

**Analisis Pengolahan Sinyal Radar
Frequency Modulated Continuous Wave untuk Deteksi,
Tracking, dan Klasifikasi Target dengan Hidden Markov Model**

TESIS

Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Magister Teknik
Dalam Program Studi Magister Teknik Elektro
Pada Fakultas Teknik Universitas Andalas

Oleh:

**Siska Aulia
NIM. 1120952028**

**Pembimbing I:
Dr.Ir. Suhartono Tjondronegoro
NIP: 130528316**

**Pembimbing II:
Dr.Eng. Rahmadi Kurnia
NIP. 196908201997031002**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG**

2013

Judul Tesis : Analisis Pengolahan Sinyal Radar Frequency Modulated
Continuous Wave untuk Deteksi, Tracking, dan
Klasifikasi Target dengan Hidden Markov Model

Nama : Siska Aulia

Nomor Induk Mhs : 1120952028

Program Studi : Magister Teknik Elektro

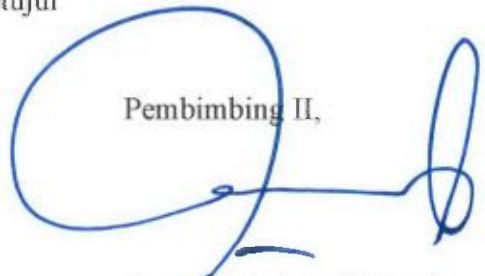
Menyetujui

Pembimbing I,



Dr. Ir. Suhartono Tjondronegoro
NIP: 130528316

Pembimbing II,



Dr. Eng. Rahmadi Kurnia
NIP. 196908201997031002

Mengetahui:

Ketua Jurusan Teknik Elektro,



Dr. Eng. Ariadi Hazmi
NIP. 197503141999031003

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji dan syukur penulis persembahkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia dan hidayah tanpa henti, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Hasil Penelitian yang berjudul " **Analisis Pengolahan Sinyal Radar Frequency Modulated Continuous Wave untuk Deteksi, Tracking, dan Klasifikasi Target dengan Hidden Markov Model**". Shalawat dan salam untuk junjungan dan teladan kita semua Nabi Muhammad SAW.

Laporan ini ditulis untuk memenuhi syarat menyelesaikan studi magister pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas. Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu saran dan kritik yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan dimasa yang akan datang.

Dengan segala kerendahan hati, penulis berharap semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan penulis khususnya, serta bagi dunia pendidikan pada umumnya.

Padang, Oktober 2013

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, puji, syukur, dan segala ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada sang penggenggam ilmu, Allah S.W.T, atas karunia, nikmat dan rahmat-Nya, sehingga memampukan penulis menyelesaikan tugas akhir ini, sebagai syarat menyelesaikan pendidikan Magister Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas.

Banyak sekali kendala yang penulis dapatkan dalam menyelesaikan laporan penelitian ini, dan penulis mendapatkan banyak sekali bantuan dari berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga tercinta, Ibunda **Alm.Irdarosa**, ayahanda **Harmonis**, dan sudaraku Mutia, Lusi, Heru dan Bang Ruma atas doa dan kasih sayang yang selalu diberikan untuk penulis. Motivasi selalu berusaha memberikan yang terbaik supaya kalian bangga dan bahagia. Terima kasih juga untuk Mak Odang, Odang, Pak Etek, Ante Pit, Pak Uwo dan Mak Uwo.
2. Bapak **Dr.Ir.Suhartono Tjondronegoro** selaku Pembimbing I, dan Bapak **Dr.Eng.Rahmadi Kurnia** selaku Pembimbing II yang selalu memberi arahan, didikan, kritikan, saran, waktu serta kepercayaan kepada penulis dalam menyelesaikan Tesis ini.
3. Bapak **Dr.Eng. Ariadi Hazmi** selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
4. Bapak **Syafii, Ph.D.**, koordinator Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Unand.
5. Bapak **Refdinal Nazir, Ph.D**, **Dr.Ir.Hendrawan**, **Dr.Tutun Juhana**, dan Pak **Eka Putra Walidi, M.Eng**, alhamdulillah berkat perjuangan beliau penulis dapat menuntut ilmu di Magister Unand dan ITB.
6. Seluruh dosen Teknik Elektro Unand dan STEI ITB yang telah memberikan ilmunya yang berguna bagi penulis selama menempuh perkuliahan di Unand-ITB. Terkhusus bapak **Prof. Andriyan Bayu Suksmono, Ph.D** , terimakasih Pak atas ilmu dan pengalaman prakteknya tentang Pengolahan Sinyal Radar, dan bapak **Achmad Munir** serta Pak **Toni**. Semoga ilmu yang bermanfaat menjadikan amal kebaikan yang tiada henti pahalanya.

7. Sahabat sekaligus saudara di ranah rantau, Yayat, kak Pipit , wiwi dan Ipit, abla Fitri, kak Ezi,kak tika, dan sahabatku sitti, kak pupus,kak iset,kak fifi, kak wira dan bunda Eva.
8. Sahabat-sahabatku di ITB peminatan wireless Yolen, Tia, Caesar, Mbak Diah, Mas Riko, terkhusus anggota radar Azizah, Mas Jumail dan Ersad.
9. Sahabatku sekaligus saudara di ranah minang, Ni Olin, Ni Meza, Ni Cika , Buk Ai, Kiki, dan Da Zulka.
10. Seluruh karyawan dan teknisi Jurusan Teknik Elektro Unand dan ITB.
11. Seluruh rekan-rekan mahasiswa magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Unand angkatan 2011.
12. Semua pihak yang telah membantu penyelesaian laporan ini. Dan semua pihak yang tak bisa disebutkan satu persatu, semoga Allah SWT membalasnya dengan yang lebih baik. Amin.

Padang, Oktober 2013

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR SINGKATAN.....	xvi
DAFTAR SIMBOL	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Metode Penelitian.....	5
1.6 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Pengertian Radar.....	7
2.1.1. Dasar Sistem Radar.....	7
2.1.2. Persamaan Radar.....	8
2.1.3. Radar Cross Section.....	10
2.2. Continuous wave Radar.....	11

2.3. Frequency Modulated Continuous Wave Radar.....	12
2.3.1. Pengolahan Sinyal Triangular FMCW radar.....	15
2.4. FMCW Doppler Radar.....	17
2.5. Teknik Monopulse Radar.....	19
2.6. Ekstraksi Parameter.....	21
2.7. Hidden Markov Model.....	22
2.8. Software Define Radio (SDR).....	27
BAB III PERANCANGAN SISTEM.....	30
3.1 Perancangan Sistem.....	30
3.1.1 Sistem FMCW radar dengan Hidden Markov Model untuk klasifikasi target.....	31
3.1.2 Diagram Blok Pengolahan Sinyal FMCW Doppler radar.....	32
3.1.3 Ekstraksi ciri sinyal beat FMCW dengan MFCC.....	34
3.1.4 Klasifikasi target dengan Hidden Markov Model.....	36
3.1.4.1 Algoritma Pelatihan Hidden Markov Model.....	37
3.1.4.2 Pengujian Hidden Markov Model dan Pengambilan Keputusan.....	42
3.2 Pemodelan Simulasi Sistem FMCW Radar.....	43
3.2.1 Pemodelan Simulasi Sistem FMCW Radar dengan Matlab.....	43
3.2.1.1 Desain Lokasi radar dan target.....	44
3.2.1.2 Informasi pemodelan target.....	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1 Hasil Simulasi Matlab.....	48
4.1.1 Pengolahan sinyal untuk deteksi target.....	48

4.1.1.1 Skenario percobaan 1 untuk satu target.....	48
4.1.1.2 Skenario percobaan 2 untuk lima target.....	59
4.1.2 Pengolahan sinyal untuk tracking target.....	66
4.1.2.1 Skenario percobaan 1 untuk satu target.....	66
4.1.2.2 Skenario percobaan 2 untuk lima target.....	70
4.1.3 Pengolahan sinyal radar untuk klasifikasi target.....	75
4.1.4 Hasil simulasi matlab untuk target diam.....	79
4.2 Hasil Simulasi Sistem Radar FMCW dengan GNU Radio.....	87
4.3 Hasil Pengujian Sistem Radar FMCW dengan USRP N210.....	92
BAB V PENUTUP.....	90
5.1. Kesimpulan.....	91
5.2. Saran.....	92
DAFTAR PUSTAKA.....	93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Diagram Blok Sistem Radar Secara Umum.....	7
Gambar 2.2. Frekuensi sinyal <i>up-chirp</i> LFM (<i>sawtooth</i>).....	12
Gambar 2.3 Frekuensi sinyal triangular LFM.....	12
Gambar 2.4 Sinyal <i>up-chirp</i> LFM dan sinyal triangular LFM dalam domain waktu.....	12
Gambar 2.5. Blok diagram FMCW Radar	14
Gambar 2.6. Sinyal Triangular LFM dan frekuensi beat untuk target stasioner..	16
Gambar 2.7. Sinyal Triangular LFM dan frekuensi beat untuk target bergerak..	16
Gambar 2.8. Ilustrasi FMCW radar untuk target bergerak.....	17
Gambar 2.9. Ilustrasi skema pengukuran Range-Doppler.....	18
Gambar 2.10. Skema teknik Monopulse radar.....	19
Gambar 2.11 Ilustrasi Monopulse perbandingan fasa.....	20
Gambar 2.12 Diagram Blok MFCC (Mel Frequency Cepstrum Coefficient).....	20
Gambar 2.13 <i>Left-right Hidden Markov Model</i>	25
Gambar 2.14 GNU Radio - USRP2 Hardware flow.....	29
Gambar 3.1 Diagram Blok Pemodelan FMCW radar untuk deteksi dan tracking target.....	30
Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem FMCW radar dengan Hidden Markov Model untuk klasifikasi target.....	31
Gambar 3.3 Diagram Blok Pengolahan Sinyal FMCW Doppler radar.....	32
Gambar 3.4 Diagram Blok ekstraksi ciri sinyal beat FMCW dengan FMCC.....	34
Gambar 3.5 Diagram Blok Sistem Klasifikasi Target Menggunakan HMM.....	36

Gambar 3.6 Diagram Blok pengenalan HMM dengan tipe Isolated word.....	37
Gambar 3.7 Desain lokasi daerah radar dan target.....	45
Gambar 3.8 Desain lokasi posisi radar.....	45
Gambar 4.1 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk target pickup truk.....	48
Gambar 4.2 Perbesaran hasil sinyal beat untuk 200 sample pertama.....	49
Gambar 4.3 Perbesaran hasil sinyal beat untuk 0,1 ms.....	49
Gambar 4.4 Perbedaan fasa sinyal beat pada antenna penerima 1 dan 2.....	50
Gambar 4.5 Noise pada sinyal beat target pickup truk.....	51
Gambar 4.6 Sinyal beat dengan noise target pickup truk.....	51
Gambar 4.7 Simulasi sinyal beat setelah filter untuk target pickup truk.....	51
Gambar 4.8 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk target mobil.....	52
Gambar 4.9 Sinyal beat dengan noise target mobil.....	52
Gambar 4.10 Simulasi sinyal beat setelah filter untuk target mobil.....	52
Gambar 4.11 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk target motor.....	53
Gambar 4.12 Sinyal beat dengan noise target motor.....	53
Gambar 4.13 Simulasi sinyal beat setelah filter untuk target motor.....	53
Gambar 4.14 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk target sepeda.....	54
Gambar 4.15 Sinyal beat dengan noise target sepeda.....	54
Gambar 4.16 Simulasi sinyal beat setelah filter untuk target sepeda.....	54
Gambar 4.17 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk target orang.....	55
Gambar 4.18 Perbesaran hasil sinyal beat untuk 200 sample pertama target orang.....	55
Gambar 4.19 Sinyal beat dengan noise target orang.....	56
Gambar 4.20 Simulasi sinyal beat setelah filter untuk target orang.....	56

Gambar 4.21(a) Frekuensi beat dan jarak target pickup truk pada antenna penerima1.....	57
Gambar 4.21(b) Frekuensi beat dan jarak target pickup truk pada antenna penerima2.....	57
Gambar 4.22 Magnitudo frekuensi beat dan jarak target pickup truk pada antenna penerima 1.....	57
Gambar 4.23 Frekuensi beat dan jarak target mobil.....	58
Gambar 4.24 Frekuensi beat dan jarak target motor	58
Gambar 4.25 Frekuensi beat dan jarak target sepeda.....	58
Gambar 4.26 Frekuensi beat dan jarak target orang.....	59
Gambar 4.27 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk lima target.....	59
Gambar 4.28 Perbesaran hasil sinyal beat untuk 200 sample pertama pada lima target.....	60
Gambar 4.29 Sinyal beat dengan noise pada lima target.....	60
Gambar 4.30 Simulasi sinyal beat setelah filter pada lima target.....	60
Gambar4.31 Frekuensi beat dan jarak target pada lima pada antenna penerima 1..	61
Gambar4.32 Frekuensi beat dan jarak target pada lima pada antenna penerima 2..	61
Gambar 4.33Magnitudo frekuensi beat dan jarak lima target pada antenna penerima 2.....	62
Gambar 4.34 Probabilitas deteksi dan SNR sinyal berdasarkan karakteristik target swerling 5, $P_{FA}=10^{-7}$	63
Gambar4.35Probabilitas deteksi target terhadap SNR untuk beberapa nilai P_{FA} ...	64
Gambar4.36 Hasil simulasi matlab posisi target pickup truk berdasarkan jarak-kecepatan.....	66

Gambar 4.37(a) Hasil simulasi matlab posisi target pickup truk berdasarkan jarak-	
sudut (b) Lokasi target pickup truk.....	66
Gambar 4.38 Hasil simulasi matlab posisi target mobil berdasarkan jarak-	
kecepatan.....	67
Gambar 4.39(a) Hasil simulasi matlab posisi target mobil berdasarkan jarak-sudut	
(b) Lokasi target mobil.....	67
Gambar 4.40 Hasil simulasi matlab posisi target motor berdasarkan jarak-	
kecepatan.....	67
Gambar 4.41(a) Hasil simulasi matlab posisi target motor berdasarkan jarak-sudut	
(b) Lokasi target motor.....	68
Gambar 4.42 Hasil simulasi matlab posisi target sepeda berdasarkan jarak-	
kecepatan.....	68
Gambar 4.43(a) Hasil simulasi matlab posisi target sepeda berdasarkan jarak-	
sudut (b) Lokasi target sepeda.....	68
Gambar 4.44 Hasil simulasi matlab posisi target orang berdasarkan jarak-	
kecepatan.....	69
Gambar 4.45(a) Hasil simulasi matlab posisi target orang berdasarkan jarak-sudut	
(b) Lokasi target orang.....	69
Gambar 4.46 Hasil simulasi matlab posisi target berdasarkan jarak-kecepatan...	69
Gambar 4.47 Hasil simulasi matlab posisi target berdasarkan jarak-sudut.....	71
Gambar 4.48 Lokasi posisi lima target dengan RCS berbeda.....	71
Gambar 4.49 Skenario jarak target untuk klasifikasi target.....	77
Gambar 4.50a. Simulasi klasifikasi target “truk”.....	77
Gambar 4.50b. Simulasi klasifikasi target “mobil”.....	78

Gambar 4.50c. Simulasi klasifikasi target “motor”.....	78
Gambar 4.50d. Simulasi klasifikasi target “sepeda” dan “orang”	78
Gambar 4.51 Sinyal beat untuk target “truk”diam.....	80
Gambar 4.52 Spektrum beat dan jarak untuk target “truk”diam.....	80
Gambar 4.53 Magnitudo dari spektrum beat dan jarak untuk target “truk”diam..	80
Gambar 4.54 Klasifikasi target untuk target diam.....	81
Gambar 4.55 Tracking target untuk lima target diam.....	81
Gambar 4.56 Sinyal beat dari GNU radio untuk target 1 (delay 8000).....	78
Gambar 4.57 Frekuensi sinyal beat.....	85
Gambar 4.58 Jarak Target.....	86
Gambar 4.59 Sinyal beat dari lima target.....	87
Gambar 4.60 Spektrum Frekuensi beat dari 5 target.....	88
Gambar 4.61 Jarak target dari 5 target.....	88
Gambar 4.62 Sinyal beat dari GNU radio dan USRP.....	87
Gambar 4.63 Frekuensi sinyal beat.....	88
Gambar 4.64 Deteksi jarak target.....	88
Gambar 4.65 Sinyal beat dari lima target.....	89
Gambar 4.66 Pengujian spektrum frekuensi beat dari 5 target.....	89
Gambar 4.67 Pengujian deteksi jarak target dari 5 target.....	90
Gambar B-1. RCS dan batas jangkauan target “truk”.....	97
Gambar B-2. RCS dan batas jangkauan target “mobil”.....	97
Gambar B-3. RCS dan batas jangkauan target “motor”.....	98
Gambar B-4. RCS dan batas jangkauan target “sepeda”.....	98
Gambar B-5. RCS dan batas jangkauan target “orang”	98

Gambar F-1. Skema pola array antenna linear array	104
Gambar F-2. Skema polar antenna linear array.....	105
Gambar F-3. Jarak elemen antenna linear array.....	105
Gambar I-1. Desain arsitektur sistem radar FMCW berbasis SDR.....	111
Gambar I-2. Skema untuk simulasi pada GNU Radio Companion.....	112
Gambar I-3. Modifikasi skematik untuk simulasi pada GNU Radio lima target.....	114
GambarJ-1.Desain arsitektur sistem radar FMCW implementasi USRP N210...	115
Gambar J-2. Skema rangkaian pengujian sistem USRP di GNU Radio.....	117
Gambar J-3. Modifikasi skema rangkaian pengujian sistem USRP di GNU radio untuk lima target.....	117
Gambar J-4. Pengujian Sistem Radar FMCW pada USRP N210.....	120
Gambar J-5. USRP N210 untuk percobaan di laboratorium.....	121
Gambar J-6. Antena UWB pada percobaan USRP N210.....	121

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter FMCW radar	43
Tabel 3.2 Parameter Lokasi radar dan target.....	44
Tabel 3.3 Parameter model antena radar.....	46
Tabel 3.4 RCS Target Pada Frekuensi radio 3-10 GHz (Skolnik).....	46
Tabel 3.5 Kecepatan model target.....	47
Tabel 4.1. Probabilitas deteksi dan karakteristik gerak target berdasarkan SNR sinyal.....	63
Tabel 4.2 Deteksi target berdasarkan SNR dan frekuensi beat sinyal.....	65
Tabel 4.3 Percobaan tracking target untuk beberapa SNR sinyal.....	72
Tabel 4.4 Resolusi jarak dan angular target.....	73
Tabel 4.5 Model-model target.....	73
Tabel 4.6 Konfigurasi simulasi klasifikasi data radar FMCW.....	76
Tabel 4.7 Hasil perbandingan matrik data latih radar FMCW dengan HMM.....	76
Tabel 4.8 Hasil perbandingan matrik data uji radar FMCW dengan HMM.....	76
Tabel 4.9 Hasil Pengujian klasifikasi target data radar FMCW dengan HMM.....	76
Tabel 4.10 Hasil pengenalan target terhadap target yang dilatih (dimodelkan).....	81
Tabel 4.11 Hasil pengujian target terhadap target yang dilatih (dimodelkan).....	91
Tabel 4.12 Hasil pengujian target terhadap target yang tidak dilatih.....	91
Tabel A-1. Frekuensi Radar.....	96
Tabel A-2. Penamaan Band Frekuensi Radar.....	96
Tabel E-1. Parameter Lokasi radar dan target.....	102

Tabel F-1. Parameter Antena Radar.....	104
Tabel H-1. Hasil Pengujian Data Radar Model Target Terlatih pada SNR 20dB.....	107
Tabel H-2. Hasil Pengujian Data Radar Model Target Tidak Dilatih pada SNR 20dB.....	108
Tabel I-1. Spesifikasi desain radar FMCW berbasis SDR GNU Radio.....	111
Tabel I-2. Parameter pada blok-blok untuk simulasi dengan GNU Radio.....	112
Tabel J-1. Spesifikasi sistem radar FMCW implementasi dengan USRP.....	116
Tabel J-2. Parameter pada blok-blok untuk simulasi dengan GNU Radio.....	118
Tabel J-3. Spesifikasi komputer host.....	120

DAFTAR SINGKATAN

ADC	Analog Digital Converter
CDHMM	Continuous Density Hidden Markov Model
CFAR	Constant False Alarm Rate
CW	Continuous Wave
DCT	Discrete Cosine Transform
FFT	Fast Fourier Transform
FM	Frequency Modulation
FMCW	Frequency Modulation Continuous Wave
FPGA	Field Programmable Gate Array
GUI	Graphical User Interface
HMM	Hidden Markov Model
LFM	Linier Frequency Modulation
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
Matlab	Matrix Laboratory
MFCC	Mel Frequency Cepstrum Coefficients
PDR	Pulsed Doppler Radar
PRF	Pulse Repetition Frequency
RADAR	Radio Detecting and Range
RCS	Radar Cross Section
RF	Radio Frekuensi
SDR	Software Defined Radio

SNR	Signal to Noise Ratio
PSD	Power Spectral Density
USRP	Universal Software Radio Pheriperal
VCO	Voltage Controlled Oscillator
WRF	Waveform Repetition Frequency

DAFTAR SIMBOL

c	kecepatan cahaya (m/s)
τ	waktu sinyal bolak-balik atau delay (detik)
P_r	daya yang diterima (mW)
P_t	daya yang dikirim (mW)
S_{PD}	rapat daya (<i>power density</i>)
G	penguatan antena
r	jarak target ke radar (m)
σ	radar cross section (m^2)
P_{Smin}	daya sinyal minimum
P_{Si}	daya sinyal masuk
R_{max}	jarak maksimum (m)
A_e	apertur efektif
A	apertur fisik
L	rugi-rugi radar
F	<i>noise figure</i>
B	bandwidth (Hz)
T_0	periode pemodulasi
T_s	temperatur noise
k	konstanta Boltzman
P_{Di}	daya sinyal terhambur pada target
P_{Dr}	daya sinyal terhambur pada antena penerima
T	<i>time sweep</i> (ms)
μ	<i>chirp rate</i>
f_o	frekuensi pembawa / frekuensi centre (Hz)
F_1	frekuensi sesaat (Hz)

f_{beat}	frekuensi beat (Hz)
f_{mak}	frekuensi maksimal
s_{tx}	sinyal yang dipancarkan
s_{rx}	sinyal yang dipantulkan
s_{beat}	sinyal beat
λ	panjang gelombang (m)
Δf	deviasi frekuensi puncak
Threshold	batas ambang
v_r	kecepatan relative
f_d	frekuensi doppler
f_m	frekuensi pemodulasi
f'	laju perubahan frekuensi
d	jarak antena penerima 1 dengan penerima 2
θ_{el}	sudut elevasi
ϕ_{az}	sudut azimut
$\Delta\varphi$	perbedaan fasa
N	jumlah <i>state</i>
M	jumlah <i>mixture</i>
R	jarak radar dengan target
$(\text{SNR})_o$	SNR output
$(\text{SNR})_{o,\text{min}}$	SNR output minimum
A_{tx}	amplitudo pemancar
A_{rx}	amplitudo penerima
ΔR	perbedaan jarak antara 2 antena
θ	sudut target terhadap 2 antena penerima

$\theta_{min/mak}$	ukuran sudut maksimum dan minimum untuk membatasi daerah lokalisasi posisi target
a_{ij}	probabilitas transisi dari state i ke state j
$\bar{a}_{ij}$	estimasi probabilitas transisi antar state
$\alpha_t(i)$	variabel forward pada frame ke t dan state ke i
b_{jm}	distribusi gaussian pada mixture ke m dan state ke i
$b_j(O_t)$	distribusi peluang deret observasi dihasilkan oleh state j
$\beta_t(i)$	variabel backward pada frame ke t dan state ke i
$c[n]$	koefisien MFCC yang ke n
C_{jm}	koefisien pembobotan untuk mixture ke m pada state j
$\bar{C}_{jm}$	estimasi koefisien pembobotan untuk mixture ke m pada state j
d	dimensi vektor ciri
λ	model target dengan HMM
$\gamma_t(i)$	peluang berada pada state S_i pada waktu t jika terdapat deret observasi (O) dan model HMM (λ)
$\gamma_t(i, m)$	peluang terjadinya komponen mixture ke m pada state i dan pada waktu t jika terdapat deret observasi O_t
$\bar{\mu}_{jm}$	vektor mean untuk mixture ke m pada state j
O_t	deret observasi pada frame ke t atau vektor ciri pada frame ke t
$n(O_t, \mu_j, \Sigma_j)$	fungsi densitas Gaussian, dengan parameter vektor mean pada state j (μ_j) dan matrik kovarian pada state j (Σ_j) serta deret observasi O_t
$P(O \lambda)$	peluang terjadinya deret observasi O jika terdapat model λ
π_1	peluang state awal
$\bar{\pi}$	estimasi probabilitas state awal
Σ_{jk}	matrik kovarian untuk mixture ke k pada state j

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran-A	Frekuensi Radar.....	96
Lampiran-B	Radar Cross Section.....	97
Lampiran-C	Penurunan Persamaan Radar pada Simulasi Matlab.....	99
Lampiran-C1	Frekuensi Modulasi.....	99
Lampiran-C2	Linear Frequency Modulation	100
Lampiran-D	Probabilitas Deteksi Target.....	101
Lampiran-E	Desaian Lokasi Radar dan Target.....	102
Lampiran-F	Model dan Pola Antena.....	104
Lampiran-G	Filter Radar.....	106
Lampiran-H	Hasil Pengujian Model – Model Target.....	107
Lampiran-I	Simulasi Sistem Radar FMCW dengan GNU Radio.....	111
Lampiran-I1	Pemodelan Simulasi Sistem Radar FMCW dengan GNU Radio.....	111
Lampiran-I2	Percobaan Sistem FMCW untuk Satu Target.....	112
Lampiran-I3	Percobaan Sistem FMCW untuk Lima Target.....	113
Lampiran-J	Implementasi Sistem FMCW Radar dengan USRP.....	115
Lampiran-J1	Perancangan Sistem FMCW Radar dengan USRP.....	115
Lampiran-J2	Percobaan Sistem FMCW untuk Satu Target.....	116
Lampiran-J3	Percobaan Sistem FMCW untuk Lima Target.....	119
Lampiran-J4	Prototipe hardware yang digunakan pada Implementasi Sistem Radar FMCW.....	120

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada prinsipnya teknologi dikembangkan untuk membuat alat atau sarana yang dapat membantu dan memberi kemudahan bagi manusia untuk melakukan kegiatan dalam hidupnya. Seiring dengan perkembangan teknologi, manusia selalu menginginkan peningkatan kualitas dan kepraktisan dari alat-alat tersebut. Misalnya penggunaan radar. Radar dulu hanya untuk kebutuhan militer saja, namun seiring dengan perkembangan teknologi radar dimanfaatkan untuk keperluan sipil.

Radar atau *Radio Detection and Ranging*, merupakan aplikasi yang telah banyak digunakan pada bidang militer, mengukur kecepatan, sebagai pengendali lalu-lintas, dan lain-lain. Teknologi radar diawali dengan teori elektromagnetik modern. Pada tahun 1886, Herzt memaparkan tentang pantulan dari gelombang radio dan pada tahun 1900, Tesla memaparkan tentang konsep dari deteksi elektromagnetik dan pengukuran kecepatan [1]. Kemudian dikembangkan oleh banyak ilmuwan antara lain Marconi, Taylor and Young. Pada tahun 1934 ditemukan *continous wave* (CW) dimanfaatkan untuk sistem radar [1]. Dewasa ini telah dikembangkan teknologi *Digital Signal Processing* (DSP) dan *image processing* untuk mendukung sistem radar [2][3].

Teknologi radar merupakan suatu sistem yang mampu memantau suatu objek dalam jarak dan arah tertentu. Informasi dari target antara lain posisi, kecepatan, arah, dan bentuknya. Teknologi radar selain digunakan sebagai pendukung sistem pertahanan juga dapat dimanfaatkan untuk mengatur sistem lalu lintas baik darat, laut maupun udara. Penggunaan sistem radar pada lalu lintas darat untuk kendaraan bermotor, diperlukan oleh kepolisian yang bertanggung jawab atas lancarnya lalu lintas darat. Salah satu metodenya menggunakan sistem radar doppler yang memanfaatkan efek doppler.

Perkembangan teknologi radar juga dilihat dari cara kerja sistemnya, sistem *pulse doppler* radar diintegrasikan dengan *Hidden Markov Model* untuk klasifikasi target [7][8][10]. *Hidden Markov Model* dikenal dalam aplikasi pengenalan pola seperti *speech recognition*, *sound*, *hardwritting*, *image*, *gesture recognition* dan *bioinformatic* [5]. Baru-baru ini, prosedur Markov berbasis algoritma juga telah berhasil diterapkan dalam pengenalan pola untuk klasifikasi target [7][8].

Hidden Markov Model (HMM) merupakan salah satu model stokastik yang banyak menarik perhatian akhir-akhir ini [7][8]. HMM terdiri atas sebuah sinyal yang dimodelkan sebagai sebuah rantai Markov keadaan terhingga dan sebuah observasi yang dimodelkan. Metode statistik HMM semakin populer pada dekade terakhir ini karena model tersebut kaya akan struktur matematika dan mengandung teori dasar yang bisa digunakan untuk beberapa aplikasi [6]. Pada Markov, state-state yang langsung terlihat sebagai observasi dan probabilitas transisi adalah satu-satunya parameter. Namun dengan HMM hanya variabel yang dipengaruhi oleh state terlihat, sedangkan state sendiri *hidden*. Setiap state yang didefinisikan memiliki distribusi probabilitas atas simbol emisi [9].

Perkembangan teknologi saat ini juga dirasakan dalam dunia radio komunikasi yaitu *Software Defined Radio* (SDR). SDR memiliki arsitektur yang lebih sederhana dibandingkan sistem radio konvensional karena sebagian besar proses modulasi dilakukan dengan software. Salah satu perangkat *open source* dan *open hardware* yang saat ini banyak dipakai untuk merealisasi perangkat radio berbasis SDR adalah GNU Radio dan USRP. Ide penggunaan USRP adalah seluruh pemrosesan gelombang seperti modulasi dan demodulasi, bisa dilakukan di dalam komputer dan semua operasi kecepatan tinggi seperti *digital-up*, *down conversion*, *decimation* dan *interpolation* dapat dikerjakan di dalam *field programmable gate array* (FPGA) [15]. GNU radio merupakan software yang dapat digunakan untuk merancang *software defined radio*. Rancangan pada GNU Radio dapat diimplementasikan ke dalam hardware menggunakan USRP.

Salah satu jenis radar yang dapat diimplementasikan menggunakan SDR adalah radar *Frequency Modulated Continuous Wave* (FMCW) [11]. Radar FMCW umumnya menggunakan modulasi *Linear Frequency Modulated* (LFM) dan memancarkan gelombang dalam seluruh rentang waktu periodiknya, hal ini berbeda dengan radar pulsa yang mengirimkan pulsa-pulsa pendek dalam rentang waktu periodiknya. Sehingga radar FMCW tidak memerlukan daya pancar yang besar untuk mendapatkan nilai SNR yang cukup untuk proses deteksi target [12]. Dari sisi hardware radar FMCW dapat dibangkitkan dengan menggunakan *solid state amplifier* yang berukuran lebih kecil dan jauh lebih murah dibandingkan magnetron yang digunakan untuk membangkitkan radar pulsa. CW-Doppler (*continuous wave*), FMCW dan FH (Frequency Hop) merupakan sistem radar yang berhasil diterapkan untuk mengukur jarak dan kecepatan target bergerak untuk waktu yang sangat lama [13]. Kemampuan radar CW untuk mendeteksi target tergantung pada SNR sinyal beat dan resolusi radar, yaitu kemampuan untuk memisahkan target yang berdekatan dalam jangkauan atau arah Doppler [13].

Kelemahan utama dari pendekatan radar CW, bahwa sistem radar hanya mampu memberikan resolusi dalam satu arah, baik jangkauan atau kecepatan (*doppler*). Pada penelitian Faiza Ali, Martin Vossiek [13] skema pengukuran radar FMCW range-doppler pada dua dimensi (2D), pengolahan *Transformasi Fourier* FMCW radar mampu memberikan resolusi 2D. Teknik pemrosesan sinyal radar FMCW dimanfaatkan untuk mendapatkan frekuensi beat target, dan dengan melakukan proses FFT diperoleh informasi jarak dari target.

Sistem radar FMCW ini diaplikasikan untuk pengawasan lalu lintas darat. Informasi jarak dan kecepatan belum mewakili lokasi posisi target. Pengukuran sudut dari target diperlukan untuk mengetahui posisi target. Salah satu teknik untuk mengetahui sudut target dengan teknik monopulse radar [16]. Konsep *monopulse* radar berhubungan dengan *tracking* target. Metode *monopulse* radar yang dimodelkan dengan perbedaan fasa, dengan menggunakan dua antena penerima [17].

Informasi target diperoleh dari jarak, kecepatan dan sudut. Untuk monitoring lalu lintas kita juga harus mengenali jenis target. Pengenalan jenis atau bentuk target bisa dilakukan dengan teknik klasifikasi. Salah satu teknik klasifikasi target dengan menggunakan metoda HMM. Pada tesis ini, hasil pemodelan sistem radar FMCW dilakukan dengan menggunakan matlab, GNU Radio dan USRP, dilanjutkan pengklasifikasi target dengan metoda HMM.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka perumusan masalah dalam tesis ini adalah :

- Bagaimana menentukan jarak dan kecepatan target dari sistem FMCW radar dengan simulasi matlab.
- Bagaimana merancang sistem radar FMCW dengan *software defined radar* (GNU Radio) dan mengimplementasikannya dengan perangkat keras USRP N210.
- Bagaimana proses klasifikasi target atau pengenalan target dari pengolahan sinyal radar FMCW melalui simulasi matlab, GNU Radio dan diimplementasikan dengan USRP N210.

1.3 Batasan Masalah

Untuk mengarahkan pokok permasalahan dalam penelitian ini, penulis mengambil batasan yang membatasi ruang lingkup pengerjaan tesis ini, yaitu:

1. Pemodelan dan simulasi sistem radar FMCW pada matlab untuk mendeteksi target berdasarkan jarak, kecepatan dan sudut. Sistem bekerja diasumsikan pada frekuensi X-Band (10GHz) dan bandwidth 150 MHz.
2. Pemodelan pada GNU radio dan implementasi dengan USRP N210 dibatasi hanya untuk mendeteksi jarak target dan belum mengukur kecepatan target. Frekuensi kerja pada 20 MHz dan bandwidt 2 MHz.
3. Pengujian sistem dengan menggunakan GNU Radio dan USRP N210 hanya sebatas untuk uji coba FMCW skala laboratorium.

4. Tidak menghitung link budget daya sinyal radar yang dipancarkan.
5. Klasifikasi target dengan Hidden Markov Model dan ekstraksi ciri target berdasarkan cepstral yaitu MFCC.
6. Model target yang diasumsikan ada 5 target yaitu : pickup truk, mobil, motor, sepeda, orang (*man*).

1.4 Tujuan Penelitian

1. Memodelkan dan mensimulasikan sistem radar FMCW sehingga diperoleh lokasi target dengan program Matlab.
2. Mendesain sistem radar FMCW dengan *software defined radar* yaitu GNU radio.
3. Pengujian perangkat lunak GNU Radio ke perangkat keras USRP N210 menjadi radar berbasis FMCW.
4. Mendiskripsikan klasifikasi target berbasis FMCW radar dengan HMM.

1.5 Metode Penelitian

1. Studi literatur dari buku teks, jurnal, thesis, dan website yang terkait dengan radar berbasis FMCW, GNU Radio dan USRP dan penggunaannya.
2. Simulasi sistem radar FMCW menggunakan perangkat lunak Matlab, dan menentukan lokasi target berdasarkan parameter radar.
3. Menguji sistem USRP N210 dan perangkat lunak GNU Radio dengan skala laboratorium
4. Mengolah data yang diterima, menghitung frekuensi beat, jarak target, kecepatan target, sudut target, dan memplot hasil pengujian.

1.6 Manfaat Penelitian

1. Sistem radar yang dimodelkan ini dapat dimanfaatkan untuk keperluan *traffic monitoring* (monitoring lalu lintas darat) yaitu untuk memperkirakan jenis, kecepatan, dan arah pergerakan dari target.
2. Sistem radar yang dimodelkan ini juga dapat mengantisipasi tabrakan. Sistem ini dapat digunakan sebagai peringatan dini bagi pengemudi kendaraan.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tesis ini terdiri dari lima bab dengan perincian sebagai berikut:

Bab I : Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika laporan Tesis.

Bab II: Tinjauan Pustaka

Pada bab ini dijelaskan mengenai teori-teori radar, teknik radar FMCW untuk target stasioner dan bergerak. Selain itu, dijelaskan juga mengenai software GNU radio yang akan digunakan untuk mendesain sistem radar berbasis software dan USRP untuk pengimplementasian hasil desainnya.

Bab III: Metode dan Rancangan Penelitian

Pada bab ini, dijelaskan mengenai tahap-tahap yang dilakukan dalam penelitian. Metode untuk mengerjakan tiap tahap dijelaskan lebih rinci dalam masing-masing sub bab.

Bab IV : Hasil dan Analisis

Bab ini memuat hasil-hasil yang diperoleh pada tiap tahap penelitian. Hasil tersebut kemudian dianalisis dan dibahas lebih lanjut.

Bab V: Kesimpulan

Pada bab ini, dijelaskan mengenai kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan saran-saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

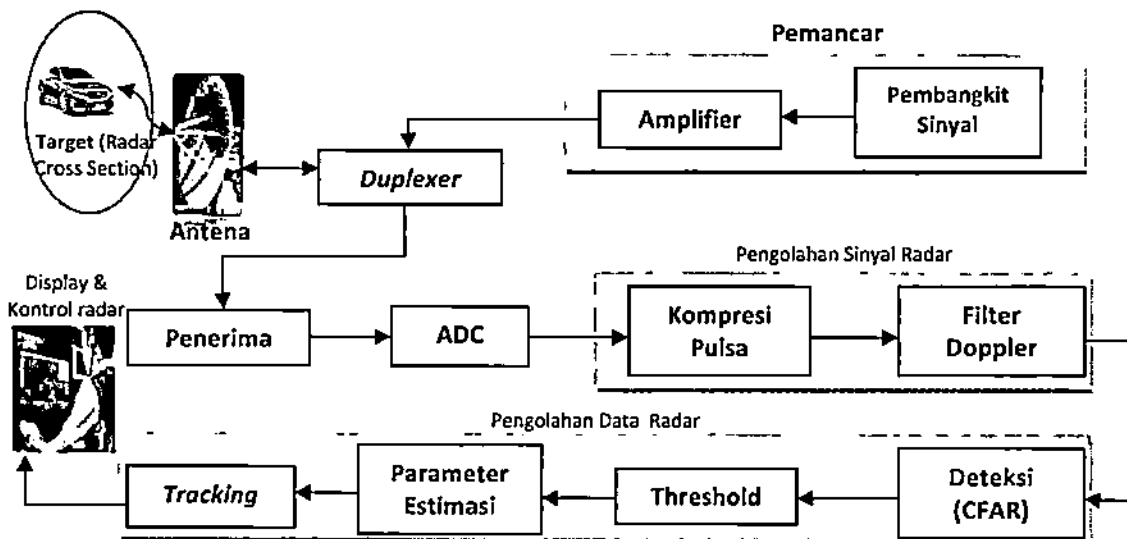
2.1 Pengertian Radar

2.1.1 Dasar Sistem Radar

Radar merupakan singkatan dari *Radio Detection and Ranging*. Radar merupakan suatu sistem yang menggunakan gelombang elektromagnetik untuk mengamati jangkauan, ketinggian, arah atau kecepatan target bergerak maupun diam seperti pesawat terbang, kapal laut, kendaraan bermotor, keadaan cuaca dan lapangan. Adapun prinsip kerjanya adalah : suatu pemancar memancarkan gelombang radio yang direfleksikan oleh target dan dideteksi oleh alat penerima yang biasanya berlokasi ditempat yang sama dengan alat pemancar.

Ada tiga komponen utama yang tersusun di dalam sistem radar, yaitu *transmitter* (pemancar sinyal), *antena*, dan *receiver* (penerima sinyal) [4].

Gambar 2.1 menunjukkan diagram blok radar secara umum.



Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Radar Secara Umum

Sistem radar secara umum terdiri dari :

1. Transmitter

Transmitter tersusun dari pembangkit sinyal (*waveform generator*), *oscillator*, dan *amplifier*. *Oscillator* berfungsi untuk memodulasi sinyal

tersebut dari frekuensi baseband ke frekuensi tertentu. Amplifier berfungsi untuk menguatkan sinyal yang akan ditransmisikan.

2. Antena

Antena merupakan suatu *transformator* gelombang elektromagnetik terbimbing menjadi gelombang elektromagnetik di ruang bebas dan sebaliknya. Fungsi antena pada sistem radar adalah untuk meradiasikan gelombang elektromagnetik, memusatkan daya RF pemancar ke arah tertentu dan menangkap pantulan gelombang tersebut yang berasal dari target yang sedang diamati.

Pada radar, antena yang digunakan adalah antena direktif dengan beamwidth yang sempit, sehingga arah dari target dapat ditentukan. Antena tidak hanya digunakan untuk memusatkan energi ke suatu arah, tapi juga digunakan untuk menentukan resolusi sudut (angular) dari target.

3. Receiver

Receiver terdiri dari *amplifier (Low Noise Amplifier)*, *oscillator*, dan filter. *Oscillator* berfungsi untuk mendemodulasi sinyal yang diterima oleh antena ke frekuensi baseband. *Amplifier* berfungsi untuk memperkuat sinyal yang diterima oleh antena.

4. Pengolahan sinyal

Bagian ini berfungsi untuk menghilangkan sinyal yang tidak diinginkan dan mengambil sinyal yang dibutuhkan. Contoh bagian pengolahan sinyal adalah *matched filter*. Selain itu, bagian ini juga berfungsi untuk mengkompresi pulsa yang diterima.

5. Bagian pengolahan data

Bagian ini berfungsi untuk mengolah sinyal yang diterima menjadi suatu informasi yang dibutuhkan. Salah satu contohnya adalah *target recognition*.

2.1.2 Persamaan Radar

Persamaan radar menjelaskan parameter-parameter sistem radar [2][3]. Jika daya dari pemancar radar P_t , dan radar ditinjau dengan antena *isotropic*, maka kerapatan daya pada jarak m dari radar sama dengan daya pancar dibagi luas permukaan $4\pi R^2$ seperti persamaan berikut:

$$S_{PD} = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (2.1)$$

Radar menggunakan antena untuk mengarahkan daya yang dipancarkan ke arah tertentu. Antena berarah (*directional*) dengan gain G dan *apertur efektif* A_e , akan berhubungan dengan panjang gelombang λ sebagai berikut,

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (2.2)$$

Apertur efektif A_e dihubungkan dengan apertur fisik A sebagai berikut, .

$$A_e = \rho A \quad ; 0 \leq \rho \leq 1$$

Jika diasumsikan sistem radar memiliki antena yang baik dimana $\rho \rightarrow 1$, maka $A_e = A$. Sehingga rapat daya pada jarak R untuk radar dengan antena berarah menjadi :

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

Saat gelombang radar mengenai target, terjadilah arus permukaan sehingga target memancarkan kembali gelombang tersebut ke segala arah. Energi radiasi sebanding dengan parameter *Radar Cross Section* (RCS) σ . Maka daya terima yang disalurkan ke pengolah sinyal menjadi :

$$P_r = \frac{P_t G \sigma}{(4\pi R^2)^2} A_e \quad (2.4)$$

Substitusi A_e , sehingga daya terima radar yang dihasilkan sebagai berikut:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.5)$$

Jarak maksimum $R_{\max}$ adalah jarak terjauh target yang masih bisa dideteksi radar. Kondisi itu terjadi ketika daya sinyal echo P_r sama dengan daya sinyal minimum yang masih bisa dideteksi.

