oznacza to, że antena nadawcza i odbiorcza znajdują się w tym samym miejscu lub ich przesunięcie jest na tyle niewielkie, iż może zostać pominięte. W wypadku geometrii bistatycznej mianownik poniższego wyrażenia miałby postać iloczynu kwadratów dwóch różnych odległości.

$$S_{RX} = \frac{P_t}{4\pi R^2} = \frac{P_{TX} G_{TX}}{16\pi^2 R^4} \sigma \quad (2.5)$$

Na podstawie powyższego równania można łatwo obliczyć moc w odbiorniku, która powstaje wskutek odbicia energii od obiektu oraz wiedząc, iż jest ona iloczynem gęstości mocy i

współczynnika efektywnej apertury anteny. W uproszczeniu opisuje on efektywność anteny w trybie odbiorczym [10]. Otrzymana zależność 2.6 nazywana jest równaniem radarowym. Jest ono kluczowe podczas projektowania systemów radiolokacyjnych, między innymi ze względu na to, iż umożliwia określenie maksymalnego zasięgu [11].

$$P_{RX} = S_{RX} A_{RXeff} = \frac{P_{TX} G_{TX}}{16\pi^2 R^4} \sigma \left[ \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{RX} \right] = \frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.6)$$

$G_{RX}$  – zysk anteny odbiorczej

$\lambda$  – długość fali

$A_{RXeff}$  – efektywna apertura anteny odbiorczej

Przekształcając równanie radarowe można otrzymać równanie opisujące maksymalny zasięg radaru  $R_{max}$ , w poniższej postaci:

$$R_{max} = \left( \frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX} \sigma \lambda^2}{16\pi^2 S_{min}} \right)^{1/4} \quad (2.7)$$

W powyższym równaniu  $S_{min}$  określa minimalną wykrywalną wartość sygnału. Jego wartość ograniczają przede wszystkim szumy odbiornika.

### 2.3. Główne czynniki wpływające na wydajność systemu radarowego

#### 2.3.1. Szumy

Poziom szumów jest najbardziej podstawowym ograniczeniem zdolności do wykrywania obiektów w systemach radiolokacyjnych. Nawet w przypadku idealnego odbiornika, który nie wprowadzałby żadnych dodatkowych szumów, wciąż obecne byłyby szumy termiczne. Ich obecność wynika z indukowania się napięć, wskutek ruchów elektronów, które nasilają się wraz ze wzrostem temperatury [12]. Ze względu na fakt, iż rozkład szumu jest równomierny, to jego moc jest proporcjonalna do szerokości pasma.

Poziom szumów definiuje tak zwaną podłogę szumową. Sygnał użyteczny musi mieć od niej wyższy poziom, aby mógł zostać odebrany. Na jej podstawie dobiera się próg wykrycia obiektu, a więc minimalną amplitudę sygnału odebranego, jaką musi posiadać aby nie został zakwalifikowany jako szum. Średnia moc szumu termicznego została opisana zależnością 2.8.

$$P = kTB \quad (2.8)$$

$k$  – stała Boltzmana ( $1,38 * 10^{-23}$  [J/K])

$T$  – temperatura

$B$  – szerokość pasma częstotliwości

#### 2.3.2. Zakłócenia bierne oraz interferencje

Wskazania radaru mogą być obciążone błędem nie tylko w wyniku szumów, lecz także interferencji oraz zakłóceń biernych. Zakłócenia bierne (ang. clutter) są zjawiskiem bardzo istotnie obniżającym wydajność stosowania technologii radarowej. Powstają na skutek przypadkowych odbić sygnału nadawanego przez radar, nazywanego sygnałem sondującym,

od różnego rodzaju przeszkód naturalnych, takich jak chmury, owady, ptaki, opady atmosferyczne czy pofałdowania powierzchni ziemi [13]. Na wydajność radaru wpływa także zjawisko interferencji. Jego źródłem mogą być inne systemy, znajdujące się w zasięgu, pracujące w zbliżonym paśmie częstotliwościowym. Przypadkiem systemu wywołującego tego typu zakłócenia może być sygnał innego radaru, jak w przypadku radarów samochodowych, gdzie kilka radarów jest umieszczonych w obrębie jednego pojazdu. Podobna sytuacja może mieć miejsce na statku w przypadku nadejścia do anteny odbiorczej radaru sygnału sondującego z radaru dalekiego zasięgu innego statku, pracującego w podobnym paśmie częstotliwościowym. Oczywiście nie tylko radary mogą powodować interferencję. Innym często spotykanym źródłem są na przykład systemy łączności [14]. Ponadto interferencja w radarach może pojawiać się nawet w warunkach braku innych systemów, w wyniku propagacji wielodrogowej. W takiej sytuacji następuje w odbiorniku superpozycja sygnałów o różnych fazach. Zjawisko to jest szczególnie intensywne w przypadku wewnątrz budynków. Algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów realizowane w odbiorniku pozwalają na znaczne ograniczenie wpływu propagacji wielodrogowej [15]. Co więcej istnieją techniki, w których detekcja obiektu zachodzi właśnie w oparciu o to zjawisko [16]. Wymienione czynniki mogą skutkować niezerowym odczytem radaru nawet w przypadku braku obiektu. Jednym z parametrów opisujących systemy radarowe jest współczynnik fałszywych alarmów, FAR (ang. False Alarm Rate). Aby osiągnąć niską wartość tego parametru należy właściwie dobrać próg detekcji lub zastosować bardziej złożony algorytm detekcji obiektu niż klasyczne progowanie. Typowym algorytmem detekcji, mającym na celu poprawę tego parametru, jest CFAR (ang. Constant False Alarm Rate).



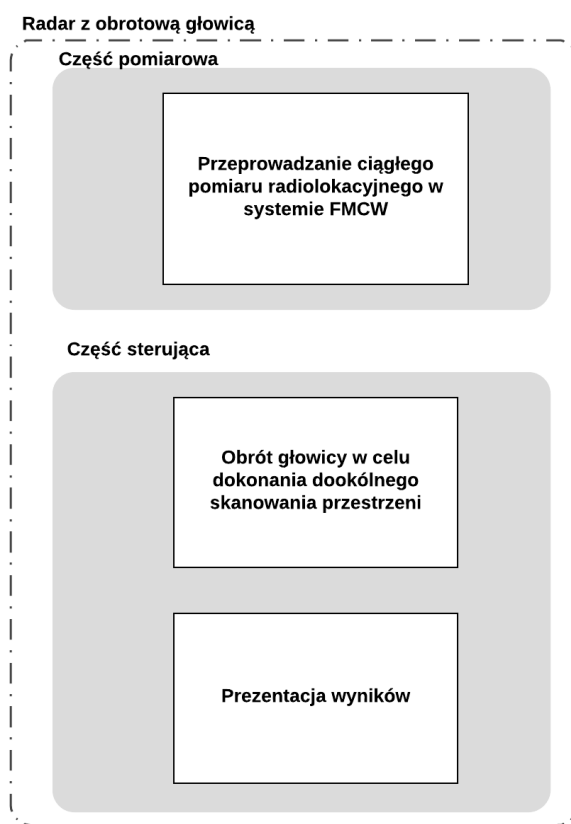
### 3. ARCHITEKTURA SYSTEMU

#### 3.1. Ogólne założenia

W celu realizacji systemu radarowego, spełniającego kryteria przyjęte jako cel niniejszej pracy, zastosowano architekturę bazującą na podziale systemu na dwie części. Ich rozróżnienia dokonuje się pod względem pełnionych funkcji w systemie. W ten sposób uzyskano podział na część pomiarową oraz sterującą, co zostało przedstawione na rysunku 3.1.

Pierwsza z nich odpowiada za przeprowadzanie pomiaru radiolokacyjnego, a więc większość bloków oprogramowania w niej zawartego będzie zajmować się zagadnieniami związanymi z operacjami na sygnałach, tj. nadawaniem, próbkowaniem oraz ich przetwarzaniem. W celu osiągnięcia możliwie najlepszych wyników dookólnego skanowania przestrzeni zakłada się, że pomiar ma zachodzić nieprzerwanie, zatem pożądana jest maksymalna możliwa separacja tej części oprogramowania od pozostałych operacji.

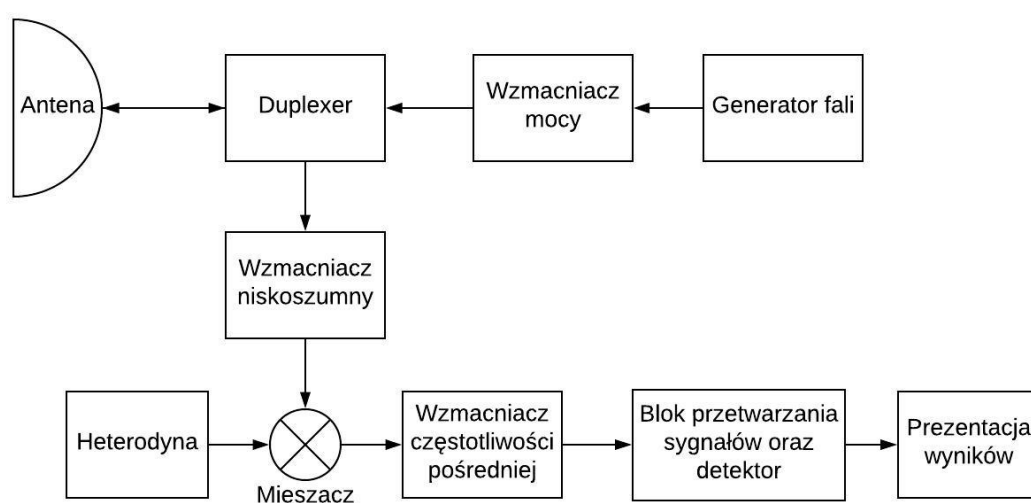
Część sterująca, ma za zadanie kontrolę ruchu obrotowej głowicy. Rozumie się przez to zarówno integrację elementów sprzętowych, niezbędnych do realizacji tej funkcji, jak również oprogramowanie bezpośrednio regulujące parametry ruchu głowicy. Ponadto zakłada się, że ta część jest odpowiedzialna za wszystkie funkcje systemu, których nie wykonuje blok pomiarowy, zatem przeprowadza również między innymi graficzną prezentację wyników.



