

**RANCANG BANGUN SISTEM *FMCW RADAR BERBASIS SOFTWARE DEFINED RADIO DENGAN GNURADIO UNTUK MENDETEKSI, ESTIMASI JARAK, DAN KECEPATAN OBJEK***

***DESIGN OF FMCW RADAR BASED ON SOFTWARE DEFINED RADIO WITH GNURADIO FOR DETECTION, RANGE ESTIMATION, AND VELOCITY OF AN OBJECT***

**TUGAS AKHIR**

Disusun sebagai syarat mata kuliah Tugas Akhir  
Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi

Disusun oleh:  
**BIMA PANCARA HARYONO PUTRA**  
**1101210528**



**FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO  
UNIVERSITAS TELKOM  
SURABAYA  
2024**

**LEMBAR PENGESAHAN  
POPOSAL TUGAS AKHIR**

Judul = Rancang Bangun Sistem *FMCW* Radar Berbasis *Software Defined Radio* dengan *GNURadio* Untuk Mendeteksi, Estimasi Jarak, dan Kecepatan Objek  
Nama = Bima Pancara Haryono Putra  
NIM = 1101210528

Telah diseminarkan pada

Hari =  
Tanggal =  
Tempat =

Mengetahui/menyetujui

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Fannush Shofi Akbar, S.ST.  
20910026

Risdilah Mimma Untsa, S.ST., M.T.  
20910025

## ABSTRAK

Teknologi penginderaan semakin diperlukan di masa mendatang, salah satu teknik penginderaan dengan berbagai keunggulan adalah dengan radar. Radar *Frequency Modulated Continuous Wave* yang populer digunakan merupakan salah satu teknik yang ramai digunakan. Implementasi teknik ini kerap ditemukan di berbagai bidang, mulai dari otomotif hingga kesehatan.

Pada penelitian ini, telah dirancang radar FMCW berbasis *Software Defined Radio* dengan menggunakan GNURadio untuk melakukan deteksi, estimasi jarak, dan kecepatan dari suatu objek. Spesifikasi sistem radar yang dirancang ada pada frekuensi tengah 3 GHz, dengan bentuk modulasi *Triangular*. Direncanakan bahwa implementasi akan dilakukan dengan dua unit USRP dengan antena *log periodic*.

**Kata Kunci:** *FMCW, Radar, GNURadio*

## DAFTAR ISI

### LEMBAR PENGESAHAN

<b>ABSTRAK</b>	iii
----------------	-----

<b>DAFTAR ISI</b>	iv
-------------------	----

<b>DAFTAR GAMBAR</b>	vi
----------------------	----

<b>DAFTAR TABEL</b>	vii
---------------------	-----

<b>I PENDAHULUAN</b>	1
----------------------	---

1.1 Latar Belakang . . . . .	1
1.2 Rumusan Masalah . . . . .	2
1.3 Tujuan Penelitian . . . . .	3
1.4 Batasan Permasalahan . . . . .	3
1.5 Metode Penelitian . . . . .	3
1.6 Jadwal Penelitian . . . . .	4

<b>II KONSEP DASAR</b>	5
------------------------	---

2.1 Kajian Penelitian Terkait . . . . .	5
2.2 Radar . . . . .	9
2.3 Pengolahan Sinyal Radar . . . . .	12
2.3.1 Bentuk Gelombang Radar . . . . .	12
2.3.2 <i>Frequency Modulated Continuous Wave Radar</i> . . . . .	13
2.3.3 <i>Linear Frequency Modulated Continuous Wave Radar</i> . . . . .	16
2.3.4 Teknik Pengolahan Sinyal . . . . .	17
2.3.5 Perhitungan <i>Error</i> . . . . .	18
2.4 <i>Software Defined Radio</i> . . . . .	18
2.4.1 <i>Universal Software Radio Peripheral</i> . . . . .	18
2.4.2 <i>GNURadio</i> . . . . .	20

<b>III MODEL SISTEM DAN PERANCANGAN</b>	22
---	----

3.1 Alur Penelitian . . . . .	22
3.2 Studi Literatur . . . . .	23
3.3 Penentuan Parameter . . . . .	23

3.4	Perancangan Spesifikasi Sistem . . . . .	24
3.5	Implementasi Sistem . . . . .	26
3.6	Pengambilan Data . . . . .	27
3.7	Konfigurasi Pengujian . . . . .	28
	<b>DAFTAR REFERENSI</b>	<b>29</b>

## DAFTAR GAMBAR

1.1	Penggunaan Radar Otomotif	1
2.1	Skema Dasar Radar	10
2.2	Blok Diagram Radar	11
2.3	<i>Radar Cross Section</i>	12
2.4	Bentuk Gelombang Radar	13
2.5	Blok Diagram Radar FMCW	14
2.6	FMCW Dalam Domain Waktu	14
2.7	LFM Tipe Segitiga	16
2.8	LFM Tipe Gigi Gergaji	16
2.9	Detail Analisis LFM <i>Sawtooth</i>	17
2.10	USRP B210	19
2.11	Logo GNURadio	20
2.12	Contoh <i>Flowgraph</i> GNURadio	20
2.13	Contoh Hasil Desain Sistem GNURadio	21
3.1	<i>Flowchart</i> Penelitian	22
3.2	Gambar Perangkat Laptop Yang Digunakan	26
3.3	Alat USRP B210	26
3.4	Antena <i>Log Periodic</i> Pengujian	27
3.5	Lokasi Pengujian	27
3.6	Skema Penelitian	28
3.7	Konfigurasi Pengujian	28

## DAFTAR TABEL

1.1	Agenda Penelitian . . . . .	4
2.1	Penelitian Terdahulu . . . . .	5
2.2	Spesifikasi <i>USRP B210</i> . . . . .	19
3.1	Parameter Penelitian . . . . .	23
3.2	Parameter Pengujian . . . . .	23
3.3	Spesifikasi Sistem Radar . . . . .	24

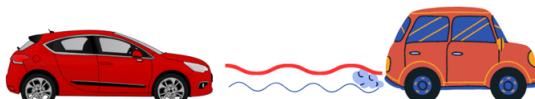
# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Untuk melakukan pendektsian objek, banyak cara yang dapat dilakukan agar hal itu bisa dicapai. Seperti contohnya adalah dengan menggunakan pengolahan visual dari hasil tangkapan kamera untuk melakukan analisis video, apalagi dengan menggunakan *multi-camera network* [1]. Adapula penggunaan gelombang suara yang memanfaatkan frekuensi suara pada jarak ultrasonik untuk mendekksi objek dan jarak dengan menggunakan mikrokontroler dan sensor ultrasonik [2]. Teknik lain yang menjadi alternatif adalah penggunaan gelombang elektromagnetik untuk mendekksi objek dan jarak suatu benda dengan menggunakan radar.

Radar sendiri adalah singkatan dari *radio detection and ranging* yang berarti bahwa fokus kegunaan radar adalah pada pendektsian dan estimasi jarak suatu benda. Dibandingkan dengan teknik pengukuran lain, keunggulan dari penggunaan radar adalah mampu mendekksi objek pada jarak yang jauh serta dapat menembus kabut. Keunggulannya tersebut adalah alasan awal digunakannya radar dahulu kala, yaitu pada medan perang untuk mendekksi pasukan sebelum nampak sehingga dapat melakukan persiapan terlebih dahulu.



**Gambar 1.1:** Penggunaan Radar Otomotif

Namun, saat zaman semakin modern dan peperangan mulai berkurang, maka radar pun beralih fungsi. Seperti contohnya radar pendekksi cuaca yang digunakan oleh badan klimatologi untuk memudahkan prediksi cuaca, radar pada menara pengawas bandara yang berguna dalam memonitor pergerakan pesawat di udara, dan radar pendekksi objek pada kendaraan otomotif yang berguna untuk mendekksi objek dan mencegah tabrakan seperti pada gambar 1.1.

Karena kemampuan radar dalam melakukan deteksi dan estimasi jarak tersebut, maka riset untuk mengembangkan implementasi radar dengan berbagai teknik

semakin banyak [3–6]. Salah satu diantaranya adalah implementasi *Real-Time Frequency Modulated Continous Wave Radar* yang dikembangkan dengan GNURadio dan digunakan pada *Software Defined Radio* [6]. Teknik *Frequency Modulated Continous Wave* atau yang disingkat dengan FMCW merupakan teknik transmisi secara kontinyu dari radar yang dapat memiliki energi yang lebih tinggi dengan *peak power* yang lebih rendah [7]. FMCW sangat populer digunakan pada industri, seperti untuk mendeteksi objek bawah tanah [8], pada sistem pengawasan maritim [9], dan bidang otomotif karena dapat bertahan pada berbagai cuaca, dapat menghasilkan performa yang sangat baik, dapat memprediksi jarak dan kecepatan suatu objek [10].

