



TUGAS AKHIR - TE 141599

**Rancang Bangun Sistem Radar MIMO-FMCW
Berbasis SDR (*Software Defined Radio*)**

Raditya Anggaprawira
NRP 2211 100 179

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

***Design of MIMO-FMCW Radar System With SDR
(Software Defined Radio)***

Raditya Anggaprawira
NRP 2211 100 179

Lecture Advisor
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING MAJOR
Industry Technology Faculty
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Rancang Bangun Sistem Radar MIMO-FMCW Berbasis SDR (*Software Defined Radio*)**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2016

Raditya Anggaprawira
NRP. 2211100179

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

**RANCANG BANGUN SISTEM RADAR MIMO-FMCW
BERBASIS SDR (SOFTWARE DEFINED RADIO)**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
pada
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing,


Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.
NIP. 197011111993031002



[Halaman ini sengaja dikosongkan]

RANCANG BANGUN SISTEM RADAR MIMO-FMCW BERBASIS SDR (*SOFTWARE DEFINED RADIO*)

Raditya Anggaprawira
2211 100 179

Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Gamantyo Hendratoro, M.Eng., Ph.D.

Abstrak

Sistem MIMO dapat meningkatkan performa melalui sistem diversitas yang digunakan. Secara khusus, penelitian terakhir yang dilakukan menunjukkan bahwa sistem MIMO dapat secara signifikan meningkatkan kecepatan data pada sistem wireless tanpa meningkatkan daya pengiriman maupun *bandwidth*-nya. Kini banyak peneliti yang mencoba untuk mengaplikasikan teknologi MIMO pada radar. MIMO radar merupakan pengembangan dari *phased array* radar yang telah banyak digunakan. *Phased Array* terdiri dari sejumlah elemen receiver yang saling berkorelasi. Dan radar MIMO merupakan pengembangan dari radar *phased array* dimana sinyal yang ditransmisikan tidak perlu berkorelasi pada setiap elemen-elemen *receiver*-nya.

Pada penelitian ini, direalisasikan sistem radar MIMO berbasis SDR (*Software Defined Radio*) menggunakan *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) untuk mengukur jarak target statis. Langkah yang dilakukan adalah implementasi, serta pengukuran untuk menguji tingkat akurasi deteksi dan resolusi jarak sistem Radar yang dibangun. Spesifikasi sistem Radar yang dibangun yakni menggunakan konfigurasi *bistatic*, bentuk gelombang *Frequency Modulated Continuous Waveform* (FMCW), dan beroperasi pada frekuensi 2,4 GHz. Pengolahan sinyal yang digunakan untuk melakukan deteksi target adalah korelasi silang. Implementasi dilakukan dengan menggunakan tiga unit USRP. Dari hasil pengukuran, jarak terdekat yang dapat terdeteksi adalah 4 meter. Radar masih dapat bekerja baik sampai dengan jarak 12 meter. Pada jarak 16 meter kemampuan radar mulai menurun ditunjukkan dengan tingkat eror dekteksi mencapai 50%.

Kata kunci : Radar, MIMO, FMCW, Korelasi Silang, SDR

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| COVER | i |
| PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR | v |
| HALAMAN PENGESAHAN | vii |
| ABSTRAK | ix |
| ABTRACT | xi |
| KATA PENGANTAR | xii |
| DAFTAR ISI | xi |
| DAFTAR GAMBAR | xv |
| DAFTAR TABEL | xvii |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Permasalahan | 2 |
| 1.3 Batasan Masalah | 2 |
| 1.4 Tujuan | 2 |
| 1.5 Metodologi | 2 |
| 1.6 Sistematika Pembahasan | 3 |
| 1.7 Relevansi | 4 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Radar [4] | 5 |
| 2.1.1 Prinsip Kerja Radar | 5 |
| 2.1.2 Persamaan Radar | 6 |
| 2.1.3 Bentuk Gelombang Radar | 8 |
| 2.1.4 Resolusi Jarak Radar | 9 |
| 2.1.5 Radar Cross Section (RCS) Target[4] | 10 |
| 2.2 Sistem MIMO | 11 |
| 2.3 LFM (<i>Linier Frequency Modulated</i>) | 12 |
| 2.4 FMCW (<i>Frequency Modulated Continuous Wave</i>) Radar | 14 |
| 2.5 Radar MIMO | 15 |
| 2.6 Radar MIMO-FMCW | 16 |

| | |
|---|----|
| 2.7 Korelasi Silang..... | 17 |
| 2.8 Akurasi Deteksi[12]..... | 18 |
| 2.9 Clutter[5]..... | 19 |
| 2.10 SDR (<i>Software Defined Radio</i>)..... | 20 |
| 2.11 USRP (Universal Software Radio Peripheral)..... | 21 |
| 2.11.1 Daughterboard USRP..... | 21 |
| 2.11.2 <i>Bandwidth</i> USRP..... | 19 |
| 2.11.3 Motherboard USRP N210..... | 23 |
| 2.11.4 Motherboard USRP-2943R (RIO)[13]..... | 24 |
| 2.11.5 Daya Pancar USRP..... | 25 |
| 2.12 Perangkat Lunak Matlab dan Labview..... | 26 |
| BAB 3 PERANCANGAN SISTEM..... | 29 |
| 3.1 Spesifikasi Radar..... | 29 |
| 3.2 Pembangkitan Sinyal..... | 32 |
| 3.3 Deskripsi Perangkat..... | 32 |
| 3.3.1 Perangkat Lunak..... | 32 |
| 3.3.2 Perangkat Keras..... | 33 |
| 3.4 Perhitungan Link Budget..... | 34 |
| 3.5 Perancangan Labview untuk Implementasi Pada USRP..... | 36 |
| 3.5.1 Instalasi Perangkat Lunak Labview..... | 38 |
| 3.5.2 Koneksi Perangkat..... | 38 |
| 3.5.3 Perancangan Sub Sistem Pengirim..... | 39 |
| 3.5.4 Perancangan Sub Sistem Penerima..... | 40 |
| 3.5.5 Perancangan Sub Sistem Pengaturan Waktu & Sinkronisasi..... | 41 |
| 3.5.6 Perancangan Sub Sistem Akuisisi Data..... | 43 |
| 3.5.7 Perancangan Sub Sistem Pengolahan Informasi Jarak..... | 44 |
| 3.6 Pengolahan Korelasi Silang pada Matlab..... | 45 |
| 3.7 Skenario Pengukuran..... | 45 |

| | |
|---|----|
| BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA..... | 49 |
| 4.1 Pengukuran Jarak Target..... | 49 |
| 4.1.1 Konfigurasi Perangkat Pengukuran..... | 49 |
| 4.1.2 Langkah Pengukuran..... | 51 |
| 4.1.3 Akuisisi Data Pengukuran..... | 53 |
| 4.2 Hasil Deteksi Jarak 1 Target..... | 54 |
| 4.3 Hasil Deteksi Jarak 2 Target..... | 56 |
| 4.6 Sintesis..... | 57 |
| 5 PENUTUP..... | 59 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 59 |
| 5.2 Saran..... | 59 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 61 |
| LAMPIRAN A PENGESAHAN PROPOSAL TUGAS AKHIR..... | 63 |
| LAMPIRAN B DOKUMENTASI PENGUKURAN..... | 65 |
| LAMPIRAN C ANTENA CIRCULAR WAVEGUIDE..... | 67 |
| LAMPIRAN D PROGRAM LABVIEW COMMUNICATIONS..... | 81 |
| LAMPIRAN E SCRIPT PENGOLAHAN SINYAL..... | 87 |
| BIODATA PENULIS | 91 |

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1.1 Automotive Vehicle [1]..... | 1 |
| Gambar 2.1 Prinsip Kerja Radar[4]..... | 5 |
| Gambar 2.2 Bentuk Gelombang Radar [5]..... | 8 |
| Gambar 2.3 Kanal MIMO [10] | 12 |
| Gambar 2.4 Kompresi Pulsa LFM[4]..... | 14 |
| Gambar 2.5 Radar MIMO[8] | 16 |
| Gambar 2.6 Gelombang LFM[7]..... | 17 |
| Gambar 2.7 Ilustrasi Pemindai Radar[5]..... | 19 |
| Gambar 2.8 Diagram blok SDR USRP | 21 |
| Gambar 2.9 Frekuensi Kerja <i>Daughterboard</i> | 22 |
| Gambar 2.10 Blok Diagram USRP RIO[13]..... | 25 |
| Gambar 3.1 Diagram Blok Radar MIMO..... | 29 |
| Gambar 3.2 Diagram Blok Pembangkitan Sinyal LFM | 31 |
| Gambar 3.3 Sinyal <i>Cosinus Up-Chirp&Down-Chirp</i> | 32 |
| Gambar 3.4 Antena Kaleng <i>Directional</i> [15]..... | 34 |
| Gambar 3.5 Ilustrasi parameter <i>Link Budget</i> | 35 |
| Gambar 3.6 Grafik daya terima sebagai fungsi jarak target | 36 |
| Gambar 3.7 Diagram Blok Pengukuran pada USRP..... | 37 |
| Gambar 3.8 Tampilan NI-USRP Configuration Utility..... | 38 |
| Gambar 3.9 Tampilan NI-USRP Configuration Utility dengan adanya perangkat USRP terkoneksi..... | 39 |
| Gambar 3.10 Diagram Blok Pembangkitan sinyal <i>chirp</i> | 39 |
| Gambar 3.11 Diagram Blok Sub Sistem Pengirim Pada Labview | 40 |
| Gambar 3.12 Diagram Blok Pengaturan Sub Sistem Penerima | 40 |
| Gambar 3.13 Konfigurasi tiga unit USRP dengan menggunakan Octoclock dan Kabel MIMO | 41 |
| Gambar 3.14 Blok Diagram Sinkronisasi pada pengirim..... | 42 |
| Gambar 3.15 Blok Diagram Sinkronisasi pada penerima | 43 |
| Gambar 3.16 Diagram Blok Akusisi Data pada Penerima | 43 |
| Gambar 3.17 Diagram Blok Korelasi Silang..... | 45 |
| Gambar 3.18 Lokasi Parkir Dosen Teknik Elektro ITS[16]..... | 45 |
| Gambar 3.19 Denah Parkir Dosen Teknik Elektro ITS..... | 46 |
| Gambar 3.20 Lokasi Parkiran Robotika ITS | 46 |
| Gambar 3.21 Denah Parkir Dosen Teknik Elektro ITS[16] | 47 |
| Gambar 4.1 Target Model | 49 |
| Gambar 4.2 Konfigurasi Perangkat untuk Deteksi Jarak Satu Target .. | 50 |
| Gambar 4.3 Konfigurasi Perangkat untuk deteksi dua target | 51 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.4 Kondisi Pada Saat Pengukuran | 52 |
| Gambar 4.5 <i>Error Underflow</i> pada Pengirim | 53 |
| Gambar 4.6 Penggunaan Header pada pembangkitan di Pengirim..... | 53 |
| Gambar 4.7 Sinyal pada penerima dengan <i>header</i> pada pengirim..... | 54 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1 RCS Maksimum dari bentuk sederhana | 10 |
| Tabel 2.2 Perbandingan Sinyal <i>Clutter</i> dan <i>Noise</i> | 20 |
| Tabel 2.3 Spesifikasi USRP N210 | 23 |
| Tabel 2.4 Daya Output USRP pada frekuensi 2,4 GHz..... | 26 |
| Tabel 4.1 Hasil deteksi Jarak 1 Target | 55 |
| Tabel 4.2 Hasil Deteksi Jarak 2 Target | 56 |

Design of MIMO-FMCW Radar System With SDR (Software Defined Radio)

Raditya Anggaprawira
2211 100 179

Advisor : Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

Abstract

MIMO system could increase the performance through diversity system used. Specifically, the last research showed that MIMO system could significantly increase the speed of data on wireless system without increasing both power delivery and bandwidth. Recently many researchers try to apply MIMO technology on radar. MIMO radar is a development from phased array radar that widely used. Phased Array consist of correlated receiver element. Furthermore, MIMO radar develop from phased array which the transmitted signal does not have to correlate to any elements of the receiver.

In this study, the realization of MIMO radar system based on SDR (*Software Defined Radio*) use *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) to measure the distance of static targets. The actions are implementation and measurement to evaluate the level of accuracy of the detection and the range resolution of the radar system structure. The specification of radar system use bistatic configuration, wave of *Frequency Modulated Continuous Waveform* (FMCW), and operated on the frequency 2,4 GHz. The signal processing to do target detection is cross correlation. The implementation is using three unit of USRP. The result shows on the nearest distance, it could detect 4 meters. Radar could work up to 12 meters. On 16 meters, the competency of radar begin to decrease, shown by the level of error detection gain 50%.

Keyword : Radar, FMCW, Cross Correlation, MIMO

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan buku tugas akhir dengan judul :

RANCANG BANGUN SISTEM RADAR MIMO-FMCW BERBASIS SDR (SOFTWARE DEFINED RADIO)

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini banyak mengalami kendala, namun berkat bantuan, bimbingan, dan kerjasama dari berbagai pihak sehingga kendala tersebut dapat diatasi. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Papa, mama, mbak Ika, atas dukungan moril dan materiil yang selalu menguatkan penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini serta Citra Rahmadhani yang juga selalu memberikan dukungan dan masukan yang sangat berarti kepada penulis.
2. Ibu Devy Kuswidiastuti, S.T., M.Sc. dan Bapak Prof. Ir. Gamantyo Hendratoro, M.Eng., Ph.D., selaku dosen pembimbing, atas bimbingan yang telah diberikan mulai dari awal penelitian hingga proses akhir penelitian.
3. Bapak dan Ibu dosen Telekomunikasi Multimedia, khususnya dosen Lab. Antena dan Propagasi, yang telah ikut membimbing penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini.
4. Rekan yang sangat membantu dalam penelitian ini, Dika Tyo, mas Nurman, mbak Tania, mbak Ranita, Hasrul, Rizky, dan Eko.
5. Rekan seperjuangan tugas akhir anggota Lab B-306 atas kebersamaan dikala susah maupun senang.
6. Sahabat-sahabat E51, Kalpataru khususnya K-28 dan juga WP-Thok.

Penulis menyadari bahwa pada penyusunan laporan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan karena keterbatasan yang penulis miliki, walaupun demikian penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat untuk penelitian kedepannya.

Surabaya, Juni 2016
Penulis

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| COVER | i |
| PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR | v |
| HALAMAN PENGESAHAN | vii |
| ABSTRAK | ix |
| ABSTRACT | xi |
| KATA PENGANTAR | xiii |
| DAFTAR ISI | xv |
| DAFTAR GAMBAR | xix |
| DAFTAR TABEL | xxi |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Permasalahan | 2 |
| 1.3 Batasan Masalah | 2 |
| 1.4 Tujuan | 2 |
| 1.5 Metodologi | 2 |
| 1.6 Sistematika Pembahasan | 3 |
| 1.7 Relevansi | 4 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Radar [4] | 5 |
| 2.1.1 Prinsip Kerja Radar | 5 |
| 2.1.2 Persamaan Radar | 6 |
| 2.1.3 Bentuk Gelombang Radar | 8 |
| 2.1.4 Resolusi Jarak Radar | 9 |
| 2.1.5 <i>Radar Cross Section (RCS) Target</i> [4] | 10 |
| 2.2 Sistem MIMO | 11 |
| 2.3 LFM (<i>Linier Frequency Modulated</i>) | 12 |
| 2.4 FMCW (<i>Frequency Modulated Continuous Wave</i>) Radar | 14 |
| 2.5 Radar MIMO | 15 |
| 2.6 Radar MIMO-FMCW | 16 |

| | |
|---|----|
| 2.7 Korelasi Silang | 17 |
| 2.8 Akurasi Deteksi[12]..... | 18 |
| 2.9 Clutter[5] | 19 |
| 2.10 SDR (<i>Software Defined Radio</i>)..... | 20 |
| 2.11 USRP (<i>Universal Software Radio Peripheral</i>) | 21 |
| 2.11.1 <i>Daughterboard</i> USRP | 21 |
| 2.11.2 <i>Bandwidth</i> USRP..... | 19 |
| 2.11.3 <i>Motherboard</i> USRP N210 | 23 |
| 2.11.4 <i>Motherboard</i> USRP-2943R (RIO)[13]..... | 24 |
| 2.11.5 Daya Pancar USRP | 25 |
| 2.12 Perangkat Lunak Matlab dan Labview | 26 |
| BAB 3 PERANCANGAN SISTEM..... | 29 |
| 3.1 Spesifikasi Radar | 29 |
| 3.2 Pembangkitan Sinyal | 32 |
| 3.3 Deskripsi Perangkat | 32 |
| 3.3.1 Perangkat Lunak | 32 |
| 3.3.2 Perangkat Keras | 33 |
| 3.4 Perhitungan Link Budget..... | 34 |
| 3.5 Perancangan Labview untuk Implementasi Pada USRP..... | 36 |
| 3.5.1 Instalasi Perangkat Lunak Labview | 38 |
| 3.5.2 Koneksi Perangkat..... | 38 |
| 3.5.3 Perancangan Sub Sistem Pengirim | 39 |
| 3.5.4 Perancangan Sub Sistem Penerima..... | 40 |
| 3.5.5 Perancangan Sub Sistem Pengaturan Waktu & Sinkronisasi..... | 41 |
| 3.5.6 Perancangan Sub Sistem Akuisisi Data | 43 |
| 3.5.7 Perancangan Sub Sistem Pengolahan Informasi Jarak | 44 |
| 3.6 Pengolahan Korelasi Silang pada Matlab | 45 |
| 3.7 Skenario Pengukuran | 45 |

| | |
|--|----|
| BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA | 49 |
| 4.1 Pengukuran Jarak Target..... | 49 |
| 4.1.1 Konfigurasi Perangkat Pengukuran..... | 49 |
| 4.1.2 Langkah Pengukuran..... | 51 |
| 4.1.3 Akuisisi Data Pengukuran..... | 53 |
| 4.2 Hasil Deteksi Jarak 1 Target | 54 |
| 4.3 Hasil Deteksi Jarak 2 Target | 56 |
| 4.6 Sintesis | 57 |
| 5 PENUTUP..... | 59 |
| 5.1 Kesimpulan | 59 |
| 5.2 Saran..... | 59 |
| DAFTAR PUSTAKA | 61 |
| LAMPIRAN A PENGESAHAN PROPOSAL TUGAS AKHIR | 63 |
| LAMPIRAN B DOKUMENTASI PENGUKURAN..... | 65 |
| LAMPIRAN C ANTENA CIRCULAR WAVEGUIDE..... | 67 |
| LAMPIRAN D PROGRAM LABVIEW COMMUNICATIONS..... | 81 |
| LAMPIRAN E SCRIPT PENGOLAHAN SINYAL..... | 87 |
| BIODATA PENULIS | 91 |

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1.1 Automotive Vehicle [1]..... | 1 |
| Gambar 2.1 Prinsip Kerja Radar[4]..... | 5 |
| Gambar 2.2 Bentuk Gelombang Radar [5]..... | 8 |
| Gambar 2.3 Kanal MIMO [10] | 12 |
| Gambar 2.4 Kompresi Pulsa LFM[4]..... | 14 |
| Gambar 2.5 Radar MIMO[8] | 16 |
| Gambar 2.6 Gelombang LFM[7]..... | 17 |
| Gambar 2.7 Ilustrasi Pemindai Radar[5]..... | 19 |
| Gambar 2.8 Diagram blok SDR USRP | 21 |
| Gambar 2.9 Frekuensi Kerja <i>Daughterboard</i> | 22 |
| Gambar 2.10 Blok Diagram USRP RIO[13]..... | 25 |
| Gambar 3.1 Diagram Blok Radar MIMO..... | 29 |
| Gambar 3.2 Diagram Blok Pembangkitan Sinyal LFM | 31 |
| Gambar 3.3 Sinyal <i>Cosinus Up-Chirp&Down-Chirp</i> | 32 |
| Gambar 3.4 Antena Kaleng <i>Directional</i> [15]..... | 34 |
| Gambar 3.5 Ilustrasi parameter <i>Link Budget</i> | 35 |
| Gambar 3.6 Grafik daya terima sebagai fungsi jarak target | 36 |
| Gambar 3.7 Diagram Blok Pengukuran pada USRP..... | 37 |
| Gambar 3.8 Tampilan NI-USRP Configuration Utility..... | 38 |
| Gambar 3.9 Tampilan NI-USRP Configuration Utility dengan adanya perangkat USRP terkoneksi..... | 39 |
| Gambar 3.10 Diagram Blok Pembangkitan sinyal <i>chirp</i> | 39 |
| Gambar 3.11 Diagram Blok Sub Sistem Pengirim Pada Labview | 40 |
| Gambar 3.12 Diagram Blok Pengaturan Sub Sistem Penerima | 40 |
| Gambar 3.13 Konfigurasi tiga unit USRP dengan menggunakan Octoclock dan Kabel MIMO | 41 |
| Gambar 3.14 Blok Diagram Sinkronisasi pada pengirim..... | 42 |
| Gambar 3.15 Blok Diagram Sinkronisasi pada penerima | 43 |
| Gambar 3.16 Diagram Blok Akusisi Data pada Penerima | 43 |
| Gambar 3.17 Diagram Blok Korelasi Silang..... | 45 |
| Gambar 3.18 Lokasi Parkir Dosen Teknik Elektro ITS[16]..... | 45 |
| Gambar 3.19 Denah Parkir Dosen Teknik Elektro ITS..... | 46 |
| Gambar 3.20 Lokasi Parkiran Robotika ITS | 46 |
| Gambar 3.21 Denah Parkir Dosen Teknik Elektro ITS[16] | 47 |
| Gambar 4.1 Target Model | 49 |
| Gambar 4.2 Konfigurasi Perangkat untuk Deteksi Jarak Satu Target .. | 50 |
| Gambar 4.3 Konfigurasi Perangkat untuk deteksi dua target | 51 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.4 Kondisi Pada Saat Pengukuran | 52 |
| Gambar 4.5 <i>Error Underflow</i> pada Pengirim | 53 |
| Gambar 4.6 Penggunaan Header pada pembangkitan di Pengirim..... | 53 |
| Gambar 4.7 Sinyal pada penerima dengan <i>header</i> pada pengirim..... | 54 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1 RCS Maksimum dari bentuk sederhana | 10 |
| Tabel 2.2 Perbandingan Sinyal <i>Clutter</i> dan <i>Noise</i> | 20 |
| Tabel 2.3 Spesifikasi USRP N210 | 23 |
| Tabel 2.4 Daya Output USRP pada frekuensi 2,4 GHz..... | 26 |
| Tabel 4.1 Hasil deteksi Jarak 1 Target | 55 |
| Tabel 4.2 Hasil Deteksi Jarak 2 Target | 56 |

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 1

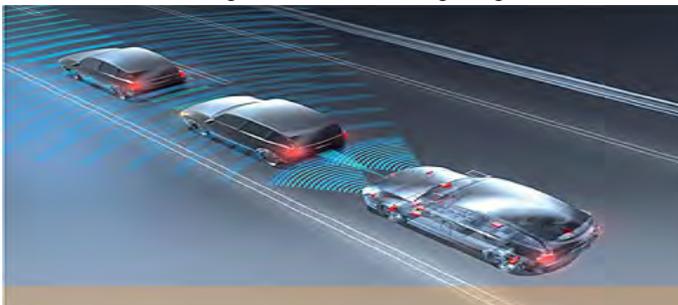
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Alat transportasi saat ini menjadi bagian penting dalam setiap kegiatan manusia untuk membantu dalam melakukan setiap aktifitas. Perkembangan teknologi dalam bidang otomotif juga semakin maju, dapat dilihat dari semakin banyaknya fitur-fitur keselamatan dan kenyamanan dalam berkendara. Kendaraan roda empat saat ini juga sudah banyak digemari masyarakat, selain harga yang terjangkau juga karena kenyamanan dan mudah untuk digunakan.