Rys. 3.1. Ogólna koncepcja architektury systemu

### 3.2. Wymagania dotyczące warstwy sprzętowej

W dzisiejszych czasach radary mogą występować w niezwykle zróżnicowanych dziedzinach, a co za tym idzie mogą przybierać bardzo różne formy. Jednak niezależnie od tego, budowę sprzętową znaczącej większości urządzeń tego typu można przedstawić za pomocą niezwykle zbliżonych schematów blokowego. Schemat przedstawiony na rys. 2.2 jest prawdziwy dla niemal wszystkich urządzeń radarowych, pracujących z wykorzystaniem techniki FMCW. Jest to układ transceivera, czyli układu nadawczo-odbiorczego. Nadajnik ma za zadanie zapewnić zarówno odpowiednią moc sygnału wyjściowego aby umożliwić wykrycie obiektu w oczekiwanym zasięgu, jak również wygenerować falę zgodną z zastosowaną techniką, od której jest ściśle uzależniona budowa bloku generatora fali.



Rys. 3.2. Schemat blokowy budowy frontentu radarowego

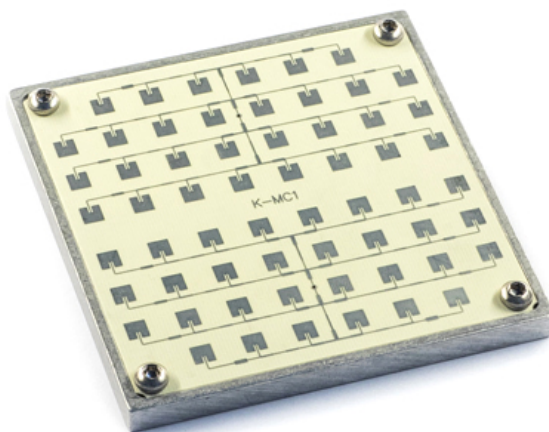
Jako pierwszy w torze odbiorczym stosuje się wzmacniacz niskoszumowy. Ponieważ amplituda szumów jest zazwyczaj głównym kryterium określającym ograniczenia użytkownika radaru, ważnym jest aby zapewnić możliwie najniższe szумы własne toru odbiorczego. Odbiornik jest zrealizowany w układzie superheterodyny, co oznacza iż następuje zjawisko przemiany częstotliwości odebranego sygnału, w wyniku jego zmieszania z sygnałem lokalnego oscylatora, zwanego heterodyną. Umożliwia to jego dalsze wzmocnienie oraz cyfrowe przetwarzanie. Ponadto odbiorniki superheterodynowe charakteryzują się wysoką czułością i wyższym wzmocnieniem, niż w przypadku wzmocnienia bezpośredniego. Duplexer umożliwia zastosowanie wspólnej anteny do nadawania i odbioru sygnału, jednocześnie zapewniając izolację między czułym układem odbiornika, a układem nadajnika przesyłającym wysoką moc. Układy stosowane w tym celu to między innymi cyrkulatory ferrytowe, zwieraki gazowe czy diody PIN [17]. Antena odpowiada za wypromieniowanie doprowadzonej energii w postaci fali elektromagnetycznej oraz odbiór fali odbitej od obiektu. W technice radarowej zazwyczaj pożądanym jest wykorzystanie anten kierunkowych o możliwie największym współczynniku kierunkowości. W ogólności aby uzyskać bardzo wąską wiązkę



promieniowania, antena powinna mieć dużą aperturę, której maksymalny wymiar jest często ograniczony wymaganiami projektowymi. Zatem istotnym wyzwaniem podczas tworzenia systemów radarowych może być osiągnięcie odpowiedniego kompromisu między szerokością głównej wiązki charakterystyki promieniowania anteny, a jej rozmiarem. Kolejnym istotnym parametrem anteny pod względem możliwości jej zastosowania w radiolokacji jest szerokość pasma, które im jest większe tym lepszą można uzyskać rozdzielczość pomiaru. Radary stosowane obecnie w branży motoryzacyjnej wykorzystują anteny o paśmie szerokości kilku GHz, dzięki czemu otrzymuje się rozdzielczość rzędu pojedynczych centymetrów. W antenie odbywa się pierwsza filtracja, jaka ma miejsce w całym torze odbiorczym. Stanowi ona swoisty filtr przestrzenny, pozwalający na eliminację z analizy sygnałów zakłócających, których kierunek nadejścia jest inny niż głównej wiązki charakterystyki promieniowania [18].

### **3.3. Realizacja sprzętowa systemu**

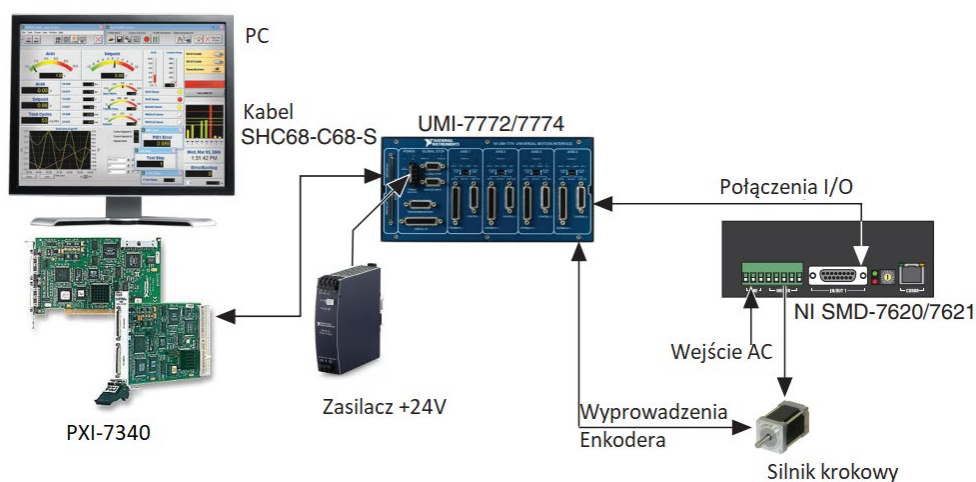
W celu zapewnienia powyższych wymagań dotyczących warstwy sprzętowej systemu, konkretnie jego części pomiarowej, wykorzystano gotowy frontend radarowy RFbeam K-MC1, który składa się z dwóch szyków antenowych oraz układu transceivera. Dużą zaletą zastosowanego układu jest wysoka skala integracji oraz gotowość do pracy z sygnałami bez konieczności stosowania żadnych dodatkowych elementów. Układ dostarcza sygnał wyjściowy w postaci pary sygnałów kwadraturowych I i Q. Zastosowany frontend pracuje na częstotliwości 24GHz i oferuje szerokość pasma rzędu 180MHz, co umożliwia osiągnięcie stosunkowo wysokiej rozdzielczości, poniżej 1m. Uwzględniając fakt, iż nielicencjonowane pasmo ISM na tej częstotliwości wynosi 250MHz to widać, iż rozdzielczość dla tego układu jest zbliżona do maksymalnej możliwej do osiągnięcia podczas pracy w paśmie 24GHz. Wykonywanie oprogramowania realizującego obsługę frontentu radarowego oraz cyfrowe przetwarzanie sygnałów odbywa się w układzie ewaluacyjnym National Instruments myRIO.



Rys. 3.3. Frontend radarowy RFbeam K-MC1 [19]



Poruszanie głowicą obrotową odbywa się przy pomocy silnika krokowego ST-34 firmy National Instruments, wyposażonego w enkoder, którego wykorzystanie dostarcza precyzyjną informację odnośnie położenia wału. Otrzymuje się zatem sprzężenie zwrotne. Jest ono kluczowe w niniejszym zastosowaniu, gdyż pożądane jest dokładne określenie pozycji w której nastąpiła detekcja obiektu. Możliwe jest to również bez wykorzystanie enkodera, poprzez zliczanie wykonanych przez silnik kroków. Jest to jednak metoda obciążona znacznym błędem, szczególnie w przypadku gdy poruszany obiekt posiada stosunkowo dużą masę. Wykluczyło to możliwość zastosowania tej techniki w niniejszym przypadku. Po umieszczeniu na głowicy układu myRIO wraz z zasilającym go akumulatorem oraz frontendu radarowego okazało się, iż przekłamanie wynikające z obciążenia jest na tyle duże, że dyskwalifikuje tę metodę. Aby móc kontrolować wykorzystany silnik oraz mieć dostęp do wartości dostarczanych przez enkoder, z poziomu oprogramowania na komputerze PC, konieczne było zastosowanie rozbudowanego układu urządzeń przeznaczonych do tego celu. Zastosowany system pozwala także osiągnąć możliwie najkrótszy czas opóźnienia między dostarczeniem wyników, a odczytem pozycji wału, co zapewnia bardzo dobrą synchronizację otrzymywanych wyników. W skład systemu wchodzi: sterownik silnika SMD-7621, sprzętowy interfejs UMI-7772 oraz moduł kontrolera ruchu PXI-7340. Strukturę Wszystkie wymienione urządzenia również są produktem firmy National Instruments. Ponadto całość jest sterowana z poziomu oprogramowania części sterującej, znajdującego się na komputerze PC.