Sedangkan *Software Defined Radio*, atau dalam kasus ini Radar, merupakan penggunaan fungsionalitas dari sistem radar yang diatur lewat *Software* dengan maksud untuk memvirtualisasikan *hardware* dan membuat manajemen pemrograman yang dilakukan menjadi lebih mudah [11]. Dengan menggunakan SDR lewat *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) sebagai perangkat kerasnya, maka proses riset dan pengembangan menjadi lebih murah, dikarenakan tidak diperlukannya fabrikasi material tiap uji coba pada frekuensi tertentu. Peneliti hanya perlu memprogram USRP yang dimilikinya untuk menghasilkan frekuensi tertentu yang mereka inginkan. Salah satu alat yang dapat digunakan dalam melakukan pemrograman terhadap USRP adalah GNURadio.

GNURadio merupakan aplikasi tak berbayar yang berada dibawah lisensi *GNU General Public License* untuk mempelajari pembuatan dan pengimplementasian sistem *software defined radio*. Dengan melakukan pemrograman pada GNURadio untuk melakukan antarmuka dengan USRP yang dimiliki, peneliti dapat menentukan berapa frekuensi hingga *sampling rate* yang diinginkan [12].

Oleh karena itu, pada proposal ini dilakukan “Rancang Bangun Sistem *FMCW Radar Berbasis Software Defined Radio dengan GNURadio Untuk Mendeteksi, Estimasi Jarak, dan Kecepatan Objek*” sehingga dapat membuktikan bahwa sistem yang dirancang dapat melakukan pendekstian objek dan estimasi jarak.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dipaparkan diatas, maka ditemukannya rumusan masalah, yaitu:

1. Bagaimana rancangan sistem radar FMCW berbasis USRP B210 menggunakan GNURadio?

2. Bagaimana sistem radar FMCW berbasis USRP B210 yang telah dirancang dapat mendeteksi, mengestimasi jarak, dan kecepatan objek?
3. Bagaimana tingkat keakurasiannya dari sistem radar FMCW pada USRP dalam mendeteksi, melakukan estimasi jarak, dan kecepatan objek?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Dari rumusan masalah yang sudah didapatkan, maka bisa diambil beberapa tujuan yang ingin dicapai oleh penulis, yaitu:

1. Untuk melakukan perancangan sistem radar FMCW berbasis USRP B210 menggunakan GNURadio.
2. Untuk melakukan pengujian deteksi, estimasi jarak, dan kecepatan objek dari sistem radar FMCW pada USRP B210.
3. Untuk mengetahui tingkat keakurasiannya pendekripsi, estimasi jarak, dan kecepatan objek menggunakan radar FMCW pada USRP.

### **1.4 Batasan Permasalahan**

Hal yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah.

1. Parameter yang diidentifikasi pada rancangan bangun ini adalah resolusi jarak, tingkat keakurasiannya, dan kecepatan.
2. Pengujian sistem dengan menggunakan USRP B210 untuk melakukan pendekripsi, estimasi jarak, dan kecepatan objek.
3. Perangkat lunak yang digunakan adalah GNURadio.
4. Antena yang digunakan adalah antena *Log Periodik*
5. Frekuensi kerja radar pada 3 GHz.
6. Objek deteksi adalah kendaraan empat roda.

### **1.5 Metode Penelitian**

Dalam melakukan pengerjaan Tugas Akhir yang diajukan, penyelesaian yang digunakan adalah dengan beberapa pendekatan yaitu: studi literatur, simulasi, analisis statistik, perancangan, dan implementasi.

## 1.6 Jadwal Penelitian

Untuk memastikan proposal ini berjalan dengan lancar, maka diperlukannya penentuan capaian yang ingin diraih pada suatu periode yang sudah ditentukan. Dengan terainnya capaian tersebut maka tahapan selanjutnya dapat mulai dilakukan.

**Tabel 1.1:** Agenda Penelitian

No.	Deskripsi Tahapan	Durasi	Tanggal	<i>Milestone</i>
1.	Desain Sistem	1 bulan	1 September 2024 - 30 September 2024	Diagram blok dan simulasi
2.	Implementasi dan pengujian	1 bulan	1 Oktober 2024 - 31 Oktober 2024	Pengujian sistem selesai
3.	Penyusunan laporan Tugas Akhir	2 minggu	1 November 2024 - 15 November 2024	Buku Tugas Akhir selesai

## **BAB II**

### **KONSEP DASAR**

#### **2.1 Kajian Penelitian Terkait**

Banyak sekali referensi yang menjadi bagian besar dalam tertulisnya proposal ini, referensi tersebut terdiri atas berbagai macam jenis literatur dari sumber yang dapat diakses secara daring. Tak sedikit pula literatur tersebut menjadi alasan besar latar belakang dari proposal ini dilahirkan, berikut adalah beberapa penelitian terdahulu yang menjadi referensi dalam melakukan penyusunan proposal ini :

**Tabel 2.1:** Penelitian Terdahulu

No.	Judul	Penulis	Hasil
1.	<i>Respiratory and Heart Rate Detection Using Continuous-Wave Radar Testbed Implemented in GNU Radio (2022)</i>	Lenz, Isabella; Holtom, Jacob; Herschfelt, Andrew; Rong, Yu; Bliss, Daniel	Penggunaan radar CW untuk memonitor detak jantung dan pernapasan menggunakan GNURadio dan USRP X310. Proses pengolahan data secara langsung dapat dilakukan dengan hasil estimasi di dalam jarak 5 BPM dibanding dengan alat monitor detak jantung.

2.	<i>Development of L-Band FMCW Radar on SDR using GNU RADIO (2024)</i>	Wankhede, Animesh; De, Sampurna	Penggunaan radar FMCW pada pita frekuensi kelas L yang di aplikasikan sebagai radar penembus tanah menunjukkan hasil yang efektif dalam melakukan deteksi dan <i>imaging</i> objek dengan akurasi dan resolusi tinggi.
3.	<i>FMCW Radar With Enhanced Resolution and Processing Time by Beam Switching (2021)</i>	Hilario Re, Pascual D.; Comite, Davide; Podilchak, Symon K.; Alistarh, Cristian A.; Goussetis, George; Sellathurai, Mathini; Thompson, John; Lee, Jaesup	Pengimplementasian radar FMCW pada pita frekuensi kelas K dengan antena <i>array</i> dan <i>beamforming</i> untuk sistem deteksi arah pada kendaraan otomotif. Dengan penggunaan frekuensi 24 GHz, radar mampu mendeteksi objek dengan jarak $2^\circ$ .
4.	<i>An X-band FMCW Radar Demonstrator Based on an SDR Platform (2020)</i>	Dabrowski, Grzegorz; Stasiak, Krzysztof; Drozdowicz, Jędrzej; Gromek, Damian; Samczynski, Piotr	Desain dan implementasi radar FMCW dengan <i>bandwidth</i> 1 GHz untuk mendapatkan resolusi jarak yang kecil dilakukan, didapati hasil pengujian yang memuaskan dengan menunjukkan adanya pergerakan pada daerah yang ditandai memiliki banyak aktivitas.