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{S_{\min}}} \right]^{1/4} \quad (2.6)$$

Sinyal pada sistem penerima mengandung informasi dan derau. Daya derau sebanding dengan lebar pita dan *Power Spectral Density* (PSD). Daya sinyal masukan S_i menjadi :

$$P_{Si} = k \cdot T_s \cdot B \cdot F \cdot (SNR)_0 \quad (2.7)$$

Sehingga daya sinyal minimum yang bisa dideteksi yaitu :

$$P_{Smin} = k \cdot T_s \cdot B \cdot F \cdot (SNR)_{o,min} \quad (2.8)$$

Ambang batas deteksi radar dibuat sama dengan SNR minimum $(SNR)_{o,min}$. Maka, diperoleh jangkauan maksimum sebagai berikut:

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_s B F (SNR)_{o,min}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.9)$$

Pada umumnya, terdapat rugi-rugi radar L yang mengurangi SNR total, sehingga :

$$(SNR)_{o,min} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_s B \cdot F \cdot L \cdot R^4_{max}} \quad (2.10)$$

2.1.3 Radar Cross Section

Gelombang elektromagnetik dalam berbagai jenis polarisasi secara normal akan terdifraksi atau menghambur ke segala arah jika mengenai sesuatu target yang memiliki koefisien pantul tertentu. Intensitas dari energi gelombang hamburan yang mempunyai polarisasi yang sama dengan polarisasi antenna penerima radar inilah yang disebut dengan target RCS (*Radar Cross Section*). Singkatnya *radar cross section* adalah perbandingan daya sinyal datang dengan daya sinyal yang terhamburkan, dan berfungsi sebagai pendeteksi kepadatan. RCS berfluktuasi tergantung pada aspek frekuensi, sudut dan polarisasi medan RF tersebut.

Jika diasumsikan rapat daya gelombang elektromagnetik pada target yang terletak pada jarak R dari radar yaitu P_{Di} , maka daya pantul dari target yaitu :

$$P_r = \sigma P_{Di} \quad (2.11)$$

dimana σ adalah Radar Cross Section. P_{Dr} yaitu rapat daya gelombang terhambur pada antenna penerima, sehingga ;

$$P_{Dr} = \frac{P_r}{4\pi R^2} \quad (2.12)$$

Persamaan 2.11 dan 2.12 disubstitusi sehingga persamaan RCS :

$$\sigma = 4\pi R^2 \left(\frac{P_{Dr}}{P_{Di}} \right) \quad (2.13)$$

Radar antenna penerima berada dalam medan jauh, sehingga rapat daya gelombang hambur pada target oleh antenna penerima memiliki persamaan RCS yaitu :

$$\sigma = 4\pi R^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \left(\frac{P_{Dr}}{P_{Di}} \right) \quad (2.14)$$

dimana R yaitu jarak antara radar dengan target, P_{Dr} yaitu rapat daya gelombang terhambur pada antenna penerima dan P_{Di} yaitu rapat daya gelombang elektromagnetik target.

2.2. Continuous Wave Radar

Radar dimana output pemancarnya tidak diinterupsi, kebalikan dari radar pulsa dimana outputnya terdiri dari pulsa-pulsa yang sempit, disebut Continuous Wave radar (CW radar). CW radar mentransmisikan suatu sinyal frekuensi tinggi secara terus-menerus [22]. Radar penerima tidak perlu dipasang pada tempat yang sama dengan radar pemancar (*bistatic radar*). Keunggulan dari CW radar adalah kemampuannya mengukur kecepatan dengan ketelitian tinggi berdasarkan prinsip doppler shift pada frekuensi sinyal yang dikembalikan oleh target. CW radar mendeteksi pergeseran frekuensi gelombang yang dipantulkan dengan nilai sebagai fungsi dari kecepatan relatif antara target dengan pemancar dan penerima. Data jangkauan diambil dari perubahan frekuensi doppler terhadap waktu.

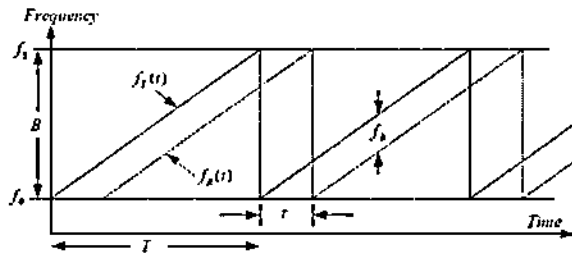
Apabila frekuensi CW radar berubah terus menerus terhadap waktu, frekuensi dari sinyal echo akan berbeda dengan frekuensi yang dipancarkan dan perbedaannya proporsional terhadap jarak jangkauan target. Dalam Frequency Modulated Continuous Wave radar, frekuensi biasanya berubah secara linear, sehingga terjadi naik turun frekuensi secara bergantian [1][2].

2.3. Frequency Modulated Continuous Wave Radar

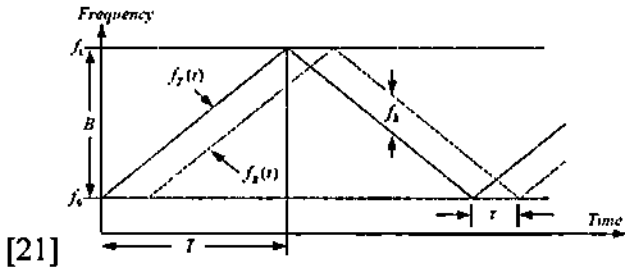
Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Radar adalah suatu metode radar yang menggunakan modulasi frekuensi secara linier dan kontinu. FMCW radar memanfaatkan frekuensi *beat* untuk mencari

jarak target ke radar. Sistem pemancar radar FMCW memancarkan gelombang kontinu dengan modulasi frekuensi pada sebuah rentang bandwidth (B) dengan frekuensi pemodulasi tertentu. Sinyal pemodulasi umumnya berbentuk gelombang *triangular*, *sawtooth* atau *sinusoidal* [19].

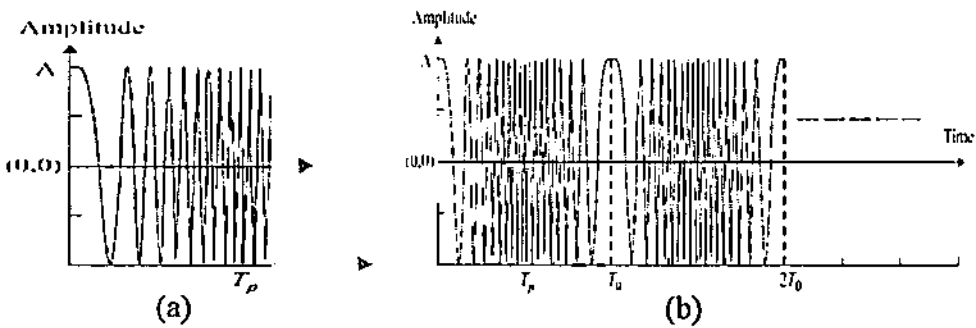
Radar Linear Frequency Modulation (LFM) atau Linear FMCW dengan sinyal pemodulasi bentuk gigi gergaji (*sawtooth*), dikenal dengan sinyal *up-chirp*. Sedangkan triangular LFM menggunakan dua sinyal chirp yaitu *up-chirp* dan *down-chirp*. Frekuensi sinyal *up-chirp* dan sinyal *triangular* LFM dapat dilihat pada gambar 2.2 dan 2.3 dan bentuk sinyalnya gambar 2.4.



Gambar 2.2 Frekuensi sinyal *up-chirp* LFM (*sawtooth*)



Gambar 2.3 Frekuensi sinyal triangular LFM [21]



Gambar 2.4 (a) Sinyal *up-chirp* LFM (b) Sinyal *triangular* LFM dalam domain waktu [21]

Sinyal up-chirp atau down-chirp adalah sinyal dengan frekuensi yang naik/turun linear terhadap waktu (*chirp*). Persamaan sinyal yang dipancarkan (transmisi) yaitu:

$$s_{tx}(t) = A_{tx} \cdot \cos(\phi_{tx}(t)) \quad (2.15a)$$

$$s_{tx}(t) = A_{tx} \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \pi \cdot \mu \cdot t^2) \quad (2.15b)$$

dimana A_{tx} merupakan amplitudo chirp yang dipancarkan, f_0 merupakan frekuensi pembawa (frekuensi kerja), ϕ_{tx} merupakan fasa sinyal transmisi dan μ merupakan laju perubahan frekuensi (*chirp rate*). Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2, 2.3 dan 2.4, frekuensi gelombang yang dipancarkan akan berubah secara linear terhadap waktu dengan laju perubahan tetap, yang dinyatakan dengan *chirp rate*. *Chirp rate* dapat didefinisikan sebagai :

$$\mu = \frac{(f_1 - f_0)}{T_{sweep}} = \frac{B}{T} \quad (2.16)$$

dimana bandwidth (B) merupakan selisih antara frekuensi gelombang terendah (f_0) dan frekuensi gelombang tertinggi (f_1). Time Sweep (T) merupakan periode sinyal chirp. *Time sweep* disebut juga waktu yang diperlukan untuk melakukan satu siklus perulangan perubahan frekuensi pada seluruh rentang bandwidth. Ini untuk pemodulasi sawtooth. Sedangkan untuk pemodulasi *triangular* T_0 .

$$T = \frac{1}{WRF} = \frac{1}{fm} \quad (2.17)$$

Hubungan T dengan T_0 yaitu:

$$T_0 = 2T$$

Sehingga *Waveform Repetition Frequency (WRF)* atau frekuensi pemodulasi pada pemodulasi *triangular*:

$$WRF = fm = \frac{1}{2T_0} \quad (2.18)$$

Frekuensi sesaat dari gelombang yang dikirimkan tersebut dapat dinyatakan sebagai turunan pertama dari elemen fasa :

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2\pi} (2\pi f_0 + 2\pi \mu t) = f_0 + \mu t \quad (2.19)$$

dan frekuensi tertinggi dari gelombang yang dipancarkan dinyatakan sebagai :

$$f_{mak} = f_0 + \mu T \quad (2.20)$$

Ketika gelombang yang dipancarkan radar tersebut diradiasikan ke sebuah medium dan menumbuk target, maka target akan memantulkan sebagian gelombang tersebut kembali ke radar. Gelombang pantul yang dihasilkan merupakan replika gelombang pancar yang mengalami pelemahan dan penundaan waktu. Dalam domain waktu gelombang pantul tersebut dapat dinyatakan sebagai :

$$s_{rx}(t) = A_{rx} \cdot \cos(\phi_{rx}(t)) \quad (2.21)$$

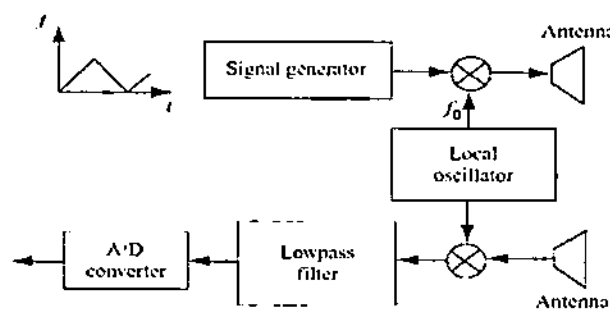
$$s_{rx}(t) = A_{rx} \cdot s_{tx}(t - \tau) = A_{rx} \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot (t - \tau) + \pi \cdot \mu \cdot (t - \tau)^2) \quad (2.22)$$

Berdasarkan persamaan 2.22 diatas, gelombang pantul ini pada dasarnya sama dengan gelombang pancar yang tertunda sebesar τ . Waktu tunda disini merupakan waktu yang diperlukan gelombang untuk merambat ke sebuah target dan kembali lagi ke radar. Jadi Δt merupakan waktu yang diperlukan untuk merambat bolak-balik ke target .

$$\Delta t = \tau(t) = \frac{2}{c} \cdot R = \tau \quad (2.23)$$

dimana R adalah jarak antara radar dengan target dan c adalah cepat rambat gelombang di udara.

Pada gambar 2.5, gelombang pantul yang diterima oleh antenna penerima selanjutnya akan dicampur atau dikalikan dengan sinyal yang dipancarkan. Pencampuran ini dilakukan oleh mixer yang akan menghasilkan komponen penjumlahan dan pengurangan frekuensi antara kedua gelombang. Perbedaan frekuensi antara kedua gelombang tersebut disebut sebagai sinyal beat yang nilainya sebanding dengan jarak target pemantul dengan radar.



Gambar 2.5 Blok diagram FMCW Radar [3]

Untuk mendapatkan elemen pengurangan (*low-order*) pada frekuensi beat, elemen penjumlahan (*high-order*) dihilangkan dengan menambahkan low pass filter (LPF). Sehingga gelombang beat yang dihasilkan setelah filtering akan memiliki persamaan :

$$s_m(t) = s_{tx}(t) \times s_{rx}(t) = \frac{1}{2} \cos(\phi_{tx} + \phi_{rx}) + \frac{1}{2} \cos(\phi_{tx} - \phi_{rx}) \quad (2.24)$$

$$s_{beat}(t) = A_{beat} \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot \tau + 2\pi \cdot \mu \cdot \tau t - \pi \cdot k t^2) \quad (2.25)$$

Jadi diperoleh persamaan frekuensi beat yang diperoleh dari turunan pertama fasa sinyal beat, yaitu:

$$f_{beat} = \frac{1}{2\pi} \frac{d(2\pi f_0 \tau + 2\pi \mu \tau t - \pi k t^2)}{dt} = \mu \cdot \tau = \frac{B}{T_{sweep}} \cdot \tau = \frac{2 \cdot R \cdot B}{c \cdot T} \quad (2.26)$$

Sehingga jangkauan R diperoleh dari f_{beat} yaitu,

$$R = \frac{T \cdot c}{2 \cdot B} \cdot f_{beat} \quad (2.27)$$

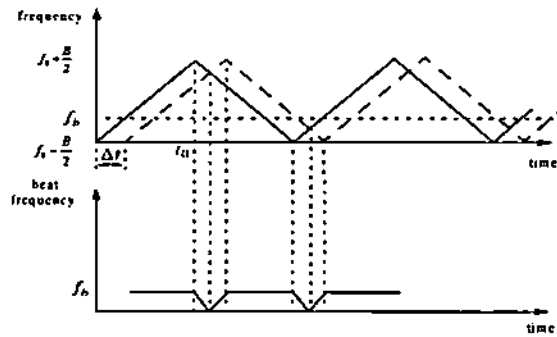
Dengan melakukan proses FFT untuk merubah sinyal beat dalam domain waktu ke dalam domain frekuensi kita akan mendapatkan puncak frekuensi beat pada spektrum frekuensinya. Frekuensi ini dapat dengan mudah diterjemahkan ke dalam nilai jarak dengan persamaan yang telah dijelaskan sebelumnya.

2.3.1. Pengolahan Sinyal Triangular FMCW radar

Ada dua kasus dalam pengolahan sinyal radar FMCW. Pertama, ketika tidak ada pergeseran doppler dalam sinyal, frekuensi beat adalah ukuran dari jangkauan target $f_b = f_r$. f_r adalah frekuensi beat, karena hanya jangkauan target. Jika kemiringan perubahan frekuensi dari sinyal yang ditransmisikan adalah f' maka;

$$f_b = \Delta t \cdot f' = \frac{2R}{c} \cdot f' \quad (2.28)$$

Ketika sinyal pemodulasi *triangular* seperti gambar 2.6 bagian atas, maka frekuensi beat yang dihasilkan ditunjukkan pada gambar 2.6 bagian bawah.



Gambar 2.6 Sinyal Triangular LFM dan frekuensi beat untuk target stasioner [2]

Biasanya dipilih frekuensi pemodulasi sebesar f_m sehingga $f_m = 1/2t_0$, sedangkan laju perubahan frekuensi f' dengan deviasi frekuensi puncak Δf :

$$f' = \frac{B}{t_0} = \frac{B}{1/2f_m} = 2f_mB \quad (2.29)$$

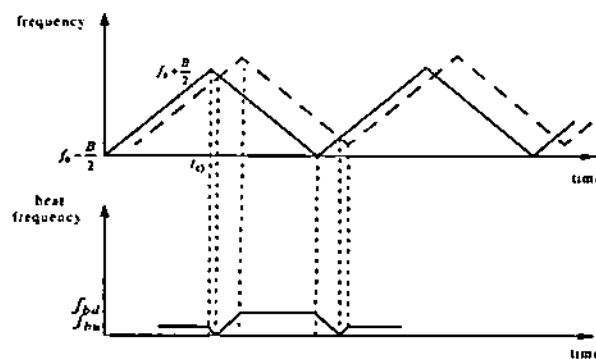
Sehingga frekuensi beat yang dihasilkan:

$$f_b = B.f' = \frac{4Rf_mB}{c} \quad (2.30)$$

Dan jarak target R dihitung dari frekuensi beat dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R = \frac{f_b c}{4f_mB} \quad (2.31)$$

Kedua jika target bergerak, akan ada pergeseran frekuensi doppler ditumpangkan ke frekuensi beat dan harus dipertimbangkan dalam demodulasi. Sketsa sinyal pemancar dan penerima jika target bergerak seperti gambar 2.7.



Gambar 2.7 Sinyal Triangular LFM dan frekuensi beat untuk target bergerak [2]

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2.7, frekuensi beat meningkat oleh pergeseran doppler, sementara di bagian lain berkurang dengan jumlah yang sama.

$$f_{\text{beat}} = f_{\text{terima}} - f_{\text{ kirim}}$$

Jika target bergerak, frekuensi *beat* akan terdiri dari pergeseran frekuensi karena delay jarak Δt dan juga karena pergeseran doppler. Saat kemiringan positif, efek doppler akan mengurangi frekuensi beat yaitu f_{bu} . Sedangkan saat kemiringan negatif, efek doppler akan menambah frekuensi beat yaitu f_{bd} .

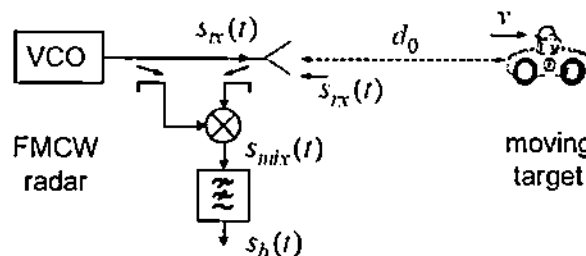
2.4. FMCW Doppler Radar

Estimasi jarak dan kecepatan relatif menggunakan frekuensi doppler radar FMCW. Jika antenna merasakan adanya target bergerak dengan kecepatan relatif terhadap radar v_r , pergeseran frekuensi terhadap sinyal terima dari pemancar disebut frekuensi doppler (f_d). Perhitungan kecepatan relatif berdasarkan frekuensi doppler berdasarkan persamaan berikut [17]:

$$f_d = \pm \frac{2 \cdot v_r}{\lambda} = \pm \frac{2 \cdot v_r \cdot f_0}{c} \quad (2.32)$$

Untuk target yang bergerak, persamaan sinyal FMCW telah dijelaskan, sehingga didapatkan informasi tentang jangkauan jarak dan kecepatan. Ilustrasi target bergerak berdasarkan gambar 2.8 dengan kecepatan relatif v_r , sehingga nilai perubahan fungsi waktu antara radar dan target yaitu[13]:

$$\tau_d(t) = \tau + 2 \cdot \frac{v}{c} \cdot t \quad (2.33)$$



Gambar 2.8 Ilustrasi FMCW radar untuk target bergerak[13]

Persamaan sinyal pemancar dan sinyal penerima sama dengan kondisi target stasioner, dimana sinyal pemancar dan penerima mengalami delay perubahan fungsi waktu seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

$$s_{rx}(t) = A_{rx} \cdot s_{tx}(t - \tau(t)) \quad (2.34)$$

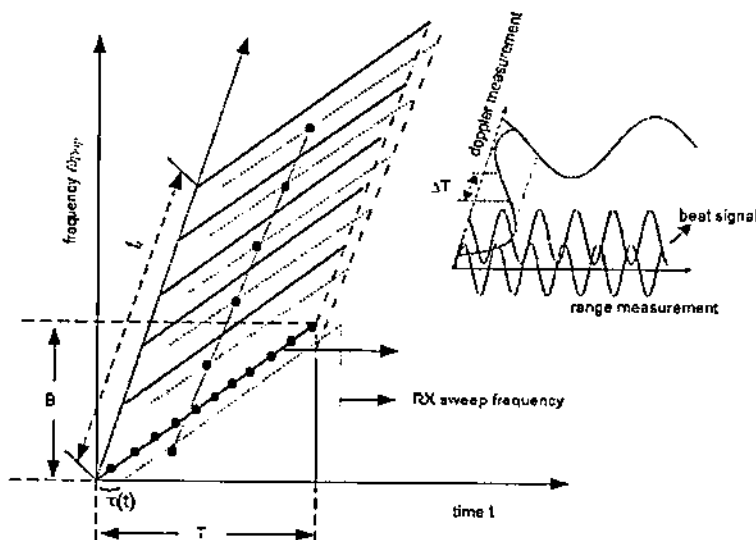
Perhitungan sinyal beat seperti yang telah dijelaskan, yaitu mengalikan sinyal pemancar dengan sinyal refleksi (pantulan) dalam mixer dan difilter dengan LPF, sehingga diperoleh persamaan sinyal beat;

$$s_{beat}(t) = A_b \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot \tau + \mu \cdot \tau \cdot t + 2 \cdot \frac{\omega_0}{c} \cdot v \cdot t\right) \quad (2.35)$$

dimana ω_0 adalah frekuensi sweep awal pemodulasi (frekuensi carrier kurang defiasi frekuensi Δf).

Sinyal beat dikirim berulang-ulang sebesar I (jumlah chirp yang digunakan). Periode waktu pengukuran ΔT , dalam gambar 2.9 ditampilkan ilustrasi skema pengukuran *range-doppler*. Waktu ketika pengukuran dengan indeks i adalah:

$$t_i = i \cdot \Delta T, \text{ dengan } i = 0, 1, 2, 3, \dots, I-1$$



Gambar 2.9 Ilustrasi skema pengukuran *range-doppler* [13]

Fungsi perubahan waktu antara radar dan target sebanyak I (*chirp*) periodik dapat didefinisikan sebagai :

$$\tau_d(t_i) = \tau + 2 \cdot \frac{v}{c} \cdot t_i \quad (2.36)$$

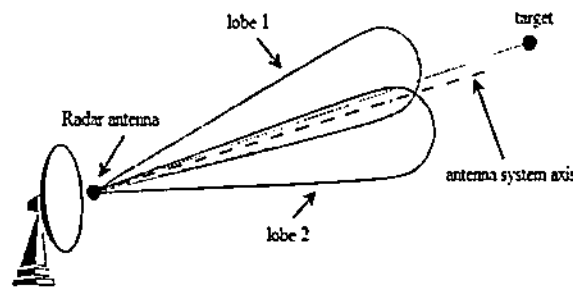
Berdasarkan persamaan 2.36 diatas, untuk sinyal beat 2D didefinisikan sebagai berikut[13][17]:

$$s_b(t, t_i) = A_b \cdot e^{j(\omega_{c0} \cdot \tau_0 + \frac{2 \cdot \omega_{c0} \cdot v}{c} \cdot t_i + \mu \cdot \tau_0 \cdot t + \mu \cdot \frac{2 \cdot v}{c} \cdot t \cdot t_i)} \quad (2.37)$$

dimana v merupakan kecepatan relatif target, τ_0 merupakan delay target diam.

2.5. Teknik Monopulse Radar

Teknik *Monopulse* dikenal sebagai perbandingan *lobus simultan* mengacu pada kemampuan untuk mendapatkan informasi kesalahan sudut pada sebuah pulsa tunggal dengan membandingkan sinyal echo diterima secara bersamaan dengan dua antenna atau lebih seperti gambar 2.10.

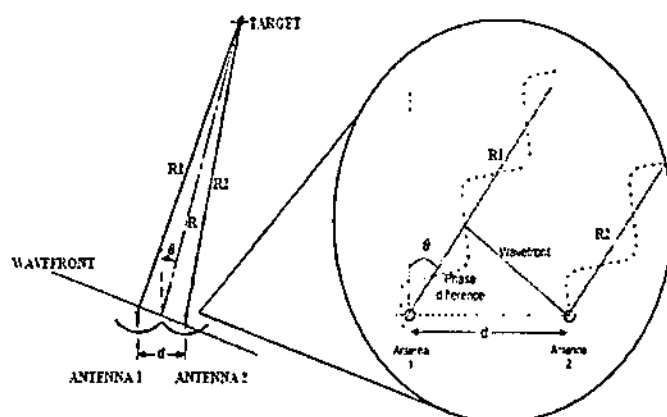


Gambar 2.10 Skema teknik Monopulse radar [16]

Konsep radar *monopulse* mengarah pada *tracking* radar [2]. *Tracking* sudut yang dikenal yaitu metode *lobus switching* dan *scanning* kerucut, pada *lobus switching* mirip dengan perbandingan amplitudo *monopulse*. Metode *monopulse* didasarkan pada informasi dari masing-masing antenna penerima. Salah satunya adalah berdasarkan perbandingan amplitudo dari sinyal, dan selisih fasa.

- **Metode Monopulse perbandingan fasa**

Metode analisis dan formula yang digunakan untuk menggambarkan cara dimana parameter sudut dapat diperkirakan dengan membandingkan fase dari sinyal echo terdeteksi di beberapa antenna penerima dengan teknik monopulse seperti gambar 2.11.



Gambar 2.11 Ilustrasi Monopulse perbandingan fasa[17]

Teknik *monopulse* yang digunakan pada penelitian ini menggunakan dua antenna penerima dengan pemisahan yang sangat kecil yang sejajar satu sama lainnya. Pemisahan kedua antenna penerima ini mendeteksi nilai jarak yang sama untuk masing-masing target, tetapi sebenarnya ada perbedaan yang sangat kecil dalam jangkauan terdeteksi untuk setiap antenna, sebagaimana dapat kita lihat pada gambar diatas, dan sesuai dengan persamaan berikut[17]:

$$R_1 = R + \frac{d}{2} \sin \theta \quad (2.38a)$$

$$R_2 = R - \frac{d}{2} \sin \theta \quad (2.38b)$$

Berdasarkan persamaan 2.38 diatas bahwa salah satu antenna menerima refleksi sinyal dengan waktu penundaan dari antenna yang lainnya, dimana R_1 sesuai dengan jarak antara target dan antenna satu dan R_2 antara target dan antenna dua, sehingga sinyal yang terdeteksi dari satu antenna mengalami perjalanan jarak yang lebih dari yang lain, dan perbedaan jarak dapat dihitung sebagai berikut:

$$\Delta R = R_1 - R_2 = d \cdot \sin \theta \quad (2.39)$$

dimana d pemisahan antenna (m) dan adalah θ sudut yang diinginkan. Jarak ΔR dapat dinyatakan sebagai sebagian kecil dari panjang gelombang λ radar untuk memberikan perbedaan dalam fasa (dinyatakan dalam radian) antara dua sinyal sebagai:

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta R = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \sin \theta \quad (2.40)$$

Berdasarkan pergeseran fasa antara dua sinyal antenna, sehingga sudut θ yaitu [2]:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{d}\right) = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (2.41)$$

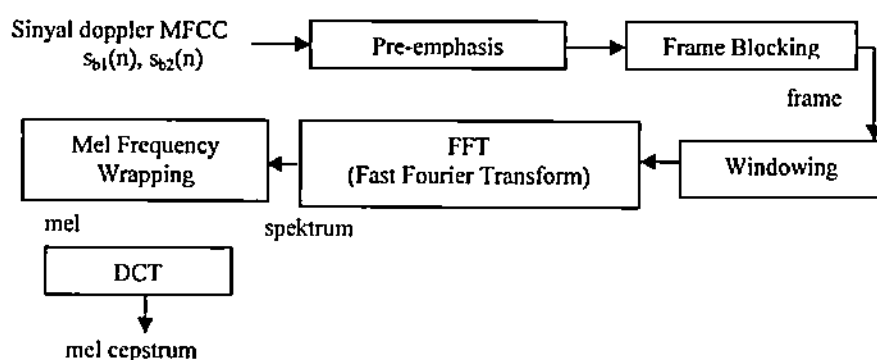
Sedangkan ukuran sudut maksimum dan minimum untuk membatasi daerah lokasi posisi target didefinisikan sebagai berikut :

$$\theta_{\max/\min} = \pm \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right) \quad (2.42)$$

2.6. Ekstraksi Parameter

Ekstraksi parameter/ciri atau ekstraksi fitur merupakan suatu proses untuk mendapatkan parameter sinyal yang diinginkan. Proses ekstraksi parameter menggunakan teknik spektral mirip dengan speech processing, yaitu *Mel Frequency Cepstrum Coefficient* (MFCC). MFCC bekerja berdasarkan prinsip sistem pendengaran manusia dalam skala mel, sehingga karakteristik parameter sinyal input yang dipilih sesuai dengan parameter yang diinginkan. Proses ini didasarkan langsung pada radar kompleks sinyal doppler. Data jangkauan diambil dari perubahan frekuensi doppler terhadap waktu, karena kecepatan yang berbeda dari target bergerak. Proses MFCC disesuaikan dengan sinyal radar kompleks [7].

Dari metode ini didapatkan parameter yang mewakili karakteristik sinyal radar doppler. Adapun tahapan yang dilalui untuk mendapatkan suatu *cepstrum mel* adalah sebagai berikut : *Frame blocking*, *Pre-emphasis*, *Windowing*, *Fast Fourier Transform (FFT)*, *Mel Frequency Wrapping* dan *Cepstrum*. Untuk lebih jelaskan pada gambar 2.12 diagram blok MFCC [7][9][10].



Gambar 2.12 Diagram blok *Mel Frequency Cepstrum Coefficient*

Pengembalian sinyal radar beberapa ratus milidetik menggunakan Hamming window untuk menciptakan sinyal persegmen mewakili kuasi-stasioner dari sinyal radar doppler [10]. Sedangkan *Fast Fourier Transform* mengubah masing-masing frame N sampel dari domain waktu menjadi domain frekuensi. FFT menguraikan sinyal kedalam suatu fungsi eksponensial pada frekuensi. Salah satu pendekatan untuk mensimulasikan spektrum adalah dengan menggunakan *filter bank*. *Filter bank* merupakan suatu rangkaian filter-filter yang memiliki frekuensi yang berbeda. Perhitungan nilai MFCC menggunakan satu filter untuk tiap-tiap komponen frekuensi mel yang diinginkan. *Filter bank* ini digunakan dalam domain frekuensi. *Filter bank* yang digunakan untuk menghitung MFCC adalah filter bank berbentuk segitiga dengan frekuensi bagian yang berbeda untuk mensimulasikan spektrum tersebut [9]. Langkah selanjutnya yaitu mendapatkan nilai *cepstrum* dengan mengubah nilai frekuensi mel menjadi domain waktu. Hasil ini disebut *Mel Frequency Cepstrum Coefficient*. Sebagai hasil dari metode di atas kita mencapai urutan fitur vektor MFCC yang mewakili sinyal radar doppler [19].

2.7. Hidden Markov Model

Model Markov telah banyak diaplikasikan pada pemodelan radar [7]. Terdapat tiga model Markov yaitu *Markov Multi-state*, *Model Hidden Markov* dan *Model Markov Non stasioner*. Umumnya metoda markov yang tepat untuk digunakan pada penelitian ini adalah Hidden Markov Model (HMM). HMM dapat digunakan untuk memecahkan dalam persoalan klasifikasi target, deteksi target, dan deteksi clutter serta noise [7][8][23-28].

Hidden Markov Model merupakan pengembangan dari *observable* Markov Model. HMM merupakan suatu rantai Markov dimana setiap state akan membentuk observasi. Disini deret observasi diketahui untuk menduga deretan state yang tersembunyi. Sebagai contoh, state yang tersembunyi tersebut bisa saja merupakan sebuah jarak target, dan observasi merupakan suatu sinyal echo radar doppler [7-10].

HMM didefinisikan sebagai kumpulan lima parameter (N, M, A, B, π). Jika dianggap $\lambda = \{A, B, \pi\}$ maka HMM mempunyai parameter tertentu N dan M . Ciri-ciri HMM adalah observasi diketahui tetapi urutan keadaan (*state*) tidak diketahui sehingga disebut *hidden*, observasi adalah fungsi probabilitas keadaan dan perpindahan keadaan adalah dalam bentuk probabilitas [5][7][26].

- **Hidden Markov Model memiliki 5 parameter yaitu [5][7][26]:**

1. N adalah jumlah state pada model. Tiap state diberi nama $\{1, 2, 3, \dots, N\}$ dan tiap state pada saat t disimbolkan q_t .
2. M adalah jumlah dari simbol observasi per state. Jumlah simbol observasi yang berbeda tiap state yang dilambangkan dengan $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_M\}$.
3. Matrik probabilitas transisi antar state adalah ($A = a_{ij}$), dimana $a_{ij} = P[q_{t+1} = j \mid q_t = i]$, $1 \leq i, j \leq N$
4. Distribusi probabilitas *symbol observation* pada sebuah state yaitu $B = \{b_j(k)\}$, dimana $b_j(k) = P[O_t = V_k \mid q_t = j]$, $1 \leq k \leq M$ *symbol distribution in state j* , $j = 1, 2, 3, \dots, N$
5. Probabilitas state awal, $\pi = \{\pi_i\}$ dimana $\pi_i = P(q_1 = S_i)$ $1 \leq i \leq N$

Prinsip dasar HMM adalah bahwa sinyal (deret observasi) dapat dimodelkan dengan baik jika parameter-parameter pemodelan tersebut dapat dipilih dengan benar dan hati-hati.

- **Distribusi Observasi Hidden Markov Model**

Distribusi probabilitas output ($b_j(O_t)$) dapat diparameterisasi dengan beberapa cara. Distribusi tersebut bisa berbentuk diskrit atau kontinu. Pemilihan antara distribusi diskrit dan kontinu tergantung pada beberapa faktor yaitu [5] :

- 1) Distribusi kontinu memberikan keakuratan pemodelan yang lebih baik.
- 2) Distribusi diskrit diestimasi dengan menggunakan beberapa bentuk vektor kuantisasi. Jadi disini *vector quantizer* merupakan komponen penting.

- 3) Perhitungan probabilitas untuk distribusi diskrit lebih sederhana sedangkan distribusi kontinu membutuhkan sejumlah perhitungan yang cukup penting.

Pada penelitian yang telah dilakukan G. Kouemon, mencoba membandingkan 3 jenis metode HMM yaitu CHMM (*continuous*), DHMM (*diskrit*) dan SCHMM (*semi-continuous*) untuk mengklasifikasikan radar target doppler [7].

Pada kasus observasi yang berbentuk kontinu maka bentuk yang paling umum dari *probability density* yang digunakan dalam pengenalan sinyal radar (yang bersumber dari suara / bunyi target) adalah *Gaussian probability density function* (Gaussian Pdf) [9]. Bentuk yang paling umum dari distribusi output adalah *Multivariate Gaussian density function*. Parameter vektor ciri sinyal radar Doppler merepresentasikan model sinyal target (dari suara maupun getaran) [9-10]. Beberapa data tidak dapat dimodelkan dengan single gaussian distribusi. Oleh karena itu digunakan Mixture gaussian untuk menangani keragaman yang ditunjukkan oleh kebanyakan parameter. Distribusi probabilitas output dapat dinyatakan sebagai mixture gaussian berdasarkan persamaan yaitu:

$$b_j(O_i) = \sum_{m=1}^M c_{jm} b_{jm}(O_i) \quad (2.43)$$

dimana O adalah vektor parameter yang akan dimodelkan. M adalah jumlah densitas komponen dalam mixture, c_{jm} adalah koefisien mixture untuk mixture ke m pada state j . $b_{jm}(O_i)$ adalah multivariate gaussian density function[5-6]:

$$N(O_i, \mu_j, \Sigma_j) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |\Sigma_j|^{1/2}} e^{-1/2(O_i - \mu_j)^T \Sigma_j^{-1} (O_i - \mu_j)} \quad (2.44)$$

Multivariate gaussian memodelkan setiap dimensi vektor ciri sebagai sebuah distribusi normal. Distribusi peluang observasi tidak dapat dimodelkan hanya dengan satu *multivariate gaussian*, tetapi dengan campuran (*mixture*) beberapa *multivariate gaussian*. Pemodelan ini disebut

dengan *Gaussian Mixture Model* (GMM)[19]. Fungsi peluang deret observasi dapat dinyatakan seperti persamaan sebagai berikut:

$$b_j(O_t) = \sum_{m=1}^M c_{jm} \left(\frac{1}{(2\pi)^{d/2} |\Sigma_{jm}|^{1/2}} \exp \left(-0.5 (O_t - \mu_{jm})^T \Sigma_{jm}^{-1} (O_t - \mu_{jm}) \right) \right) \quad (2.45)$$

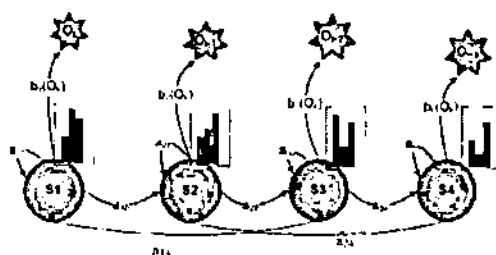
Untuk c_{jm} harus memenuhi syarat stokastik seperti persamaan yaitu :

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M c_{jm} &= 1 & 1 \leq j \leq N \\ c_{jm} &\geq 0, & 1 \leq j \leq N; 1 \leq m \leq M \end{aligned} \quad (2.46)$$

Topologi Hidden Markov Model

Secara umum terdapat 2 topologi dari Hidden Markov Model yaitu *ergodik* dan *left to right* HMM. *Ergodik* menunjukkan bahwa seluruh bagian dari HMM saling berhubungan satu sama lain dan memiliki kemungkinan untuk berpindah ke setiap state. Model yang kedua adalah *left to right*, model ini hanya memiliki kemungkinan untuk berpindah ke state yang berikutnya atau kembali lagi ke state yang sama.

Left-right model atau disebut juga dengan *Bakis model*. Untuk aplikasi pemodelan sinyal radar maka model tipe ini lebih cocok digunakan dari pada tipe *ergodik* [28].



Gambar 2.13 *Left-right Hidden Markov Model*

Persyaratan dasar untuk bakis model ini adalah sebagai berikut:

a). Koefisien transisi state memenuhi syarat :

1. $a_{ij} = 0$, jika $j < i$. Maksudnya tidak diizinkan transisi ke state yang lebih rendah dari state yang sekarang.
2. $a_{ij} = 0$, jika $j > i + \Delta$. ($\Delta = 2$) Ketentuan ini bertujuan untuk mencegah agar tidak terjadi perubahan yang besar pada state. Δ bernilai 2 karena tidak diizinkan ada perpindahan yang lebih dari 2 state.

3. Matrik transisi yang akan terbentuk jika terdapat 4 state adalah :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix}$$

$a_{NN} = 1$, Karena matrik stokastik, jumlah elemen pada baris = 1

$a_{Ni} = 0$ untuk $i < N$

b). Probabilitas state awal memenuhi persyaratan :

$$\pi_i = \begin{cases} 0, & i \neq 1 \\ 1, & i = 1 \end{cases}$$

Hal ini disebabkan deretan state harus dimulai dari state 1 dan berakhir di state yang ke N.

Ada 3 masalah dasar HMM yang harus dipecahkan untuk model yang diterapkan di dunia nyata, yaitu [5][6][26]:

1. Evaluasi : bagaimana menghitung deret observasi jika diberikan deret observasi $O = o_1, o_2, o_3, \dots, o_T$, dan HMM $\lambda = (A, B, \pi)$. Secara matematis dapat ditulis $P(O|\lambda)$.
2. Decoding : bagaimana memilih deret state yang optimal sehingga mampu merepresentasikan dengan baik jika diberikan deret observasi $O = o_1, o_2, o_3, \dots, o_T$ dan HMM $\lambda = (A, B, \pi)$.
3. Pelatihan (Training) : bagaimana menentukan metode penyesuaian parameter model HMM $\lambda = (A, B, \pi)$ untuk memaksimalkan peluang deret observasi terhadap model $P(O|\lambda)$.

Untuk memecahkan masalah pertama dengan menggunakan algoritma Maju-Mundur (*Forward-Backward*). Masalah kedua dipecahkan dengan menggunakan algoritma Viterbi. Sedangkan masalah ketiga dipecahkan dengan algoritma Baum-welch.

Masalah pelatihan ini merupakan masalah yang paling sulit pada HMM. Untuk mengatasi hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan metoda Baum-Welch atau disebut juga dengan metoda EM (*expectation-Maximalization method*) [5][7]. Algoritma EM pada dasarnya dirancang untuk menangani kasus dimana terdapat data yang hilang (data yang tidak

lengkap). Dalam kasus Hidden Markov ini data yang hilang adalah deretan state. Metoda EM dapat memilih $\lambda = (A, B, \pi)$ yang memiliki $P(O|\lambda)$ yang maksimal dengan menggunakan prosedur iterasi. Proses akhir dari pengenalan sinyal dengan HMM adalah model sinyal, yaitu membandingkan model sekarang dinyatakan sebagai $\lambda=(A,B, \pi)$ dan model re-estimasi dinyatakan sebagai $(\bar{\lambda} = \bar{A}, \bar{B}, \bar{\pi})$. Jika $P(O|\bar{\lambda}) > P(O|\lambda)$ berarti kita menemukan model baru yaitu $\bar{\lambda}$. Model baru ini memiliki kemungkinan yang lebih besar sebagai model yang dihasilkan oleh deret observasi yang diamati. Iterasi ini akan berhenti sampai kondisi konvergen [5].

2.8. Software Define Radio (SDR)

GNU Radio merupakan sebuah free software yang dapat digunakan oleh siapa saja untuk membuat dan mendesain sistem radio berbasis perangkat lunak. Perangkat lunak open-source ini didistribusikan oleh GNU general public license. Eric Blossom dan John Gilmore merintis GNU Radio mulai tahun 2001, dan sekarang telah banyak digunakan oleh universitas dan industri untuk penelitian komunikasi wireless yang dapat diimplementasikan untuk real-time radio.

GNU Radio terdiri dari blok signal processing (diimplementasikan dalam C++) yang dapat menghubungkan semuanya. Pengguna dapat dengan mudah membuat perangkat lunak radio dengan membuat grafik, yaitu dengan cara menghubungkan blok-blok yang telah tersedia pada software tersebut. Grafik-grafik tersebut dibuat dan dijalankan dalam bahasa pemrograman Python.

Software GNU Radio dapat dijalankan dengan berbagai komputer yang berbasis OS Linux. Python script digunakan untuk mendesain modulasi, grafik yang menjelaskan tentang aliran data pada pemrosesan sinyal. Sejumlah blok diagram dapat diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman C++ yang dibuat oleh GNU Radio. GNU Radio juga menyediakan GUI tool yang disebut *GNU Radio Companion* untuk

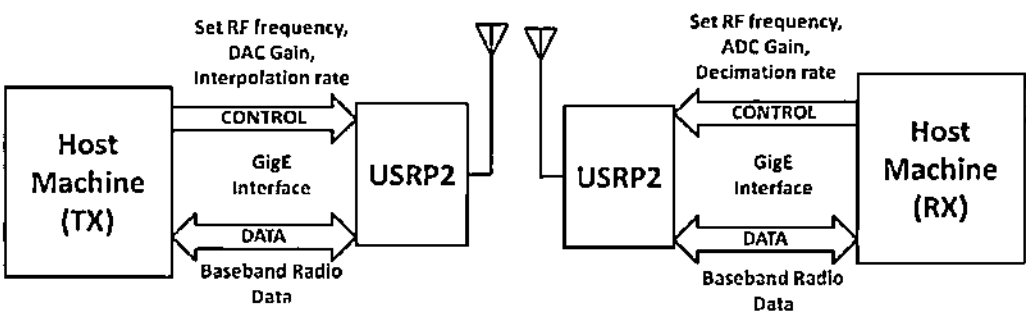
mengimplementasikan grafik. Pengguna dapat membuat grafik dengan cara drag-and-drop interface dan menghasilkan Python script yang sesuai.

Keuntungan menggunakan GNU radio untuk membuat aplikasi SDR yaitu mudah direkonfigurasi. Parameter dari blok pemrosesan sinyal dapat dimodifikasi dengan mudah. Topologi pemrosesan juga mudah dilakukan. Banyak parameter input dan output. Bisa melakukan proses modulasi, demodulasi, VCO, NCO, pentapisan, kecepatan tinggi ADC dan DAC.

GNU radio bekerja pada rentang frekuensi baseband maupun IF. GNU radio digunakan untuk membangkitkan sinyal chirp FMCW, mengirim dan menerima data dari dan ke USRP (kalau diimplementasikan dengan USRP), serta melakukan mixing antara sinyal transmit dan sinyal receive. Sehingga didapatkan hasil berupa sinyal beat yang disimpan dalam bentuk file binary.