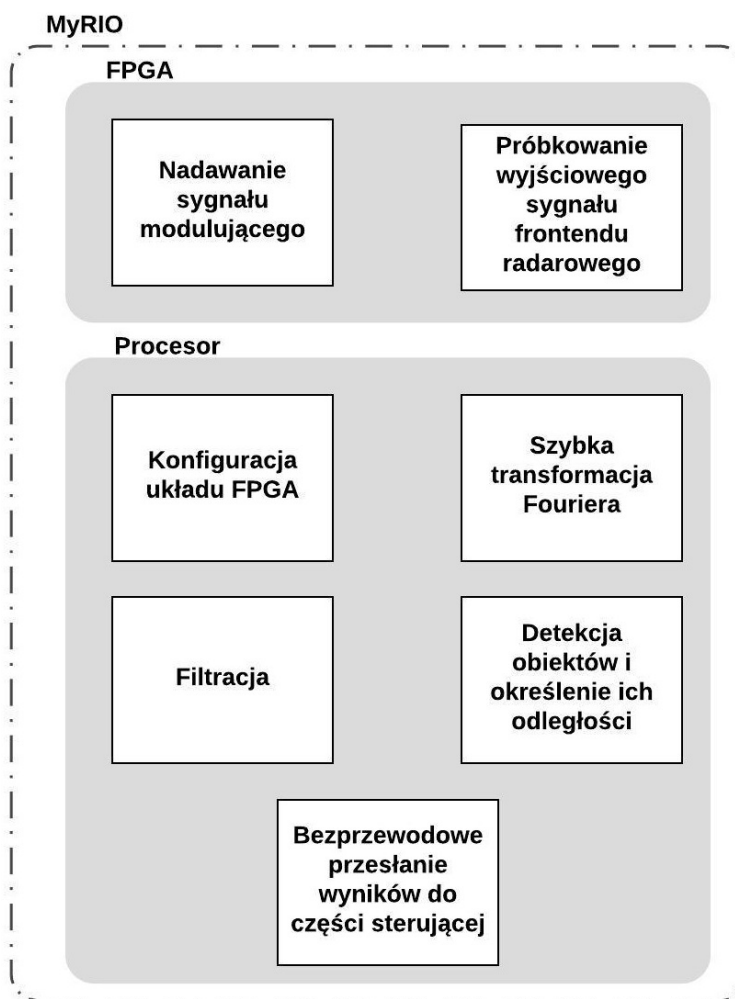


Rys. 3.4. Struktura systemu sprzętowego do obsługi ruchu obrotowego głowicy [20]

## 4. IMPLEMENTACJA SYSTEMU

### 4.1. Bloki oprogramowania części radarowej

Na podstawie przedstawionej powyżej zasady działania systemów radarowych można wyróżnić konkretne bloki oprogramowania, niezbędne do realizacji wymienionych funkcjonalności. Bloki te przedstawiono na rys. 4.1. Całość części pomiarowej została zrealizowana przy użyciu układu myRIO. Jej zadaniem jest przeprowadzanie pomiarów radarowych i przekazywanie otrzymanych wyników do części sterującej.

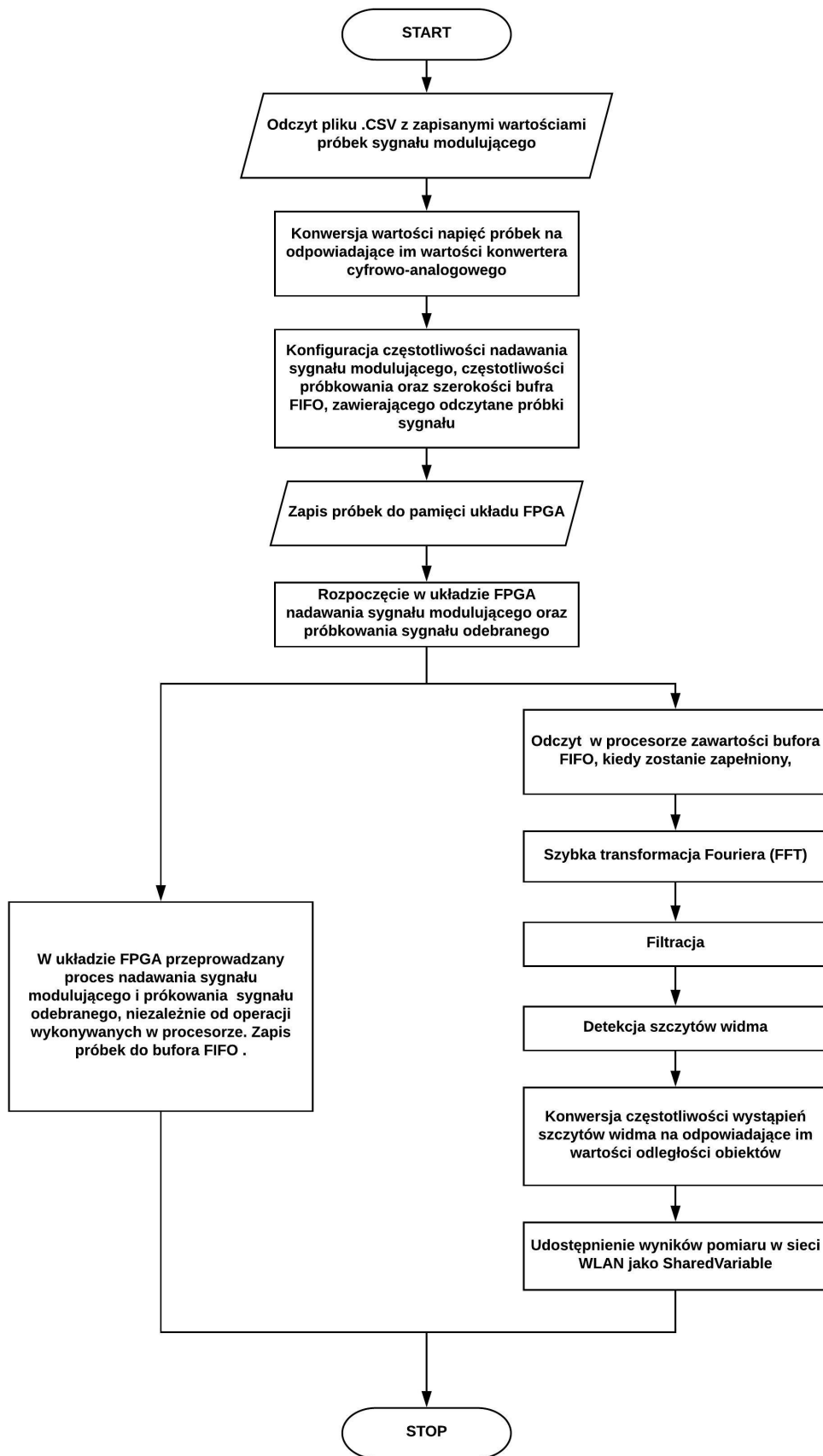


Rys. 4.1. Bloki oprogramowania części pomiarowej

Niewątpliwym atutem architektury zestawu ewaluacyjnego myRIO jest integracja układu FPGA oraz procesora ARM i systemu operacyjnego czasu rzeczywistego. Dzięki temu oprogramowanie części pomiarowej można podzielić na dwa bloki. Pierwszy z nich to oprogramowanie FPGA, odpowiedzialne za zachowanie odpowiednich częstotliwości nadawania oraz próbkowania. Drugi zaś stanowi program wykonywany w procesorze, odpowiedzialny za cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Oba programy zostały stworzone w środowisku programistycznym LabView.



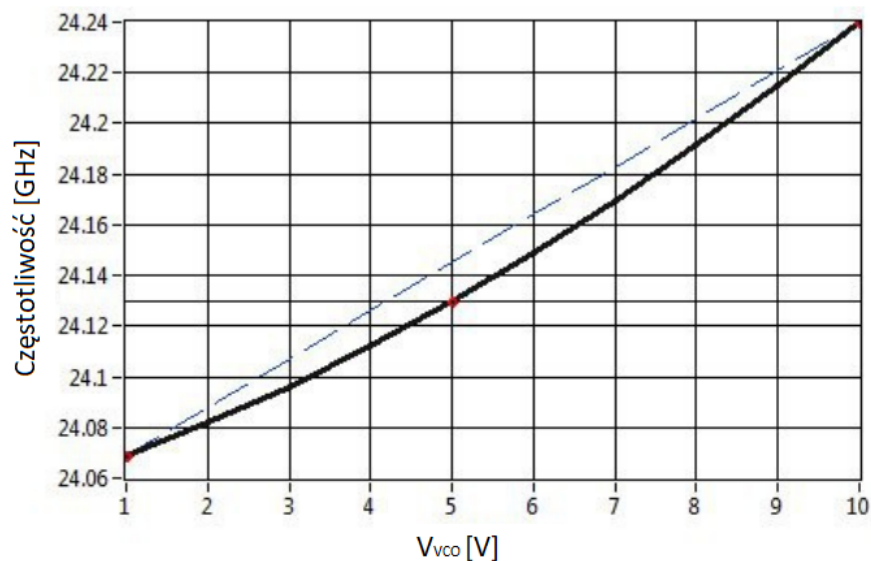
#### 4.2. Szczegółowy opis działania oprogramowania części pomiarowej



Rys. 4.2. Schemat blokowy algorytmu działania oprogramowania części pomiarowej

W celu realizacji założonych wymagań, w projekcie wykorzystano techniką FMCW, czyli częstotliwościowej modulacji fali ciągłej. Jako sygnał modulujący wybrano rampę, która, w przeciwieństwie do sygnału piłokształtnego, umożliwia eliminację wpływu przesunięcia Dopplera, wynikającego z niezerowej prędkości obiektu, na odczytaną odległość. Sygnał modulujący trafia z wyjścia analogowego układu myRIO do wejścia VCOin (ang. Voltage Controlled Oscillator), czyli wejścia sterującego układu oscylatora sterowanego napięciem, frontendu radarowego K-MC1. Fizycznym skutkiem podania na to wejście sygnału o zmiennej amplitudzie jest zmiana częstotliwości generowanego przez oscylator sygnału, a co za tym idzie również modulacja częstotliwościowa sygnału sondującego systemu radarowego. Ze względu na nieliniową charakterystykę zastosowanego układu VCO, w celu uzyskania liniowo zmieniającej się częstotliwości należało zastosować rampę o zmodyfikowanym kształcie. Współrzędne poszczególnych punktów wyznaczono w oparciu o dostarczoną charakterystykę układu przez producenta, która jest opisana równaniem 3.1.