Berkembangnya dunia otomotif maka mengakibatkan banyak beredar kendaraan roda empat di masyarakat, sehingga jalanan menjadi sangat ramai. Hal ini mengakibatkan tingginya angka kecelakaan kendaraan bermotor di jalanan. Banyak faktor yang menyebabkan hal ini terjadi, faktor manusia dan faktor dari kondisi kendaraan itu sendiri. Kelalaian manusia yang sering terjadi di jalan sangat fatal akibatnya. Sehingga perlu adanya solusi untuk membantu manusia dalam meminimalisir kecelakaan, yaitu sistem radar.

Sistem Radar dapat mendeteksi jarak, kecepatan, dan arah kedatangan dari objek (kendaraan lain) sehingga akan sangat berguna bila di setiap kendaraan menggunakan sistem radar. Sehingga kendaraan bermotor dapat melakukan respon secara otomatis untuk menghindari kejadian yang tidak diinginkan seperti kecelakaan lalu lintas. Pengoperasian ini dinamakan *Automotive Vehicle*[1]. Pengertian *Automotive Vehicle* dapat diilustrasikan seperti pada **Gambar 1.1**



Gambar 1.1 Automotive Vehicle[2]

Banyak teknologi yang bisa digunakan dalam sistem radar. Pada tugas akhir ini penulis memilih menggunakan sistem Multiple Input,

Multiple Output (MIMO). Sistem MIMO dengan antena Colocated untuk sistem radar memiliki sejumlah keunggulan, yaitu kemampuan untuk menghasilkan resolusi yang tinggi, akurasi untuk mendeteksi target bergerak pelan yang tinggi, dan identifikasi parameter yang lebih mudah bila dibandingkan dengan radar phased array[3].

Pada tugas akhir ini akan dilakukan perancangan sistem radar MIMO menggunakan SDR dan nanti hasilnya dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan aplikasi MATLAB. Selain itu, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis dan perbandingan resolusi jarak, akurasi deteksi, jarak maksimum, dan deteksi arah kedatangan antara radar MIMO.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Apakah radar MIMO mampu mendeteksi jarak ?
2. Berapa resolusi jarak dari radar MIMO ?
3. Apakah hasil pengukuran sesuai dengan hasil simulasi pada MATLAB ?

1.3 Batasan Masalah

Hal-hal yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Parameter yang diidentifikasi dari radar MIMO adalah resolusi jarak, akurasi deteksi, dan jarak maksimum
2. Menggunakan antena *Omnidirectional*
3. Radar menggunakan konfigurasi 2x4
4. Pengujian system menggunakan NI USRP N2922, NI USRP N210 dan NI USRP RIO untuk mendeteksi target jamak

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mendapatkan perbandingan pengukuran antara radar MIMO
2. Mengimplementasikan radar MIMO pada SDR

1.5 Metodologi

Penelitian akan dilakukan dengan melalui beberapa tahap yaitu: Studi Literatur, Perancangan dan Desain Sistem Radar MIMO-FMCW, Implementasi Desain pada Platform Berbasis SDR, Pengukuran dan Pengambilan Data, Pengolahan dan Analisis Hasil Pengukuran, dan Kesimpulan

Studi literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari dan mempelajari beberapa paper dan jurnal baik skala nasional maupun internasional serta beberapa buku literatur yang sesuai dengan topik tugas akhir yang diambil. Pada tahap ini akan dipelajari sistem radar, sistem MIMO, gelombang FMCW, radar MIMO, radar FMCW, program Labview.

Perancangan dan Desain Sistem Radar MIMO-FMCW

Pada tahap ini akan dilakukan perancangan mengenai sistem radar MIMO-FMCW menggunakan perangkat lunak MATLAB. Dalam tahap ini penulis menentukan spesifikasi sistem radar dan pembangkitan sinyal.

Implementasi Desain pada Platform Berbasis SDR

Pada tahap ini hasil rancangan desain sistem radar diimplementasikan ke dalam SDR. Untuk SDR ini, perangkat lunak yang digunakan adalah LabVIEW Communications karena berbasis sistem operasi Windows, sementara perangkat keras yang digunakan adalah USRP 2922, USRP N210, dan USRP 2943R (RIO)..

Pengukuran dan Pengambilan Data

Setelah berhasil mengimplementasikan pada perangkat lunak LabVIEW, maka tahap berikutnya adalah melakukan pengukuran dari sistem yang sudah dibuat. Ada beberapa skenario untuk pengukuran ini. Sebagai permulaan sistem diujikan ke satu target. Apabila sudah benar maka sistem diujikan ke dua target.

Setelah didapatkan data hasil pengukuran dari ujicoba yang telah dilakukan maka tahap selanjutnya yang harus dilakukan pengolahan hasil pengukuran.

Pengolahan dan Analisis Data

Pada tahap ini dilakukan pengolahan terhadap data yang didapat dari hasil pengukuran. Tahap pengolahan data ini dilakukan pada perangkat lunak Matlab.

Setelah didapat data yang telah diolah dan didapat hasil perhitungan jarak, maka selanjutnya hasil tersebut dianalisa terlebih lanjut.

Penarikan Kesimpulan

Kemudian dapat dilakukan penarikan kesimpulan mengenai hasil kinerja sistem radar MIMO-FMCW yang telah dibuat. Selain itu juga dipaparkan saran untuk penelitian berikutnya.

1.6 Sistematika Pembahasan

Laporan tugas akhir ini terdiri dari lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut.

- **BAB 1 PENDAHULUAN**

Pada bab ini akan diuraikan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistematika laporan, dan relevansi.

- **BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini akan dijelaskan tentang tinjauan pustaka yang akan membahas tentang sistem radar, sistem MIMO, gelombang FMCW, radar MIMO, radar FMCW, perangkat lunak dan perangkat keras yang digunakan..

- **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini akan dijelaskan tentang metodologi penelitian dalam merancang sistem radar MIMO-FMCW berdasarkan teori pada Bab 2.

- **BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA**

Pada bab ini akan ditampilkan hasil pengujian berdasarkan pengukuran sistem radar MIMO-FMCW dengan skenario yang ditetapkan, kemudian dilakukan analisis dari data yang telah diperoleh sehingga dapat memudahkan melakukan penarikan kesimpulan.

- **BAB 5 PENUTUP**

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran berdasarkan yang telah dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

Hasil yang didapat dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut :

1. Memberikan kontribusi berupa sistem radar baru yang dapat mendapatkan jarak dan sudut kedatangan target dengan resolusi yang baik.
2. Menjadi referensi dalam pengimplementasian radar MIMO-FMCW menggunakan perangkat keras USRP.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

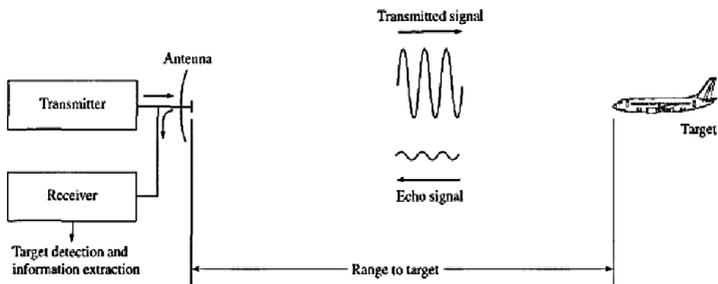
2.1 Radar [4]

Radar (*Radio Detection and Ranging*) adalah sebuah sistem elektromagnetik yang berfungsi untuk mendeteksi dan menentukan lokasi dari suatu objek yang dapat memantulkan gelombang seperti pesawat, kapal, kendaraan ruang angkasa, kendaraan darat, orang dan lingkungan alam.

Radar beroperasi dengan memancarkan sinyal ke suatu ruang dan mendeteksi sinyal echo yang dipantulkan oleh objek (target). Energi yang dipantulkan dan diterima kembali oleh radar tidak hanya mengindikasikan keberadaan target, tetapi dengan membandingkan sinyal *echo* yang diterima dengan sinyal yang dipancarkan, maka lokasi dan beberapa informasi tentang target dapat ditentukan. Radar dapat bekerja pada jarak dekat maupun jauh di bawah kondisi cerah, gelap, hujan, berkabut maupun bersalju, sehingga merupakan teknik pengukuran jarak jauh yang paling akurat sampai saat ini.

2.1.1 Prinsip Kerja Radar

Pemancar membangkitkan gelombang elektromagnetik dan meradiasikannya ke ruang. Sebagian energi terpancar akan dipotong oleh target dan diradiasikan kembali ke segala arah. Energi balik yang mengarah ke radar akan dikumpulkan oleh antena dan dikirim ke penerima. Prinsip radar dapat diilustrasikan seperti **Gambar 2.1**



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Radar [4]

Pada radar antenna ganda, pemancar dan penerima terpisah lokasi, sehingga memancarkan dan menerima sinyal dapat berlangsung bersamaan. Tetapi pada antenna tunggal di mana pemancar dan penerima berdekatan, harus ada pembagian waktu antara pemancaran dan penerimaan karena gelombang radar berupa deretan pulsa berulang.

2.1.2 Persamaan Radar

Jarak radar ke target dapat ditentukan dengan menghitung waktu ketika sinyal tepat ditransmisikan ke target dan ketika kembali ke radar. Sedangkan lokasi dari target dalam sudut dapat ditentukan dari arah narrow-beamwidth antenna radar ketika menerima sinyal echo pada amplitudo maksimum.

Jarak radar ke target

Jarak radar ke target ditentukan dengan dua kali waktu propagasi dari radar ke target (T_R). Kecepatan cahaya $c=3 \times 10^8$ m/s. Sehingga jarak radar ke target dapat ditulis

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

Maximum Unambiguous Range

Maximum Unambiguous Range adalah jarak yang bisa ditempuh sinyal sebelum sinyal berikutnya ditransmisikan. Jarak ini dihitung karena jika ada dua sinyal atau lebih di *space area* akan menimbulkan ambiguous sinyal ketika sampai di receiver, sehingga hasil deteksi maupun pengukuran oleh radar bisa salah. *Maximum Unambiguous Range* (R_{un}) bisa dihitung melalui persamaan (2.2)

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

dimana T_p adalah *pulse repetition period* dan $T_p = \frac{1}{f_p}$, f_p adalah *pulse repetition frequency* dinyatakan dalam satuan hertz atau *pulse per second* (pps).

Kerapatan daya yang diterima oleh obyek yang terletak sejauh R dari pemancar apabila menggunakan antenna Isotropik maka dapat ditentukan :

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

Apabila Radar menggunakan antena pengarah dengan *gain* (G) maka kerapatan daya yang diterima obyek sejauh R dapat dinyatakan :

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

dimana :

P_t = daya pemancar

Daya yang dapat diterima oleh target apabila luas tangkap efektif dari target tersebut

dinyatakan dengan σ maka :

$$P \sigma = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (2.5)$$

Jika semua daya yang diterima oleh target tersebut dipantulkan kembali, maka kerapatan daya sinyal *echo* yang diterima radar :

$$\hat{P} = \frac{P_t G \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (2.6)$$

Apabila luas tangkap efektif dari antena penerima ialah A_e maka daya yang diterima oleh antena penerima dinyatakan sebagai berikut :

$$P_r = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} A_e \quad (2.7)$$

$$P_r = \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (2.8)$$

Jarak maksimum yang dapat dicapai oleh penerima ialah dengan mendeteksi jarak dari target yang hampir tidak dapat dideteksi, hal ini terjadi apabila daya signal pantul yang dapat diterima sama dengan signal minimum yang masih dapat dideteksi.

Maka didapat :

$$R_{max} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \left[\frac{P_t G \sigma A_e}{S_{min}} \right]^{1/4} \quad (2.9)$$

karena

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e \quad (2.10)$$

dimana :

S_{min} = sinyal minimum yang masih dapat dideteksi

A_e = luas tangkap efektif dari antena penerima

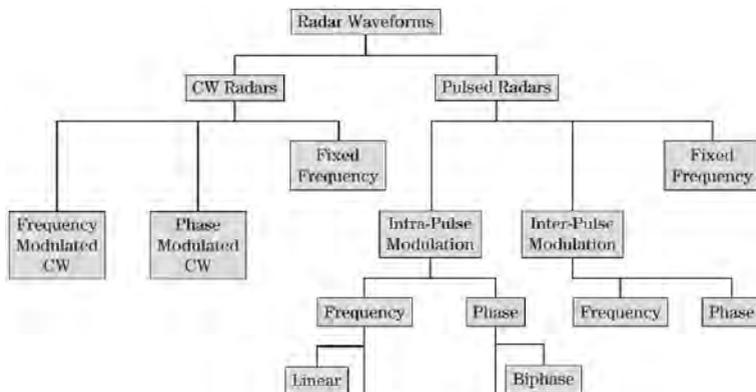
G = *gain* antena

- P_t = daya pemancar
- σ = luas tangkap efektif dari target
- λ = panjang gelombang

2.1.3 Bentuk Gelombang Radar

Radar terbagi atas dua tipe berdasarkan pada bentuk gelombang (*waveform*) yang digunakan, yakni radar deretan pulsa (*pulse train*) dan radar gelombang kontinu (*continuous wave (CW)*). Pemilihan bentuk gelombang ditentukan oleh desain perangkat keras dan tujuan penggunaan radar. Dari sisi perangkat keras, bentuk gelombang deretan pulsa umumnya digunakan pada radar yang hanya menggunakan satu antena dengan fungsi pengiriman dan penerimaan aktif secara bergantian. Radar dengan mekanisme kerja tersebut disebut *monostatic radar*. Pada saat pengiriman pulsa, maka radar dengan bentuk gelombang deretan pulsa tidak dapat menerima sinyal, kemudian setelah pulsa dikirimkan terdapat jeda waktu penerimaan sinyal *echo*. Penerimaan sinyal dilakukan setelah pengiriman pulsa selesai dilakukan sampai pada waktu pengiriman pulsa berikutnya.

Sebaliknya, pada bentuk gelombang CW tidak terdapat waktu tertentu untuk memulai penerimaan sinyal *echo* yang berarti setiap sinyal gelombang CW langsung dikirimkan setelah sinyal sebelumnya terkirim. Rentang waktu penerimaan radar dengan bentuk sinyal CW adalah sama dengan periode sinyal CW yang dikirimkan. Sehingga, bentuk gelombang CW digunakan pada radar dengan antena pengirim dan penerima yang terpisah atau fungsi pengiriman dan penerimaan aktif bekerja secara



Gambar 2.2 Bentuk Gelombang Radar [5]

bersamaan. Radar dengan mekanisme kerja tersebut disebut *bistatic radar*.

Bentuk gelombang deretan pulsa digunakan untuk mengukur jarak target. Resolusi jarak pada bentuk gelombang deretan pulsa ditentukan oleh lebar pulsa. Bentuk gelombang CW memanfaatkan pergeseran frekuensi Doppler dari sinyal *echo* yang disebabkan oleh target yang bergerak untuk mengukur kecepatan radial target. Radar CW sederhana tidak dapat mengukur jarak target, namun dapat digunakan untuk mendapatkan jarak target melalui modulasi gelombang [6].

Kelebihan dari penggunaan bentuk gelombang CW adalah radar mampu mendeteksi target pada jarak yang dekat terhadap radar sampai dengan *maximum unambiguous range* yang ditentukan oleh lebar satu pulsa bentuk gelombang CW. Sedangkan radar deretan pulsa mampu mendeteksi jarak target pada rentang waktu penerimaan sinyal *echo*.

2.1.4 Resolusi Jarak Radar

Resolusi radar adalah kemampuan radar untuk mendeteksi 2 target yang berbeda pada posisi yang saling berdekatan. Semakin kecil resolusi radar, maka kemampuan radar akan semakin baik.

Pulsa radar, baik pada bentuk gelombang deretan pulsa maupun CW terbagi atas dua jenis, yaitu pulsa tak termodulasi (*unmodulated*) dan termodulasi (*modulated*). Bentuk gelombang deretan pulsa pada frekuensi tetap dengan perubahan amplitudo disebut termodulasi amplitudo. Pada pulsa tak termodulasi dan termodulasi amplitudo, resolusi jarak radar ditentukan oleh lebar pulsa radar, yang diformulasikan sebagai berikut [4]:

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \quad (2.11)$$

Notasi ΔR menyatakan resolusi jarak radar dalam meter dan τ adalah lebar pulsa dalam satuan detik.

Pulsa radar termodulasi, terbagi atas modulasi frekuensi dan fasa. Pada pulsa termodulasi frekuensi maupun fasa, resolusi jarak tergantung pada lebar *bandwidth* yang digunakan, yang ditunjukkan dalam persamaan [4]:

$$\Delta R = \frac{c}{2\beta} \quad (2.12)$$

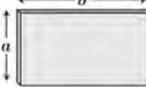
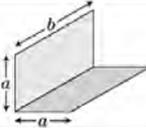
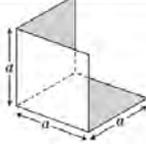
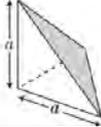
dengan β adalah *bandwidth* pulsa radar yang dibangkitkan.

2.1.5 Radar Cross Section (RCS) Target[4]

Radar cross section (σ) adalah karakteristik dari objek atau target yang dimasukkan dalam persamaan radar untuk menyatakan magnitudo sinyal *echo* yang kembali dari target. Definisi RCS adalah

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\text{daya dipantulkan ke sumber/sudut unit solid}}{\text{kerapatan daya datang}/4\pi} \\ &= 4\pi R^2 \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Tabel 2.1 RCS maksimum dari bentuk sederhana, $\lambda \ll$ ukuran objek [5]

| Bentuk | Ilustrasi | RCS |
|---|---|-------------------------|
| <i>Sphere, radius r</i> |  | πr^2 |
| <i>Flat plate, edge lengths a and b</i> |  | $4\pi(ab)^2/\lambda^2$ |
| <i>Dihedral, edge lengths a and b</i> |  | $8\pi(ab)^2/\lambda^2$ |
| <i>Trihedral, square sides, edge length a</i> |  | $12\pi(ab)^2/\lambda^2$ |
| <i>Trihedral, triangular sides, edge length a</i> |  | $4\pi a^4/3\lambda^2$ |

dengan E_r adalah kuat medan listrik dari sinyal *echo* yang kembali ke radar, dan E_i adalah kuat medan listrik yang datang pada target. Persamaan di atas mengasumsikan target berada pada jarak yang cukup jauh dari radar sehingga gelombang datang bisa dianggap *planar*, bukan

spherical. RCS dinyatakan sebagai area rekaan yang menangkap sebagian daya yang datang pada target. Daya yang datang pada target diasumsikan terhambur secara *uniform* ke semua arah, menghasilkan daya *echo* yang sama dengan daya yang dihasilkan oleh target nyata.

RCS tergantung pada dimensi karakteristik objek dan dibandingkan dengan panjang gelombang radar. Ketika panjang gelombang sangat besar jika dibandingkan dengan dimensi objek, penghamburan gelombang dianggap berada pada daerah Rayleigh dan lebih ditentukan oleh volume penghambur bukan dari bentuknya. Ketika panjang gelombang radar lebih kecil jika dibandingkan dimensi objek, disebut berada pada daerah optik (*optical region*). Pada daerah optik, RCS lebih dipengaruhi oleh bentuk objek. Diantara daerah Rayleigh dan optik terdapat daerah resonansi dimana panjang gelombang radar sebanding dengan dimensi objek. **Tabel 2.1** berisi RCS maksimum dari berbagai bentuk target sederhana, dengan panjang gelombang lebih kecil jika dibandingkan dengan ukuran target.

2.2 Sistem MIMO

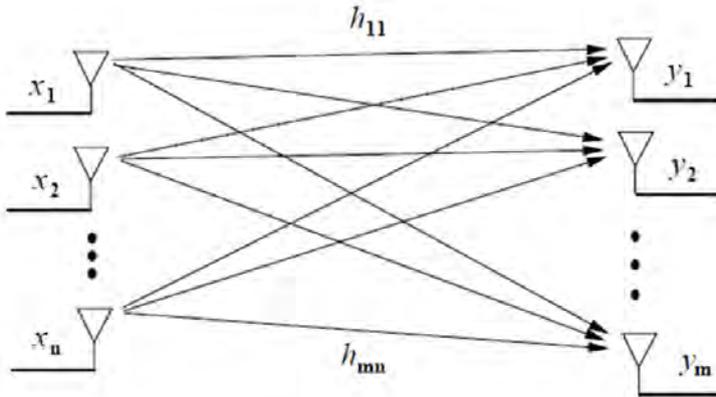
Sistem MIMO didefinisikan sebagai komunikasi *point-to-point* menggunakan banyak antena baik pada pemancar maupun penerima. Manfaat penggunaan banyak antena pada kedua sisi ini adalah untuk meningkatkan performa melalui sistem diversitas yang digunakan. Secara khusus, penelitian terakhir yang dilakukan menunjukkan bahwa sistem MIMO dapat secara signifikan meningkatkan kecepatan data pada sistem *wireless* tanpa meningkatkan daya pengiriman maupun *bandwidth*. Dampak dari meningkatnya kecepatan data ini adalah alokasi ruang tambahan dan tata letak untuk penempatan antena-antena serta parameter sistem yang lebih kompleks untuk pemrosesan sinyal multi-dimensi. Sistem komunikasi *point-to-point* pita sempit (*narrowband*) menggunakan n antena pemancar dan m antena penerima digambarkan dengan model waktu diskrit pada matriks di persamaan (2.14) [10]

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & \cdots & h_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_m \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

atau secara sederhana dapat ditulis pada persamaan (2.15)

$$\bar{y} = H\bar{x} + \bar{n} \quad (2.15)$$

dimana \bar{x} adalah n -dimensional transmitted symbol, \bar{n} adalah vektor *Additional White Gaussian Noise* (AWGN) yang besarnya m -dimensi, dan matriks kanal H adalah *zero mean (Rayleigh Fading) complex circular Gaussian random* dimana variabel h_{mn} merepresentasikan *gain* kanal dari antenna pemancar m ke antenna penerima n . Dengan asumsi melakukan normalisasi *noise* sehingga *noise covariance matrix* adalah sebuah matriks identitas, serta diasumsikan sisi penerima mampu untuk



Gambar 2.3 Kanal MIMO[10]

melakukan estimasi pada kanal H secara tepat, sehingga setiap elemen H dapat diidentifikasi. Dan sebagai catatan tambahan bahwa semua variabel diatas adalah proses stokastik. Sistem kanal MIMO dapat dilihat pada **Gambar 2.3**

Sistem MIMO dengan antenna yang terletak pada satu tempat dengan posisi linier (*colocated antenna*) untuk sistem radar memiliki sejumlah keunggulan, yaitu kemampuan untuk menghasilkan resolusi yang tinggi, akurasi untuk mendeteksi target bergerak pelan yang tinggi, dan identifikasi parameter yang lebih mudah bila dibandingkan dengan radar *phased array* [3].

Sistem MIMO yang digunakan pada Radar yaitu menggunakan teknik Multiplexing, yaitu teknik menggabungkan beberapa sinyal untuk dikirimkan secara bersamaan pada suatu kanal transmisi.

2.3 LFM (*Linear Frequency Modulated*)

LFM adalah salah satu bentuk kompresi pulsa radar yang dibangkitkan dengan cara melakukan sapuan (*sweep*) frekuensi. Sapuan

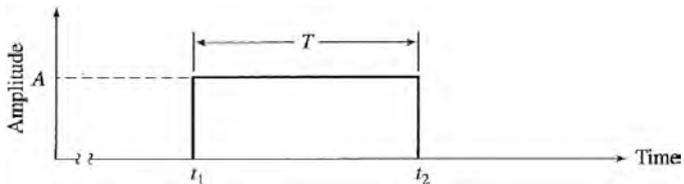
frekuensi bisa dilakukan secara linier pada satu arah (*unidirectional*) naik (*up chirp*) atau turun (*down chirp*), maupun gabungan dari keduanya (*bidirectional chirp*) dalam rentang pulsa (*pulsewidth*) yang dibangkitkan. Untuk membangkitkan *unidirectional chirp*, digunakan sinyal pemodulasi berbentuk gigi gergaji (*sawtooth*). Sedangkan pada *bidirectional chirp* digunakan sinyal pemodulasi berbentuk segitiga (*triangle*) dengan periode sama dengan lebar pulsa yang akan dibangkitkan. Bentuk gelombang LFM dapat diterapkan pada radar yang menggunakan deretan pulsa (*pulse train radar*) maupun radar dengan bentuk gelombang kontinu (radar CW) atau disebut *Frequency Modulated Continuous Waveform* (FMCW) Radar.