Bagian radio front-end untuk GNU Radio dinamakan *Universal Software Radio Peripheral* (USRP). USRP merupakan antar-muka antara perangkat dan dunia RF. Mesin ini pada dasarnya adalah komputer digunakan untuk menjalankan software radio. USRP merupakan perangkat yang tidak terlalu mahal dan drivernya mudah didapatkan. USRP sudah dilengkapi dengan ADC, DAC, FPGA dan interface yang dapat mengontrol bagian-bagian tersebut. FPGA mengimplementasikan up-converters dan down-converters. USRP juga dapat mendukung tipe board yang berbeda dalam implementasi yang berkaitan dengan RF front ends, komponen yang penting dari mother board ini adalah mixer dan IC local oscillator. Fitur yang penting pada USRP adalah fleksibilitas. Hal ini dapat di atur dari komputer dengan cara memberikan nilai-nilai parameter untuk ADC/DAC, penguatan dan nilai decimation/interpolation. Selain itu juga dapat di gunakan untuk band frekuensi yang berbeda-beda. USRP2 menggunakan Gigabit Ethernet (GigE) sebagai interface-nya. Pada gambar 2.14 dapat diilustrasikan aliran data antara host machine dan USRP2 radio front-end pada bagian transmitter dan receiver. Pada bagian akhir transmitter, host machine mengirimkan data baseband ke USRP2, dengan memilih modulasinya dan frekuensi carrier untuk selanjutnya di

transmisikan melalui udara. Pada sistem receiver, USRP2 mengubah data frekuensi radio ke data baseband, dengan menggunakan software radio pada host machine.



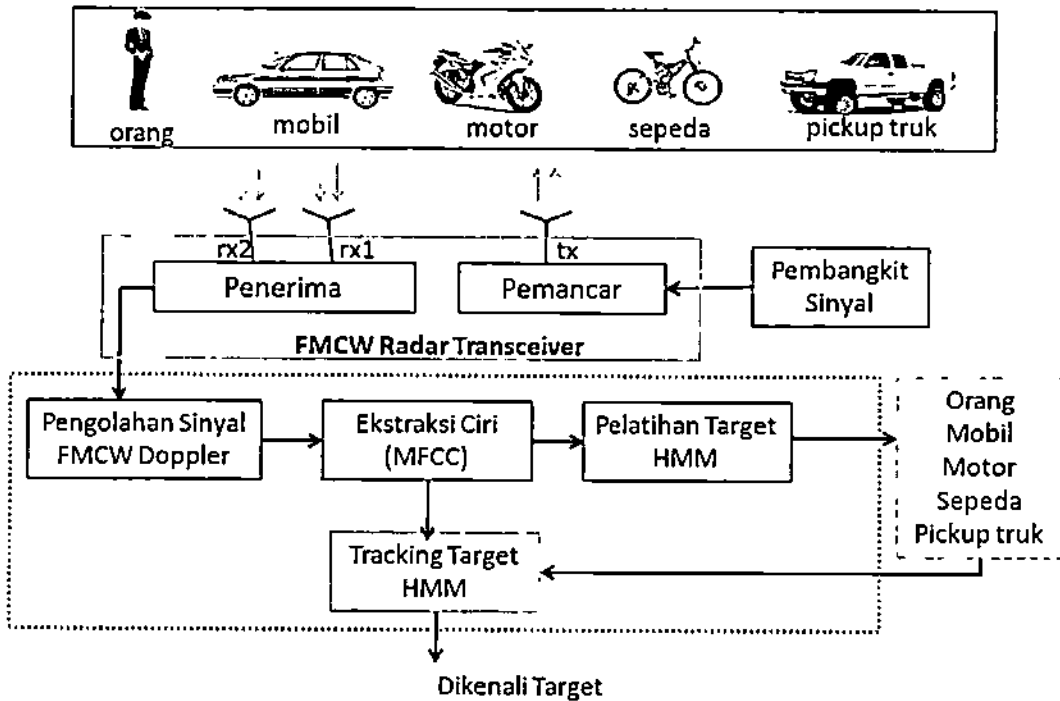
Gambar 2.14 GNU Radio - USRP2 Hardware flow

BAB III

Metoda dan Perancangan Penelitian

3.1. Perancangan Sistem

Pemodelan sistem ini bertujuan untuk merancang sistem radar doppler dengan pengolahan sinyal FMCW radar untuk *tracking* target.

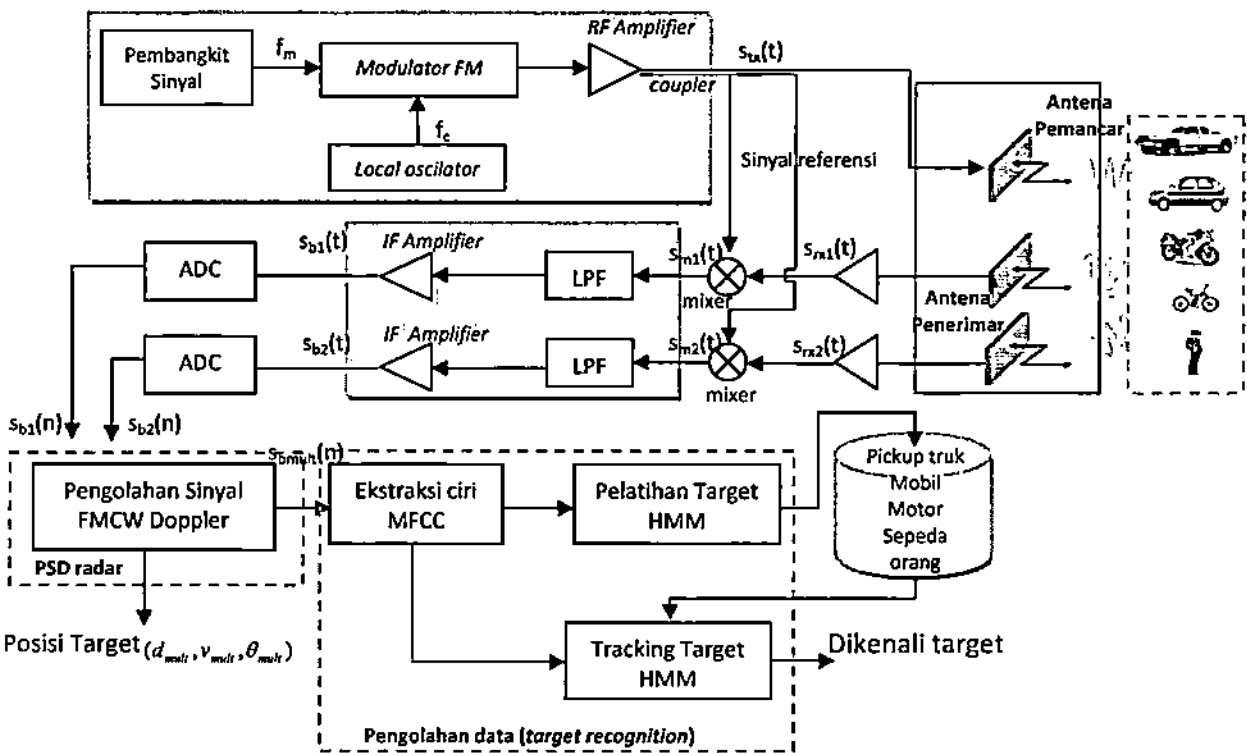


Gambar 3.1 Diagram Blok pemodelan FMCW radar untuk deteksi dan tracking target

Berdasarkan diagram blok diatas, perancangan penelitian ini terdiri dari 4 tahap diagram blok yaitu:

1. Sistem FMCW radar dengan Hidden Markov Model untuk klasifikasi target
2. Pengolahan Sinyal FMCW radar doppler
3. Ekstraksi ciri dari sinyal beat target
4. Klasifikasi Target dengan Hidden Markov Model

3.1.1 Sistem FMCW radar dengan Hidden Markov Model untuk klasifikasi target



Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem FMCW radar dengan Hidden Markov Model untuk klasifikasi target

Berdasarkan diagram blok diatas, algoritma pengolahan sinyal FMCW radar sebagai berikut:

1. Sinyal dengan frekuensi yang naik/turun linear terhadap waktu (chirp) ditransmisikan.

Frekuensi : $f(t) = f_0 + \mu t$ $0 \leq t \leq T$

Fasa : $\varphi(t) = 2\pi f_0 t + \pi \mu t^2$ $0 \leq t \leq T$

Sinyal Pancar : $s_t(t) = \exp[j\{2\pi f_0 t + \pi \mu t^2\}]$ $0 \leq t \leq T$

Dimana:

f_0 = frekuensi dalam sinyal chirp (Hz)

μ = gradient frekuensi sinyal chirp (Hz/s)

T = periode sinyal chirp (s)

2. Sinyal tersebut dimodulasi, kemudian dipantulkan oleh suatu target yang akan dikenali, dan diterima serta didemodulasi pada receiver. Informasi jarak dapat diperoleh dari frekuensi beat antara sinyal yang ditransmisikan dan sinyal yang diterima, sebagai berikut:

$$r = \frac{T_{\text{transp}} \cdot c}{2 \cdot B} \cdot f_{\text{beat}}$$

Frekuensi beat tersebut dapat diperoleh melalui proses mixing, yaitu dengan mengkonjugasi kompleks sinyal pantul dan mengalikannya dengan sinyal transmisi awal dengan persamaan sebagai berikut:

Sinyal pantul:

$$s_r(t) = \exp[j\{2\pi f_0(t - t_d) + \pi M u(t - t_d)^2\}] \quad t_d \leq t \leq T + t_d$$

Hasil konjugasi kompleks dan perkalian sinyal transmisi:

$$s_{\text{in}}(t) = \exp[j\{2\pi f_0 t_d + 2\pi M u t_d t - \pi M u t_d^2\}] \quad t_d \leq t \leq T$$

dimana t_d adalah waktu delay mulai dari saat sinyal ditransmisikan sampai sinyal tiba kembali di penerima.

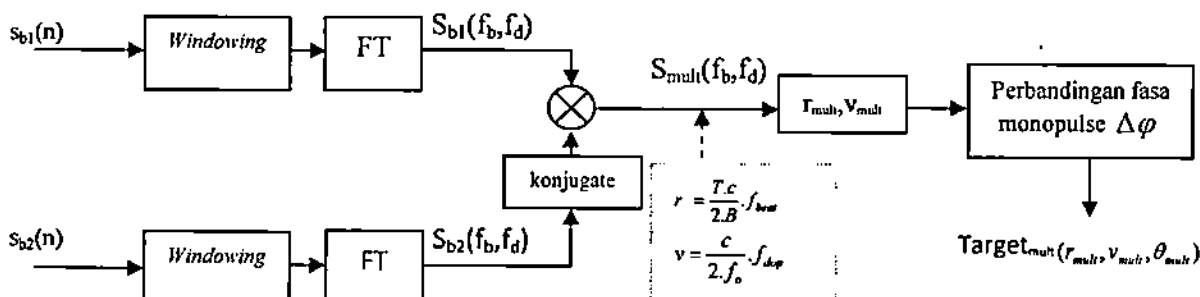
3. Sinyal tersebut kemudian ditransformasikan dengan Transformasi Fourier ke domain frekuensi untuk memperoleh letak frekuensi beat sebagai berikut:

$$S(f) = \int_{t_d}^T S_m(t) \exp(-j2\pi f t) dt$$

$$S(f) = (T - t_d) \exp\{j\phi(f)\} \sin c[(f - M u t_d)(T - t_d)]$$

4. Hasil transformasi Fourier pada persamaan diatas merupakan sinyal sinc yang berpusat di $f = M u t_d$, dengan lebar sinyal sinc sebesar $\frac{1}{T - t_d}$. Letak pusat sinc memberikan informasi jarak target pemantul, sedangkan lebar sinyal sinc menentukan resolusi sistem radar.

3.1.2 Diagram Blok Pengolahan Sinyal FMCW Doppler radar



Gambar 3.3 Diagram Blok Pengolahan Sinyal FMCW Doppler radar

Diagram blok pada gambar 3.3 merupakan lanjutan diagram blok gambar 3.2 untuk pemodelan target bergerak. Algoritma sebagai berikut:

- Sinyal beat $s_{b1(n)}$ dan $s_{b2(n)}$ terdeteksi masing-masing antenna setelah melewati LPF (Low-Pass Filter) untuk menekan komponen frekuensi yang tidak diinginkan dari penjumlahan dan noise. Hasil sinyal yang dilakukan berulang secara periodik dengan jumlah perulangan I dan disimpan ke dalam matriks data dua dimensi, sehingga dua matriks diisi dengan sinyal beat untuk masing-masing penerima.

$$s_{b1}(t) = A_1 \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot \tau_{d1} + \mu \cdot \tau_1 \cdot I + 2 \cdot \frac{\omega_0}{c} \cdot v \cdot I\right)$$

$$s_{b2}(t) = A_2 \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot \tau_{d2} + \mu \cdot \tau_2 \cdot I + 2 \cdot \frac{\omega_0}{c} \cdot v \cdot I\right)$$

- Hamming dua dimensi digunakan setiap matriks untuk membuat spektrum sinyal terbatas dalam jarak (range) dan kecepatan (arah Doppler). Kemudian masing-masing matriks beat dalam domain waktu diubah ke domain frekuensi oleh FFT 2D, sehingga didapat spektrum sinyal dua dimensi $S_{b1}(f_b, f_d)$ dan $S_{b2}(f_b, f_d)$.
- Dua spektrum yang dihasilkan akan dikalikan bersama-sama untuk menghitung nilai sudut, sebelum mengalikan salah satu dari spektrum harus dikonjugasi, untuk mendapatkan fase yang berbeda. Hasil perkalian spektrum, dihasilkan spektrum baru $\Delta\phi$ dalam dua dimensi (range-Doppler) $S_{mult}(f_b, f_d)$.

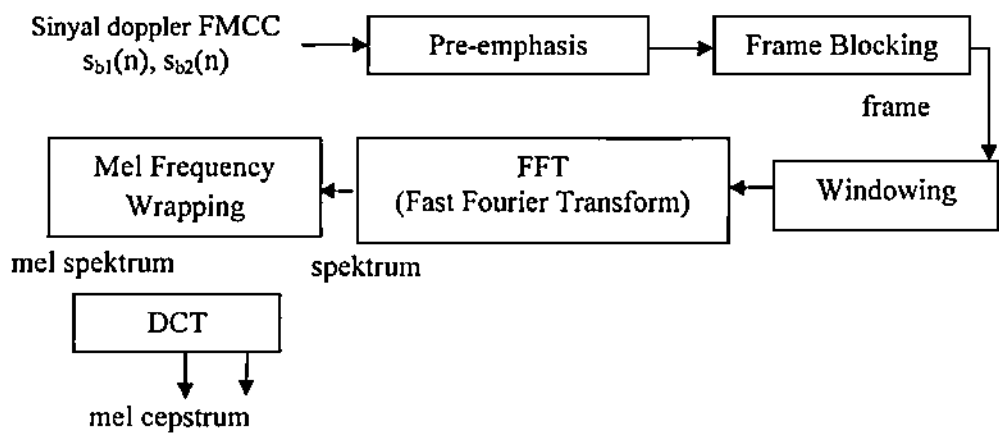
$$S_{mult}(f_b, f_d) = S_{b1}(f_b, f_d) \times (S_{b2}(f_b, f_d))^*$$

- Dari hasil perkalian spektrum $S_{mult}(f_b, f_d)$ diperoleh informasi jarak (r_{sim}) dan kecepatan (v_{sim}). $\omega_R = \frac{2 \cdot B \cdot r_{mult}}{T \cdot c} \Rightarrow r_{mult} = \frac{T \cdot c}{2 \cdot B} \cdot f_{beat}$ $\omega_{Dop} = \frac{2 \cdot \omega_0 \cdot v_{sim}}{c} \Rightarrow v_{mult} = \frac{c}{2 \cdot f_0} \cdot f_{dop}$

f_{beat} dan f_{dop} adalah komponen frekuensi di setiap arah spektrum range-doppler 2D

3.1.3 Ekstraksi ciri sinyal beat FMCW dengan FMCC

Ekstraksi ciri merupakan proses yang harus dilakukan sebelum klasifikasi target, tujuannya agar didapatkan parameter sinyal yang akan dimodelkan. Ekstraksi ciri yang dilakukan berbasis spektral. Pada tahap ini, transformasi fourier dalam satu dimensi, input untuk MFCC yaitu sinyal beat dari antenna 1 dan 2 $s_{b1}(n)$ dan $s_{b2}(n)$, namun dalam pelaksanaannya penulis hanya menggunakan sinyal beat pada antenna 1.



Gambar 3.4 Diagram Blok ekstraksi ciri sinyal beat FMCW dengan FMCC

Ekstraksi ciri mengubah representasi digital dari sinyal beat target yang diterima kedalam deretan vektor ciri. Kualitas vektor ciri merupakan hal yang sangat penting dalam pemodelan target atau klasifikasi target.

- **Pre-emphasis**

Pre-emphasis dilakukan oleh filter *Highpass*. Filter yang paling banyak digunakan adalah *Finite Impulse Respons* (FIR) filter, dengan persamaan :

$$\tilde{s}(n) = s(n) - as(n-1)$$

dimana $s(n)$ adalah sinyal input dan $\tilde{s}(n)$ adalah sinyal $s(n)$ yang telah mengalami pre-emphasis. Fungsi transfer adalah : $H(z)=1-az^{-1}$ dengan “a” adalah koefisien filter yang bernilai 0.97.

- **Frame Blocking**

Pada tahap ini, sinyal beat target dikelompokkan ke dalam *frame-frame* dengan ukuran masing-masing *frame* (N) sebesar 256 data cuplikan. *Frame* ini berurutan dengan pemisahan antara kedua bingkai (M) sebesar 100 data cuplikan. *Frame* pertama berisi N data pertama sinyal beat. *Frame* kedua dimulai dari data

ke-M pada *frame* pertama, sehingga terdapat penumpukan (*overlap*) *frame* sejauh N-M buah data (156 data). Demikian juga dengan *frame* ketiga dimulai dari data ke-2M *frame* pertama (atau data ke-M dari *frame* kedua), sehingga terdapat penumpukan *frame* sejauh N-2M dengan *frame* pertama. Proses ini berlangsung terus sampai seluruh data sinyal beat di-*frame*-kan.

- **Windowing**

Tahap *windowing*, me-*window* setiap *frame* yang bertujuan untuk meminimasi ketidakkontinuan sinyal pada awal dan akhir dari tiap-tiap *frame*. Jenis window yang digunakan adalah *Hamming Window* yang memiliki bentuk:

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \text{ dengan } 0 \leq n \leq N-1$$

dimana $w(n)$ adalah sinyal *windowing* dan N adalah jumlah cuplikan tiap-tiap *frame*. Jika didefinisikan *window* sebagai $w(n)$ dengan $0 \leq n \leq N-1$, maka sinyal hasil *windowing* adalah:

$$Y_i(n) = X_i(n) \cdot w(n), \text{ dengan } 0 \leq n \leq N-1$$

$X_i(n)$ adalah sinyal *input frame* ke-i, dan hasil *windowing* adalah $Y_i(n)$.

- **Fast Fourier Transform (FFT)**

Proses FFT ini bertujuan untuk mengonversi masing-masing N sampel sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. Hasil yang diperoleh dari proses ini disebut dengan spektrum.

- **Mel Frequency Wrapping**

Spektrum yang dihasilkan dari proses FFT kemudian diproses dengan *Mel Frequency Wrapping*. Tahap ini merupakan proses pemfilteran dari spektrum setiap *frame* dengan menggunakan sejumlah M filter segitiga. Pada sistem ini digunakan pendekatan *filter bank* sebanyak 20 filter. Satu filter digunakan untuk masing-masing komponen *mel-frequency* yang diinginkan. Hasil dari proses ini ialah *mel* spektrum.

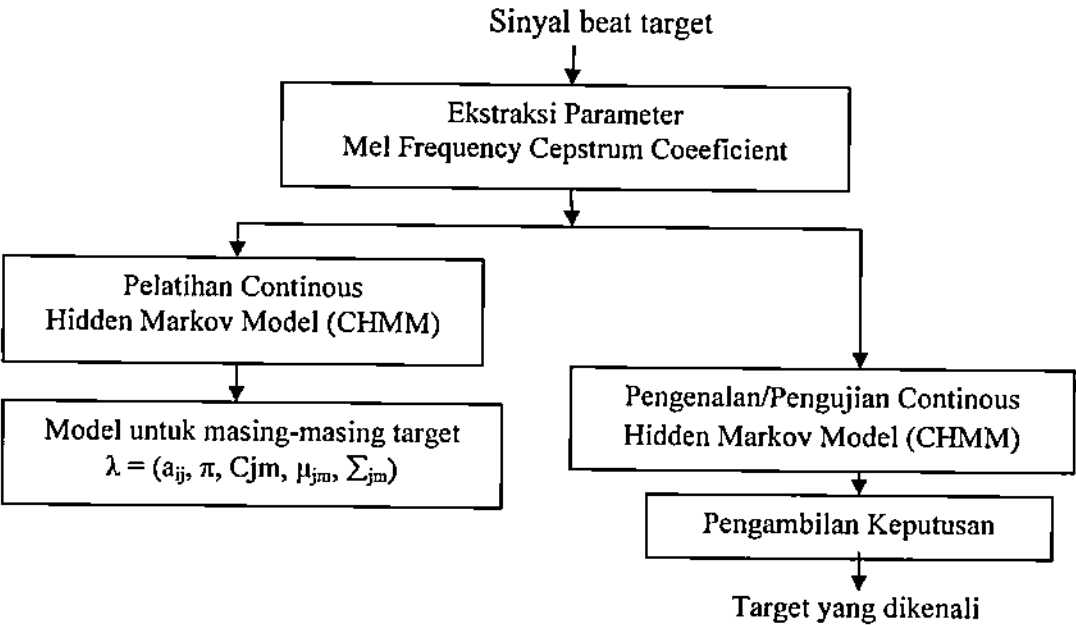
- **Discrete Cosine Transform (DCT)**

Langkah terakhir dari proses utama ekstraksi parameter MFCC ialah Transformasi Kosinus Diskrit atau *Discrete Cosine Transform* (DCT). Tujuan dari proses DCT ini adalah untuk mendapatkan nilai *cepstrum*. Nilai *cepstrum* inilah yang merupakan hasil akhir dari ekstraksi parameter MFCC. *Cepstrum* merupakan

koefisien parameter MFCC berupa vektor akustik atau vektor ciri. Sistem ini menggunakan orde 13 yang berarti menghasilkan 13 koefisien pertama MFCC untuk tiap satu *frame*.

3.1.4 Klasifikasi target dengan Hidden Markov Model

Semua sistem klasifikasi target dibentuk melalui dua proses utama yaitu pelatihan (*training*) dan pengenalan (*recognition*). Pada proses pelatihan dan pengenalan, dilakukan ekstraksi ciri terhadap setiap sinyal beat dari masing-masing target sehingga dihasilkan vektor ciri untuk masing-masing target. Pada proses pelatihan, vektor ciri digunakan untuk membentuk model target merepresentasikan target tersebut. Model tersebut disimpan dan dijadikan sebagai pola referensi. Pada proses pengenalan, vektor ciri dibandingkan dengan semua model pada basis data.

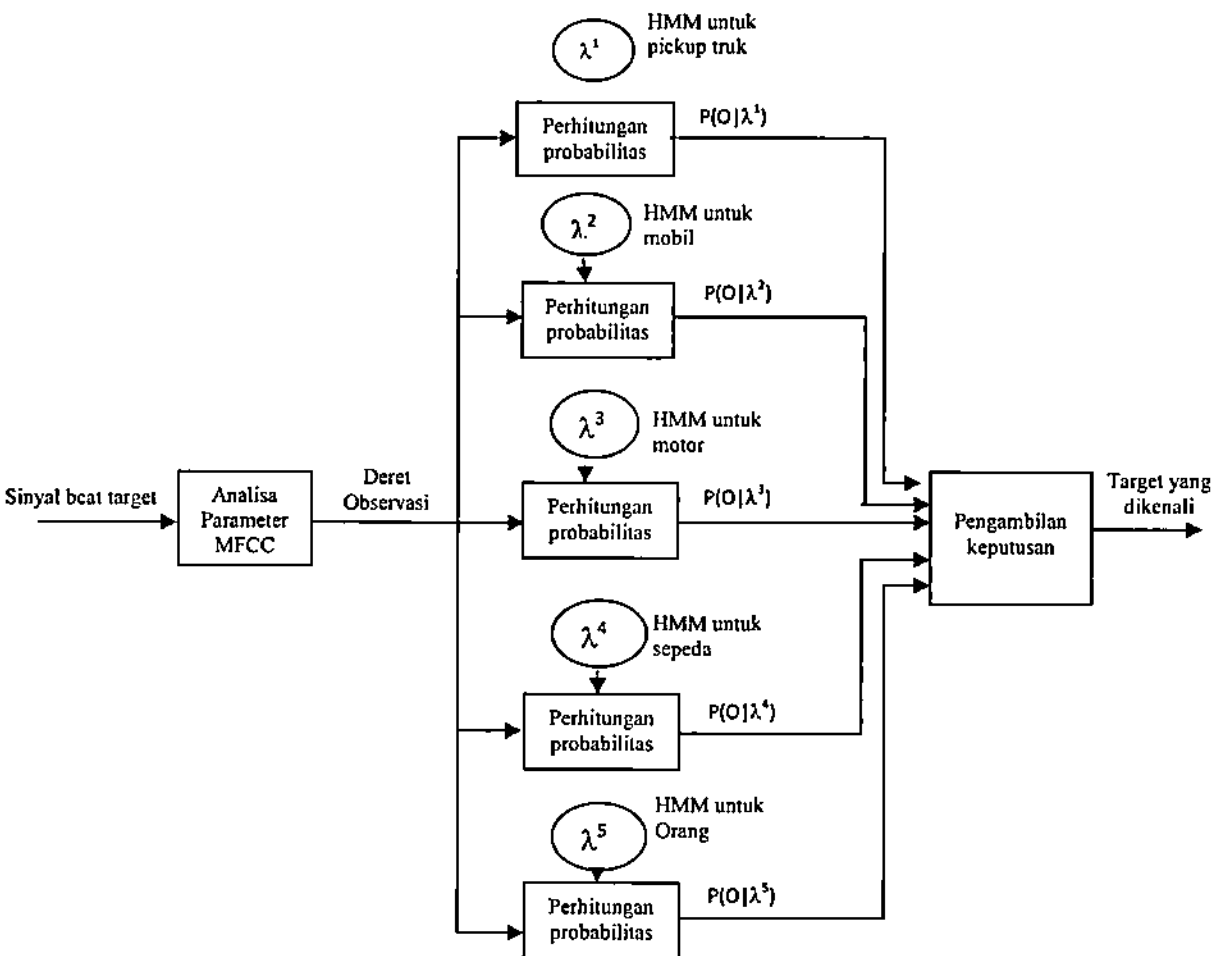


Gambar 3.5 Diagram blok sistem klasifikasi target menggunakan HMM

Klasifikasi atau pengenalan target pada penelitian ini menggunakan Hidden Markov Model. Jenis pengenalan target yang dilakukan adalah isolated word recognition. Pada proses pembentukan suatu sistem klasifikasi yang terpisah (isolated word) diasumsikan terdapat sebanyak N model sinyal beat. Setiap N sinyal ini akan dimodelkan dengan HMM yang berbeda. Setiap model memiliki data pelatihan yang terdiri dari T deret observasi. Deret observasi ini

merepresentasikan karakteristik spectral dari model sinyal beat target. Untuk melakukan klasifikasi tipe isolated word maka dilakukan langkah berikut :

- 1). Untuk setiap sinyal harus dibentuk model HMM-nya dengan cara mengestimasi parameter model. Hal ini dilakukan pada proses pelatihan dengan menggunakan solusi dari permasalahan ke tiga.
- 2). Untuk setiap sinyal beat yang akan dikenali prosesnya dapat dilihat pada gambar 3.6. Proses pertama mencari deret observasi $O = \{ O_1 O_2O_T \}$ melalui ekstraksi parameter dari sinyal beat target. Kemudian diikuti dengan perhitungan probabilitas deret observasi terhadap semua model yang ada, $P(O|\lambda^v), 1 \leq v \leq 5$. Proses selanjutnya yaitu pengambilan keputusan dengan peluang yang paling besar dipilih sebagai target pembentuk model tersebut.



Gambar 3.6 Diagram blok pengenalan HMM dengan tipe *Isolated word*

3.1.4.1 Algoritma Pelatihan Hidden Markov Model

a. Inisialisasi Parameter

Pada sistem pengenalan target ini menggunakan pengenalan target isolated word. Jumlah state yang digunakan sebanyak lima state. Untuk setiap model akan digunakan jumlah state yang sama. Jumlah state ini akan sangat terkait sekali dengan parameter-parameter HMM selanjutnya.

Parameter HMM yang pertama adalah matrik probabilitas transisi. Matrik ini berdimensi jumlah state x jumlah state. Karena pada penelitian ini digunakan HMM dengan tipe Bakis Model maka bentuk matrik probabilitas transisi ini sesuai dengan persyaratan yang ada pada tipe Bakis Model. Nilai untuk masing-masing elemen matrik tersebut dapat ditentukan secara acak atau random tetapi memenuhi persyaratan yang dijelaskan pada bab 2.

Parameter selanjutnya adalah probabilitas state awal. Karena kita memakai Bakis model maka untuk parameter ini probabilitas awal adalah 1 untuk state pertama dan 0 untuk state selanjutnya. Jadi memenuhi persyaratan :

$$\pi_i = \begin{cases} 0, & i \neq 1 \\ 1, & i = 1 \end{cases}$$

Pada penelitian ini digunakan Continuous model dengan menggunakan mixture Gaussian Pdf sehingga parameter berikutnya yaitu berkaitan dengan gaussian. Pertama yang ditentukan yaitu jumlah mixture. Pada penelitian ini jumlah mixture yang digunakan sebanyak 5 mixture dalam setiap state. Matrik koefisien mixture memiliki dimensi jumlah state x jumlah mixture. Untuk matrik koefisien mixture nilainya ditentukan secara acak tetapi memenuhi persyaratan yang telah ditentukan pada bab 2.

Matrik Mean (vektor mean untuk mixture ke m pada state j) diperoleh dari rata-rata deret observasi dalam mixture ke-m pada state j. Matrik mean ini memiliki dimensi jumlah state x jumlah mixture x d koefisien pada setiap frame. Kedua matrik kovarian (untuk mixture ke m pada state j), bila terdapat sejumlah M komponen mixture, dan deret observasi memiliki D koefisien pada setiap frame, maka dalam setiap state terdapat sejumlah M matrik kovariant dengan dimensi

dxd. Matrik kovarian diperoleh dengan matrik diagonal kovarian, sehingga dimensi untuk matrik kovarian jumlah state x jumlah mixture x d x d.

b. Algoritma Pelatihan Continuous HMM

Adapun langkah-langkah pelatihan Continuous HMM jenis Bakis Model sebagai berikut:

1. Nilai variabel MFCC yang diperoleh dari hasil ekstraksi parameter merupakan hasil vektor observasi yang akan diproses lebih lanjut. Nilai vektor ini akan bervariasi sesuai dengan panjang masing-masing sinyal beat target..
2. Inisialisasi parameter-parameter yang akan digunakan seperti jumlah state, jumlah mixture, matrik probabilitas transisi antara state, probabilitas state awal, koefisien mixture, mean dan kovarian matrik. Nilai-nilai inisialisasi ini dapat dilakukan secara random.
3. Hitung peluang output untuk setiap observasi pada setiap state terhadap parameter awal yang diinisialisasi pada langkah 2. Perhitungan ini dapat dilakukan dengan rumus :

$$b_i(O_i) = \sum_{m=1}^M C_{jm} \left(\frac{(e^{-0.5(O_i - MU_{jm})^2 U_{jm}^{-1} (O_i - MU_{jm})})}{\sqrt{(2\pi)^2 |U_{jm}|}} \right)$$

4. Hasil perhitungan peluang output pada langkah 3 digunakan untuk menghitung peluang Forward (variabel forward / $\alpha_i(t)$) dengan menggunakan rumus:

$$\alpha_i(i) = P_i b_i(O_i)$$

$$\alpha_i(i) = \left[\sum_{j=1}^N \alpha_{i-1}(j) \alpha_{ij} \right] b_j(O_i)$$

Hasil perhitungan peluang output pada langkah 3 digunakan untuk menghitung peluang backward (variabel backward/ $\beta_i(t)$) dengan menggunakan rumus:

$$\beta_i(i) = 1$$

$$\beta_i(i) = \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} b_j(O_{i+1}) \beta_{i+1}(j)$$

5. Setelah didapatkan nilai variabel Forward dan Backward pada langkah 4 dan 5 maka dilanjutkan dengan langkah ekspektasi. Menghitung peluang terjadinya state i pada waktu t dengan menggunakan nilai variabel Forward dan Backward. Peluang ini dilambangkan dengan γ dan dapat dirumuskan dengan:

$$\gamma_t(i) = \frac{\alpha_t(i) \cdot \beta_t(i)}{\sum_{j=1}^N \alpha_t(j) \beta_t(j)}$$

6. Dengan menggunakan γ pada langkah 6 dan peluang Forward dan Backward maka dapat dihitung peluang terjadinya state i pada waktu t dan terjadinya state j pada waktu $t+1$, dilambangkan dengan:

$$\xi_t(i, j) = \frac{\gamma_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}{\beta_t(i)}$$

7. Selanjutnya dengan menggunakan γ pada langkah ke 6 maka dapat dihitung peluang terjadinya komponen mixture yang ke m pada state ke i dan waktu t berdasarkan deret observasi.

$$\gamma_{t(i,m)} = \gamma_t(i) \frac{C_m \left(\frac{(e - 0.5(O_t - MU_{jm})^T U_{jm}^{-1} (O_t - MU_{jm}))}{\sqrt{(2\pi)^2 |U_{jm}|}} \right)}{b_i(O_t)}$$

8. Setelah didapatkan nilai-nilai yang diharapkan maka dilanjutkan dengan langkah maksimalisasi yaitu mengestimasi model. Estimasi nilai-nilai peluang state awal (P) sehingga didapatkan P_{baru} yaitu :

$$\text{Phi}(i) = \gamma_t(i)$$

9. Estimasi nilai-nilai untuk setiap peralihan antar state sehingga didapatkan matrik peluang peralihan state yang baru.

$$\tilde{a}_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \xi_t(i, j)}{\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t(i)}$$

10. Estimasi nilai-nilai koefisien mixture pada setiap state

$$\bar{C}_m = \frac{\sum_{t=1}^T \gamma_t(i, m)}{\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^K \gamma_t(i, m)}$$

11. Estimasi nilai-nilai komponen mean mixture pada setiap state.

$$\overline{MU}_{im} = \frac{\sum_{i=1}^T \gamma_i(i,m) O_i}{\sum_{i=1}^T \gamma_i(i,m)}$$

13. Estimasi nilai-nilai komponen kovarian pada setiap state.

$$\overline{U}_{im} = \frac{\sum_{i=1}^T \gamma_i(i,m) (O_i - \overline{MU}_{im})(O_i - \overline{MU}_{im})^T}{\sum_{i=1}^T \gamma_i(i,m)}$$

14. Tentukan Peluang deret Observasi (O) terhadap model inisialisasi awal.

$$P(O|\text{model_lama}) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(i)$$

15. Tentukan peluang deret observasi (O) terhadap model estimasi yang baru.

$$P(O|\text{model_baru}) = \sum_{i=1}^N \alpha_{\text{baru}}(i)$$

16. Tentukan tingkat kekonvergenan dengan cara gradient harus kecil dari 0.0001.

$$\text{Gradient} = \frac{\text{abs}(\log(P(O|\text{model_baru})) - \log(P(O|\text{model_baru}))))}{((\text{abs}(\log(P(O|\text{model_baru})))) + \text{abs}(\log(P(O|\text{model_baru}))))/2)}$$

17. Jika syarat konvergen tidak terpenuhi maka kembali ke langkah 3 dengan menggunakan model estimasi yang baru dibentuk sebagai model inisialisasi dan proses kembali sampai langkah 16.

18. Jika syarat konvergen terpenuhi maka simpan paramater-paramater yang baru terbentuk tersebut sebagai model dari target yang dilatihkan dan keluar dari program.

19. Lakukan proses dari langkah 1 sampai langkah 18 dengan jenis target yang dilatihkan berbeda. Sehingga akan didapatkan model dari msing-masing target yang dilatihkan.

3.1.4.2 Pengujian Hidden Markov Model dan Pengambilan Keputusan

Pada proses pengujian kita mencari nilai peluang terbesar antara deret observasi terhadap model referensi yang dihasilkan oleh proses pelatihan. Peluang

yang terbesar diidentifikasi sebagai kata pembentuk model. Pada penelitian ini proses pengujian menggunakan metode Forward. Adapun langkah-langkah pengujian Hidden Markov Model dengan metode Forward sebagai berikut:

1. Melakukan proses ekstraksi parameter terhadap target yang ingin dikenali dengan menggunakan MFCC. Hasil ekstraksi ini akan menjadi vector parameter.
2. Membaca semua model target yang telah terbentuk dari proses pelatihan. Model ini nantinya berfungsi sebagai model referensi.
3. Mengitung peluang output dari deret observasi terhadap masing-masing model kata.
4. Hasil perhitungan peluang output pada langkah 3 digunakan untuk menghitung probabilitas forward (variabel forward / $\alpha_i(t)$) untuk masing-masing model.
5. Menentukan probabilitas deret observasi terhadap masing-masing model.
6. Pengambilan keputusan yaitu:
 - 6.1 Jika probabilitas deret observasi terhadap model pertama adalah probabilitas yang terbesar maka deret observasi tersebut dikenali sebagai target "Pickup Truk".
 - 6.2 Jika probabilitas deret observasi terhadap model kedua adalah probabilitas yang terbesar maka deret observasi tersebut dikenali sebagai kata "Mobil".
 - 6.3 Jika probabilitas deret observasi terhadap model ketiga adalah probabilitas yang terbesar maka deret observasi tersebut dikenali sebagai kata "Motor".
 - 6.4 Jika probabilitas deret observasi terhadap model keempat adalah probabilitas yang terbesar maka deret observasi tersebut dikenali sebagai kata "Sepeda".
 - 6.5 Jika probabilitas deret observasi terhadap model kelima adalah probabilitas yang terbesar maka deret observasi tersebut dikenali sebagai kata "Orang".

3.2. Pemodelan Simulasi Sistem FMCW Radar

3.2.1 Pemodelan Simulasi Sistem FMCW Radar dengan Matlab

Pemodelan dengan simulasi matlab berdasarkan diagram blok Sistem FMCW radar dengan Hidden Markov Model untuk klasifikasi target. Model target yang digunakan disini bergerak. Adapun parameter sistem radar berdasarkan tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter rancangan radar FMCW untuk memonitoring lalu lintas

Parameter	Notasi	Spesifikasi
Frekuensi carrier	f_c	10 GHz
Range Frekuensi	$f_{up}-f_{lw}$	10,075-9,925 GHz
Bandwidth	B	150 MHz
Periode chirp	T	1ms
Periode Modulasi	T_m	2ms
Frekuensi modulasi	f_m	500 Hz
Jumlah chirp	I	50
ADC (sampling rate)	f_{sam}	2 MHz
Jarak maksimum target	R	200 m
Daya pancar	P_t	20 mW
Frekuensi beat maksimal	f_{beat}	200 kHz

Skenario yang digunakan pada simulasi matlab ini ada dua yaitu :

1. Menentukan posisi lokasi target terhadap informasi jarak, kecepatan dan sudut.
2. Melakukan klasifikasi target dengan HMM berdasarkan jarak,kecepatan, dan sudut target

Prinsipnya pengolahan sinyal FMCW doppler radar mepresentasikan operasi dan fungsi yang digunakan, informasi yang didapat dilakukan dengan simulasi Matlab untuk mencapai target posisi lokasi target. Analisis dilakukan langkah demi langkah dalam program simulasi, parameter antenna dan parameter

target diinisialisasi sebelumnya, sehingga hasilnya didefinisikan sebagai jarak target = r , kecepatan = v dan sudut target = θ . Jadi, dasar setiap informasi target berdasarkan sinyal beat FMCW yang dihitung setiap antenna penerima disebut dengan $s_{b1}(t)$ dan $s_{b2}(t)$. Pada simulasi ini menggunakan prinsip jarak-kecepatan 2D.

Pada skenario kedua, hasil sinyal beat dari masing-masing antenna dimodel menggunakan HMM untuk menentukan jenis target (percobaan yang dilakukan hanya menggunakan hasil sinyal beat 1). Prinsip klasifikasi berdasarkan gambar 3.5, sinyal beat dilakukan ekstraksi ciri dilanjutkan pelatihan HMM untuk didapatkan model masing-masing target. Model ini disimpan sebagai database untuk pengujian pengenalan target. Kemudian dilanjutkan pengujian atau pengenalan target berdasarkan gambar 3.6.

3.2.1.1 Desain Lokasi radar dan target

Untuk mendapatkan model target yang akurat penting untuk melakukan eksperimen pengumpulan data dari pengolahan sinyal sinyal beat pada kondisi SNR yang tinggi. Oleh karena itu ditetapkan jarak antara radar dan target sekitar 200-600 m [19][20].

Tabel 3.2 Parameter Lokasi radar dan target

Parameter	Spesifikasi
Jarak maksimum target	200 m
Lebar jalan	20 m
Tinggi posisi radar	8 m

Desain lokasi radar dan target harus memenuhi syarat:

1. Maksimal batas jarak target 100 dan 300 m [33]
2. Resolusi jarak target 1m (ukuran yang menggambarkan kemampuan untuk mendeteksi benda-benda yang saling berdekatan sebagai benda-benda yang berbeda).

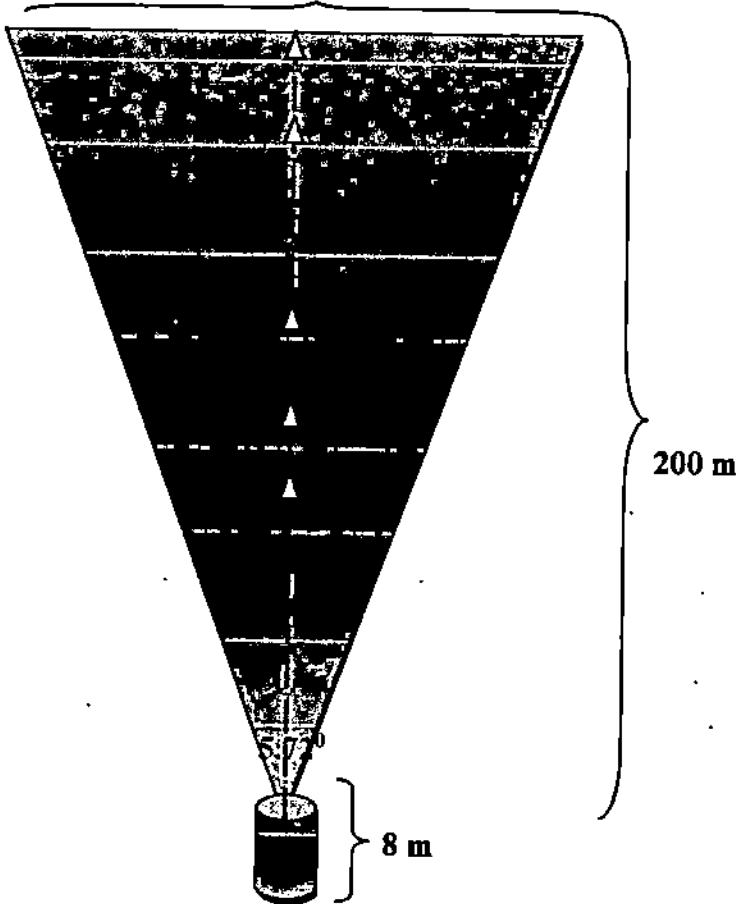
$$\Delta R = \frac{B}{T}$$

3. Resolusi lateral / resolusi angular.

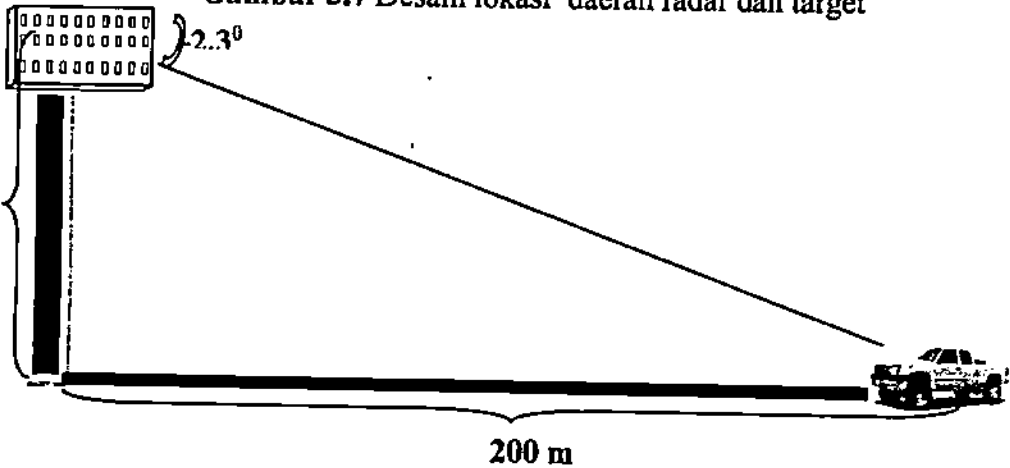
Resolusi lateral harus mampu membedakan antara kendaraan jalur yang berbeda.

$$\Delta S_{AZ} = 2R \cdot \sin \frac{\phi_{az}}{2} = 19.958m$$

$$\Delta S_{AE} = 2R \cdot \sin \frac{\phi_{el}}{2} = 8.027m$$



Gambar 3.7 Desain lokasi daerah radar dan target



Gambar 3.8 Desain lokasi posisi radar

Tabel 3.3 Parameter model antenna radar

Parameter	Spesifikasi
Jenis Antena	Linear Array (1 TX, 2RX)
Coverage Elevasi	-2.3°
Coverage Azimut	5.72° (2 antena Rx) 1 antena RX = 2.8°
Gain Antena	33 dB

3.2.1.2 Informasi pemodelan target

Pemodelan target ini artinya informasi yang diberikan target sehingga target dapat dimodelkan dalam klasifikasi target. Ada tiga informasi target yang dimodelkan yaitu:

1. Informasi target berdasarkan nilai RCS target

Tabel 3.4 menunjukkan nilai RCS untuk beberapa target pada X-Band [3].

