

**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

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana
Dari Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi
Direktorat Kampus Surabaya
Universitas Telkom

Disusun oleh:
BIMA PANCARA HARYONO PUTRA
1101210528



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK TELEKOMUNIKASI
DIREKTORAT KAMPUS SURABAYA
UNIVERSITAS TELKOM
SURABAYA
2025**

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

Telah disetujui dan disahkan untuk memenuhi sebagian syarat memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Telekomunikasi
Direktorat Kampus Surabaya
Universitas Telkom

Disusun oleh:
BIMA PANCARA HARYONO PUTRA
1101210528

Surabaya, 05 Februari 2025

Menyetujui,

1. **Dr. Fannush Shofi Akbar, S.ST.** (Pembimbing I)
NIP. 20910026
 2. **Risdilah Mimma Untsa, S.ST., M.T.** (Pembimbing II)
NIP. 20910025
 3. **Nilla Rachmaningrum, S.T., M.T.** (Penguji I)
NIP. 17780080
 4. **Muhsin, S.T., M.T., Ph.D.** (Penguji II)
NIP. 19940001
- Kaprodi Teknik Telekomunikasi,**

Dr. Fannush Shofi Akbar, S.ST.
NIP. 20910026

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS



Nama	:	Bima Pancara Haryono Putra
NIM	:	1101210528
Alamat	:	Perum. Mega Asri, B-02
No. Telepon	:	089699444339
Email	:	bimapancara@student.telkomuniversity.ac.id

Menyatakan bahwa Tugas Akhir ini merupakan karya orisinal saya sendiri. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung risiko atau sanksi yang dijatuhkan kepada saya apabila kemudian ditemukan adanya pelanggaran terhadap kejujuran akademik atau etika keilmuan dalam karya ini, atau ditemukan bukti yang menunjukkan ketidakaslian karya ini.

Surabaya, Januari 2025

Bima Pancara Haryono Putra

1101210528

ABSTRAK

Teknologi penginderaan semakin diperlukan di masa mendatang, salah satunya adalah untuk melakukan pendekslsian objek, estimasi kecepatan dan jarak yang digunakan pada alat seperti *speed trap camera* di pinggir jalan untuk mendekksi kecepatan kendaraan agar tidak melewati batas kecepatan yang sudah ditentukan. Dari berbagai teknik penginderaan terdapat teknologi 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 dan diuji 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 pembawa 5.8 GHz, dengan bentuk modulasi *Sawtooth*. Implementasi dilakukan dengan satu unit USRP menggunakan antena *log periodic*. Hasil pengujian jarak menunjukkan kualitas yang baik pada jarak 6 meter dengan nilai akurasi prediksi 82.86% dan pada 9 meter dengan nilai akurasi sekitar 93.56%, pada pengujian jarak 3 meter sistem radar tidak dapat melakukan prediksi jarak dengan nilai akurasi -402.72%. Pada pengujian kecepatan hasil tidak menunjukkan kualitas yang baik.

Kata Kunci: *FMCW, Radar, GNURadio, USRP, Detection, Estimation*

ABSTRACT

Sensing Technology will become an important part of the future, one of its purposes is for object detection, velocity estimation, and ranging for speed trap camera on the side of the road to detect the velocity of vehicle so they wont surpass the chosen speed limit. Radar technology is one of sensing technology. Frequency Modulated Continuous Wave Radar is a popular technique that many people use. Many implementation of this technique is often use in various field, from automotive to health.

In this research, a Software Defined Radio based FMCW radar has been design with GNURadio for detection, range estimation, and velocity of an object. The specification of system radar that has been designed is on 5.8 GHz carrier frequency, with a sawtooth modulation. The implementation use one unit of USRP with log periodic antenna. The result for range testing show a good quality from 6 meter above. The prediction accuracy for 6 meter is 82.86% and the accuracy prediction for 9 meter is around 93.56%. For range estimation at 3 meter, the prediction accuracy is at its worst, at about -402.72%. The velocity experiment does not show a good quality.

Keywords: *FMCW, Radar, GNURadio, USRP, Detection, Estimation*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas berkah, rahmat dan hidayah-Nya yang senantiasa dilimpahkan kepada penulis, sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Rancang Bangun Sistem *FMCW* Radar Berbasis *Software Defined Radio* dengan *GNURadio* Untuk Mendeteksi, Estimasi Jarak, dan Kecepatan Objek” sebagai salah satu persyaratan dalam menyelesaikan pendidikan pada Program Studi Teknik Telekomunikasi Fakultas Teknik Elektro Telkom University Surabaya. Penulis menyadari bahwa penulisan ini tidak dapat terselesaikan tanpa dukungan dari berbagai pihak baik moril maupun materil. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini terutama kepada:

1. Papa Ir. Mardi Susanto Hariyono, Mama Indrianingrum, S.H., dan Kakak Noviyana Haryono Putri, S.E. yang setia serta selalu mendukung keperluan penulis dari berbagai macam hal, mulai dari moril, materil, hingga pengambilan data dalam tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Fannush Shofi Akbar, S.ST., selaku Ketua Program Studi Teknik Telekomunikasi Fakultas Teknik Elektro Telkom University Surabaya, sekaligus sebagai dosen Pembimbing I Tugas Akhir yang telah bersedia membimbing dan mengarahkan penulis selama menyusun Tugas Akhir dan memberikan banyak ilmu serta solusi pada setiap permasalahan atas kesulitan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Risdilah Mimma Untsa, S.ST., M.T., selaku dosen Pembimbing II Tugas Akhir yang telah berkenan memberikan tambahan ilmu dan solusi pada setiap permasalahan atas kesulitan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
4. Ibu Nilla Rachmaningrum, S.T., M.T., selaku dosen Penguji I Tugas Akhir yang telah memberikan masukan dan kritik saran agar penulisan buku Tugas Akhir ini menjadi lebih baik.
5. Bapak Muhsin, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen Penguji II Tugas Akhir yang telah memberikan masukan dan kritik saran agar penulisan buku Tugas Akhir ini menjadi lebih baik.

6. Bapak Walid Maulana H, S.T., M.T., selaku Dosen Wali, yang selalu memberikan nasihat dan pengarahan selama penulis menempuh studi di Program Studi Teknik Telekomunikasi Fakultas Teknik Elektro Telkom University Surabaya.
7. Terima kasih untuk Athallah Rafi Andro Mulyawan, Hidayat, Alifvian Aria Sasongko, Akbar Handinegara, dan Vian Akbar Putra Widodo yang sudah membantu penulis untuk mengambil data jarak serta kecepatan dalam waktu singkat dan tanpa rencana di kampus.
8. Terima kasih untuk teman teman seperjuangan laboratorium *Wireless Communication Signal Processing* Wildan Abdillah, Wahyu Agung, Arya Prayoga, Haidar Daniel, Anas Al Hibrizi, Adam Maulana, Wafiqoh Dwi, Elsa Diah, First Ad'ha, Regina Salsabilla, Qaanitah Salwa, Intan Anggreita, Vidira Anindita yang selalu saling mendukung dikala pusing dan tak tahu arah.
9. Teman teman program studi Teknik Telekomunikasi angkatan 2021 yang tidak bisa disebutkan satu persatu, tetap semangat.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna dikarenakan terbatasnya pengalaman dan pengetahuan yang dimiliki penulis. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan semoga Allah SWT memberi lindungan bagi kita semua.

Surabaya, 05 Februari 2025

Bima Pancara Haryono Putra

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR ISTILAH	xv
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan dan Manfaat	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Penelitian	4
II LANDASAN TEORI	6
2.1 Kajian Penelitian Terkait	6
2.2 Radar	11
2.3 Pengolahan Sinyal Radar	14
2.3.1 Bentuk Gelombang Radar	14
2.3.2 <i>Frequency Modulated Continuous Wave Radar</i>	15
2.3.3 <i>Linear Frequency Modulated Continuous Wave Radar</i>	17
2.3.4 Teknik Pengolahan Sinyal	20
2.3.5 Perhitungan <i>Error</i>	20
2.4 <i>Software Defined Radio</i>	21
2.4.1 <i>Universal Software Radio Peripheral</i>	21

2.4.2 <i>GNURadio</i>	22
III METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1 Alur Penelitian	24
3.2 Penentuan Parameter	25
3.3 Perancangan Spesifikasi Sistem	25
3.4 Implementasi Sistem	27
3.5 Pengambilan Data	29
3.6 Konfigurasi Pengujian	30
3.7 Prediksi Hasil Pengujian	31
IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	32
4.1 Desain Sistem	32
4.2 Pengukuran Antena	32
4.3 Pengambilan Data Jarak	33
4.3.1 Jarak 3 Meter	33
4.3.2 Jarak 6 Meter	34
4.3.3 Jarak 9 Meter	34
4.4 Pengambilan Data Kecepatan	35
4.4.1 Menjauhi Radar	35
4.4.2 Mendekati Radar	36
4.5 Pengolahan Data Dengan Matlab	37
4.5.1 Pengolahan Data Jarak	37
4.5.2 Pengolahan Data Kecepatan	37
V ANALISIS DAN PEMBAHASAN	39
5.1 Hasil Pengolahan Data Jarak	39
5.1.1 Data Jarak 3 Meter	39
5.1.2 Data Jarak 6 Meter	41
5.1.3 Data Jarak 9 Meter	42
5.2 Hasil Pengolahan Data Kecepatan	43
5.2.1 Data Kecepatan 5 km/h	43
5.2.2 Data Kecepatan 10 km/h	44
5.2.3 Data Kecepatan 15 km/h	44
5.2.4 Data Kecepatan 20 km/h	45
5.3 Analisis Hasil	45

VI KESIMPULAN DAN SARAN	48
6.1 Kesimpulan	48
6.2 Saran	48

DAFTAR PUSTAKA	50
-----------------------	-----------

LAMPIRAN

Lampiran A 1

Lampiran A 2

Lampiran B

Lampiran C

DAFTAR GAMBAR

1.1	Penggunaan Radar Otomotif	1
2.1	Skema Dasar Radar	12
2.2	Blok Diagram Radar	12
2.3	Bentuk Gelombang Radar	14
2.4	Blok Diagram Radar FMCW	15
2.5	FMCW Dalam Domain Waktu	16
2.6	LFM Tipe Segitiga	18
2.7	LFM Tipe Gigi Gergaji	18
2.8	Detail Analisis LFM <i>Sawtooth</i>	19
2.9	Detail Analisa LFM <i>Triangular</i>	19
2.10	USRP B210	21
2.11	Contoh <i>Flowgraph</i> GNURadio	23
2.12	Contoh Hasil Desain Sistem GNURadio	23
3.1	<i>Flowchart</i> Penelitian	24
3.2	Gambar Perangkat Laptop Yang Digunakan	28
3.3	Alat USRP B210	28
3.4	Antena <i>Log Periodic</i> Pengujian	29
3.5	Skema Penelitian	29
3.6	Lokasi Pengujian	30
3.7	Konfigurasi Pengujian	30
4.1	Desain Sistem Pada GNURadio	32
4.2	Hasil pengukuran pola radiasi antena	33
4.3	Pengambilan data jarak 3 meter	34
4.4	Pengambilan data jarak 6 meter	34
4.5	Pengambilan data jarak 9 meter	35
4.6	Pengambilan data kecepatan menjauhi radar	36
4.7	Pengambilan data kecepatan mendekati radar	36
4.8	<i>Phase Noise</i> dari sinyal yang diterima	37
4.9	Perubahan frekuensi dengan waktu	38
5.1	Hasil <i>beat frequency</i> dari jarak 3 meter	39

5.2	Hasil <i>beat frequency</i> dari jarak 6 meter	41
5.3	Hasil <i>beat frequency</i> dari jarak 9 meter	42
5.4	Hasil Prediksi Kecepatan Objek 5 km/h	43
5.5	Hasil Prediksi Kecepatan Objek 10 km/h	44
5.6	Hasil Prediksi Kecepatan Objek 15 km/h	44
5.7	Hasil Prediksi Kecepatan Objek 20 km/h	45

DAFTAR TABEL

2.1	Penelitian Terkait	6
2.2	Spesifikasi <i>USRP B210</i>	22
3.1	Parameter Pengujian	25
3.2	Spesifikasi Sistem Radar	25
3.3	Prediksi Nilai <i>Beat Frequency</i>	31
3.4	Prediksi Nilai <i>Doppler Frequency</i>	31
5.1	Tabel hasil prediksi dan akurasi	46
5.2	Hasil deteksi Kecepatan	46

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A: Pengujian Pola Radiasi Antena

Lampiran B: Kode Program Pengolahan Data

DAFTAR ISTILAH

Radar	= <i>Radio Detection and Ranging</i>
FMCW	= <i>Frequency Modulated Continuous Wave</i>
USRP	= <i>Universal Software Radio Peripheral</i>
SDR	= <i>Software Defined Radio</i>
LFM	= <i>Linear Frequency Modulated</i>
FFT	= <i>Fast Fourier Transform</i>
RMSE	= <i>Root Mean Square Error</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi penginderaan sangat penting pada masa kini, salah satunya adalah untuk melakukan pendekripsi objek, estimasi kecepatan dan jarak. Kegunaan dari teknologi ini bisa dilihat pada alat seperti *speed trap camera* yang sering diletakkan di pinggir jalan untuk mendekripsi kecepatan kendaraan agar tidak melewati batas kecepatan yang sudah ditentukan. Dalam implementasi pendekripsi objek, estimasi jarak, dan kecepatan, 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 mendekripsi objek dan jarak dengan menggunakan mikrokontroler dan sensor ultrasonik [2]. Teknik lain yang menjadi alternatif adalah penggunaan gelombang elektromagnetik untuk mendekripsi objek dan jarak suatu benda dengan menggunakan radar.

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



Gambar 1.1 Penggunaan Radar Otomotif

Seiring berjalananya waktu dan zaman semakin modern, serta peperangan mulai berkurang, maka radar pun beralih fungsi. Contohnya seperti radar pendekripsi 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 pendekripsi objek pada kendaraan otomotif yang berguna untuk mendekripsi objek dan mencegah tabrakan seperti pada gambar 1.1.

Kemampuan radar dalam melakukan deteksi dan estimasi jarak sangatlah penting, maka riset untuk mengembangkan implementasi radar dengan berbagai teknik semakin banyak [3–6]. Salah satu diantaranya adalah implementasi *Real-Time Frequency Modulated Continuous Wave Radar* yang dikembangkan dengan GNURadio dan digunakan pada *Software Defined Radio* [6]. Teknik *Frequency Modulated Continuous 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 mendekripsi objek bawah tanah [8], pada sistem pengawasan maritim [9], dan bidang otomotif karena dapat bertahan pada berbagai cuaca, mampu menghasilkan performa dengan sangat baik, serta bisa memprediksi jarak dan kecepatan suatu objek [10].