5.	<p><i>Single Target Recognition Using a Low-Cost FMCW Radar Based on Spectrum Analysis</i> (2020)</p>	<p>Rizik, Ali; Tavanti, Emanuele; Vio, Roberto; Delucchi, Alessandro; Chible, Hussien; Randazzo, Andrea; Caviglia, Daniele D.</p>	<p>Implementasi dan pengolahan sinyal radar dilakukan dengan melakukan klasifikasi terhadap data yang diterima. Klasifikasi dilakukan dengan menggunakan <i>Support Vector Machine</i> (SVM), didapati hasil menunjukkan hasil akurasi klasifikasi target mencapai 100%.</p>
6.	<p><i>Educational Low-Cost C-Band FMCW Radar System Comprising Commercial Off-the-Shelf Components for Indoor Through-Wall Object Detection</i> (2021)</p>	<p>Jeong, Hyunmin; Kim, Sangkil</p>	<p>Desain dan implementasi radar FMCW pada frekuensi kelas C dilakukan menggunakan komponen elektronik yang mudah didapat di pasar. Implementasi dilakukan dengan skenario pengujian dalam ruangan dan tembus dinding. Didapatkan hasil rata rata akurasi sekitar 5.6 cm dibanding data asli.</p>

7.	<p><i>Modified FMCW system for non-contact sensing of human respiration (2020)</i></p>	<p>Pramudita, Aloysius Adya; Suratman, Fiky Y.; Arseno, Dharu</p>	<p>Dengan melakukan modifikasi pada pendektsian aktivitas pernafasan lewat pergeseran kecil, khususnya pada pengolahan data fasa setelah filter <i>Low Pass</i>. Didapatkan hasil bahwa desain modifikasi mampu mendekksi waktu dan amplitudo pernafasan, serta lokasi dari target.</p>
8.	<p><i>FMCW Radar for Noncontact Bridge Structure Displacement Estimation (2023)</i></p>	<p>Pramudita, Aloysius Adya; Lin, Ding-Bing; Dhiyani, Azizka Ayu; Ryanu, Harfan Hian; Adiprabowo, Tjahjo; Yudha, Erfansyah Ali</p>	<p>Dilakukan implementasi radar FMCW pada frekuensi 24 GHz dengan <i>bandwidth</i> 150 MHz untuk mendekksi pergeseran kecil pada bangunan jembatan. Dengan menggunakan analisis fasa untuk mendapat resolusi yang baik dalam melakukan pendektsian, didapat hasil bahwa metode berhasil dilakukan dengan kondisi banyak <i>noise</i> dan nilai SNR rendah dengan rata rata galat 0.13 mm.</p>

9.	<i>A Novel Scheme of High-Precision Heart Rate Detection With a mm-Wave FMCW Radar (2023)</i>	Zhou, Min; Liu, Yunxue; Wu, Shie; Wang, Chengyou; Chen, Zekun; Li, Hongfei	Penggunaan radar FMCW dengan gelombang milimeter untuk monitor detak jantung telah banyak dilakukan. Sehingga usaha peningkatan akurasi menjadi arah selanjutnya, dengan implementasi algoritma <i>Variable Mode Extraction</i> sinyal detak jantung di ambil dan teknik pengukuran frekuensi <i>Double-CZT</i> dilakukan. Hasil menunjukkan tingkat akurasi yang meningkat dengan rata rata eror absolut kurang dari 1 bpm, selain itu nilai SNR meningkat sehingga estimasi akurasi detak jantung juga meningkat.
----	---	---	---

## 2.2 Radar

Penggunaan gelombang elektromagnetik sebagai sarana untuk mendeteksi objek adalah konsep dasar dari radar. Radar sendiri merupakan singkatan dari *Radio Detection and Ranging*, dari situ sangat nampak sekali tujuan dari penggunaan alat ini, yaitu untuk mendeteksi sesuatu dan mengukur jarak dengan menggunakan gelombang radio.

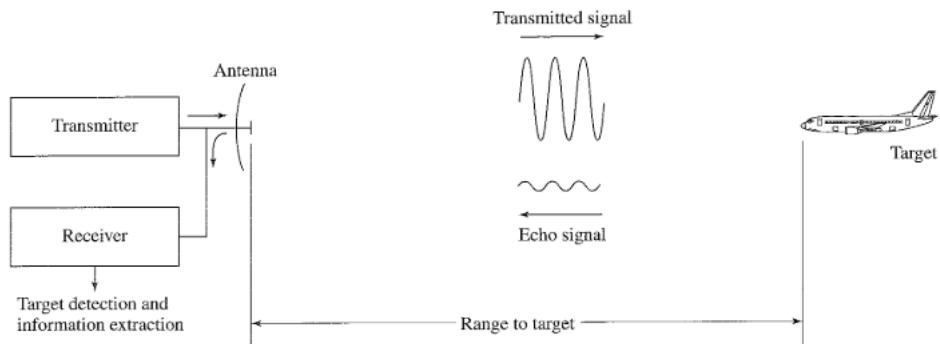
Cara kerja dari radar adalah dengan memancarkan gelombang di dalam ruang bebas yang kemudian radar akan mendeteksi gelombang pantulan dari

objek tersebut. Adanya gelombang yang terpantul ini tidak hanya menunjukkan keberadaan dari suatu objek, namun dengan membandingkan gelombang pantulan yang diterima dengan gelombang yang dikirimkan maka informasi tentang objek yang terdeteksi dapat didapat [13].

$$R = \frac{cT_R}{2} \quad (2.1)$$

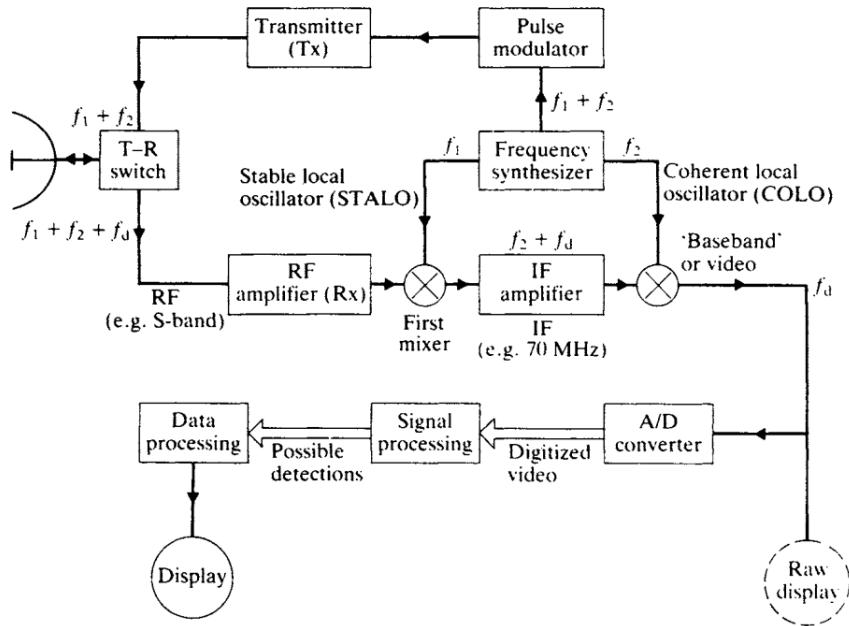
Persamaan 2.1 menjelaskan jarak antara target dengan antena, dengan  $T_R$  sebagai waktu sinyal radar bergerak secara bolak balik dari dan menuju objek. Karena radar memakai gelombang elektromagnetik, maka  $c$  memiliki kecepatan yang sama dengan cahaya, yaitu  $3 \times 10^8$ .

Pada gambar 2.1 berikut, skema dan konsep dasar dari cara kerja radar dapat diamati. Terlihat bahwa sinyal yang dikirimkan akan mengenai target, dalam kasus ini adalah pesawat, lalu sinyal yang mengenai objek akan kembali dengan sinyal yang lebih kecil dengan amplitudo yang lebih rendah. Perubahan pada gelombang yang terpantul dapat menggambarkan perilaku yang sedang ditunjukkan oleh objek yang di deteksi, mulai dari pengurangan amplitudo hingga pergeseran fasa.



**Gambar 2.1:** Skema Dasar Radar [13]

Gambar 2.2 menunjukkan blok diagram dari sistem radar pulsa sederhana. Dapat dilihat beberapa komponen yang membentuk seluruh sistem radar, semua komponen ini memiliki perannya sendiri sehingga proses pengiriman dan pendeksi sinyal dapat dilakukan. Bila seluruh sistem bekerja dengan baik, maka proses yang ditunjukkan pada penjelasan skema dasar radar dapat berjalan dengan lancar.



**Gambar 2.2:** Blok Diagram Radar Sederhana [14]

Persamaan radar berguna untuk menghubungkan seluruh komponen yang terdapat pada suatu sistem radar. Hubungan di antara seluruh komponen tersebut akan di perlihatkan secara matematis, sehingga penerapannya pada suatu alat akan terlihat dengan jelas. Dengan adanya beberapa persamaan ini, proses desain suatu radar akan menjadi lebih mudah dilakukan dan prediksi dari hasil radar yang dirancang bisa didapatkan.