$$F(V_{VCO}) = 0,000778 V_{VCO}^2 + 0,010333V_{VCO} + 24,058889 \quad (3.1)$$



Rys. 4.3. Charakterystyka  $F(V_{VCO})$  [21]

Próbki wygenerowanego sygnału, w postaci kolejnych napięć  $V_{VCO}$  zostały zapisane w pliku CSV (ang. Comma Separated Values), przekazanego do pamięci myRIO. Pierwszym krokiem po uruchomieniu programu jest odczyt próbek, w programie głównym, wykonywany w procesorze, oraz transformacja wartości napięć na odpowiadające im wartości konwertera cyfrowoanalogowego. Następnie otrzymany w ten sposób sygnał przekazywany jest do układu FPGA, w którego pamięci zostają zapisane gotowe próbki sygnału modulującego w kształcie rampy. Po zakończeniu zapisu rozpoczyna się jego nadawanie w układzie FPGA, polegające na wystawianiu na wyjścia analogowe kolejnych próbek oraz odczyt sygnału odebranego, pochodzącego z frontendu K-MC1. Wykorzystanie FPGA w tym celu daje gwarancje



uzyskania oczekiwanych, stałych częstotliwości nadawania i próbkowania. Odczytane wartości odebranego sygnału są zapisywane do bufora FIFO. Analizowany jest tylko jeden z pary sygnałów kwadraturowych, będących sygnałem wyjściowym frontendu radarowego. Jest to wystarczające dla detekcji odległości obiektów. Wykorzystanie obu sygnałów kwadraturowych byłoby niezbędne w przypadku jednoczesnego pomiaru prędkości wykrytych obiektów. Program główny steruje działaniem modułu FPGA. Przeprowadza zapis próbek sygnału nadawanego, jedna po drugiej do jego pamięci, ustawia flagę po zakończonym zapisie, która powoduje rozpoczęcie nadawania i odbioru, oraz ustawia częstotliwości nadawania i próbkowania.

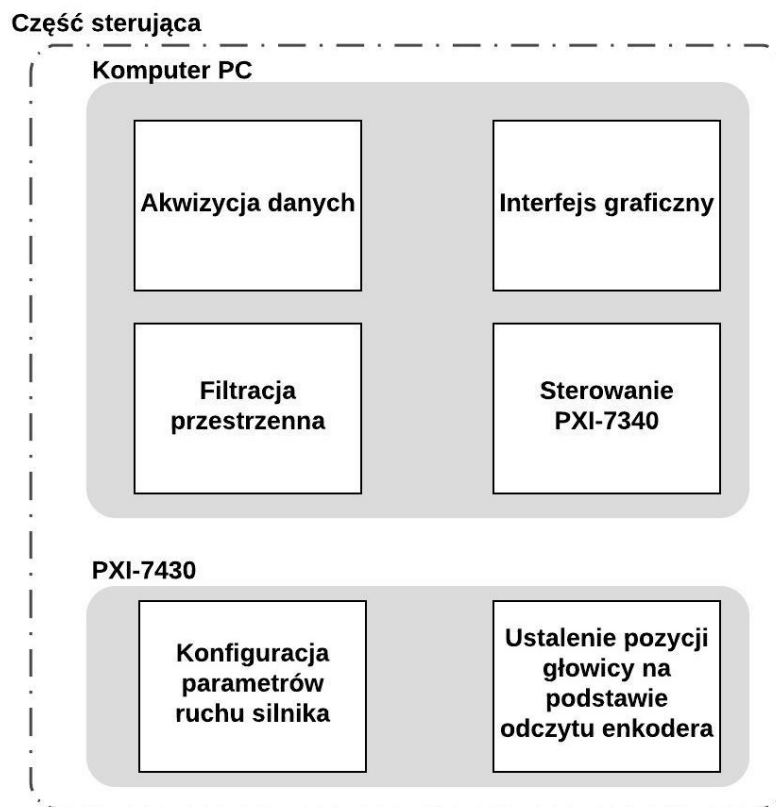
Odebrane próbki, po zapisaniu do bufora FIFO w układzie FPGA, zostają odczytane w programie głównym, w blokach liczących po 8196 próbek, które zostają poddane szybkiej transformacji Fouriera FFT. W ten sposób otrzymane zostaje widmo wyjściowego sygnału frontendu radarowego K-MC1, na podstawie którego można wykryć obiekt oraz określić jego odległość od radaru. Na podstawie położenia prążków widma tego sygnału wyznacza się dystans od obiektu. Program realizuje filtrację pasmoprzepustową, w której dolna częstotliwość odcięcia wynosi 40 Hz, co definiuje dokumentacja wykorzystywanego frontendu. Jest to najniższa częstotliwość sygnału, który niesie wartościową informację. W przypadku częstotliwości niższych nie jest możliwa detekcja obiektu, ponieważ między torem nadawczym i odbiorczym istnieje skończona izolacja następuje przenikanie sygnału z toru nadawczego, przez co na niższych częstotliwościach obserwuje się prążki widma pochodzące od częstotliwości fali nośnej, która po przemianie częstotliwości w odbiorniku heterodynowym przypada na częstotliwości bliskie składowej stałej. Górna częstotliwość odcięcia została wyznaczona emirycznie i wynosi 1.5 kHz.

W odfiltrowanym paśmie widma następuje detekcja szczytów w widmie. Następnie przeprowadzana jest detekcja progowa. Częstotliwości szczytów widma, których amplituda przekracza wartość progu, zostają przetransformowane na odległości. Tablica zawierająca otrzymane w ten sposób wyniki zostaje przesłana za pośrednictwem sieci WiFi do komputera, wchodzącego w skład części sterującej systemem, jako SharedVariable. Jest to mechanizm przekazywania zmiennej między różnymi programami, pracującymi na różnych urządzeniach.

#### **4.3. Bloki oprogramowania części sterującej**

W celu realizacji pożądaney, pełnej funkcjonalności systemu konieczna jest integracja ruchu obrotowej głowicy wraz z przedstawioną powyżej częścią radarową. Odpowiedzialna za to jest część sterująca. Połączenie obu części w celu wzajemnej komunikacji, przy pomocy przewodów, wymagałoby zastosowania złącza obrotowego. Postanowiono jednak skorzystać z alternatywnego rozwiązania i dokonać rozproszenia systemu, lokując część sterującą na komputerze PC, odciążając tym samym myRIO, które odpowiada jedynie za wyżej wymienione funkcje umożliwiające detekcję.





Rys. 4.4. Bloki oprogramowania części sterującej

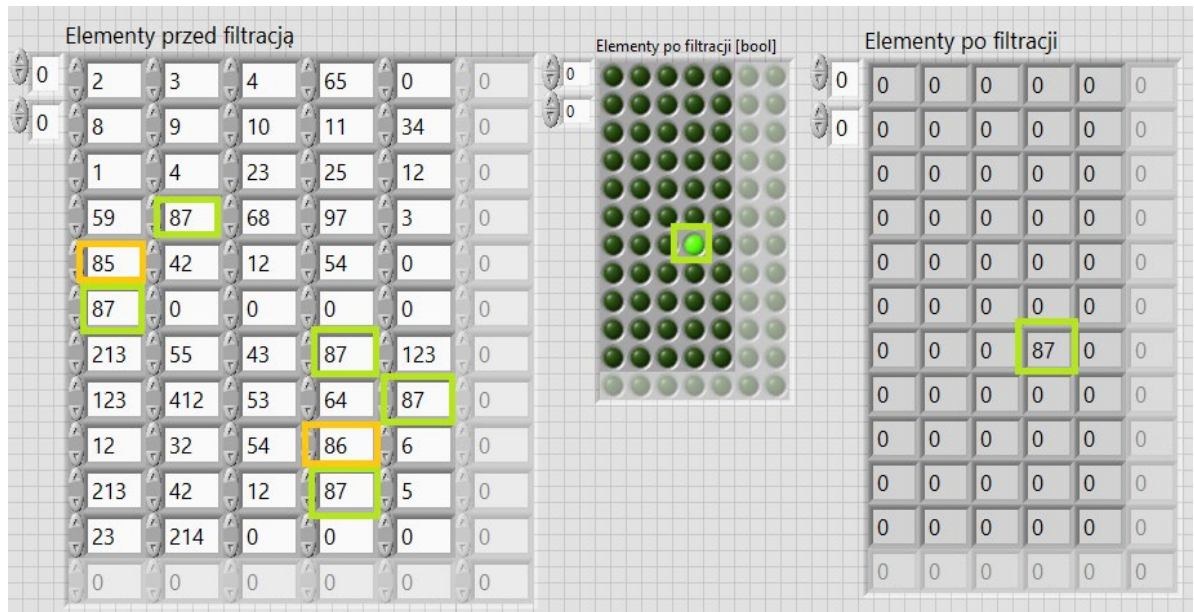
#### 4.4. Szczegółowy opis działania części sterującej

Najbardziej podstawową rolą części sterującej jest komunikacja z układem PXI-7340. To właśnie stanowiło czynnik narzucający konieczność zastosowania rozproszenia systemu lub zastosowania złącza obrotowego. Jest to urządzenie dzięki któremu możliwe jest sterowanie silnikiem krokowym obracającym głowicę oraz precyzyjny odczyt aktualnego położenia anteny radaru, co pozwala na dokładne określenie pozycji wykrytego obiektu.