Tabel 3.4 RCS Target Pada Frekuensi radio 3-10 GHz (Skolnik)

Target	RCS (m^2)
Pickup Truck	200
Mobil	100
Motor	6
Sepeda	2
Man	1

2. Informasi target berdasarkan kecepatan target

Klasifikasi target bergerak menggunakan efek Doppler. Target terdeteksi dan dilacak secara otomatis oleh radar. Penelitian oleh Igal Bilik kecepatan model target dari *Ground Surveillance Doppler Radar*, dirangkum pada table 3.5.

Tabel 3.5 Kecepatan model target [19][20]

Target	Kecepatan (km/jam)
Truk	Slow (10-20 km/jam)
Mobil	Normal (20-30 km/jam)
Motor	Fast (30-90 km/jam)
Sepeda	Normal (10 km.jam)
Orang	Slow (2-3 kim/jam)
	Normal (3-5 km/jam)

3. Informasi target berdasarkan aspek sudut

Informasi target berdasarkan aspek sudut terdiri dari 2 parameter yaitu:

- Sudut berdasarkan beamwidth antena (dapat dilihat pada tabel 3.3)
- Informasi sudut dihitung dengan menggunakan metode perbandingan fase monopulse dan posisi target diperoleh berdasarkan parameter radar.

$$\theta_{mult} = \arcsin\left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{a}\right)$$

dan batas sudut untuk lokasi target:

$$\theta_{\max/\min} = \pm \arcsin\left(\frac{\lambda}{2.a}\right) = \pm \arcsin\left(\frac{0.03}{2 \times 0.1337}\right) = 6.44^\circ$$

dimana a adalah jarak antara dua antena penerima

λ adalah panjang gelombang.

BAB IV

Hasil Simulasi dan Analisis

Pada bab empat ini ditampilkan hasil simulasi untuk deteksi, tracking dan klasifikasi target yang telah dijelaskan pada Bab III dan dilakukan analisis terhadap hasil simulasi. Ada tiga cara pemodelan sinyal dalam rancangan sistem radar FMCW yang dibangun, dimana ketiga hasil dilakukan klasifikasi target.

4.1 Hasil Simulasi Matlab

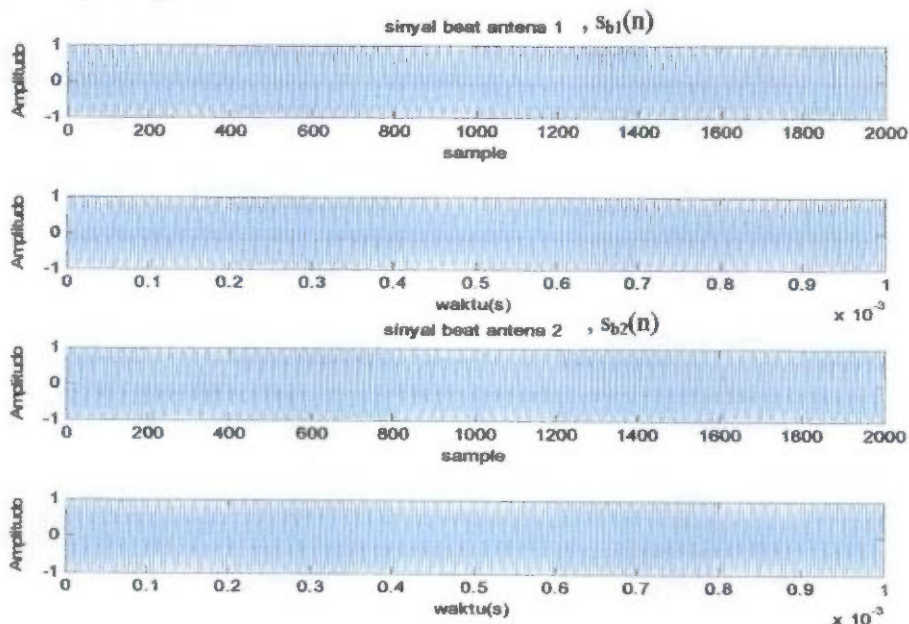
Pada simulasi matlab ini, pemodelan target diasumsikan bergerak dimana informasi target berupa jarak, kecepatan dan sudut. Pemodelan sinyal FMCW radar dengan simulasi matlab ada tiga percobaan yaitu deteksi target (pengolahan sinyal FMCW), *tracking* target (lokasi target) dan klasifikasi target (pengenalan target).

4.1.1 Pengolahan sinyal untuk deteksi target

4.1.1.1 Skenario percobaan 1 untuk satu target

Pada simulasi matlab ini, sinyal beat $s_{b1}(t)$ dan $s_{b2}(t)$ dilewatkan ke suatu unit pengubah analog ke digital (ADC), kemudian diproses dengan algoritma pemrosesan sinyal akan didapatkan sinyal keluaran pada ADC $s_{b1}(n)$ dan $s_{b2}(n)$. ADC yang dirancang dengan frekuensi pencuplikan 2 MHz atau periode pencuplikan $0.5 \mu s$.

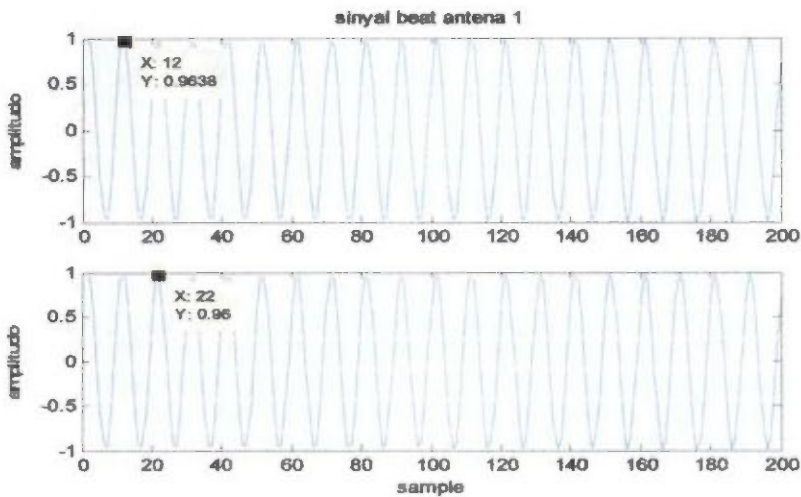
Hasil sinyal beat untuk target pickup truk pada gambar 4.1, 4.2, dan 4.3 dan setelah difilter pada gambar 4.6.



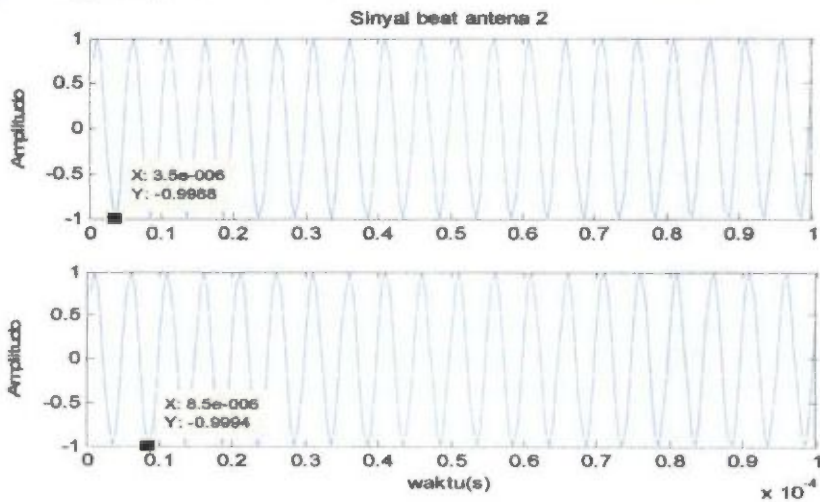
Gambar 4.1 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk target pickup truk

Pemrosesan sinyal digital (DSP) digunakan untuk proses pendeteksian. Proses DSP dimulai dengan sampling. Menurut teorema sampling untuk menghindari aliasing sinyal harus disampling lebih besar dari dua kali frekuensi beat maksimu (persamaan 2.30), sehingga $f_s \geq \frac{8.R_{mak}.f_m.B}{c}$

Hasil sinyal beat pada gambar 4.1,4.2 dan 4.3 diperoleh dari penurunan persamaan sinyal FMCW. Penurunan persamaan dari sistem frekuensi modulasi pada lampiran C. Hasil plot sinyal beat untuk antenna 1 dan antenna 2 dengan 2000 sample (1ms). Bentuk sinyal pada gambar 4.1 sulit diamati karena frekuensinya cukup tinggi. Perbesaran sinyal beat untuk 200 sample dapat dilihat pada gambar 4.2 dan gambar 4.3.

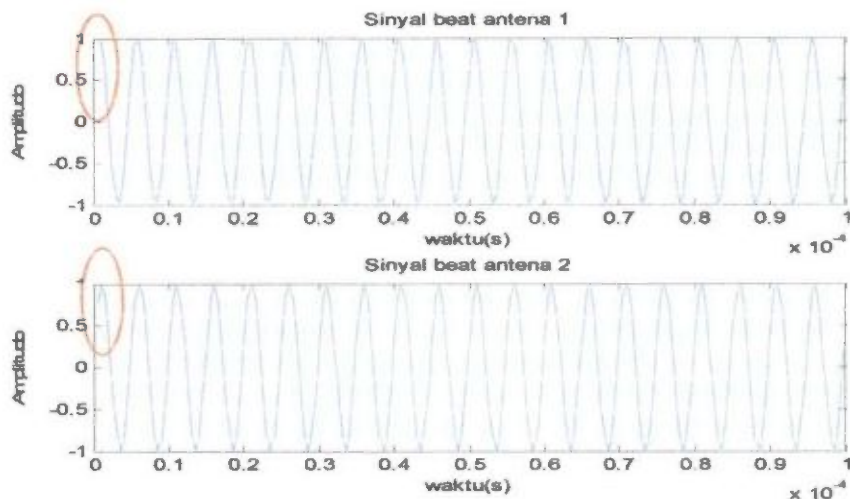


Gambar 4.2 Perbesaran hasil sinyal beat untuk 200 sample pertama
 Perbesaran sinyal beat pada gambar 4.2 dilihat dalam sample (banyak cuplikan) begitu juga pada, sedangkan gambar 4.3 sinyal beat dalam domain waktu.



Gambar 4.3 Perbesaran hasil sinyal beat untuk 0,1 ms

Hasil simulasi sinyal beat diperbesar dengan pencuplikan 200 sample atau 0,1 ms, sinyal beat yang dihasilkan dari sebuah sistem FMCW merupakan superposisi sinyal sinusoidal dengan frekuensi beat 200 kHz. Pada gambar 4.2 sinyal yang diamati pada antenna penerima 1, dimana pergeseran periode sinyal periodik setiap 10 sample per frekuensi cuplik yaitu 5×10^{-6} s. Begitu juga jika dilihat pada antenna penerima 2 (dalam domain waktu). Periode sinyal beat diperoleh 5×10^{-6} s (8.5×10^{-6} s – 3.5×10^{-6} s). Pada gambar 4.2 dan gambar 4.3 terlihat terjadi perbedaan fasa sinyal beat, untuk lebih jelasnya kita lihat pada gambar 4.4.



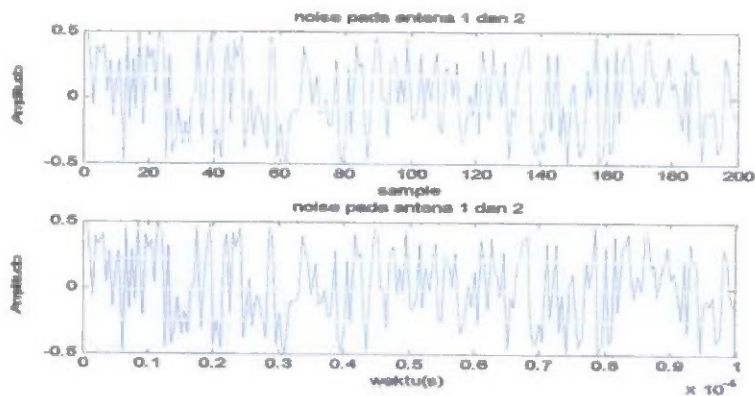
Gambar 4.4 Perbedaan fasa sinyal beat pada antenna penerima 1 dan 2

Hasil simulasi matlab pada gambar 4.4 menunjukkan terjadinya perbedaan fasa antara antenna penerima 1 dan 2. Pada penelitian ini menggunakan dua antenna penerima, dimana dengan menggunakan metode perbedaan fasa pada sistem monopulse radar kita dapat menentukan posisi target. Untuk posisi target yaitu analisis tracking target dijelaskan pada subbab 4.1.2.

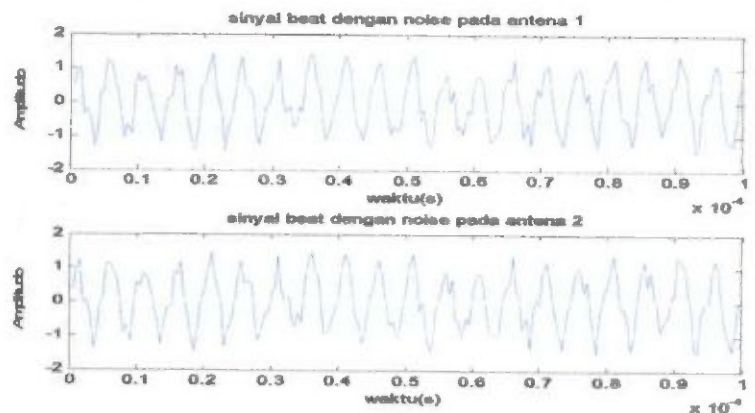
Perbedaan fasa antara dua sinyal terjadi karena adanya jarak ΔR yang dinyatakan sebagai sebagian kecil dari panjang gelombang λ radar.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta R = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \sin \theta$$

Proses pendektesian target dipengaruhi oleh SNR. Pemodelan sinyal beat berikutnya dengan menambahkan noise. Noise yang dibangkitkan dapat dilihat pada gambar 4.5. Sinyal beat yang dibangkitkan dengan noise dapat dilihat pada gambar 4.6.

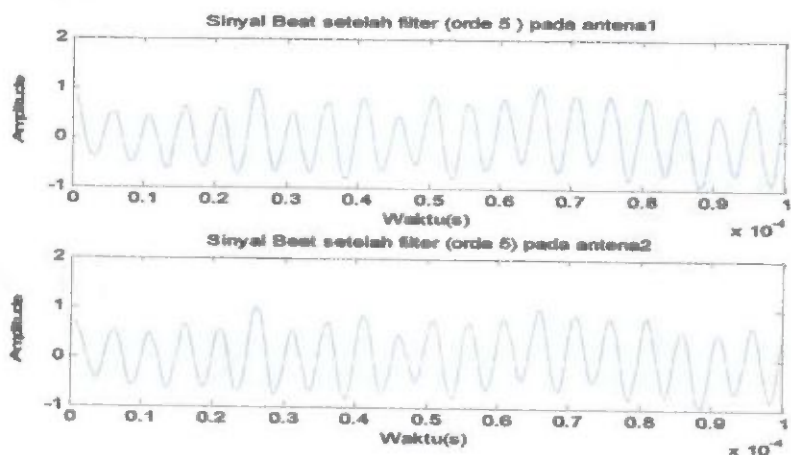


Gambar 4.5 Noise pada sinyal beat target pickup truk



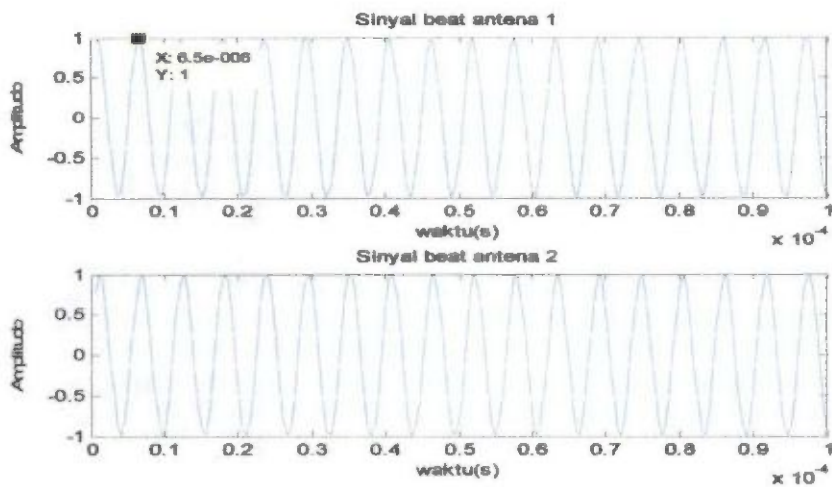
Gambar 4.6 Sinyal beat dengan noise target pickup truk

Sinyal beat pada gambar 4.2 dan 4.3 berbentuk sinusoidal periodik yang rata, tetapi pada gambar 4.6 sinyal beat rusak karena pengaruh noise. Untuk mengatasi noise supaya dalam pendektasian target tidak terjadi kesalahan maka dirancanglah filter. Filter yang digunakan dalam penelitian ini filter IIR yaitu chebychev tipe 1. Hasil sinyal beat setelah difilter pada gambar 4.7.

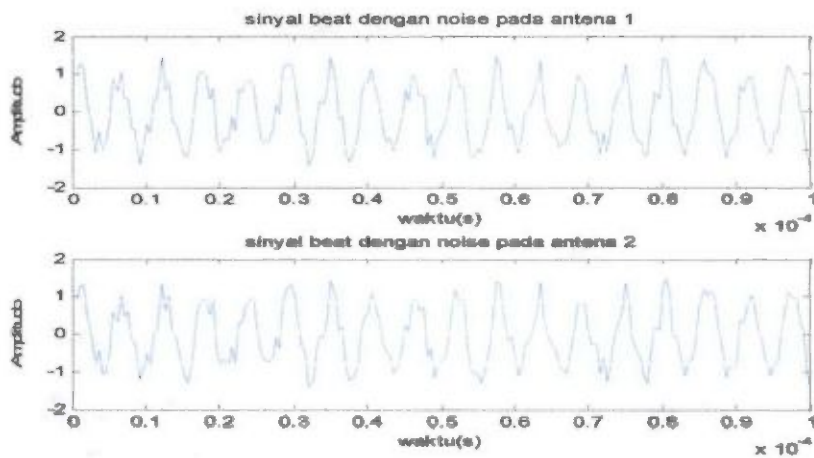


Gambar 4.7 Simulasi sinyal beat setelah filter untuk target pickup truk

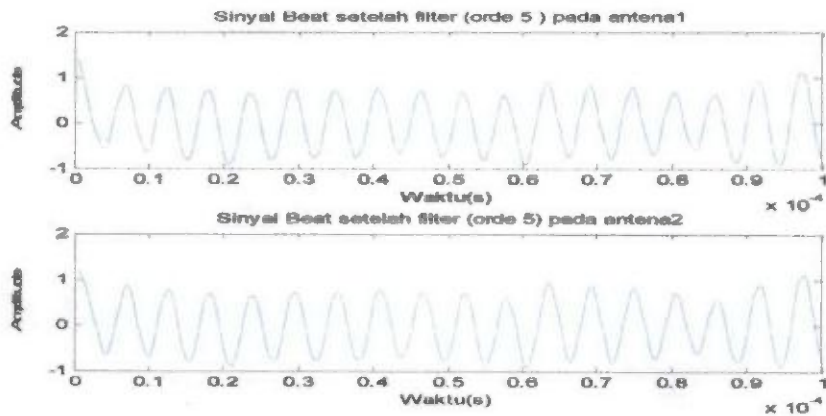
Pada penelitian ini, sistem FMCW radar yang dimodelkan dengan menggunakan 5 model target. Hasil simulasi sinyal beat berikutnya untuk target mobil, motor, sepeda dan orang.



Gambar 4.8 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk target mobil

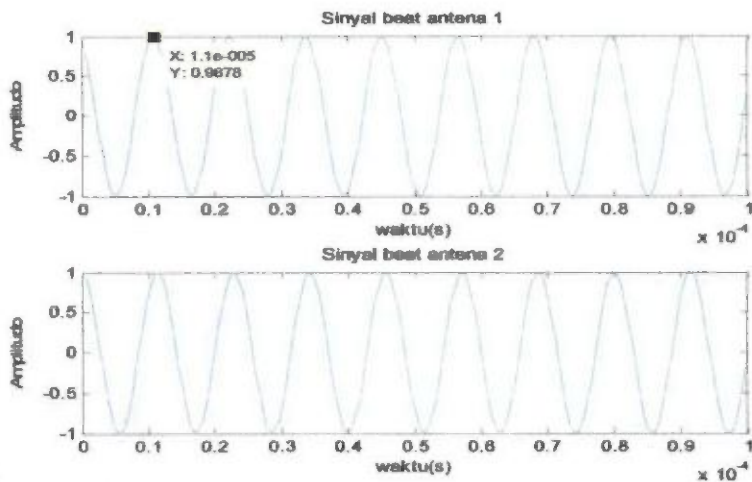


Gambar 4.9 Sinyal beat dengan noise target mobil

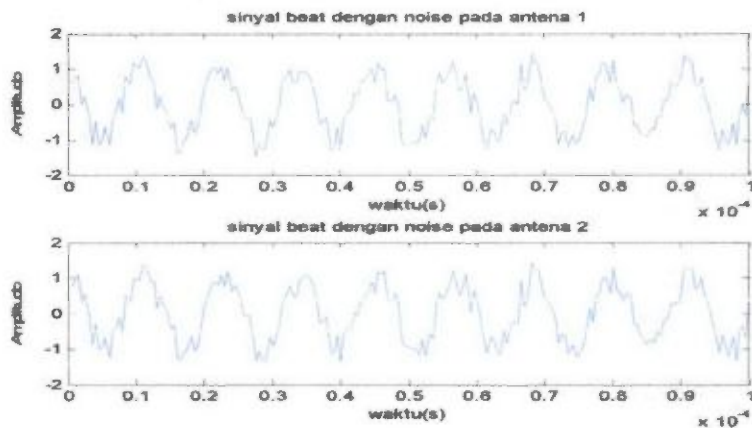


Gambar 4.10 Simulasi sinyal beat setelah filter untuk target mobil

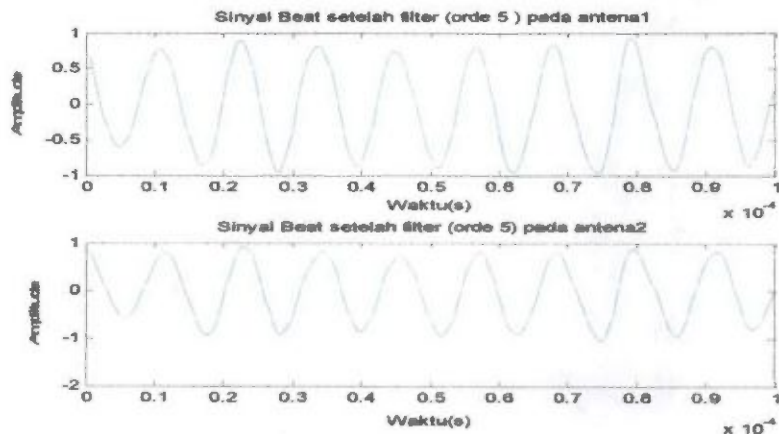
Analisa untuk sinyal beat pada target mobil. Sinyal beat dengan periode pergeseran sinyal $5,5 \times 10^{-6}$ s, sinyal beat ini memiliki frekuensi beat 181 kHz. Pada gambar diatas juga terjadi perbedaan fasa antara antenna penerima 1 dan 2.



Gambar 4.11 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk target motor

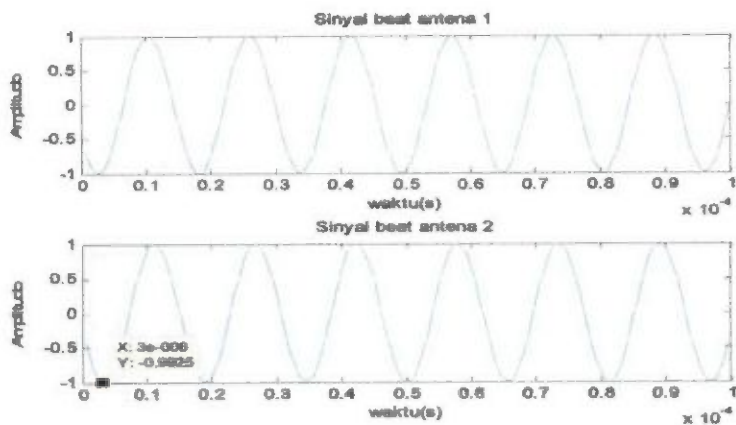


Gambar 4.12 Sinyal beat dengan noise target motor

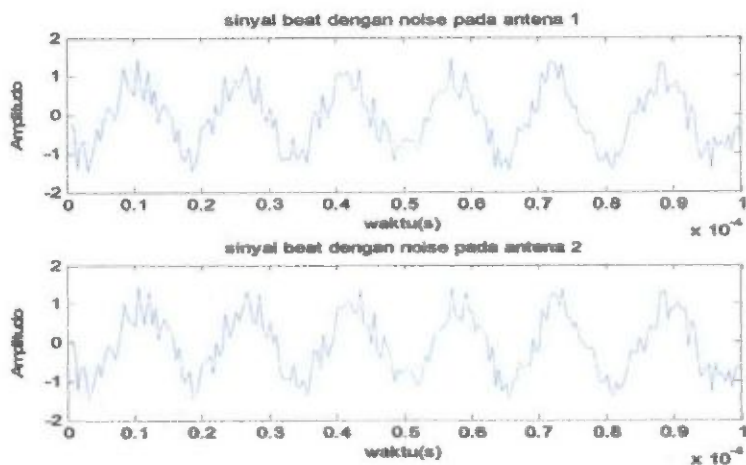


Gambar 4.13 Simulasi sinyal beat setelah filter untuk target motor

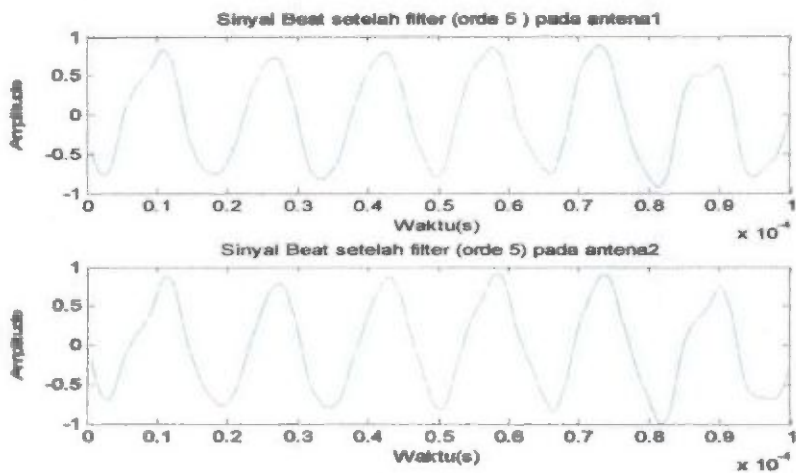
Analisa untuk sinyal beat pada target motor. Sinyal beat dengan periode pergeseran sinyal $11,5 \times 10^{-6}$ s, sinyal beat ini memiliki frekuensi beat 86,95 kHz. Pada gambar diatas juga terjadi perbedaan fasa antara antenna penerima 1 dan 2.



Gambar 4.14 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk target sepeda

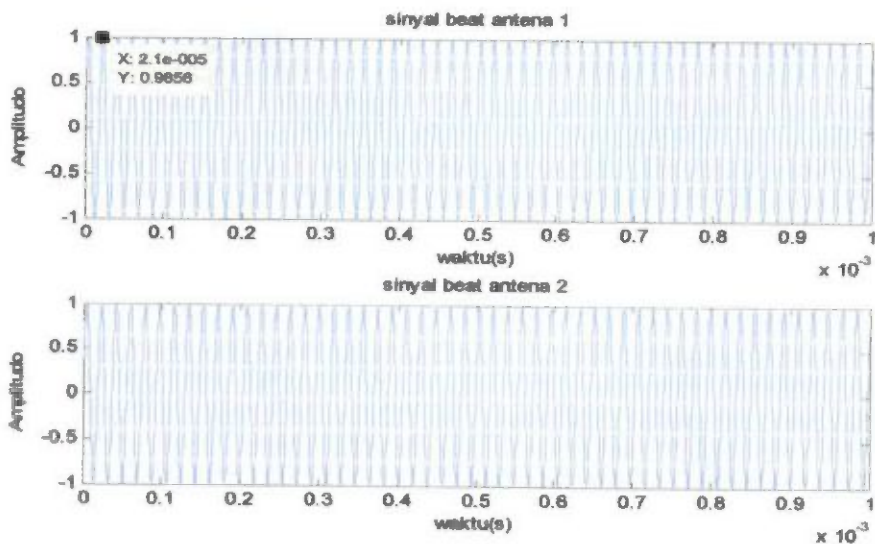


Gambar 4.15 Sinyal beat dengan noise target sepeda



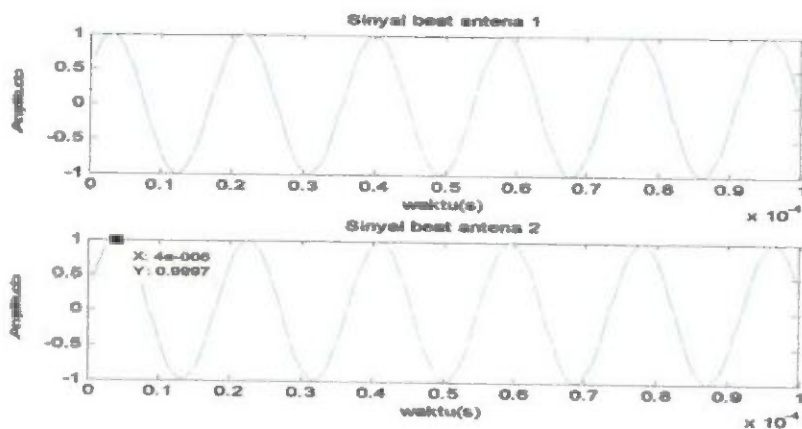
Gambar 4.16 Simulasi sinyal beat setelah filter untuk target sepeda

Analisa untuk sinyal beat pada target sepeda. Sinyal beat dengan periode pergeseran sinyal $15,5 \times 10^{-6}$ s, sinyal beat ini memiliki frekuensi beat 64.51 kHz. Pada gambar diatas juga terjadi perbedaan fasa antara antenna penerima 1 dan 2. Pada simulasi hasil sinyal beat untuk target mobil,motor dan sepeda diatas pada perbesaran 200 sample pertama. Untuk target orang kita amati dalam 1ms.

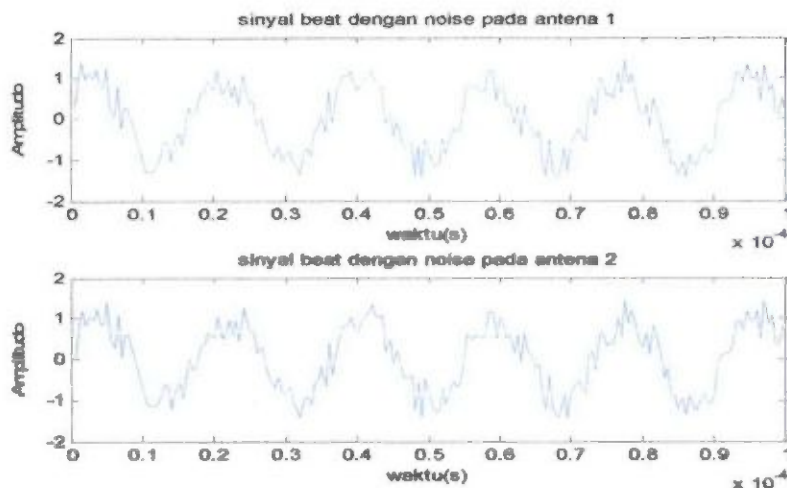


Gambar 4.17 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk target orang

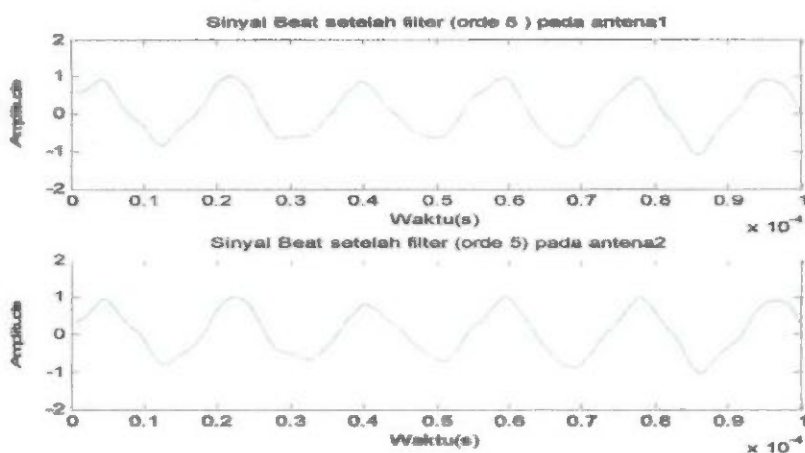
Hasil simulasi sinyal beat untuk target orang diamati dalam 1ms (2000 sample). Dalam 2000 sample ini terjadi 54 cycle. Untuk target orang bisa kita amati untuk 2000 sample karena jarak terpendek ke radar dibanding 4 target lainnya. Sehingga frekuensi sinyal beat yang dihasilkan juga rendah, dapat dilihat pada gambar 4.18.



Gambar 4.18 Perbesaran hasil sinyal beat untuk 200 sample pertama target orang



Gambar 4.19 Sinyal beat dengan noise target orang



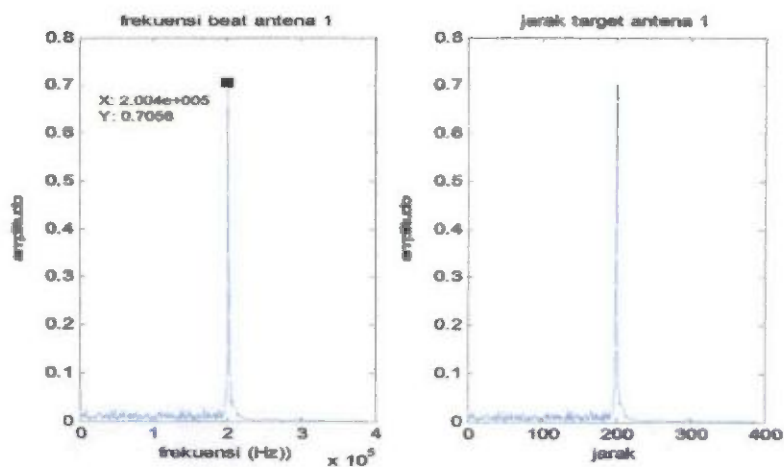
Gambar 4.20 Simulasi sinyal beat setelah filter untuk target orang

Analisa untuk sinyal beat pada target orang. Sinyal beat dengan periode pergeseran sinyal $18,5 \times 10^{-6}$ s, sinyal beat ini memiliki frekuensi beat 54.05 kHz. Pada gambar diatas juga terjadi perbedaan fasa antara antenna penerima 1 dan 2.

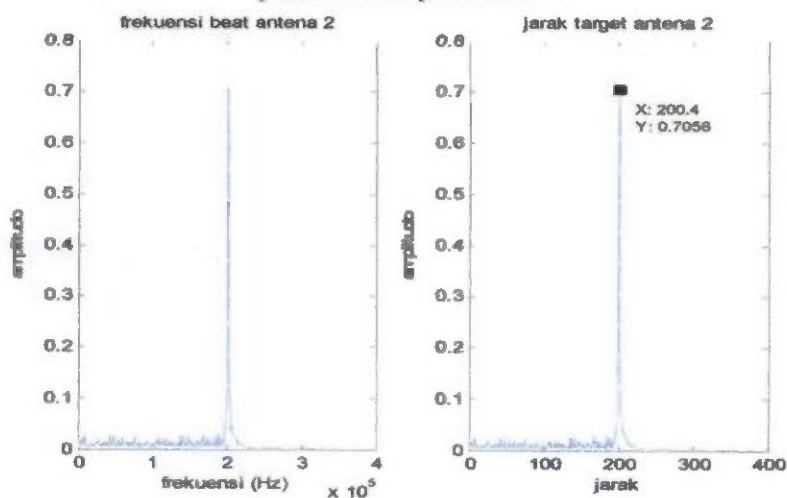
Analisis dari pengolahan sinyal beat sistem FMCW radar, sinyal beat berbentuk sinusoidal dengan pergeseran periode tetap. Pergeseran periode sinyal ini akan menunjukkan frekuensi beat. Sinyal beat ini diperoleh dari perkalian sinyal pancar dengan penerima dalam baseband.

$$s_{Mu}(t) = \exp[j\{2\pi f_0 t_d + 2\pi M u_d t - \pi M u_d^2\}] \quad t_d \leq t \leq NT$$

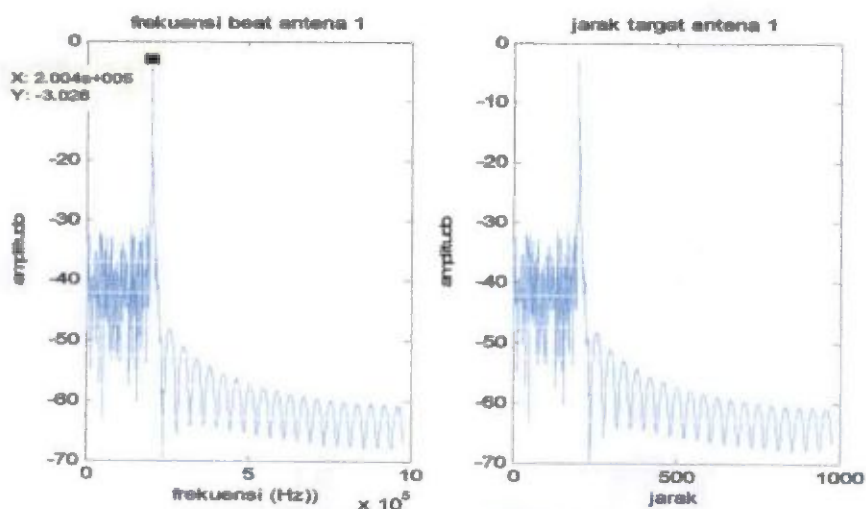
Terakhir, hasil sinyal beat diatas dilakukan transformasi fourier (dalam penelitian ini menggunakan FFT). Hasil sinyal di-FFT untuk mengamati deteksi target pemantulnya. Jumlah sample yang digunakan untuk FFT pada simulasi Matlab adalah 400000 sample.