Salah satu persamaan pada radar adalah *maximum unambiguous range*, yang bersimbol  $R_{un}$ , dengan  $T_p$  sebagai periode pengulangan pulsa, yang bernilai  $\frac{1}{f_p}$ , dengan  $f_p$  sebagai frekuensi pengulangan pulsa.

$$R_{un} = \frac{cT_p}{2} = \frac{c}{2f_p} \quad (2.2)$$

Bila antena yang digunakan dalam memancarkan gelombang elektromagnetika radar bersifat isotrop, maka kerapatan daya pada jarak  $R$  dari radar akan sama dengan daya di transmisi ( $P_t$ ) dibagi luas permukaan  $4\pi R^2$  dari sebuah bola imajiner dengan radius  $R$ , atau dapat didefinisikan pula dengan.

$$P = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (2.3)$$

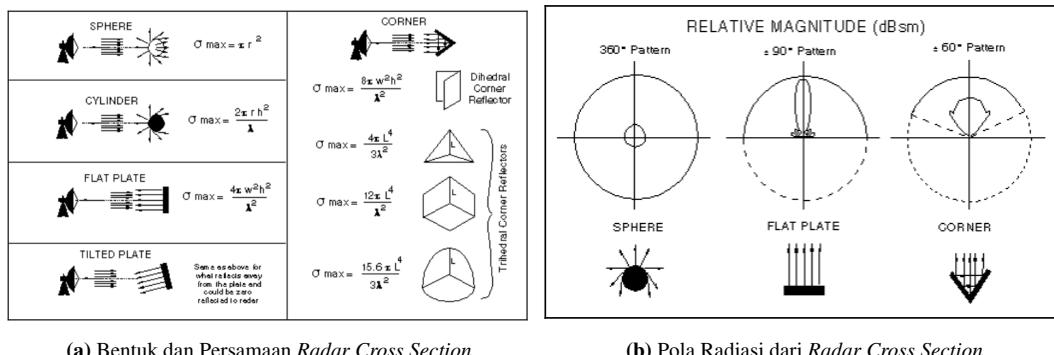
Namun, pada kenyataannya radar seringkali menggunakan antena *directive* untuk mengkonsentrasi daya yang terradiasi pada arah tertentu. Maka kerapatan dayanya adalah

$$\text{Kerapatan daya antena } \textit{directional} = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (2.4)$$

Dengan  $G$  sebagai *gain* maksimum suatu antena, yaitu

$$G = \frac{\text{Kerapatan daya maksimum dari antena } \textit{directional}}{\text{Kerapatan daya antena Isotrop lossless dengan daya yang sama}} \quad (2.5)$$

*Radar Cross Section* atau yang sering disingkat dengan RCS merupakan daerah suatu objek dari target yang dapat terdeteksi oleh suatu radar. Area tersebut diperhitungkan dengan mempertimbangkan bentuk dari objek dan interaksinya dengan gelombang elektromagnetik. Pada 2.3 ditunjukkan beberapa sifat RCS dan persamaannya.



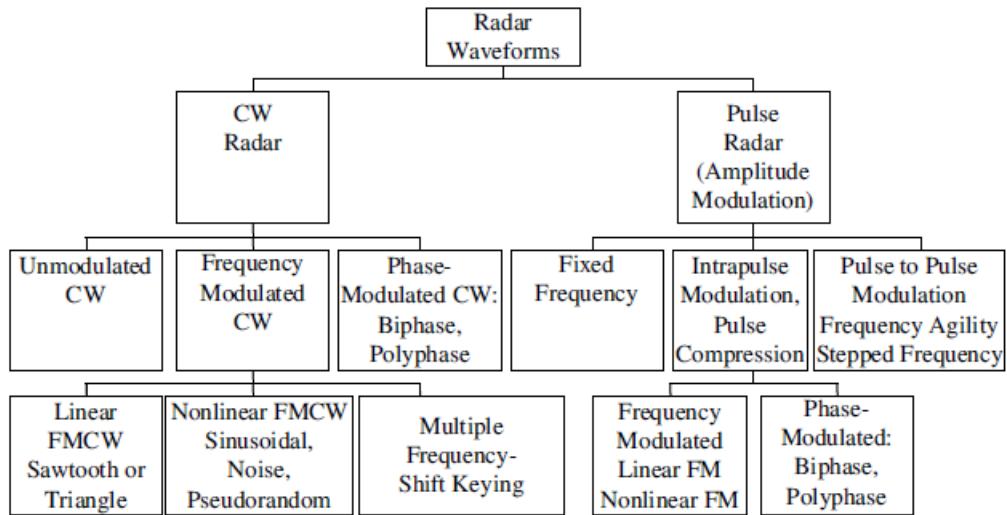
Gambar 2.3: Radar Cross Section [15]

## 2.3 Pengolahan Sinyal Radar

Untuk mendapat suatu kesimpulan dari sinyal radar, maka dibutuhkan pengolahan sinyal radar yang tepat. Pengolahan sinyal tersebut dilakukan mulai dari pembentukan gelombang hingga pengambilan kesimpulan.

### 2.3.1 Bentuk Gelombang Radar

Bentuk gelombang radar dapat dibedakan menjadi dua kelas, yaitu radar dengan gelombang kontinyu dan radar pulsa. Seperti pada gambar 2.4, kedua kelas tersebut masih dapat dibagi lagi kedalam beberapa teknik lain. Penggunaan salah satu jenis gelombang ditentukan berdasarkan kebutuhan radar yang akan di desain.



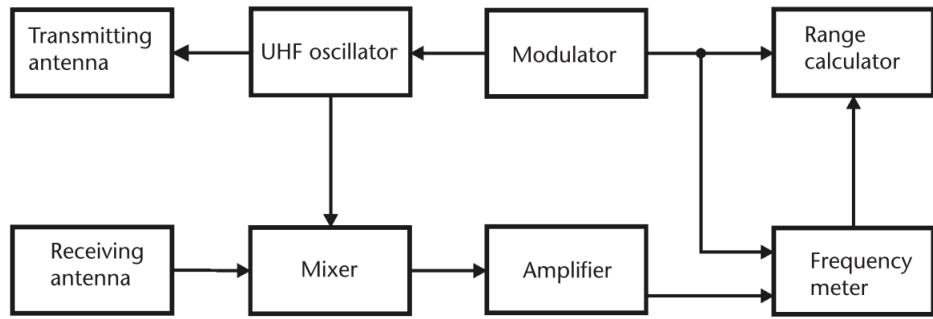
**Gambar 2.4:** Bentuk Gelombang Radar [16]

Radar dengan gelombang pulsa akan memancarkan gelombang elektromagnetik dalam waktu singkat lalu jeda sejenak sesuai waktu yang ditentukan. Pada waktu jeda tersebut, radar akan mendeteksi sinyal pantul dari gelombang yang dikirim sebelumnya. Setelah waktu jeda berakhir, radar akan kembali memancarkan gelombang pulsa lagi. Radar dengan gelombang ini akan memancarkan gelombang elektromagnetik dengan *power* yang tinggi.

Sedangkan radar dengan gelombang kontinyu akan terus memancarkan serta menerima gelombang elektromagnetik tanpa henti dalam waktu yang bersamaan. Sehingga radar dengan gelombang kontinyu hanya digunakan pada sistem dengan *power* yang rendah dengan jarak maksimum deteksi yang kecil. Hal ini disebabkan karena sering terjadinya kebocoran dari antena pengirim ke antena penerima. Alasan ini pula yang mendasari keputusan penggunaan *power* yang rendah [17].

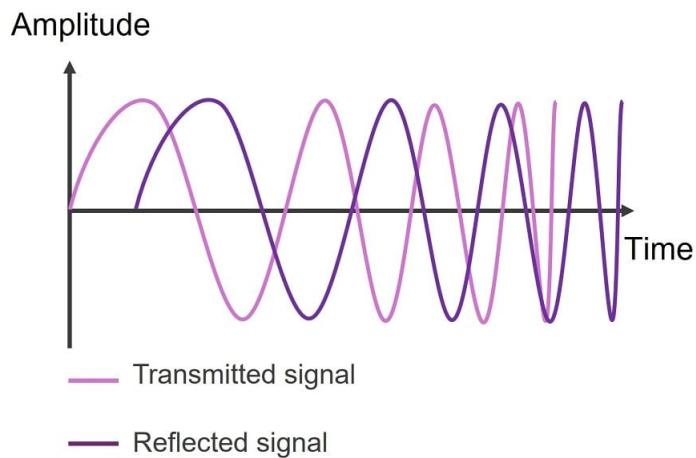
### 2.3.2 Frequency Modulated Continuous Wave Radar

Radar FMCW memancarkan sinyal yang bila terpantul objek, akan kembali terdeteksi. Hal ini dapat direalisasikan dengan blok diragram dari sistem radar FMCW seperti pada gambar 2.5.