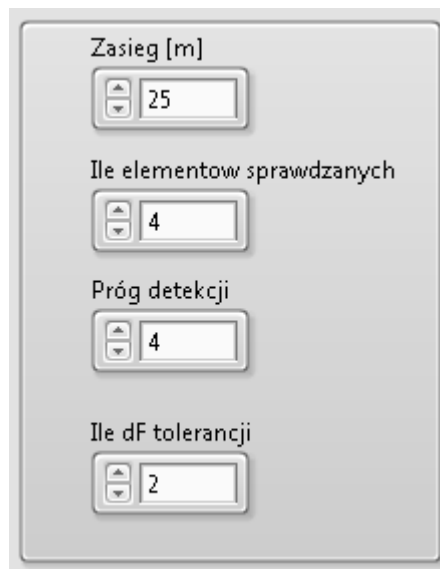
Drugą istotną rolą jaką pełni część sterująca jest przeprowadzania filtracji przestrzennej otrzymanych wyników. Jej stosowanie wynika z faktu, iż w przeciwieństwie do idealnego przypadku, kierunkowość wykorzystywanej anteny posiada skończoną wartość. Ponieważ pomiar jest wykonywany w trybie ciągłym, a wyniki są pobierane co 1 stopień obrotu to wykorzystanie anteny o wiązce promieniowania w płaszczyźnie horyzontalnej szerszej niż 1 stopień prowadzi do otrzymania kilkukrotnego wykrycia tego samego obiektu, a tym samym jego istotnego poszerzenia na etapie prezentacji wyników. Aby zminimalizować to zjawisko zastosowano algorytm filtracji przestrzennej. Jako parametry filtracji należy zadać szerokości wiązki  $n$ , wyrażonej w stopniach oraz próg detekcji, rozumiany jako ilość wystąpień obiektu w  $n$  sąsiadujących pozycjach. Podczas testów systemu wykazano, iż w niektórych wypadkach podczas oświetlania obiektu pojedyncze z  $n$  wyników świadczących o detekcji obiektu występowały na pozycjach sąsiednich do faktycznej. Należy przy tym pamiętać, iż radar ma możliwość określenia pozycji obiektu wyłącznie w pozycjach dyskretnych, określanych przez



rozmieszczenie prążków widma dF. Aby umożliwić detekcję również w takim wypadku, uzupełniono algorytm filtracji przestrzennej o trzeci parametr jakim jest tolerancja dF, oznaczająca ilość pozycji położenia obiektu o jakie może być oddalony wynik pomiaru, aby był zaliczany do wyników należących do tego samego obiektu. Poniżej przedstawiono działanie algorytmu dla szerokości wiązki 7 stopni, progu detekcji 6 oraz tolerancji 2 dF, gdzie  $dF = 1$ . Na rys. 3.4 wykryty obiekt znajduje się w odległości 87m.



Rys. 4.5. Filtracja przestrzenna

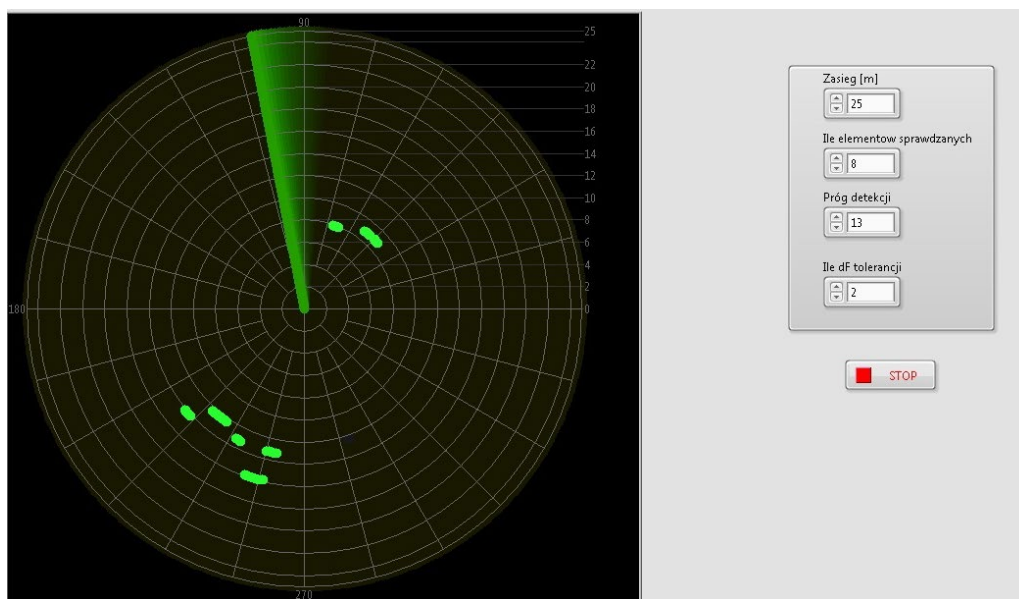


Rys. 4.6. Panel ustawień parametrów filtracji przestrzennej

Pierwszym krokiem jaki wykonuje program części sterującej po uruchomieniu jest wyzerowanie wskazań enkodera, co powoduje iż początkowa pozycja głowicy jest ustalana jako pozycja odpowiadająca 0stopni. Następnie inicjowany jest ruch silnika ze stałą prędkością, która nie może być zbyt duża, aby możliwe było dokonanie pomiaru na każdej z przemieszczanych pozycji. Następnie rozpoczyna się odczyt wyników pomiaru przekazywanych

w obrębie sieci bezprzewodowej WLAN przez układ myRIO. Odebrane wyniki są zapisywane do tablicy, przechowującej wyniki odczytu dla każdej z 360 pozycji, w kolumnie która odpowiada odczytanej w danym momencie pozycji z enkodera. Tablica wyników jest przekazywana do bloku filtracji przestrzennej, po przejściu przez który zostają zaprezentowane za pośrednictwem interfejsu graficznego.

Istotna jest również prędkość obrotu stolika, nie może ona być zbyt szybka aby umożliwić dokonanie pomiaru w każdym z kątów. Maksymalna prędkość obrotu może być zatem wyznaczona znając liczbę próbek sygnału odebranego jaka zostaje poddana operacji FFT, która wynosi 8192 oraz częstotliwość próbkowania, wynoszącą 250kHz. Oznacza to, że pełen pomiar w każdej z pozycji zajmuje nieco poniżej 33ms, zaś biorąc pod uwagę konieczność dokonania pomiaru w każdym z 360 położeń to prędkość obrotowa nie może być większa niż 12s/obr. Aby zwiększyć precyzję można spowolnić obrót dwukrotnie, co daje pewność, iż wszystkie próbki zostały pobrane dla jednego i tego samego kąta. W przeciwnym wypadku część z nich mogłaby pochodzić z kąta poprzedniego, co byłoby i tak pomijalnym błędem. Jednakże spowolnienie obrotu jest pożądane również ze względu na fakt, iż przy zbyt dużej szybkości wykorzystana konstrukcja platformy głowicy obrotowej wyraźnie drgała, co miało wpływ na dokładność przeprowadzanych pomiarów. Zastosowano prędkość 30s/obr, co zapewnia dobrą stabilność platformy, przy jednoczesnym zachowaniu stosunkowo wysokiej szybkości działania.



Rys. 4.7. Interfejs graficzny



## 5. TESTY SYSTEMU

### 5.1. Metodologia testów

Testy zrealizowanego projektu zostały przeprowadzone w dwojaki sposób. Pierwszy z nich dotyczył wyłączenie części pomiarowej. Miało na celu weryfikację poprawności wykonywanych operacji przetwarzania sygnałów i obejmował porównania wynikowego sygnału, będącego sygnałem odbitym od obiektu, z sygnałem referencyjnym. W obu wypadkach konfiguracja stanowiska pomiarowego była identyczna i polegała na umieszczeniu elementu silnie odbijającego fale elektromagnetyczne w pewnej odległości od radaru. W obu wypadkach zastosowano dokładnie ten sam frontend, różnica polegała jedynie na przeprowadzeniu operacji przetwarzania sygnałów w różnych oprogramowaniach.

Drugi rodzaj testów miał za zadanie zweryfikować działanie systemu jako całości. Obejmował on umieszczenie elementów silnie odbijających fale elektromagnetyczne, w różnych położeniach dookoła radaru. Sprawdzone przy tym poprawność działania następujących elementów:

- sterowanie ruchem głowicy obrotowej,
- synchronizacja odczytów enkodera z faktyczną pozycją,
- bezprzewodowe przesyłanie danych z części pomiarowej do sterującej,
- filtracja przestrzenna,
- graficzna prezentacja wyników.

Ponadto umożliwiło to określenie faktycznych parametrów otrzymanego systemu.

Jako elementy odbijające wykorzystano reflektory rogowe. Ten rodzaj reflektora charakteryzuje się faktem, iż jego kształt pozwala odbijać promieniowanie elektromagnetyczne z powrotem w kierunku jego źródła. Element o takiej geometrii, dodatkowo wykonany z materiału będącego dobrym przewodnikiem, będzie charakteryzował się dużą wartością współczynnika RCS (Radar Cross Section). Stanowi zatem doskonały obiekt do przeprowadzania testów systemu radarowego.