Tujuan dari modulasi frekuensi adalah untuk mendapatkan energi seperti yang dihasilkan apabila menggunakan pulsa yang panjang dan resolusi seperti jika menggunakan pulsa yang pendek [4]. LFM memiliki kelebihan sebagai berikut[11]:

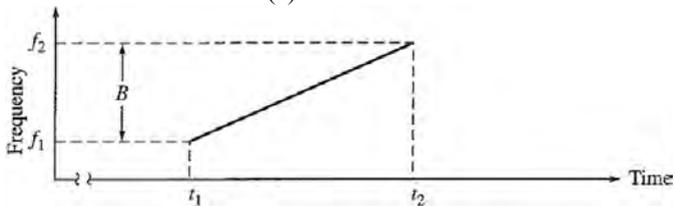
1. Daya yang lebih besar pada setiap periode sinyal karena kompresi pulsa.
2. Resolusi jarak yang lebih tinggi.
3. SNR yang lebih tinggi.

Persamaan untuk membangkitkan sinyal LFM *unidirectional up chirp* dengan frekuensi tengah dan fasa masing-masing f_1 dan θ_1 , *bandwidth* β , durasi pulsa τ , serta amplitudo sinyal A adalah [8]

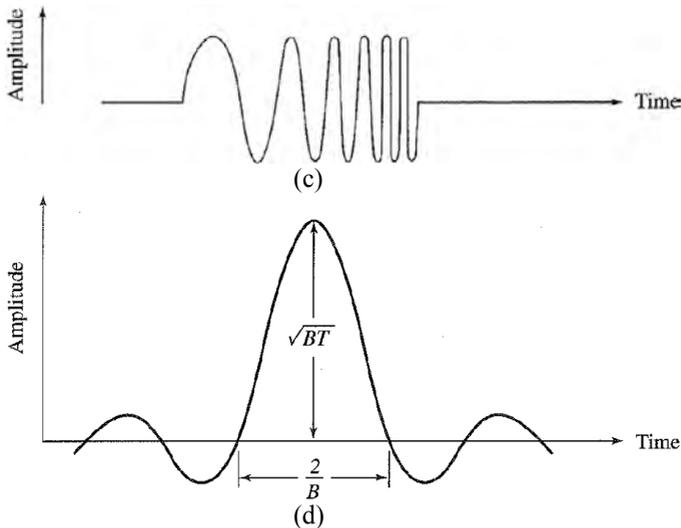
$$x(t) = A \cos \left(2\pi f_1 t + \pi \frac{\beta}{\tau} \left(t - \frac{\tau}{2} \right)^2 + \theta_1 \right); 0 \leq t \leq \tau \quad (2.16)$$



(a)



(b)



Gambar 2.4 Kompresi pulsa LFM [4], (a) bentuk gelombang yang ditransmisikan, (b) frekuensi dari bentuk gelombang yang ditransmisikan sebagai fungsi waktu, (c) representasi bentuk gelombang LFM, dan (d) *output* teoritis dari filter kompresi pulsa.

Gambar 2.4 (c) menunjukkan contoh hasil pembangkitan sinyal LFM *directional up chirp*. Apabila sinyal *up chirp* digambarkan pada koordinat Kartesian dengan sumbu horizontal adalah waktu dan sumbu vertikal adalah frekuensi, maka akan terlihat seperti pada **Gambar 2.4** (b), yakni frekuensi berubah naik secara linier terhadap waktu.

Selanjutnya, frekuensi tengah sinyal LFM tersebut digeser untuk mendapatkan frekuensi kerja *radio frequency* (RF) yang diinginkan melalui proses pencampuran sinyal (*mixing*) dengan *local oscillator*. *Lower sideband* yang dihasilkan dari proses pencampuran sinyal dihilangkan melalui proses pemfilteran. Pengolahan sinyal untuk mendapatkan nilai *delay* sinyal *echo* pada radar dengan bentuk gelombang LFM dapat dilakukan melalui korelasi silang (*cross correlation*) maupun *stretch processing*.

2.4 FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave*) Radar

Sistem radar yang menggunakan bentuk sinyal CW (radar CW) bekerja dengan mendeteksi pergeseran frekuensi Doppler untuk menentukan kecepatan pergerakan target. Namun, radar CW tidak dapat

digunakan untuk mendeteksi jarak target karena bentuk gelombang CW tidak mempunyai penanda waktu yang diperlukan oleh sistem radar untuk menentukan waktu pengiriman dan penerimaan sinyal. Sehingga pada radar CW tidak bisa diperoleh *delay* propagasi sinyal untuk mendapatkan informasi jarak target.

Pada sistem radar yang menggunakan bentuk gelombang deretan pulsa (*pulse train radar*), penanda waktu dihasilkan oleh pulsa yang digunakan. Radar pulsa mengukur jarak objek dengan mengirimkan energi pulsa menuju target dan kemudian menunggu datangnya sinyal *echo*. Interval waktu kembalinya sinyal *echo* menyediakan informasi mengenai jarak target. Namun, pulsa pendek membutuhkan daya puncak yang besar untuk menghasilkan kuat sinyal *echo* yang kuat bagi jarak target yang jauh. Pada radar deretan pulsa, pergeseran frekuensi Doppler tidak dapat terdeteksi sehingga tidak dapat digunakan untuk mendeteksi kecepatan pergerakan target.

Modulasi frekuensi (FM) ditujukan untuk mengatasi keterbatasan pada sistem radar CW dan radar pulsa. Dengan modulasi frekuensi, dapat diperoleh penanda yang dibutuhkan untuk mendeteksi jarak target serta kemampuan untuk menentukan kecepatan target. Modulasi frekuensi dapat diterapkan baik pada radar pulsa maupun radar CW.

Radar CW yang menerapkan modulasi frekuensi disebut dengan radar FMCW. Radar FMCW mengirimkan gelombang kontinu dengan frekuensi yang berubah terhadap waktu dalam lebar pulsa tertentu. Fitur utama dari radar FMCW adalah [9]:

1. Kemampuan untuk mengukur jarak target yang pendek (jarak minimal terukur dapat sebanding dengan panjang gelombang (*wavelength*) yang dikirimkan)
2. Kemampuan untuk mengukur secara simultan jarak target dan kecepatan relatifnya.
3. Akurasi yang tinggi untuk pengukuran jarak.
4. Pengolahan sinyal setelah *mixing* dilakukan pada rentang frekuensi rendah, sangat membantu untuk menyederhanakan realisasi rangkaian pengolahan.
5. Aman, karena tidak adanya radiasi pulsa dengan daya puncak yang tinggi.

2.5 Radar MIMO

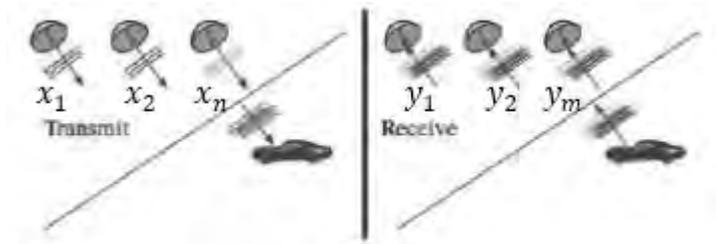
Radar MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) mempunyai karakteristik yaitu kemampuannya untuk mengirimkan sinyal yang saling independen dari banyak elemen pemancar yang memiliki diversitas

spasial dan untuk mengamati sinyal yang diterima pada elemen penerima yang juga memiliki diversitas spasial. Operasi dari radar MIMO diilustrasikan pada **Gambar 2.5**.

Untuk radar dengan banyak elemen pemancar, maka sinyal yang ditransmisikan oleh pemancar harus saling orthogonal. Dua sinyal dikatakan saling orthogonal jika memenuhi persamaan (2.17)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(t)\varphi_2^*(t) dt = 0 \quad (2.17)$$

Ada tiga teknik untuk memaksimalkan orthogonalitas antar sinyal yang dikirimkan pemancar pada radar MIMO, yaitu dengan memanfaatkan waktu pancar (*Time Division Multiplexing*), frekuensi sinyal (*Frequency Division Multiplexing*), dan/atau teknik pengkodean (*Code Division Multiplexing*).



Gambar 2.5 Radar MIMO[8]

Dengan radar MIMO, keuntungan yang didapatkan adalah kapasitas bandwidth yang semakin besar, resolusi radar yang semakin baik, dan kerja radar tetap maksimum ketika salah satu pemancar atau penerima mengalami kerusakan/*error*.

2.6 Radar MIMO-FMCW

Radar MIMO-FMCW merupakan sistem radar dengan pengiriman gelombang kontinu. Gelombang yang dikirimkan berupa gelombang LFM (*Linear Frequency Modulation*) secara satu arah baik naik (*up-chirp*) maupun turun (*down-chirp*). Persamaan sinyal *up-chirp* dan *down-chirp* yang dipancarkan dapat dilihat pada persamaan (2.18) dan (2.19)

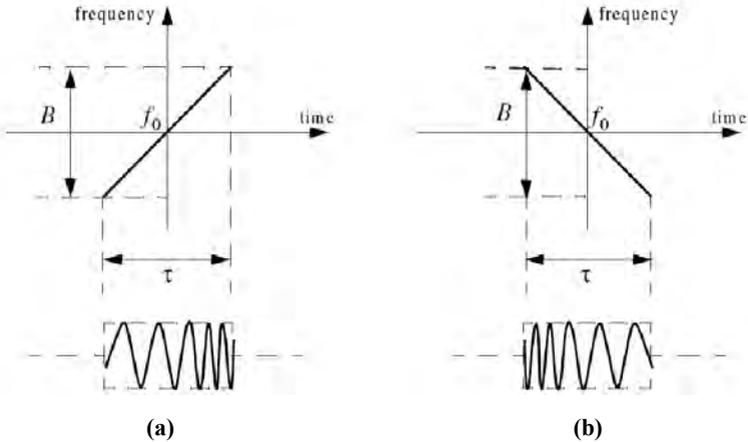
$$s_1(t) = A \cos \left(2\pi f t + \left(\frac{\mu}{2\tau} \right) ((t - \tau)^2) \right); 0 \leq t \leq \tau \quad (2.18)$$

$$s_2(t) = A \cos\left(2\pi f t - \left(\frac{\mu}{2\tau}\right)((t - \tau)^2)\right); 0 \leq t \leq \tau \quad (2.19)$$

persamaan (2.18) merupakan persamaan sinyal LFM *up-chirp* dan persamaan (2.18) merupakan persamaan sinyal LFM *down-chirp*. A adalah amplitudo sinyal *chirp* yang dipancarkan, A ditentukan sebesar 1, f adalah frekuensi tengah sinyal *chirp*, τ merupakan periode sinyal *chirp*, dan μ merupakan laju perubahan frekuensi. μ dapat diperoleh melalui persamaan (2.20)

$$\mu = 2\pi\beta \quad (2.20)$$

β adalah *bandwidth*. Plot perubahan frekuensi terhadap waktu untuk sinyal *up-chirp* dan *down-chirp* dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6 Gelombang LFM, up-chirp (a) down-chirp (b) [7]

2.7 Korelasi Silang

Korelasi silang deterministik antara dua sinyal $x[n]$ dan $y[n]$ didefinisikan dalam persamaan (2.21)

$$c_{xx}[m] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] x^*[n + m] \quad (2.21)$$

dimana m disebut sebagai *correlation lag*. Jika $x[n] = x^*[n + m]$, maka $c_{xx}[m]$ disebut sebagai autokorelasi deterministik dari $x[n]$. Persamaan $c_{xx}[m]$ ketika $m = 0$ dapat dilihat dalam persamaan (2.22)

$$c_{xx}[0] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]x^*[n] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]|^2 = E_x \quad (2.22)$$

dimana E_x adalah energi dari sinyal $x[n]$. Ketika $m = 0$, maka m atau lag adalah titik puncak dari fungsi autokorelasi, dalam persamaan (2.23)

$$c_{xx}[m] \leq c_{xx}[0] \quad (2.23)$$

sifat tersebut tidak berlaku untuk fungsi korelasi silang antara dua sinyal yang berbeda.

Korelasi digunakan pada pemrosesan sinyal untuk mendeteksi sinyal informasi pada *noise* tertinggi dan untuk estimasi isi dari sinyal informasi pada deretan *noise*. Sebagai contoh, ketika puncak nilai *lag* ($m = 0$) pada posisi 10, maka informasi tersebut mengindikasikan adanya korelasi tinggi antara pulsa referensi dan deretan sampelnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa informasi pada pulsa terletak pada nilai 10 tersebut.

Pada radar, korelasi silang ini digunakan untuk mendeteksi jarak dari target. Sinyal yang diolah adalah sinyal yang diterima oleh penerima. Sinyal tersebut telah mengalami *delay* dan mengandung *noise* (*noise* AWGN). Korelasi silang akan mencari informasi *delay* diantara deretan sinyal yang mengandung *noise* AWGN. Informasi tersebut, yang disebut diatas sebagai *lag*, merepresentasikan posisi target yang dideteksi radar. *Delay* pada sinyal (t_d) yang merepresentasikan jarak tertentu (R) dirumuskan pada persamaan (2.24)

$$t_d = \frac{2R}{c} \quad (2.24)$$

dimana t_d dalam detik dan $c = 3 \times 10^8$ m/s.

Untuk mengetahui isi informasi jarak target, dapat diperoleh menggunakan persamaan (2.1).

2.8 Akurasi Deteksi[12]

Akurasi deteksi radar didapatkan dari *Root Mean Square Error* (RMS E) yang bergantung pada nilai SNR sistem. *Root Mean Square Error* (RMS E) yang bergantung pada nilai SNR sistem dapat dihitung melalui persamaan (2.25)

$$\sigma_{RN} = \frac{RMS E}{\sqrt{2 SNR_L}} \quad (2.25)$$

RMS E sendiri dapat diperoleh menggunakan persamaan (2.26)

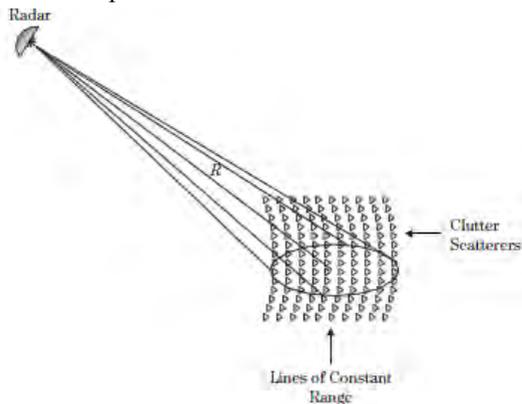
$$RMS E = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^k (m(t)-n(t))^2}}{k} \quad (2.26)$$

dimana k adalah banyaknya data, m adalah data hasil simulasi, dan n adalah data sebenarnya. Sehingga, akurasi deteksi radar dapat dihitung melalui persamaan (2.27)

$$Akurasi\ Deteksi = 1 - \sigma_{RN} \quad (2.27)$$

2.9 Clutter [5]

Clutter merupakan sinyal yang membingungkan dan tidak diinginkan pada tampilan di radar indikator. Ini dikarenakan sinyal yang mantul dari daratan, permukaan laut, hujan, kapal, daerah yang sedang dibangun, dan pesawat. Banyak gangguan yang muncul pada layar akan menyulitkan radar menghilangkannya dan sulit membedakan target sesungguhnya. Ini salah satu yang menyebabkan berkurangnya kemampuan suatu radar. Dan clutter merupakan suatu frekuensi dari sistem pemancar lain yang diterima oleh sistem penerima kita.



Gambar 2.7 Ilustrasi Pemindaian Radar[5]

Gambar 2.7 menunjukkan situasi di mana pancaran radar memancarkan sejumlah scatterers, masing-masing memiliki reflektifitas dan jarak berbeda dari radar. Garis rentang konstan untuk elips bentuk radar

pada permukaan. Amplitudo medan listrik (horizontal atau vertikal komponen polarisasi) diukur pada radar karena pantulan dari penghamburan jumlah *scatter* akan sebanding dengan akar kuadrat dari daya yang diterima, diberikan oleh persamaan radar

Tabel 2.2 Perbandingan sinyal *clutter* dan *noise*

| Noise | Clutter |
|---|---|
| Amplitudo tidak bergantung dari level daya pemancar | Amplitudo sebanding dengan level daya pemancar |
| Memiliki <i>bandwidth</i> lebar | Memiliki <i>bandwidth</i> sempit |
| Nilai tidak bergantung antar pulsa | Sinyal <i>Clutter</i> berkolerasi antar pulsa |
| Sinyal noise independen terhadap frekuensi pemancar | Sinyal <i>Clutter</i> berpengaruh terhadap perubahan frekuensi pemancar |
| Independen terhadap lingkungan | Dipengaruhi terhadap perubahan kondisi lingkungan |

$$|E_i| = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_i}{(4\pi)^3 L_s d_i^4} \right]^{1/2} = k \frac{\sqrt{\sigma_i}}{d_i^2} \quad (2.28)$$

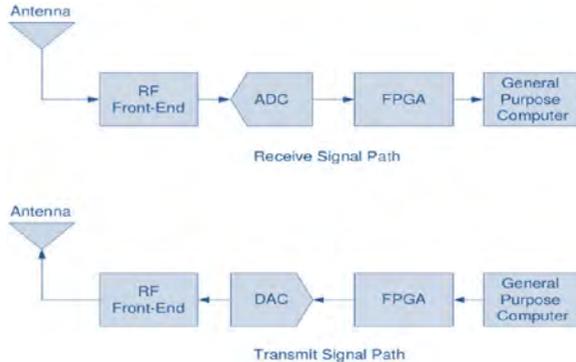
dimana P_t adalah daya yang ditransmisikan, λ adalah panjang gelombang, dan L_s adalah *Loss* sistem (termasuk hardware dan kerugian atmosfer). Konstan, k , menyerap semua faktor yang sama untuk setiap scatterer.

2.10 SDR (*Software Defined Radio*)

SDR merupakan perangkat keras pemancar/penerima gelombang radio (*transceiver*) yang dapat diatur/diprogram sesuai kebutuhan pengguna. SDR forum mendefinisikan SDR sebagai radio yang menggunakan perangkat lunak untuk bagian teknik modulasi, *wide-band* atau *narrow-band operation*, fungsi keamanan komunikasi (seperti *hopping*), dan kebutuhan bentuk gelombang untuk standar saat ini dan yang akan datang pada daerah frekuensi *broad band*. SDR merupakan suatu teknologi dimana perangkat lunak dapat dijalankan pada platform perangkat keras, yaitu pada *Digital Signal Processing (DSP) processor* dan *Field Programmable Gate Array (FPGA)*, untuk mengimplementasikan fungsi-fungsi radio seperti proses modulasi pada transmitter dan proses demodulasi pada receiver.

2.11 USRP (*Universal Software Radio Peripheral*)

USRP merupakan salah satu SDR yang umum digunakan. *Interface* USRP telah tersedia di beberapa perangkat lunak, diantaranya adalah LabVIEW, MATLAB/Simulink, dan GNU Radio.



Gambar 2.8 Diagram blok SDR USRP

Dalam USRP ada *motherboard* dan *daughterboard*. Di bagian *motherboard* ada FPGA dan ADC/DAC. FPGA menjalankan fungsi *Digital Up Converter* (DUC) dan *Digital Down Converter* (DDC) serta menyediakan antarmuka untuk berkomunikasi dengan *host PC*.

Analog to Digital Converter (ADC) dan *Digital to Analog Converter* (DAC) berfungsi melakukan konversi sinyal analog ke digital dan sebaliknya. Saat ini, *motherboard* USRP mendukung frekuensi kerja 0 Hz (DC) s/d 6 GHz.

Daughterboard ditujukan sebagai RF *front end* yang menentukan rentang frekuensi kerja radio yang dapat digunakan. Secara umum, *daughterboard* terdiri atas *filter*, *mixer*, dan *amplifier*. Sinyal yang diolah pada *daughterboard* adalah berupa sinyal analog. **Gambar 2.8** menunjukkan diagram blok SDR dengan menggunakan perangkat keras USRP.

2.11.1 *Daughterboard* USRP

Daughterboard USRP yang dipasang menentukan frekuensi kerja yang USRP mungkin lakukan. **Gambar 2.9** menunjukkan kemampuan masing-masing *daughterboard* yang tersedia untuk USRP.

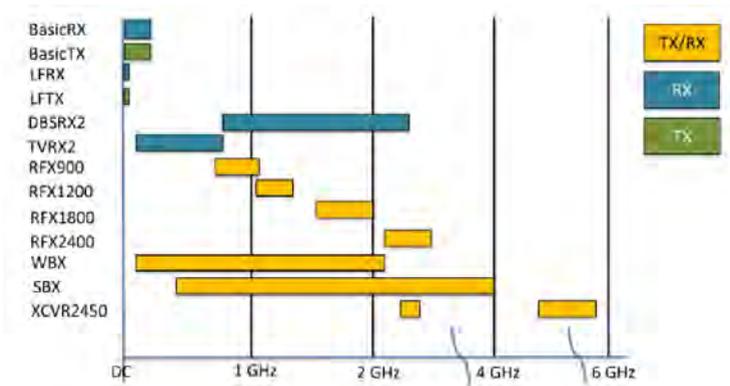
Sebagai perbandingan, untuk penelitian HF dapat menggunakan *daughterboard* LFTX pada transmitter dan LFRX pada receiver yang mana keduanya bekerja pada frekuensi 0-30 MHz. Sedangkan untuk

menggunakan USRP sebagai penangkap siaran televisi digunakan TVRX2.

Untuk aplikasi *Wide-Band* maka dipergunakanlah WBX. Sementara untuk aplikasi radar disarankan untuk menggunakan daughterboard SBX yang bekerja pada frekuensi 2-4 GHz.

2.11.2 Bandwidth USRP

Bandwidth perangkat USRP berbeda pada setiap titik dalam rantai sinyal. Tiga tipe dari spesifikasi bandwidth adalah bandwidth analog, bandwidth pemrosesan FPGA, dan bandwidth host. Perlu diperhatikan, bahwa *bandwidth* analog harus lebih kecil dari sample rate ADC/ DAC. *Bandwidth* sistem dalam aplikasi USRP ditentukan oleh *bandwidth* terkecil dari ketiga istilah *bandwidth* tersebut.



Gambar 2.9 Frekuensi Kerja Daughterboard

Bandwidth analog adalah besarnya *bandwidth* yang digunakan (3 dB) antara port RF dan antarmuka IF/ *baseband*. *Bandwidth* analog diatur oleh *filter* IF atau *baseband* pada *daughterboard*, yang didesain untuk menghindari aliasing ketika dipasangkan dengan *motherboard* USRP dengan sample rate ADC/ DAC tertentu.

Bandwidth pemrosesan FPGA adalah besarnya *sample rate* yang disediakan oleh ADC dan DAC pada *motherboard* USRP. *Bandwidth* ini menyatakan *bandwidth* digital maksimum pada sistem USRP.

Antarmuka host memungkinkan terjadinya aliran data antara FPGA pada perangkat USRP dengan *host* PC. Pada umumnya, aliran data dari dan ke USRP adalah dalam bentuk aliran data I/Q, dengan kecepatan aliran dinyatakan dalam IQ *sample rate*, menggunakan satuan S/s (Sample/second). Dalam konteks perangkat USRP mendukung komunikasi *full duplex*, berarti bahwa antarmuka bisa mengalirkan data dalam dua arah dengan kecepatan tertentu secara bersamaan. Hal yang perlu diperhatikan adalah bahwa unjuk kerja aliran data aktual akan tergantung pada kemampuan pemrosesan host PC, kompleksitas aplikasi atau Digital Signal Processing (DSP), dan faktor lainnya.