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 tugas akhir ini dilakukan “Rancang Bangun Sistem *FMCW Radar Berbasis Software Defined Radio* dengan *GNURadio* Untuk Mendekripsi, Estimasi Jarak, dan Kecepatan Objek” sehingga dapat membuktikan bahwa sistem yang dirancang dapat melakukan pendekripsi objek dan estimasi jarak.

1.2 Rumusan Masalah

Desain dan implementasi sistem radar FMCW memerlukan spesifikasi yang tepat sehingga kemampuan sistem dalam mendeteksi, estimasi jarak, dan kecepatan objek menjadi optimal, maka rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini, yaitu:

1. Perancangan sistem radar FMCW menggunakan GNURadio yang memaksimalkan kemampuan USRP B210 dengan mempertimbangkan keperluan sistem.
2. Pengujian terhadap sistem radar FMCW yang telah didesain, khususnya pada kemampuan radar mendeteksi objek, estimasi jarak, dan kecepatan objek.
3. Evaluasi terhadap radar FMCW yang didesain, khususnya pada kapabilitas radar dalam mendeteksi, melakukan estimasi jarak, dan kecepatan suatu objek.

1.3 Tujuan dan Manfaat

Tujuan dan manfaat yang ingin dicapai dalam penelitian tugas akhir ini, yaitu:

1. Merancang sistem radar FMCW yang memaksimalkan kemampuan USRP dengan mempertimbangkan keperluan sistem.
2. Memberikan langkah yang jelas dalam melakukan desain radar FMCW di Universitas Telkom Surabaya.
3. Untuk melakukan perancangan sistem radar FMCW berbasis USRP B210 menggunakan GNURadio.
4. Untuk melakukan pengujian deteksi, estimasi jarak, dan kecepatan objek dari sistem radar FMCW pada USRP B210.
5. Untuk mengetahui tingkat keakurasaan pendekripsi, estimasi jarak, dan kecepatan objek menggunakan radar FMCW pada USRP.

1.4 Batasan Masalah

Hal yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah.

1. Parameter yang diidentifikasi pada rancang bangun ini adalah jarak, kecepatan, dan tingkat keakurasaan.

2. Pengujian sistem dengan menggunakan USRP B210 untuk melakukan pendektsian, estimasi jarak, dan kecepatan objek.
3. Perangkat lunak yang digunakan adalah GNURadio.
4. Antena yang digunakan adalah antena *Log Periodic* dengan pola radiasi *directional*, polarisasi linier, dan *gain* 6 dBi.
5. Frekuensi kerja radar pada 5.8 GHz di kelas frekuensi ISM untuk menghindari interferensi dengan perangkat lain.
6. Objek deteksi adalah kendaraan bermotor dua roda.

1.5 Sistematika Penelitian

Pada bagian ini, sistematika penelitian dari tugas akhir dipaparkan dengan jelas dan sesuai dengan isi penulisan buku tugas akhir ini.

1. BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bagian ini, latar belakang munculnya penelitian ini dipaparkan dengan jelas. Dari latar belakang yang ada, maka suatu rumusan masalah dapat dibentuk sehingga tujuan dari penelitian dapat ditentukan dengan suatu batasan masalah yang telah ditetapkan. Pada bagian ini, sistematika penulisan penelitian ini juga dicantumkan.

2. BAB 2 LANDASAN TEORI

Pada bagian ini, dasar teori yang berhubungan dengan radar, prinsip kerja, bentuk gelombang, hingga persamaan yang digunakan dalam penelitian ini telah dicantumkan.

3. BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bagian ini, diagram alur penelitian telah dilampirkan, kemudian parameter pengujian berdasarkan tujuan penelitian telah dijabarkan, kemudian spesifikasi sistem telah dirancang beserta dengan implementasinya. Skenario pengambilan data telah diajukan lengkap beserta dengan konfigurasi pengujian dan prediksi hasil pengujian yang akan didapat.

4. BAB 4 PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Pada bagian ini, desain sistem telah dipaparkan, kemudian berbagai data yang diperlukan sedang dikumpulkan, seperti data pola radiasi antena yang digunakan, hingga proses pengambilan data jarak dan kecepatan. Setelah terkumpul, data akan diolah untuk mendapatkan hasil dari penelitian ini.

5. BAB 5 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, hasil pengolahan data jarak dan kecepatan telah diolah sehingga hasil akhir penelitian bisa disimpulkan.

6. BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bagian ini, kesimpulan dari penelitian ini telah dijelaskan dan saran penelitian selanjutnya telah diberikan.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Banyak sekali referensi yang menjadi bagian besar dalam tertulisnya tugas akhir 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 tugas akhir ini dilahirkan, berikut adalah beberapa penelitian terdahulu yang menjadi referensi dalam melakukan penyusunan tugas akhir ini :

Tabel 2.1 Penelitian Terkait

No.	Nama	Judul	Jurnal	Deskripsi
1.	Lenz, Isabella; Holtom, Jacob; Herschfelt, Andrew; Rong, Yu; Bliss, Daniel	<i>Respiratory and Heart Rate Detection Using Continuous-Wave Radar Testbed Implemented in GNU Radio</i> (2022) [13]	<i>Proceedings of the 12th GNU Radio Conference</i>	Penggunaan radar CW untuk observasi detak jantung dan pernapasan menggunakan GNURadio dan USRP X310. Proses pengolahan data secara langsung dengan hasil estimasi pada jarak 5 BPM dibanding alat monitor detak jantung.

2.	Wankhede, Animesh; De, Sampurna	<i>Development of L-Band FMCW Radar on SDR using GNU RADIO</i> (2024) [14]	<i>2024 Second International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ICETITE)</i>	Penggunaan radar FMCW pada pita frekuensi kelas L untuk radar penembus tanah menunjukkan hasil yang efektif dalam melakukan deteksi dan <i>imaging</i> objek dengan akurasi dan resolusi tinggi.
3.	Hilario Re, Pascual D.; Comite, Davide; Podilchak, Symon K.; Alistarh, Cristian A.; Goussetis, George; Sellathurai, Mathini; Thompson, John; Lee, Jaesup	<i>FMCW Radar With Enhanced Resolution and Processing Time by Beam Switching</i> (2021) [15]	<i>IEEE Open Journal of Antennas and Propagation</i>	Implementasi radar FMCW pada frekuensi kelas K dengan antena <i>array</i> dan <i>beamforming</i> untuk deteksi arah pada kendaraan otomotif. Radar mampu mendeteksi objek dengan jarak 2° .

4.	Dabrowski, Grzegorz; Stasiak, Krzysztof; Drozdowicz, Jędrzej; Gromek, Damian; Samczynski, Piotr	<i>An X-band FMCW Radar Demonstrator Based on an SDR Platform</i> (2020) [16]	2020 <i>21st International Radar Symposium (IRS)</i>	Desain radar FMCW dengan bandwidth 1 GHz untuk mendapatkan resolusi jarak yang kecil, didapat hasil pengujian yang memuaskan dengan adanya pergerakan pada daerah yang ditandai memiliki banyak aktivitas.
5.	Rizik, Ali; Tavanti, Emanuele; Vio, Roberto; Delucchi, Alessandro; Chible, Hussien; Randazzo, Andrea; Caviglia, Daniele D.	<i>Single Target Recognition Using a Low-Cost FMCW Radar Based on Spectrum Analysis</i> (2020) [17]	2020 <i>27th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)</i>	Pengolahan sinyal radar dilakukan dengan klasifikasi data menggunakan <i>Support Vector Machine</i> (SVM), didapat hasil menunjukkan akurasi klasifikasi target mencapai 100%.
6.	Jeong, Hyunmin; Kim, Sangkil	<i>Educational Low-Cost C-Band FMCW Radar System Comprising Commercial</i>	<i>Electronics</i>	Desain dan implementasi radar FMCW pada frekuensi kelas C dilakukan menggunakan

		<i>Off-the-Shelf Components for Indoor Through-Wall Object Detection</i> (2021) [18]		komponen elektronik yang mudah didapat. Implementasi dilakukan dengan skenario pengujian dalam ruangan dan tembus dinding. Didapat hasil rata rata akurasi sekitar 5.6 cm.
7.	Pramudita, Aloysius Adya; Suratman, Fiky Y.; Arseno, Dharu	<i>Modified FMCW system for non-contact sensing of human respiration</i> (2020) [19]	<i>Journal of Medical Engineering and Technology</i>	Dengan melakukan modifikasi pada pengolahan data fasa setelah filter <i>Low Pass</i> . Didapatkan hasil bahwa desain modifikasi mampu mendekripsi waktu dan amplitudo pernafasan, serta lokasi dari target.
8.	Pramudita, Aloysius Adya; Lin, Ding-Bing; Dhiyani, Azizka Ayu;	<i>FMCW Radar for Noncontact Bridge Structure Displacement Estimation</i> (2023) [20]	<i>IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement</i>	Implementasi radar FMCW pada frekuensi 24 GHz dengan bandwidth 150 MHz untuk mendekripsi

	Ryanu, Harfan Hian; Adiprabowo, Tjahjo; Yudha, Erfansyah Ali			pergeseran kecil pada bangunan jembatan. Hasil menunjukkan metode berhasil dengan kondisi banyak <i>noise</i> dan nilai SNR rendah dengan rata rata galat 0.13 mm.
9.	Zhou, Min; Liu, Yunxue; Wu, Shie; Wang, Chengyou; Chen, Zekun; Li, Hongfei	<i>A Novel Scheme of High-Precision Heart Rate Detection With a mm-Wave FMCW Radar</i> (2023) [21]	<i>IEEE Access</i>	Radar FMCW dengan gelombang milimeter untuk peningkatan akurasi menggunakan algoritma <i>Variable Mode Extraction</i> dan teknik pengukuran frekuensi <i>Double-CZT</i> . Tingkat akurasi meningkat dengan rata rata <i>error</i> absolut kurang dari 1 bpm, nilai SNR meningkat sehingga estimasi akurasi detak jantung juga meningkat.

Pada penelitian [13], menunjukkan teknik yang perlu dilakukan saat melakukan pengolahan data hasil radar secara *real time* yaitu dengan menggunakan ZeroMQ yang dapat mengirimkan data dari aplikasi satu ke lainnya, sehingga pengolahan bisa dilakukan dengan pemrograman berbahasa *python*. Penelitian [14] menunjukkan referensi parameter radar FMCW yang dapat diraih oleh USRP menggunakan GNURadio. Penelitian [15] menunjukkan kemampuan radar FMCW bila dilakukan implementasi dengan menggunakan antena *array* untuk mendeteksi arah datang suatu objek.

Penelitian [16] menunjukkan skenario yang harus dilakukan dalam melakukan pengujian bila jarak radar didapat sangat jauh, sehingga perlu beberapa teknik pengujian yang dilakukan untuk mengambil keputusan dan menilai radar yang telah didesain. Penelitian [17] memperlihatkan kapabilitas radar bila dilakukannya analisa data lebih lanjut, yaitu dalam mengklasifikasikan data antara orang berjalan kaki dan kendaraan. Penelitian [18] menunjukkan langkah yang perlu dilakukan dalam merancang analisa hasil radar dan membandingkannya dengan nilai ekspektasi.

Penelitian [19] menggunakan analisa pada fasa untuk memperoleh data yang diinginkan, hal ini menunjukkan titik observasi lain masih dapat dilakukan untuk mendapatkan data yang diinginkan bila hasil tidak sesuai dengan ekspektasi. Penelitian [20] menunjukkan teknik pengujian dan analisa yang perlu dilakukan dalam melakukan pengujian radar FMCW, hingga perbandingan antara radar yang didesain dengan radar komersial untuk menentukan kualitas radar yang dirancang. Penelitian [21] memperlihatkan bahwa teknik analisa hasil tidak hanya dapat dilakukan dengan FFT, namun algoritma lain dapat dilakukan sehingga estimasi akan semakin akurat.

2.2 Radar

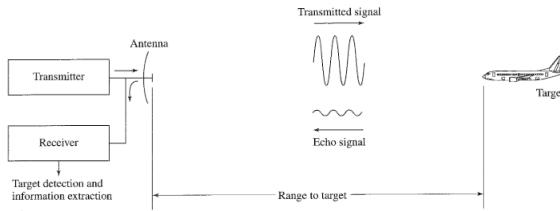
Penggunaan gelombang elektromagnetik sebagai sarana untuk mendeteksi objek adalah konsep dasar dari radar. Radar sendiri merupakan singkatan dari *Radio Detection and Ranging*, dari situ sangat nampak sekali tujuan dari penggunaan alat ini, yaitu untuk mendeteksi sesuatu dan mengukur jarak dengan menggunakan 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 dihitung [22].

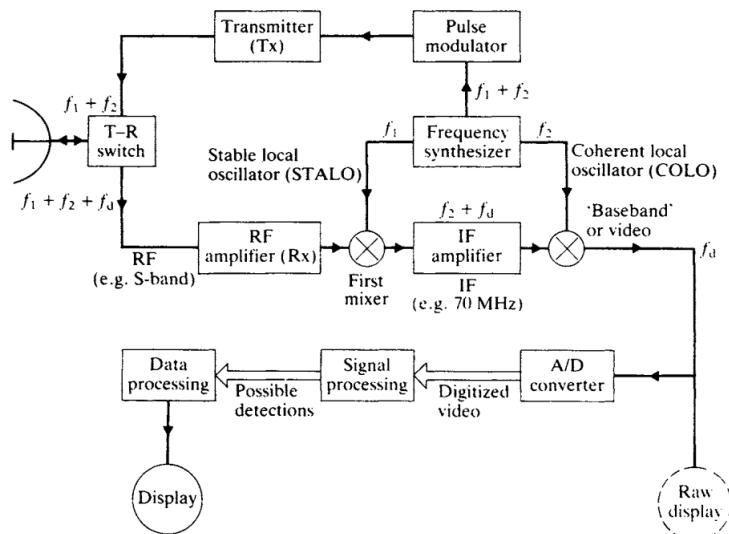
$$R_{max} = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) menjelaskan jarak maksimum antara target dengan antena yang disimbolkan sebagai R_{max} (meter), dimana P_t adalah daya tertransmisi, G adalah nilai gain antena, σ merupakan nilai *radar cross section* objek, dan S_{min} adalah tingkat sinyal rendah yang terdeteksi.



Gambar 2.1 Skema Dasar Radar [22]

Pada gambar 2.1, 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 2.2 Blok Diagram Radar Sederhana [23]

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 pendekripsi sinyal dapat dilakukan. Bila seluruh sistem bekerja dengan baik, maka proses yang ditunjukkan pada penjelasan skema dasar radar dapat berjalan dengan lancar.

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.

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

Salah satu persamaan pada radar adalah *maximum unambiguous range* menunjukkan jarak tempuh radar terjauh yang dapat dideteksi disimbolkan sebagai R_{un} (meter) pada persamaan (2.2), dengan c adalah kecepatan cahaya, T_p sebagai periode pengulangan pulsa yang biasa menggunakan satuan sekon bahkan mikrosekon, dan f_p sebagai frekuensi pengulangan pulsa (Hz). Sehingga T_p berbanding terbalik dengan f_p .