### 5.2. Środowisko przeprowadzania testów

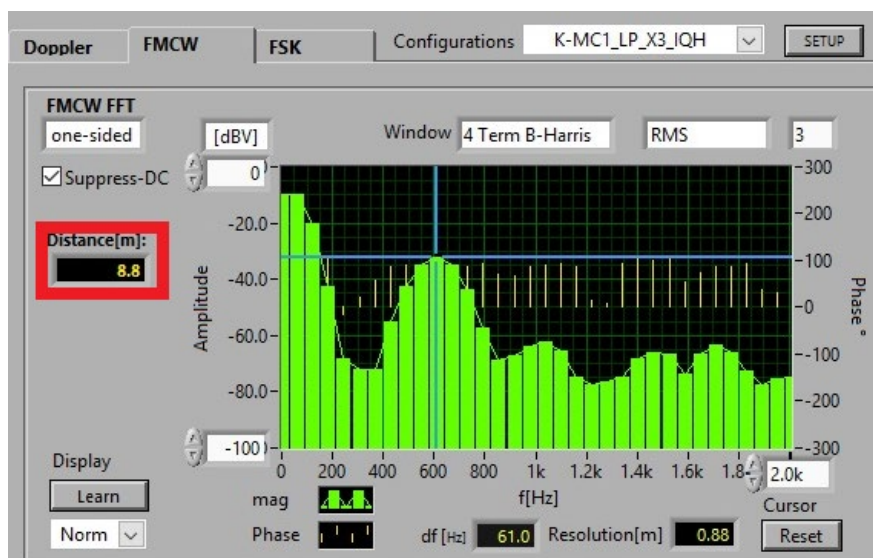
Jak już zostało wcześniej wspomniane, wykorzystany frontend radarowy charakteryzuje się skończoną izolacją pomiędzy torem nadawczym, a odbiorczym, co skutkuje przenikaniem sygnału sondującego do odbiornika, zwane jest to samomieszaniem się sygnału. Efektem tego zjawiska jest pojawienie się w widmie odebranego sygnału prążków o wysokich wartości dla częstotliwości do około 40Hz. Przy zadanych w projekcie parametrach sygnałów oznacza to ograniczenie minimalnej odległości, która może zostać wykryta, do ok. 1.6m.

Ponadto w radarach FMCW maksymalną rozdzielczość określa połowa długości fali odpowiadającej szerokości pasma systemu. Dla zaprojektowanego systemu jest to 170MHz, zatem minimalna odległość w jakiej muszą znajdować się dwa obiekty, aby nie zostały zakwalifikowane jako jeden element, wynosi 88cm.

Na podstawie wartości wyznaczonych powyżej parametrów uznano, iż najbardziej odpowiednim będzie przeprowadzenie testów systemu w środowisku zewnętrznym. Argumentem, który również przemawiał za tym aby nie odbywało się to wewnątrz budynków, był fakt iż zastosowany frontend nie posiada możliwości sterowania mocą wyjściowego sygnału. Nie pozwala to na dopasowanie jej do warunków środowiska propagacyjnego, a co za tym idzie wewnątrz niewielkich pomieszczeń z dużą liczbą różnych obiektów, otrzymuje się liczne echa sygnału, uniemożliwiające poprawną pracę systemu.

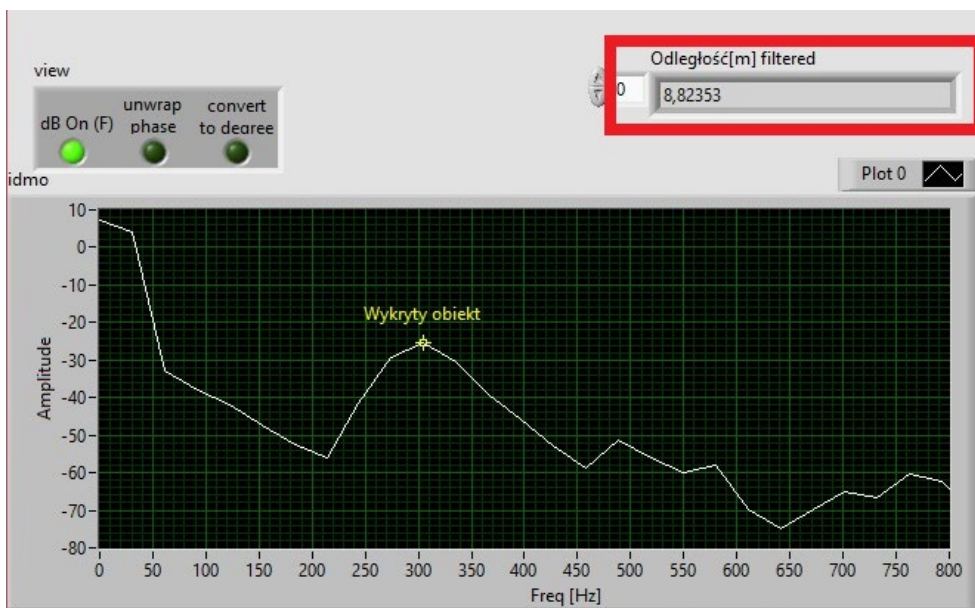
### 5.3. Test algorytmów przetwarzania sygnałów

W tym celu wykorzystano RFbeam ST200, będący układem ewaluacyjnym, przeznaczonym do pracy z frontendami radarowymi tego samego producenta, w tym także z wykorzystaniem w projekcie K-MC1. Jest to kompletny system sprzętowy do przetwarzania sygnałów radarowych, do obsługi którego wykorzystuje się aplikację ST200 Signal Explorer. Wyniki otrzymane dla tej konfiguracji zostały potraktowane jako referencyjne dla tych uzyskanych w wyniku przetwarzania sygnałów w urządzeniu myRIO.



Rys. 5.1. Widmo uzyskane w programie ST200 Signal Explorer

Pomiary w obu systemach zostały wykonane dla takich samych sygnałów modulujących. Jediną różnicą jest ilość próbek, dla których wykonywana jest operacja szybkiej transformacji Fouriera. Wynika z tego fakt, iż próbki odpowiadające tym samym odległościom w widmie wykreślonym w programie ST200 Signal Explorer znajdują się na częstotliwościach dwukrotnie większych niż w zaproponowanym programie. Na podstawie przedstawionych wyników widać, że kształt uzyskanego widma w obu przypadkach jest niemalże identyczny, a wyniki detekcji obiektu są dokładnie takie same. Test został przeprowadzony dla różnych wariantów rozmieszczenia obiektów odbijających i jednoznacznie wykazał słuszność stosowanych w projekcie algorytmów przetwarzania sygnałów.



Rys. 5.2. Widmo uzyskane w stworzonym programie

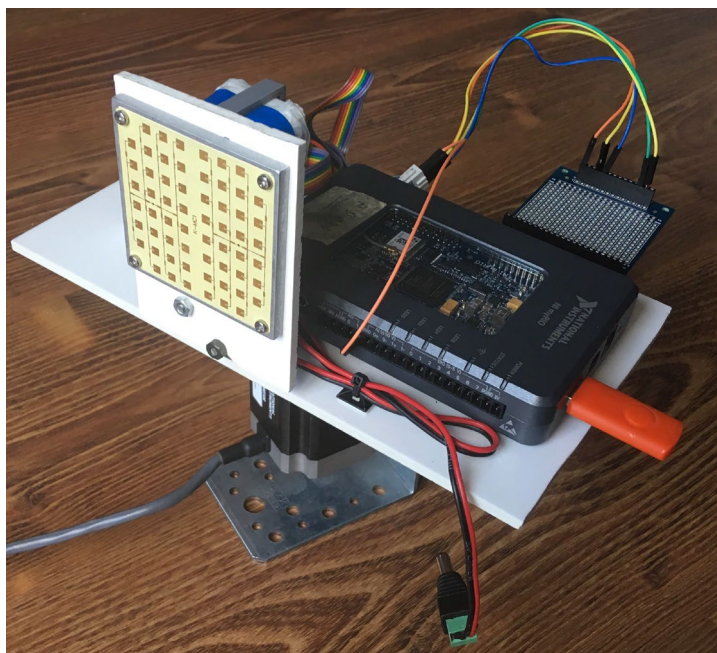
#### 5.4. Testy kompletnego systemu



Rys. 5.3. Radar oraz reflektory rogowe

Testy systemu jako całości pozwoliły zarówno na weryfikację poprawności działania poszczególnych elementów, jak i ich współpracy oraz prawidłowości wskazań radaru. Polegały one na umieszczeniu reflektorów rogowych w różnych pozycjach i obserwacji wyników pomiarów radiolokacyjnych.





Rys. 5.4. Elementy radaru z głowicą obrotową złożone w całość

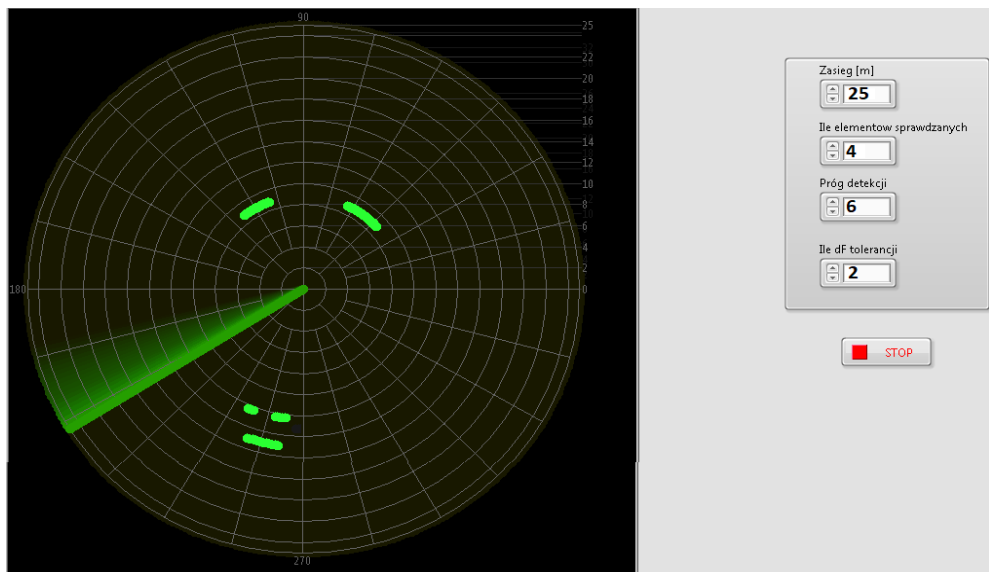
Scenę z pierwszego scenariusza przedstawiono na rysunkach 5.5. oraz 5.6., natomiast odpowiadający jej odczyt planszy radaru na rysunku 5.7. Zarówno detekcja obiektów jak i określenie ich odległości przebiegło pomyślnie. Należy pamiętać, iż radar FMCW może określać pozycję obiektów jedynie w dyskretnych pozycjach, których rozmieszczenie zależy przede wszystkim od wartości  $dF$ , czyli odstępu między kolejnymi prążkami w widmie sygnału odebranego. W stworzonym systemie kolejne pozycje znajdują się w odległości 0.88m od siebie, co jest równe teoretycznej rozdzielczości systemu. Należy zatem zakładać możliwość wystąpienia rozbieżności między rzeczywistym położeniem obiektu, a określonym przez radar, nawet w przypadku bezbłędnej operacji radaru. W scenariuszu testowym pozycja obiektów została przypisana do dyskretnej wartości, najbliższej odpowiadającej rzeczywistej odległości, co było możliwie najbardziej pożądanym zjawiskiem.