2.11.3 Motherboard USRP N210

USRP seri Networked adalah tipe USRP yang menggunakan ethernet untuk berkomunikasi dengan host PC. Pada seri N210, interface yang digunakan adalah Gigabit Ethernet untuk melakukan transfer data dengan *sample rate* maksimum 50 MS/s dengan kedalaman 8 bit dan 25 MS/s untuk kedalaman 16 bit. USRP N210 juga mendukung komunikasi full duplex dengan host PC. Sedangkan untuk *sample rate* ADC adalah 100 MS/s dan DAC 400 MS/s.

Tabel 2.3 Spesifikasi USRP N210

| <i>Spesification</i> | <i>Typical Value</i> | <i>Unit</i> |
|--|-------------------------------|-------------|
| <i>Power</i> | | |
| DC Input | 6 | V |
| Current Consumption | 1,3 | A |
| <i>Conversion Performance and Clock</i> | | |
| ADC <i>Sample Rate</i> | 100 | MS/s |
| ADC <i>Resolution</i> | 14 | Bits |
| ADC <i>Wideband SFDR</i> | 88 | dBc |
| DAC <i>Sample Rate</i> | 400 MS/s | MS/s |
| DAC <i>Resolution</i> | 16 | Bits |
| DAC <i>Wideband SFDR</i> | 80 | dBc |
| IQ <i>Sampling Rate</i> (8b/16b) | 50 Full Duplex/25 Full Duplex | MS/s |
| <i>Clock Type</i> | TCXO | |
| <i>Frequency Accuracy</i> | 2,5 | ppm |

| | | |
|--|-------------------------------------|-----|
| <i>Frequency Accuracy w/ GPSDO Reference</i> | 0,01 | ppm |
| <i>Transmitter RF Performance</i> | | |
| <i>Tx Maximum Output Power</i> | 17 - 20 | dBm |
| <i>SW Adjustable Tx Frequency Step</i> | < 1 | kHz |
| <i>Tx Output Power Gain Range</i> | 0 - 30 | dB |
| <i>SW Adjustable Output Gain Step Size</i> | 1 | dB |
| <i>Instantaneous Real Time Bandwidth (8b/16b)</i> | 20/40 | MHz |
| <i>Receiver RF Performance</i> | | |
| <i>Rx Maximum Input Power</i> | 0 | dBm |
| <i>Software Adjustable Rx Frequency Step</i> | < 1 | kHz |
| <i>Tx Output Power Gain Range</i> | 0 - 31,5 | dB |
| <i>SW Adjustable Output Gain Step Size</i> | 0,5 | dB |
| <i>Instantaneous Real Time Bandwidth (8b/16b)</i> | 20/40 | Mhz |
| <i>Noise Figure</i> | 5 - 7 | dB |
| <i>Connections</i> | | |
| <i>TX1/RX1,RX2 Port</i> | | - |
| <i>Ethernet Connection</i> | | - |
| <i>Ref Clock (10-MHz external reference input)</i> | SMA, 3 – 5 V TTL Compatible | - |
| <i>MIMO Expansion Port</i> | <i>High – Speed SerDes protocol</i> | - |
| <i>Physical</i> | | |
| <i>Operating Temperature</i> | 0° – 55° | C |
| <i>Dimensions (1x w x h)</i> | 21 x 16 x 5 | Cm |
| <i>Weight</i> | 1,2 | Kg |

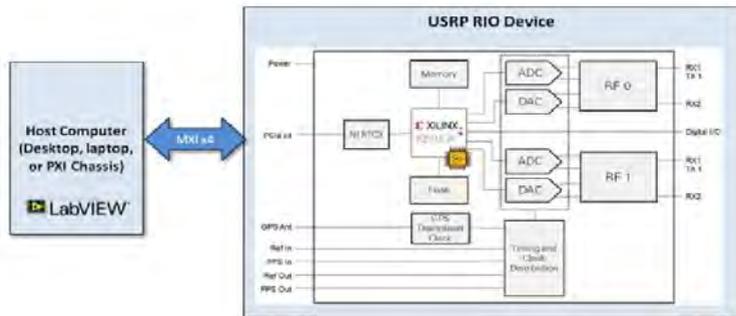
2.11.4 Motherboard USRP-2943R (RIO)[13]

USRP RIO ini merupakan sebuah SDR yang dapat digunakan untuk membantu mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak dalam melakukan percobaan Sistem Komunikasi Nirkabel dengan performa yang tinggi.

USRP-RIO ini memiliki fitur yang dapat mengolah FPGA sehingga dapat melakukan pemrosesan dengan *rate* tinggi dan *latency* rendah.

Memiliki frekuensi kerja 1,2 – 6 GHz. Blok diagram USRP ini dapat dilihat pada **Gambar 2.10**

Pada USRP-RIO ini tidak menggunakan sambungan LAN seperti pada USRP N210, tetapi menggunakan Port MXI-Express yang dapat melakukan transfer data hingga 800 MB / s ke desktop, laptop, atau komputer PXI Express host pengguna. Pengguna juga dapat menggunakannya untuk menghubungkan hingga 18 perangkat RIO USRP ke chassis PXI tunggal.



Gambar 2.10 Blok Diagram USRP RIO[14]

2.11.5 Daya Pancar USRP

USRP adalah perangkat yang tidak terkalibrasi, sehingga nilai *gain* pancar (Tx) yang diatur melalui perangkat lunak tidak terkait langsung dengan level daya *output*, P_{out} USRP. Selain itu, besarnya daya *output* berbeda pada setiap frekuensi radio yang digunakan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengukuran daya *output* USRP pada frekuensi yang akan digunakan, yaitu frekuensi radio 2,4 GHz. **Tabel 2.4** menunjukkan hasil pengukuran daya *output* USRP pada frekuensi 2,4 GHz dengan variabel *gain* pancar. Sensitivitas daya USRP dari hasil pengukuran diketahui sebesar -100 dBm. Sehingga ketika sinyal yang diterima pada USRP kurang dari -110 dBm, sinyal tidak akan terbaca pada perangkat keras USRP.

Tabel 2.4 Daya *output* USRP pada frekuensi 2,4 GHz dengan variabel *gain* pancar.

| <i>Gain Tx</i> (dB) | <i>P_{out}</i> (dBm) | <i>Gain Tx</i> (dB) | <i>P_{out}</i> (dBm) |
|---------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|
| 0 | -5,72 | 16 | 9,21 |
| 1 | -4,96 | 17 | 10,29 |
| 2 | -3,82 | 18 | 11,21 |
| 3 | -2,93 | 19 | 12,34 |
| 4 | -2,29 | 20 | 13,05 |
| 5 | -1,28 | 21 | 14,20 |
| 6 | -0,44 | 22 | 15,11 |
| 7 | 0,68 | 23 | 16,27 |
| 8 | 1,59 | 24 | 17,42 |
| 9 | 2,66 | 25 | 18,33 |
| 10 | 3,53 | 26 | 18,94 |
| 11 | 4,57 | 27 | 19,66 |
| 12 | 5,22 | 28 | 20,00 |
| 13 | 6,32 | 29 | 20,44 |
| 14 | 7,22 | 30 | 20,46 |
| 15 | 8,31 | 31 | 20,49 |

2.12 Perangkat Lunak Matlab dan Labview

Matlab (*Matrix Laboratory*) merupakan bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh The Mathwork Inc. Matlab merupakan bahasa pemrograman level tinggi yang dikhususkan untuk kebutuhan komputasi teknis, visualisasi dan pemrograman seperti komputasi matematik, analisis data, pengembangan algoritma, simulasi dan pemodelan dan grafik-grafik perhitungan. Matlab telah mendukung untuk diterapkan bersama USRP sebagai perangkat lunak pengolahan data melalui Simulink yang merupakan salah satu fitur pada Matlab.

LabView (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) adalah perangkat lunak komputer untuk pengolahan dan visualisasi data dalam bidang akuisisi data, kendali instrumentasi serta otomasi industri. Berbeda dengan Matlab yang berbasis teks, LabVIEW menggunakan grafis untuk merepresentasikan setiap fungsi

pemrogramannya, yang disebut dengan Virtual Instrument. LabVIEW menggunakan icon yang saling terhubung untuk merepresentasikan fungsi dan menjelaskan aliran data didalam program yang dibangun.

LabVIEW mendukung pengaturan dan pemrograman perangkat keras USRP dengan menggunakan fungsi tambahan yang terdapat pada *toolbox* NI-USRP Instrumen Driver. NI-USRP Instrumen Driver terdiri atas fungsi untuk melakukan pengaturan USRP, sinkronisasi dan fungsi lainnya.

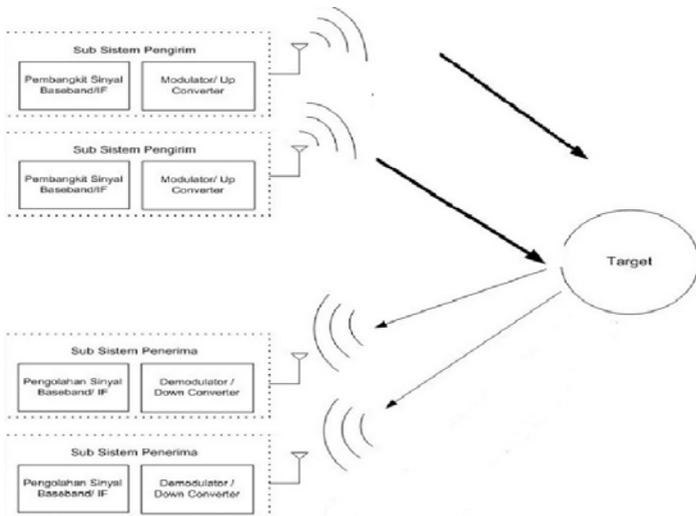
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini, dibahas mengenai perancangan sistem radar MIMO FMCW berbasis SDR untuk pengukuran jarak target.

3.1 Spesifikasi Radar

Sistem radar terdiri atas dua sub sistem utama, yakni sub sistem pengirim (Tx) dan sub sistem penerima (Rx). Sub sistem pengirim radar terdiri atas pembangkit sinyal *baseband* atau IF dan *modulator/ up converter*. Untuk memperkuat daya kirim, pada antenna pengirim dapat menggunakan *power amplifier*. Sedangkan sub sistem penerima terdiri atas *demodulator/ down converter* dan pengolah sinyal. Umumnya, sebelum melalui *demodulator/ down converter*, sinyal terima dikuatkan terlebih dahulu menggunakan *low noise amplifier* (LNA). Hasil keluaran *demodulator/ down converter* berupa sinyal *echo* pada frekuensi *baseband/ IF*. Pada radar pengukur jarak target, sinyal *echo* tersebut selanjutnya diolah dan dianalisis menggunakan pengolahan sinyal untuk menentukan jarak target. **Gambar 3.1** menunjukkan diagram blok sistem radar secara umum.



Gambar 3.1 Diagram Blok Radar MIMO

Berdasarkan pada diagram blok sistem radar pada **Gambar 3.1**, maka ditentukan Rancang Bangun Sistem Radar MIMO FMCW berbasis SDR yang diimplementasi pada penelitian ini terdiri atas lima sub sistem, yaitu sub sistem pengirim, sub sistem penerima, sub sistem pengaturan waktu dan sinkronisasi, sub sistem akuisisi data, serta sub sistem pengolahan sinyal. Sub sistem pengirim, penerima, pengaturan waktu dan sinkronisasi, serta akuisisi data dibangun pada perangkat lunak LabVIEW Communication. Sedangkan sub sistem pengolahan sinyal dibangun menggunakan perangkat lunak Matlab.

Sistem Radar yang dirancang adalah radar CW *bistatic* menggunakan bentuk gelombang LFM (*chirp*) atau disebut radar FMCW. Sistem radar dibentuk pada sistem MIMO, sehingga terdapat *multiple* antena pengirim dengan perbedaan frekuensi dan *multiple* antena pada penerima. Pertimbangan yang digunakan dalam penentuan spesifikasi tersebut adalah karena ketidaktersediaan perangkat *circulator*, terbatasnya daya pancar, dan keterbatasan ukuran lokasi pengujian sistem radar. Bentuk gelombang *chirp* yang digunakan adalah *unidirectional* dengan sapuan naik (*up chirp*) dan turun (*down chirp*). Pada penelitian ini, sistem radar beroperasi menggunakan *band* frekuensi ISM, yaitu pada frekuensi radio 2,4 GHz.

Pengolahan sinyal untuk melakukan deteksi jarak target dilakukan menggunakan korelasi silang. Pada pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang, lebar pulsa sinyal *echo* yang dikorelasi silangkan adalah sama dengan dua kali lebar pulsa *chirp*, atau dua kali periode pulsa, 2τ . Hal tersebut memiliki tujuan yang sama untuk menghindari SNR *loss* dan penurunan resolusi bagi target yang terletak pada jarak yang jauh.

Parameter utama pada sistem radar adalah resolusi jarak, diketahui bahwa untuk sistem radar yang menggunakan bentuk gelombang termodulasi frekuensi, resolusi jaraknya tergantung pada *bandwidth* pulsa yang dibangkitkan. Sehingga, untuk mendapatkan resolusi jarak maksimum, maka ditentukan *bandwidth* pulsa *chirp* yang dibangkitkan adalah sama dengan *bandwidth* USRP N210, yakni 25 MHz pada resolusi 8 bit/*sample*. Dengan IQ *sampling rate* maksimum adalah 50 MS/s, maka rentang frekuensi *chirp* yang dibangkitkan adalah 0 – 25 MHz sesuai dengan kriteria Nyquist, yakni $f_s \geq 2f_m$.

Lebar pulsa, τ ditetapkan sebesar 6 μ s untuk mendapatkan nilai *time-bandwidth*, $\tau\beta \geq 100$ [12]. Dengan lebar pulsa tersebut, nilai *time-bandwidth* yang dihasilkan adalah

$$\tau\beta = 6 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 10^6 = 150 \quad (3.1)$$

Selanjutnya, dengan menggunakan persamaan (2.2) diperoleh nilai *maximum unambiguous range* sebesar

$$R_{un} = \frac{c\tau}{2} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{2} = 900 \text{ m} \quad (3.2)$$

Berdasarkan pada uraian di atas, spesifikasi sistem SDRadar yang dibangun adalah:

1. Konfigurasi Radar : *Bistatic*
2. Bentuk Gelombang : *FMCW Bidirectional Up & Down Chirp*
3. Frekuensi Kerja : 2,4 GHz
4. Pengolahan Sinyal : Korelasi Silang
5. *Bandwidth, β* : 25 MHz (Frekuensi 0 – 25 MHz)
6. Lebar Pulsa, τ : 6 μ s

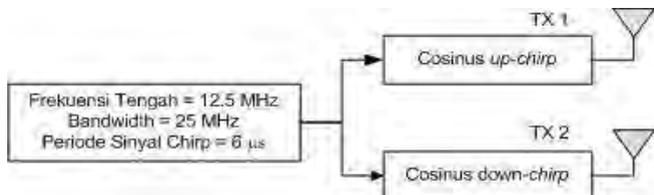
3.2 Pembangkitan Sinyal

Pada sub bab ini dilakukan pembangkitan gelombang LFM yang terdiri atas sinyal *up-chirp* dan *down-chirp*. Seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 3.1, rentang frekuensi *chirp* yang dibangkitkan adalah 0-25 MHz, dengan frekuensi tengah 12,5 MHz, dan ditentukan periode *chirp* atau lebar pulsa τ sebesar 6 μ s. Kemudian dimasukkan pada persamaan sinyal berdasarkan persamaan (2.18) dan (2.19).

Karena sistem radar yang dibangun menggunakan konfigurasi MIMO, maka sinyal yang dipancarkan harus saling orthogonal agar tidak terjadi interferensi. Maka sinyal yang dipancarkan pada TX 1 dan TX 2 adalah :

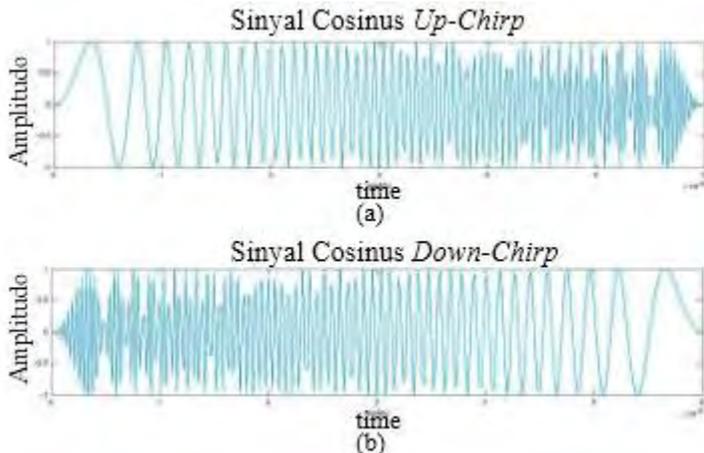
$$x_1(t) = A \cos\left(2\pi f t + \left(\frac{\mu}{2\tau}\right)((t - \tau)^2)\right); 0 \leq t \leq \tau \quad (3.3)$$

$$x_2(t) = A \cos\left(2\pi f t - \left(\frac{\mu}{2\tau}\right)((t - \tau)^2)\right); 0 \leq t \leq \tau \quad (3.4)$$



Gambar 3.2 Diagram Blok Pembangkitan Sinyal LFM

Maka sinyal yang dibangkitkan adalah cosinus up-chirp ($x_1(t)$) dan cosinus down-chirp ($x_2(t)$). Diagram blok pada tahap pembangkitan sinyal dapat dilihat pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.3 Sinyal Cosinus *Up-Chirp* (a) dan Sinyal Cosinus *Down-Chirp*

3.3 Deskripsi Perangkat

Perangkat yang digunakan untuk implemementasi rancang bangun sistem radar ini meliputi perangkat lunak dan perangkat keras, baik untuk mendapatkan data dari rancang bangun Sistem Radar MIMO FMCW ini dan juga pengolahan data tersebut.

3.3.1 Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah Matlab untuk melakukan simulasi dan melakukan sub sistem pengolahan data serta LabVIEW Communication untuk membangun sub sistem pengukuran dan akuisisi data. Berikut spesifikasi perangkat lunak yang digunakan :

1. Matlab
 - Versi : R2014b x86
 - Toolbox : *Signal Processing Toolbox*
 - DSP System Toolbox*
 - Communications System Toolbox*

2. LabVIEW Communications
 Versi : System Design Suites 1.1

3.3.2 Perangkat Keras

Perangkat keras yang digunakan yakni satu unit USRP NI-2943R (RIO), dua unit USRP N210, satu unit perangkat komputer Sony Vaio S Series VPCS117GG dengan sistem operasi Windows 7 Professional 64-bit, dua unit *amplifier* RF, dua unit antena pandu gelombang (*waveguide*), dan dua unit antena *omnidirectional*. Berikut adalah spesifikasi perangkat keras yang digunakan :

1. Sony Vaio S Serier VPCS117GG
 - Processor* : Intel Core i5 with NVIDIA Graphics (4 CPUs), 2.4 GHz
 - Memory* : 4096MB RAM
 - Ethernet card* : Realtek PCIe GBE Family Controller
2. RF *Amplifier*
 - Frekuensi : 2400 – 2500 MHz
 - Transmit gain* : 17 dB (*typical*)
 - Receive gain* : 11 dB (*typical*)
 - Noise figure* : 3 (*typical*)
 - Input Trigger* : min. 3 dBm, max. 20 dBm
3. Antena[15]
 - Frekuensi : 2200 – 3246 MHz
 - Pola radiasi : *Directional*
 - Dimensi : diameter 14,8 cm
 panjang 15,6 cm
 - Gain* : 3,32 dBi
 - HPBW : 51,63°
 - Far Field* : 35,05 cm
 - VSWR : ≤ 1,9
4. Antena Dipole
 - Tipe : VERT2450 Dipole *Dual-Band*
 - Frekuensi kerja : 2.4 - 2.5 GHz dan 4.9 - 5.9 GHz
 - Gain : 3 dBi
 - Pola Radiasi : Omnidirectional
 - Polarisasi : Vertikal
 - Impedansi : 50 Ω
 - Daya Maksimal : 50 W
 - VSWR : < 2:1
 - Dimensi : 7.79"

- Jumlah : 2 buah
- 5. Perangkat *software Define Radio* (SDR)
 - Tipe : NI USRP N210 & NI USRP 2943R
 - Motherboard : Ettus Research N210
 - Daughterboard : SBX
 - Jumlah : 2 buah & 1 buah
- 6. Perangkat *Integrated Timing Source*
 - Tipe : Ettus Research™ Octoclock-G
 - Sumber *Clock* : Internal GPSDO
 - Output : - 10 MHz *waveform (square wave)*
- PPS *waveform (pulsa)*
 - Jumlah : 1 buah
- 7. Tipe : Coaxial RG-58A/U
 - Konektor : SMA Male – Male
 - Redaman : 18,1 dB/100 ft
- 8. Kabel MIMO
 - Tipe : Ettus Research™
 - Jumlah : 1 buah
- 9. Kabel Ethernet
 - Tipe : Gigabit Ethernet
 - Jumlah : 1 buah

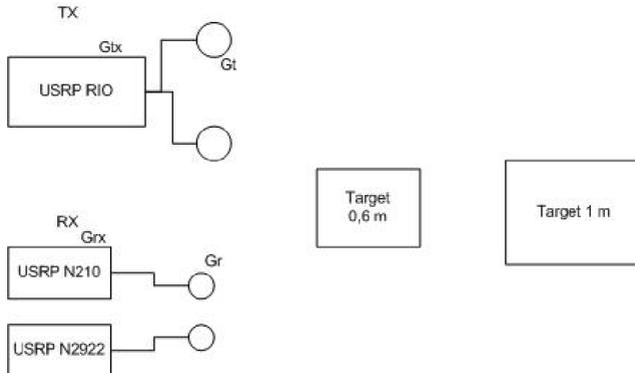


Gambar 3.4 Antena Kaleng *Directional* [15]

3.4 Perhitungan Link Budget

Berikut ini adalah perhitungan *power link budget* sistem. Perhitungan *power link budget* ini didasarkan pada parameter-parameter seperti tersebut berikut ini

1. Daya pancar, $P_t G_{tx} = 20,49$ dBm untuk *gain* pemancar, $G_{tx} = 31$ dB
2. *Gain* penerima, $G_{rx} = 31$ dB
3. *Gain* antenna pengirim, $G_t = 3,32$ dBi
4. *Gain* antenna penerima, $G_r = 3,1$ dBi
5. Frekuensi kerja, $f = 2,4$ GHz
6. Dimensi model target, sisi $s = 0,6$ m dan 1 m
7. Lebar pulsa, $\tau = 6$ μ s
8. *Bandwidth*, $\beta = 25$ MHz
9. Asumsi jumlah pulsa, $n_p = 1$ (tanpa *gain* integrasi)
10. Asumsi $L_s = 20$ dB, dengan hasil pengukuran redaman total kabel *feeder* di sisi pengirim (Tx) dan penerima (Rx) adalah 12,4 dB.



Gambar 3.5 Ilustrasi parameter *Link Budget*

Gain pada pemancar ditetapkan sebesar 31 dB dikarenakan merupakan besaran maksimal gain yang dapat di pancarkan oleh perangkat keras USRP. Gain pada penerima juga diatur sebesar 31 dB. Terdapat dua model target pada pengukuran Tugas Akhir ini.