**Gambar 2.5:** Blok Diagram Radar FMCW

Dari blok diagram tersebut, dapat dilihat bahwa sinyal yang diterima dicampurkan dengan sinyal yang dikirim, sehingga karena adanya *delay* yang disebabkan oleh jarak gelombang bergerak, maka akan terdeteksi perbedaan frekuensi. Dengan begitu, perbedaan pada fasa dan frekuensi menjadi tolok ukur antara sinyal yang dikirim dengan sinyal yang di dapatkan kembali.



**Gambar 2.6:** FMCW Dalam Domain Waktu

Oleh karena itu, salah satu karakteristik dari radar FMCW adalah bahwa jarak pengukuran dapat dihitung dengan membandingkan frekuensi sinyal yang diterima dengan sinyal yang ditransmisikan.

$$R = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{c\Delta f}{2\left(\frac{d(f)}{d(t)}\right)} \quad (2.6)$$

Persamaan 2.6 menunjukkan jarak (R) dengan objek yang terdeteksi. Yang mana  $\Delta t$  adalah waktu tunda dalam detik,  $\Delta f$  merupakan pergeseran frekuensi

terukur dalam Hertz, dengan  $d(f)/d(t)$  sebagai pergeseran frekuensi dalam suatu periode.

$$R_{max} = \frac{F_{sc}}{2\mu} \quad (2.7)$$

Persamaan 2.7 menunjukkan jarak maksimum yang dapat di deteksi oleh radar FMCW.  $F_{sc}$  merupakan frekuensi *sampling*, dan  $\mu$  adalah tingkat kenaikan frekuensi pada suatu periode yang dapat dihitung dengan persamaan 2.8 yaitu membagi nilai *bandwidth* dengan waktu *sweep (chirp)* bersimbol  $T_c$ .

$$\mu = \frac{\text{Bandwidth}}{T_c} \quad (2.8)$$

Dengan nilai  $T_c$  sebagai berikut

$$T_c = \frac{\lambda}{4 \cdot V_{max}} \quad (2.9)$$

Selain itu, salah satu faktor penting yang perlu diperhitungkan dalam perancangan radar FMCW adalah resolusi jarak. Resolusi jarak sendiri merupakan kemampuan dari suatu radar dalam membedakan dua buah objek yang berdekatan.

$$R_{res} = \frac{c}{2BW} \quad (2.10)$$

Persamaan 2.10 menjelaskan bahwa dengan membagi kecepatan cahaya dengan dua kali lebar pita frekuensi (*Bandwidth*), maka resolusi jarak akan didapatkan. Sedangkan nilai kecepatan maksimum dapat dihitung dengan persamaan 2.11 yang melakukan pembagian panjang gelombang frekuensi dipilih dengan 4 dikali *sweep time*.

$$v_{max} = \frac{\lambda}{4 \cdot T_c} \quad (2.11)$$

Sehingga nilai resolusi kecepatan dapat dihitung dengan persamaan 2.12, yang membagi panjang gelombang dengan 2 kali durasi *frame* ( $T_f$ ).

$$V_{res} = \frac{\lambda}{2 \cdot T_f} \quad (2.12)$$

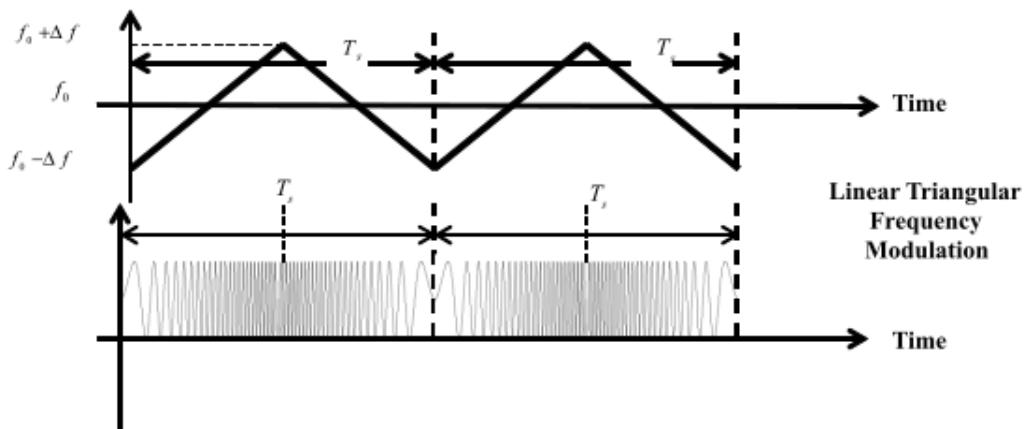
$T_f$  sendiri adalah durasi dari *frame* yang terdiri dari N jumlah dari *chirp* secara terus menerus, nilainya dapat dicari pada persamaan 2.13.

$$T_f = N \cdot T_c = \frac{\lambda}{2 \cdot V_{res}} \quad (2.13)$$

### 2.3.3 Linear Frequency Modulated Continuous Wave Radar

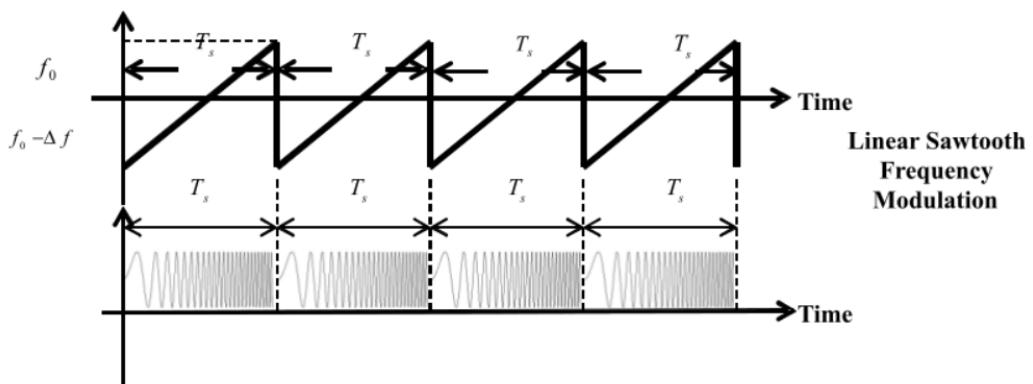
*Linear Frequency Modulated*, yang juga sering disingkat sebagai LFM adalah teknik pengolahan sinyal yang dilakukan dengan menyapu frekuensi dari bawah ke atas (*Up-Chirp*) atau dari atas ke bawah (*Down-Chirp*). Dengan  $f_0$  sebagai frekuensi tengah, dan dilakukan pada *bandwidth* yang telah ditentukan. Teknik ini akan membantu pencapaian radar dengan resolusi yang lebih tinggi karena *bandwidth* yang dicapai akan menjadi lebih tinggi.

Salah satu jenis gelombang LFM adalah *Linear Triangular Frequency Modulation* yang ditunjukkan pada gambar 2.7. Penggunaan jenis gelombang tersebut akan mempermudah proses evaluasi target.



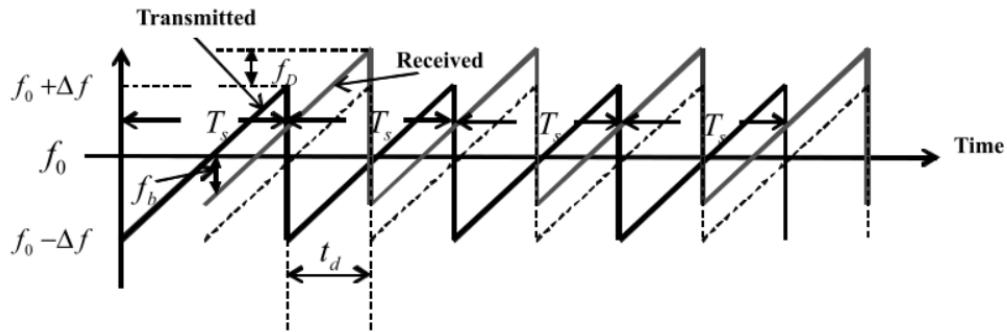
Gambar 2.7: LFM Tipe Segitiga [18]

Selain gelombang LFM segitiga, ada pula yang berbentuk seperti gigi gergaji (*Sawtooth*) seperti gambar 2.8.