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (2.3)$$

Persamaan (2.3) menunjukkan hubungan periode pengulangan pulsa radar (T_p) dengan frekuensi pengulangannya (f_p). Semakin besar frekuensi pengulangan pulsa radar, maka periode pengulangannya akan semakin kecil.

$$P = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (2.4)$$

Bila antena yang digunakan dalam memancarkan gelombang elektromagnetika radar bersifat isotrop, maka kerapatan daya pada jarak R dari radar akan sama dengan daya dalam satuan Watt di transmisi (P_t) dibagi luas permukaan $4\pi R^2$ dari sebuah bola imajiner dengan radius R (meter), atau dapat didefinisikan pula dengan persamaan (2.4), namun kenyataannya tidak seperti itu.

$$\text{Kerapatan daya antena } \textit{directive} = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (2.5)$$

Radar seringkali menggunakan antena *directive* untuk mengkonsentrasi daya yang terradiasi pada arah tertentu. Maka kerapatan dayanya seperti pada

persamaan (2.5), dengan G sebagai *gain* maksimum suatu antena yang terdefinisi sebagai berikut.

$$G = \frac{\text{Kerapatan daya maksimum dari antena } \textit{directional}}{\text{Kerapatan daya antena Isotrop lossless dengan daya yang sama}} \quad (2.6)$$

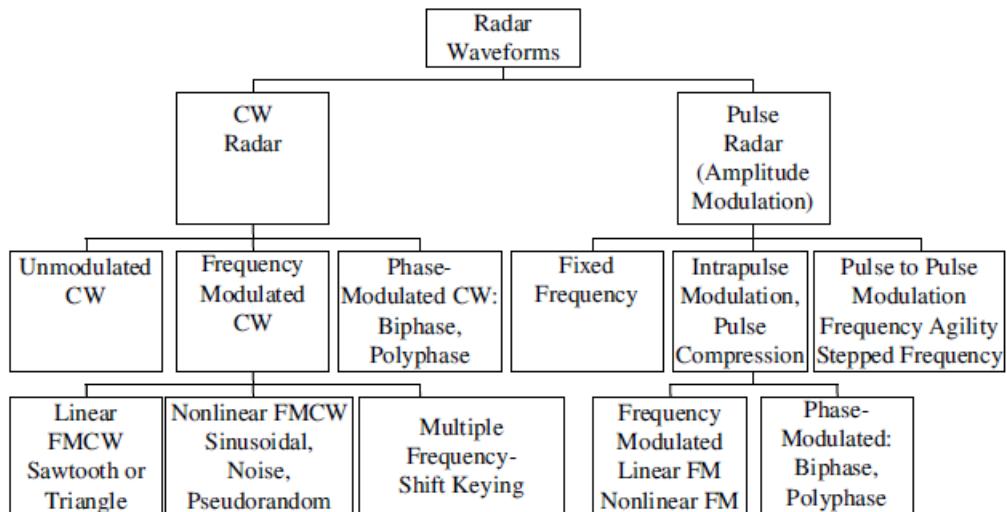
Gain bersatuan dB (desibel) yang menunjukkan perbandingan suatu nilai, dalam kasus ini kerapatan daya maksimum antena berarah dibanding antena isotropik.

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 2.3, 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 2.3 Bentuk Gelombang Radar [24]

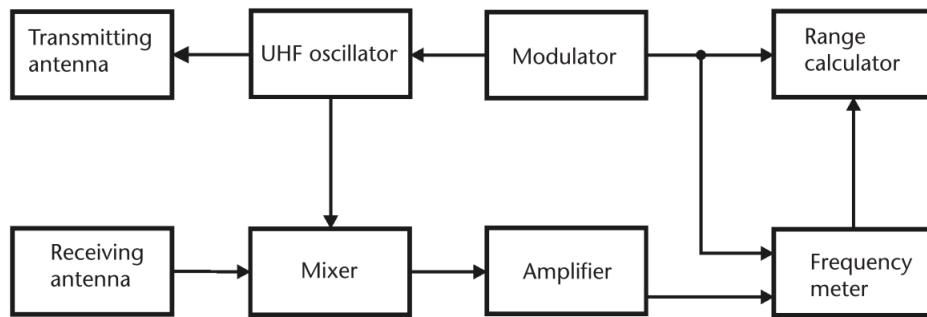
Radar dengan gelombang pulsa akan memancarkan gelombang elektromagnetik dalam waktu singkat lalu jeda sejenak sesuai waktu yang ditentukan. Pada waktu

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 [25].

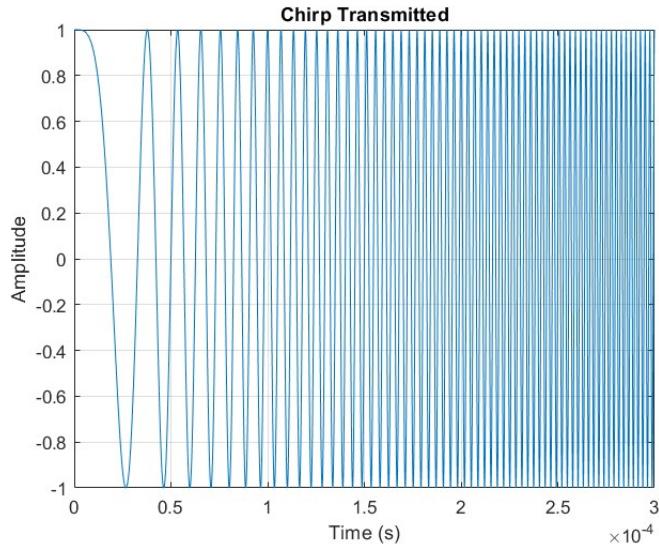
2.3.2 Frequency Modulated Continuous Wave Radar

Radar FMCW memancarkan sinyal yang bila terpantul objek, akan kembali terdeteksi. Hal ini dapat direalisasikan dengan blok diagram dari sistem radar FMCW seperti pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Blok Diagram Radar FMCW

Dari blok diagram tersebut, dapat dilihat bahwa sinyal yang diterima akan dicampurkan dengan sinyal yang dikirim, bila terdapat *delay* yang disebabkan oleh jarak, 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 2.5 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 seperti pada gambar 2.5.

$$R = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{c\Delta f}{2(\frac{d(f)}{d(t)})} \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) menunjukkan jarak (R) dalam meter dengan objek yang terdeteksi. Yang mana Δt adalah waktu tunda dalam detik, Δf merupakan pergeseran frekuensi terukur dalam Hertz, dengan $d(f)/d(t)$ sebagai pergeseran frekuensi dalam suatu periode.

$$R_{max} = \frac{c \cdot T}{4 \cdot Bandwidth} \quad (2.8)$$

Persamaan (2.8) menunjukkan jarak maksimum yang dapat di deteksi oleh radar FMCW. F_s merupakan frekuensi *sampling* yang biasanya menggunakan satuan Hertz atau *Sample/second*, dan μ adalah tingkat kenaikan frekuensi pada suatu periode disimbolkan dengan Hertz/sekon.

$$\mu = \frac{Bandwidth}{T_c} \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) adalah langkah menghitung μ yaitu membagi nilai *bandwidth* dengan waktu *sweep (chirp)* bersimbol T_c . Biasanya, radar FMCW memiliki nilai T_c yang kecil, dengan menggunakan satuan μs , sehingga nilai *chirp rate* memiliki satuan $Hz/\mu s$

$$T_c = \frac{\lambda}{4 \cdot V_{max}} \quad (2.10)$$

Dengan nilai T_c yaitu periode *chirp* didefinisikan sebagai persamaan (2.10), dengan λ sebagai panjang gelombang (meter) dan V_{max} sebagai kecepatan maksimum yang dapat dideteksi oleh radar (m/s).

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.

$$R_{res} = \frac{c}{2BW} \quad (2.11)$$

Persamaan (2.11) menjelaskan bahwa dengan membagi kecepatan cahaya dengan dua kali lebar pita frekuensi (*Bandwidth*) dalam Hertz, maka resolusi jarak dalam satuan meter akan didapatkan.

$$v_{max} = \frac{\lambda}{2 \cdot T_c} \quad (2.12)$$

Nilai kecepatan maksimum dapat dihitung dengan persamaan (2.12), yaitu panjang gelombang frekuensi yang digunakan (Hz) dibagi dengan *sweep time* dalam sekon (T_c) dikalikan dua.

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

Sehingga nilai resolusi kecepatan dapat dihitung dengan persamaan (2.13), yang membagi panjang gelombang (Hz) dengan 2 kali durasi *frame* (T_f) dalam sekon.

$$T_f = N \cdot T_c = \frac{\lambda}{2 \cdot V_{res}} \quad (2.14)$$

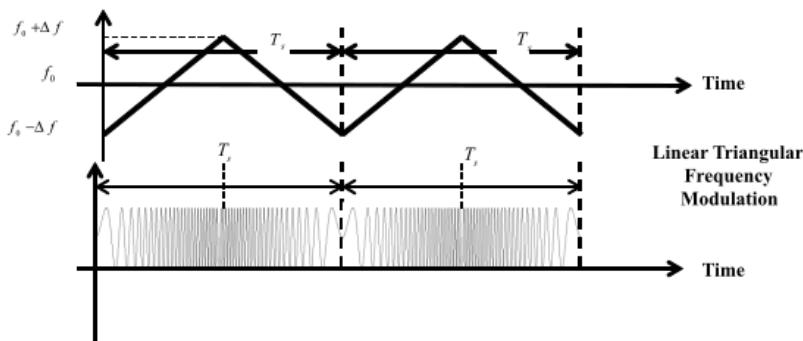
T_f adalah durasi dari *frame* yang terdiri dari N jumlah dari *chirp* secara terus menerus, nilainya dapat dicari pada persamaan (2.14).

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 menyalurkan 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.

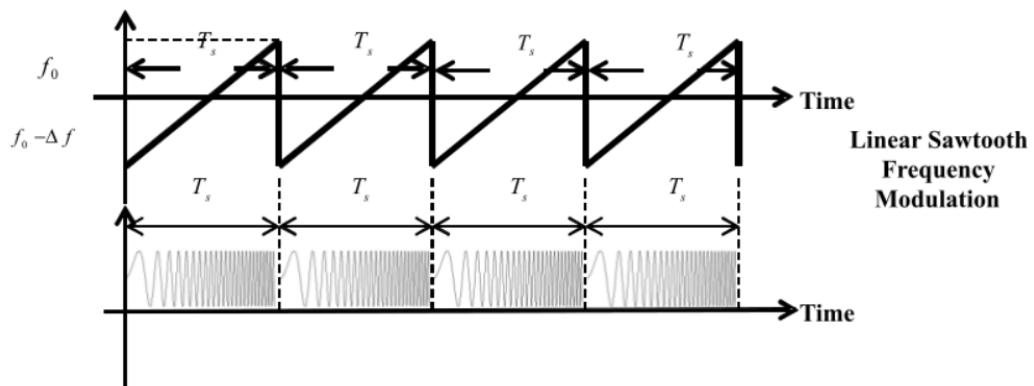
Salah satu jenis gelombang LFM adalah *Linear Triangular Frequency Modulation* yang ditunjukkan pada gambar 2.6. Penggunaan jenis gelombang tersebut akan mempermudah proses evaluasi target. Alasannya adalah saat objek yang terdeteksi bergerak menjauh dari radar, maka frekuensi akan bergeser turun karena *doppler* dan dua *beat frequency* akan muncul, satu pada *upchirp* dan satu pada *downchirp*.

Saat objek berada pada jarak yang jauh, namun tidak bergerak, maka akan terjadi *beat frequency* akibat kemunduran waktu. Bila keduanya terjadi dalam waktu yang bersamaan, maka dua nilai *beat frequency* akan muncul, sehingga sumber pergeseran frekuensi dapat dibedakan diantara *doppler* dengan *delay* waktu.



Gambar 2.6 LFM Tipe Segitiga [26]

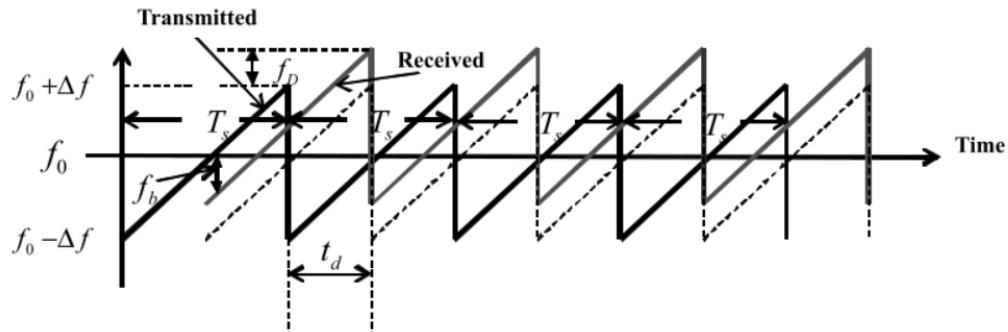
Selain gelombang LFM segitiga, ada pula yang berbentuk seperti gigi gergaji (*Sawtooth*) seperti gambar 2.7.



Gambar 2.7 LFM Tipe Gigi Gergaji [26]

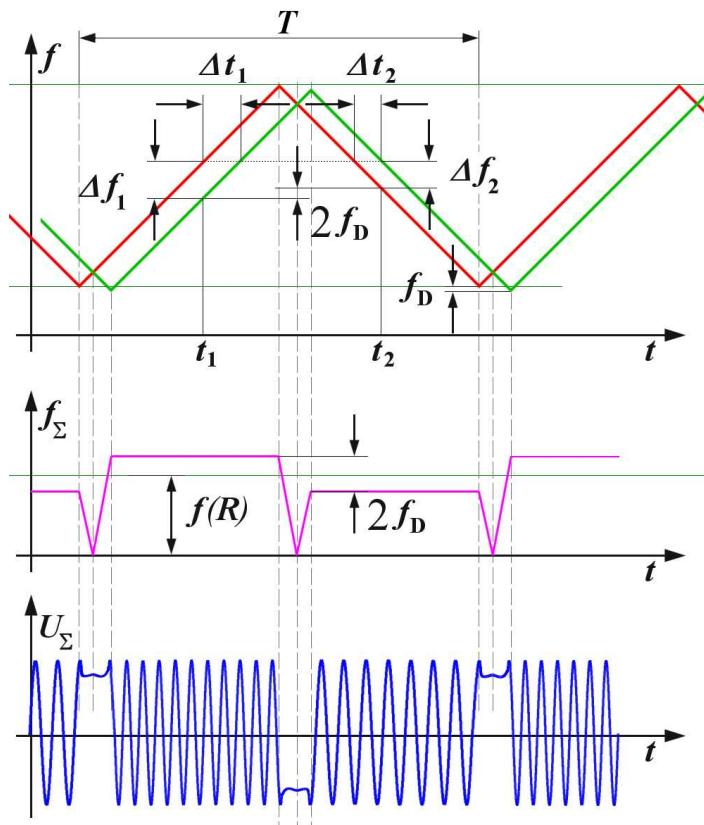
Seluruh teknik tersebut memiliki keunggulannya masing-masing. Keunggulan tersebut didapat karena proses analisis yang berbeda. Pada LFM berbentuk gigi

gergaji, maka hanya objek diam saja yang dapat dideteksi jarak dan kecepatannya seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Detail Analisis LFM Sawtooth [26]

Bila menggunakan LFM berbentuk segitiga, maka objek yang bergerak dapat dideteksi jarak dan kecepatannya dalam waktu yang bersamaan. Cara melakukan analisa pada teknik LFM segitiga dapat dilihat lebih jelas pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Detail Analisis LFM Triangular

Gambar 2.9 menunjukkan langkah analisa gelombang LFM tipe segitiga. Δt adalah pergeseran frekuensi akibat kemunduran waktu, sedangkan Δf adalah pergeseran frekuensi akibat *doppler*. Dengan T sebagai periode *chirp* yang terjadi pada radar.