Dari parameter yang ditetapkan, dapat dihitung panjang gelombang, λ yang digunakan, yakni

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{24 \cdot 10^9} = 0,125 \text{ m} = 125 \text{ cm} \quad (3.5)$$

Sedangkan RCS model target dihitung dengan persamaan

- Untuk target 1 (0,6m) :

$$\sigma = \frac{4\pi(s^2)^2}{\lambda^2} = \frac{4\pi(0,6^2)^2}{0,125^2} = 106605 \text{ m}^2 \quad (3.6)$$

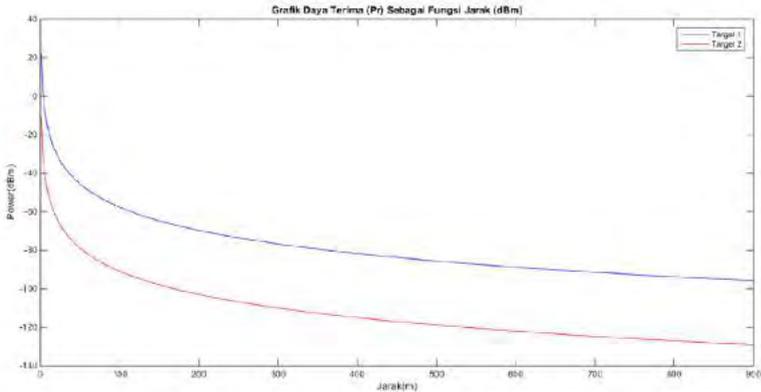
- Untuk target 2 (1 m) :

$$\sigma = \frac{4\pi(s^2)^2}{\lambda^2} = \frac{4\pi(0,506^2)^2}{0,125^2} = 00503 \text{ m}^2 \quad (3.7)$$

Dengan asumsi jarak antenna pengirim dengan target, R_t dan jarak antara target dengan antenna penerima, R_r adalah sama, $R_t = R_r = R$ dan untuk memasukkan nilai *gain* pemancar, G_{tx} dan *gain* penerima, G_{rx} USRP dalam perhitungan *power link budget*, maka daya terima P_r adalah

$$P_r = \frac{P_t G_{tx} G_t G_{rx} G_r \lambda^2 \sigma n_p}{(4\pi)^3 R^4 L_s} \tau \beta \quad (3.8)$$

Hasil perhitungan *power link budget* menunjukkan bahwa daya terima P_r masih mencukupi untuk target yang terletak pada jarak 900 m, namun karena ada daya sidelobe antenna yang lebih besar daripada daya echo maka jarak maksimal target yang dapat dideteksi menjadi lebih pendek dari jika tidak ada daya sidelobe antenna.

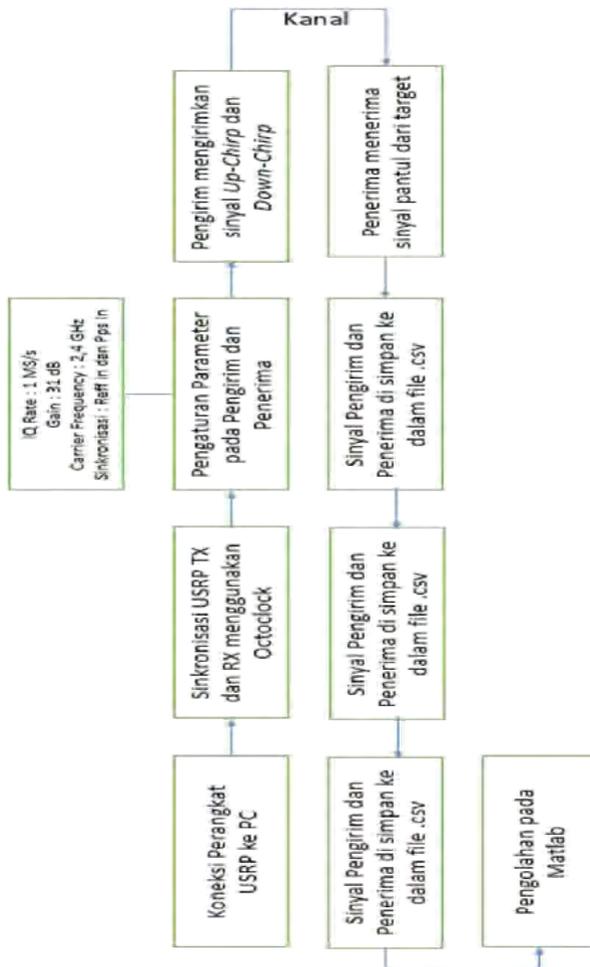


Gambar 3.6 Grafik daya terima (P_r (dBm)) sebagai fungsi jarak target. **G**

3.5 Perancangan Labview untuk Implementasi Pada USRP

Setelah menentukan parameter-parameter yang diperlukan, proses selanjutnya melakukan instalasi perangkat lunak LabVIEW pada *host* PC

dan interkoneksinya dengan perangkat keras USRP yang bertujuan untuk membangun sub sistem pengukuran dan akuisisi data pada sistem radar yang dirancang.



Gambar 3.7 Diagram Blok Pengukuran pada USRP

3.5.1 Instalasi Perangkat Lunak Labview

Pada Tugas Akhrit ini, perangkat lunak yang digunakan merupakan perangkat lunak Labview terbaru, yaitu Labview Communications System Design Suites 1.1. Ini merupakan perangkat lunak yang di khususkan untuk bidang Telekomunikasi. Perangkat lunak Labview Communications dapat beroperasi pada sistem operasi Windows 7 dan 8 dalam versi arsitektur 64 bit dan 32 bit.

3.5.2 Koneksi Perangkat

Komunikasi antara USRP RIO dengan host dirancang menggunakan *port* MXI Express yang bisa memberikan data lebih cepat bila dibandingkan dengan koneksi menggunakan kabel *Ethernet*. Sedangkan USRP N210 dengan *host* dirancang berbasis IP *address*. Standar IP *address* yang digunakan adalah IP v.4 192.168.10.2, di mana IP 192.168.10.1 digunakan sebagai IP *gateway* untuk komunikasi USRP dengan perangkat laptop yang berkedudukan sebagai *host*.

Pengguna USRP dapat mengganti IP *address* USRP melalui *software* NI-USRP Configuration Utility. Tampilan dari NI-USRP Configuration Utility dapat dilihat melalui **Gambar 3.8**. Sebagai informasi jika laptop telah terkoneksi maka akan munculnya IP *address* USRP.



Gambar 3.8 Tampilan NI-USRP Configuration Utility

Untuk mengganti IP pada USRP pengguna harus masuk pada jendela device kemudian pada sisi kanan panel pilih IP dari USRP mana yang akan diganti, setelah itu ketik IP baru yang ingin dimasukkan dan kemudian klik change IP. **Gambar 3.9** memperlihatkan IP yang telah kita setting pada jendela NI-USRP Configuration Utility



Gambar 3.9 Tampilan NI-USRP Configuration Utility dengan adanya perangkat USRP terkoneksi

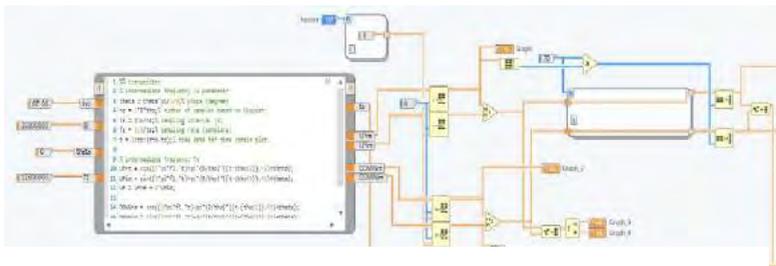
3.5.3 Perancangan Sub Sistem Pengirim

Perancangan sub sistem pengirim pada Tugas Akhir ini menggunakan USRP RIO, dimana pada satu unit USRP RIO dapat menjadi dua pengirim. Pada USRP RIO tidak diperlukan sinkronisasi melalui eksternal, karena antara pemancar satu dan pemancar dua sudah tersinkronisasi seperti dijelaskan pada **Gambar 2.10**.

Terdapat beberapa langkah pada sub sistem pengirim, yaitu pembangkitan sinyal *chirp* (*chirp generator*), pengaturan perangkat keras USRP sub sistem pengirim, dan penulisan (*write*) data ke USRP.

Sesuai dengan spesifikasi radar yang dijelaskan pada sub bab 3.1, spesifikasi bentuk gelombang yang dibangkitkan adalah:

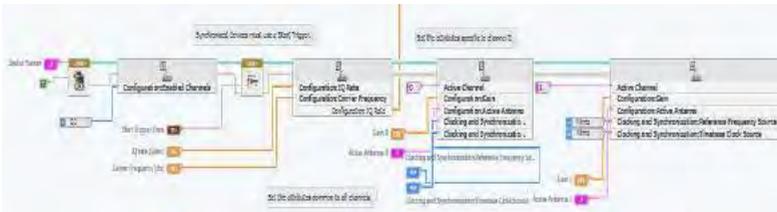
1. Bentuk gelombang : FMCW *Unidirectional Up Chirp & Down Chirp*
2. *Bandwidth*, β : 25 MHz (Frekuensi 0 – 25 MHz)
3. Lebar pulsa, τ : 6 μ s
4. Jumlah *sample*/ pulsa : 300 *sample* / pulsa



Gambar 3.10 Diagram Blok Pembangkitan sinyal *chirp*

Gambar 3.10 menunjukkan diagram blok pembangkit sinyal *chirp* yang dibuat pada perangkat lunak LabVIEW. Sinyal *chirp* yang dibangkitkan tersebut dibentuk menggunakan *Mathscript*.yang sebelumnya sudah di simulasikan pada perangkat lunak Matlab. Pada *Mathscript* tersebut juga menentukan berapa jumlah sampling dalam satu pulsa.

Gambar 3.11 menunjukkan diagram blok pengaturan perangkat keras USRP sub sistem pengirim serta penulisan (*write*) data ke USRP yang dibuat pada perangkat lunak LabVIEW. Parameter yang diatur meliputi IP Address perangkat keras USRP, pengaturan *channel* yang aktif pada channel 0 dan *channel* 1, pengaturan *port* antenna pada *port* TX1/RX1, *gain* pengiriman, frekuensi kerja, dan IQ *sample rate* yang digunakan.

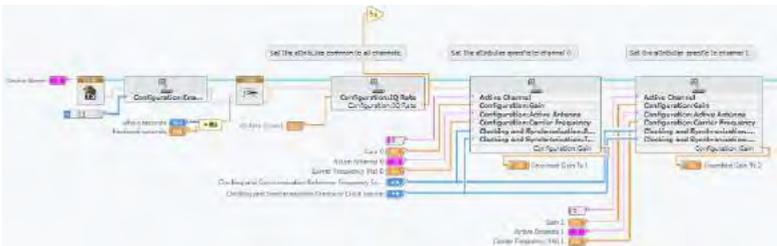


Gambar 3.11 Diagram Blok Pengaturan Sub Sistem Pengirim pada Labview

3.5.4 Perancangan Sub Sistem Penerima

Perancangan pada sub sistem penerima menggunakan dua unit USRP N210. Sub sistem penerima terdiri atas bagian pengaturan perangkat keras USRP sub sistem penerima dan pengambil (*fetch*) data dari USRP.

Gambar 3.12 menunjukkan diagram blok sub sistem penerima. Parameter yang diatur meliputi IP Address perangkat keras USRP, pengaturan *channel* yang aktif pada *channel* 0 dan *channel* 1, pengaturan *port* antenna pada *port* RX2, *gain* penerima, frekuensi kerja, dan IQ *sample rate* yang digunakan.

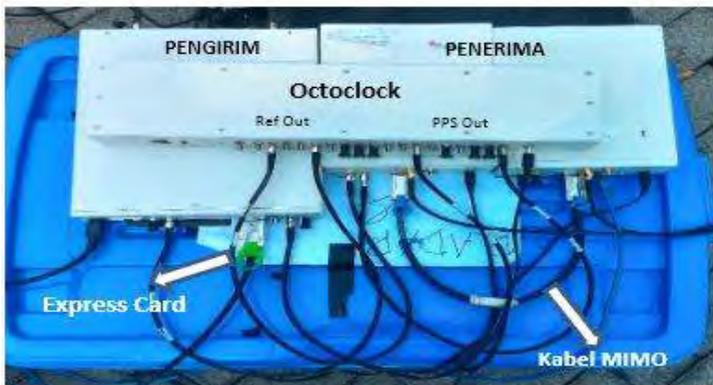


Gambar 3.12 Diagram Blok Pengaturan Sub Sistem Penerima

3.5.5 Perancangan Sub Sistem Pengaturan Waktu dan Sinkronisasi

Sub Sistem Pengaturan waktu dan sinkronisasi merupakan hal yang penting karena untuk mensinkronisasikan antar beberapa unit USRP yang digunakan dan memastikan sub sistem pengirim dan penerima mulai berjalan secara bersamaan. Sinkronisasi yang digunakan pada penelitian ini menggunakan kabel MIMO dan Octoclock G. **Gambar 3.13** menunjukkan konfigurasi antar perangkat USRP pengirim dan penerima.

Pada USRP RIO, perangkat yang terhubung ke *host* PC diidentifikasi dengan nama RIO0. Penggunaan nama RIO0 sudah mewakili *channel* 0 dan *channel* 1.



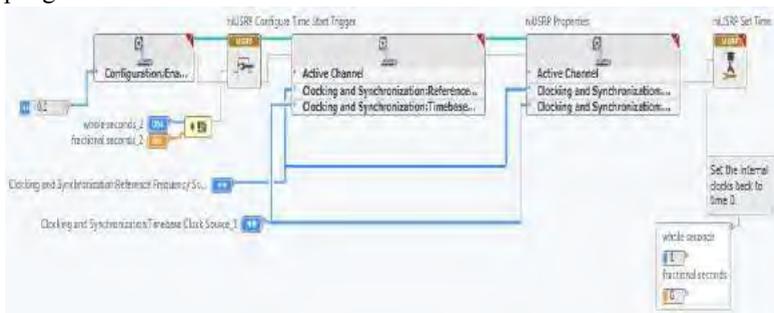
Gambar 3.13 Konfigurasi tiga unit USRP dengan menggunakan Octoclock dan Kabel MIMO

Pengaturan sinkronisasi dilakukan sub sistem penerima dengan mengacu pada sub sistem pengirim sebagai sumber *clock* waktu (*timebase clock source*) dan sumber frekuensi referensi (*reference frequency source*) atau bisa juga dilakukan sebaliknya. Jika sinkronisasi dua unit USRP dilakukan melalui kabel MIMO, maka masukan untuk *timebase clock source* dan *reference frequency source* adalah “Mimo”.

Penelitian ini menggunakan USRP RIO pada pengirim, sehingga tidak diperlukan kabel MIMO untuk mensinkronisasikan pengirim satu dan pengirim dua. Pada sub sistem pengirim konfigurasi sinkronisasi menggunakan Octoclock. Sehingga masukan untuk *timebase clock source* adalah *ReffIn* dan masukan untuk *reference frequency source* adalah *PpsIn*. **Gambar 3.14** menunjukkan diagram blok pada sub sistem pengirim. Sedangkan pada sub sistem penerima menggunakan dua unit USRP N210 sehingga diperlukan sinkronisasi antar dua perangkat USRP

N210 tersebut menggunakan kabel MIMO. Namun, untuk mensinkronisasikan antara pengirim dan penerima menggunakan Octoclock, sehingga pada channel 0 masukan untuk *reference frequency source* adalah *PpsIn* dan masukan untuk *timebase clock source* adalah *ReffIn*. Pada channel 1 masukan untuk *reference frequency source* dan *timebase clock source* adalah MIMO. Diagram blok untuk sinkronisasi pada sub sistem penerima ditunjukkan pada **Gambar 3.15**.

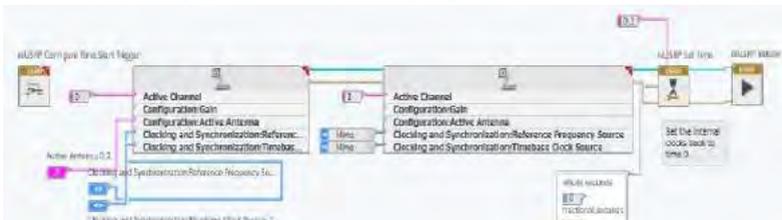
Pengaturan waktu dimulainya proses pengiriman dan penerimaan sinyal dilakukan melalui pengaturan *niUSRP Configure Time Start Trigger*, kemudian melakukan pengaturan sinkronisasi masukan pada *reference frequency source* dan *timebase clock source*. Setelah itu dilakukan pengaturan. *Set time* digunakan untuk melakukan pengaturan waktu perangkat USRP. Sedangkan *Set Trigger time* digunakan untuk menentukan waktu dimulainya sub sistem pengirim dan penerima dengan mengacu pada waktu perangkat USRP. Pada diagram blok program LabVIEW, pengaturan waktu *trigger* harus dilakukan terlebih dahulu sebelum pengaturan waktu USRP. Hal tersebut bertujuan untuk memastikan definisi waktu dimulainya sub sistem pengirim dan penerima dilakukan terlebih dahulu sebelum terjadinya pengaturan waktu USRP. Selain itu, waktu yang dimasukkan pada *Set Trigger time* harus lebih besar atau sama dengan waktu yang dimasukkan pada *Set time* untuk memastikan proses pengiriman dan penerimaan dimulai setelah proses pengaturan waktu USRP.



Gambar 3.14 Blok Diagram Sinkronisasi pada pengirim

3.5.6 Perancangan Sub Sistem Akuisisi Data

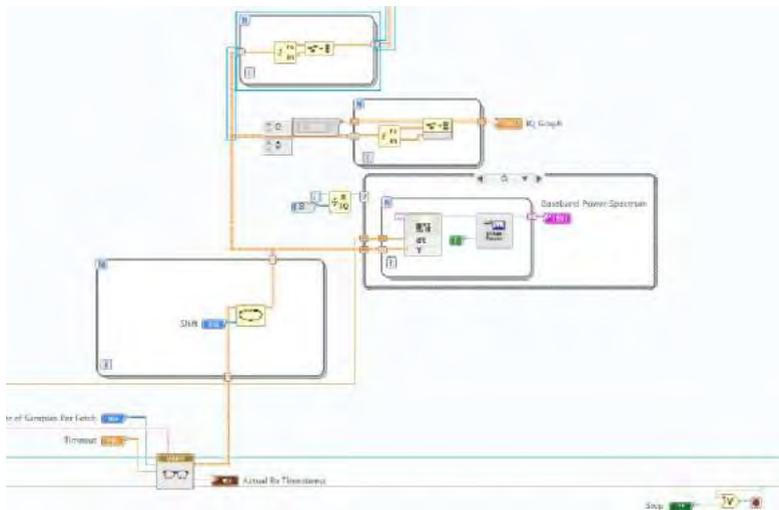
Pada sisi pengirim akuisisi data dilakukan pada sub program yang dituliskan (*write*) ke USRP dan data yang diambil (*fetch*) dari USRP di sisi penerima. Data tersebut selanjutnya disimpan kedalam *file* berformat .csv (Comma Separated Value). Data yang diakuisisi adalah berupa sinyal



Gambar 3.15 Blok Diagram Sinkronisasi pada penerima

dengan frekuensi *baseband*. **Gambar 3.16** menunjukkan diagram blok sub sistem akuisisi data.

Data yang diambil dari niUSRP Fetch Rx Data.vi di sisi penerima berupa data 2D Complex Double (2D CDB). Data tersebut selanjutnya dipisahkan (demodulasi) untuk mendapatkan komponen *in phase* (I) dan *quadrature* (Q) sebelum disimpan ke dalam *file* .csv.



Gambar 3.16 Diagram Blok Akuisisi Data pada Penerima

3.5.7 Perancangan Sub Sistem Pengolahan Informasi Jarak

Perancangan sub sistem pengolahan sinyal dilakukan pada perangkat lunak Matlab. Pengolahan sinyal dilakukan secara terpisah untuk mengurangi beban komputasi selama proses pengukuran. Pengolahan sinyal dilakukan pada data hasil pengukuran yang tersimpan dalam *file* berekstensi .csv

Sub sistem pengolahan sinyal dirancang berdasarkan pada simulasi yang telah dilakukan menggunakan korelasi silang. Program simulasi pengolahan sinyal yang telah dibuat diberi beberapa perubahan pada *script* atau bagian program simulasi. Bagian yang diubah diantaranya adalah *script* pembangkitan sinyal *chirp* digantikan dengan *script* untuk membaca *file* dengan format .csv dan menghapus *script* yang digunakan untuk mensimulasikan sinyal *echo*. Kemudian mendapatkan hasil jarak dengan menggunakan proses korelasi silang.

3.6 Pengolahan Korelasi Silang Pada Matlab

Korelasi silang digunakan untuk mendapatkan informasi jarak dari target. Diagram blok proses pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang dapat dilihat pada **Gambar 3.17**.

Tahap pertama input sinyal pengirim dan penerima dari file .csv ke perangkat lunak Matlab. Data yang diinputkan dari file .csv digabungkan antara nilai *In Phase* dan nilai *Quadrature*. Kemudian nilai Penerima 1 dan Penerima 2 dijumlahkan. Hal yang sama juga dilakukan pada data penerima. Kemudian antara penerima dan pengirim dikorelasikan. Lalu hasil tersebut diplot sehingga mendapatkan nilai informasi jarak dari target.

Sesuai teori pada sub bab 2.7, hasil perhitungan menggunakan persamaan (2.22) akan didapatkan autokorelasi $c_{xx}(t)$ dari sinyal. Autokorelasi tersebut dapat digunakan untuk mendapatkan daya yang diterima radar. Daya yang diterima radar didapatkan menggunakan persamaan (3.9)

$$E_x = 10 * \log_{10}(c_{xx}(t)) \quad (3.9)$$

Sedangkan informasi posisi target didapatkan dengan persamaan (2.1). Nilai T_R diganti dengan nilai *lag* dari nilai autokorelasi maksimum yang telah didapatkan sebelumnya dan dikalikan waktu sampling t_s . Seperti dijelaskan pada sub bab 2.7, *lag* adalah titik puncak dari fungsi autokorelasi, yaitu ketika $t = 0$. Sesuai persamaan (3.10)

$$R = \frac{c \text{ lag } t_s}{2} \quad (3.10)$$



Gambar 3.17 Diagram Blok Pengolahan Sinyal menggunakan Korelasi Silang

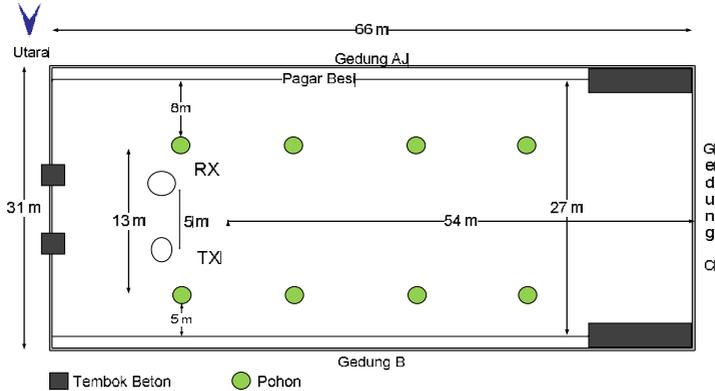
3.7 Skenario Pengukuran

Pengukuran dilakukan di lapangan parkir Jurusan Teknik Elektro ITS dan Lapangan Parkir Robotika ITS. Tempat tersebut dipilih karena dianggap memiliki lahan yang cukup luas dan tidak banyak benda yang dapat mengganggu kinerja dari sistem radar ini.



Gambar 3.18 Lokasi Parkir Teknik Elektro ITS [16]

Konfigurasi perangkat diatur sedemikian di lapangan parkir ini sehingga dapat mengukur target dengan baik. Kemungkinan pantulan dari lingkungan sekitar harus diperhatikan agar pengukuran dapat dilakukan sebagaimana mestinya. **Gambar 3.18** menunjukkan lokasi pengukuran di Parkiran Dosen Teknik Elektro ITS.