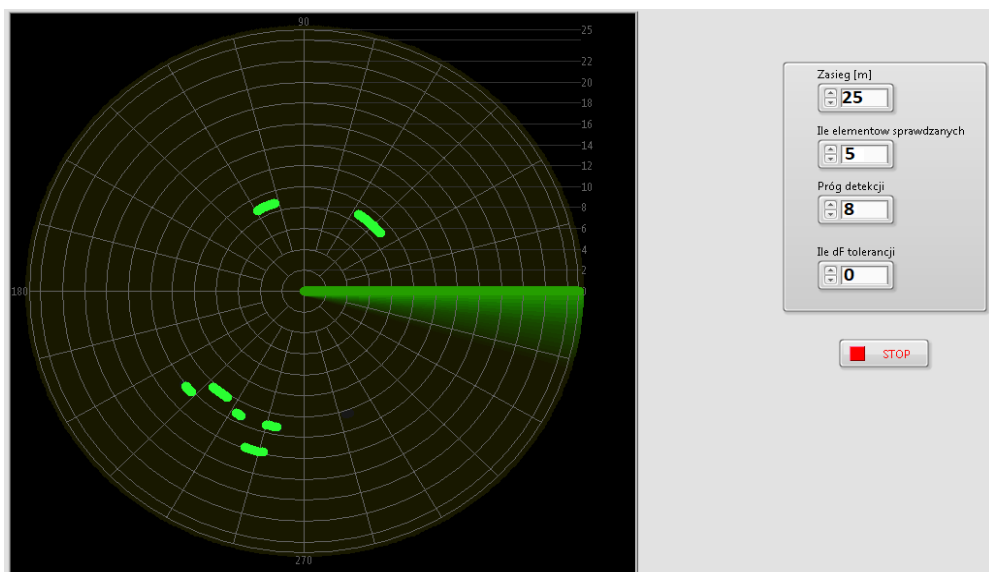
Rys. 5.5. Rozmieszczenie reflektorów (obszar odpowiadający zakresowi 160-20 stopni na planszy radaru, licząc od prawej strony zdjęcia)



Rys. 5.6. Obszar odpowiadający zakresowi 180 - 270 stopni na planszy radaru (patrząc od prawej strony zdjęcia)

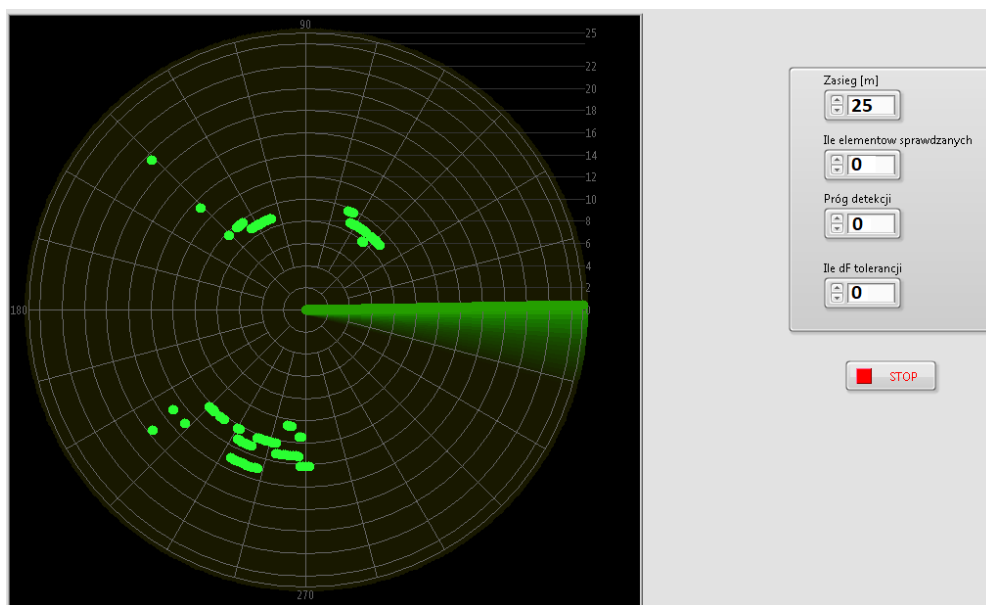


Rys. 5.7. Plansza radaru podczas pomiaru dla sceny przedstawionej na rys. 5.5. i 5.6.

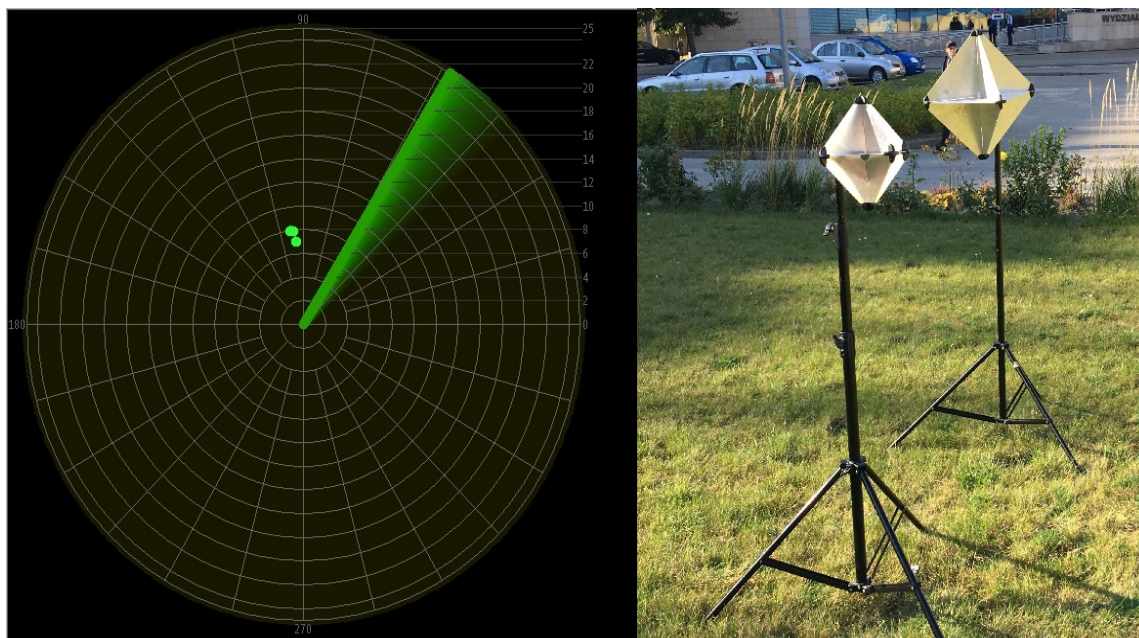


Rys. 5.8. Modyfikacja parametrów filtracji przestrzennej

Podczas powyższego pomiaru wykazano także wpływ filtracji przestrzennej na uzyskiwane rezultaty. Na rys. 4.7 przedstawiono wyniki w przypadku zmiany parametrów przeprowadzanej filtracji, zaś rys. 4.8 przedstawia sytuacje w przypadku jej całkowitej eliminacji. Filtracja przestrzenna pozwala na znaczącą redukcję wpływu niepożądanych sygnałów echa oraz zakłóceń, przenikających do odebranego sygnału, na uzyskiwane wyniki, lecz także modyfikacja jej parametrów pozwala na dopasowanie czułości systemu, co zostało ukazane na poniższych ilustracjach.



Rys. 5.9. Filtracja przestrzenna wyłączona



Rys. 5.10. Pomiar rozdzielczości przy rozmieszczeniu reflektorów jeden za drugim

Podczas testów oszacowano wartość maksymalnego zasięgu radaru, wynoszącą około 35 metrów. Określono również rozdzielczość systemu. Po pierwsze sprawdzono czy rzeczywista rozdzielczość w przypadku umieszczenia jednego obiektu za drugim pokrywa się z wartością teoretyczną, równą połowie długości fali odpowiadającej szerokości pasma, czyli 0.88m dla niniejszego projektu. W wyniku przeprowadzonych testów wykazano, iż dla rzeczywistego systemu taki odstęp okazał się wystarczający, aby elementy zostały zakwalifikowane jako dwa osobne, jednocześnie potwierdzając zgodność wartości teoretycznej z rzeczywistą.

Dokonano również pomiaru rozdzielczości w przypadku umieszczenia obiektów jeden obok drugiego, w tej samej odległości od radaru. Jej wartość jest definiowana przede wszystkim przez szerokość wiązki promieniowania w płaszczyźnie horyzontalnej, zastosowanego szyku antenowego. Producent deklaruje ją jako  $12^\circ$ , co zdaje się w wysokim stopniu odpowiadać rzeczywistości, jednocześnie powodując iż rozdzielczość można opisać wzorem:  $X = \tan(12^\circ) * D$ , gdzie D to odległość obiektów od radaru, zaś X to minimalna odległość między nimi aby zostały uznane jako dwa osobne obiekty.