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 (2.15) dapat menjelaskan hubungan jarak dengan beberapa faktor yang mempengaruhinya.

$$d_0 = \frac{c f_b}{2\mu} = \frac{c T_c f_b}{2BW} \quad (2.15)$$

Pada persamaan (2.15) tersebut, d_0 merujuk ke hasil estimasi jarak dengan satuan meter, c sebagai kecepatan cahaya, f_b adalah *beat frequency* yang merupakan perbedaan pada frekuensi dalam Hertz, μ yang merupakan laju perubahan frekuensi pada suatu waktu (*chirp rate*) disimbolkan sebagai Hz/s, 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.

$$v = \frac{f_d}{2} \lambda \quad (2.16)$$

Persamaan (2.16) akan didapat dengan menunjukkan hubungan antara pergeseran doppler (f_d), dengan v sebagai kecepatan yang memiliki satuan m/s, dan λ adalah panjang gelombang dengan satuan meter.

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 (2.17) dengan nilai n adalah jumlah pengulangan dari uji coba.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (simulasi_i - aktual_i)^2}{n}} \quad (2.17)$$

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 [27]. 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 [28].

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.



(a) USRP B210 dengan *enclosure*

(b) *Board* USRP B210

Gambar 2.10 USRP B210

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.

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*

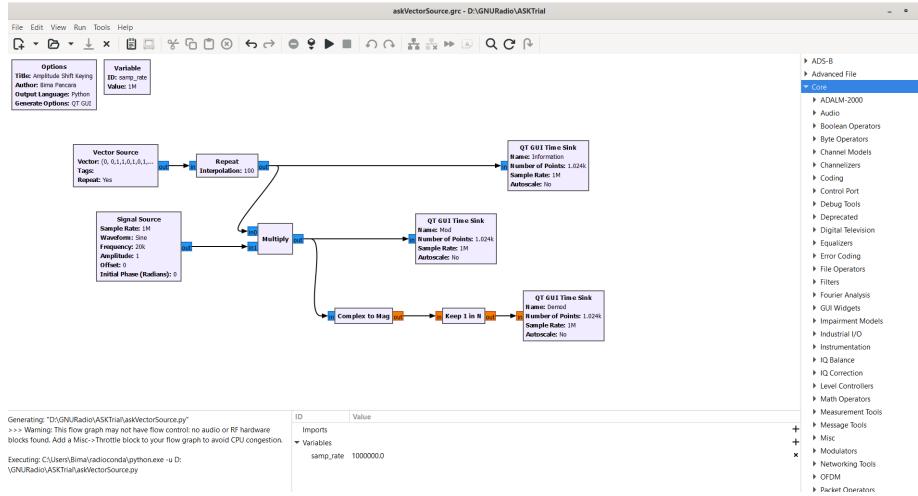
No.	Keterangan	Nilai	Satuan
1.	<i>RF Coverage</i>	70 - 6	MHz - GHz
2.	<i>Analog to Digital Converter Sample Rate</i> (maksimum)	61.44	MS/s
3.	<i>Analog to Digital Resolution</i>	12	bits
4.	<i>Analog to Digital Wideband SFDR</i>	78	dBc
5.	<i>Digital to Analog Converter Sample Rate</i> (maksimum)	61.44	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>	± 2.0	ppm
9.	<i>W/ GPS Unlocked TCXO Reference</i>	± 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*

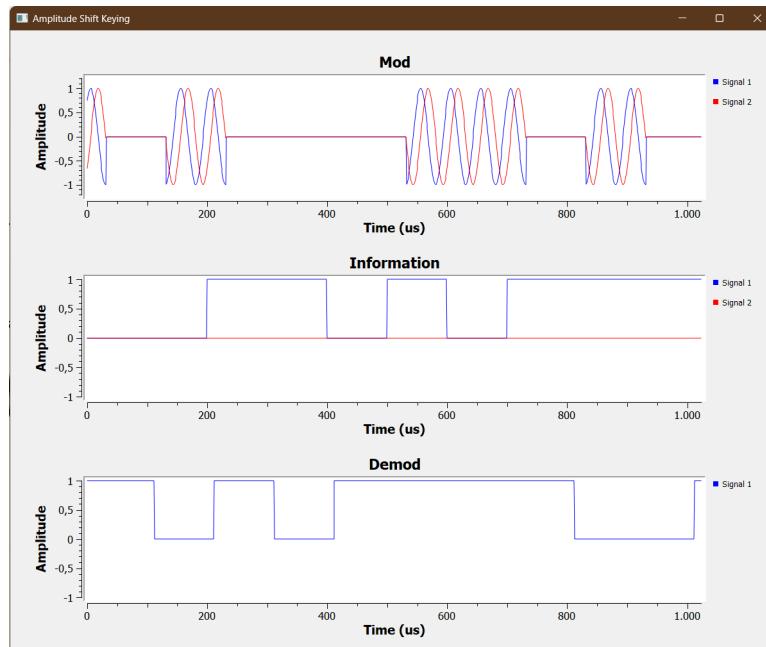
GNURadio adalah aplikasi yang dapat melakukan pemrograman terhadap USRP lewat antarmuka. GNURadio merupakan *software open source* sehingga semua orang dapat mengakses, mengubah, dan membagikan *source code* dari program tersebut secara bebas. Dengan menggunakan aplikasi ini, perubahan parameter pada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

GNURadio juga dapat melakukan simulasi pengolahan sinyal, mulai dari komunikasi menggunakan modulasi tertentu, hingga simulasi pengukuran jarak dan kecepatan objek. Pemrograman GNURadio dilakukan dengan menghubungkan blok dengan tujuan tertentu yang diatur sedemikian rupa sehingga menjadi sistem yang baik.



Gambar 2.11 Contoh *Flowgraph* GNURadio

Gambar 2.11 adalah contoh blok diagram sistem (*flowgraph*) yang sukses dibuat pada aplikasi GNURadio. Tujuan dari sistem tersebut adalah mengirimkan deret vektor tertentu secara berulang dan mengalikannya dengan sinyal sinus. Pada gambar 2.12 menunjukkan hasil bila desain sistem tersebut dijalankan. Pada bagian *Mod* menunjukkan hasil modulasi antara deret vektor dengan sinyal sinusoidal, pada bagian *information* menunjukkan deret vektor yang dikirim, sedangkan pada bagian *Demod* menunjukkan hasil demodulasi.



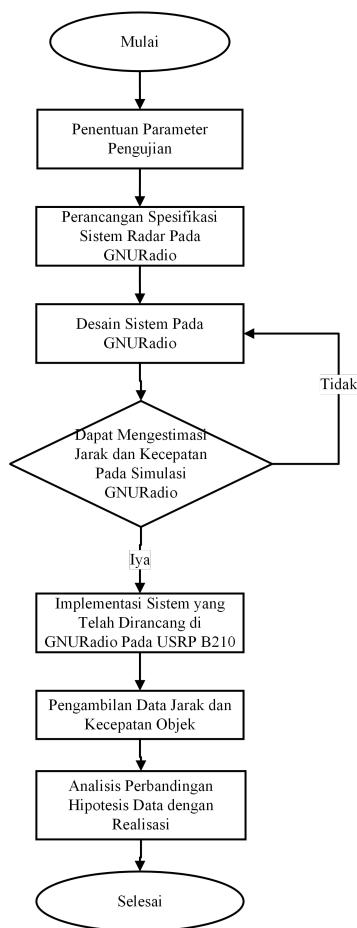
Gambar 2.12 Contoh Hasil Desain Sistem GNURadio

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

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 beberapa 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 Penentuan Parameter

Pada tahap ini parameter pengujian ditentukan sehingga hasil yang dicapai dapat dikatakan baik, sebagai berikut.

Tabel 3.1 Parameter Pengujian

No.	Parameter Pengujian	Satuan
1.	Jarak	m
2.	Kecepatan	m/s
3.	<i>RMSE</i>	-
4.	Nilai prediksi <i>beat frequency</i>	Hz
5.	Nilai prediksi <i>doppler frequency shift</i>	Hz

3.3 Perancangan Spesifikasi Sistem

Pada tahap ini, dilakukan perancangan sistem radar. Maka perlu ditentukannya spesifikasi radar berdasarkan perangkat keras USRP berseri B210 yang digunakan. Spesifikasi dari sistem ini akan dijelaskan pada tabel berikut.

Tabel 3.2 Spesifikasi Sistem Radar

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	USRP	B210
2.	<i>Carrier Frequency</i> (F_c)	5800 MHz
3.	<i>Bandwidth</i> (BW)	14 MHz
4.	Frekuensi Sampling (F_s)	28 MHz
5.	Bentuk Modulasi	<i>Sawtooth</i>
6.	Jarak Maksimum (R_{max})	0.05 m
7.	Resolusi Jarak (R_{res})	10.7 m
8.	Kecepatan Maksimum (V_{max})	9.31 km/h
9.	Resolusi Kecepatan (V_{res})	0.144 km/h
10.	Durasi <i>Chirp</i> (T_c)	0.01 s
11.	<i>Chirp Rate</i> (μ)	1.4 MHz/ μ s

- Hitung panjang gelombang (λ) dari frekuensi pembawa yang sudah ditentukan yaitu 5.8 GHz.

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{F_c} \\ \lambda &= \frac{3 \cdot 10^8}{5.8 \cdot 10^9} \\ \lambda &= 0.0517m\end{aligned}$$

- Menghitung resolusi jarak berdasarkan persamaan (2.11) dan dengan menentukan *bandwidth* bernilai 14 MHz, maka.

$$\begin{aligned}R_{res} &= \frac{c}{2 \cdot Bandwidth} \\ R_{res} &= \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 14} \\ R_{res} &= 10.7m\end{aligned}$$

- Menghitung jarak maksimum yang dapat dideteksi oleh radar digunakanlah persamaan (2.8), namun sebelumnya harus ditentukan terlebih dahulu nilai μ , yang merupakan tingkat kenaikan frekuensi pada suatu periode sesuai dengan persamaan (2.9), dengan nilai T_c ditentukan yaitu 0.01s, maka.

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{Bandwidth}{T_c} \\ \mu &= \frac{14}{0.01} \\ \mu &= 1.4 \cdot 10^9 Hz/s \\ \mu &= 1.4 MHz/\mu s\end{aligned}$$

- Dengan jarak maksimum yang didapat adalah.

$$\begin{aligned}R_{max} &= \frac{c \cdot T}{4 \cdot Bandwidth} \\ R_{max} &= \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 0.01}{4 \cdot 14 \cdot 10^6} \\ R_{max} &= 0.05m\end{aligned}$$

- Sehingga resolusi kecepatan yang didapat adalah.

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

$$V_{res} = \frac{0.0517}{2 \cdot (64 \cdot 0.01)}$$

$$V_{res} = 0.04m/s = 0.144km/h$$

- Maka kecepatan maksimum yang dapat dideteksi bernilai.

$$v_{max} = \frac{\lambda}{2 \cdot T_c}$$

$$v_{max} = \frac{0.0517}{2 \cdot 0.01}$$

$$v_{max} = 2.585m/s = 9.31km/h$$

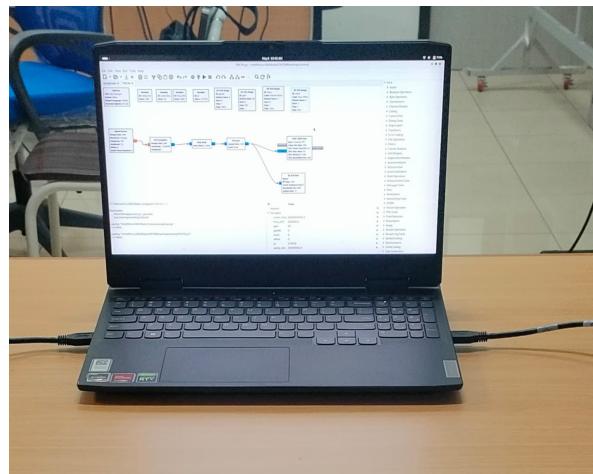
Hampir seluruh perhitungan yang telah dilampirkan menunjukkan hasil prediksi yang tepat, kecuali pada prediksi resolusi kecepatan dan kecepatan maksimum. Sedangkan pada nilai jarak maksimum, hasil menunjukkan nilai yang sangat rendah. Dengan menggunakan persamaan *radar range equation* [22], akan berubah. Dengan persamaan 2.1, maka jarak maksimum yang terdeteksi adalah sekitar 10.7 meter.

3.4 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 3.2.

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 - 6000 MHz

3. Antena *Log-periodic* :

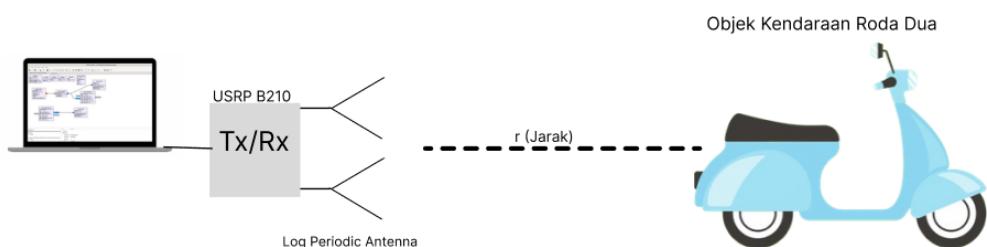


Gambar 3.4 Antena *Log Periodic* Pengujian

- Frekuensi : 800 MHz - 6000 MHz
- Pola Radiasi : *Directional*
- Gain : 5.2 - 6.3 dB

3.5 Pengambilan Data

Pada tahap ini, pengambilan data dengan radar yang sudah didesain dan diimplementasikan pada USRP dilakukan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan kendaraan roda dua sebagai objek yang akan dideteksi. Sehingga pengambilan data kecepatan dan prediksi jarak dapat dilakukan. Hasil prediksi jarak dan kecepatan radar akan dibandingkan dengan nilai aktual jarak pada kenyataan dan kecepatan tercatat pada *speedometer*.