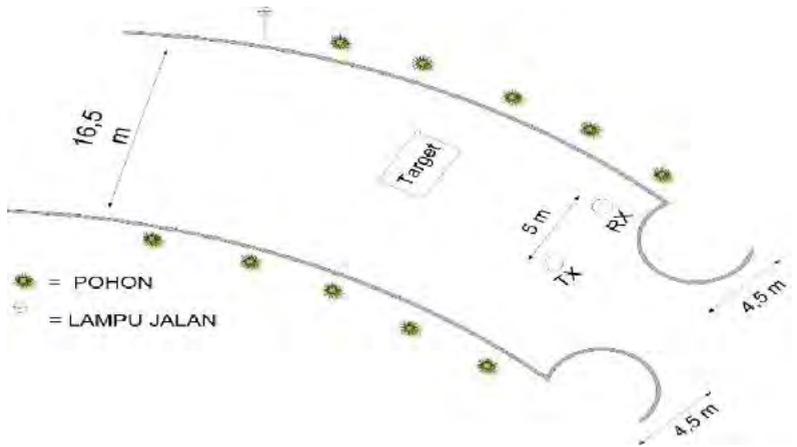
Gambar 3.19 Denah Parkir Teknik Elektro ITS



Gambar 3.20 Parkiran Robotika ITS [16]

Pengukuran kinerja sistem Radar pada dua lokasi dikarenakan untuk mengetahui kinerja deteksi terbaik dari sistem Radar ini. Sehingga melakukan pengukuran di dua lokasi. Pengukuran pada Lapangan parkir Jurusan Teknik Elektro ITS juga tidak memungkinkan dilakukan pada siang hari dikarenakan banyaknya volume kendaraan yang berada pada

lokasi tersebut, sehingga pengukuran pada siang hari dilakukan di lapangan parkir Robotika ITS. **Gambar 3.20** menunjukkan lokasi pengukuran Parkiran Robotika ITS.



Gambar 3.21 Denah Parkiran Robotika ITS

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

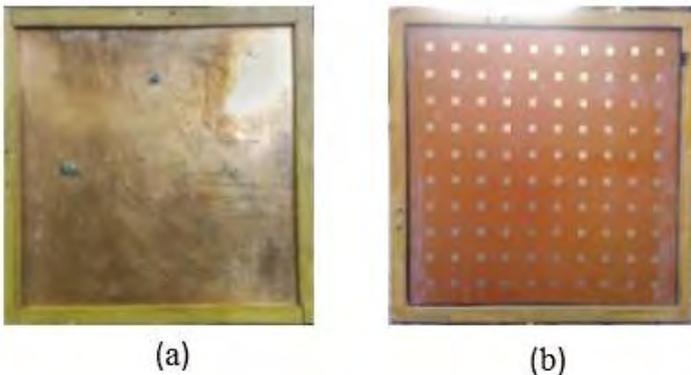
Pada bab ini dilakukan pembahasan mengenai pengukuran sistem radar dan analisis data dari hasil pengukuran.

4.1 Pengukuran Jarak Target

Pengukuran dilakukan untuk mengetahui jarak target suatu objek dari antenna pengirim dan penerima.

4.1.1 Konfigurasi Perangkat Pengukuran

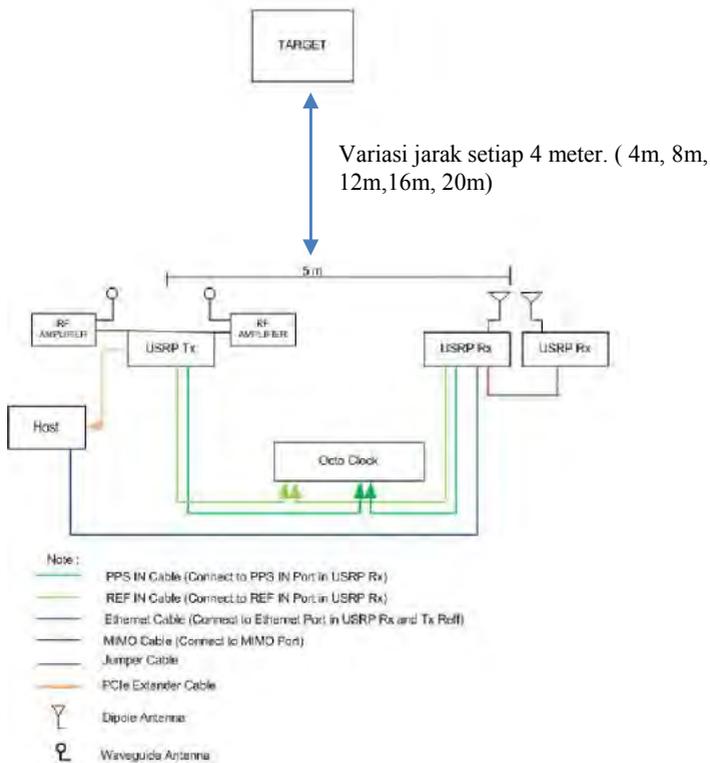
Perangkat pengukuran terdiri atas tiga unit USRP (satu unit USRP RIO dan dua unit USRP N210), satu kabel MIMO untuk sinkronisasi antar unit USRP pada penerima, satu unit *host* PC, dua unit *amplifier* RF untuk pengirim , dua unit antenna *waveguide* untuk pengirim, dua unit antenna omni pada penerima, empat kabel *feeder*, Octoclock G untuk sinkronisasi antar pengirim dan penerima, dan dua target model berbentuk persegi dengan ukuran sisi 60 cm dan 1 m. **Gambar 4.1** menunjukkan target model yang digunakan. Target model dapat berupa plat datar berbentuk segi empat yang terbuat dari bahan metal.



Gambar 4.1 Target 1 (a) ; Target 2 (b)

Gambar 4.2 menunjukkan konfigurasi perangkat pada pengukuran jarak 1 target. Antena pengirim dan penerima diletakkan pada satu lokasi dan terpisah sejauh 5 m. Target model diletakkan di depan arah pancar dan arah terima antenna pada jarak 4 m dan kelipatannya sampai dengan

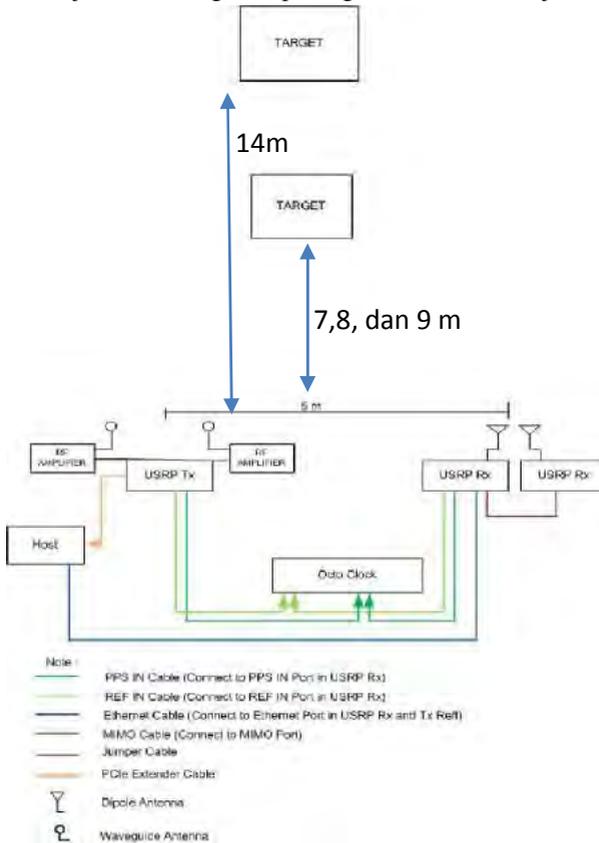
jarak 24 m. Jarak target, R diukur dari titik tengah jarak antara antenna pengirim dan penerima. Posisi target model terhadap antenna pengirim dan penerima adalah simetris terhadap posisi kedua antenna tersebut. Port TX1/RX1 dan RX2 dihubungkan ke *amplifier* RF sebelum dihubungkan ke antenna pengirim.



Gambar 4.2 Konfigurasi Perangkat untuk Deteksi Jarak Satu Target

Pada penelitian ini juga di lakukan pengukuran untuk mendeteksi jarak 2 target. Menggunakan konfigurasi perangkat yang sama dengan pengukuran deteksi jarak untuk satu target. Target model 1 diletakkan pada jarak 7 meter, 8 meter dan 9 meter. Sedangkan target dua diletakkan pada jarak 14 meter. Pada pengukuran deteksi dua target hanya ingin

melihat berapa resolusi jarak dari sistem radar ini. **Gambar 4.3** menunjukkan konfigurasi perangkat untuk deteksi jarak dua target.



Gambar 4.3 Konfigurasi Perangkat untuk deteksi dua target

4.1.2 Langkah Pengukuran

Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini untuk pengukuran jarak target adalah :

1. Rancang sistem radar seperti pada konfigurasi perangkat pengukuran, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.2** untuk satu target dan **Gambar 4.3** untuk dua target. Ketinggian model target diatur agar sejajar dengan tinggi antenna penerima dan

pengirim. Jangan dekatkan antena pengirim/penerima dekat dengan tanah/lantai, karena dapat menyebabkan pantulan ke arah tanah serta pastikan pada lokasi pengukuran tidak terdapat objek selain model target yang digunakan.

2. Untuk memastikan *host* PC telah terhubung dengan USRP, jalankan perangkat lunak USRP Configuration Utility seperti pada **Gambar 3.8**.
3. Cek *firmware* dan *FPGA image* USRP yang digunakan.
4. Atur jarak target model sesuai dengan jarak target yang akan diukur. Pada penelitian ini untuk deteksi satu target, target model diukur mulai jarak 4 meter dari antena pengirim dan penerima lalu ditambah setiap kelipatan 4 meter.



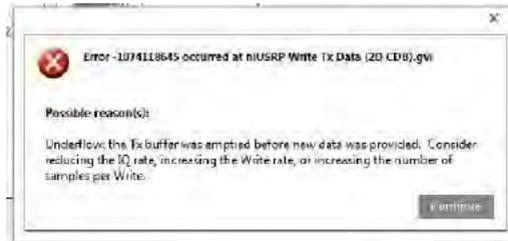
Gambar 4.4 Kondisi pada saat pengukuran

5. Pada program LabVIEW, lakukan pengaturan parameter pengukuran yang telah ditetapkan sebelumnya pada sub bab 3.1. Parameter pada pengirim dan penerima yang meliputi IP Address perangkat keras USRP, *IQ sample rate*, frekuensi kerja, *port* antena pengirim dan penerima, *gain* pengirim dan penerima, lokasi penyimpanan data pengukuran, dll.
6. Selanjutnya, jalankan program LabVIEW untuk memulai pengukuran dan akuisisi data.
7. Setelah didapat data pada pengirim dan penerima dalam bentuk .csv, data tersebut diolah menggunakan software Matlab.

8. Data pengirim dan penerima yang tersimpan dalam .csv dipanggil pada perangkat lunak Matlab, lalu kedua sinyal tersebut di korelasi silangkan sehingga mendapatkan informasi jarak.

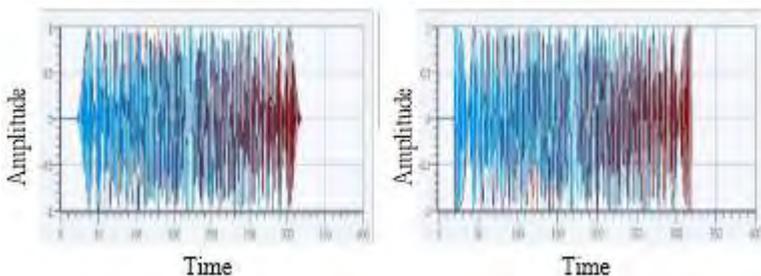
4.1.3 Akuisisi Data Pengukuran

Pengambilan data pengukuran dilakukan sebanyak sepuluh kali untuk setiap jarak target. Hal ini dilakukan agar didapat persentase keberhasilan deteksi target dari sistem Radar yang dibangun. Jumlah sampling dari sinyal asli yang dibangkitkan pada pengirim berjumlah 300, namun ketika hanya mengirimkan sinyal asli sebanyak 300 akan terjadi *error underflow*, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.5**. Agar tidak terjadi *error underflow*, sinyal asli yang dibangkitkan dikali sehingga sinyal dikirimkan memiliki jumlah *sampling* yang besar.



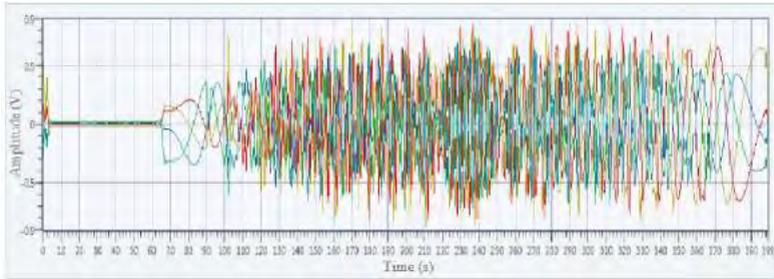
Gambar 4.5 *Error Underflow* pada Pengirim

Jumlah sampling antara pengirim dan penerima harus berjumlah sama. Pada pengirim ditambahkan *header* yaitu penambahan sampling yang berisikan sinyal bernilai 0, tujuannya agar pencuplikan awal pada sampling sama antara pengirim dan penerima. Penggunaan header pada pengirim ditunjukkan pada **Gambar 4.5**.



Gambar 4.6 Penggunaan Header pada pembangkitan Sinyal di Pengirim

Pada penerima ditambahkan *shifter* agar sinyal yang diterima dapat dipilih sesuai dengan sinyal yang dikirimkan. **Gambar 4.7** menunjukkan sinyal yang diterima pada penerima dengan adanya header pada pengirim. Setelah sinyal pada penerima diatur dengan *shifter*, data akan disimpan dalam *file .csv*.



Gambar 4.7 Sinyal pada penerima dengan adanya *header* pada pengirim

4.2 Hasil Deteksi Jarak 1 Target

Pada pengukuran IQ Rate yang digunakan adalah 1 Ms/sec, frekuensi yang digunakan 2,4 GHz, gain pada pengirim dan penerima diatur 31 dB, merupakan gain maksimal yang bisa digunakan pada perangkat USRP.

Pada tugas akhir ini dibandingkan dengan radar SISO FMCW yang telah dilakukan pada Tugas Akhir sebelumnya yang berjudul “**IMPLEMENTASI TESTBED SOFTWARE DEFINED RADAR MENGGUNAKAN UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL (USRP)**”[15].

Pada implementasi SISO FMCW menggunakan antena directional pada pengirim dan penerima. Pada pengirim dan penerima juga menggunakan amplifier. IQ Rate yang digunakan 1 Ms/s, frekuensi yang digunakan 2,4 GHz, gain pada pengirim dan penerima diatur 31 dB.

Dalam satu kondisi jarak dilakukan sepuluh kali pengambilan data dalam kondisi yang sama antar pengambilan data. **Tabel 4.1** menunjukkan hasil dari rekapitulasi pengambilan data dalam beberapa variasi jarak.

Tabel 4.1 Hasil deteksi Jarak 1 Target

| Jarak Target (m) | Jumlah Keberhasilan Deteksi | |
|--------------------|-----------------------------|-----------|
| | SISO FMCW | MIMO FMCW |
| 4 | 10 | 10 |
| 8 | 10 | 10 |
| 12 | 10 | 10 |
| 16 | 10 | 5 |
| 20 | 0 | 2 |
| Persentase Akurasi | 80% | 74% |

Dari **Tabel 4.1** hasil deteksi radar untuk SISO FMCW lebih baik, dikarenakan kedua antenna yaitu pengirim dan penerima menggunakan antenna directional, sehingga pancaran radar lebih mengarah kepada target. Sedangkan pada antenna MIMO pada sisi penerima menggunakan antenna omni directional dengan 2 elemen yang disejajarkan yang berjarak 0.5 lambda.

Pada radar SISO masih dapat mendeteksi sampai dengan jarak 16 meter dengan baik. Sedangkan pada radar MIMO deteksi pada jarak 16 meter mengalami penurunan kinerja. Kriteria keberhasilan deteksi jarak target mengacu pada persamaan (2.12). Dimana pengukuran radar dikatakan *error* jika selisih pembacaan yang seharusnya dengan yang terbaca melebihi resolusi, dimana diketahui resolusi jarak sistem radar yang dibuat pada tugas akhir ini adalah 6 m.

Pada jarak 20 m, radar SISO tidak dapat mendeteksi target sedangkan pada radar MIMO tingkat error deteksi mencapai 80 %. Hal ini bisa terjadi karena ada nya delay pada perangkat USRP, sehingga perlu adanya kompensasi delay pada pengolahan di perangkat lunak Matlab agar terdeteksi hasil yang sesuai dengan pengukuran. Error besar pada antenna MIMO pada jarak lebih dari 12 meter bisa disebabkan karena antenna penerima dan pengirim menggunakan antenna yang memiliki *beamwidth* lebar, sehingga pancaran dan arah terima menjadi lebih luas, yang menyebabkan banyak terjadi pantulan yang seharusnya bukan merupakan objek di dalam penelitian.

4.3 Hasil Deteksi Jarak 2 Target

Pada pengukuran deteksi jarak 2 target, pengaturan dan konfigurasi sama dengan pengukuran deteksi jarak 1 target. Pada deteksi jarak 2 target diambil sample jarak 7,8,9,12,14,dan 18 meter karena jarak tersebut dapat terdeteksi oleh sistem radar ini. Tabel 4.2 menunjukkan hasil deteksi jarak 2 target. Pada pengukuran jarak 2 target tidak dibandingkan dengan radar SISO FMCW dikarenakan tidak adanya pengukuran pada kondisi 2 target.

Tabel 4.2 Hasil Deteksi Jarak 2 Target

| Jarak (m) | | Pengukuran ke- | Hasil (m) | |
|-----------|----------|----------------|-----------|----------|
| Target 1 | Target 2 | | Target 1 | Target 2 |
| 7 | 14 | 1 | 0 | NaN |
| | | 2 | 9 | 24 |
| | | 3 | 9 | NaN |
| | | 4 | 12 | NaN |
| | | 5 | 6 | NaN |
| 8 | 14 | 1 | 6 | NaN |
| | | 2 | 6 | NaN |
| | | 3 | 3 | NaN |
| | | 4 | 9 | NaN |
| | | 5 | 0 | 12 |
| 9 | 14 | 1 | 6 | NaN |
| | | 2 | 9 | NaN |
| | | 3 | 6 | NaN |
| | | 4 | 9 | NaN |
| | | 5 | 6 | NaN |
| 12 | 18 | 1 | 9 | NaN |
| | | 2 | 9 | NaN |
| | | 3 | 9 | NaN |
| | | 4 | 9 | NaN |
| | | 5 | 6 | NaN |

Pada Tabel 4.2 menunjukkan hasil target deteksi jarak 2 target. Hasil menunjukkan target kedua tidak dapat terdeteksi. Hal ini juga

dimungkinkan karena pantulan dari target kedua tidak sampai pada penerima.

4.4 Sintesis

Sistem radar pada penelitian ini merupakan radar MIMO-FMCW dengan konfigurasi MIMO 2x2, menggunakan gelombang LFM. Sistem radar ini dibangun pada SDR yaitu *Universal Software Radio Peripheral* dan pemrosesan sinyal menggunakan korelasi silang untuk mendapatkan informasi jarak dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab

Desain pembangkitan sinyal untuk sistem radar MIMO-FMCW harus memperhatikan ortogonalitas antar pemancar, agar tidak terjadi interferensi antar sinyal. Untuk itu sinyal yang dibangkitkan adalah sinyal *up-chirp* dan *down-chirp*.

Pada Tugas Akhir ini, menggunakan satu unit USRP RIO yang bekerja sebagai pengirim dan dua unit USRP N210 yang berfungsi sebagai penerima. Pada antena pengirim menggunakan antena waveguide sedangkan pada antena penerima menggunakan antena *omnidirectional* yang disusun secara *array*. Antena pengirim dan penerima berada pada satu lokasi yang berjarak 5 meter. Lokasi pengukuran pada Tugas Akhir ini berada di Parkiran Jurusan Teknik Elektro ITS dan Parkiran Pusat Robotika ITS.

Informasi yang ingin didapatkan dari deteksi target menggunakan radar MIMO-FMCW yaitu informasi jarak. Desain pengolahan sinyal yang dibuat adalah pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang untuk mendapatkan informasi jarak. Proses korelasi silang akan didapatkan nilai autokorelasi, dimana ketika nilai autokorelasi maksimum mengindikasikan bahwa informasi jarak target berada pada nilai tersebut.

Berdasarkan hasil pengukuran sistem radar MIMO-FMCW, diketahui bahwa radar MIMO-FMCW dengan konfigurasi MIMO 2x2 mampu mendeteksi 1 target.

Jarak terdekat target yang terdeteksi radar adalah 4 meter dan terjauh 20 meter .

Error deteksi radar untuk deteksi jarak 1 target adalah sebesar 0% pada jarak 4 meter dan 8 meter, namun pada jarak 16 meter error sebesar 50% dan pada jarak 20 meter error mencapai 80%..

Pada deteksi jarak 2 target, target kedua tidak bisa terdeteksi dikarenakan kecilnya pantulan yang masuk pada antena penerima.

Dengan optimasi proses pengolahan sinyal, radar MIMO-FMCW mampu untuk diterapkan sebagai salah satu teknologi pada *Automotive Vehicle*.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN A

PENGESAHAN PROPOSAL TUGAS AKHIR

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri - ITS

TE141599 TUGAS AKHIR - 4 SKS

Nama Mahasiswa : Raditya Anggapawita
Nomor Pokok : 2211 166 179
Bidang Studi : Telekomunikasi Multimedia
Tugas Diberikan : Semester Genap Th. 2015/2016
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Ir. Gamantyo Hendranoro, M.Eng, Ph.D.

10 FEB 2016

Judul Tugas Akhir : **Rancangan Bangun Sistem Radar MIMO-FMCW Berbasis SDR (Software Defined Radio)**
Design of MIMO-FMCW Radar System With SDR (Software Defined Radio)

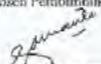
Uraian Tugas Akhir :

Sistem MIMO didefinisikan sebagai komunikasi *point-to-point* menggunakan banyak antena baik pada *transmitter* maupun *receiver*. Manfaat penggunaan banyak antena pada kedua sisi ini adalah untuk meningkatkan performa melalui sistem *diversitas* yang digunakan. Secara khusus, penelitian terakhir yang dilakukan menunjukkan bahwa sistem MIMO dapat secara signifikan meningkatkan kecepatan data pada sistem wireless tanpa meningkatkan daya pengiriman maupun *bandwidth*-nya. Kini banyak peneliti yang mencoba untuk mengaplikasikan teknologi MIMO pada radar. MIMO radar sendiri merupakan pengembangan dari *phased array* radar yang telah banyak digunakan. *Phased Array* terdiri dari sejumlah elemen receiver yang saling berkorelasi. Dan radar MIMO merupakan pengembangan dari radar *phased array* dimana sinyal yang ditransmisikan tidak perlu berkorelasi pada setiap elemen-elemen *receiver*-nya.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan perancangan sistem radar MIMO yang menggunakan SDR (Software Defined Radio). Selain itu, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis dan perbandingan resolusi jarak, akurasi deteksi, jarak maksimum, dan deteksi arah kedatangan antara radar MIMO.