Czas potrzebny na dokonanie pełnego, dookólnego skanowania przestrzeni wynosi 30s. Podczas testów okazało się, że ze względu na obciążenie poruszanej platformy ustawiana prędkość nie pokrywała się z rzeczywistą, co wynikało z faktu, iż nie każdy krok silnika powodował ruch wału. Efektem tego zjawiska było powstawanie istotnych przekłamań. Empirycznie ustalono, iż skonfigurowania silnika w taki sposób aby poruszał się z prędkością 20s/obrót pozwalało osiągnąć pożądaną prędkość 30s/obr.



## 6. WNIOSKI KOŃCOWE

Celem niniejszego projektu było stworzenie systemu radarowego z głowicą obrotową, który umożliwiłby detekcję obiektów oraz określałby ich odległość. Zastosowanie obrotowej głowicy dodatkowo umożliwia wykonywanie dookólnego skanowania przestrzeni.

W przedstawionym projekcie udało się zrealizować powyższe założenia. Powstały radar umożliwia detekcję obiektów oraz określa ich pozycję. Co więcej system cechuje się pewną mobilnością. Uzyskane parametry, takie jak dokładność, rozdzielczość oraz czas pełnego, dookólnego skanowania przestrzeni przyjmują w pełni zadawalające wartości, umożliwiające odnalezienie dla stworzonego systemu wielu praktycznych zastosowań.

Powstały projekt udowadnia, że technika radarowa staje się coraz bardziej dostępna i przystępna finansowo. Na bazie niedrogiego frontendu radarowego udało się stworzyć w pełni funkcjonalny system o dobrych parametrach. Możliwie jest jeszcze większe obniżenie kosztów w stosunku do zaproponowanego rozwiązania. W projekcie korzystano z dostępnych urządzeń, przez co część sterująca charakteryzuje się pewną redundancją. Jednak w przypadku budowania takiego systemu od podstaw, przy braku dostępu do urządzeń tego typu, możliwe jest zastąpienie wykorzystanych modułów zdecydowanie tańszymi oraz o mniejszych wymiarach. Umożliwiłoby to otrzymanie rozwiązania wysoce mobilnego. Pod względem wykorzystywanego sprzętu można by również rozważyć wykorzystanie frontendu radarowego o szerszym paśmie, co skutkowałoby poprawą rozdzielczości pomiaru.

Zaproponowany w niniejszej pracy system mógłby zostać w przyszłości rozwinięty o element, który znacząco przyczyniłby się do poprawy jego parametrów. Jest nim eliminacja wpływu wielodrogowości na otrzymywane wyniki. Jednakże najsukuteczniejsze rozwiązania tego typu, zaprezentowane w literaturze, wymagają zastosowania architektury MIMO (ang. Multiple Input Multiple Output) [22]. Jednakże wiązałoby się nie tylko z koniecznością zmian oprogramowania, lecz także struktury sprzętowej systemu. Takie rozwiązanie mogłoby skutkować przede wszystkim znaczącą poprawą skuteczności działania zaprojektowanego systemu w zamkniętych przestrzeniach z licznymi odbiciami, jak na przykład niewielkie pomieszczenia z wieloma elementami.

Potencjalnym obszarem zastosowań zaprojektowanego radaru jest lokalizowanie obiektów i obrazowanie w środowiskach o ograniczonej widoczności oraz wykorzystanie go jako komponentu systemów bezpieczeństwa w przestrzeniach przemysłowych, szczególnie w obszarach infrastruktury krytycznej.



## WYKAZ LITERATURY

- [1] M. A. Richards, "Fundamentals of Radar Signal Processing", McGraw-Hill Education, 2014, ISBN 0071798323
- [2] B. Molina, E. Olivares, C. E. Palau and M. Esteve, "A Multimodal Fingerprint-Based Indoor Positioning System for Airports," in IEEE Access, vol. 6, pp. 10092-10106, 2018.
- [3] J. W. Marck, A. Mohamoud, E. vd Houwen, R. van Heijster, "Indoor radar SLAM A radar application for vision and GPS denied environments," 2013 European Radar Conference, Nuremberg, 2013, pp. 471-474.
- [4] G.A.Moeness, "Through-the-wall Radar Imaging", CRC Press, 2010 , ISBN 9781439814765
- [5] T.Stupak, R.Wawruch, "Badanie właściwości detekcyjnych radaru pracującego na fali ciągłej" , Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni, 2009, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni
- [6] H.M. Jol, "Ground Penetrating Radar Theory and Applications", Elsevier Science, 2009, ISBN 0444533486, pp. 70-85
- [7] RF Tutorial Lesson 17: Simulating a Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) Radar System [dostęp 29.11.2018] Dostępny: [http://www.emagtech.com/wiki/index.php/RF\\_Tutorial\\_Lesson\\_17:\\_Simulating\\_a\\_Frequency-Modulated\\_Continuous-Wave\\_\(FMCW\)\\_Radar\\_System](http://www.emagtech.com/wiki/index.php/RF_Tutorial_Lesson_17:_Simulating_a_Frequency-Modulated_Continuous-Wave_(FMCW)_Radar_System)
- [8] Ł.Kulas, M. Płotka, Przestrzenie Inteligentne, „Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów w radiokomunikacji i technice radarowej”
- [9] L. Nicolaescu and T. Oroian, "Radar cross section," 5th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service. TELSIKS 2001. Proceedings of Papers (Cat. No.01EX517), Nis, Yugoslavia, 2001, pp. 65-68 vol.1.
- [10] Effective Aperture, [dostęp 29.11.2018] Dostępny: [http://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electronic\\_engineering/Effective\\_Aperture.pdf](http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Effective_Aperture.pdf)
- [11] Kissinger, Dietmar. (2012). Millimeter-Wave Receiver Concepts for 77 GHz Automotive Radar in Silicon-Germanium Technology. 10.1007/978-1-4614-2290-7.
- [12] J. Park, A. A. Korosov, M. Babiker, S. Sandven and J. Won, "Efficient Thermal Noise Removal for Sentinel-1 TOPSAR Cross-Polarization Channel," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 56, no. 3, pp. 1555-1565, March 2018.
- [13] A.Jakubiak, "Metody klasyfikacji radiolokacyjnych zakłóceń biernych", Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektronika, 2000, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej
- [14] N. Nartasilpa, A. Salim, D. Tuninetti and N. Devroye, "Communications System Performance and Design in the Presence of Radar Interference," in IEEE Transactions on Communications, vol. 66, no. 9, pp. 4170-4185, Sept. 2018.
- [15] Tan, Qinyan & Leung, Henry & Song, Yaoliang & Wang, Towe. (2014). Multipath Ghost Suppression for Through-the-Wall Radar. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 50. 2284-2292. 10.1109/TAES.2013.100241.
- [16] R. H. W. Graves, "Detection of airborne targets by a space-based radar using multipath interference," Proceedings of the 1991 IEEE National Radar Conference, Los Angeles, CA, USA, 1991, pp. 46-49.
- [17] Montgomery C.G., Principles of Microwave Circuits, The Institution of Engineering and Technology, 1987. ISBN: 978-0863411007
- [18] Merrill Skolnik, "Radar Handbook 3rd Ed", McGraw-Hill, 2008. ISBN: 978-0071485470
- [19] K-MC1 Radar Transceiver Product Details [dostęp 07.12.2018] <https://www.rfbeam.ch/product?id=15>



- [20] NI SMD-7620/7621 Stepper Drives and NI 73xx Motion Controllers [dostęp 29.11.2018]  
Dostępny: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376091a.pdf>
- [21] K-MC1 Radar Transceiver Datasheet [dostęp 29.11.2018] Dostępny:  
[https://www.rfbeam.ch/files/products/15/downloads/Datasheet\\_K-MC1.pdf](https://www.rfbeam.ch/files/products/15/downloads/Datasheet_K-MC1.pdf)
- [22] Y. Liu, B. Jiu, X. Xia, H. Liu and L. Zhang, "Height Measurement of Low-Angle Target Using MIMO Radar Under Multipath Interference," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 54, no. 2, pp. 808-818, April 2018

## SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2.1. Sygnały modulujące: a) sygnał piłokształtny b) rampa .....	10
Rys. 3.1. Ogólna koncepcja architektury systemu .....	14
Rys. 3.2. Schemat blokowy budowy frontendu radarowego .....	15
Rys. 3.3. Frontend radarowy RFbeam K-MC1 .....	16
Rys. 3.4. Struktura systemu sprzętowego do obsługi ruchu obrotowego głowicy .....	17
Rys. 4.1. Bloki oprogramowania części pomiarowej .....	18
Rys. 4.3. Charakterystyka $F(V_{vco})$ .....	20
Rys. 4.4. Bloki oprogramowania części sterującej .....	22
Rys. 4.5. Filtracja przestrzenna .....	23
Rys. 4.6. Panel ustawień parametrów filtracji przestrzennej .....	23
Rys. 4.7. Interfejs graficzny .....	24
Rys. 5.1. Widmo uzyskane w programie ST200 Signal Explorer .....	26
Rys. 5.2. Widmo uzyskane w stworzonym programie .....	27
Rys. 5.3. Radar oraz reflektory rogowe .....	27
Rys. 5.4. Elementy radaru z głowicą obrotową złożone w całość .....	28
Rys. 5.5. Rozmieszczenie reflektorów .....	28
Rys. 5.6. Obszar odpowiadający zakresowi 180 - 270 stopni na planszy radaru .....	29
Rys. 5.7. Plansza radaru podczas pomiaru dla sceny przedstawionej na rys. 5.5. i 5.6. ....	29
Rys. 5.8. Modyfikacja parametrów filtracji przestrzennej .....	29
Rys. 5.9. Filtracja przestrzenna wyłączona .....	30
Rys. 5.10. Pomiar rozdzielczości przy rozmieszczeniu reflektorów jeden za drugim .....	30