Gambar 2.8: LFM Tipe Gigi Gergaji [18]

Seluruh teknik tersebut memiliki keunggulannya masing-masing. Keunggulan tersebut didapat karena proses analisis yang berbeda. Pada LFM berbentuk gigi gergaji, maka hanya objek diam saja yang dapat dideteksi jarak dan kecepatannya seperti pada gambar 2.9. Namun bila menggunakan LFM berbentuk segitiga, maka objek yang bergerak dapat dideteksi jarak dan kecepatannya dalam waktu yang bersamaan.



**Gambar 2.9:** Detail Analisis LFM Sawtooth [18]

### 2.3.4 Teknik Pengolahan Sinyal

Untuk melakukan pengambilan keputusan dari data yang diambil oleh radar, maka dibutuhkan langkah pengolahan yang benar dan mencakup berbagai hal. Beberapa parameter yang bisa diambil estimasinya adalah jarak dan kecepatan dari objek yang terdeteksi. Pada estimasi jarak, persamaan 2.14 dapat menjelaskan hubungan jarak dengan beberapa faktor yang mempengaruhinya.

$$d_0 = \frac{c f_b}{2\mu} = \frac{c T_c f_b}{2B} \quad (2.14)$$

Pada persamaan tersebut, terdapat  $c$  sebagai kecepatan cahaya,  $f_b$  adalah *beat frequency* yang merupakan perbedaan pada frekuensi,  $\mu$  yang merupakan laju perubahan frekuensi pada suatu waktu (*chirp rate*), dengan  $T_c$  sebagai waktu *Sweep*. Sedangkan untuk melakukan estimasi kecepatan terdapat pergeseran frekuensi akibat efek doppler, yang menjelaskan perubahan frekuensi suatu gelombang karena suatu objek sumber yang bergerak. Bila pergeseran doppler ( $f_d$ ), dengan  $v$  sebagai kecepatan, dan  $\lambda$  adalah panjang gelombang, maka didapatkan persamaan 2.15.

$$v = \frac{f_d}{\gamma} \lambda \quad (2.15)$$

### 2.3.5 Perhitungan *Error*

Penghitungan galat dari radar yang telah di desain dapat dilakukan dengan menguji keakurasiannya dari hasil deteksi. Hasil akurasi deteksi radar dapat diuji dengan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai dari RMSE bisa didapat dengan persamaan 2.16 dengan nilai n adalah jumlah pengulangan dari uji coba.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (simulasi_i - aktual_i)^2}{n}} \quad (2.16)$$

## 2.4 *Software Defined Radio*

*Software Defined Radio* atau yang sering disingkat menjadi SDR merupakan teknologi komunikasi berbasis nirkabel yang kegunaannya dapat ditentukan oleh perangkat lunak [19]. Sehingga dalam implementasinya, tidak perlu dilakukan perubahan perangkat keras baru bila ingin melakukan perubahan, baik dari segi standar, teknologi, dan layanan. Hanya dengan melakukan perubahan konfigurasi saja, lalu SDR akan langsung dapat digunakan.

Dalam implementasinya, SDR membutuhkan *Universal Software Radio Peripheral*, atau yang sering disingkat menjadi USRP merupakan *hardware* yang merupakan bagian *front end* pada arsitektur sistem SDR. USRP terdiri dari modul yang dapat terkoneksi dengan komputer sehingga memperbolehkan pemrograman dengan aplikasi seperti GNURadio dan LabVIEW [20].

Penggunaan USRP sangat memudahkan proses perancangan prototipe dan pengujian karena adanya antarmuka yang dapat mengkoneksikan USRP dengan antena dan berbagai macam bagian perangkat keras yang dibutuhkan.

### 2.4.1 *Universal Software Radio Peripheral*

*Universal Software Radio Peripheral* sering disingkat USRP merupakan *platform* yang digunakan dalam mengimplementasikan SDR. Di dalam USRP terdapat *Field Programmable Gate Array* atau FPGA yang merupakan suatu *Integrated Circuit* yang dapat diprogram. Pada hal ini, USRP adalah perangkat keras yang dapat menerima dan mentransmisikan gelombang radio.

Kemampuannya untuk berinteraksi dengan gelombang radio inilah, ditambah dengan kemudahannya untuk melakukan pemrograman terhadap USRP yang membuat alat ini terkenal di kalangan akademisi dan peneliti. Karena pengembangan prototipe menjadi lebih mudah tanpa perlu pengadaan komponen.



**Gambar 2.10:** USRP B210

Ada beberapa USRP di pasaran, salah satunya adalah USRP buatan dari *Ettus* dengan seri B210 seperti pada gambar 2.10. Penggunaan seri ini dikarenakan seperti yang dapat dilihat pada tabel spesifikasi 2.2, USRP ini cukup memenuhi kebutuhan riset dengan kapabilitas pengolahan sampel yang baik.

**Tabel 2.2:** Spesifikasi *USRP B210*

No.	Keterangan	Nilai	Satuan
1.	<i>RF Coverage</i>	70 - 6	MHz - GHz
2.	<i>Analog to Digital Converter Sample Rate</i> (maksimum)	61.44	MS/s
3.	<i>Analog to Digital Resolution</i>	12	bits
4.	<i>Analog to Digital Wideband SFDR</i>	78	dBc
5.	<i>Digital to Analog Converter Sample Rate</i> (maksimum)	61.44	MS/s
6.	<i>Digital to Analog Resolution</i>	12	bits
7.	<i>Host Sample Rate (16b)</i>	61.44	MS/s
8.	<i>Frequency Accuracy</i>	$\pm 2.0$	ppm
9.	<i>W/ GPS Unlocked TCXO Reference</i>	$\pm 75$	ppb
10.	<i>W/ GPS Locked TCXO Reference</i>	< 1	ppb

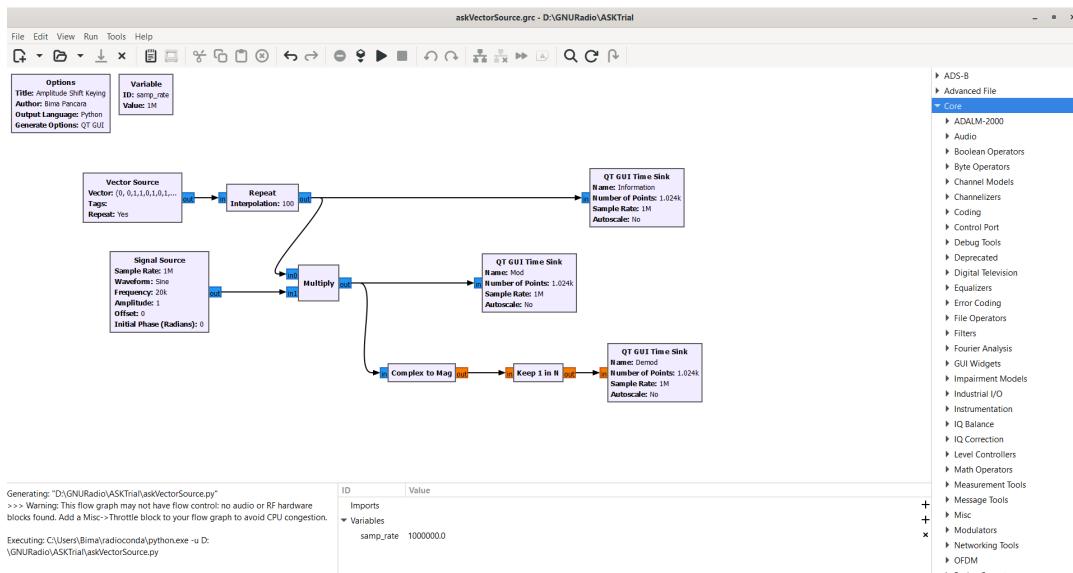
Dengan spesifikasi tersebut, maka USRP B210 memiliki kemampuan *instantaneous bandwidth* hingga 56 MHz pada transmisi 1 X 1 dan 30.72 MHz pada transmisi 2 X 2.