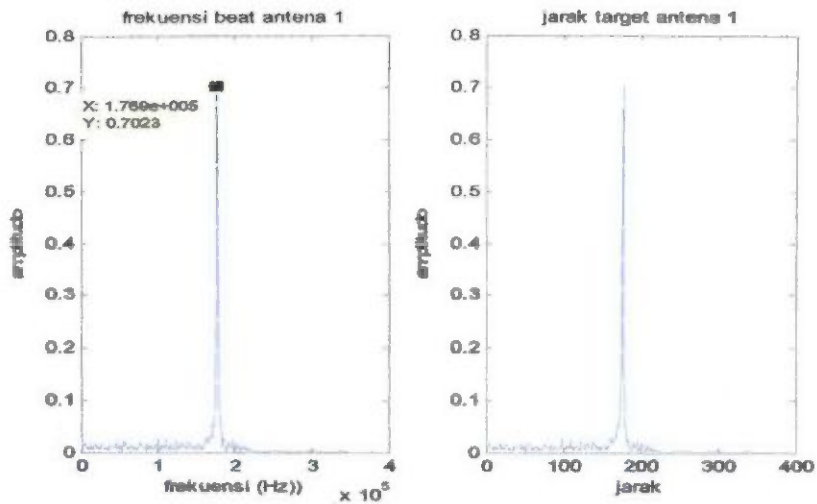
Gambar 4.21(a) Frekuensi beat dan jarak target pickup truk pada antenna penerima 1



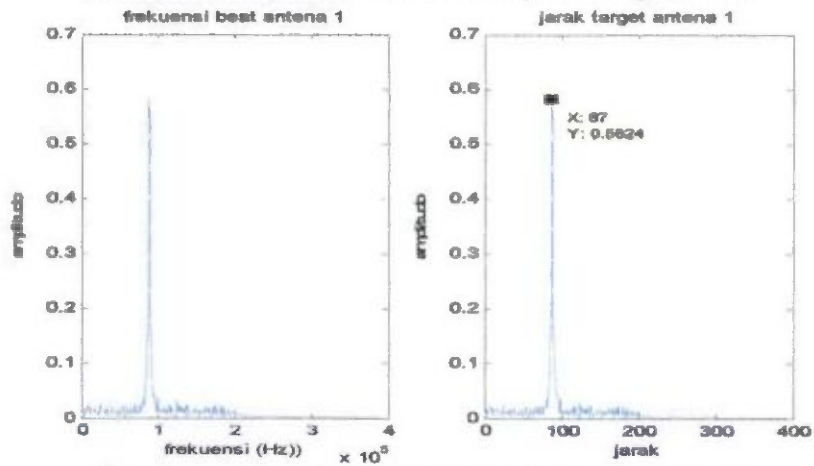
Gambar 4.21(b) Frekuensi beat dan jarak target pickup truk pada antenna penerima 2



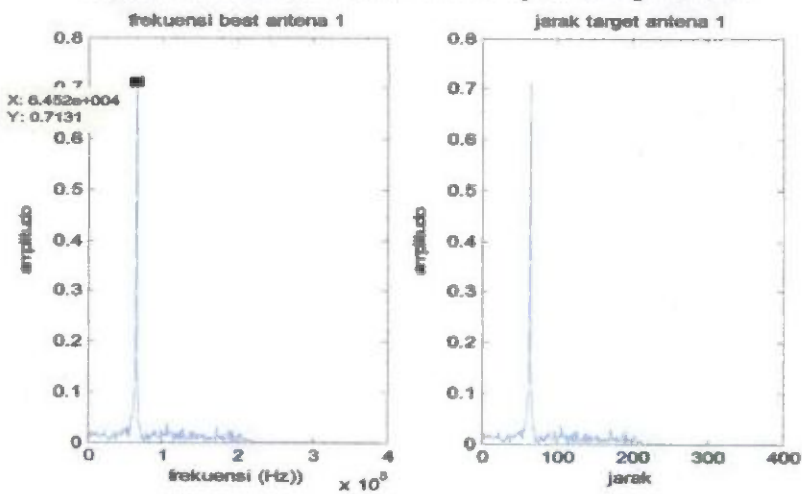
Gambar 4.22 Magnitudo frekuensi beat dan jarak target pickup truk pada antenna penerima 2



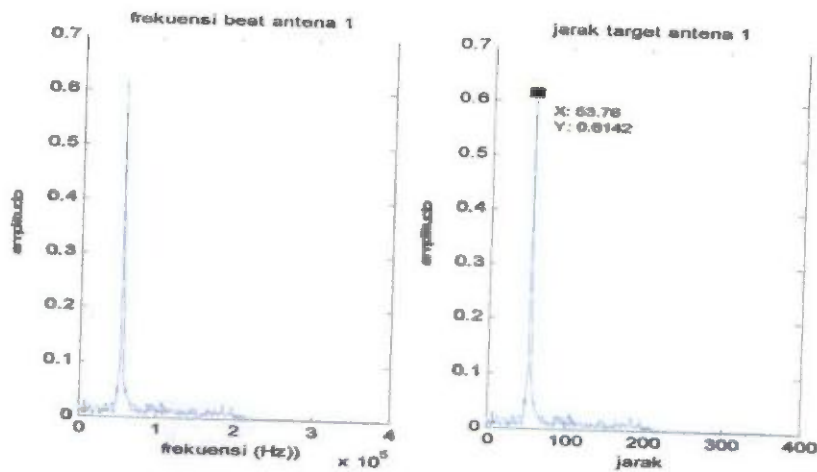
Gambar 4.23 Frekuensi beat dan jarak target mobil



Gambar 4.24 Frekuensi beat dan jarak target motor

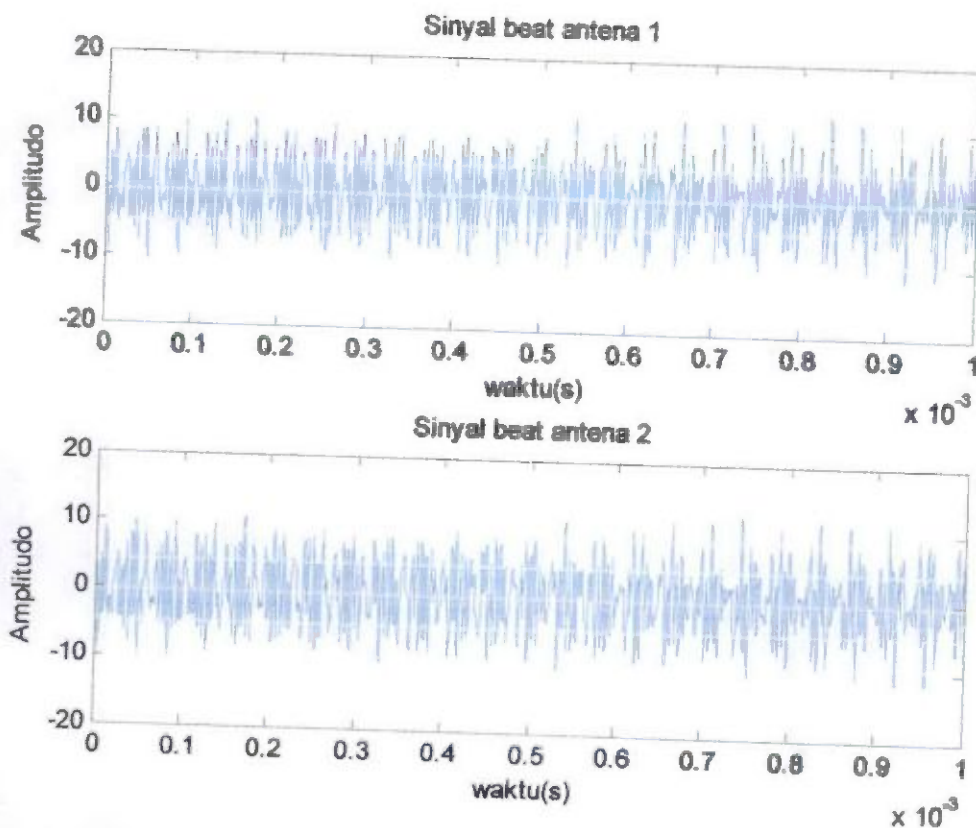


Gambar 4.25 Frekuensi beat dan jarak target sepeda

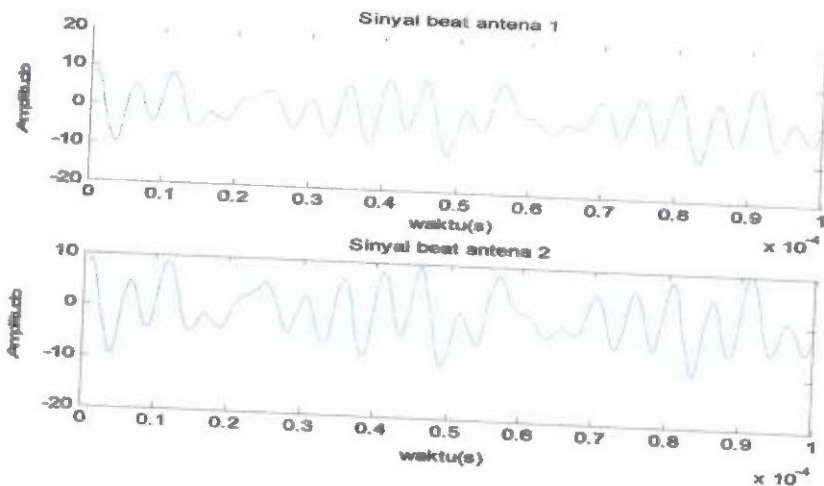


Gambar 4.26 Frekuensi beat dan jarak target orang

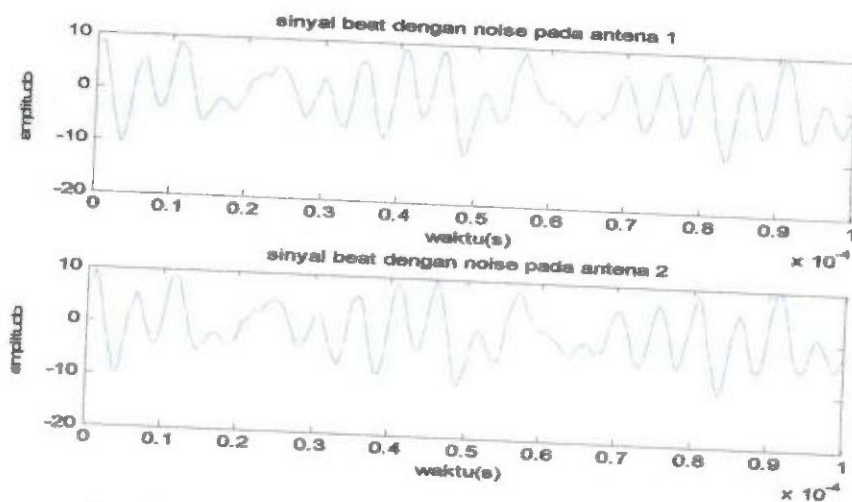
4.1.1.2 Skenario percobaan 2 untuk lima target



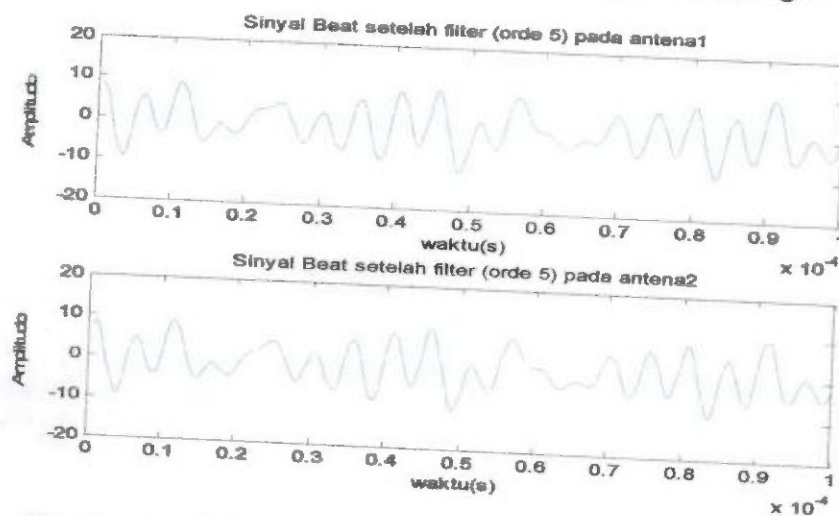
Gambar 4.27 Hasil simulasi Matlab sinyal beat untuk lima target



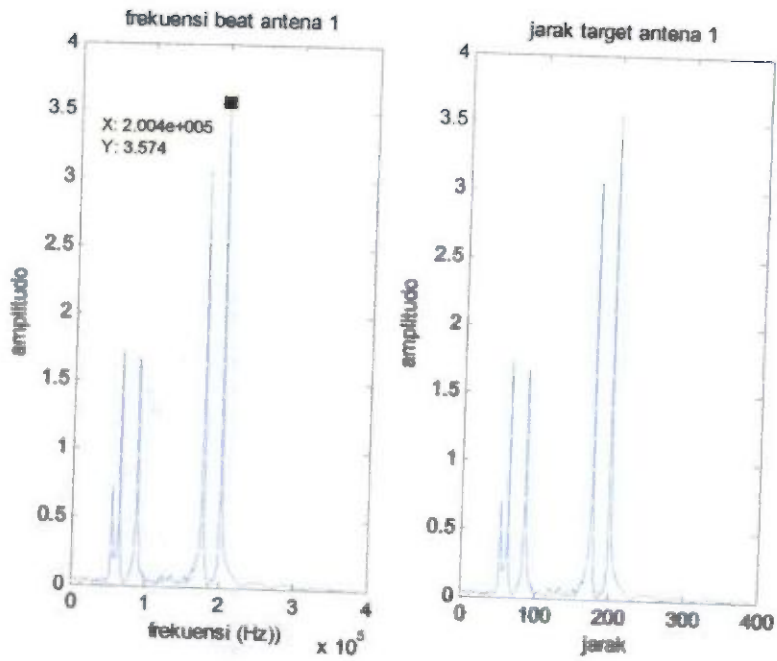
Gambar 4.28 Perbesaran hasil sinyal beat untuk 200 sample pertama
Pada lima target



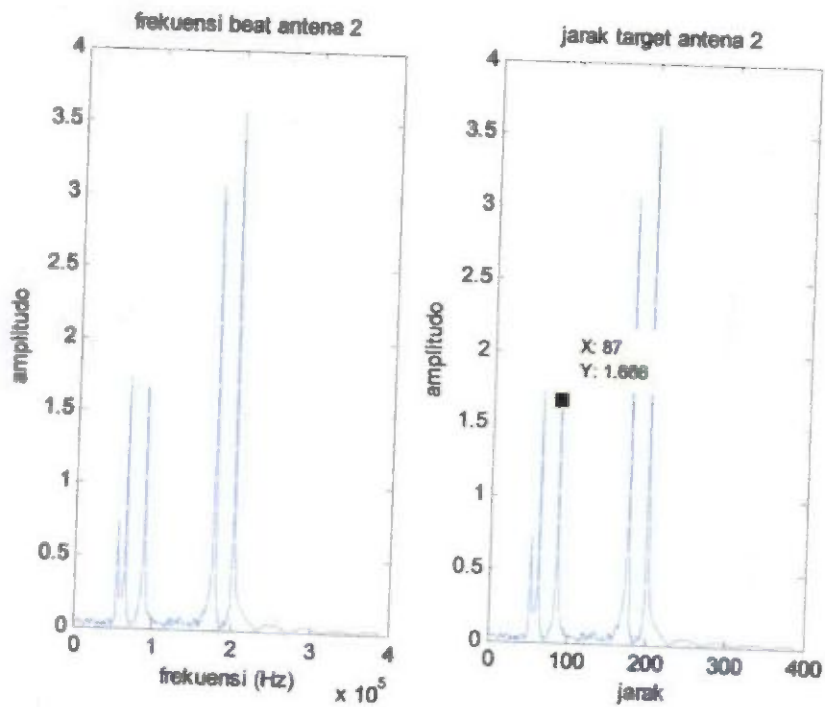
Gambar 4.29 Sinyal beat dengan noise pada lima target



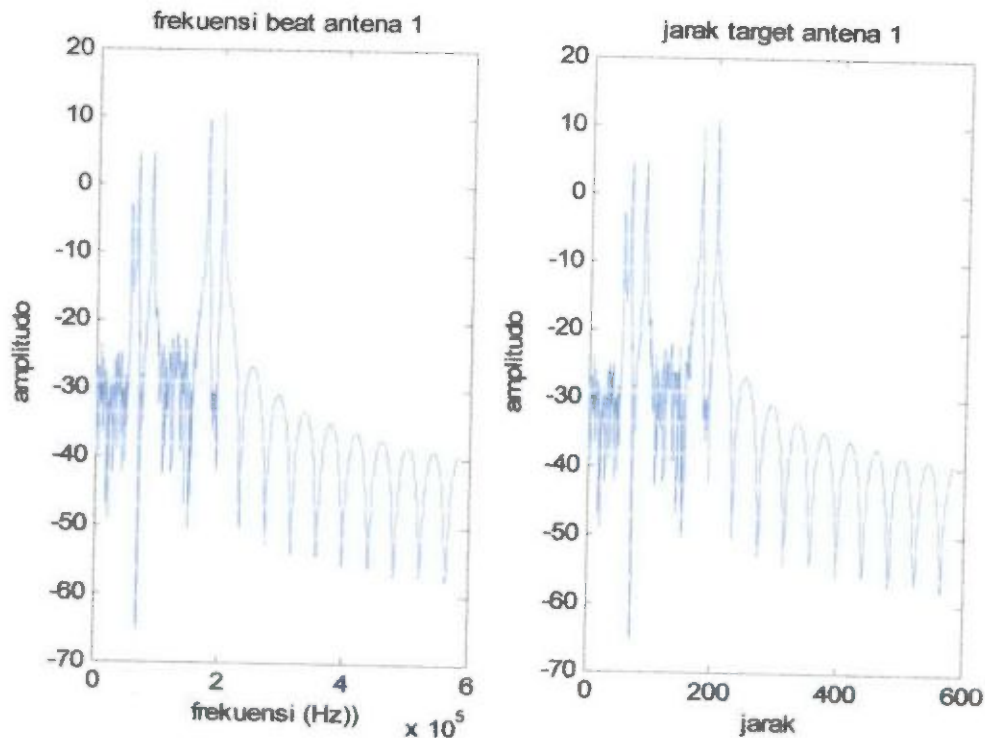
Gambar 4.30 Simulasi sinyal beat setelah filter pada lima target



Gambar 4.31 Frekuensi beat dan jarak target pada lima pada antenna penerima 1



Gambar 4.32 Frekuensi beat dan jarak target pada lima pada antenna penerima 2



Gambar 4.33 Magnitudo frekuensi beat dan jarak lima target pada antenna penerima 2

Analisis dari hasil simulasi matlab untuk deteksi target yaitu sinyal beat (penurunan teoritis radar FMCW) dan digabung dengan noise, sehingga diperoleh frekuensi beat dan jarak target. Kemampuan sistem radar FMCW untuk mendeteksi target tergantung pada SNR sinyal beat. Sinyal yang dipantulkan target yang bergerak menunjukkan adanya kehadiran suatu target yang memiliki karakteristik gerak dan Radar Cross Section. Sinyal yang mengalami pergeseran fasa ini mencapai batas tingkat deteksi sinyal pantul target pada output sistem Rx. Setelah kehadiran suatu objek diketahui dari sinyal pantulnya yang diterima bagian Rx, kemudian parameter gerak target diestimasi pada bagian pemrosesan sinyal. Parameter gerak target yaitu jarak dan kecepatan, dideteksi dengan cara mengetahui delay waktu propagasi sinyal dan pergeseran frekuensi sinyal.

Deteksi suatu sinyal pantul merupakan hubungan antara tingkat daya sinyal yang diterima oleh bagian Rx dengan suatu karakteristik gerak target. Level sinyal menentukan tingkat SNR pada proses deteksi. Hubungan level sinyal dan deteksi sinyal menunjukkan hubungan antara SNR sinyal pantul dengan fungsi probabilitas dari

deteksi sinyal P_D dan probabilitas false-alarm P_{FA} pada konteks karakteristik gerak target.

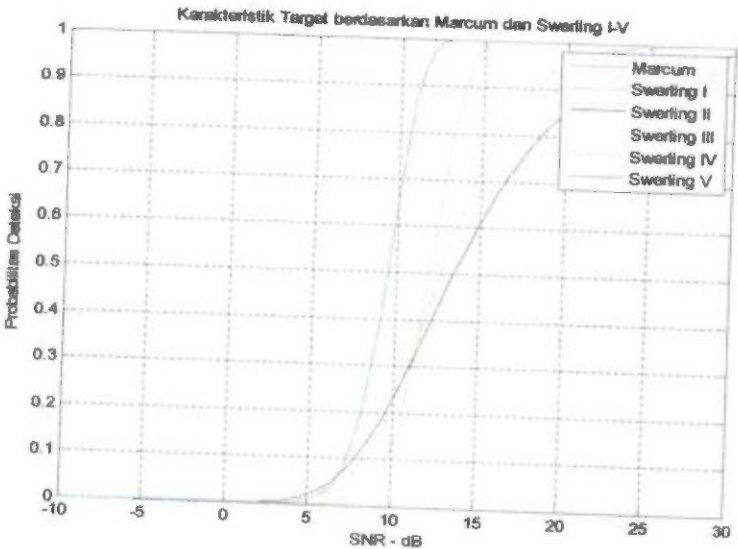
Pada proses deteksi, karakteristik objek yang digunakan adalah model fluktuasi RCS objek yang disusun oleh Marcum dan Swerling. Model ini mengklasifikasikan tingkah laku gerak yang berbeda-beda dari RCS suatu target. Hubungan probabilitas deteksi dan karakteristik gerak target berdasarkan SNR sinyal beat dapat dilihat pada tabel 4.1 sehingga diperoleh sinyal beat target.

Tabel 4.1. Probabilitas deteksi dan karakteristik gerak target berdasarkan SNR sinyal

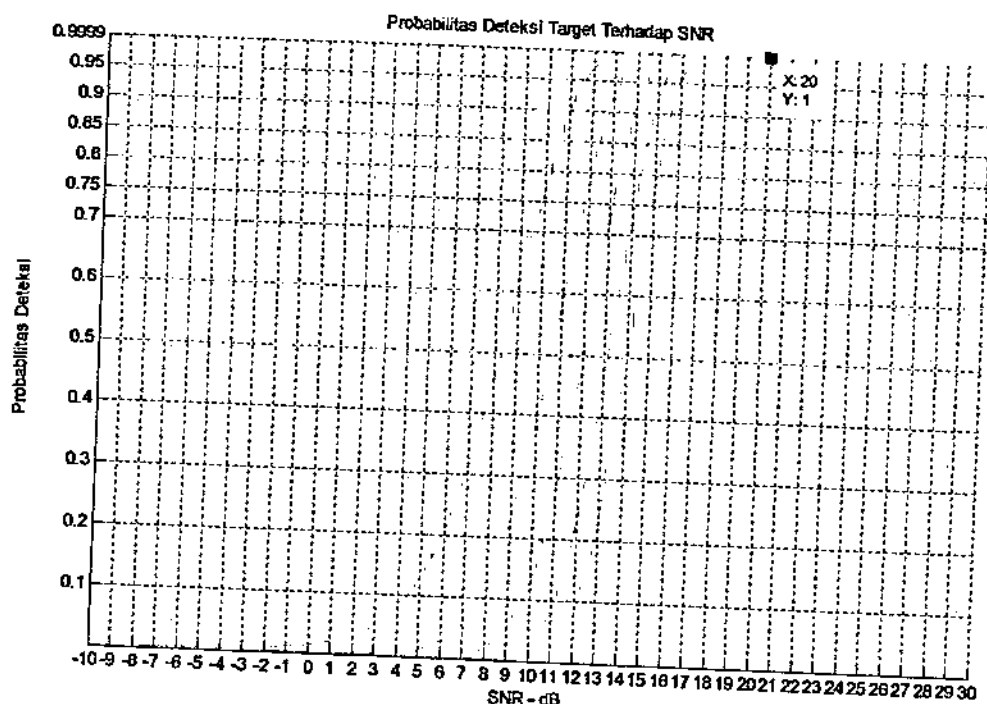
Karakteristik Target (model fluktuasi RCS)	SNR (dB)									
	13.5	14	15	16.5	17	20	30	40	50	60
Marcum	0.8303	0.9123	0.9873	0.9999	1	1	1	1	1	1
Swerling 5	0.9999	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Swerling 1	0.502	0.5395	0.6101	0.7026	0.7296	0.8325	0.984	0.9984	0.9998	1
Swerling 2	0.502	0.5395	0.6101	0.7026	0.7296	0.8325	0.984	0.9984	0.9998	1
Swerling 3	0.5902	0.64	0.7291	0.8326	0.8592	0.9349	0.9996	1	1	1
Swerling 4	0.5902	0.64	0.7291	0.8326	0.8592	0.9349	0.9996	1	1	1

Probabilitas deteksi target dengan SNR sinyal beat radar, dimana $P_{FA}=10^{-7}$

Tabel 4.1 diatas dengan asumsi probabilitas false alarm 10^{-7} . Perbandingan setiap model fluktuasi RCS terhadap SNR diatas dapat dilihat pada lampiran D. Sehingga SNR sinyal beat yang digunakan pada penelitian ini 20 dB, dimana karakteristik target dimodelkan dengan model fluktuasi RCS swerling 5 (tanpa fluktuasi) dapat dilihat pada gambar 4.34 dan model marcum gambar 4.35.



Gambar 4.34 Probabilitas deteksi dan SNR sinyal berdasarkan karakteristik target swerling 5, $P_{FA}=10^{-7}$



Gambar 4.35 Probabilitas deteksi target terhadap SNR untuk beberapa nilai P_{FA}

Berdasarkan gambar 4.34 dan 4.35 memberikan tampilan untuk berbagai syarat sistem radar berdasarkan SNR yang dibutuhkan. Jika diinginkan probabilitas false alarm rendah (waktu rata-rata false alarm meningkat), maka SNR yang dihasilkan lebih tinggi untuk probabilitas deteksi sama. Hasil grafik probabilitas deteksi target untuk SNR sinyal yang dibutuhkan sesuai dengan persamaan berikut :

$$SNR = \left(\sqrt{\ln\left(\frac{1}{P_{FA}}\right)} - \operatorname{erfc}^{-1}(2P_D) \right)^2 - \frac{1}{2}$$

Persamaan diatas disubstitusi ke persamaan radar sehingga dihasilkan persamaan jarak maksimum radar secara eksplisit dimana terkandung realibilitas deteksi:

$$R_{mak, P_D, P_{FA}, \sigma} = \left[\frac{G_a G_r P_t \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 B F \left\{ \left(\sqrt{\ln\left(\frac{1}{P_{FA}}\right)} - \operatorname{erfc}^{-1}(2P_D) \right)^2 - \frac{1}{2} \right\} L} \right]^{1/4}$$

Persamaan diatas masih merupakan perkiraan / estimasi jarak maksimum karena sinyal terima dan noise memiliki fluktuasi statistik. Efek dari fluktuasi dapat dikurangi dengan teknik *windowing*. Berdasarkan persamaan radar diatas, nilai RCS target konstan. Sebuah target RCS bervariasi terhadap aspek sudut, frekuensi dan polarisasi.

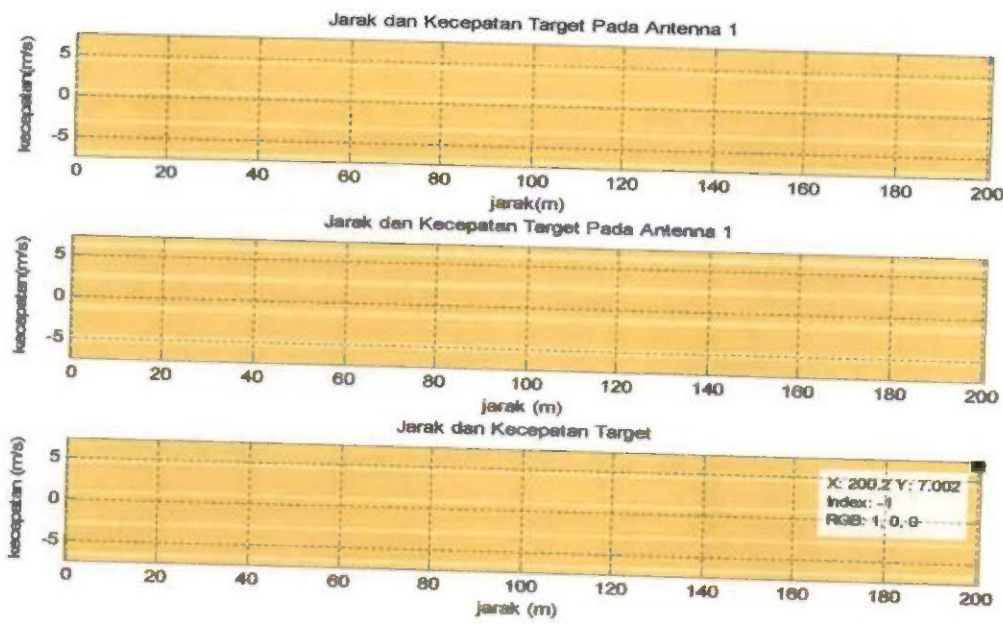
Bentuk persamaan jangkauan radar juga mengabaikan fluktuasi sinyal terima, sehingga parameter probabilitas deteksi dan deteksi false alarm diperlukan untuk mendapatkan SNR minimum. Berdasarkan nilai SNR sinyal maka diperoleh batas jangkauan target dapat dilihat pada lampiran B, dan nilai jarak deteksi target terhadap SNR yang berbeda sesuai RCS target dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Deteksi target berdasarkan SNR dan frekuensi beat sinyal

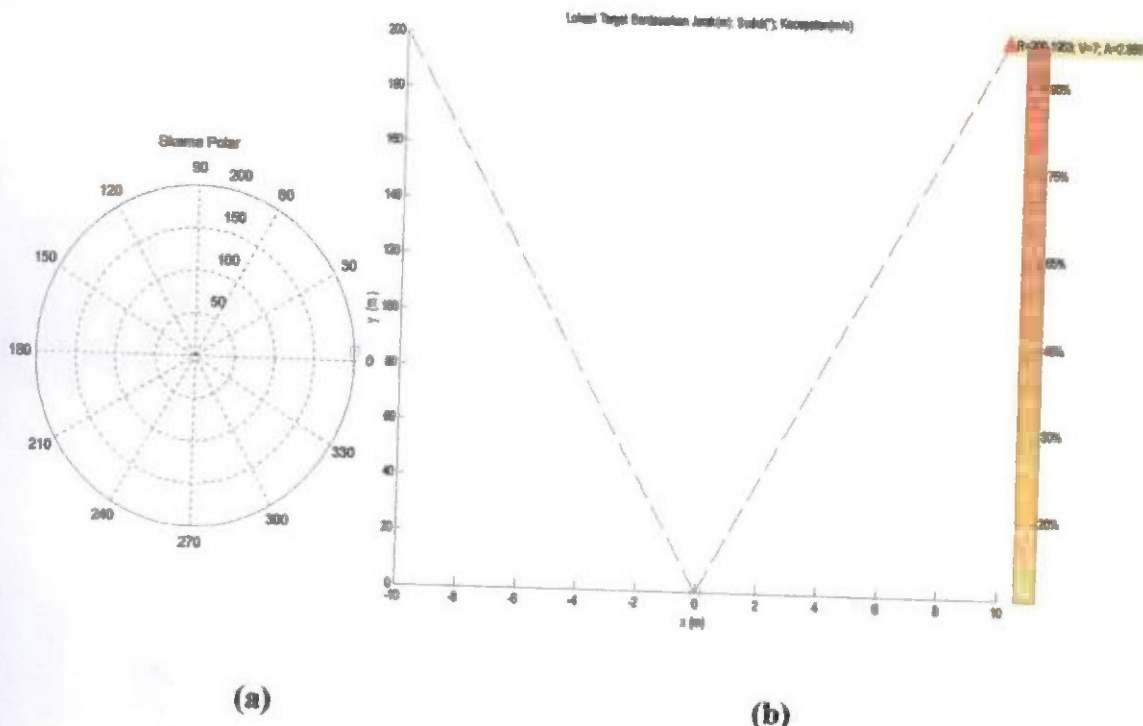
Target	SNR (dB)	Frekuensi Beat (Hz)	Jarak (m)
Pickup Truk	20	200.4×10^3	200.4
	30	117.3×10^3	117.3
	40	65.49×10^3	65.49
	50	37.17×10^3	36.17
	60	20.53×10^3	20.53
Mobil	20	176.9×10^3	176.9
	30	96.77×10^3	96.77
	40	55.72×10^3	55.72
	50	30.3×10^3	30.3
	60	18.57×10^3	18.57
Motor	20	87.98×10^3	87.98
	30	48.88×10^3	48.88
	40	27.37×10^3	27.37
	50	15.64×10^3	15.64
	60	9.775×10^3	9.775
Sepeda	20	64.52×10^3	64.52
	30	36.17×10^3	36.17
	40	20.53×10^3	20.53
	50	11.73×10^3	11.73
	60	6.834×10^3	6.834
Orang (man)	20	53.76×10^3	53.76
	30	30.3×10^3	30.3
	40	17.6×10^3	17.6
	50	9.775×10^3	9.775
	60	5.865×10^3	5.865

4.1.2 Pengolahan sinyal untuk tracking target

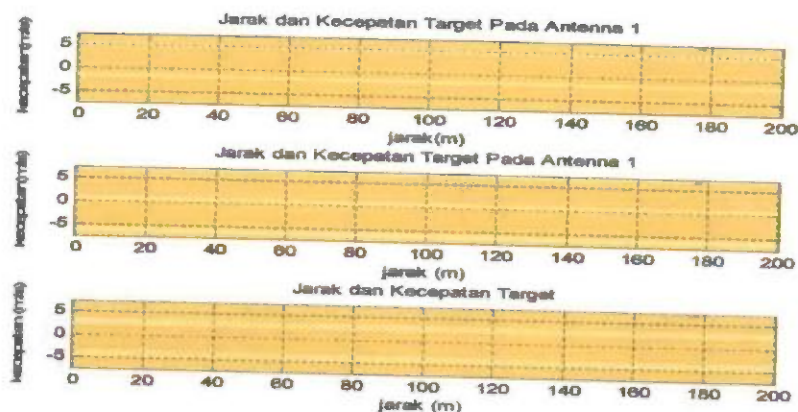
4.1.2.1 Skenario percobaan 1 untuk satu target



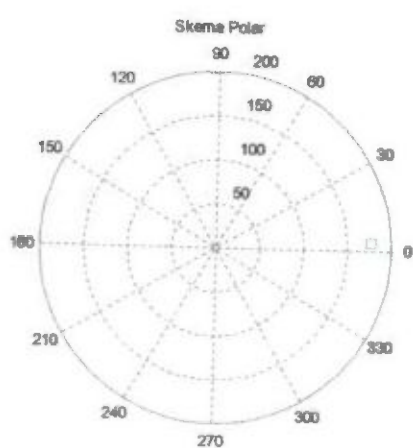
Gambar 4.36 Hasil simulasi matlab posisi target pickup truk berdasarkan jarak-kecepatan



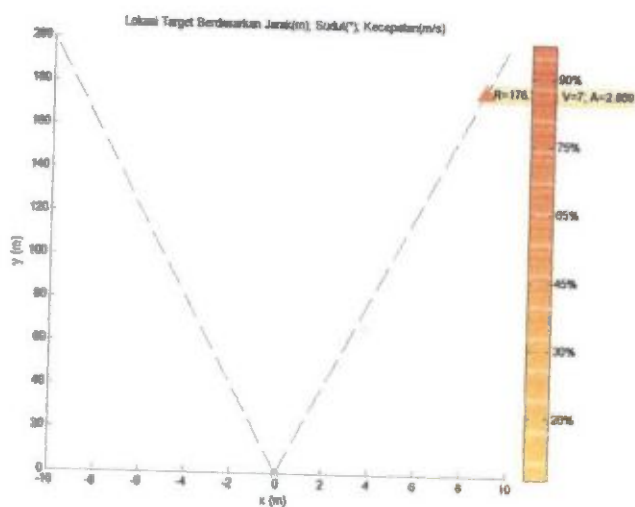
Gambar 4.37(a) Hasil simulasi matlab posisi target pickup truk berdasarkan jarak-sudut (b) Lokasi target pickup truk



Gambar 4.38 Hasil simulasi matlab posisi target mobil berdasarkan jarak-kecepatan

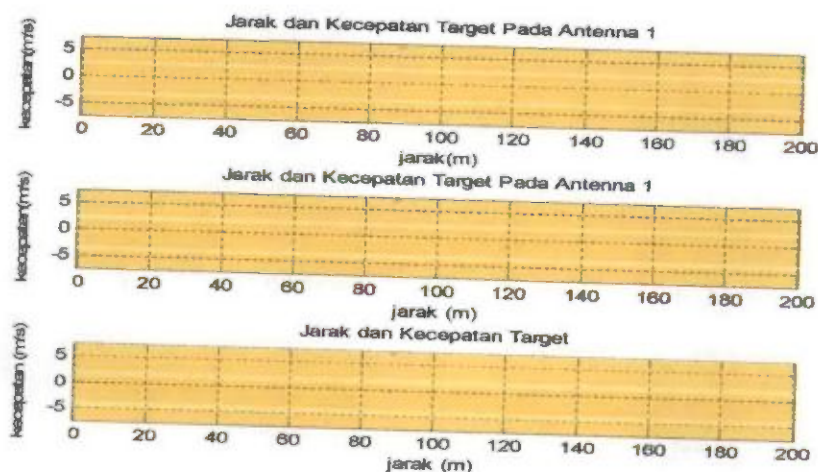


(a)

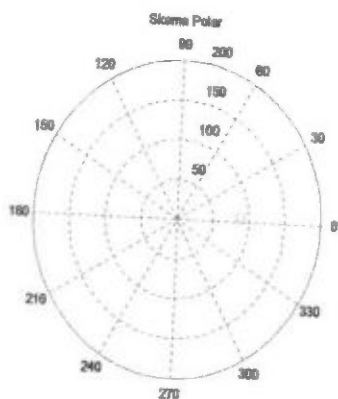


(b)

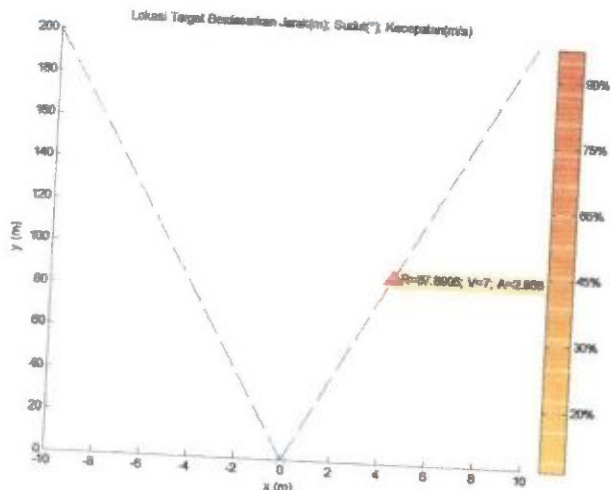
Gambar 4.39(a) Hasil simulasi matlab posisi target mobil berdasarkan jarak-sudut (b) Lokasi target mobil



Gambar 4.40 Hasil simulasi matlab posisi target motor berdasarkan jarak-kecepatan



(a)

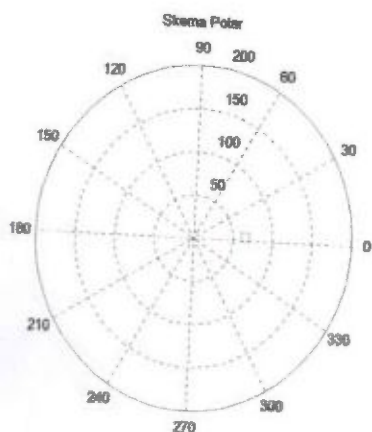


(b)

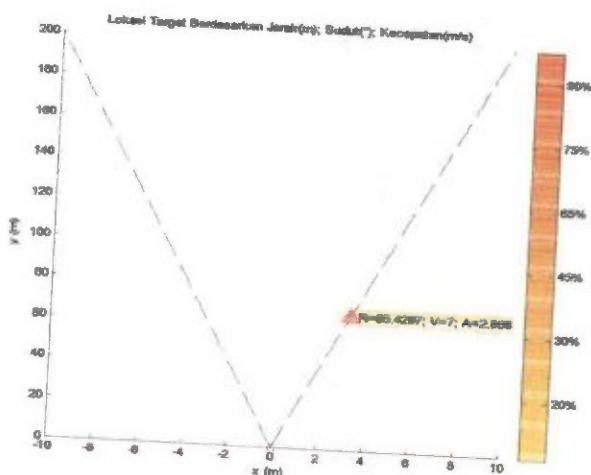
Gambar 4.41(a) Hasil simulasi matlab posisi target motor berdasarkan jarak-sudut (b) Lokasi target motor



Gambar 4.42 Hasil simulasi matlab posisi target sepeda berdasarkan jarak-kecepatan

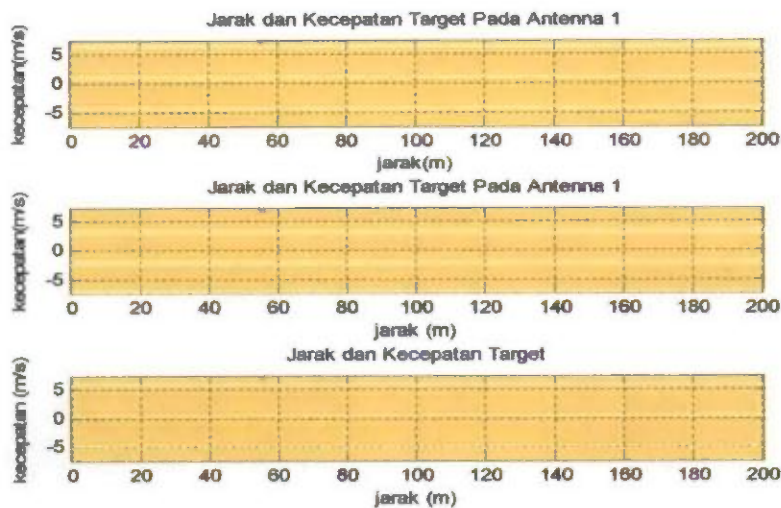


(a)

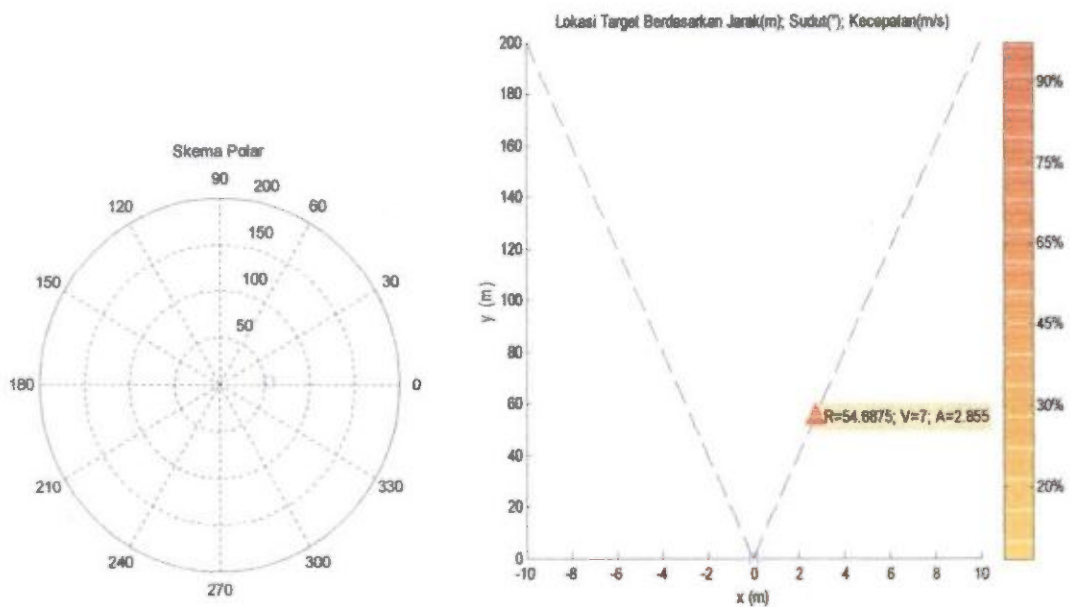


(b)

Gambar 4.43(a) Hasil simulasi matlab posisi target sepeda berdasarkan jarak-sudut (b) Lokasi target sepeda



Gambar 4.44 Hasil simulasi matlab posisi target orang berdasarkan jarak-kecepatan



Gambar 4.45(a) Hasil simulasi matlab posisi target orang berdasarkan jarak-sudut (b) Lokasi target orang

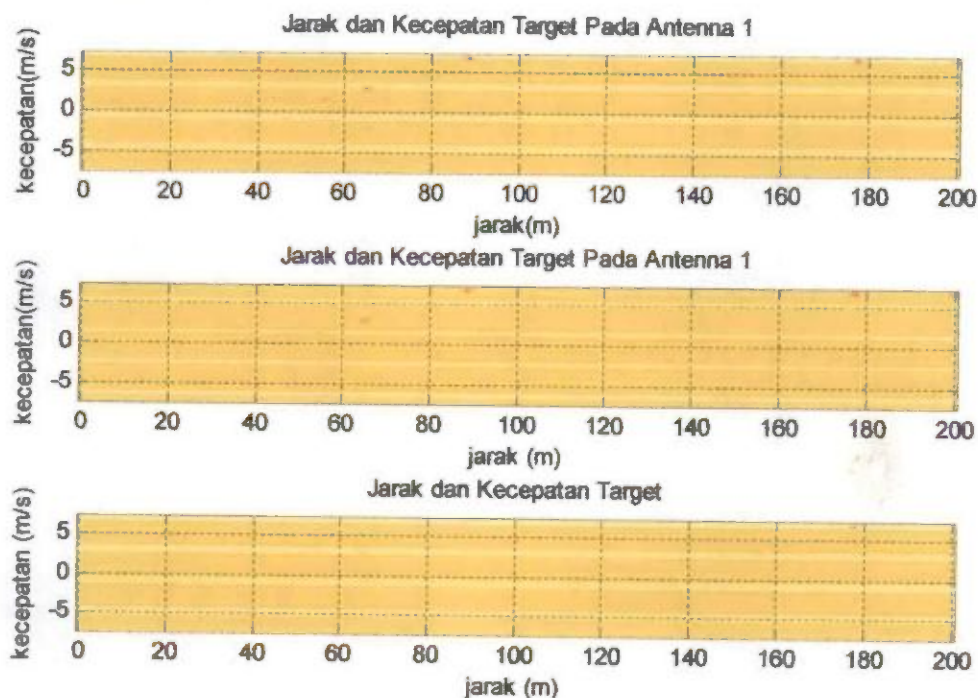
Analisis hasil simulasi matlab untuk tracking target pada percobaan satu target, direalisasikan dalam lokasi posisi target. Informasi yang dibutuhkan berupa jarak, kecepatan dan sudut untuk target bergerak. Skema lokasi dari hasil tracking target ditunjukkan pada gambar 3.37, 3.39, 3.41, 3.43 dan 3.45. Hasil analisis dari sinyal FMCW radar 2-D diperoleh nilai jarak-kecepatan sekaligus, sehingga proses tracking target ditampilkan dalam dua skema lokasi target. Pertama lokasi target masing-masing berdasarkan jarak dan sudut, masing-masing target diwakili dengan kotak biru (skema

polar). Kedua skema lokasi target dengan semua parameter yaitu R=jarak target, A=sudut , dan V=kecepatan target. Dengan skema yang ditunjukkan pada gambar dimaksudkan untuk menggambarkan semua informasi tersedia, masing-masing target diwakili dengan segitiga. Selain itu, garis putus-putus berwarna hitam merupakan daerah lokalisasi yang tersedia yang dibatasi oleh antena-antena penerima. Dalam skema ini ditampilkan sebuah bar warna yang mewakili fungsi penyebaran titik atau point spread function (PSF) sebagai metrik kualitas pencitraan, sehingga warna dan ukuran masing-masing segitiga tergantung pada deteksi intensitasnya dapat dilihat pada gambar 4.48 untuk lima target. Batas sudut yang digunakan pada simulasi untuk menentukan lokasi target atau daerah aperture target yaitu:

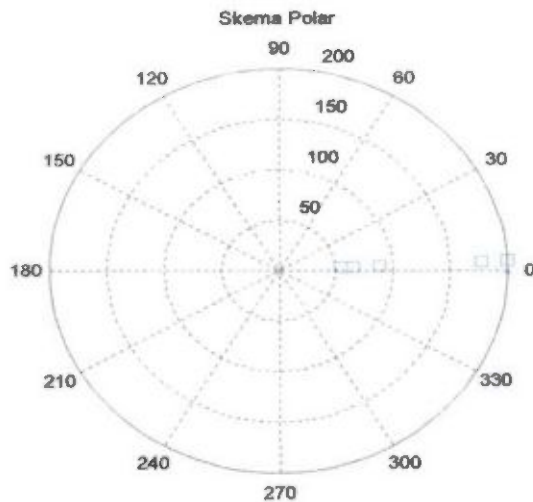
$$\lambda = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^9} = 0.03m$$

$$\theta_{\max/\min} = \pm \arcsin\left(\frac{\lambda}{2.d}\right) = \pm \arcsin\left(\frac{0.03}{2 \times 0.1337}\right) = 6.44^\circ$$

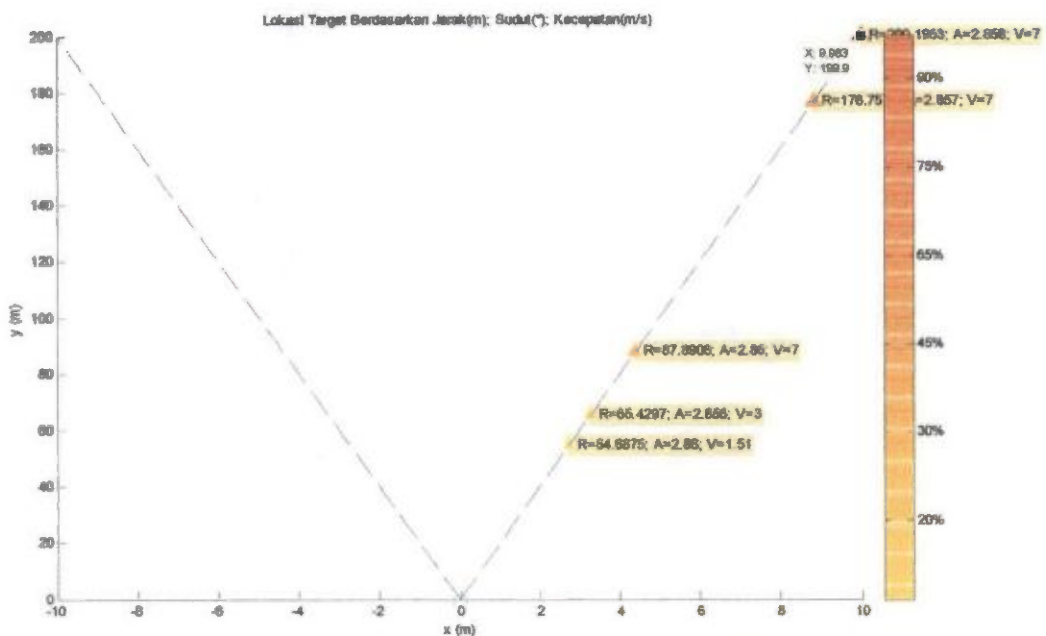
4.1.2.2 Skenario percobaan 2 untuk lima target



Gambar 4.46 Hasil simulasi matlab posisi target berdasarkan jarak-kecepatan



Gambar 4.47 Hasil simulasi matlab posisi target berdasarkan jarak-sudut



Gambar 4.48 Lokasi posisi lima target dengan RCS berbeda

Hasil simulasi untuk tracking target, menggambarkan bagaimana sistem FMCW radar doppler digabung dengan sistem monopulse radar perbedaan fasa. Pemodelan sistem radar yang dirancang sesuai metode diatas menghasilkan sinyal-sinyal beat yang dapat menentukan lokasi target dari informasi jarak,kecepatan dan sudut baik untuk satu target maupun lima target. Hasil dari FFT 2D atas setiap matriks sinyal beat ditunjukkan pada gambar 4.48 untk masing-masing antenna penerima. Sedangkan gambar hasil perkalian spektrum antenna penerima 1 dan antenna penerima 2 dimana setiap target

diwakili oleh jarak dan kecepatan (doppler). Dalam gambar 4.46 plot grafik ketiga ditunjukkan bahwa kedua spektrum terdeteksi sangat mirip.