Gambar 3.5 Skema Penelitian

Data berupa nilai *beat frequency* dan *doppler frequency shift* yang sudah ditentukan sebagai parameter pengujian telah didapat dari hasil pengambilan data akan dibandingkan dengan nilai prediksi berdasarkan perhitungan. Dengan begitu, maka nilai RMSE dapat dihitung.



Gambar 3.6 Lokasi Pengujian

Pengambilan data akan dilaksanakan di lokasi lapangan Universitas Telkom Surabaya yang beralamat Jl. Ketintang No.156, Ketintang, Kec. Gayungan, Surabaya, Jawa Timur 60231.

3.6 Konfigurasi Pengujian

Konfigurasi pengujian dilakukan sesuai dengan gambar 3.5. Terdapat satu buah perangkat laptop yang terhubung dengan satu buah USRP, yang terhubung dengan antena *Log-periodic*. Sehingga satu USRP tersebut berperan sebagai *transmitter* dan *receiver*.



Gambar 3.7 Konfigurasi Pengujian

3.7 Prediksi Hasil Pengujian

Prediksi hasil pengujian diperlukan untuk menjadi pembanding dari hasil yang akan didapat setelah melakukan pengujian. Perhitungan prediksi ini berupa nilai *beat frequency* dan *doppler frequency*. Prediksi nilai *beat frequency* didapat pada persamaan (2.15) dan memodifikasinya dengan menentukan nilai jarak (d_0) pada estimasi jarak.

Prediksi nilai frekuensi doppler dapat dilakukan dengan mengubah persamaan (2.16) lalu memberikan asumsi nilai kecepatan (v) pada estimasi kecepatan dengan satuan m/s dan panjang gelombang frekuensi (λ) yang digunakan dengan satuan meter.

Hasil prediksi dari nilai *beat frequency* yang telah dihitung menggunakan turunan dari persamaan berada pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Prediksi Nilai *Beat Frequency*

d0	Prediksi f_b
3 m	28.0194 Hz
6 m	56.0388 Hz
9 m	84.0582 Hz

Hasil prediksi dari nilai *doppler frequency* yang didapat dengan persamaan turunan yang dilakukan terdata dalam tabel 3.4.

Tabel 3.4 Prediksi Nilai *Doppler Frequency*

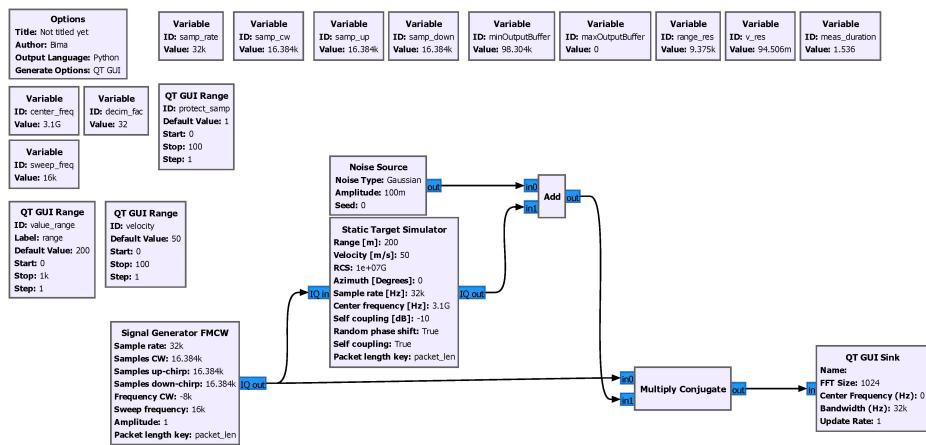
v	Prediksi f_d
5 km/h	53.7 Hz
10 km/h	107.41 Hz
15 km/h	161.11 Hz
20 km/h	214.8 Hz

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Desain Sistem

Bagian ini menjelaskan tentang desain sistem yang dilakukan sesuai dengan spesifikasi sistem yang telah diajukan. Desain ini dibuat di perangkat lunak GNURadio.



Gambar 4.1 Desain Sistem Pada GNURadio

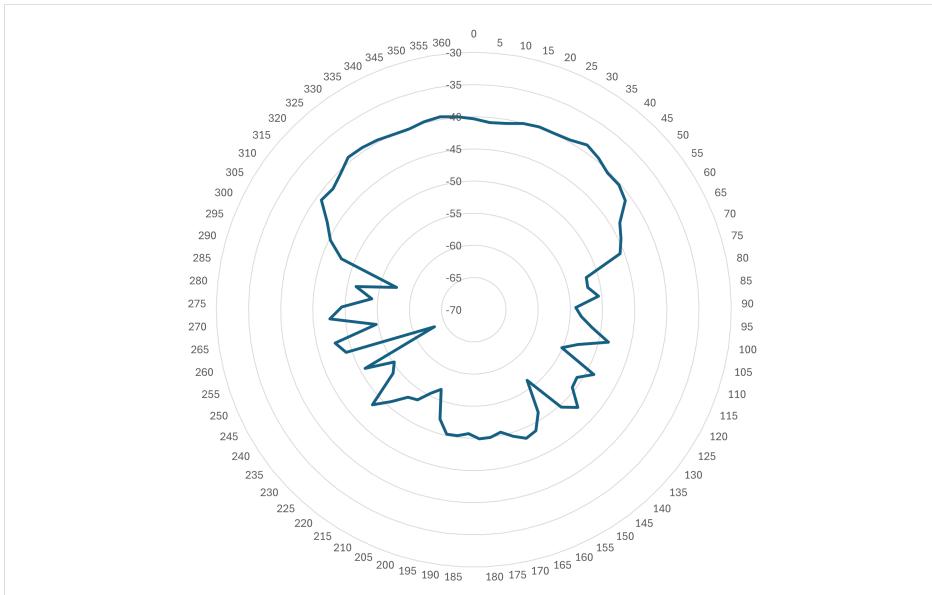
Gambar 4.1 menunjukkan sistem pada GNURadio bila kalkulasi jarak dilakukan secara *real-time*. Namun pada kenyataannya, saat pengukuran dilakukan, terjadi banyak sekali kegagalan, mulai dari *error overflow* dan *underflow*, *error* pada pembacaan nilai jarak yang dihasilkan, hingga kalibrasi sinkronisasi perangkat yang perlu dilakukan tiap sistem diaktifkan.

Sehingga diputuskan bahwa pengambilan hasil dilakukan secara tidak *real-time*, sehingga skema dari sistem yang digunakan di GNURadio berubah. Dalam pengambilan data tidak langsung, juga terjadi *error overflow*, namun hal ini bisa dilewati dengan memanfaatkan kemampuan sistem operasi Linux untuk *mount* dan menyimpan langsung di RAM.

4.2 Pengukuran Antena

Antena merupakan salah satu faktor penting dalam sistem radar, parameter seperti pola radiasi dan *return loss* merupakan hal yang perlu dipertimbangkan

dalam memilih antena. Pada penelitian ini, digunakan antena *log periodic* dengan *bandwidth* yang lebar. Antena identik digunakan sebagai *transmitter* dan *receiver*. Pola radiasi yang didapat pada pengujian antena adalah seperti gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil pengukuran pola radiasi antena

Gambar 4.2 menunjukkan pola radiasi yang bagus untuk digunakan dalam implementasi radar, hal ini ditunjukkan dengan jenis pola radiasi *directional* ke derajat 0. Selain itu, nilai gain dari antena yang digunakan adalah 6 dBi sesuai dengan datasheet yang ada dari antena.

4.3 Pengambilan Data Jarak

Pengambilan data jarak dilakukan di lapangan upacara Universitas Telkom Surabaya dengan menggunakan kendaraan roda dua. Dengan menggunakan pita ukur dan mengatur jarak kendaraan sesuai dengan parameter pengukuran, pengambilan data jarak dapat dilakukan dengan lancar. Terdapat 3 variasi jarak yang dilakukan, masing masing diulang sebanyak 3 kali untuk menjadi validasi.

4.3.1 Jarak 3 Meter

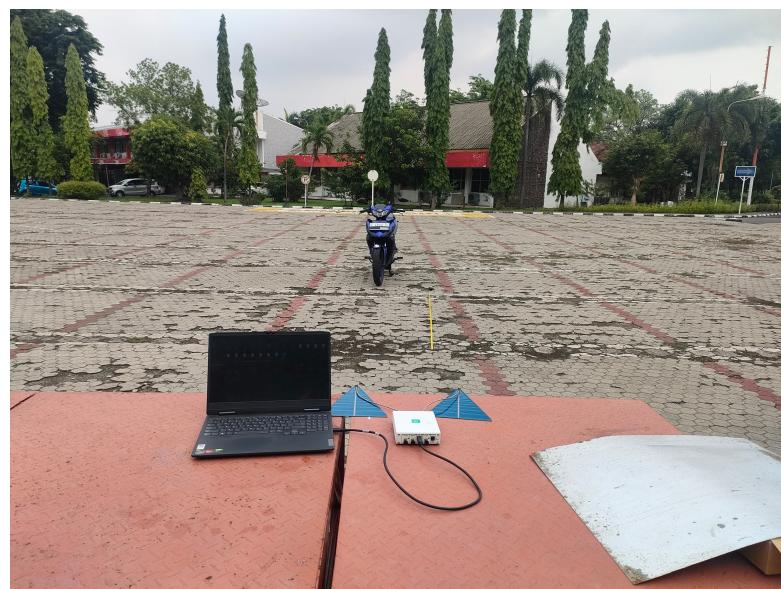
Pengambilan data jarak 3 meter yang dihitung dari ujung antena hingga ke kendaraan roda dua telah dilakukan seperti pada gambar 4.3. Untuk memastikan isolasi antara antena *transmitter* dan antena *receiver*, maka digunakanlah plat yang terbuat dari logam.



Gambar 4.3 Pengambilan data jarak 3 meter

4.3.2 Jarak 6 Meter

Pengambilan data jarak 6 meter yang juga dilakukan dilokasi yang sama telah dilakukan. Dengan skema perhitungan jarak yang sama dengan pengambilan data jarak 3 meter. Namun pada jarak ini kesulitan dalam mengukur jarak dari ujung antena ditemui karena batas pita ukur yang hanya 3 meter, maka dari itu, pengukuran jarak dilakukan dimulai dari titik sebelumnya yaitu 3 meter.



Gambar 4.4 Pengambilan data jarak 6 meter

4.3.3 Jarak 9 Meter

Pengambilan data jarak 9 meter dari ujung antena telah dilaksanakan dengan lancar. Skema pengambilan data jarak sama dengan pengambilan data pada jarak 6

meter. Yaitu dengan memulai perhitungan titik mulai ukur dari titik jarak 6 meter dari antena.



Gambar 4.5 Pengambilan data jarak 9 meter

4.4 Pengambilan Data Kecepatan

Pengambilan data kecepatan dari objek dilakukan di tempat yang berbeda dengan pengambilan data jarak. Hal ini dikarenakan lintasan yang ada di lokasi pengambilan jarak tidak mendukung kecepatan hingga 20 km/h. Sehingga diputuskan bahwa pengambilan data kecepatan harus dilakukan ditempat lain yang memiliki lintasan mulus dan tidak membahayakan. Berbeda dengan pengambilan data jarak, pada data kecepatan diambil 2 skema yaitu mendekati radar dan menjauhi radar dengan 4 variasi kecepatan, masing masing kecepatan yang diuji dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali.

4.4.1 Menjauhi Radar

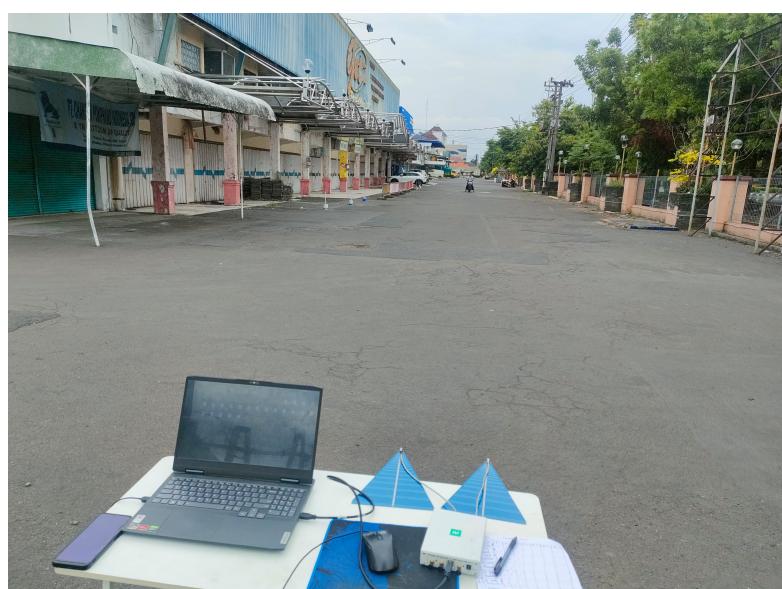
Pengambilan data menjauhi radar dilakukan dengan mengendarai kendaraan roda dua dekat dengan antena radar lalu melaju dengan kecepatan yang sudah ditentukan seperti pada gambar 4.6. Data akan terus diambil hingga 10 detik telah berlalu. Pembatasan pengambilan data ini dilakukan karena semakin lama data diambil, maka semakin besar pula data yang dihasilkan, sehingga pengolahan akan semakin berat untuk dilakukan.



Gambar 4.6 Pengambilan data kecepatan menjauhi radar

4.4.2 Mendekati Radar

Pengambilan data mendekati radar dilakukan hampir sama dengan skema menjauhi radar, hanya saja jarak awal kendaraan ada pada sekitar 20 meter dari antena radar. Namun pemilihan jarak awal ini berubah, tiap kecepatan yang dipilih, pada pengukuran kecepatan lebih lambat, jarak awal yang dipilih lebih dekat dibanding kecepatan lebih tinggi. Hal ini dilakukan untuk memastikan kecepatan dari kendaraan bisa stabil di angka yang telah ditentukan. Gambar 4.7 menunjukkan kegiatan pengambilan data yang telah dilaksanakan.