## 2.4.2 GNURadio



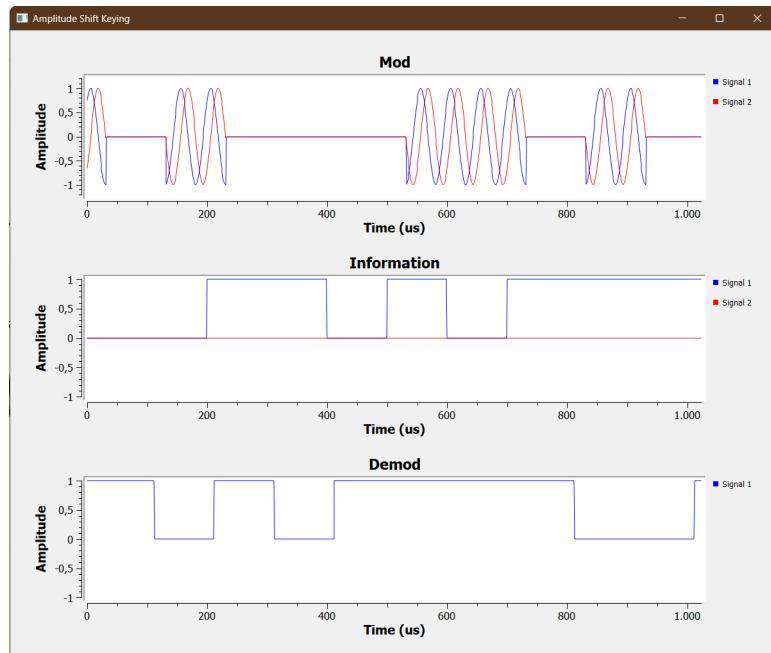
Gambar 2.11: Logo GNURadio

GNURadio adalah aplikasi yang dapat melakukan pemrograman terhadap USRP lewat antarmuka. GNURadio merupakan *software open source* sehingga semua orang dapat mengakses, mengubah, dan membagikan *source code* dari program tersebut secara bebas. Dengan menggunakan aplikasi ini, perubahan parameter pada USRP dapat dilakukan dengan mudah.



Gambar 2.12: Contoh Flowgraph GNURadio

Gambar 2.12 adalah contoh blok diagram sistem (*flowgraph*) yang sukses dibuat pada aplikasi GNURadio. Pada gambar 2.13 menunjukkan hasil bila desain sistem tersebut dijalankan.



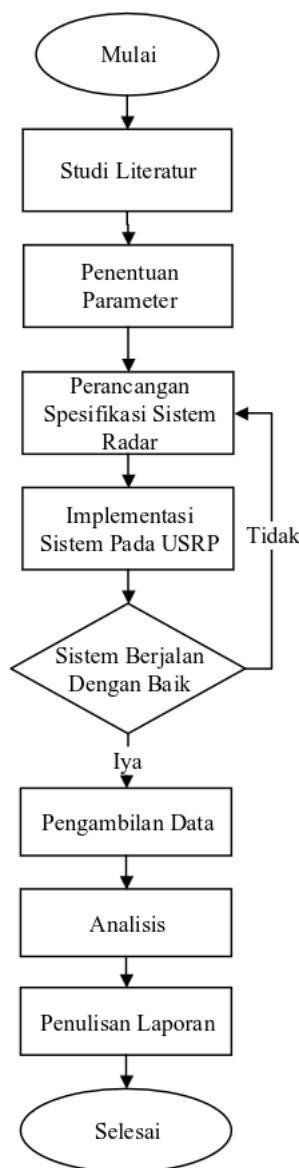
**Gambar 2.13:** Contoh Hasil Desain Sistem GNURadio

## BAB III

### MODEL SISTEM DAN PERANCANGAN

#### 3.1 Alur Penelitian

Dalam suatu penelitian, terdapat urutan tahapan yang perlu dilakukan. Alur penelitian ini mengandung seluruh langkah yang harus ditempuh, mulai dari fase perancangan hingga tahap akhir penelitian.



**Gambar 3.1:** *Flowchart* Penelitian

Pada alur penelitian yang telah dirancang, terdapat 6 tahap yang perlu dilakukan setelah penelitian dimulai dan sebelum penelitian diakhiri. Tiap tahapan yang telah dirancang harus dilaksanakan sebaik mungkin agar hasil yang diharapkan dapat tercapai.

### 3.2 Studi Literatur

Pada tahap ini, dilakukan studi literatur terhadap masalah yang diangkat serta solusi yang diajukan pada proposal ini. Studi literatur meliputi kajian artikel terdahulu hingga kajian terhadap perangkat lunak yang digunakan serta metode yang dilakukan dalam penyelesaian masalah.

### 3.3 Penentuan Parameter

Pada tahap ini, parameter penelitian ditentukan, dengan parameter perancangan sebagai berikut.

**Tabel 3.1:** Parameter Penelitian

No.	Parameter Penelitian	Satuan
1.	<i>Center Frequency</i>	GHz
2.	<i>Bandwidth</i>	MHz

Sementara itu, untuk memastikan hasil yang dicapai baik, maka perlu ditentukan pula parameter pengujian, sebagai berikut.

**Tabel 3.2:** Parameter Pengujian

No.	Parameter Pengujian	Satuan
1.	Jarak	m
2.	Kecepatan	m/s
3.	<i>RMSE</i>	-

### 3.4 Perancangan Spesifikasi Sistem

Pada tahap ini, dilakukan perancangan tentang penelitian yang diangkat, dalam konteks ini adalah radar. Sehingga perlu dilakukannya penentuan spesifikasi radar berdasarkan perangkat keras yang digunakan. Penelitian ini menggunakan alat USRP berseri B210. Spesifikasi dari alat ini akan dijelaskan pada tabel berikut.

**Tabel 3.3:** Spesifikasi Sistem Radar

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	USRP	B210
2.	<i>Center Frequency</i>	3 GHz
3.	<i>Bandwidth</i>	50 MHz
4.	Bentuk Modulasi	<i>Triangular</i>
5.	Jarak Maksimum	150 km
6.	Resolusi Jarak	3 m
7.	Kecepatan Maksimum	15 m/s
8.	Resolusi Kecepatan	1 m/s
9.	Durasi <i>Chirp</i>	0.001667 s
10.	<i>Chirp Rate</i>	30000 MHz

- Hitung panjang gelombang ( $\lambda$ ) dari frekuensi tengah yang sudah ditentukan yaitu 3 GHz.

$$\lambda = \frac{c}{F_c}$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^9}$$

$$\lambda = 0.1 \text{ m}$$

- Menghitung resolusi jarak berdasarkan persamaan 2.10 dan dengan menentukan *bandwidth* bernilai 50 MHz, maka.

$$R_{res} = \frac{c}{2BW}$$

$$R_{res} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 50 \text{ MHz}}$$

$$R_{res} = 3 \text{ m}$$

- Menghitung jarak maksimum yang dapat dideteksi oleh radar digunakanlah persamaan 2.7, namun sebelumnya harus ditentukan terlebih dahulu nilai  $\mu$ , yang merupakan tingkat kenaikan frekuensi pada suatu periode sesuai dengan persamaan 2.8, dengan nilai  $T_c$  sesuai persamaan 2.9 dan nilai kecepatan maksimum ditentukan bernilai 15 m/s, maka.

$$T_c = \frac{\lambda}{4 \cdot V_{max}}$$

$$T_c = \frac{0.1}{4 \cdot 15}$$

$$T_c = 0.001667$$

- Sehingga nilai  $\mu$  dapat dihitung menjadi.

$$\mu = \frac{Bandwidth}{T_c}$$

$$\mu = \frac{50 \text{ MHz}}{0.001667}$$

$$\mu = 30000 \text{ MHz/s}$$

- Dengan jarak maksimum yang didapat adalah.

$$R_{max} = \frac{F_s \cdot c}{2 \cdot \mu}$$

$$R_{max} = \frac{30 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 30000}$$

$$R_{max} = 150m$$

- Dengan  $T_f$  sebagai durasi *frame* bernilai 0.05 s maka resolusi kecepatannya.

$$V_{res} = \frac{\lambda}{2 \cdot T_f}$$

$$V_{res} = \frac{0.1}{2 \cdot 0.05}$$

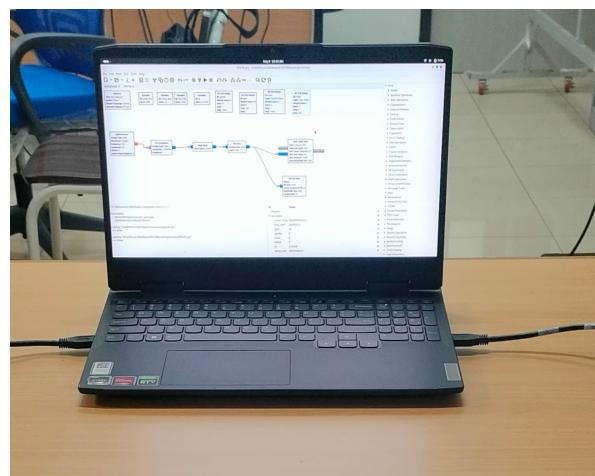
$$V_{res} = 1m/s$$

### 3.5 Implementasi Sistem

Tahap implementasi ini dilakukan pada aplikasi GNURadio dan menghasilkan *flow diagram* yang merepresentasikan langkah yang dilakukan pada USRP. *Flow diagram* yang didesain sudah memenuhi spesifikasi sistem radar pada tabel 3.3.