Analisa sinyal beat yang diperoleh sesuai nilai SNR sinyal sebagai batas jangkauan target. Berdasarkan tabel SNR sinyal yang dilakukan untuk simulasi tracking target yaitu 20 dB (pada jarak maksimal masing-masing target) sampai 60 dB (batas jangkauan target). Nilai SNR diatas 20 dB dengan probabilitas deteksi target diperoleh 100%, dimana kondisi RCS yang dimodelkan konstan (tanpa fluktuasi). Hasil percobaan tracking target untuk SNR yang berbeda dapat dilihat pada table 4.3.

Tabel 4.3 Percobaan tracking target untuk beberapa SNR sinyal

Target	SNR (dB)	Jarak (m)	Kecepatan(m/s)	Sudut($^{\circ}$)
Pickup Truk RCS=200	20	200.1953	7	2.857
	30	118.1641	7	2.857
	40	66.4063	7	2.853
	50	37.1094	7	2.846
	60	21.4844	7	2.835
Mobil RCS=100	20	176.7578	7	2.859
	30	97.6563	7	2.854
	40	56.6406	7	2.851
	50	31.25	7	2.844
	60	19.5313	7	2.83
Motor RCS=6	20	87.8906	7	2.858
	30	48.8281	7	2.849
	40	28.3203	7	2.842
	50	16.6016	7	2.8427
	60	9.7656	7	2.807
Sepeda RCS=2	20	65.4297	7	2.857
	30	37.1094	7	2.854
	40	21.4844	7	2.85
	50	12.6953	7	2.843
	60	7.8125	7	2.83
Orang (man) RCS=1	20	54.6875	1.51	2.872
	30	31.25	1.51	2.857
	40	17.5781	1.51	2.854
	50	10.7422	1.51	2.85
	60	5.8594	1.51	2.839

Pemodelan simulasi sistem radar FMCW ini mampu mendeteksi dan tracking target dengan resolusi jarak 1m dan resolusi angular pada tabel 4.4. Resolusi jarak dan resolusi angular diperlukan untuk membedakan antara dua target yang berdekatan. Resolusi angular bergantung pada kecepatan, lebar pulsa dan jarak. Semakin besar jaraknya, semakin besar resolusi angularnya. Resolusi angular berhubungan erat dengan beam width dari antenna yang digunakan, semakin sempit beam width antenna yang digunakan semakin tinggi pula resolusi angularnya dihasilkan.

Tabel 4.4 Resolusi jarak dan angular target

Target	Jarak Mak. (m)	Resolusi Jarak	Resolusi Angular	
		(ΔR) m	Elevasi $(\Delta S_{AE})^0$	Azimut $(\Delta S_{Az})^0$
Truk	200	1	8.027	19.96 (9.98)
Mobil	176	1	7.563	17.6 (8.8)
Motor	87	1	3.492	8.6(4.3)
Sepeda	64	1	2.568	6.4(3.2)
Orang	54	1	2.167	5.4(2.7)

Pada tesis ini, sistem tracking target untuk percobaan satu target maupun lima target dengan beamwidth antenna 5.72^0 dan jarak antara dua antenna penerima 0.1337 m atau 13.37 cm dapat dilihat pada lampiran E dan F. Berdasarkan perancangan parameter sistem radar FMCW , desain antenna dan lokasi radar, maka diperoleh model-model target pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Model-model target

Jenis Target	Model Target	Jarak R	Kecepatan V	Sudut A	Deteksi		
					R	V	A
Truk	Truk1	200	7	2.86	200.1953	7	2.859
	Truk2	190	7	3	191.4063	6.99	3
	Truk3	180	7	3.18	181.6406	6.99	3.18
	Truk4	160	7	3.57	161.1328	6.99	3.57
	Truk5	140	7	4.09	141.6016	6.99	4.09
	Truk6	120	7	4.77	121.0938	6.98	4.77
	Truk7	100	7	5.72	101.5625	6.97	5.72
	Truk8	89	7	6.43	89.8438	6.97	6.43
	Truk9	190	-7	-3	191.4297	-6.98	-2.991
	Truk10	120	-5	-4.77	121.0938	-4.97	-4.775
Mobil	Mobil1	176	7	2.86	176.7578	7	2.858
	Mobil2	170	7	2.97	170.8984	6.99	2.97

	Mobil3	150	7	3.36	151.3672	6.99	3.36
	Mobil4	130	7	3.88	130.8594	6.99	3.888
	Mobil5	120	7	4.2	121.0938	6.99	4.192
	Mobil6	110	7	4.58	111.3281	6.99	4.574
	Mobil7	90	7	5.6	90.8203	6.99	5.591
	Mobil8	79	7	6.39	80.0781	6.97	6.337
	Mobil9	150	-5	-3.36	151.3672	-4.98	-3.359
	Mobil10	90	-6	-5.6	90.8203	-5.96	-5.606
Motor	Motor1	87	7	2.86	87.8906	7	2.855
	Motor2	80	7	3.08	81.0547	6.99	3.072
	Motor3	75	7	3.29	76.1719	6.99	3.284
	Motor4	70	7	3.52	71.2891	6.99	3.51
	Motor5	65	7	3.79	66.4063	6.99	3.773
	Motor6	60	7	4.11	61.5234	6.99	4.089
	Motor7	50	7	4.93	50.7813	6.98	4.91
	Motor8	39	7	6.32	40.0391	6.97	6.292
	Motor9	70	-6.5	-3.52	71.2891	-6.48	-3.541
	Motor10	80	-5	-3.08	81.0547	-4.99	-3.086
Sepeda	Sepeda1	64	3	2.86	65.4297	3	2.86
	Sepeda2	60	3	3.06	61.5234	3	3.055
	Sepeda3	55	3	3.33	55.6641	3	3.329
	Sepeda4	50	3	3.67	50.7813	3	3.683
	Sepeda5	45	3	4.08	45.8984	3	4.075
	Sepeda6	40	3	4.58	41.0156	3	4.568
	Sepeda7	35	3	5.24	36.1328	3	5.231
	Sepeda8	29	3	5.56	30.2734	2.99	6.319
	Sepeda9	55	-3	-3.33	55.6641	-2.99	-3.334
	Sepeda10	29	-2.5	-6.33	30.2784	-2.48	-6.336
Orang	Orang1	54	1.5	2.86	54.6875	1.51	2.856
	Orang2	50	1.5	3.09	50.7813	1.5	3.09
	Orang3	45	1.5	3.43	45.8984	1.5	3.438
	Orang4	40	1.5	3.87	41.0156	1.5	3.872
	Orang5	35	1.5	4.42	36.1328	1.5	4.412
	Orang6	30	1.5	4.84	31.25	1.5	5.152
	Orang7	27	1.5	5.16	28.3203	1.5	5.732
	Orang8	25	1.5	5.53	26.3672	1.49	6.193
	Orang9	40	-1.5	-3.876	41.0156	-1.49	-3.876
	Orang10	50	-1	-3.09	50.7813	-0.99	-3.09

Model- model target pada tabel 4.5 dengan level SNR sinyal beat 20 dB. Jarak minimum terdeteksi target berdasarkan model target 8. Batasan tracking target selain nilai RCS dan SNR sinyal juga ditentukan oleh beamwidth antenna dan batasan sudut maksimum/minimum target dari jarak antara antenna penerima. Model-model target ini yang digunakan untuk referensi (database) dalam klasifikasi target radar FMCW. Namun, jika target hanya dalam beamwidth antenna (dalam main lobe antenna), semua target berada dalam kondisi jarak maksimum. Kecepatan doppler radar dipengaruhi oleh pendekatan sudut target.

4.1.3 Pengolahan sinyal radar untuk klasifikasi target

Data untuk pelatihan dan pengujian CHMM radar FMCW diperoleh dari simulasi pemodelan radar FMCW bergerak dengan X-band stasioner. Sudut radar dan target 0° - 5.72° dan batas daerah sudut deteksi target 6.44° dengan jarak maksimum target 200m. Pada penelitian ini, ada 5 state target klasifikasi yaitu orang, sepeda, motor, mobil dan truk. Teknik klasifikasi target menggunakan CHMM yaitu metode GMM.

Pada penelitian ini, pembentukan model target untuk klasifikasi HMM dengan jumlah state 5 dan mixture 5. Dalam hal ini, tidak ada algoritma secara pasti menjelaskan cara untuk menentukan jumlah state dan mixture yang terbaik [41]. Ada 10 data model target untuk pelatihan dan 20 data model target untuk pengujian, data masing-masing model target dapat dilihat pada tabel 4.6. Hasil klasifikasi model target HMM kombinasi dengan ekstraksi ciri menggunakan mel cepstrum (MFCC) dapat dilihat pada tabel 4.5 dan lampiran H.

Pengenalan target pada tesis ini pada lingkungan berderau (noise), sedangkan dalam pengolahan sinyal beat radar FMCW ada dua jenis pengolahan sinyal yaitu sinyal beat tanpa derau dan sinyal beat dengan derau. Pengenalan target pada lingkungan berderau dilakukan untuk mengetahui derau terhadap kinerja sistem. Derau yang digunakan adalah AWGN yang dibangkitkan dari komputer. Penambahan derau ini dilakukan dengan level sinyal SNR 20 (berdasarkan tabel 4.1). Sinyal yang telah mendapat tambahan derau dengan level SNR sinyal 20 dB menjadi input pada proses pengenalan target. Hasil pengujian simulasi klasifikasi atau pengenalan target dapat dilihat pada tabel 4.9 , lampiran H, serta ditampilkan pada gambar 4.50.

Tabel 4.6 Konfigurasi simulasi klasifikasi data radar FMCW

Target	Data latih	Data Uji	Total
Truk	10	20	30
Mobil	10	20	30
Motor	10	20	30
Sepeda	10	20	30
Orang	10	20	30
Total	50	100	150

Tabel 4.7 Hasil perbandingan matrik data latih radar FMCW dengan HMM

Target Latih	<i>dikenali sebagai</i> (dalam %)				
Target	Truk	Mobil	Motor	Sepeda	Orang
Truk	100	0	0	0	0
Mobil	0	100	0	0	0
Motor	0	0	100	0	0
Sepeda	0	0	0	100	0
Orang	0	0	0	0	100

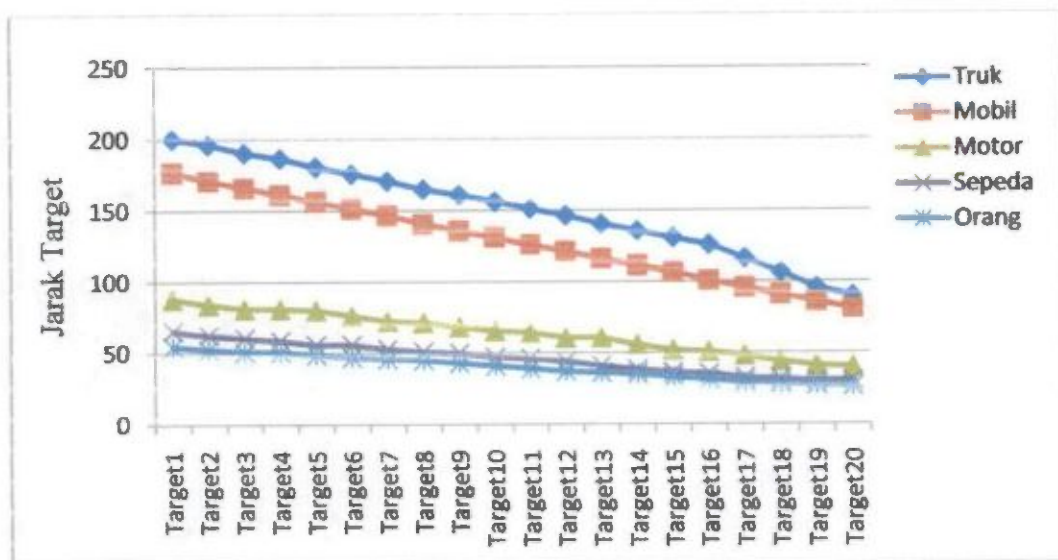
Tabel 4.8 Hasil perbandingan matrik data uji radar FMCW dengan HMM

Target Uji	<i>dikenali sebagai</i> (dalam %)				
Target	Truk	Mobil	Motor	Sepeda	Orang
Truk	100	0	0	0	0
Mobil	5	95	0	0	0
Motor	0	5	90	5	0
Sepeda	0	0	0	95	5
Orang	0	0	0	0	100

Tabel 4.9 Hasil Pengujian klasifikasi target data radar FMCW dengan HMM

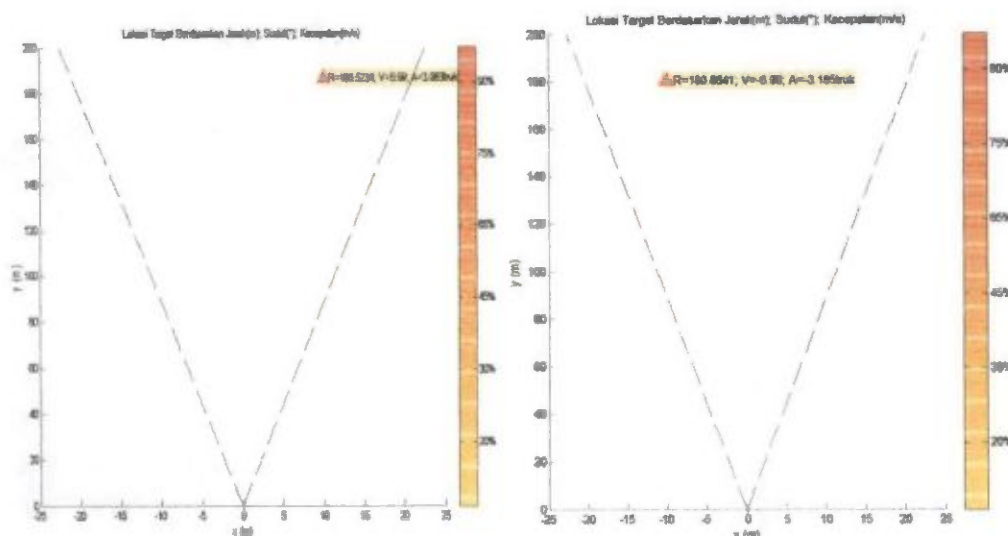
Target	Data pengujian target latih			Data pengujian target tanpa latih(data uji)		
	Jumlah benar	Jumlah salah	% Benar	Jumlah benar	Jumlah salah	% Benar
Truk	10	0	100	20	0	100
Mobil	10	0	100	19	1	95
Motor	10	0	100	18	2	90
Sepeda	10	0	100	19	1	95
Orang	10	0	100	20	0	100

Untuk mendapatkan model target yang akurat, maka perancangan simulasi pengumpulan data sinyal echo radar pada kondisi SNR tinggi. Oleh karena itu SNR 20 dB untuk jarak maksimum radar dan target 200m. Hasil simulasi model – model target tanpa latih dapat dilihat pada lampiran H, dimana skenario jarak masing-masing target pada gambar 4.49.

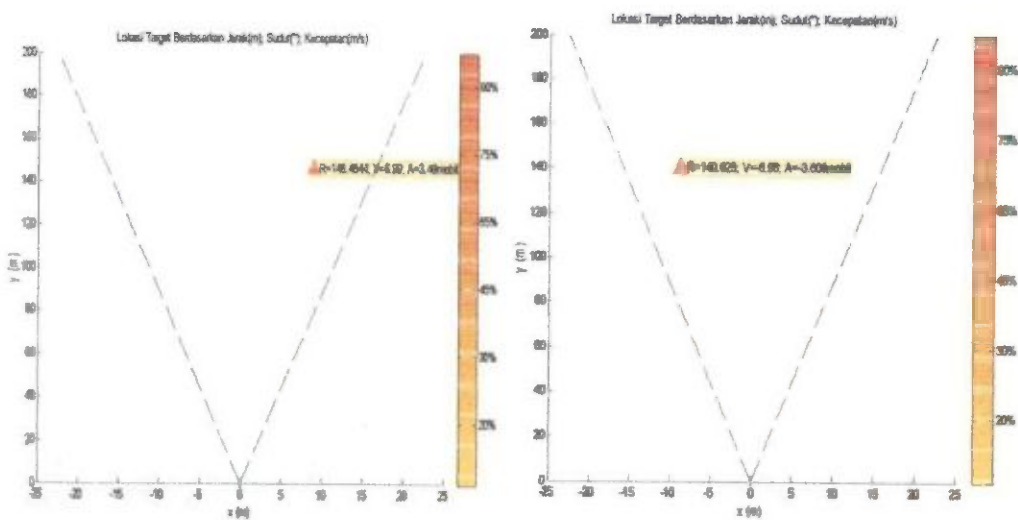


Gambar 4.49 Skenario jarak target untuk klasifikasi target

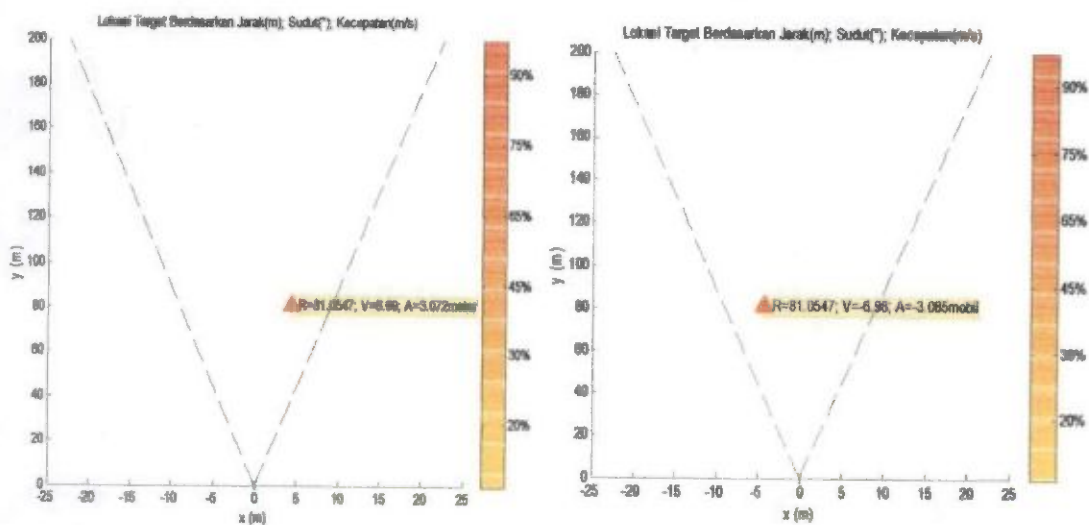
Sedangkan bentuk simulasi untuk klasifikasi target berdasarkan informasi jarak, kecepatan dan sudut target ditampilkan pada gambar 4.47a, 4.47b, 4.47c dan 4.47d.



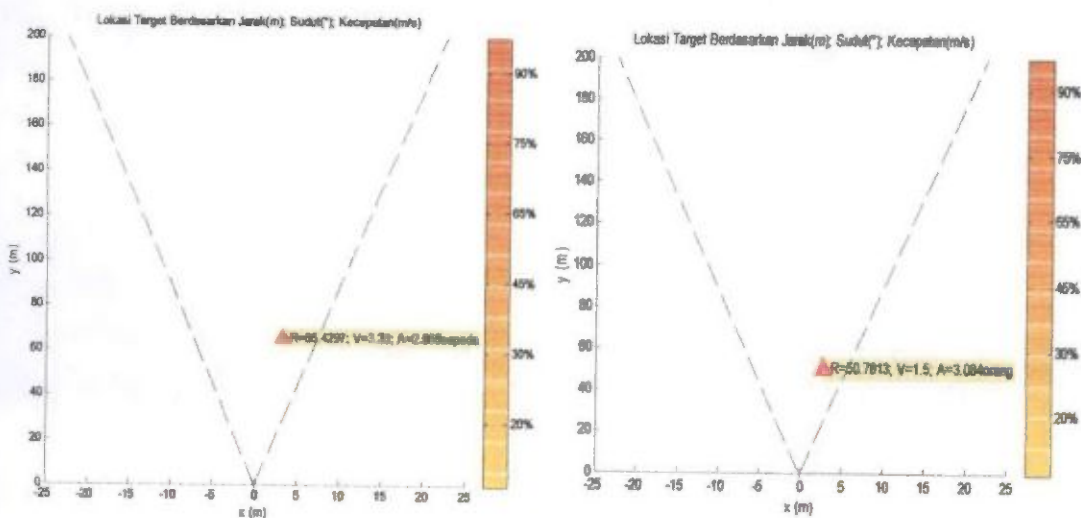
Gambar 4.50a. Simulasi klasifikasi target “truk”



Gambar 4.50b. Simulasi klasifikasi target “mobil”



Gambar 4.50c. Simulasi klasifikasi target “motor”



Gambar 4.50d. Simulasi klasifikasi target “sepeda” dan “orang”

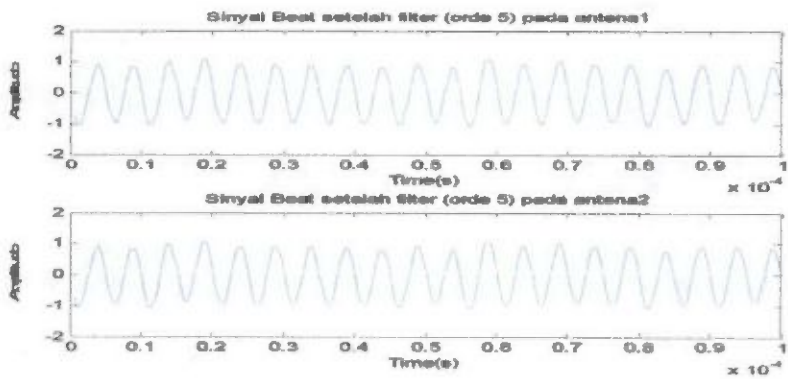
Hasil simulasi menampilkan, target dilambangkan dengan segitiga berwarna dengan identifikasi jarak (R), kecepatan (V), sudut (A) dan dikenali sebagai "target". Pada gambar 4.50a, gambar 4.50b dan gambar 4.50c, masing-masing gambar terdiri dari 2 gambar, gambar pertama target bergerak maju (mendekati radar) dengan kecepatan terdeteksi 6.99 m/s. Sedangkan gambar kedua target meninggalkan radar (menjauhi radar) dengan kecepatan terdeteksi -6.98 m/s. Kecepatan target mendekati radar lebih besar daripada menjauhi radar, begitu juga pada model-model target lainnya yang dapat dilihat pada lampiran H. Pada gambar 4.50c bagian gambar kedua, sistem radar mendeteksi target sebagai mobil, seharusnya motor. Sistem FMCW radar dapat melakukan klasifikasi target dengan metode HMM dengan total persentase kebenaran 96% untuk data target tanpa latih, sedangkan data target dengan pelatihan 100%.

Permasalahan klasifikasi berhubungan dengan pengolahan sinyal. Pemancar radar dalam menransmisikan sinyal akan mendapatkan respon dari keluaran penerima yang merupakan beberapa jenis sinyal yaitu target, clutter, derau (noise) dan kadang-kadang gangguan (jamming). Sinyal noise dan jamming merupakan sinyal-sinyal yang mengganggu dapat menurunkan kemampuan untuk mengukur target. Pengolahan sinyal yang efektif diukur oleh perbaikan yang menyediakan instrument (figure of merit), seperti detection probability, signal to interference ratio, dan ketelitian segala penjur. Sinyal pada keluaran penerima merupakan suatu kombinasi echo dari target, noise, clutter dan kemungkinan jamming. Target dan noise merupakan echo yang tertunda dari sinyal yang ditransmisikan. Noise yang diterima terlihat acak. Jadi, sinyal yang diterima menghasilkan sinyal echo dari penyebaran pada jangkauan $r = c\tau/2$. Sinyal radar bersifat stasioner sehingga bisa dilakukan klasifikasi atau pengenalan target.

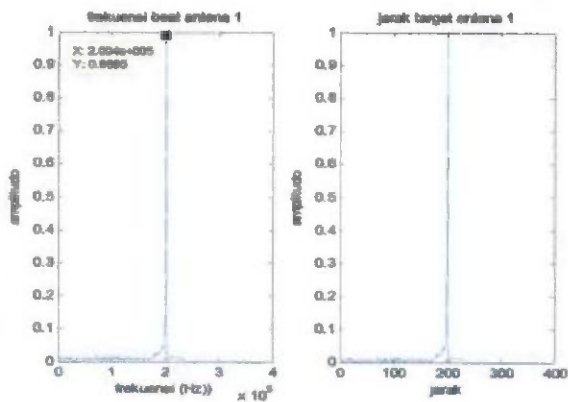
4.1.4 Hasil simulasi matlab untuk target diam

Pada subbab ini, analisa pengolahan sinyal beat dilakukan untuk target diam. Pengolahan sinyal beat untuk target diam direalisasikan juga pada soft defined radar, yaitu GNU Radio dan dimplementasikan dengan USRP N210. Penjelasan pemodelan sistem radar FMCW dengan GNU Radio dan USRP dapat dilihat pada lampiran I dan J. Untuk hasil simulasi GNU Radio pada subbab 4.2 dan hasil pengujian dengan USRP pada subbab 4.3.

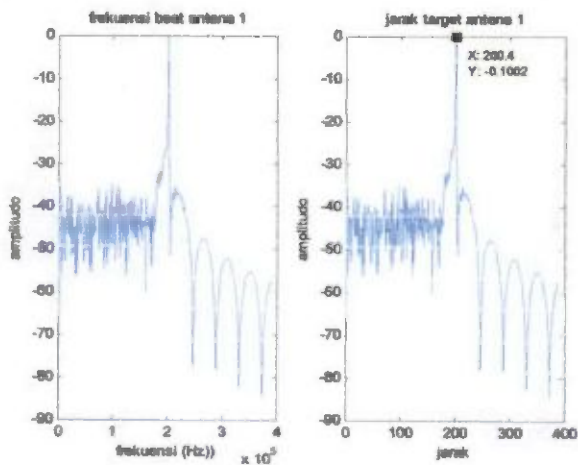
Pada simulasi matlab dimana target diasumsikan dalam keadaan diam, target berada dalam daerah beamwidht antenna (garis aksis tracking). Pada percobaan ini, posisi target dan radar adalah lurus (pada jalur yang sama) yaitu sudut target diasumsikan 0^0 . Hasil sinyal beat yang diperoleh diberikan pada gambar 4.51 sedangkan spektrum beat dan deteksi jarak target 4.52 dan 4.53.



Gambar 4.51 Sinyal beat untuk target “truk”diam



Gambar 4.52 Spektrum beat dan jarak untuk target “truk”diam



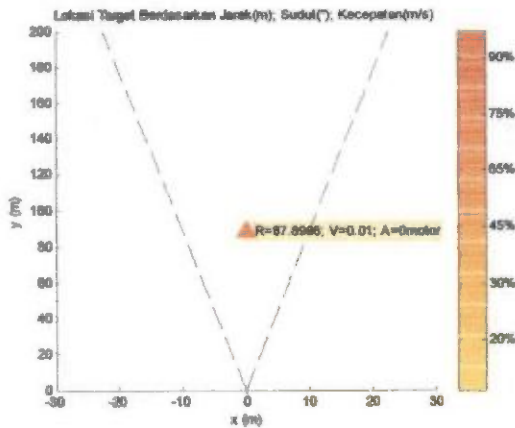
Gambar 4.53 Magnitudo dari spektrum beat dan jarak untuk target “truk”diam

Klasifikasi target sinyal beat untuk kondisi target tidak bergerak

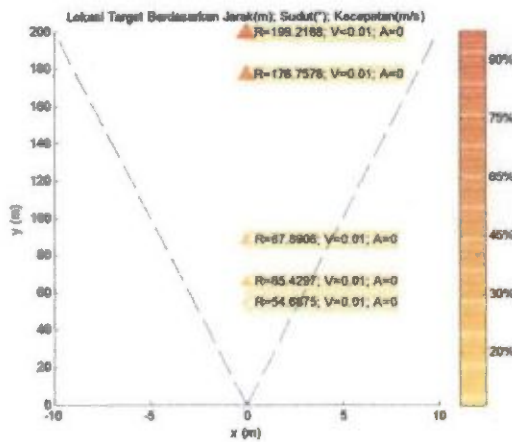
Proses klasifikasi atau pengenalan target untuk target tidak bergerak (diam) sama dengan target bergerak. Sinyal beat yang dihasilkan menjadi input untuk pengenalan target. Hasil deteksi dan klasifikasi target dari sinyal beat untuk target diam dapat dilihat pada tabel 4.10. Untuk tampilan klasifikasi target dengan dua antena penerima diberikan pada gambar 4.54, dan tracking target untuk target diam pada gambar 4.55.

Tabel 4.10 Hasil pengenalan target terhadap target yang dilatih (dimodelkan)

Target	Deteksi		Estimasi	
	Frek.beat (kHz)	Jarak (m)	dikenali	dikenali sebagai
truk	200.1953	200.1953	salah	motor
mobil	176.7578	176.7578	salah	sepeda
motor	87.8906	87.8906	benar	motor
sepeda	65.4297	65.4297	benar	sepeda
orang	54.6875	54.6875	benar	orang



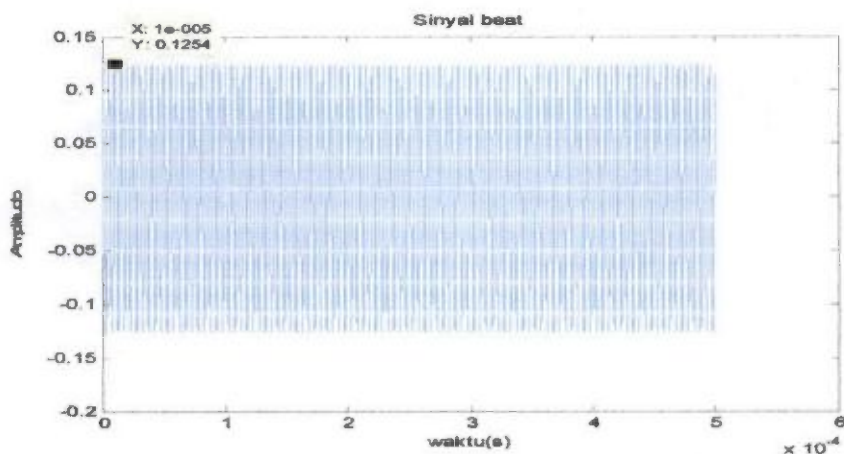
Gambar 4.54 Klasifikasi target untuk target diam



Gambar 4.55 Tracking target untuk lima target diam

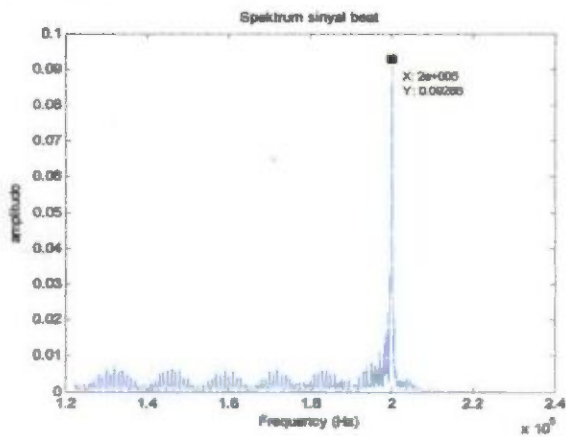
4.2 Hasil Simulasi Sistem Radar FMCW dengan GNU Radio

Percobaan simulasi FMCW pada GNU radio dengan pengolahan data dari sinyal beat pada Matlab. Pengolahan data (data.dat) dari pengolahan sinyal beat pada GNU Radio dilakukan menggunakan Matlab secara offline untuk mengurangi beban kerja GNU Radio. Didalam analisa ini, tidak memperhatikan besar daya yang diterima, tetapi ditekankan pada proses penerimaan sinyal dan tundaan waktu yang terjadi. Hasil perkalian sinyal yang diterima dengan sinyal yang dipancarkan, maka diperoleh sinyal beat seperti ditunjukkan pada gambar 4.56.

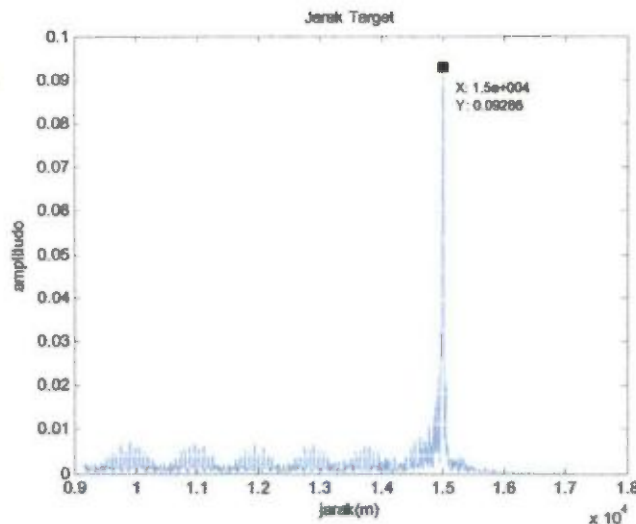


Gambar 4.56 Sinyal beat dari GNU radio untuk target 1 (delay 8000)

Gambar 4.56 menunjukkan sinyal beat setelah proses filter. Sinyal beat yang dihasilkan merupakan sinyal beat dari target 1 dengan delay 8000 sample. Percobaan ini diasumsikan target diam, dimana delay 8000 sample artinya target mengalami penundaan waktu sebesar 0.1 ms. Pada gambar tersebut terlihat sinyal lebih jelas, sehingga lebih mudah untuk menentukan frekuensi beatnya. Frekuensi beat sinyal dapat dilihat pada gambar 4.57 dan jarak target 4.58.



Gambar 4.57 Frekuensi sinyal beat



Gambar 4.58 Jarak Target

Gambar 4.58 menunjukkan jarak target pada posisi 15 km. Frekuensi beat berdasarkan perhitungan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$f_b = \Delta f' = \frac{t_d \times T_s \times B}{T} = \frac{8000 \times 2.000.000}{80 \times 10^6 \times 10^{-3}} = 200 \text{ kHz}$$

dan jarak target dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$R = \frac{f_b \times c}{4 \times f_m \times B} = \frac{200.000 \times 3 \times 10^8}{4 \times 500 \times 2.000.000} = 15 \text{ km}$$

Sehingga hasil yang diperoleh berdasarkan simulasi dan perhitungan mempunyai nilai yang sama. Pemodelan diatas untuk target dengan delay 8000 sample ($\tau = 10^{-4}$) yaitu target pertama. Target pertama dari simulasi GNU Radio diasumsikan truk (simulasi matlab) karena frekuensi beat yang dihasilkan 200 kHz. Sinyal FM dari pemodelan target diatas, dibangkitkan mulai dari 0 Hz sampai 2MHz selama 1 ms. Frekuensi sampel untuk pencuplikan sinyal 80 MHz, sehingga jumlah sampel data (N_{data}) adalah:

$$N_{data} = T \times f_s = 10^{-3} \times 80 \times 10^6 = 80000$$

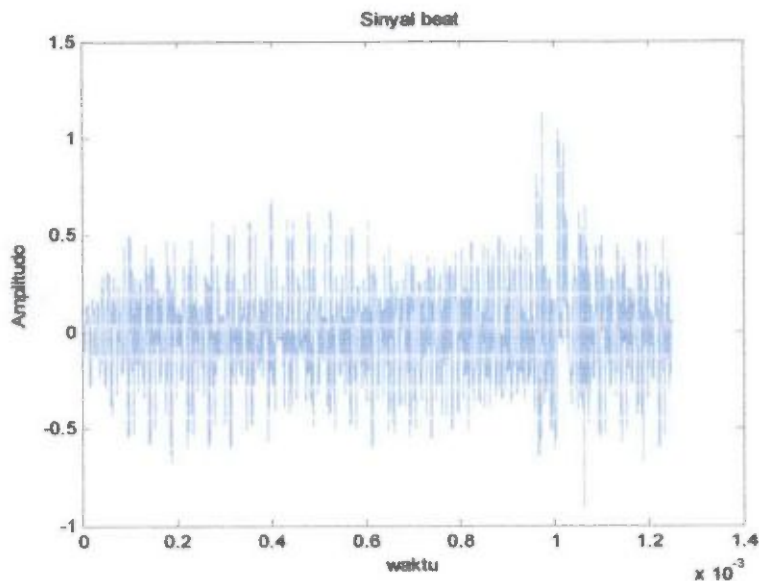
Sedangkan resolusi jarak dari sistem radar FMCW ini:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.000.000} = 75 \text{ m}$$

Percobaan sistem FMCW untuk deteksi jarak target yang berbeda

Untuk mensimulasikan deteksi target pada sistem FMCW SDR yang telah dibuat, digunakan blok delay setelah blok modulasi pada GRC (telah dilakukan pada satu target

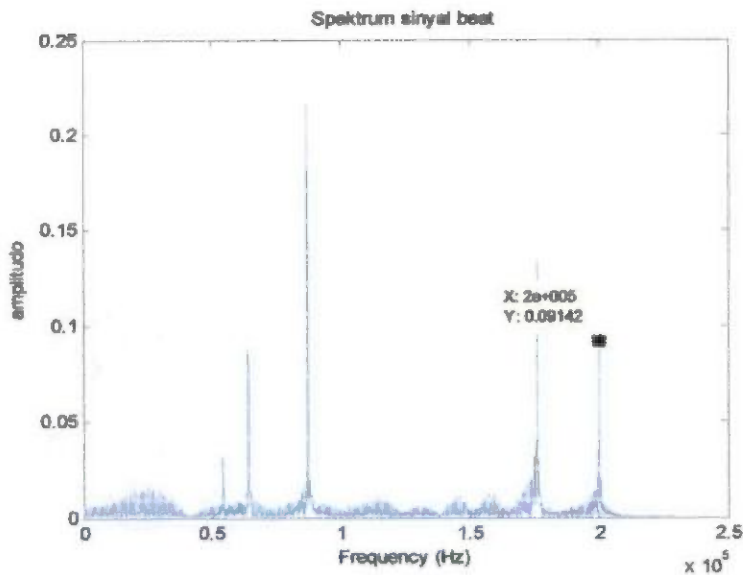
dengan kondisi delay yang berbeda pada percobaan-percobaan diatas). Dengan memberikan delay, dapat dibuat seolah-olah sinyal transmit mengenai suatu target pada jarak tertentu sebelum dikembalikan ke receiver radar. Pada percobaan selanjutnya, dilakukan uji coba menggunakan lima buah delay sekaligus sebesar 8000, 7040, 3480, 2560, dan 2160 sampel untuk mendeteksi beberapa target yang berbeda. Hasil sinyal beat untuk lima target ditunjukkan pada gambar 4.59.



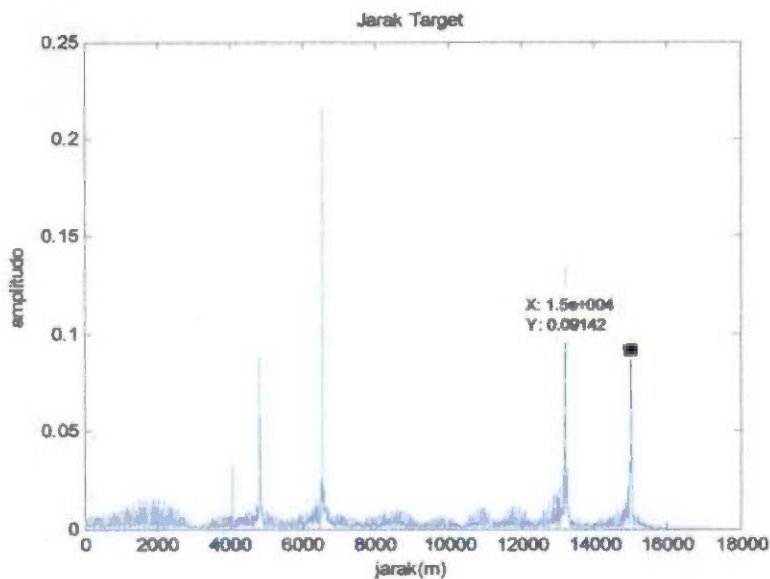
Gambar 4.59 Sinyal beat dari lima target

Setelah didapatkan sinyal beat dari 5 target, kita dapat mengetahui frekuensi beat dari masing-masing target menentukan jarak dari target tersebut. Data binary dalam bentuk float yang sudah ada dibaca menggunakan Matlab dan difilter menggunakan low pass filter digital FIR. Low Pas filter yang digunakan untuk mengetahui hubungan antara jarak dengan reflektifitas target.

Setelah itu, FFT dilakukan untuk mengubah sinyal domain waktu diskrit ke dalam domain frekuensi diskrit, dan dilakukan plotting hasil transformasi untuk bisa mendapatkan gambaran antara reflektifitas dengan jarak. Frekuensi beat dari 5 target dan jaraknya dapat dilihat pada gambar 4.60 dan 4.61.