Gambar 4.7 Pengambilan data kecepatan mendekati radar

4.5 Pengolahan Data Dengan Matlab

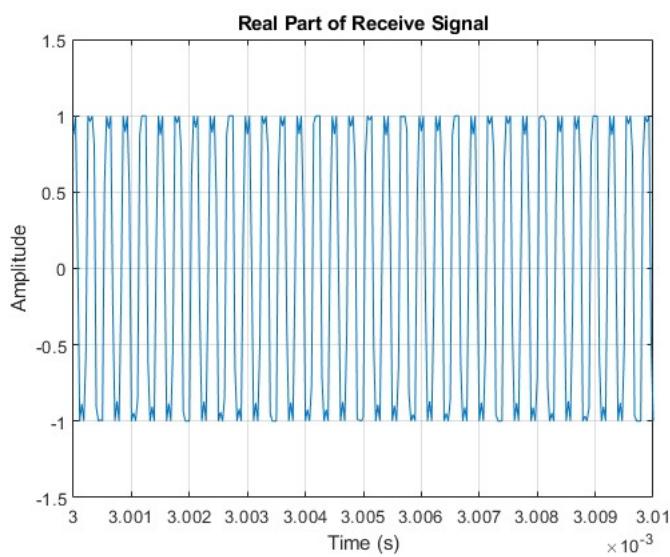
Setelah dilaksanakan pengambilan data jarak objek dan kecepatan objek, selanjutnya adalah melakukan pengolahan dengan perangkat lunak matlab.

4.5.1 Pengolahan Data Jarak

Data jarak yang sudah didapat akan diolah dengan perangkat lunak matlab. Dengan melakukan perkalian *conjugate* antara sinyal terkirim dan sinyal yang diterima, maka *beat frequency* akan didapat. Saat nilai *beat frequency* didapat, maka selanjutnya nilai tersebut bisa dimasukkan kedalam persamaan 2.15. Persamaan ini telah tersedia dalam bentuk fungsi di dalam perangkat lunak matlab, dengan memanggil *beat2range(fb,slope)* dimana *fb* adalah nilai *beat frequency* yang didapat dari pengolahan sebelumnya dan *slope* adalah lebar *sweep bandwidth* yang telah dipilih, yaitu 14 MHz.

4.5.2 Pengolahan Data Kecepatan

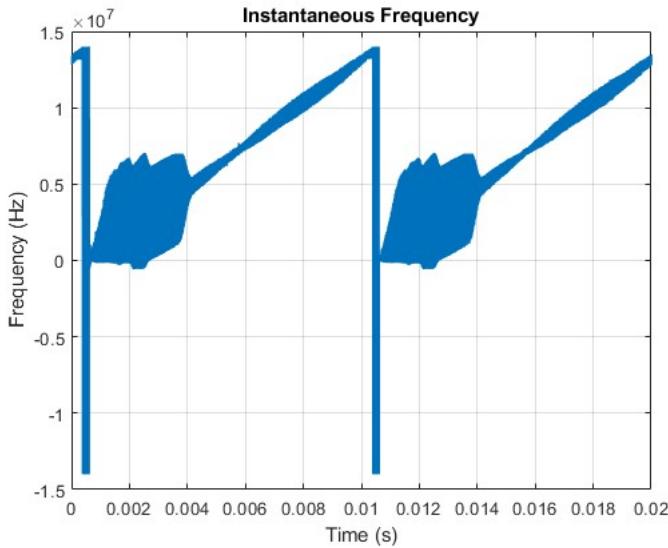
Data kecepatan secara teori dilakukan dengan mengukur berapa pergeseran frekuensi yang terjadi antara frekuensi terkirim dan frekuensi yang diterima. Namun pada kenyataannya, data yang didapat memiliki *phase noise*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Phase Noise dari sinyal yang diterima

Gambar 4.8 menunjukkan bagian real dari sinyal FMCW yang terpantul dari objek. Dapat dilihat pada fasa 90, selalu terjadi kerusakan sinyal, perlu diingat

bahwa pengamatan sinyal ini dilakukan dalam waktu 0.01 detik. Saat seluruh sinyal diterima di plot dalam bentuk perubahan frekuensi dalam waktu, hal ini akan terlihat dengan jelas seperti dalam gambar 4.9.



Gambar 4.9 Perubahan frekuensi dengan waktu

Nampak pada gambar 4.9 bahwa selalu ada *phase noise* yang terjadi, sehingga saat sinyal yang di transmisi dan sinyal yang diterima dibandingkan, pengukuran kecepatan akan sangat sulit dilaksanakan, apalagi saat sinyal doppler yang terjadi sangat kecil. Sehingga digunakanlah teknik lain dalam mengukur kecepatan. Kecepatan dapat didefinisikan menggunakan persamaan sederhana kecepatan bersimbol V, dengan S dibagi t . S adalah jarak tempuh objek dan t adalah waktu tempuh objek. Dengan melakukan konversi dari minimal dua *beat frequency* ke dalam jarak, dan melakukan kalkulasi terhadap perubahan waktu tersebut, maka nilai kecepatan akan didapat.

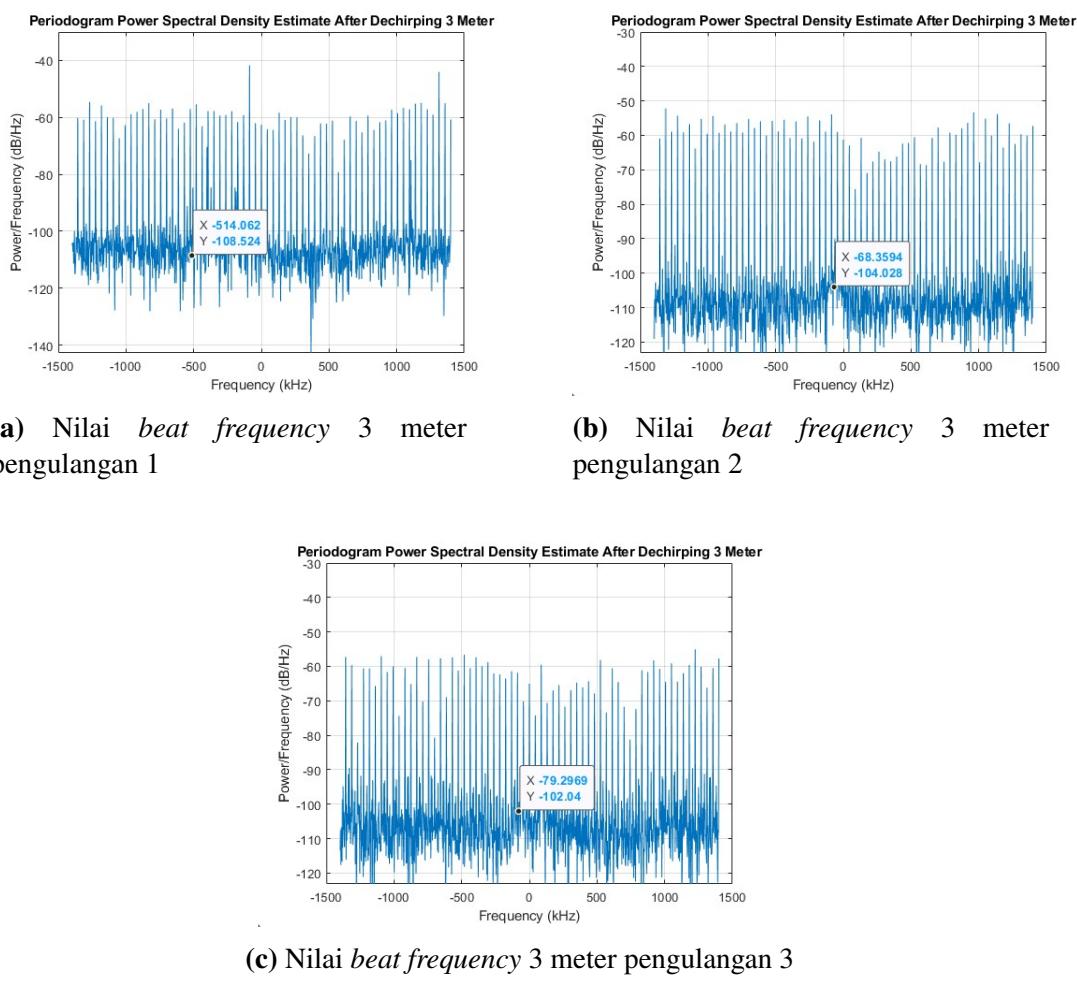
BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pengolahan Data Jarak

Pada bagian ini, data dari *beat frequency* akan disajikan dalam bentuk gambar. Data tersebut adalah hasil setelah diolah pada langkah pengolahan data. Setelah didapat nilai *beat frequency*, selanjutnya dimasukkan kedalam fungsi *beat2range* yang terdapat pada matlab.

5.1.1 Data Jarak 3 Meter



Gambar 5.1 Hasil *beat frequency* dari jarak 3 meter

Pada gambar 5.1 telah dilampirkan tiga sampel hasil percobaan dari total sembilan pengambilan data jarak objek setelah diolah dengan matlab untuk mendapatkan nilai *beat frequency* dari objek. Pada gambar 5.1a yang menunjukkan pengambilan data pengulangan pertama didapatkan hasil nilai *beat frequency* pada frekuensi -514.062 Hz, pada gambar 5.1b yang menunjukkan pengambilan data pengulangan kedua didapatkan nilai -68.3594 Hz, dan pada pengambilan data pengulangan ketiga, nilai *beat frequency* adalah -79.2969 Hz seperti pada gambar 5.1c.

Dengan menggunakan persamaan 2.15, konversi *beat frequency* ke jarak dapat dilakukan, perhitungan konversi adalah sebagai berikut.

$$d_0 = \frac{|-514.062| \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot (\frac{14 \cdot 10^6}{0.01})}$$

$$d_0 = 55.08 \text{ meter}$$

$$d_1 = \frac{|-68.3594| \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot (\frac{14 \cdot 10^6}{0.01})}$$

$$d_1 = 7.32 \text{ meter}$$

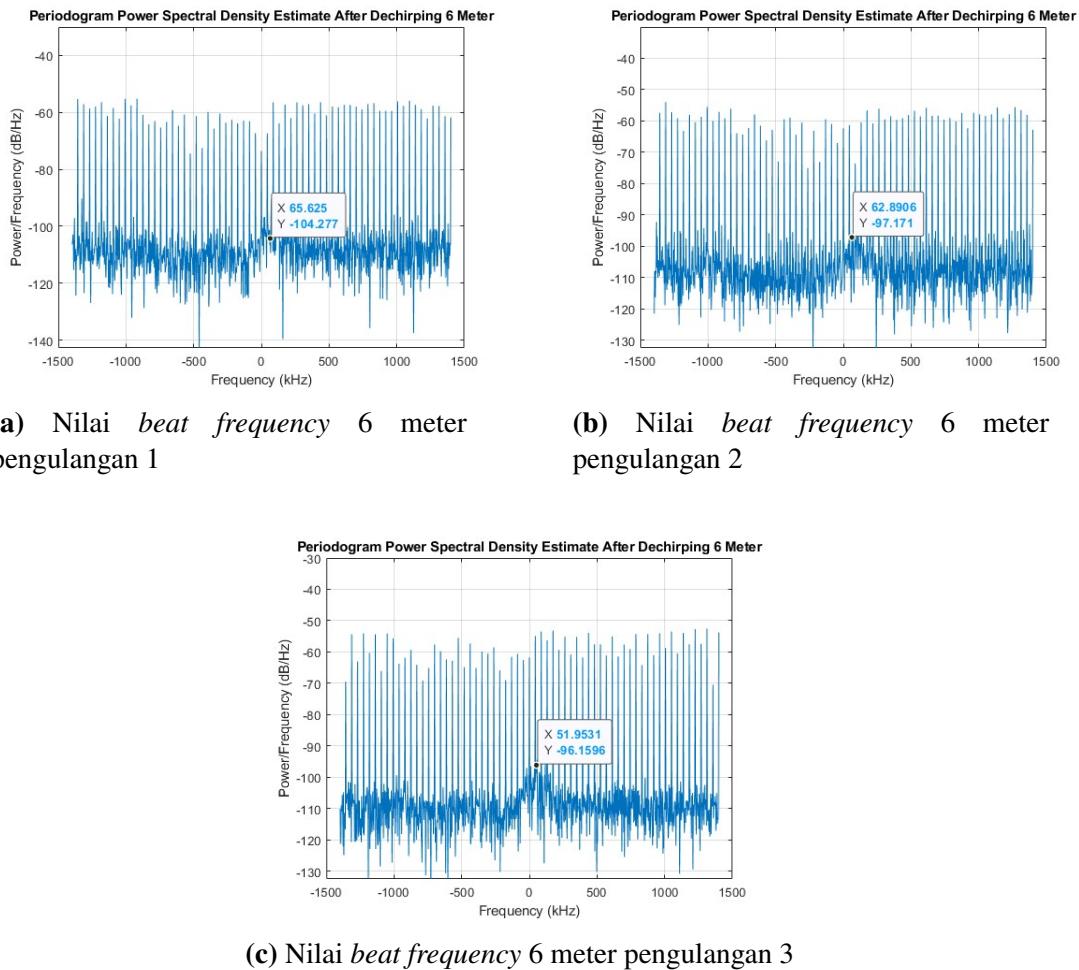
$$d_2 = \frac{|-79.2969| \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot (\frac{14 \cdot 10^6}{0.01})}$$

$$d_2 = 8.5 \text{ meter}$$

Penggunaan mutlak pada *beat frequency* karena nilai jarak yang didapat adalah nilai absolut yang merepresentasikan jarak di depan radar, dengan penggunaan *double sideband* pada gambar 4.3 maka *beat frequency* perlu di ubah agar tidak mendapatkan hasil negatif jarak.

Konversi dari nilai *beat frequency* menuju jarak dilakukan dengan fungsi *beat2range* pada matlab, didapat dari nilai *beat frequency* gambar 5.1a bahwa nilai jarak yang didapat adalah 55.08 meter. Nilai jarak dari *beat frequency* gambar 5.1b adalah 7.32 meter. Sedangkan pada gambar 5.1c nilai jarak ada pada 8.50 meter. Dapat dilihat bahwa pada ketiga pengujian, nilai prediksi jarak tidak linier dengan jarak asli. Hal ini menunjukkan kegagalan radar dalam memprediksi jarak objek pada 3 meter.