Implementasi sistem akan dilaksanakan pada beberapa perangkat, mulai dari laptop, antena, dan USRP. Berikut detail perangkat yang akan digunakan pada saat implementasi guna mendapat hasil yang baik.

#### 1. *IdeaPad Gaming 3 15ARH7* :



**Gambar 3.2:** Gambar Perangkat Laptop Yang Digunakan

- *Processor* : AMD Ryzen 7 6800H dengan *Radeon Graphics* 3.20 GHz
- *Memory* : 8,00 GB (7,19 GB *usable*)

#### 2. Perangkat *Software Defined Radio* :



**Gambar 3.3:** Alat USRP B210

- Tipe : USRP B210
- Jarak Frekuensi : 70 MHz - 6 GHz

3. Antena *Log-periodic* :



**Gambar 3.4:** Antena *Log Periodic* Pengujian

- Frekuensi : 800 MHz - 6GHz
- Pola Radiasi : *Directional*
- *Gain* : 5.2 - 6.3 dB

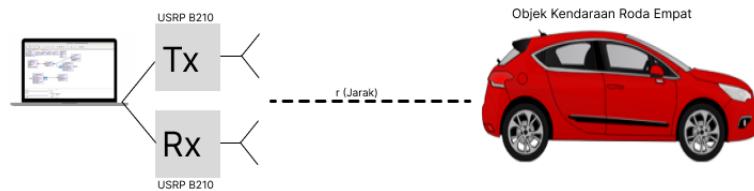
### 3.6 Pengambilan Data

Pada tahap ini, pengambilan data dengan radar yang sudah didesain dan diimplementasikan pada USRP dilakukan. Pengambilan data akan dilaksanakan di lokasi lapangan Univertitas Telkom Surabaya yang beralamat Jl. Ketintang No.156, Ketintang, Kec. Gayungan, Surabaya, Jawa Timur 60231.



**Gambar 3.5:** Lokasi Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menggunakan kendaraan roda empat sebagai objek yang akan dideteksi. Dengan begitu, maka pengambilan data kecepatan dapat dilakukan dan dapat dibandingkan dengan hasil yang didapat dari radar yang telah didesain.



**Gambar 3.6:** Skema Penelitian

### 3.7 Konfigurasi Pengujian

Konfigurasi pengujian dilakukan sesuai dengan gambar 3.6. Terdapat satu buah perangkat laptop yang terhubung dengan dua buah USRP, masing-masing USRP terhubung dengan antena *Log-periodic*. USRP 1 berperan sebagai *transmitter* sedangkan USRP 2 berperan sebagai *receiver*.



**Gambar 3.7:** Konfigurasi Pengujian

## DAFTAR REFERENSI

- [1] S. Zhang, C. Wang, S.-C. Chan, X. Wei, and C.-H. Ho, “*New Object Detection, Tracking, and Recognition Approaches for Video Surveillance Over Camera Network*,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, pp. 2679–2691, May 2015.
- [2] A. Biswas, S. Abedin, and M. A. Kabir, “*Moving Object Detection Using Ultrasonic Radar with Proper Distance, Direction, and Object Shape Analysis*,” *Journal of Information Systems Engineering and Business Intelligence*, vol. 6, p. 99, Oct. 2020.
- [3] M. Jia, S. Li, J. L. Kernev, S. Yang, F. Fioranelli, and O. Romain, “*Human activity classification with radar signal processing and machine learning*,” in *2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET)*, IEEE, Aug. 2020.
- [4] Y. Xia, Z. Ma, and Z. Huang, “*Over-the-Air Radar Emitter Signal Classification Based on SDR*,” in *2021 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP)*, IEEE, Apr. 2021.
- [5] D. A. Mora-Huaman, F. Palomino Quispe, R. J. Coaquirra-Castillo, and M. Clemente-Arenas, “*Distance to Object Estimation Based on Software Defined Radio USRP using Python*,” in *2020 IEEE XXVII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, IEEE, Sept. 2020.
- [6] S. S, A. C, T. Zacharia, and G. R, “*Real time implementation of FMCW radar for target detection using GNU radio and USRP*,” in *2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, IEEE, Apr. 2015.
- [7] K. Stasiak and P. Samczynski, “*FMCW radar implemented in SDR architecture using a USRP device*,” in *2017 Signal Processing Symposium (SPSympo)*, IEEE, Sept. 2017.
- [8] J. M. S. Macasero, O. J. L. Gerasta, D. P. Pongcol, V. J. V. Ylaya, and A. B. Caberos, “*Underground Target Objects Detection Simulation Using FMCW Radar with SDR Platform*,” in *2018 IEEE 10th International Conference*

*on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, IEEE, Nov. 2018.

- [9] A. Lestari, D. D. Patriadi, I. H. Putri, B. Harnawan, O. D. Winarko, W. Sediono, and M. A. K. Titasari, “*FPGA-based SDR implementation for FMCW maritime surveillance radar*,” in *2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, IEEE, Oct. 2017.
- [10] J.-H. Deng, P.-N. Chen, C.-F. Lee, Y.-F. Chan, and Y.-C. Lin, “*SDR measurement platform design for FMCW RADAR performance verification*,” in *2017 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing*, IEEE, Aug. 2017.
- [11] L. Zeng, C. Yang, Y. Zhao, M. Huang, and C. Zhi, “*Research on Evaluation Index System for Software Defined Radar (SDR)*,” in *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, IEEE, Apr. 2019.
- [12] A. Prabaswara, A. Munir, and A. B. Suksmono, “*GNU Radio based software-defined FMCW radar for weather surveillance application*,” in *2011 6th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*, IEEE, Oct. 2011.
- [13] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*. McGraw-Hill electrical engineering series, Boston, Mass.: McGraw Hill, third edition ed., 2001. International edition.
- [14] S. Kingsley, *Understanding radar systems*. Mendham, NJ: SciTech Publishing, 1999. This is a reprinting of the 1992 edition originally published by McGraw-Hill Book company Europe.. - Includes bibliographical references and index.
- [15] S. O'Neill, N. Dvn, and U. Command, *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*. Military Studies Press, 2012.
- [16] W. L. Melvin, ed., *Principles of modern radar*, vol. 3. Edison, NJ: SciTech Publ., 2014.
- [17] J. Scheer, M. A. Richards, and W. A. Holm, eds., *Principles of modern radar*, vol. Volume 1. Raleigh, NC: SciTech Pub, reprinted with corrections ed., 2015. Includes bibliographical references and index.

- [18] M. Jankiraman, *FMCW radar design*. Artech House radar series, Boston: Artech House, 2018. *Includes bibliographical references and index.*
- [19] I. Anisah, H. Briantoro, A. Zainudin, and D. I. Permatasari, “Implementasi sistem komunikasi nirkabel ofdm berbasis software defined radio (sdr),” *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, vol. 7, June 2018.
- [20] M. M. Gulo, I. G. P. Astawa, Arifin, Y. Moegiharto, and H. Briantoro, “*The Joint Channel Coding and Pre-Distortion Technique on the USRP-Based MIMO-OFDM System*,” *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)*, vol. 7, pp. 930–939, Aug. 2023.