Gambar 4.60 Spektrum Frekuensi beat dari 5 target



Gambar 4.61 Jarak target dari 5 target

Berdasarkan gambar 4.60 dan 4.61, spektrum frekuensi beat dari 5 target yang dimodelkan sekaligus, didapat nilai frekuensi beat untuk masing-masing target. Nilai yang diperoleh sama dengan nilai frekuensi beat ketika dimodelkan hanya satu target. Begitu juga dengan jarak target, didapatkan 5 buah nilai jarak untuk masing-masing target. Hasil simulasi ini sama dengan perhitungan. Jadi, sistem radar FMCW yang dibangun dapat mendeteksi satu target dan lima target. Sehingga jarak masing-masing target dapat dibedakan.

Klasifikasi target sinyal beat dari simulasi sinyal GNU radio

Prinsip sistem kerja klasifikasi target dari simulasi GNU radio sama dengan simulasi matlab. Sinyal beat yang dihasilkan menjadi input untuk pengenalan target. Hasil deteksi dan klasifikasi target dari sinyal beat pada GNU radio dapat dilihat pada tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil pengujian target sinyal terhadap target yang dilatih (dimodelkan)

Target	Delay (sample)	Deteksi		Estimasi		Perhitungan	
		Frek.beat (kHz)	Jarak (km)	dikenali	dikenali sebagai	Frek.beat (kHz)	Jarak (km)
target1	8000	200	15	benar	target1	200	15
target2	7040	175.9	13.2	benar	target2	176	13.2
target3	3480	86.98	6.523	benar	target3	87	6.525
target4	2560	63.93	4.795	benar	target4	64	4.8
target5	2160	54.02	4.051	benar	target5	54	4.05

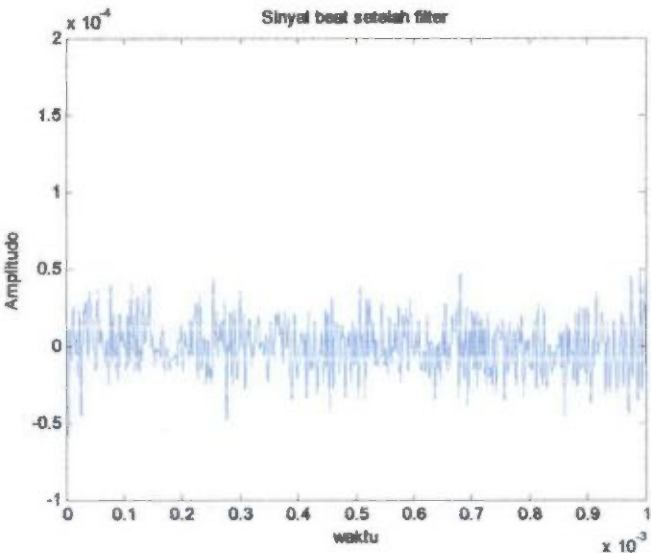
Tabel 4.12 Hasil pengujian target terhadap target yang tidak dilatih

Target	Delay (sample)	Deteksi		Estimasi		Perhitungan	
		Frek.beat (kHz)	Jarak (km)	dikenali	dikenali sebagai	Frek.beat (kHz)	Jarak (km)
target1_1	7920	197.8	14.83	benar	target1	198	14.85
target1_2	7800	195.3	14.65	benar	target1	195	14.625
target1_3	7600	190.4	14.28	salah	target4	190	14.25
target1_4	7400	184.3	13.82	salah	target5	185	13.875
target1_5	7200	179.4	13.46	salah	target2	180	13.5
target2_1	6800	169.7	12.73	benar	target2	170	12.75
target2_2	6600	164.8	12.36	benar	target2	165	12.375
target2_3	6400	159.9	11.99	benar	target2	160	12
target2_4	6200	155	11.63	benar	target2	155	11.625
target2_5	6000	150.1	11.26	benar	target2	150	11.25
target3_1	3400	84.84	6.363	benar	target3	85	6.375
target3_2	3280	81.79	6.134	benar	target3	82	6.15
target3_3	3200	79.96	5.997	salah	target2	80	6
target3_4	3000	75.07	5.63	salah	target2	75	5.625
target3_5	2800	70.19	5.264	salah	target2	70	5.25
target4_1	2520	63.48	4.761	benar	target4	63	4.725
target4_2	2480	62.26	4.669	benar	target4	62	4.65
target4_3	2440	61.04	4.578	benar	target4	61	4.575
target4_4	2400	59.81	4.486	benar	target4	60	4.5
target4_5	2320	57.37	4.303	benar	target4	58	4.35
target5_1	2080	51.88	3.891	benar	target5	52	3.9
target5_2	2000	50.05	3.754	benar	target6	50	3.75

target5_3	1920	48.22	3.616	benar	target7	48	3.6
target5_4	1840	45.78	3.433	benar	target8	46	3.45
target5_5	1760	43.95	3.296	benar	target9	44	3.3

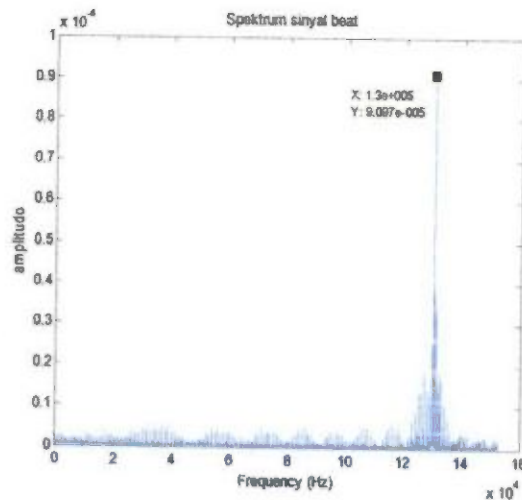
4.3 Hasil Pengujian Sistem Radar FMCW dengan USRP N210

Pengujian sistem radar FMCW dengan USRP N210 juga melalui software GNU Radio. Pda bagian ini diberikan hasil uji coba USRP N210 berdasarkan skenario yang sudah dibuat sebelumnya. Pengolahan data dari sinyal beat dilakukan menggunakan Matlab secara offline untuk mengurangi beban kerja GNU Radio. Seluruh hasil percobaan ditampilkan dengan menggunakan script matlab. Bentuk data mentah yang dihasilkan oleh GNU Radio dan USRP untuk deteksi satu taget diberikan pada gambar 4.62.

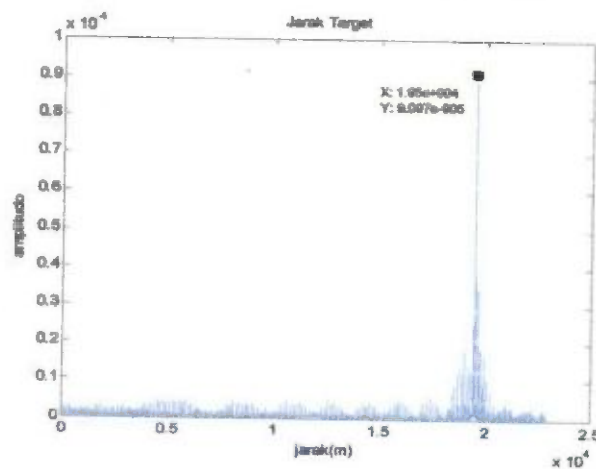


Gambar 4.62 Sinyal beat dari GNU radio dan USRP

Gambar 4.62 menunjukkan sinyal beat setelah difilter (pengolahan sinyal dengan proses filtering pada matlab). Sinyal tersebut diperoleh dengan menggunakan blok delay, sinyal receive akan terdelay secara signifikan dibandingkan dengan sinyal transmit dan menghasilkan sinyal beat setelah dilakukan mixing terhadap sinyal transmit. Sinyal hasil mixing inilah yang menjadi masukan Matlab, untuk kemudian diproses lebih lanjut. Sinyal beat tersebut dilakukan transformasi fourier sehingga diperoleh spektrum target dan jarak terdeteksi target diberikan pada gambar 4.63 dan 4.64.



Gambar 4.63 Frekuensi sinyal beat

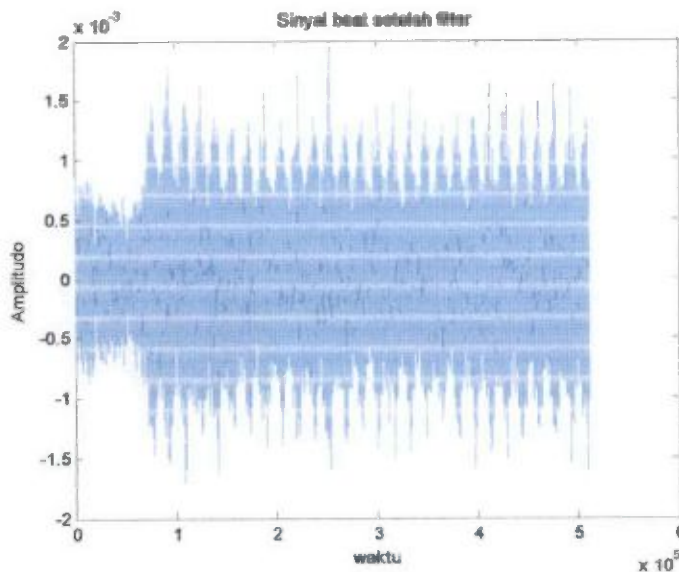


Gambar 4.64 Deteksi jarak target

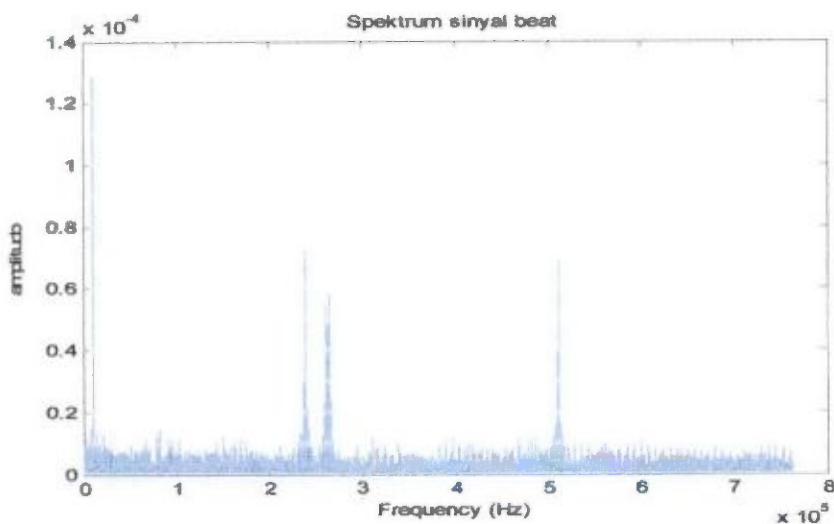
Pada domain waktu sinyal berupa sinusoidal frekuensi tinggi juga memiliki frekuensi rendah. Pada domain frekuensi, terdapat komponen frekuensi tinggi dan komponen frekuensi rendah. Komponen frekuensi rendah merupakan selisih antara frekuensi sinyal pemancar dan penerima, sementara komponen frekuensi tinggi adalah penjumlahan frekuensi transmit dan receive yang terus bertambah selama periode sinyal.

Percobaan sistem FMCW untuk deteksi jarak target yang berbeda

Untuk pengujian percobaan dengan lima target jarak berbeda, hasil sinyal beat yang didapatkan ditunjukkan pada 4.65, dan spektrum beat 4.66.

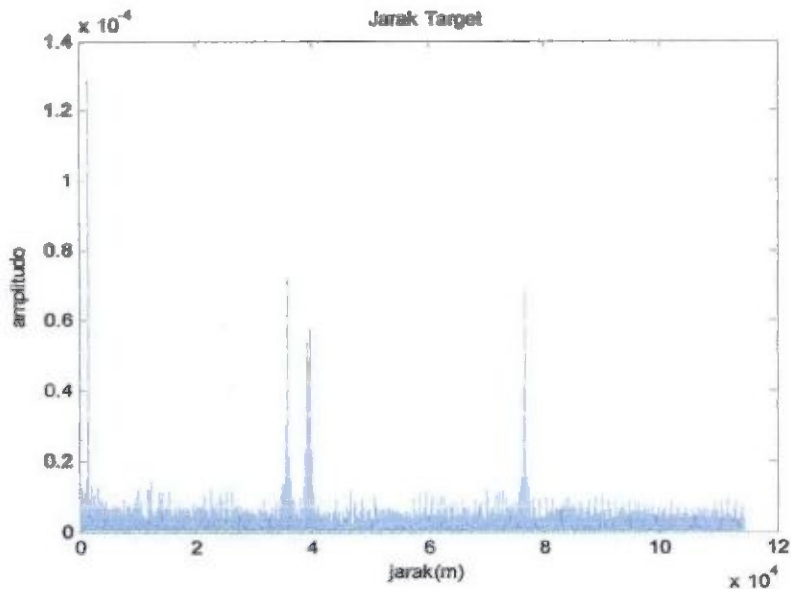


Gambar 4.65 Sinyal beat dari lima target



Gambar 4.66 Pengujian spektrum frekuensi beat dari 5 target

Setelah didapatkan sinyal beat dari 5 target, kita dapat mengetahui frekuensi beat dari masing-masing target menentukan jarak dari target tersebut. Data binary dalam bentuk float yang sudah ada dibaca menggunakan Matlab dan difilter menggunakan low pass filter digital FIR. Low Pas filter yang digunakan untuk mengetahui hubungan antara jarak dengan reflektifitas target. Setelah itu, FFT dilakukan untuk mengubah sinyal domain waktu diskrit ke dalam domain frekuensi diskrit, dan dilakukan plotting hasil transformasi untuk bisa mendapatkan gambaran antara reflektifitas dengan jarak. Deteksi jarak ditunjukkan pada gambar 4.67.



Gambar 4.67 Pengujian deteksi jarak target dari 5 target

Hasil spektrum memberikan bahwa lima buah target yang berbeda akan memberikan lima buah frekuensi respon pada frekuensi yang berbeda, baik untuk hasil GNU Radio maupun diimplementasikan dengan USRP. Perbedaan ketinggian antara kelima respon dikarenakan adanya ketidak linieran dari sinyal beat. Jadi, dapat disimpulkan bahwa sistem yang telah dirancang dan dimodelkan dapat digunakan untuk mendeteksi target dengan jarak berbeda-beda, dimana target diasumsikan dalam keadaan tidak bergerak.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa yang dilakukan dari penelitian tesis ini, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pengolahan sinyal beat FMCW yang dilakukan pada simulasi matlab ada dua yaitu sinyal tanpa derau (noise) dan sinyal dengan derau. Percobaan deteksi target melalui sinyal beat target adalah pengolahan sinyal beat dengan derau. Sinyal pada keluaran penerima merupakan suatu kombinasi echo dari target dan derau. Sinyal target dan noise merupakan echo yang tertunda dari sinyal transmisi.
2. Pendeteksian dan penentuan jarak diperoleh dengan menentukan waktu delay (tunda) antara sinyal transmisi dan sinyal yang telah dipantulkan target.
3. Sistem radar FMCW yang dirancang baik melalui simulasi matlab maupun direalisasikan dengan GNU radio dapat mendeteksi satu target dan lima target
4. Informasi target bergerak menggunakan efek doppler. Informasi yang diperoleh yaitu jarak, kecepatan dan arah target. Penggunaan dalam bentuk domain frekuensi lebih mudah untuk menganalisa radar shift doppler. Radar shift doppler dapat diaplikasikan pada pengaturan lalu lintas darat.
5. Sistem radar FMCW mampu mentracking target dengan menggunakan batasan sudut target melalui sistem monopulse radar yaitu perbedaan fasa antara dua sinyal antena penerima.
6. Sistem radar FMCW mampu melakukan pengenalan atau klasifikasi target dengan Hidden Markov Model. Hasil klasifikasi target pada Matlab untuk data latih 100%, sedangkan data tidak latih 96%. Begitu juga pengenalan target dari GNU radio 100% dan data tidak latih 76%.

5.2 Saran

Untuk penelitian lebih lanjut analisa pengolahan sinyal beat radar FMCW dapat ditambahkan dengan pengaruh kanal. Pengolahan sinyal radar disertai dengan pemodelan kanal untuk mengetahui seberapa besar pengaruh kanal merubah sinyal pancar dalam keadaan kondisi kanal yang berbeda-beda. Analisa juga ditambahkan dengan perhitungan link budget, carrier to noise, BER (Bit error rate) dan kondisi target saat cuaca hujan, karena pada kondisi hujan akan merubah konduktivitas dan permitivitas. Penggunaan pengenalan pola target (klasifikasi target) sudah dapat direalisasikan, diharapkan setelah target dideteksi dan dikenali dapat dilanjutkan dengan pengolahan image radar.

Pengolahan sinyal beat radar FMCW yang direalisasikan pada GNU radio dan USRP selain dilakukan dalam skala laboratorium juga dapat diimplementasikan pada lapangan terbuka.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mark A. Richards, *"Fundamental of Radar Signal Processing"*, McGraw-Hill 2005
- [2] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. CRC Press. 2009.
- [3] Merrill I. Skolnik, *"RADAR HANDBOOK"*, Third Edition. The McGraw-Hill Companies. 2008.
- [4] Bu-Chin Wang, *"Digital Signal Processing Techniques and Applications in Radar Image Processing"*. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008.
- [5] L. R. Rabiner, *"A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition,"* Readings in speech recognition, vol. 53, no. 3, pp. 267–296, 1990.
- [6] L. R. Rabiner and B-H Juang, *Fundamentals of Speech Recognition* Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993, chapter 6.
- [7] G. Kouemou, F. Opitz. *"Hidden Markov Models in Radar Target Classification"*, International Conference on Radar Systems, Edinburgh UK (2007). IEEE Conference Publications.
- [8] G. Kouemou, F. Opitz. *Impact Of Wavelet Based Signal Processing Methods In Radar Classification Systems Using Hidden Markov Models*, Radar Symposium, 2008 International Publication Year: 2008 , Page(s): 1 - 4 IEEE Conference Publications.
- [9] Evan Hughes and Mike Lewis Cranfield University, UK and Fit Lt E Reid, *The Application of Speech Recognition Techniques to Radar Target Doppler Recognition: A Case Study*. Publication Year: 2006 , Page(s): 145 - 152 .IET Conference Publications.
- [10] Eryildirim Abdulkadir, Onaran Ibrahim, and Etin A. *"Pulse Doppler Radar Target Recognition using a Two-Stage SVM Procedure"*, IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. 47, NO. 2 APRIL 2011.
- [11] Aditya Prabaswara, Achmad Munir, Andriyan Bayu Suksmono, *GNU Radio Based Software-Defined FMCW Radar for Weather Surveillance Application*, The 6th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications 2011
- [12] L. K. Patton, *A GNU Radio Based Software-Defined Radar*, Wright State University, Thesis, 2007.
- [13] Faiza Ali, Martin Vossiek, *Detection of Weak Moving Targets Based on 2-D Range-Doppler FMCW Radar Fourier Processing*. Institute of Electrical Information Technology, Clausthal University of Technology, Germany. 2010.
- [14] A. Wojtkiewicz, J. Misiurewicz, M. Nalecz, K. Jedrzejewski and K. Kulpa, *Two-Dimensional Signal Processing In FMCW Radars*, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1996.
- [15] Peberlin Sitompul, *Pengujian dan analisa sistem radar FMCW berbasis Universal Software Radio Peripheral (USRP) dan GNU radio*. Institute teknologi bandung, Thesis, 2012.

- [16] D. Bonefačić, J. Jančula, and Majurec, "Model of a Monopulse Radar Tracking System for Student Laboratory". Radio Engineering, vol. 16, no. 3, September 2007.
- [17] Iván Lozano Mármol, "Monopulse Range-Doppler FMCW Radar Signal Processing for Spatial Localization of Moving Targets", Technische Universität Clausthal Institut für Elektrische Informationstechnik.2012.
- [18] Li Su, Hsien Shun Wu and Ching-Kuang C. Tzuang "2-D FFT and Time-Frequency Analysis Techniques for Multi-Target Recognition of FMCW Radar Signal", Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference 2011.
- [19] Bilik, I. Tabrikian, J., and Cohen, A. "GMM-Based Target Classification for Ground Surveillance Doppler Radar", IEEE transactions on aerospace and electronic systems vol. 42, no. 1 january 2006.
- [20] Bilik, I. Tabrikian, J., and Cohen, A. "Target Classification Using Gaussian Mixture Model For Ground Surveillance Doppler Radar ", IEEE transactions on aerospace and electronic.2005.
- [21] Erman Ozdemir , "Super Resolution Spectral Estimation Methods for Buried and Through-the-wall Object Detection". Electrical and electronics engineering, middle east technical university.2005 .
- [22] <http://www.radartutorial.eu> .Author: Christian Wolff, graduated Radar engineer, SMSgt. G.A.F. (Rtd.)
- [23] Cui Jingjing, Gudnason Jon , "Hidden Markov Models For Multi-Perspective Radar Target Recognition. 2008 IEEE.
- [24] David W. J. Stein, 1997, "Detection of Random and Sinusoidal Signals in Hidden Markov Noise", Proceeding of the 30th IEEE Asilomar Conference on Signal Systems and Computers, 464-468.
- [25] D. W. J. Stein, G. M. Dillard, "Applying Hidden Markov Models To Radar Detection In Clutter" , Publication Year: 1997 , Page(s): 586 - 590 IET Conference Publications
- [26] Serdar Tuğaç, Murat Efe, "Hidden Markov Model Based Target Detection" Publication Year: 2010 , Page(s): 1 - 7 IEEE Conference Publications
- [27] Neri Merhav, Member, IEEE, "Universal Classification for Hidden Markov Models" IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, vol. 37, no. 6, november 1991.
- [28] Chanin Nilubol, Quoc H. Pham, Russell M. Mersereau, Mark J. T. Smith, and Mark A. Clements. Hidden Markov Modelling For Sar Automatic Target Recognition.1998 IEEE.
- [29] Eugin Hyun, and Jong-Hun Lee, "Method to Improve Range and Velocity Error Using De-interleaving and Frequency Interpolation for Automotive FMCW Radars", International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition Vol. 2, No. 2, June 2009
- [30] Moon-Sik Lee and Yong-Hoon Kim, "Design and Performance of a 24-GHz Switch-Antenna Array FMCW Radar System for Automotive Applications", IEEE transactions on vehicular technology, vol. 59, no. 5, June 2010.
- [31] Ghulam Ahmad, " Design, Optimization and Development of X-Band Microstrip Patch Antenna Array for High Gain, Low Sidelobes and Impedance Matching "Second International Conference on Electrical Engineering 25-26 March 2008 University of Engineering and Technology. IEEE.

- [32] Kurt , Sinan , *"Range Resolution Improvement of FMCW Radars"* . Middle East Technical Universit. 2007.
- [33] Yaşar Barış Yetkil, *"Design of an FMCW Radar Altimeter"*. The graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university. 2005.
- [34] Adriano Meta, *"Signal Processing of FMCW Synthetic Aperture Radar Data"* Technische Universiteit Delft.2006.
- [35] J.A. McGregor, E.M. Poulter and M.J. Smith, "Switching system for single antenna operation of an S-band FMCW radar", IEEE Proc.-Radar, Sonar Navig., Vol. 141, No. 4, August 1994.
- [36] A.G. Stove, "Linear FMCW Radar Techniques"IEE PROCEEDINGS-F, Vol. 139, No. 5, OCTOBER 1992.
- [37] Sune r.j. Axelsson, *"Area Target Response of Triangularly Frequency-Modulated Continuous-Wave Radars"*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems vol. Aes-14, no. 2 March 1978
- [38] S. Sharensen, *"Angle Estimation Accuracy with a Monopulse Radar in the Search Mode"* The RAND Corporation, Santa Monica, Calif., Research Memorandum-1491; May 20, 1955.
- [39] Kristen Parrish, *"An Overview of FMCW Systems in MATLAB "*, EE 383V RADAR PRINCIPLES: TERM PROJECT.
- [40] Joon Hyung Yi, Inbok Lee, Modar Safir Shbat, and Vyacheslav Tuzlukov, *"24 GHz FMCW Radar Sensor Algorithms for Car Applications"*, Kyungpook National University, Daegu, SOUTH KOREA.
- [41] Fitrilina, *Sistem Pengenalan Isolated Digit yang Robust dengan Menggunakan Spectral Substraction Berdasarkan Minimum Statistic.* Institute Teknologi Bandung, Thesis, 2010.
- [42] Michael Glen Anderson. *Design of Multiple Frequency Continuous Wave Radar Hardware and Micro-Doppler Based Detection and Classification Algorithms.* The University of Texas at Austin. Disertasi. 2008.

LAMPIRAN-A

FREKUENSI RADAR

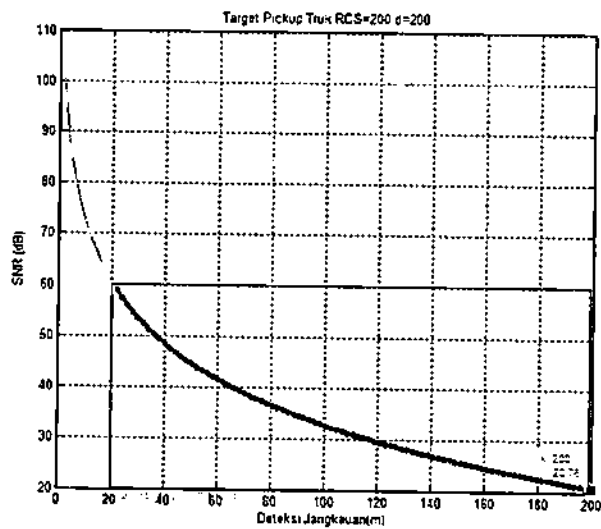
Tabel A.1 Frekuensi Radar

Nama	Band	Frekuensi	Panjang Gelombang
Extremely Low Frequency	ELF	3 – 30 Hz	100.000 – 10.000 km
Super Low Frequency	SLF	30 – 300 Hz	10.000 – 1.000 km
Ultra Low Frequency	ULF	300 – 3000 Hz	1.000 – 100 km
Very Low Frequency	VLF	3 – 30 kHz	100 – 10 km
Low Frequency	LF	30 – 300 kHz	10 km – 1 km
Mediun Frequency	MF	300 - 3000 kHz	1km – 100 m
High Frequency	HF	3 – 30 MHz	100 – 10 m
Very High Frequency	VHF	30 – 300 MHz	10 – 1 m
Ultra High Frequency	UHF	300 - 3000 MHz	1m – 10 cm
Super High Frequency	SHF	3 – 30 GHz	10 – 1cm
Extremely High Frequency	EHF	30 – 300 GHz	1 cm – 1mm

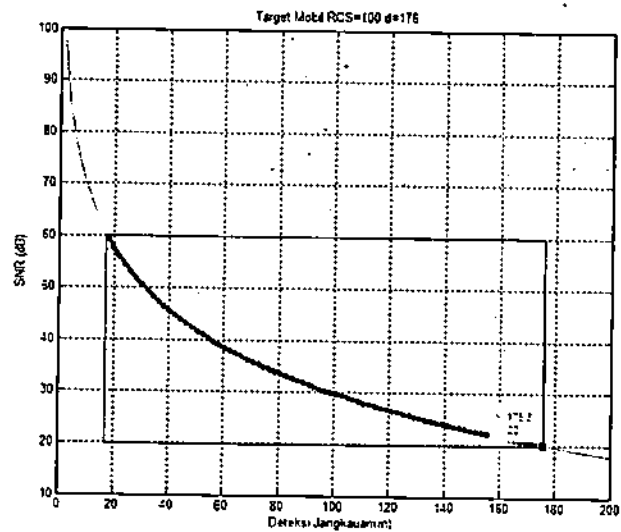
TabelA.2 Penamaan Band Frekuensi Radar

ITU Band	Frekuensi (GHz)
HF	0.003 – 0.03
VHF	0.03 – 0.3
UHF	0.3 - 1.0
L-band	1.0 - 2.0
S-band	2.0 – 4.0
C-band	4.0 – 8.0
X-band	8.0 – 12.5
Ku-band	12.5 – 18.0
K-band	18.0 - 26.5
Ka-band	26.5 - 40.0
MMW	>34.0

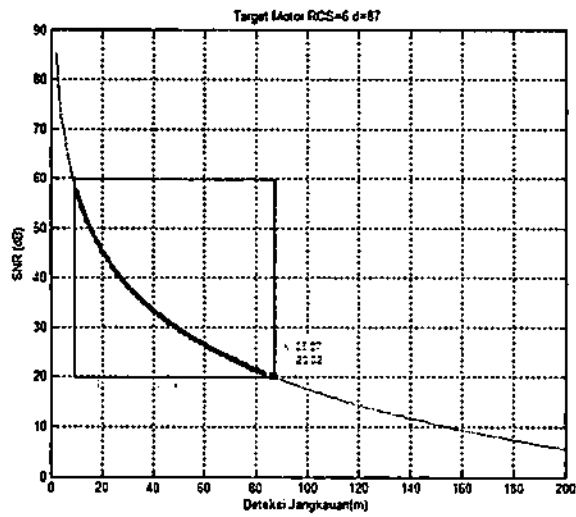
RADAR CROSS SECTION



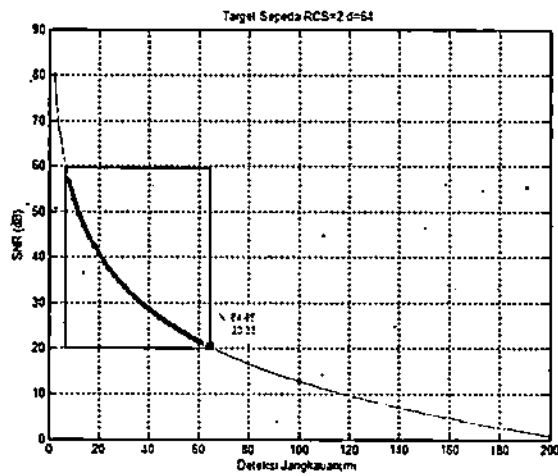
Gambar B-1. RCS dan batas jangkauan target “truk”



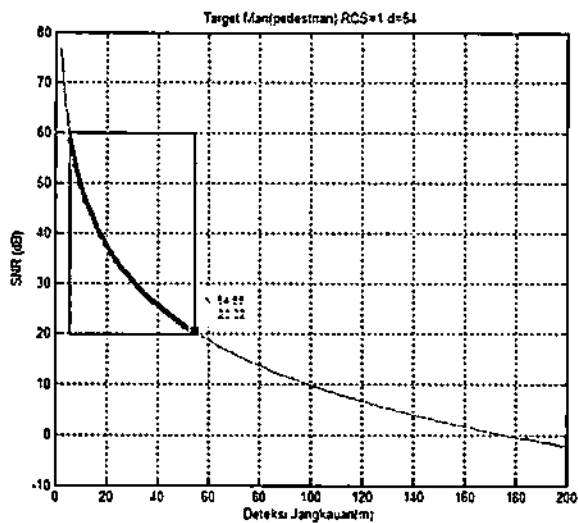
Gambar B-2. RCS dan batas jangkauan target “mobil”



Gambar B-3. RCS dan batas jangkauan target “motor”



Gambar B-4. RCS dan batas jangkauan target “sepeda”



Gambar B-5. RCS dan batas jangkauan target “orang”

Lampiran-C

Penurunan Persamaan Radar Pada Simulasi Matlab

C-1. Frekuensi Modulasi

Jika $\theta_i(t)$ adalah sudut sinyal carrier yang telah dimodulasi oleh $m(t)$, maka persamaan sinyal termodulasi menjadi:

$$s(t) = A_c \cos(\theta_i)$$

Frekuensi rata-rata dari sinyal tersebut adalah:

$$f_{\Delta} = \frac{\theta_i(t + \Delta t) - \theta_i(t)}{2\pi\Delta t}$$

Sehingga kita definisikan frekuensi sesaat dari sinyal $s(t)$:

$$\begin{aligned} f_i(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} f_{\Delta} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{\theta_i(t + \Delta t) - \theta_i(t)}{2\pi\Delta t} \right] \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} \end{aligned}$$

Frekuensi modulasi adalah bentuk modulasi sudut dimana frekuensi sesaat $f_i(t)$ berubah secara linier oleh $m(t)$.

$$f_i(t) = f_0 + k_f m(t)$$

k_f : sensitifitas modulator frekuensi (Hertz/volt)

Integral dari frekuensi sesaat adalah sudut sesaat.

$$\begin{aligned} f_i(t) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt}, \text{ dimana } \theta_i(t) = 2\pi \int_0^t f_i(t) dt \\ &= 2\pi \int_0^t [f_0 + k_f m(t)] dt \\ \theta_i(t) &= 2\pi f_0 t + 2\pi k_f \int_0^t m(t) dt \end{aligned}$$

Dengan demikian persamaan sinyal FM yang dihasilkan adalah:

$$s(t) = A_c \cos \left[2\pi f_0 t + 2\pi k_f \int_0^t m(t) dt \right]$$

$$s(t) = A_c \cos \left(2\pi f_0 t + k_f \int_0^t \cos 2\pi f_m u du \right)$$

dimana f_0 frekuensi operasi (carrier) dari radar, $\cos 2\pi f_m t$ sinyal pemodulasi, A_c konstanta, $k_f = 2\pi \Delta f_{\text{peak}}$ dimana Δf_{peak} adalah frekuensi puncak dari deviasi.

Fasa :

$$\begin{aligned} \psi(t) &= 2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f_{\text{peak}} \int_0^t \cos 2\pi f_m u du \\ &= 2\pi f_0 t + \beta \sin 2\pi f_m t \end{aligned}$$

β : indeks modulasi FM

$$\beta = \Delta f_{\text{peak}} / f_m$$

Sinyal terima $s_r(t)$ akibat pantulan target pada jarak R adalah:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_0(t - \Delta t) + \beta \sin 2\pi f_m(t - \Delta t))$$

C-2. Linear Frequency Modulation

Frekuensi Modulasi Linear : frekuensi menyapu ke atas (up-chirp) atau ke bawah (down-chirp). Frekuensi sesaat meningkat secara linear dengan sinyal $m(t) = \mu t$,

dimana $\mu = \frac{B}{T}$.

Sinyal pancar up-chirp LFM adalah:

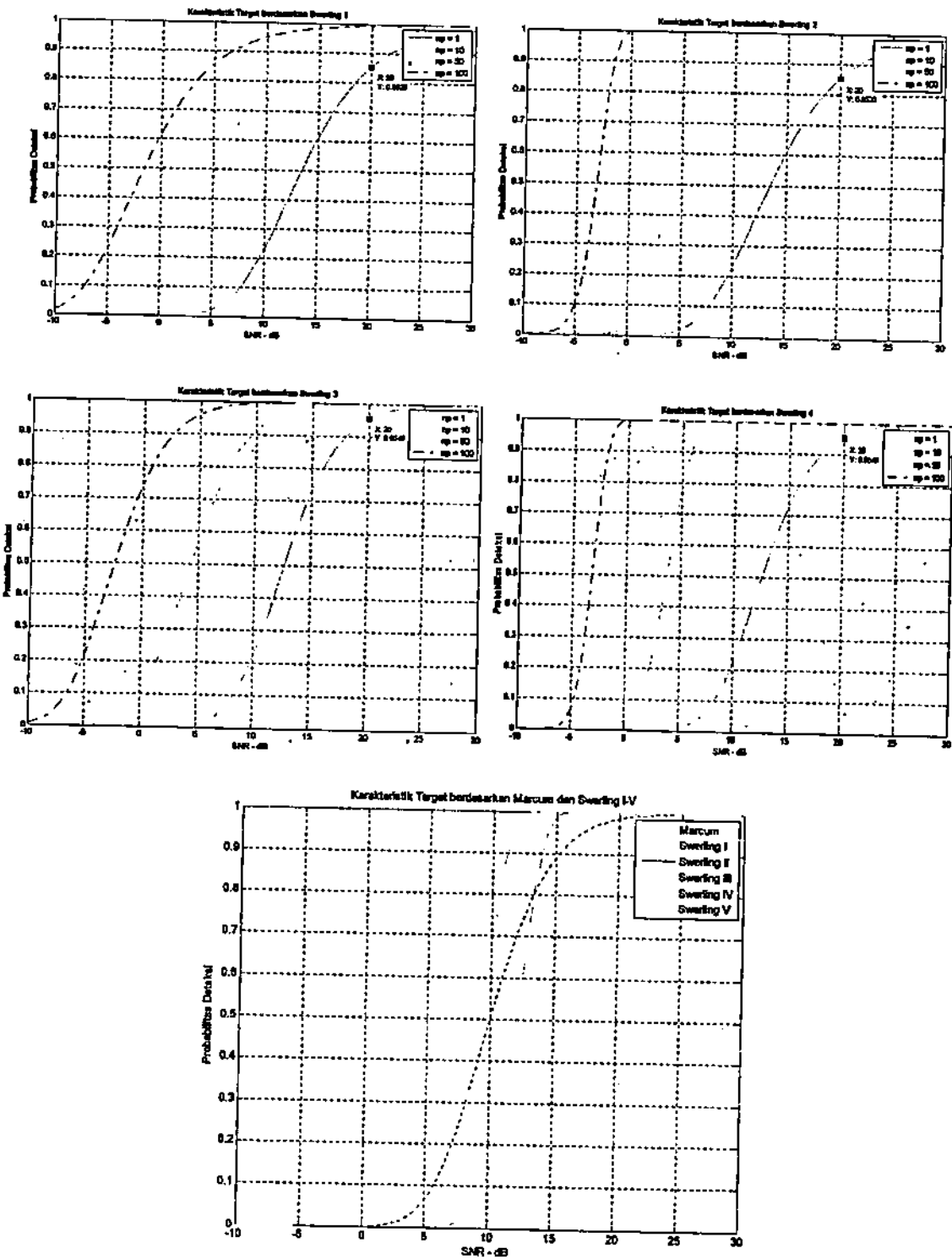
$$s_x(t) = A \cos \left[2\pi f_0 t + 2\pi \int_0^t m(t) dt \right]$$

$$= A \cos \left[2\pi f_0 t + 2\pi \int_0^t \alpha t dt \right]$$

$$= A \cos \left[2\pi f_0 t + 2\pi \left(\mu \frac{t^2}{2} \right) \right]$$

$$\theta_i(t) = 2\pi \left(f_0 t + \mu \frac{t^2}{2} \right)$$

Probabilitas Deteksi Target

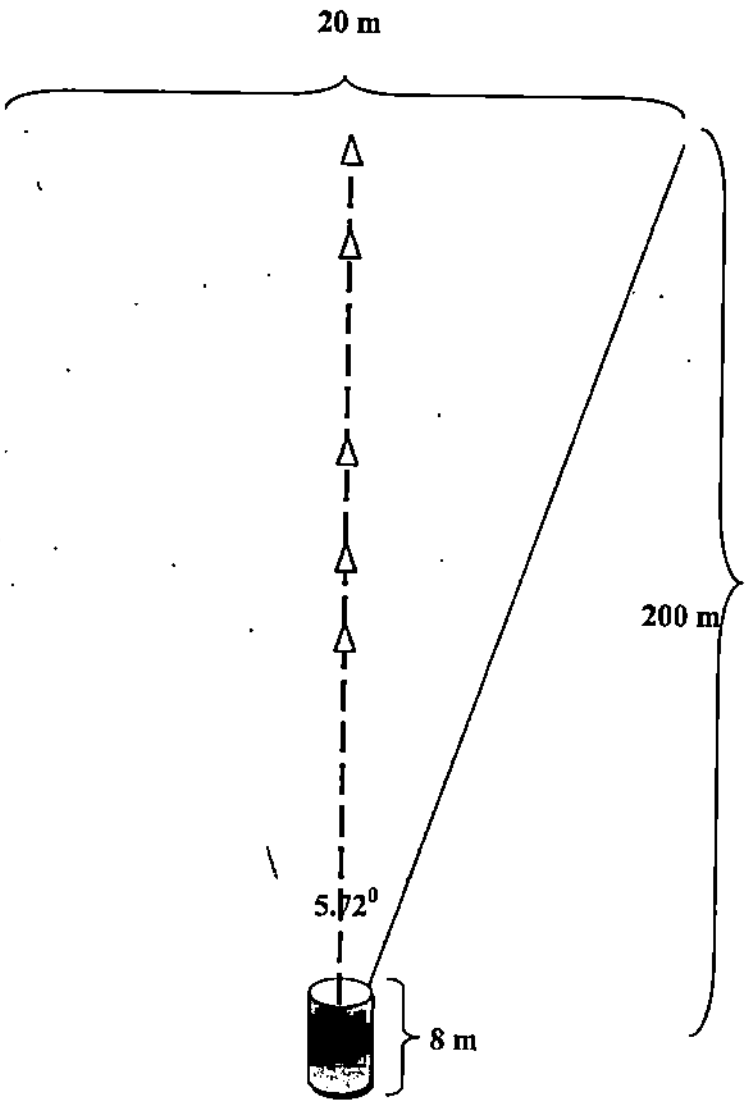


Lampiran-E

Desaian Lokasi Radar dan Target

Tabel E.1 Parameter Lokasi radar dan target

Parameter	Spesifikasi
Jarak maksimum target	200 m
Lebar jalan	20 m
Tinggi posisi radar	8 m

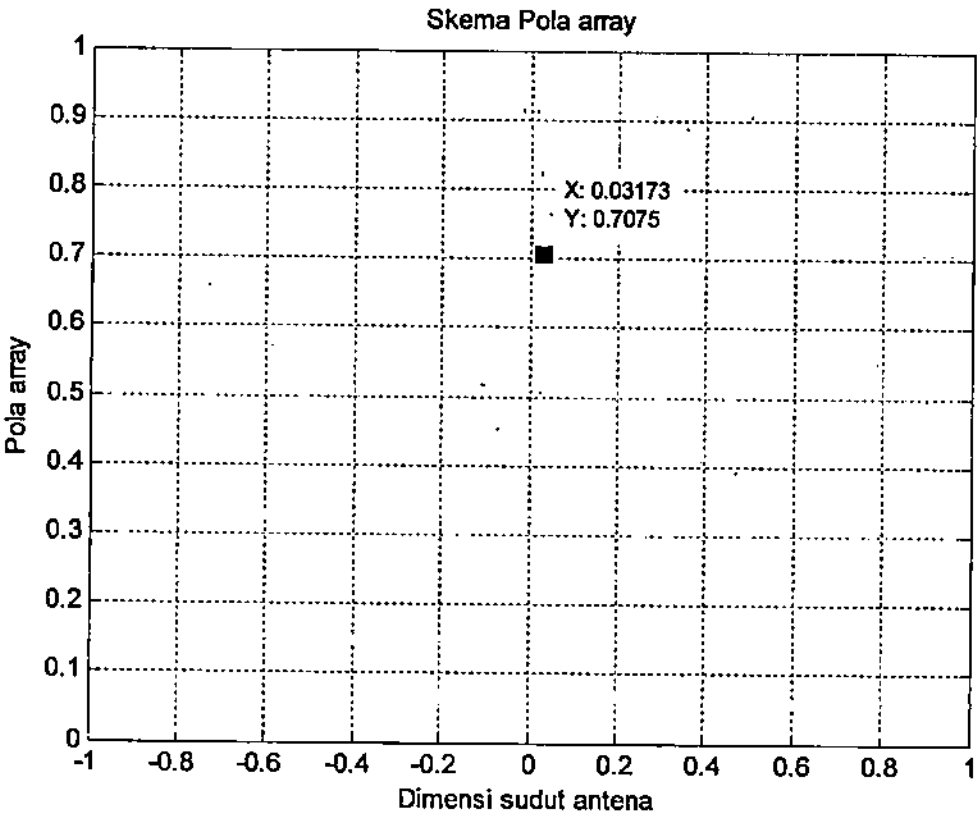


Lampiran- F

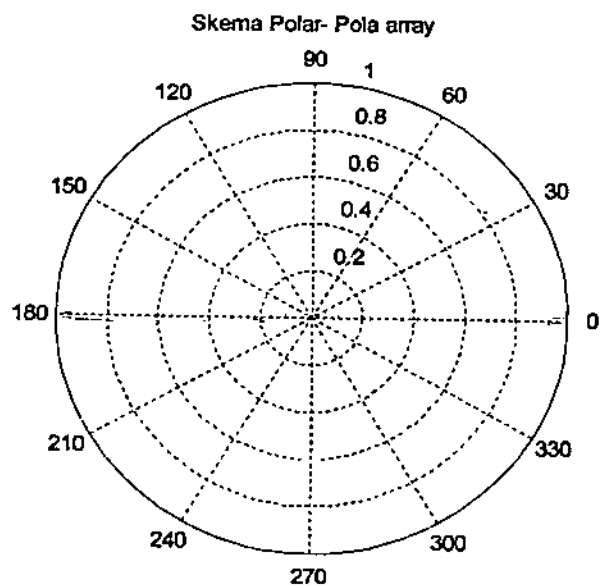
Model dan Pola Antena

Tabel F.1 Parameter Antena Radar

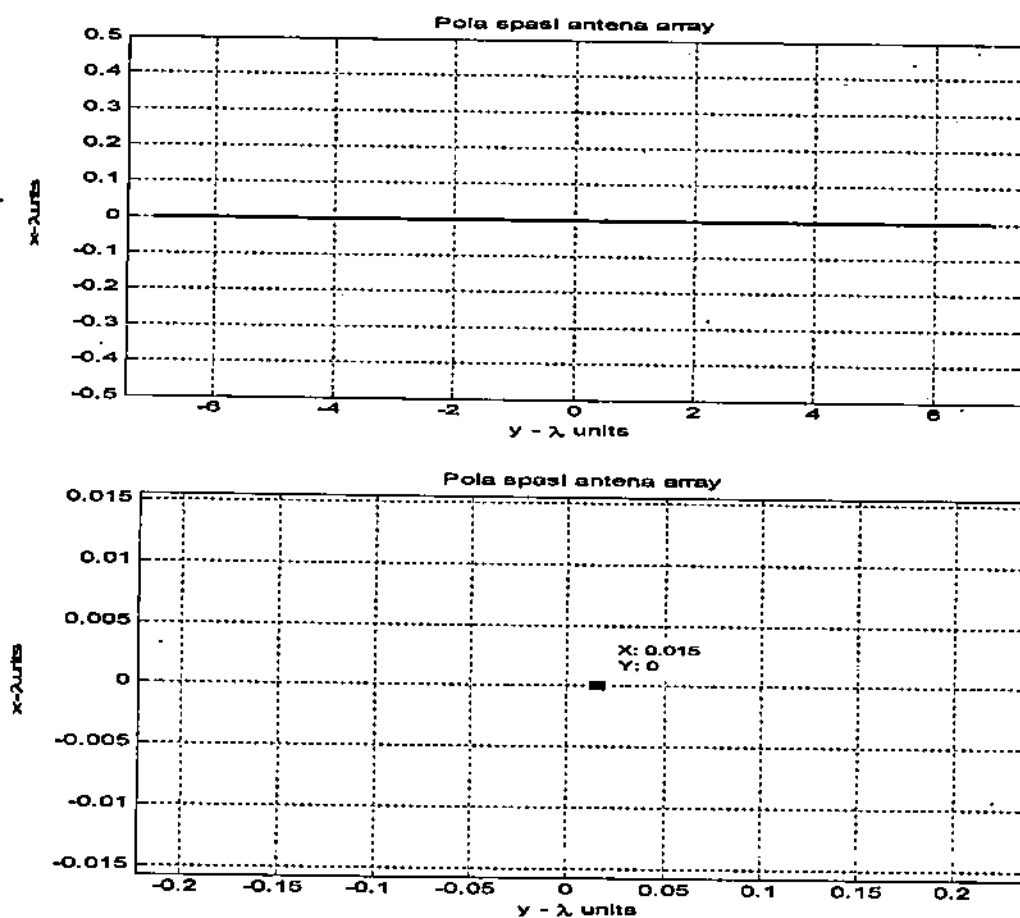
Parameter	Spesifikasi
Jenis Antena	Linear Array (1 TX, 2RX)
Coverage Elevasi	-2.3 ⁰
Coverage Azimut	5.72 ⁰ (2 antena Rx) 1 antena RX = 2.86 ⁰