Kata Kunci : *Radar, MIMO, FMCW, SDR*

Dosen Pembimbing


Prof. Ir. Gamantyo Hendranoro, M.Eng, Ph.D
NIP. 197004111993031002

Mengetujui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro FTI - ITS

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 197309271998031004

Menyetujui,
Koordinator Bidang Studi
Teknik Telekomunikasi Multimedia


Dr. Ir. Endryono, DEA
NIP. 196504041991021001

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN B DOKUMENTASI PENGUKURAN



Gambar B.1 Pengukuran di Parkiran Dosen Teknik Elektro ITS (Tampak Depan)



Gambar B.2 Pengukuran di Lapangan Parkir Robotika ITS



Gambar B.3 Pengukuran di Parkiran Dosen Teknil Elektro ITS

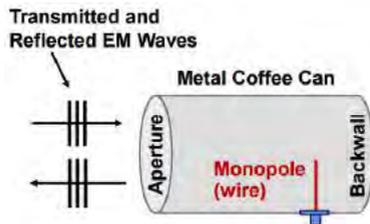
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN C

ANTENA PANDU GELOMBANG BERPENAMPANG LINGKARAN (*CIRCULAR WAVEGUIDE*) [15]

Pada penelitian yang dilakukan, antenna menggunakan antenna yang telah dibuat pada penelitian Tugas Akhir “IMPLEMENTASI TESTBED SOFTWARE DEFINED RADAR MENGGUNAKAN UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL (USRP)”, antenna yang digunakan dapat berupa antenna jenis apapun dengan pola radiasi *directional* dan frekuensi operasi 2,4 GHz. Akan lebih baik apabila antenna yang digunakan memiliki sudut HPBW yang kecil.

Karena ketidakterdediaan antenna *directional* dengan frekuensi operasi 2,4 GHz, maka dibangun dua unit antenna pandu gelombang berpenampang lingkaran (*circular waveguide*). Referensi yang digunakan untuk membuat antenna *circular waveguide* diperoleh dari Massachusetts Institute of Technology (MIT) Open Courseware. Referensi yang digunakan dapat dilihat pada tautan <http://ocw.mit.edu/resources/res-ll-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar-imaging-january-iap-2011/>.



Gambar C.1 Desain antenna pandu gelombang berpenampang bundar (*circular waveguide*).

C.1 Langkah Perhitungan Dimensi Antenna *Circular Waveguide*

Berikut langkah perhitungan yang diperlukan untuk membangun antenna *circular waveguide*.

1. Menghitung panjang gelombang frekuensi operasi, λ menggunakan persamaan

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

dengan c adalah kecepatan cahaya dan f adalah frekuensi operasi antena yang diinginkan.

2. Menghitung panjang saluran *monopole* (l_{line}).

$$l_{line} = \frac{\lambda}{4}$$

3. Menghitung panjang gelombang mode TE₁₁, λ_c menggunakan persamaan

$$\lambda_c = 1,705\emptyset$$

dengan \emptyset adalah diameter *circular waveguide*. Dari nilai λ_c , dapat diperoleh frekuensi *cut off* mode TE₁₁, f_c melalui persamaan

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c}$$

Pada *circular waveguide*, rentang frekuensi yang dapat dihasilkan adalah dari frekuensi *cut off* mode dominan, TE₁₁ sampai dengan frekuensi *cut off* mode tertinggi, TE₀₁. Mode dominan TE₁₁ tidak akan merambat pada frekuensi di bawah frekuensi *cut off*.

4. Menghitung panjang gelombang pandu atau *guide wavelength* (λ_g)

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{1,705D}\right)^2}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}$$

5. Menghitung jarak saluran *monopole* dari *backwall*

$$d_{line} = \frac{\lambda_g}{4}$$

6. *Gain* maksimum antena dihitung dengan persamaan

$$G_{m,dBi} = 10 \log_{10} \left(\frac{\pi \emptyset}{\lambda} \right)^2$$

7. HPBW antenna yang dirancang dapat diketahui dengan pendekatan menggunakan persamaan

$$HPBW = 58^\circ \frac{\lambda}{\emptyset}$$

8. Untuk menentukan *gain* antenna yang telah dipabrikasi melalui pengukuran dapat dilakukan dengan mengukur daya relatif yang *tercoupling* antara dua antenna (*mutual coupling*) identik. Jarak dua antenna yang diukur adalah lebih dari atau sama dengan jarak *far field* antenna, r_f . Jarak *far field* antenna merupakan fungsi panjang gelombang dari frekuensi yang digunakan dan dimensi terbesar antenna. Persamaan untuk menentukan jarak *far field* antenna adalah

$$r_f = 2 \frac{\max[D]^2}{\lambda}$$

dengan D adalah dimensi antenna *circular waveguide*.

9. Daya relatif yang *tercoupling* antara dua antenna, yakni antenna pengirim dan penerima dapat diperoleh dengan persamaan

$$\frac{P_r(\theta, \varphi)}{P_t} = \frac{G_t(\theta, \varphi) G_r(\theta, \varphi) \lambda^2}{(4\pi r)^2}$$

10. Jika daya relatif yang *tercoupling* antara dua antenna identik ($G_t = G_r = G$) terukur, *gain* antenna bisa dihitung dengan persamaan

$$\frac{P_r(\theta, \varphi)}{P_t} = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi r)^2}$$

$$G^2 = \frac{P_r(\theta, \varphi)}{P_t} \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2$$

$$G_{dBi} = 0,5 \left[10 \log_{10} \left(\frac{P_r(\theta, \varphi)}{P_t} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) \right]$$

dengan $P_r(\theta, \varphi)/P_t$ adalah sama dengan parameter S21 hasil pengukuran.

C.2 Parameter Perancangan Antena

| | |
|---------------------|---------------------------------------|
| Penampang waveguide | : Lingkaran (<i>circular</i>) |
| Dimensi waveguide | : diameter 14,8 cm panjang 15,4 cm |
| Frekuensi operasi | : 2,4 GHz |

C.3 Perhitungan Dimensi Antena

Berdasarkan pada parameter perancangan antena, dilakukan perhitungan untuk menentukan dimensi dan jarak saluran *monopole* dari *backwall*.

1. Panjang gelombang operasi

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{2,4 \cdot 10^9} = 0,125 \text{ m}$$

2. Panjang gelombang *cutoff*

$$\lambda_c = 1,705 \cdot 0,125 = 0,252 \text{ m}$$

3. Frekuensi *cutoff* mode TE11

$$f_c = \frac{3 \cdot 10^8}{0,252} = 1,2 \cdot 10^9 \text{ Hz} = 1,2 \text{ GHz}$$

4. Panjang gelombang pandu (*guide wavelength*)

$$\lambda_g = \frac{0,125}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,125}{0,252}\right)^2}} = 0,144 \text{ m}$$

5. Panjang saluran *monopole*

$$l_{line} = \frac{0,125}{4} = 0,03125 \text{ m} = 3,125 \text{ cm}$$

6. Jarak saluran *monopole* dari *backwall*

$$d_{line} = \frac{0,144}{4} = 0,036 \text{ m} = 3,6 \text{ cm}$$

7. HPBW antena yang dirancang

$$HPBW = 58^\circ \frac{0,125}{0,148} = 48,986^\circ$$

8. *Gain* maksimum antena yang dirancang

$$G_{m,dBi} = 10 \log_{10} \left(\frac{0,148\pi}{0,125} \right)^2 = 11,406 \text{ dBi}$$

9. Jarak *far field* antena

$$r_f = 2 \cdot \frac{0,154^2}{0,125} = 0,3795 \text{ m} = 37,95 \text{ cm}$$

C.4 Bahan dan Peralatan

Bahan yang diperlukan untuk membuat antena *circular waveguide* adalah sebagai berikut:

1. Kaleng berpenampang lingkaran 2 buah
2. Konektor tipe N *Chassis Female* 2 buah
3. Kawat tembaga berdiameter 1,5 mm 10 cm, atau secukupnya
4. Timah solder (*solder wire*) 10 cm, atau secukupnya
5. Baut dan mur berdiameter ulir 2,5 mm 4 pasang

Sedangkan peralatan yang diperlukan pada proses fabrikasi dan pengukuran antena meliputi:

1. Bor meja (*bench drill*)
2. Tang potong
3. Solder
4. Kikir
5. Amplas
6. *Vector Network Analyzer* (VNA)
7. *Spectrum Analyzer*
8. Kabel *patchcord* N Male - N Male

C.5 Langkah Fabrikasi Antena *Circular Waveguide*

Langkah fabrikasi antenna *circular waveguide* adalah sebagai berikut:

1. Ukur diameter dan panjang kaleng.
2. Lakukan perhitungan dimensi antena untuk menentukan panjang saluran *monopole* dan jarak saluran *monopole* dari *backwall*.
3. Berikan titik penanda pada kaleng sesuai dengan posisi saluran *monopole* dari *backwall* hasil perhitungan.
4. Lubangi kaleng pada titik yang telah ditandai. Sesuaikan diameter lubang dengan diameter konektor tipe N yang akan digunakan.
5. Buatlah lubang untuk memasangkan konektor pada kaleng sesuai dengan posisi dan ukuran lubang pemasangan (*mounting*) konektor.
6. Potong kawat tembaga sedikit lebih panjang dari panjang saluran *monopole* hasil perhitungan. Tujuan pemotongan kawat tembaga lebih dari ukuran panjang saluran *monopole* adalah untuk tujuan proses optimasi antena.
7. Pasangkan kawat tembaga tersebut ke konektor N dengan cara disolder. Pastikan kawat tembaga telah dikikir dan diampas terlebih dahulu sebelum dipasangkan ke konektor.
8. Pasangkan konektor N yang telah terpasang kawat tembaga pada lubang konektor yang telah dibuat pada kaleng menggunakan mur dan baut.

C.6 Prosedur Optimasi dan Pengukuran Antena

C.6.1 Optimasi, Pengukuran *Return Loss*, dan *VSWR* Antena

Optimasi antena dilakukan dengan memotong kawat tembaga (saluran *monopole*) yang terpasang pada konektor sedikit demi sedikit. Oleh karena itu, pemotongan kawat tembaga pada saat fabrikasi antena dilakukan dengan ukuran lebih dari panjang saluran *monopole* hasil perhitungan. Panjang saluran *monopole* hasil optimasi memiliki panjang sama dengan atau mendekati panjang saluran hasil perhitungan.

Sambungkan antena dengan VNA menggunakan kabel patchcord N Male – N Male. Atur VNA untuk melakukan pengukuran *return loss* atau parameter S_{11} . Potong saluran *monopole* menggunakan tang potong sedikit demi sedikit sampai mendapatkan nilai *return loss* di bawah -10 dB pada *band* frekuensi ISM (2,4 GHz – 2,5 GHz). Selanjutnya, lakukan pengukuran *VSWR* antena dengan mengubah pengaturan pada VNA.

Gambar C.2 menunjukkan konfigurasi untuk melakukan pengukuran *return loss* dan VSWR, serta melakukan optimasi antenna.



Gambar C.2 Konfigurasi pengukuran *return loss* (S11) dan VSWR, serta optimasi antenna.

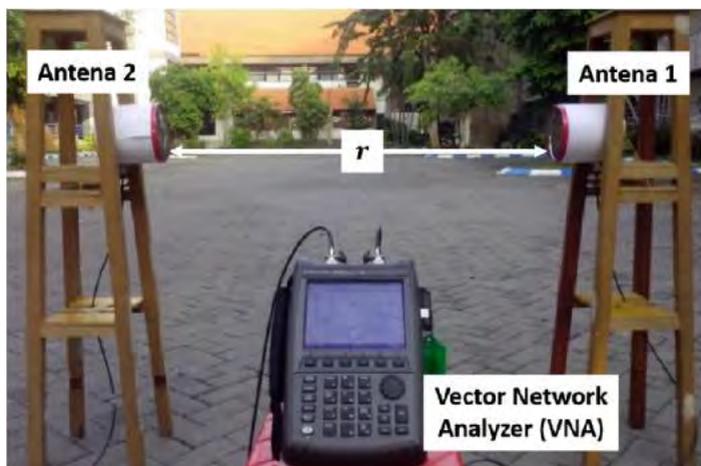
C.6.2 Pengukuran *Gain* Antena

Penentuan *gain* dilakukan dengan melakukan pengukuran *mutual coupling* atau parameter S21 antara dua antenna hasil fabrikasi. Antena diletakkan terpisah pada jarak lebih dari jarak *far field* antenna. Pada pengukuran *mutual coupling* untuk menentukan *gain* antenna, dua antenna identik diarahkan saling berhadapan, masing-masing antenna menghadap ke arah pola radiasi antenna lainnya. Dari hasil perhitungan diketahui, jarak *far field* antenna yang dibangun adalah 37,95 cm. Jarak antenna untuk melakukan pengukuran *mutual coupling* ditentukan sebesar 1 m dan 2 m. Gambar C.3 menunjukkan konfigurasi pengukuran *mutual coupling* antenna untuk menentukan *gain* dua antenna identik.

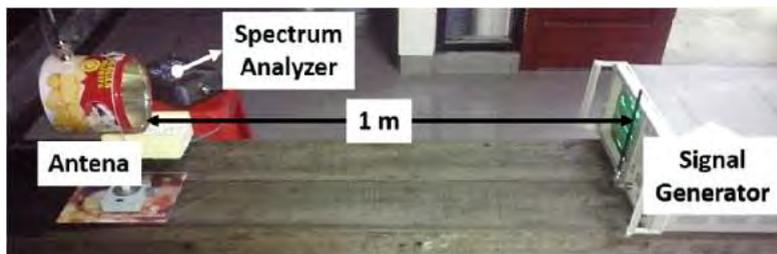
C.6.3 Pengukuran Pola Radiasi Antena

Untuk melakukan pengukuran pola radiasi antenna, diperlukan pemancar dan penerima gelombang elektromagnetika. Pemancar berupa *signal generator* dengan frekuensi sinyal yang sama dengan frekuensi antenna yang diukur. Sedangkan penerima adalah berupa *spectrum analyzer*, untuk mengukur daya terima pada setiap sudut arah pancar antenna yang diukur. Antena yang diukur, diposisikan sejajar terhadap

antena pemancar pada jarak yang lebih jauh dari jarak *far field* antena. Hasil pengukuran daya terima pada setiap sudut arah pancar selanjutnya diplotkan untuk mengetahui pola radiasi antena yang diukur. Gambar C.4 menunjukkan konfigurasi pengukuran pola radiasi antena.



Gambar C.3 Konfigurasi pengukuran *mutual coupling* antena untuk menentukan *gain* dua antena identik.



Gambar C.4 Konfigurasi pengukuran pola radiasi antena.

C.7 Hasil Pengukuran Antena

C.7.1 Hasil Pengukuran *Return Loss* dan VSWR Antena

Dari pengukuran parameter *return loss* (S_{11}) dan VSWR antena, berikut ini adalah data hasil pengukuran yang diperoleh. Frekuensi kerja antena pada parameter perancangan masuk pada frekuensi kerja antena *circular waveguide* yang dibangun, dengan rentang frekuensi antena yang

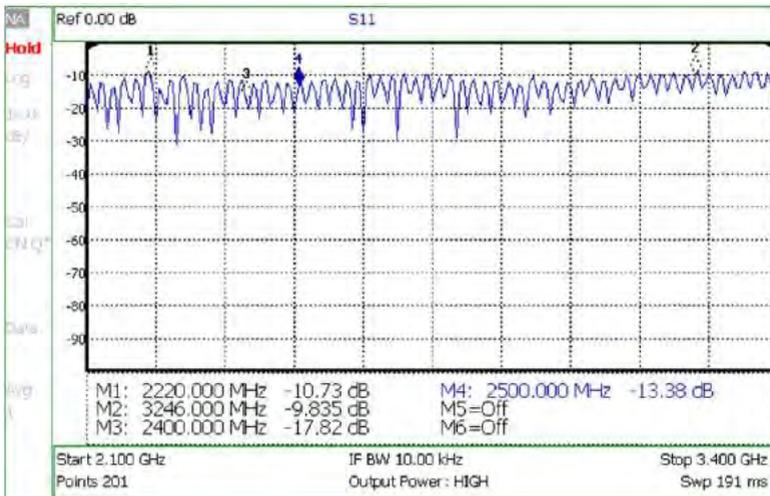
dibangun adalah 2,22 GHz – 3,246 GHz. *Bandwidth* antenna yang dibangun adalah 1,026 GHz.

Data yang ditampilkan pada Tabel C.1 adalah frekuensi operasi antenna dengan nilai *return loss* dan VSWR terendah untuk rentang frekuensi 2,4 – 2,5 GHz. Gambar C.6 sampai dengan Gambar C.10 menunjukkan *screenshot* hasil pengukuran *return loss* dan VSWR dua unit antenna yang dibuat.

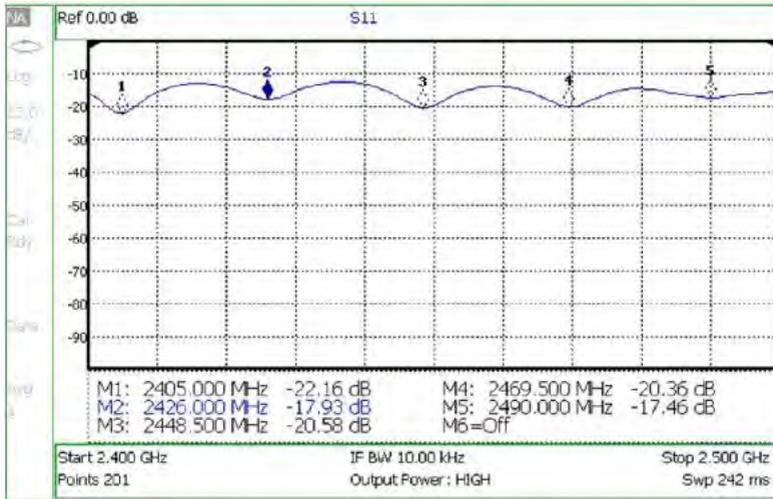
Tabel C.1 Hasil pengukuran *return loss* (S11) dan VSWR antenna.

| Antena 1 | | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Frekuensi (MHz) | 2405 | 2427 | 2448 | 2469,5 | 2490 |
| S11 (dB) | -22,16 | -17,93 | -20,58 | -20,36 | -17,46 |
| VSWR | 1,169 | 1,29 | 1,207 | 1,212 | 1,309 |

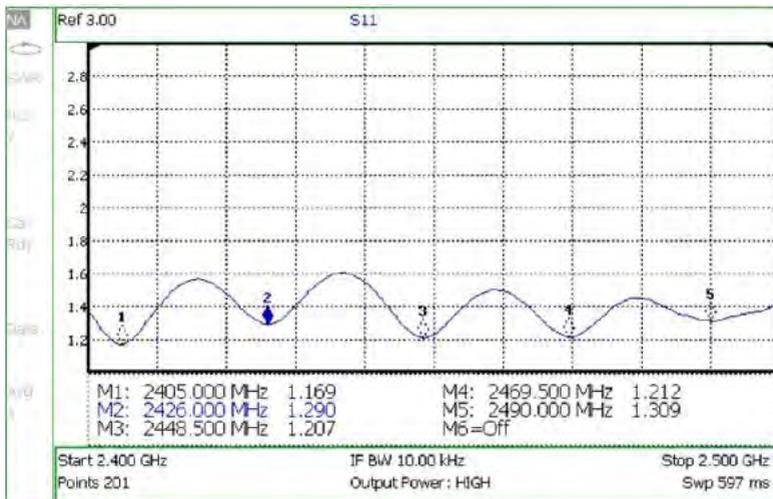
| Antena 2 | | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Frekuensi (MHz) | 2404 | 2425,5 | 2447,5 | 2471,5 | 2494,5 |
| S11 (dB) | -21,32 | -27,29 | -18,05 | -21,21 | -21,02 |
| VSWR | 1,188 | 1,09 | 1,286 | 1,191 | 1,196 |



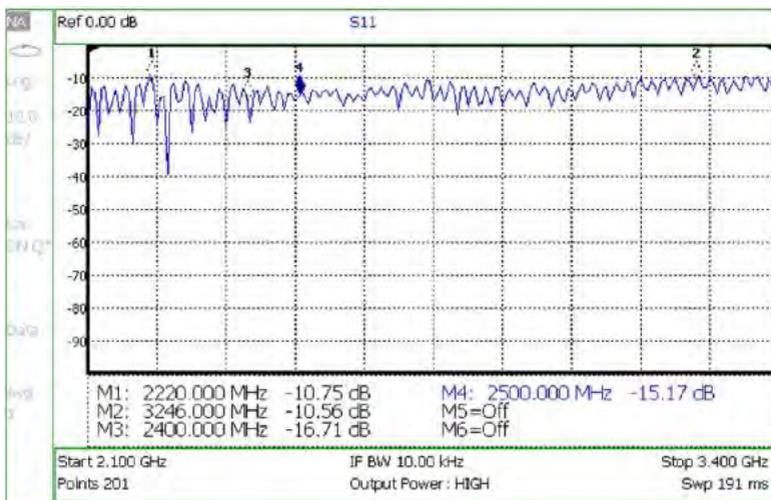
Gambar C.5 Grafik hasil pengukuran *return loss* (S11) antenna 1.



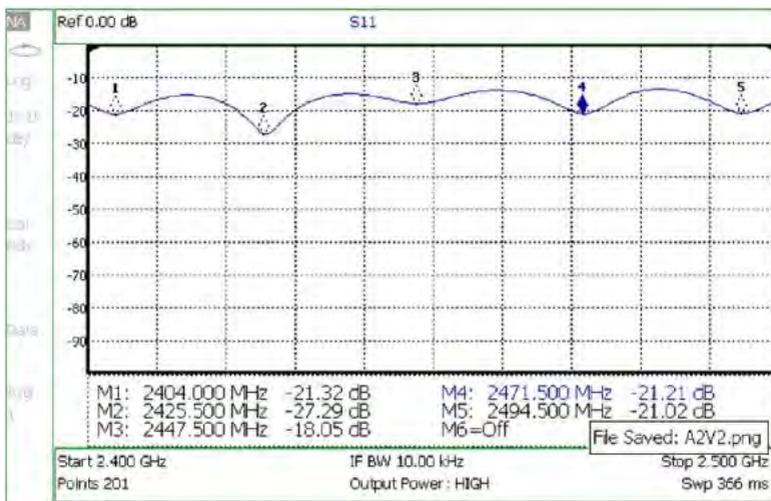
Gambar C.6 Grafik hasil pengukuran *return loss* (S11) antenna 1 untuk rentang frekuensi 2,4 – 2,5 GHz.



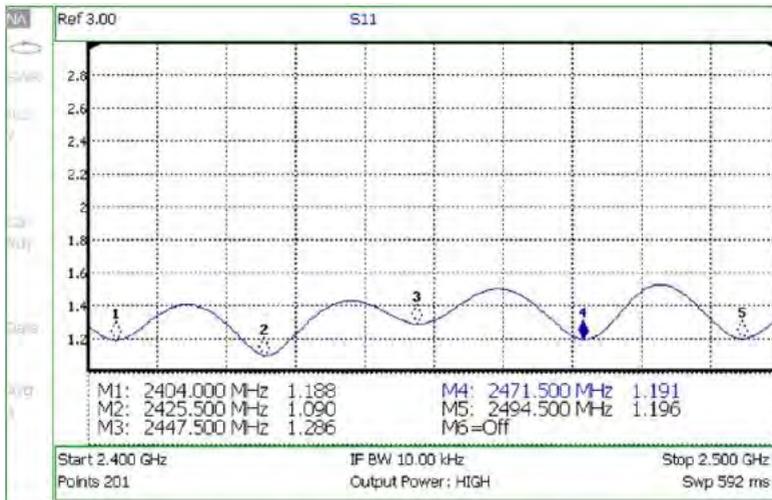
Gambar C.7 Grafik hasil pengukuran VSWR antenna 1 untuk rentang frekuensi 2,4 – 2,5 GHz.



Gambar C.8 Grafik hasil pengukuran *return loss* (S11) antenna 2.



Gambar C.9 Grafik hasil pengukuran *return loss* (S11) antenna 2 untuk rentang frekuensi 2,4 – 2,5 GHz.



Gambar C.10 Grafik hasil pengukuran VSWR antenna 2 untuk rentang frekuensi 2,4 – 2,5 GHz.