5.1.2 Data Jarak 6 Meter

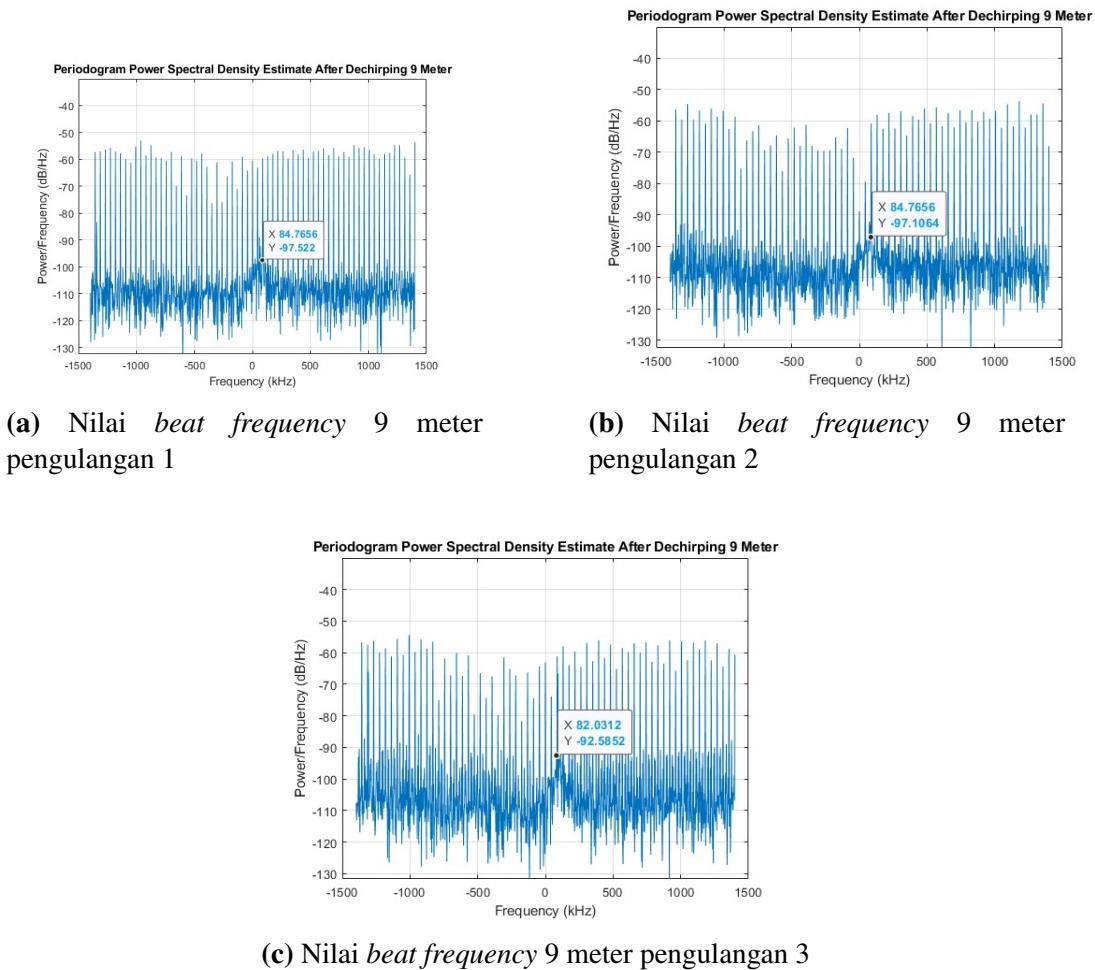


Gambar 5.2 Hasil *beat frequency* dari jarak 6 meter

Pada gambar 5.2 telah dilampirkan tiga dari sembilan sampel hasil percobaan pengambilan data jarak objek setelah diolah dengan matlab untuk mendapatkan nilai *beat frequency* dari objek. Pada gambar 5.2a yang menunjukkan pengambilan data pengulangan pertama didapatkan hasil nilai *beat frequency* pada frekuensi 65.625 KHz, pada gambar 5.2b yang menunjukkan pengambilan data pengulangan kedua didapatkan nilai 62.8906 kHz, dan pada pengambilan data pengulangan ketiga, nilai *beat frequency* adalah 51.9531 kHz seperti pada gambar 5.2c.

Dengan menggunakan persamaan 2.15 yang terkandung dalam fungsi yang tersedia pada matlab, maka didapat nilai jarak dari 5.2a adalah 7.03 meter. Pada hasil *beat frequency* gambar 5.2b, konversi jarak yang didapat adalah 6.74 meter. Pada hasil pengujian ketiga seperti gambar 5.2c, hasil prediksi jarak adalah 5.57 meter. Dari hasil jarak yang sudah didapat, menunjukkan bahwa hasil prediksi radar bekerja dengan cukup baik.

5.1.3 Data Jarak 9 Meter



Gambar 5.3 Hasil *beat frequency* dari jarak 9 meter

Pada gambar 5.3 telah dilampirkan tiga sampel dari total sembilan hasil percobaan pengambilan data jarak objek setelah diolah dengan matlab untuk mendapatkan nilai *beat frequency* dari objek. Pada gambar 5.3a yang menunjukkan pengambilan data pengulangan pertama didapatkan hasil nilai *beat frequency* pada frekuensi 84.7656 Khz, pada gambar 5.3b yang menunjukkan pengambilan data pengulangan kedua didapatkan nilai 84.7656 kHz, dan pada pengambilan data pengulangan ketiga, nilai *beat frequency* adalah 82.0312 kHz seperti pada gambar 5.3c.

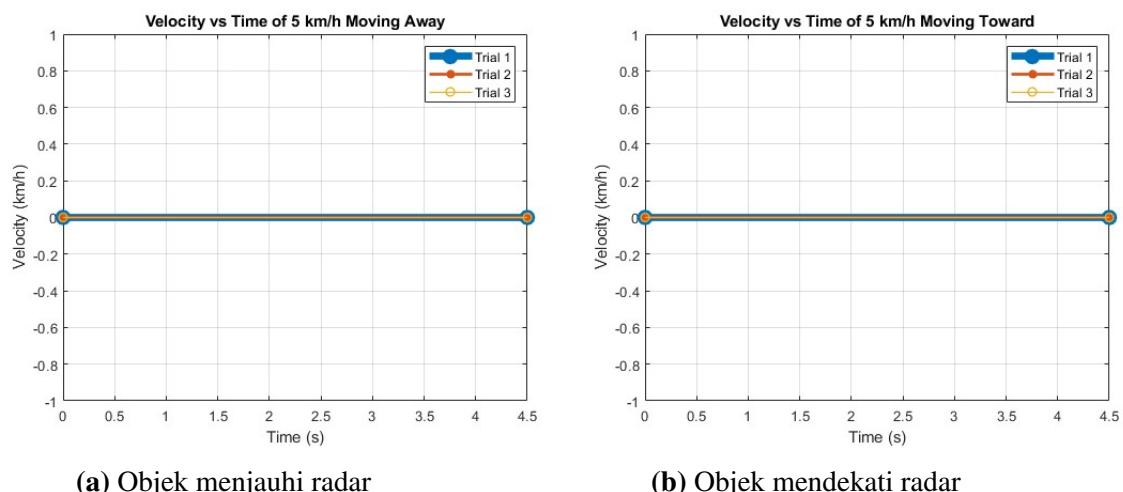
Setelah nilai *beat frequency* tiap pengulangan didapat, maka dilakukanlah konversi dengan fungsi *beat2range*. didapat hasil jarak dari gambar 5.3a adalah 9.08 meter. Pada pengujian dari *beat frequency* gambar 5.3b, nilai jarak juga didapat 9.08 meter. Pada pengujian ketiga dengan *beat frequency* seperti gambar 5.3c, nilai jarak yang didapat adalah 8.79 meter. Hasil pengujian jarak 9 meter dari objek dengan

menggunakan radar menunjukkan kemampuan radar yang dirancang sudah cukup baik dalam memprediksi jarak objek.

5.2 Hasil Pengolahan Data Kecepatan

Hasil prediksi kecepatan didapat dengan melakukan perhitungan dari nilai prediksi jarak yang terdeteksi dalam suatu waktu. Dengan mengamati frekuensi hasil *conjugate*, akan didapat perubahan jarak objek yang didapat.

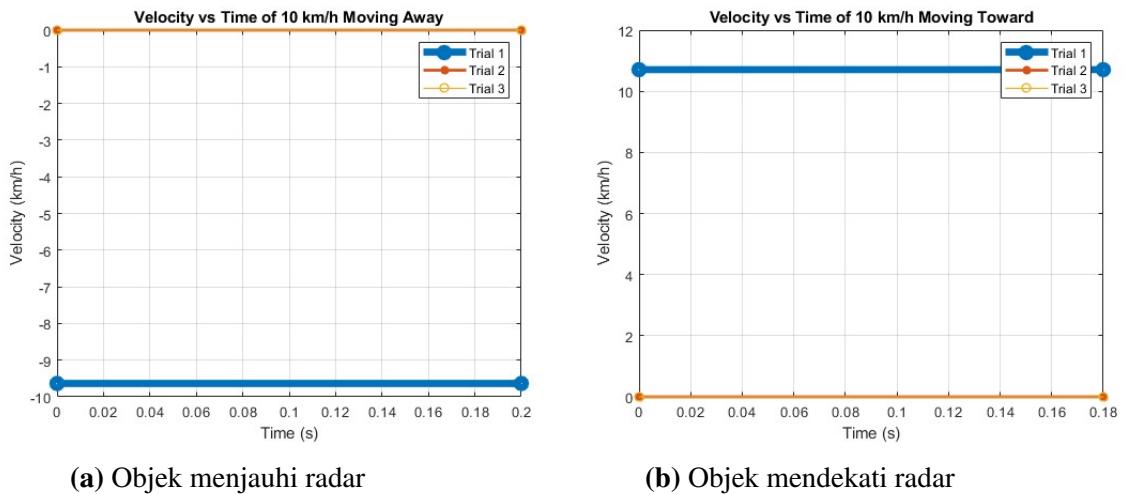
5.2.1 Data Kecepatan 5 km/h



Gambar 5.4 Hasil Prediksi Kecepatan Objek 5 km/h

Pada gambar 5.4a dan gambar 5.4b, data kecepatan dari objek telah diambil dan ditampilkan. Nampak bahwa data kecepatan tidak didapatkan. Hal ini sesuai dengan resolusi kecepatan yang telah dilampirkan dalam tabel 3.2 bahwa objek baru akan terdeteksi setelah kecepatan mencapai minimal 9.31 km/h.

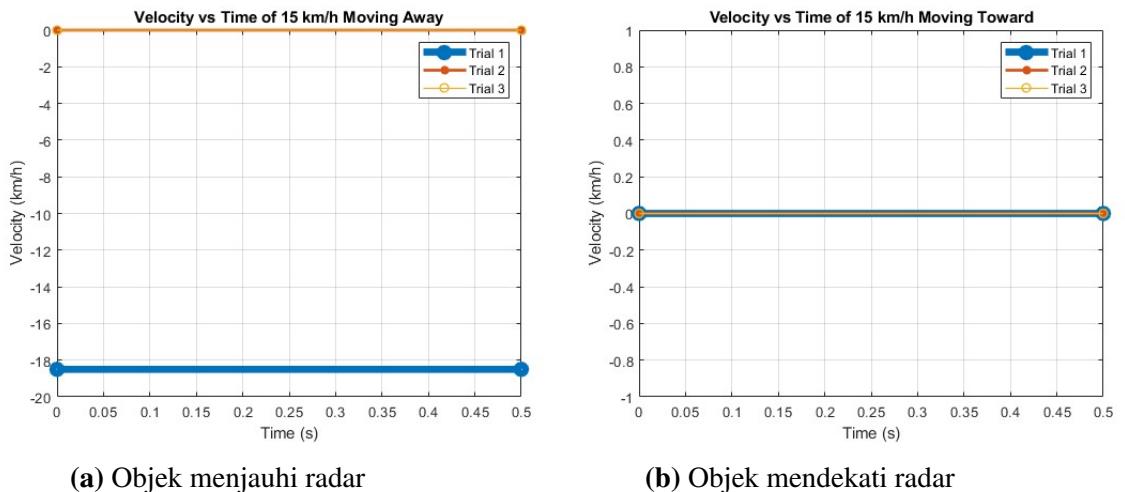
5.2.2 Data Kecepatan 10 km/h



Gambar 5.5 Hasil Prediksi Kecepatan Objek 10 km/h

Data kecepatan dari objek bergerak telah di ambil dan ditampilkan pada gambar 5.5. Grafik tersebut menunjukkan bahwa radar dapat melakukan hasil prediksi kecepatan dari objek. Dengan perbedaan paling mencolok dari kedua skema pengujian adalah saat objek menjauhi radar, maka nilai kecepatan ada pada negatif, sedangkan saat objek mendekati radar maka nilai kecepatan bernilai positif. Nilai prediksi kecepatan ada pada -9.8 km/h untuk objek menjauhi radar, sedangkan saat objek mendekati radar, nilai kecepatan terdeteksi adalah 10.3 km/h.

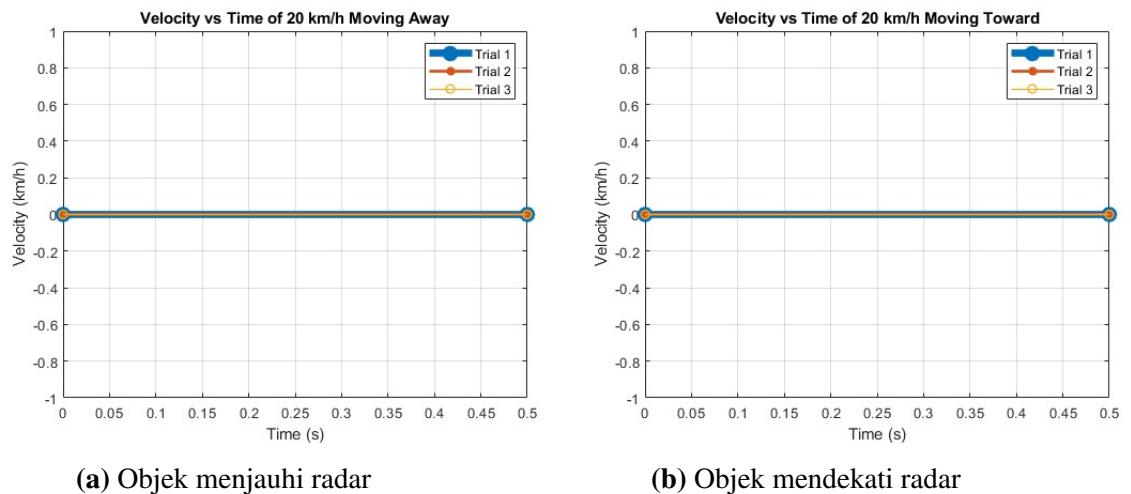
5.2.3 Data Kecepatan 15 km/h



Gambar 5.6 Hasil Prediksi Kecepatan Objek 15 km/h

Gambar 5.6 menunjukkan hasil prediksi kecepatan objek 15 km/h. Dari kedua skema pengujian, hanya skema pengujian objek menjauhi radar yang terdeteksi. Pada prediksi kecepatan tersebut, nilai yang diprediksi adalah -18,03 km/h. Untuk objek yang mendekati radar, didapati bahwa kecepatan objek tidak terdeteksi. Sehingga dapat dinilai bahwa kemampuan radar untuk mendeteksi kecepatan objek pada kecepatan 15 km/h kurang baik.