Gambar F-1. Skema pola array antena linear array



Gambar F-2. Skema polar antenna linear array

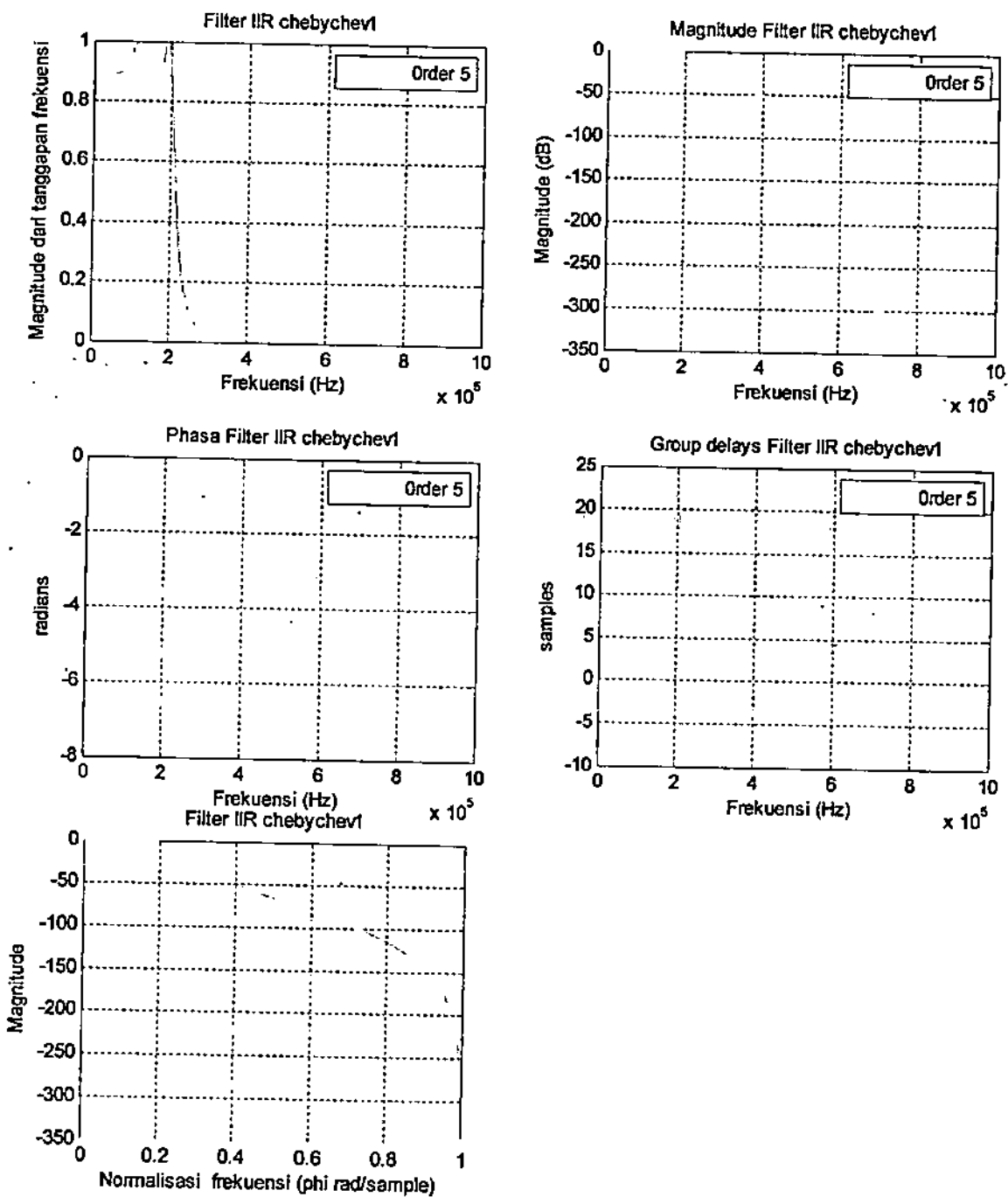


Gambar F-3. Jarak elemen antenna linear array

Filter Radar

Jenis filter : IIR (Infinite Impulse Response)
Jenis filter IIR : chebychev orde 1
Tipe Filter : Low Pass Filter
Orde Filter : 5

Frekuensi cut-off : 200kHz



Lampiran-H

Hasil Pengujian Model – Model Target

TabelH.1 Hasil Pengujian Data Radar Model Target Terlatih pada SNR 20dB

Model target	Deteksi	Estimasi(dikenali)
Truk1	Benar	Truk
Truk2	Benar	Truk
Truk3	Benar	Truk
Truk4	Benar	Truk
Truk5	Benar	Truk
Truk6	Benar	Truk
Truk7	Benar	Truk
Truk8	Benar	Truk
Truk9	Benar	Truk
Truk10	Benar	Truk
Mobil1	Benar	Mobil
Mobil2	Benar	Mobil
Mobil3	Benar	Mobil
Mobil4	Benar	Mobil
Mobil5	Benar	Mobil
Mobil6	Benar	Mobil
Mobil7	Benar	Mobil
Mobil8	Benar	Mobil
Mobil9	Benar	Mobil
Mobil10	Benar	Mobil
Motor1	Benar	Motor
Motor2	Benar	Motor
Motor3	Benar	Motor
Motor4	Benar	Motor
Motor5	Benar	Motor
Motor6	Benar	Motor
Motor7	Benar	Motor
Motor8	Benar	Motor
Motor9	Benar	Motor
Motor10	Benar	Motor
Sepeda1	Benar	Sepeda
Sepeda2	Benar	Sepeda
Sepeda3	Benar	Sepeda
Sepeda4	Benar	Sepeda
Sepeda5	Benar	Sepeda
Sepeda6	Benar	Sepeda
Sepeda7	Benar	Sepeda

Sepeda8	Benar	Sepeda
Sepeda9	Benar	Sepeda
Sepeda10	Benar	Sepeda
Orang1	Benar	Orang
Orang2	Benar	Orang
Orang3	Benar	Orang
Orang4	Benar	Orang
Orang5	Benar	Orang
Orang6	Benar	Orang
Orang7	Benar	Orang
Orang8	Benar	Orang
Orang9	Benar	Orang
Orang10	Benar	Orang

Tabel H.2 Hasil Pengujian Data Radar Model Target Tidak Dilatih pada SNR 20dB

Jenis Target	Model Target	Jarak	Kecepatan	Sudut	Deteksi			Estimasi	
		R	V	A	R	V	A	dikenali	d.sebagai
Truk	Truk1	200	7.4	2.86	200.1953	7.4	2.862	benar	truk
	Truk2	195	7.2	2.93	196.2891	7.2	2.926	benar	truk
	Truk3	190	-7	-3	190.4297	-6.98	-3.005	benar	truk
	Truk4	185	7	3.09	186.5234	6.99	3.083	benar	truk
	Truk5	180	-7	-3.18	180.6641	-6.98	-3.185	benar	truk
	Truk6	175	7	3.27	175.7813	6.99	3.266	benar	truk
	Truk7	170	-7	-3.36	170.8984	-6.98	-3.365	benar	truk
	Truk8	165	7	3.47	165.0156	6.99	3.468	benar	truk
	Truk9	160	-6.95	-3.57	161.1328	-6.93	-3.575	benar	truk
	Truk10	155	6.95	3.69	156.25	6.94	3.69	benar	truk
	Truk11	150	-5.56	-3.81	151.3672	-5.54	-3.818	benar	truk
	Truk12	145	5.56	3.94	146.4844	5.55	3.933	benar	truk
	Truk13	140	-5	-4.09	140.625	-4.98	-4.096	benar	truk
	Truk14	135	5	4.24	135.7422	5	4.234	benar	truk
	Truk15	130	-5	-4.39	130.8594	-4.98	-4.393	benar	truk
	Truk16	125	5	4.58	125.9766	4.99	4.577	benar	truk
	Truk17	115	-4.17	-4.97	116.2109	-4.15	-4.976	benar	truk
	Truk18	105	4.17	5.45	106.4453	4.16	5.445	benar	truk
	Truk19	95	-3.89	-6.02	95.7031	-3.86	-6.027	benar	truk
	Truk20	89	3.89	6.43	89.8438	3.87	6.425	benar	truk
Mobil	Mobil1	176	7.4	2.86	176.7575	7.4	2.855	benar	mobil
	Mobil2	170	7.2	2.97	170.8984	7.2	2.97	benar	mobil
	Mobil3	165	7	3.06	166.0156	6.99	3.052	salah	truk
	Mobil4	160	-7	-3.15	161.1328	-6.98	-3.151	benar	mobil
	Mobil5	155	7	3.25	156.25	6.99	3.246	benar	mobil

	Mobil6	150	-7	-3.36	151.3672	-6.98	-3.362	benar	mobil
	Mobil7	145	7	3.48	146.4844	6.99	3.48	benar	mobil
	Mobil8	140	-7	-3.6	140.625	-6.98	-3.606	benar	mobil
	Mobil9	135	6.95	3.74	135.7422	6.94	3.729	benar	mobil
	Mobil10	130	-6.95	-3.88	130.8594	-6.93	-3.889	benar	mobil
	Mobil11	125	5.56	4.03	125.9766	5.55	4.025	benar	mobil
	Mobil12	120	-5.56	-4.2	121.0983	-5.54	-4.209	benar	mobil
	Mobil13	115	5	4.39	116.2109	5	4.387	benar	mobil
	Mobil14	110	-5	-4.58	111.3281	-4.97	-4.583	benar	mobil
	Mobil15	105	5	4.8	106.4453	4.99	4.795	benar	mobil
	Mobil16	100	-5	-5.04	100.5859	-4.97	-5.047	benar	mobil
	Mobil17	95	4.17	5.31	95.7011	4.16	5.3	benar	mobil
	Mobil18	90	-4.17	-5.6	90.82032	-4.15	-5.605	benar	mobil
	Mobil19	85	3.89	5.93	85.935	3.87	5.924	benar	mobil
	Mobil20	79	-3.89	-6.39	80.781	-3.86	-6.401	benar	mobil
Motor	Motor1	87	7.4	2.86	87.8906	7.4	2.855	benar	motor
	Motor2	83	7.2	2.97	83.9844	7.2	2.961	benar	motor
	Motor3	80	7	3.08	81.0547	6.99	3.072	benar	motor
	Motor4	80	-7	-3.08	81.0547	-6.98	-3.085	salah	mobil
	Motor5	79	7	3.12	80.0781	6.99	3.114	benar	motor
	Motor6	75	-7	-3.29	76.1719	-6.98	-3.299	benar	motor
	Motor7	71	7	3.47	72.2656	6.99	3.462	benar	motor
	Motor8	70	-7	-3.52	71.2891	-6.98	-3.527	benar	motor
	Motor9	67	6.95	3.68	68.3594	6.94	3.673	benar	motor
	Motor10	65	-6.95	-3.79	65.4297	-6.93	-3.796	benar	motor
	Motor11	63	5.56	3.91	64.4531	5.55	3.904	benar	motor
	Motor12	60	-5.56	-4.11	60.5469	-5.54	-4.121	benar	motor
	Motor13	59	5	4.18	60.5469	5	4.17	benar	motor
	Motor14	55	-5	-4.48	55.6641	-4.98	-4.489	benar	motor
	Motor15	51	5	4.83	51.7578	4.99	4.812	benar	motor
	Motor16	50	-5	-4.93	50.7813	-4.97	-4.938	benar	motor
	Motor17	47	4.17	5.24	47.8516	4.16	5.23	benar	motor
	Motor18	43	-4.17	-5.73	43.9453	-4.14	-5.74	benar	motor
	Motor19	40	3.33	6.16	41.0156	3.6	6.149	benar	motor
	Motor20	39	-3.33	-6.32	40.0391	-3.58	-6.336	salah	orang
Sepeda	Sepeda1	64	3.33	2.86	65.4297	3.33	2.855	benar	sepeda
	Sepeda2	61	3.33	3	62.5	3.33	2.993	benar	sepeda
	Sepeda3	60	-3	-3.06	60.5469	-2.99	-3.069	benar	sepeda
	Sepeda4	58	3	3.161	58.5938	3	3.155	benar	sepeda
	Sepeda5	55	3	3.33	55.6641	3	3.325	benar	sepeda
	Sepeda6	55	-3	-3.33	55.6641	-2.99	-3.332	benar	sepeda
	Sepeda7	52	3	3.53	52.7344	3	3.53	benar	sepeda
	Sepeda8	50	-3	-3.68	50.7813	-2.99	-3.687	benar	sepeda
	Sepeda9	49	3	3.74	49.8047	3	3.732	benar	sepeda
	Sepeda10	46	3	3.99	46.875	3	3.984	benar	sepeda

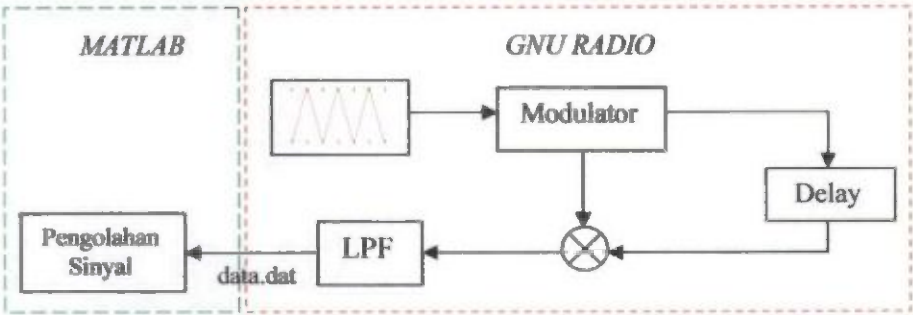
	Sepeda11	45	-2.78	-4.08	45.8984	-2.77	-4.084	benar	sepeda
	Sepeda12	43	2.78	4.26	43.9453	2.78	4.256	benar	sepeda
	Sepeda13	40	-2.78	-4.58	41.0156	-2.76	-4.583	benar	sepeda
	Sepeda14	37	2.78	4.96	38.0859	2.78	4.948	benar	sepeda
	Sepeda15	35	-2.5	-5.24	36.1328	-2.48	-5.246	benar	sepeda
	Sepeda16	34	2.5	5.39	35.1563	2.5	5.377	benar	sepeda
	Sepeda17	31	-2.5	-5.92	32.2166	-2.48	-5.929	benar	sepeda
	Sepeda18	30	2.5	6.11	31.25	2.49	6.096	benar	sepeda
	Sepeda19	29	-2.22	-6.33	30.2734	-2.2	-6.337	benar	sepeda
	Sepeda20	29	2.22	6.33	30.2734	2.21	6.319	salah	orang
Orang	Orang1	54	1.94	2.86	54.6875	1.98	2.855	benar	orang
	Orang2	52	1.67	2.98	52.7344	1.68	2.97	benar	orang
	Orang3	50	1.5	3.09	50.7813	1.5	3.084	benar	orang
	Orang4	50	-1.5	-3.09	50.7813	-1.49	-3.088	benar	orang
	Orang5	48	1.5	3.22	48.8281	1.51	3.217	benar	orang
	Orang6	46	-1.5	-3.36	46.875	-1.49	-3.365	benar	orang
	Orang7	45	-1.5	-3.44	45.8984	-1.49	-3.447	benar	orang
	Orang8	44	1.5	3.52	44.9219	1.5	3.515	benar	orang
	Orang9	42	1.39	3.68	42.9688	1.39	3.676	benar	orang
	Orang10	40	-1.39	-3.87	41.0156	-1.38	-3.874	benar	orang
	Orang11	38	1.39	4.07	39.0625	1.39	4.065	benar	orang
	Orang12	36	-1.39	-4.29	37.1094	-1.38	-4.294	benar	orang
	Orang13	35	1.11	4.42	36.1328	1.11	4.417	benar	orang
	Orang14	34	-1.11	-4.55	35.1563	-1.1	-4.552	benar	orang
	Orang15	32	1.11	4.84	33.2031	1.11	4.835	benar	orang
	Orang16	30	-1.11	-5.16	31.25	-1.1	-5.169	benar	orang
	Orang17	28	0.83	5.53	29.2969	0.83	5.525	benar	orang
	Orang18	27	-0.83	-5.73	28.3203	-0.82	-5.731	benar	orang
	Orang19	26	0.56	5.95	27.3438	0.56	5.94	benar	orang
	Orang20	25	-0.56	-6.19	26.3672	-0.55	-6.189	benar	orang

Lampiran-I

Simulasi Sistem Radar FMCW dengan GNU Radio

I-1. Pemodelan Simulasi Sistem Radar FMCW dengan GNU Radio

Desain secara umum arsitektur sistem radar FMCW yang direalisasikan menggunakan GNU Radio pada gambar I.1 dan spesifikasi sistem radar FMCW yang digunakan pada tabel I.1.



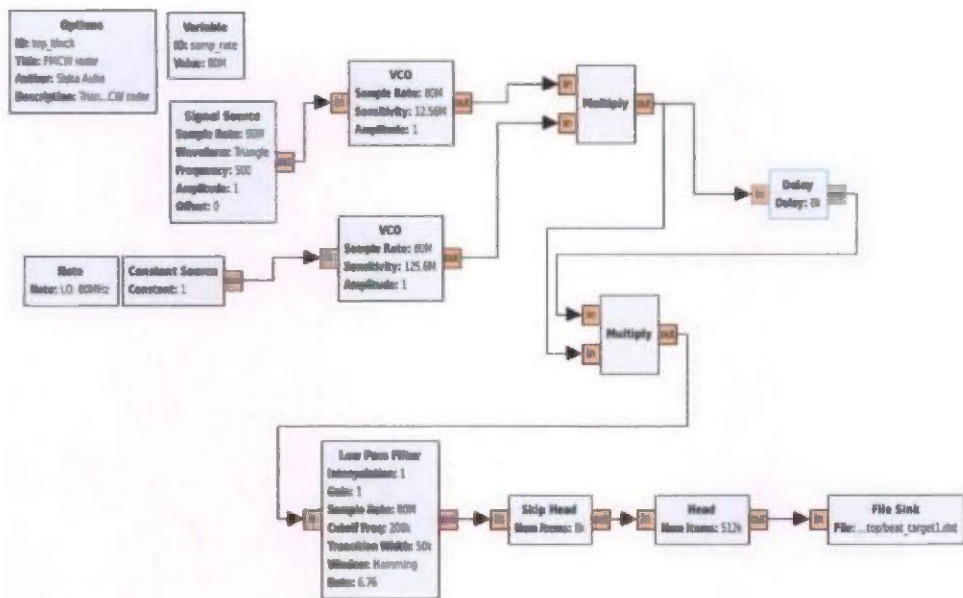
Gambar I.1 Desain arsitektur sistem radar FMCW berbasis SDR

Tabel I.1 Spesifikasi desain radar FMCW berbasis SDR GNU radio

Parameter	Notasi	Spesifikasi
Frekuensi carrier	f_c	20 MHz
Bandwidth	B	2 MHz
Chirp waveform		Triangular
Periode chirp	T	1ms
Periode Peodulasi	T_m	2ms
Frekuensi modulasi	f_m	500 Hz
ADC (sampling rate)	f_{sam}	80 MHz
Range Resolution	ΔR	75 m

Pada tahap ini, dilakukan simulasi untuk sistem FMCW yang didesain menggunakan GNU radio. Pertama-tama dibuat skema sebagai berikut pada GNU Radio Companion.

I-2. Percobaan Sistem FMCW untuk Satu Target



Gambar I-2. Skema untuk simulasi pada GNU Radio Companion (file binary)

Pada simulasi ini digunakan frekuensi sampling 80 MHz. Spesifikasi dari beberapa blok yang terdapat pada skema yang ditunjukkan oleh gambar I.2 diberikan pada tabel I.2.

Tabel I-2. Parameter pada blok-blok untuk simulasi dengan GNU Radio

Blok	Parameter
Signal Source	Sample rate = 80 MHz Waveform = triangular Frequency = 500 Hz Amplitude =1
Constant Source	Constant = 1
VCO (atas)	Sample rate = 80 MHz Sensitivity = 12.56 MHz/volt Amplitude =1
VCO (bawah)	Sample rate = 80 MHz Sensitivity = 125.6 MHz/volt Amplitude =1
Delay	8000
Low pass Filter	Sample rate = 80 MHz

	Cutoff Freq = 200kHz Window = hamming
--	--

Pada skema gambar I.2 terdapat dua buah blok VCO. Input blok VCO yang pertama terhubung ke blok Signal Source yang menghasilkan sinyal berbentuk triangular. Sinyal dibangkitkan di signal source, kemudian voltage controlled osilator (VCO) mengubah signal source menjadi sinyal FM. Hasil output blok VCO tersebut adalah sinyal chirp pada frekuensi baseband. Frekuensi sinyal yang dihasilkan naik dan turun secara linear mulai dari 0 Hz sampai 2 MHz selama selang waktu 2ms (frekuensi Signal = 500 Hz). Sinyal triangular yang dihasilkan digunakan untuk mencatu VCO dengan nilai sensitifitas $2\pi \times 2\text{MHz/volt}$, yang akan menghasilkan gelombang chirp dengan bandwidth 2 MHz.

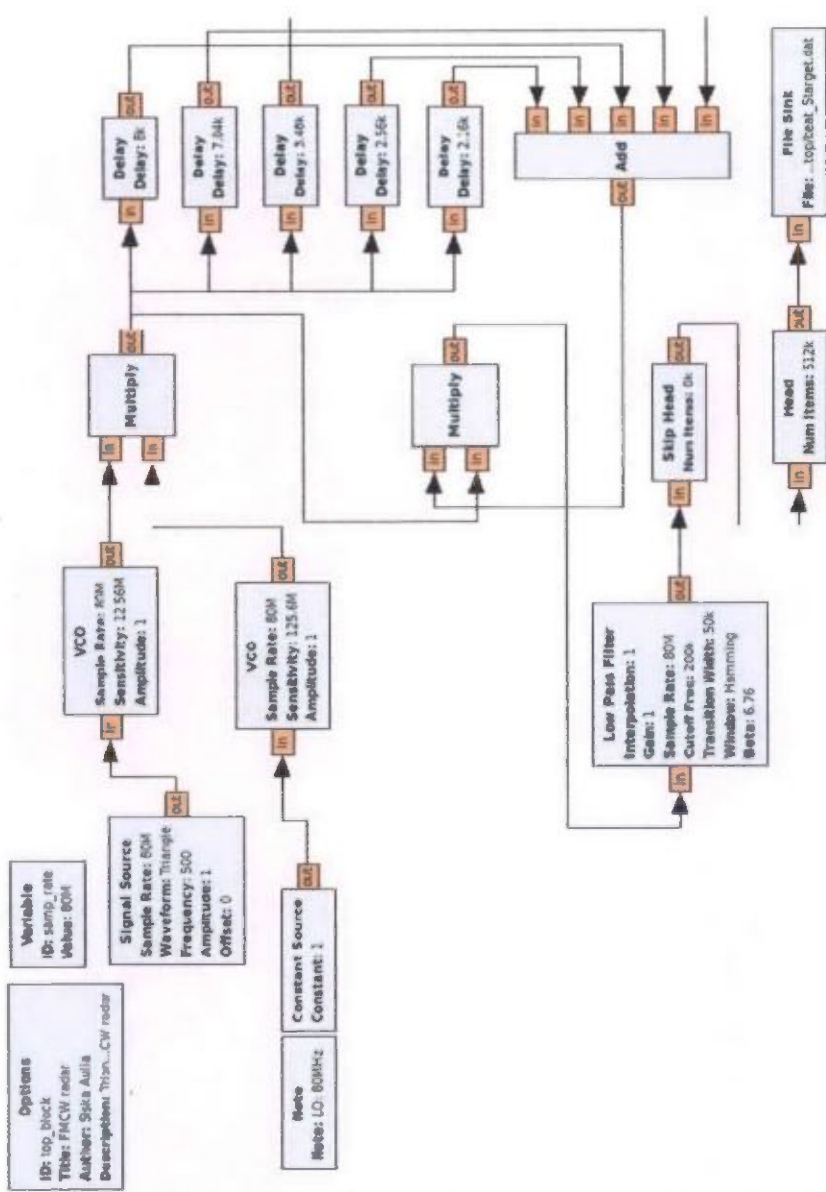
Input blok VCO yang kedua terhubung dengan blok Constant Source yang menghasilkan output tegangan konstan. Blok VCO kedua tersebut menghasilkan sinyal sinusoidal yang akan digunakan sebagai carrier. Frekuensinya ketika amplitude blok Constant Source bernilai 1 adalah 20 MHz. Kedua sinyal tersebut dikalikan untuk mengimplementasikan proses modulasi.

Pada output modulasi, terdapat blok Delay yang berfungsi memberi delay beberapa sample pada sinyal input. Blok delay menyatakan sinyal radar mengenai target yang mengalami penundaan waktu. Kemudian target memantulkan sinyal, fungsi ini diimplementasikan sebagai proses demodulasi. Hasil demodulasi tersebut dikalikan dengan sinyal hasil modulasi, untuk mendapatkan frekuensi beat, yang diikuti oleh blok *Low Pass Filter* untuk mendapatkan komponen *Low Order* dari frekuensi beat sekaligus sebagai aliasing filter. Hasilnya kemudian disimpan ke dalam suatu file dengan format binary float dengan menggunakan blok File Sink (file binary data.dat). Pada MATLAB, dilakukan pengolahan sinyal beat dan transformasi fourier sehingga didapatkan komponen frekuensi rendah sebagai frekuensi beat dan jarak target.

I-3. Percobaan Sistem FMCW untuk Lima Target

Untuk mensimulasikan deteksi target pada desain sistem FMCW yang telah dibuat. Pemodelan dengan memberikan delay, dapat dibuat seolah-olah sinyal transmit mengenai suatu target pada jarak tertentu sebelum dikembalikan ke

receive radar. Pada pemodelan sistem kedua ini, diuji coba dimana sistem digunakan untuk mendeteksi lima target pada gambar 1-3.



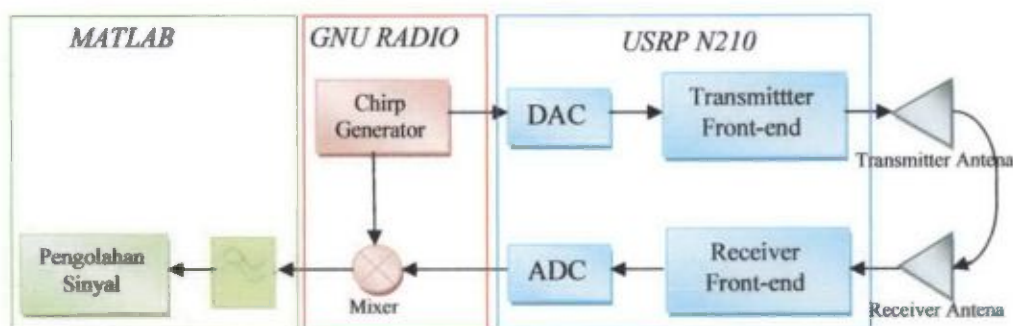
Gambar 1-3. Modifikasi skematik untuk simulasi pada GNU Radio lima target

Lampiran-J

Implementasi Sistem FMCW Radar dengan USRP

J-1. Perancangan Sistem FMCW Radar dengan USRP

Pada tahap ini, desain yang sebelumnya telah dibuat dan disimulasikan pada GNU Radio kemudian diimplementasikan pada USRP. Terdapat beberapa perubahan yang dilakukan pada desain sebelumnya (GNU Radio) agar dapat diimplementasikan ke USRP. Desain secara umum arsitektur sistem radar FMCW yang diimplementasikan menggunakan USRP pada gambar J.1 dan spesifikasi sistem FMCW radar yang digunakan pada tabel J.1.



Gambar J.1 Desain arsitektur sistem radar FMCW berbasis SDR

USRP N210 berfungsi sebagai FPGA untuk melakukan pembangkitan sinyal dan translasi sinyal dari rentang IF ke RF. GNU Radio bekerja pada rentang frekuensi baseband maupun IF. GNU Radio digunakan untuk membangkitkan sinyal chirp FMCW, mengirim dan menerima data dari dan ke USRP, dan melakukan mixing antara sinyal pancar dengan sinyal terima. Hasil mixing dua sinyal ini berupa sinyal beat yang kemudian disimpan dalam bentuk file binary.

Pada matlab, dilakukan proses pengolahan sinyal, pemfilteran dari sinyal beat dan transformasi sinyal. Spesifikasi dari radar yang didesain dengan menggunakan USRP ditunjukkan pada tabel J.1.

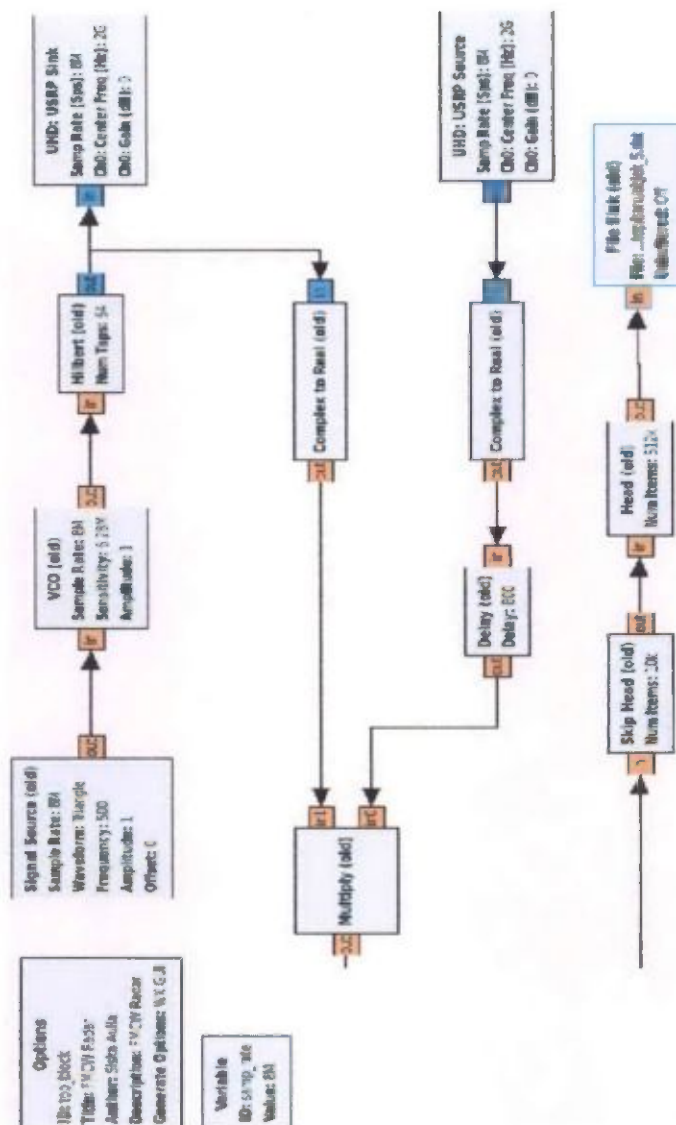
Tabel J.1 Spesifikasi sistem radar FMCW implementasi dengan USRP

Parameter	Notasi	Spesifikasi
Frekuensi carrier	f_c	2 GHz
Bandwidth	B	1 MHz
Chirp waveform		Triangular
Periode chirp	T	1ms
Periode Peodulasi	T_m	2ms
Frekuensi modulasi	f_m	500 Hz
ADC (sampling rate)	f_{sam}	8 MHz
Range Resolution	ΔR	150 m

Perancangan frekuensi radar pada USRP ini dibatasi oleh spesifikasi daughterboard WBX dengan frekuensi maksimum 2,2 GHz. Pada penelitian ini diambil frekuensi 2 GHz sebagai titik kerja (frekuensi carrier). Pemilihan bandwidth 2 MHz disebabkan keterbatasan dari USRP dan komputer host yang digunakan, dimana sampling rate yang tinggi akan terjadi kondisi overrun dan underrun pada USRP sehingga terjadi kesalahan pembacaan. Dalam perancangan sistem, digunakan GRC untuk memudahkan proses desain. Setelah melakukan desain, GRC akan menghasilkan sebuah file python yang digunakan untuk mengendalikan USRP dari komputer host. Skematik radar fmcw yang didesain ditunjukkan pada gambar J.2 dan J.3.

J-2. Percobaan Sistem FMCW untuk Satu Target

Skema rangkaian pengujian sistem USRP dengan perangkat lunak GNU radio untuk satu target ditunjukkan pada gambar J.2. Blok yang digunakan meliputi blok *Signal Source* sebagai sinyal pemodulasi FM berbentuk segitiga (triangular) yang memiliki frekuensi pemodulasi 500Hz dengan amplitudo 1 volt. Sinyal segitiga yang dihasilkan digunakan untuk mencatu VCO dengan nilai sensitifitas $2\pi \times 1\text{MHz/volt}$, yang akan menghasilkan gelombang chirp dengan bandwidth 1 MHz.



Gambar J-2. Skema rangkaian pengujian sistem USRP di GNU radio

Gambar J.2 merupakan desain arsitektur radar yang dioperasikan secara real-time dan diimplementasikan menggunakan GNU Radio beserta USRP. Blok yang digunakan meliputi file source (FMCW chirp generator), UHD USRP Sink, UHD Source Sink, hilbert transform, complex-to-real, receiver, mixer, low pass filter, delay dan file sink. Spesifikasi dari blok – blok yang terdapat pada skema yang ditunjukkan oleh gambar J.2 diberikan pada tabel J.2.

Tabel J-2. Parameter pada blok-blok untuk simulasi dengan GNU Radio

Blok	Parameter
Signal Source	Sample rate = 8 MHz Waveform = triangular Frequency = 500 Hz Amplitude =1
VCO	Sample rate = 8 MHz Sensitivity = 6.28 MHz/volt Amplitude =1
Delay	8000
UHD_Sink	Sample rate = 8 MHz Center Frequency= 100 MHz Gain = 0dB
UHD_Source	Sample rate = 8 MHz Center Frequency= 100 MHz Gain = 0dB

Cara kerja sistem radar ini dimulai dengan pembangkitan chirp FMCW (dari File Source), yang menghasilkan komponen real dari gelombang chirp FMCW. Sebelum dikirimkan ke dalam USRP N210 sinyal ini harus diubah terlebih dahulu kedalam bentuk kompleks menggunakan Blok Hilbert Transform. Sinyal chirp yang telah bernilai kompleks kemudian dilewatkan kedalam blok UHD Sink yang mewakili USRP N210 untuk selanjutnya dipancarkan pada frekuensi carier sebesar 2 GHz.

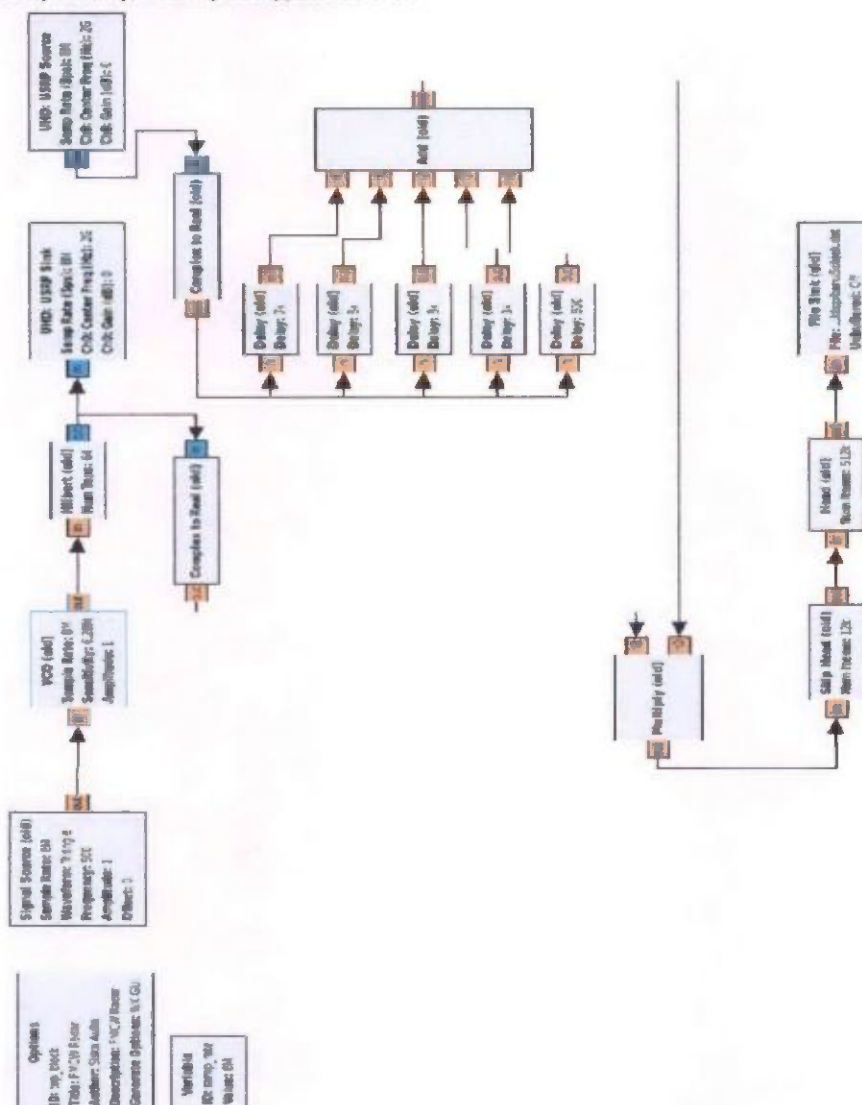
Gelombang pantul yang diterima oleh USRP N210 dikirimkan kembali ke GNU Radio melalui blok UHD Source. Sinyal kompleks yang dihasilkan diubah kembali ke dalam bentuk real menggunakan blok Complex-to-Real. Selanjutnya chirp sinyal yang dikirimkan dikalikan (*mixed*) dengan sinyal yang diterima dengan blok *Multiply* untuk mendapatkan beat frekuensi, yang diikuti oleh blok *Low-Pass-Filter* untuk mendapatkan komponen *Low-Order* dari beat frekuensi sekaligus sebagai aliasing filter. Sinyal beat dalam kawasan waktu ini kemudian disimpan ke dalam sebuah file dengan format binary float dengan menggunakan blok File Sink. Proses pengolahan sinyal , proses pemfilteran sinyal beat sehingga didapatkan komponen frekuensi rendah, dan transformasi fourier untuk mendapatkan frekuensi beat dan jarak target dilakukan dengan Matlab.

Pengolahan sinyal sengaja dilakukan menggunakan Matlab secara offline untuk mengurangi beban kerja GNU Radio. Pada implementasinya, sistem yang

didesain dioperasikan menggunakan antenna penerima dan pengirim UWB yang diletakkan secara berdampingan.

J-3. Percobaan Sistem FMCW untuk Lima Target

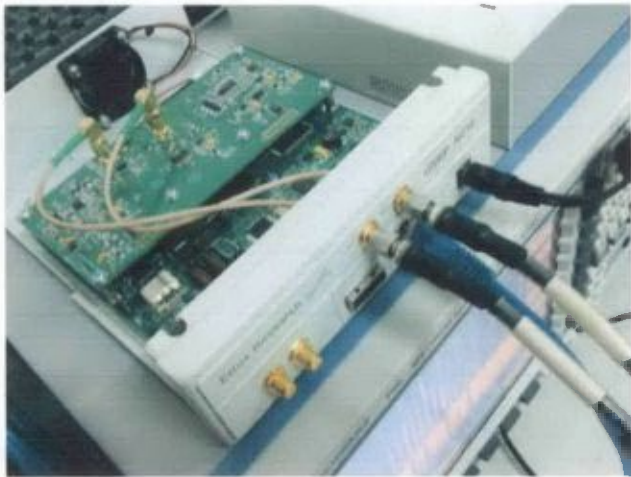
Untuk mensimulasikan deteksi target pada desain sistem FMCW yang telah dibuat. Pemodelan dengan memberikan delay, dapat dibuat seolah-olah sinyal transmit mengenai suatu target pada jarak tertentu sebelum dikembalikan ke receive radar. Pada pemodelan sistem kedua ini, diuji coba dimana sistem digunakan untuk mendeteksi lima target (mampu mendeteksi beberapa target berbeda) ditunjukkan pada gambar J-3.



Gambar J-3. Modifikasi skema rangkaian pengujian sistem USRP di GNU radio untuk lima target

J-4. Prototipe hardware yang digunakan pada Implementasi Sistem Radar FMCW

Untuk melakukan pengukuran terhadap desain dan arsitektur yang telah dibuat, maka sistem Radar FMCW direalisasikan dengan menggunakan USRP N210 dan daughterboard RFX900 seperti terlihat pada gambar J.4, dan software yang digunakan GNU Radio pada sistem operasi Linux-Ubuntu.



Gambar J-4 Pengujian Sistem Radar FMCW pada USRP N210.

Pengujian protipe sistem radar FMCW pada laboratorium seperti gambar J.4, terdapat tiga hardware yang digunakan. Pertama yaitu komputer host, kedua USRP dan ketiga antenna. USRP dihubungkan dengan komputer host melalui interface ethernet gigabit. Spesifikasi dari komputer host yang digunakan diberikan pada tabel J.3.

Tabel J.3 Spesifikasi komputer host

CPU	Intel Core i3 Processor 350M, speed 2.26 GHz
Memory	4 GB DDR3 1066 MHz SDRAM
Operating System	Ubuntu 10.13 64 bit

Bentuk perangkat USRP N210 yang digunakan pada percobaan diberikan pada gambar J.4 dan J.5.