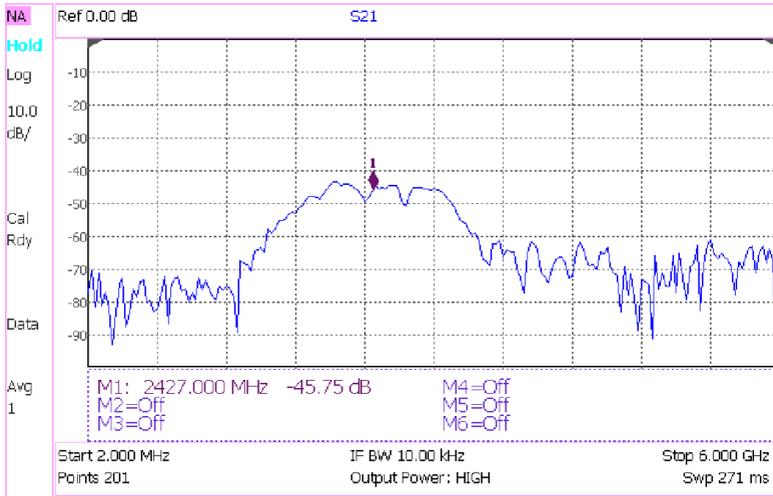
C.7.2 Hasil Pengukuran *Gain* Antena

Hasil pengukuran *mutual coupling* atau parameter S21 pada frekuensi 2,427 GHz dengan jarak antena 1 m dan 2 m adalah -45,75 dB dan -52,09 dB. Dengan total redaman kabel konektor adalah -12,4, maka S21 aktual adalah -33,35 dB dan -39,69 dB. Melalui persamaan (**Error! Reference source not found.**), perhitungan *gain* antena pada jarak 1 m dan 2 m adalah

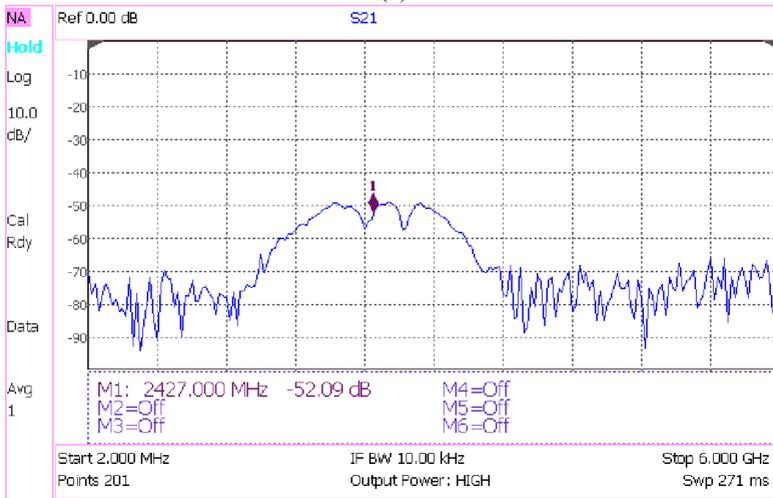
$$G_{1m,dBi} = 0,5 \left[-33,35 + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot 1}{0,124} \right) \right] = 3,396 \text{ dBi}$$

$$G_{2m,dBi} = 0,5 \left[-39,69 + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot 2}{0,124} \right) \right] = 3,236 \text{ dBi}$$

Apabila kedua nilai *gain* tersebut dirata-ratakan, maka diperoleh *gain* masing-masing antena adalah 3,32 dBi. Gambar C.11 menunjukkan hasil pengukuran parameter S21 pada jarak 1 m dan 2 m.



(a)

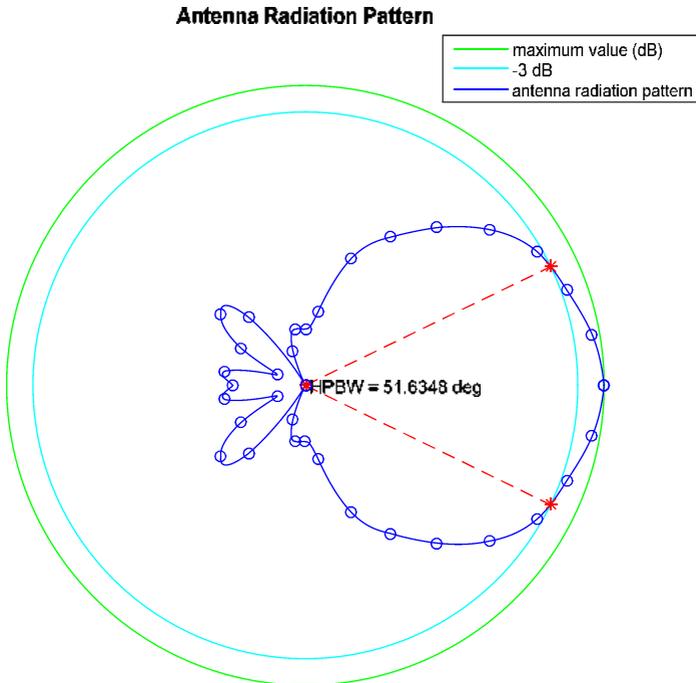


(b)

Gambar C.11 Hasil pengukuran parameter S21 dua antenna pada jarak (a) 1 m dan (b) 2 m.

C.7.3 Pola Radiasi Antena

Hasil pengukuran pola radiasi antena pada bidang horizontal menunjukkan bahwa antena memiliki pola radiasi *directional* dengan HPBW antena sebesar $51,63^\circ$. Gambar C.12 menunjukkan pola radiasi antena *circular waveguide* yang dibangun.



Gambar C.12 Pola radiasi bidang horizontal antena.

C.8 Spesifikasi Antena

Berdasarkan pada hasil pengukuran, diketahui spesifikasi antena *circular waveguide* yang dibangun adalah sebagai berikut:

1. Frekuensi : 2220 – 3246 MHz
2. *Bandwidth* : 1026 MHz
3. Pola Radiasi : *Directional*
4. *Gain* : 3,32 dBi
5. VSWR : $\leq 1,9$
6. HPBW : $51,63^\circ$

LAMPIRAN D

PROGRAM LABVIEW COMMUNICATIONS

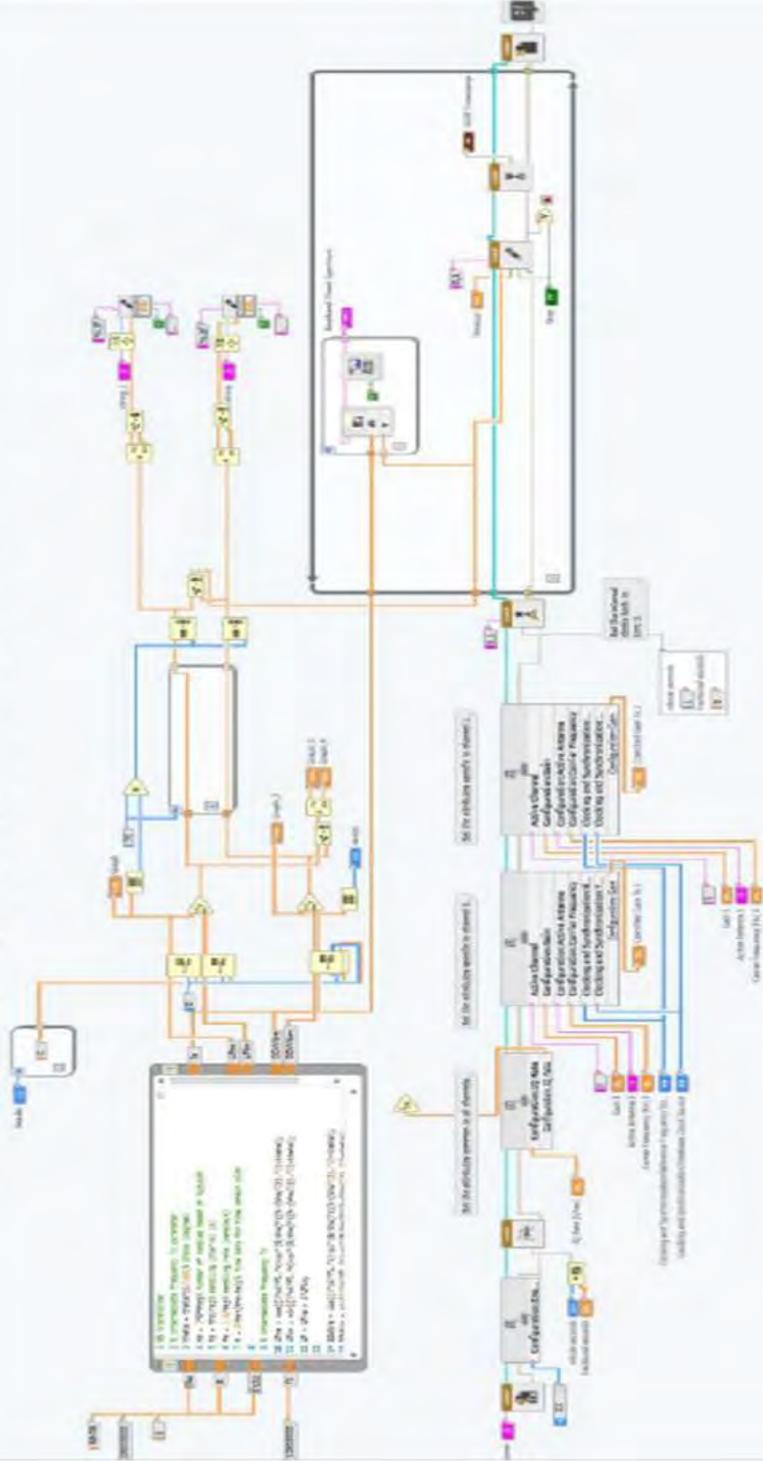
Pada penelitian Tugas Akhir **“Rancang Bangun Sistem Radar MIMO-FMCW Berbasis SDR (Software Defined Radio)”** dibangun pada perangkat lunak Labview Communications. Labview Communications merupakan perangkat lunak terbaru yang dikeluarkan oleh National Instrument yang dikhususkan untuk penggunaan dalam bidang Telekomunikasi.

FRONT PANEL PENGIRIM PADA LABVIEW

The screenshot shows the LabVIEW front panel for a program titled "Tx Multiple Outputs". At the top, there are buttons for "Panel", "Diagram", and "Icon". The main area is divided into several sections:

- Overview:** A blue header bar with the title "Tx Multiple Outputs" and a link "See the diagram for more information".
- Instructions:** A section with the heading "Instructions" and a list of five steps: 1. Run the NI-USB Configuration Utility... 2. Run the VI. 3. Click Stop to stop the VI.
- Device Name:** A text box containing "800".
- Channel 0:** A control panel with "Active Antenna 0" (set to 0), "Gain 0" (set to 10), "Carrier Frequency [Hz] 0" (set to 2.45), and "Coarse Gain Tx 0" (set to 0).
- Channel 1:** A control panel with "Active Antenna 1" (set to 1), "Gain 1" (set to 10), "Carrier Frequency [Hz] 1" (set to 2.45), and "Coarse Gain Tx 2" (set to 0).
- Timeout:** A numeric control set to 10.
- IQ Rate [S/sec]:** A numeric control set to 1M.
- Start Trigger:** A control panel with "whole seconds" (set to 2) and "fractional seconds" (set to 0).
- Encoding and Synchronization:** A section with "Coding and Synchronization" (set to "QPSK"), "USB Timestamp" (set to 300), "whole seconds" (set to 0), and "fractional seconds" (set to 0).
- Stop:** A red button labeled "Stop".
- Footer:** A small text box at the bottom right containing the text "ring_Diyubahita_Ekaterina_pang_kuram344061; pancaah100031_309_301ov" and "img_2_Diyubahita_Ekaterina_pang_kuram344061; pancaah100031_309_301ov".

Diagram Blok Pengirim pada Perangkat Lunak Labview Communications

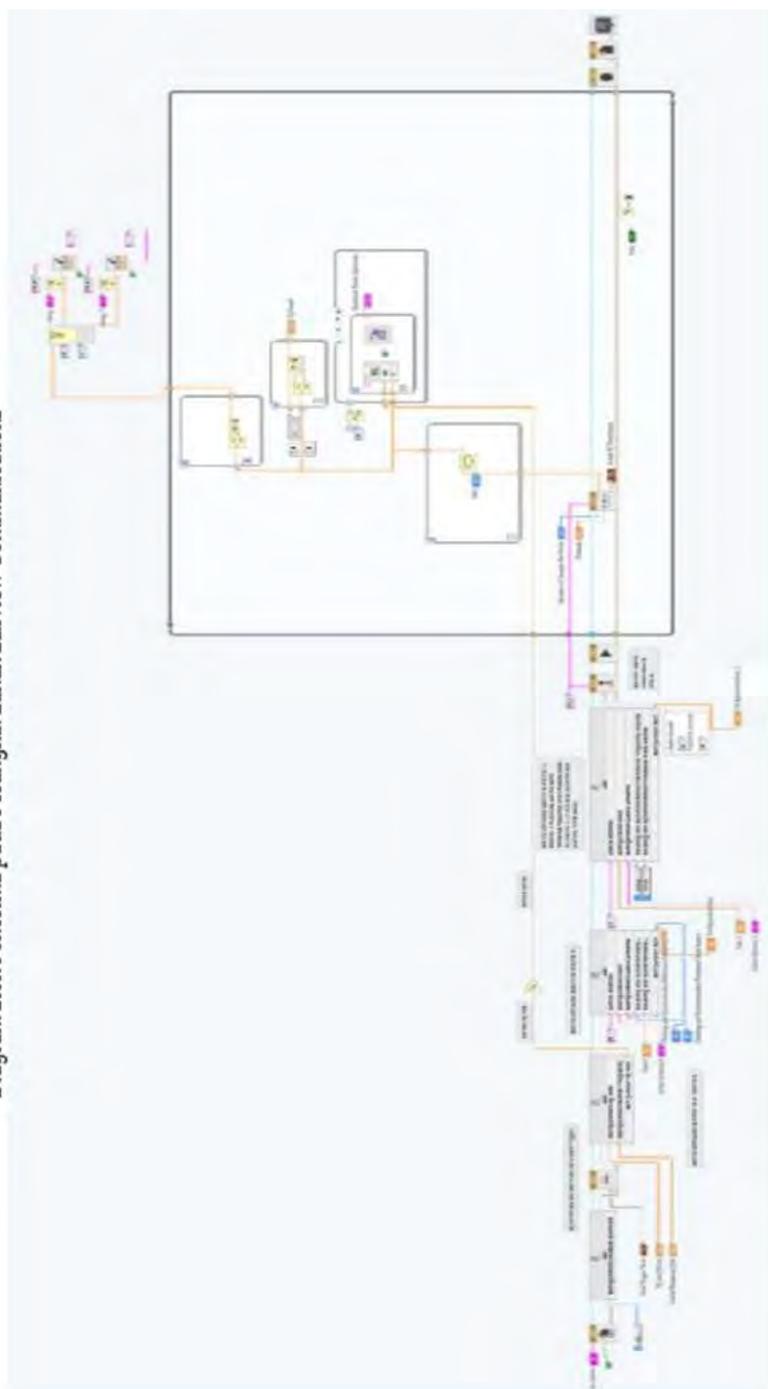


FRONT PANEL PENERIMA PADA LABVIEW

The screenshot shows the front panel of a LabVIEW receiver application. The interface is organized into several sections:

- Device Names:** A text box containing the IP address `192.168.10.2102168.102`.
- IQ rate [S/sec]:** A numeric control knob set to `100`.
- Carrier Frequency [Hz]:** A numeric control knob set to `2.4G`.
- Number of Samples Per Fetch:** A numeric control knob set to `300`.
- Start Trigger Time:** Two numeric control knobs for "whole seconds" (set to `0`) and "fractional seconds" (set to `0`).
- Timeout:** A numeric control knob set to `10`.
- Channel 0 and Channel 1:** Two rounded rectangular boxes, each containing "Active Antenna" (set to `00L`) and "Gain" (set to `10`).
- Configuration Gain:** Two numeric control knobs, both set to `0`.
- Cooling and Synchronization-Reference Frequency Source:** A dropdown menu set to `Quinn`.
- Cooling and Synchronization-Timebase Clock Source:** A dropdown menu set to `Quinn`.
- Baseband Power Spectrum:** A plot showing "Amplitude [dB]" on the y-axis (ranging from -100 to -30) and "Frequency [Hz]" on the x-axis (ranging from -100000 to 437515). The plot shows a flat line at approximately -100 dB. Below the plot are two buttons labeled "Ck0" and "Ck1".
- String Fields:** Two text boxes containing the path `D:\Kuliah\TA Riset\data pengukuran\25-05\001\001_2505_0_1.csv`.
- Stop Button:** A red button labeled "Stop" located at the bottom right.

Diagram Blok Penerima pada Perangkat Lunak Labview Communications



[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN E SCRIPT PENGOLAHAN SINYAL PADA MATLAB

```
% Pengolahan Sinyal Untuk Mendapatkan Informasi
Jarak
% Radar MIMO-FMCW
% Korelasi Silang

clear all;clc;close all;

% Input File.csv ke Matlab
% Pengirim 1
Tx1=csvread('TX1_2505_8_2.csv');
Tx1=complex(Tx1(101:400,1),Tx1(101:400,2));
Tx1=Tx1.';
% Pengirim 2
Tx2=csvread('TX2_2505_8_2.csv');
Tx2=complex(Tx2(101:400,1),Tx2(101:400,2));
Tx2=Tx2.';
%Penjumlahan antara Pengirim 1 dan Pengirim 2
TX = Tx1+Tx2;

% Penerima 1
Rx1=csvread('RX1_2505_8_2.csv');
Rx1=complex(Rx1(101:400,1),Rx1(101:400,2));
Rx1=Rx1.';
% Penerima 2
Rx2=csvread('RX2_2505_8_2.csv');
Rx2=complex(Rx2(101:400,1),Rx2(101:400,2));
Rx2=Rx2.';
% Penjumlahan Penerima 1 dan Penerima 2
RX=Rx1+Rx2;

aa=Rx1./TX;
jarak=ifft(bb, length(bb));
jarak1=abs(jarak);
figure(1)
```

```

plot
((900*(1:length(jarak))/length(jarak)), jarak1)

tho=6e-6;
ns =300;
ts=tho/ns;
% Parameter Radar
% B = 25*1.0e6;% chirp signal bandwidth (Hz)
% tho = 6*1.0e-6;% pulsewidth (us)
% tover = 2*tho;% over sweep oscillator (us)
% ns = 2*B*tover;% number of samples/pulse
% ts = tover/ns;% sampling time (s)
% t = 0:ts:(tover-ts);% time data
% R = 1;% system impedance (ohm)
% tmeas = 6e-6;% measurement time (s)

% RXBB=RX(1:2*B*tmeas);
% RXBB_int = zeros(1,ns);
% s = 1;
% for idx = 1:floor(length(RXBB)/ns)
%     RXBB_int = RXBB_int + RXBB(s:(idx*ns));
%     s = s+ns;
% end
% figure
% subplot(2,1,1)
% plot(0:ts:(tho-ts),real(TXBB),'b')
% hold on
% plot(0:ts:(tho-ts),imag(TXBB),'r')
% hold off
% legend('I channel','Q channel')
% grid
% xlabel('Time (s)')
% ylabel('Amplitude (V)')
% title('Transmitted Baseband Signal')
% subplot(2,1,2)
% plot(t,real(RXBB_int),'b')
% hold on
% plot(t,imag(RXBB_int),'r')
% hold off
% legend('I channel','Q channel')

```

```

% grid
% xlabel('Time (s)')
% ylabel('Amplitude (V)')
% title(['Coherently Integrated '...
%       'Received Baseband Signal']);

% Pengolahan Sinyal Menggunakan IFFT

% [acor,lag] = xcorr(RX,TX);
% acor=hamming(length(599)).*acor;
% jarak1 = 20*log10((abs(acor))/max(abs(acor)));

% TF=fft(TX);
% RF=fft(RX);
% RFc=conj(RF);
%
% TFRF=TF.*RFc.*hamming(length(TF)).';
% jarak1=ifft(TFRF)
% jarak1=abs(jarak1);
%
% lag=lag((end-length(jarak1)+1:end));
% figure
% det_range = lag*ts*3.0e8/2;
% subplot(2,1,1)
% plot(det_range,jarak1,'LineWidth',1.25)
% xlabel('Range (m)');
% ylabel('Power (dBm)');
% grid on;

```

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian Tugas Akhir yang dilakukan oleh penulis, kesimpulan yang diperoleh adalah

- Sistem radar yang dibangun merupakan radar MIMO-FMCW dengan konfigurasi MIMO 2x2, menggunakan gelombang LFM, dan pemrosesan sinyal menggunakan korelasi silang untuk mendapatkan informasi jarak..
- Jarak terdekat target yang bisa dideteksi radar adalah sejauh 4 m, dan jarak terjauh target yang bisa dideteksi oleh radar adalah sejauh 16 .m
- Pada penelitian ini, tidak dapat mendeteksi dua target
- Untuk Sistem Radar memerlukan antena yang memiliki beamwidth kecil.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian Tugas Akhir yang dilakukan oleh penulis, saran yang diberikan adalah

- Menggunakan antena directional agar penembakan ke target tidak lebar dan hanya fokus ke target
- Diperlukannya pembatas yang tidak dapat ditembus sinyal antara pengirim dan penerima

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wiesbeck, W.: The Radar of The Future. Radar Conference (EuRAD), 2013 European, pp. 137 – 140
- [2] Whydell A., Basten M., dan Seewald A. 2009. Automotive radar technologies for all vehicle segments. ATZelektronik worldwide volume 4 issue 6.
- [3] Li, J., Stoica, P.: MIMO Radar with Colocated Antennas. IEEE Signal Process. Mag., 2007, 24, pp. 106-114
- [4] Skolnik, Merrill I.: Introduction to Radar System: Third Edition. 2001. The McGraw Hill Companies
- [5] M. A. Richards, et al., “Principles of Modern Radar Vol. I: Radar Basic Principles”, Scitech Publishing, New Jersey, 2010.
- [6] S. Costanzo, et al., “Potentialities of USRP-Based Software Defined Radar Sitemas”, Progress In Electromagnetics Research B, vol. 53, pp. 417-435, Calabria, 2013.
- [7] Bassem R. Mahafza.: Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. 2005. Chapman & Hall.
- [8] Melvin, William L., Scheer, James A.: Principles of Modern Radar : Advanced Techniques. 2013. Scitech Publishing
- [9] Komarov, I. V. dan Smolskiy, S. M., “Fundamentals of Short Range FM Radar”, Artech House, Norwood, 2003.
- [10] Goldsmith, A.: Wireless Communications. 2004. Stanford University.
- [11] Patton, L. K., “A GNU Radio Based Software-Defined Radar”, Wright State University, Dayton, 2007.
- [12] Curry, G. Richard: Radar Essential : Ch.08 Radar Measurement and Tracking. Scitech Publishing.
- [13] National Instruments, “USRP 2943R”,
<URL:<http://www.sine.ni.com>>, Mei 2016.
- [14] National Instruments, “USRP 2943R Block Diagram”,
<URL:<http://www.ni.com>> , Mei 2016
- [15] Khakim, Nurman. 2015. *Implementasi Testbed Software Defined Radar Menggunakan Universal Software Radio Peripheral (USRP)*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [16] Google Earth, “ITS Maps”, URL:<http://www.earth.google.com>, Mei 2016.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BIODATA PENULIS



Raditya Anggaprawira, lahir di Jakarta, 5 November 1993. Memulai pendidikan formal di SDN Cemerlang Jakarta lalu SMPN 92 Jakarta, dan SMAN 21 Jakarta. Kemudian melanjutkan pendidikannya di Strata-1 (S1) program studi Telekomunikasi Multimedia, jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya sejak Juli 2011. Penulis aktif sebagai anggota pecinta alam “Kalpataru” di Teknik Elektro ITS dan juga Kompas Muda Surabaya.