5.2.4 Data Kecepatan 20 km/h



(a) Objek menjauhi radar

(b) Objek mendekati radar

Gambar 5.7 Hasil Prediksi Kecepatan Objek 20 km/h

Data dari kecepatan objek yang bergerak pada kecepatan 20 km/h telah dilampirkan pada gambar 5.7. Dapat dilihat bahwa kemampuan radar dalam mendeteksi objek yang bergerak pada kecepatan 20 km/h tidak bekerja. Baik pada skema pengujian objek mendekati maupun menjauhi radar. Maka dari itu, dapat dinyatakan bahwa kemampuan radar yang telah didesain tidak dapat mendeteksi objek dengan kecepatan 20 km/h.

5.3 Analisis Hasil

Pada tabel 5.1 telah dilampirkan data deteksi jarak dari pengumpulan dan pengolahan data yang telah dilakukan. Pada tabel tersebut, didapatkan nilai deviasi antara prediksi dan nilai asli yang kecil pada jarak 6 meter dan 9 meter. Sedangkan pada data jarak 3 meter, didapati bahwa nilai prediksi sangat buruk.

Tabel 5.1 Tabel hasil prediksi dan akurasi

Jarak	Hasil Prediksi									Akurasi
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
3	2,64	53,61	12,01	8,50	3,22	11,13	55,08	7,32	8,50	-402,72 %
6	6,74	5,86	7,03	7,62	7,91	7,62	7,03	6,74	5,57	82,86 %
9	9,67	8,79	9,67	10,83	7,62	9,08	9,08	9,08	8,79	93,56 %

Pada jarak 3 meter, didapat rata rata deviasi absolut sekitar 24.72 dengan nilai RMSE 2.72 dan nilai akurasi sekitar -402.72%. Pada jarak pengujian 6 meter, didapatkan rata rata deviasi absolut sekitar 1.03 dengan nilai RMSE 1.17 dan nilai akurasi sekitar 82.86%. Sedangkan pada jarak 9 meter, rata rata deviasi absolut adalah sekitar 0.58 dengan nilai RMSE 0.83 dan nilai akurasi sekitar 93.56%. Maka dapat diambil suatu analisa bahwa kemampuan radar yang telah didesain bekerja sangat baik pada jarak 9 meter dan 6 meter. Sedangkan pada jarak 3 meter, radar yang telah didesain tidak dapat melakukan estimasi jarak objek.

Tabel 5.2 Hasil deteksi Kecepatan

Kecepatan	Hasil Prediksi					
	Menjauhi			Mendekati		
	1	2	3	1	2	3
5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10	-9.8 KM/H	ND	ND	10.3 KM/H	ND	ND
15	-18.03 KM/H	ND	ND	ND	ND	ND
20	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Akurasi	ND			ND		

Pada tabel 5.2 telah dipaparkan beberapa sampel data hasil deteksi kecepatan objek yang bergerak. Bisa dilihat bahwa hasil estimasi kecepatan bisa berjalan, namun tidak dengan kemampuan yang baik. Arah dari gerakan objek yang bergerak juga dapat diamati. Pada saat objek bergerak menjauhi radar, nilai estimasi kecepatan akan negatif, sedangkan saat objek bergerak menjauhi radar, maka nilai estimasi kecepatan menjadi positif.

Karena hasil percobaan yang dapat dianalisis hasilnya hanyalah satu sampel, maka rata rata nilai absolut dan RMSE tidak bisa didapatkan. Sehingga dalam proses penilaian kualitas estimasi, kecepatan yang didapat hanya bisa dinilai dengan menggunakan deviasi absolut. Pada kecepatan 10 km/h mendekati radar, nilai deviasi adalah 0.3. Sedangkan saat objek bergerak menjauhi radar dengan kecepatan

10 km/h, didapatkan hasil negatif yang menunjukkan arah gerak objek, beserta nilai deviasi sekitar 0.2. Pengujian yang memiliki hasil selain dua di atas adalah pengujian 15 km/h yang memiliki nilai deviasi 3.03 dengan penunjuk arah negatif yang benar.

Alasan data hasil pengujian kecepatan sangat sulit untuk didapatkan dan diverifikasi karena penggunaan objek target berupa kendaraan bermotor roda dua. Dengan ukuran tersebut, maka dapat diasumsikan bahwa objek tersebut memiliki *Radar Cross Section* yang tidak terlalu besar, yaitu sekitar $3m^2$.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Pada bagian ini, kesimpulan dari penelitian akan disajikan. Terutama dalam menjawab rumusan masalah yang diajukan pada penelitian ini, maka kesimpulan yang diperoleh adalah:

1. Perancangan sistem radar FMCW dengan GNURadio telah dilakukan dengan menggunakan kemampuan maksimal dari USRP B210. Mulai dari frekuensi sampling 28 MHz bagi *transmit* dan *receive*, lalu lebar *bandwidth* 14 MHz, hingga nilai *internal gain* maksimum untuk mencapai jarak paling jauh yang dapat dicakup. Sistem telah dirancang dan implementasikan dengan baik.
2. Pengujian sistem radar FMCW telah dilakukan, khususnya untuk melakukan pendekripsi objek, estimasi jarak, dan kecepatan objek. Dengan menggunakan kendaraan roda dua yang memiliki *Radar Cross Section* yang kecil, radar mampu menangkap sinyal pantulan dari objek.
3. Evaluasi terhadap sistem radar FMCW yang didesain telah dilakukan setelah melakukan pengujian, didapatkan hasil bahwa radar bekerja dengan baik sebagai pendekripsi jarak yaitu pada 6 meter dengan nilai akurasi prediksi 82.86% dan pada 9 meter dengan nilai akurasi sekitar 93.56%. Sedangkan sistem radar yang didesain tidak dapat mendekripsi objek pada jarak 3 meter dengan nilai akurasi -402.72%. Dalam pengujian kecepatan, sistem radar yang didesain dapat melakukan estimasi kecepatan dengan perbandingan perubahan jarak. Dengan begitu maka radar dapat melakukan deteksi objek.

6.2 Saran

Dari penelitian yang sudah dilakukan, maka terdapat saran yang bisa diimplementasikan pada penelitian selanjutnya.

1. Menggunakan objek dengan *Radar cross section* lebih besar untuk memastikan seluruh energi dapat terpantul secara maksimal oleh objek.

2. Menggunakan perangkat keras lebih mumpuni untuk mengatasi *error overflow* dan *underflow* sehingga pengolahan data secara *real time* dapat dilakukan.
3. Menggunakan antena dengan *beamwidth* lebih kecil dengan *gain* tinggi untuk memastikan isolasi benar benar terjadi pada gelombang yang di transmisikan.
4. Menggunakan teknik yang dapat memperbesar lebar pita dari sistem radar FMCW yang terbatas, seperti *frequency hopping* dan *synthetic wide-bandwidth*.

DAFTAR PUSTAKA

- [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. Coaquira-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. Sundaresan, C. Anjana, T. Zacharia, and R. Gandhiraj, “*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.

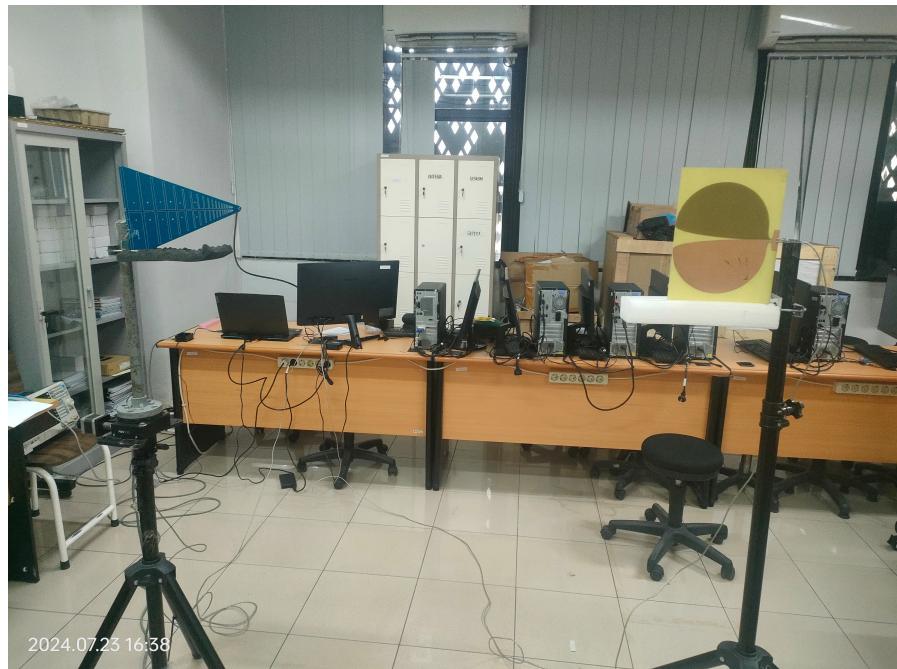
- [9] A. Lestari, D. D. Patriadi, I. H. Putri, B. Harnawan, O. D. Winarko, W. Sediono, and M. A. K. Titasari, “*FPGA-based SDR Implementation for FMCW Maritime Surveillance Radar*,” in *2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, IEEE, Oct. 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] I. Lenz, J. Holtom, A. Herschfelt, Y. Rong, and D. Bliss, “*Respiratory and Heart Rate Detection Using Continuous-Wave Radar Testbed Implemented in GNU Radio*,” *Proceedings of the GNU Radio Conference*, vol. 7, no. 1, 2022.
- [14] A. Wankhede, S. De, and G. N. Surname, “*Development of L-Band FMCW Radar on SDR using GNU RADIO*,” in *2024 Second International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ICETITE)*, IEEE, Feb. 2024.
- [15] P. D. Hilario Re, D. Comite, S. K. Podilchak, C. A. Alistarh, G. Goussetis, M. Sellathurai, J. Thompson, and J. Lee, “*FMCW Radar With Enhanced Resolution and Processing Time by Beam Switching*,” *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2, pp. 882–896, 2021.
- [16] G. Dabrowski, K. Stasiak, J. Drozdowicz, D. Gromek, and P. Samczynski, “*An X-band FMCW Radar Demonstrator Based on an SDR Platform*,” in *2020 21st International Radar Symposium (IRS)*, IEEE, Oct. 2020.

- [17] A. Rizik, E. Tavanti, R. Vio, A. Delucchi, H. Chible, A. Randazzo, and D. D. Caviglia, “*Single Target Recognition Using a Low-Cost FMCW Radar Based on Spectrum Analysis*,” in *2020 27th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, IEEE, Nov. 2020.
- [18] H. Jeong and S. Kim, “*Educational Low-Cost C-Band FMCW Radar System Comprising Commercial Off-the-Shelf Components for Indoor Through-Wall Object Detection*,” *Electronics*, vol. 10, p. 2758, Nov. 2021.
- [19] A. A. Pramudita, F. Y. Suratman, and D. Arseno, “*Modified FMCW System for Non-Contact Sensing of Human Respiration*,” *Journal of Medical Engineering and Technology*, vol. 44, pp. 114–124, Apr. 2020.
- [20] A. A. Pramudita, D.-B. Lin, A. A. Dhiyani, H. H. Ryanu, T. Adiprabowo, and E. A. Yudha, “*FMCW Radar for Noncontact Bridge Structure Displacement Estimation*,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1–14, 2023.
- [21] M. Zhou, Y. Liu, S. Wu, C. Wang, Z. Chen, and H. Li, “*A Novel Scheme of High-Precision Heart Rate Detection With a mm-Wave FMCW Radar*,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 85118–85136, 2023.
- [22] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*. McGraw-Hill electrical engineering series, Boston, Mass.: McGraw Hill, third edition ed., 2001. International edition.
- [23] S. Kingsley, *Understanding radar systems*. Mendham, NJ: SciTech Publishing, 1999.
- [24] W. L. Melvin, ed., *Principles of modern radar*, vol. 3. Edison, NJ: SciTech Publ., 2014.
- [25] 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.
- [26] M. Jankiraman, *FMCW radar design*. Artech House radar series, Boston: Artech House, 2018.
- [27] 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.

- [28] 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.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A



LAMPIRAN B

```
1 % Read Signal
2
3 filename_transmit = 'path/to/file.bin';
4 data_type = 'float32'; % Adjust based on the file format
5 fs = 28e6; % Sampling frequency (Hz)
6 window_size = 2048; % Size of FFT window
7 step_size = 1024; % Step size for sliding window
8 observable = inf;
9
10 % Open and read binary file
11 file_transmit = fopen(filename_transmit, 'rb');
12 sentData = fread(file_transmit, observable, data_type);
13 fclose(file_transmit);
14
15 % Reconstruct complex numbers
16 real_part_transmit = sentData(1:2:end);
17 imag_part_transmit = sentData(2:2:end);
18 complex_data_transmit = complex(real_part_transmit, imag_part_transmit);
19 complex_data_transmit(1:28000000, :) = [];
20
21 % Time axis (if applicable)
22 n_samples_transmit = length(complex_data_transmit);
23 time_transmit = (0:n_samples_transmit-1) / fs;
24
25 % Compute instantaneous phase
26 inst_phase_transmit = unwrap(angle(complex_data_transmit));
27
28 % Compute instantaneous frequency
29 % Append 0 to match dimensions
30 inst_freq_chirp = [diff(inst_phase_transmit) * fs / (2 * pi); 0];
31
32 % Plot the data
33 figure;
34
35 % Instantaneous frequency
36 plot(time_transmit, inst_freq_chirp);
37 title('Instantaneous Frequency of Chirp Transmitted');
38 xlabel('Time (s)');
39 ylabel('Frequency (Hz)');
40 grid on;
```

LAMPIRAN C

```
1 % Drop Data if necessary
2 % Calculate the difference in lengths
3 difference = length(complex_data_transmit) - length(complex_data);
4
5 % Trim the extra elements from the end of complex_data
6 complex_data_transmit_trimmed = complex_data_transmit(1:end-difference);
7
8 % Ranging
9 % StrecProc = dechirp(Rx, Tx)
10 StrecProc = complex_data_transmit_trimmed .* conj(complex_data);
11
12 % Plot the spectrum before dechirping.
13 [Pxx,F] = periodogram(complex_data,[],1024,fs,'centered');
14 plot(F/1000,10*log10(Pxx)); grid;
15 xlabel('Frequency (kHz)');
16 ylabel('Power/Frequency (dB/Hz)');
17 title('Periodogram Power Spectral Density Estimate Before Dechirping');
18
19 % Plot the spectrum after dechirping.
20 [Pyy,F] = periodogram(StrecProc,[],1024,fs,'centered');
21 plot(F/1000,10*log10(Pyy));
22 xlabel('Frequency (kHz)');
23 ylabel('Power/Frequency (dB/Hz)');
24 ylim([-100 -30]); grid
25 title('Periodogram Power Spectral Density Estimate After Dechirping 6 Meter');
```