

## TUGAS AKHIR - TE 141599

# DESAIN GELOMBANG RADAR MIMO MENGGUNAKAN TEKNIK INTERLEAVED-OFDM

Muhammad Rizky NRP 2212 100 099

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

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



## FINAL PROJECT - TE 141599

# MIMO RADAR WAVEFORM DESIGN USING INTERLEAVED-OFDM TECHNIQUE

Muhammad Rizky NRP 2212 100 099

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

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

# PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Desain Gelombang Radar MIMO Menggunakan Teknik** *Interleaved*-**OFDM**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahanbahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

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

Surabaya, Mei 2016

Muhammad Rizky NRP. 2212100099

# DESAIN GELOMBANG RADAR MIMO MENGGUNAKAN TEKNIK INTERLEAVED-OFDM

# **TUGAS AKHIR**

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing,

montes

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

> SURABAYA JUNI, 2016

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

# DESAIN GELOMBANG RADAR MIMO MENGGUNAKAN TEKNIK *INTERLEAVED*-OFDM

#### Muhammad Rizky 2212 100 099

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

#### Abstrak

Modifikasi dari MIMO-OFDM konvensional bertujuan untuk meningkatkan ortogonalitas antar subcarrier dengan penggunaan bandwidth yang sama. Pada tugas akhir ini dibahas mengenai akurasi, resolusi dari jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan (DoA) dari empat modifikasi MIMO-OFDM vaitu MIMO-OFDM konvensional, MIMO-IOFDM model Wiesbeck, MIMO-IOFDM model Yoke, dan MIMO-IOFDM menggunakan subcarrier acak. Sinyal OFDM yang dikirim didesain untuk bekerja pada multiple antena dan setiap transmiter mengirimkan subcarrier yang berbeda atau unik. Algoritma MUSIC digunakan untuk mendeteksi sudut kedatangan target dan periodogram digunakan untuk mendeteksi informasi jarak dan kecepatan target. Penggunaan virtual antenna bertujuan untuk meningkatkan akurasi deteksi sudut dan meningkatkan jumlah target yang bisa dideteksi. Untuk mereduksi level daya sidelobe maka digunakan Window Hamming namun akan menurunkan resolusi dari hasil deteksi. Dari hasil simulasi vang telah dilakukan, MIMO-IOFDM model Wiesbeck mempunyai nilai akurasi dan resolusi terbaik jika dibandingkan dengan yang lain, namun nilai level daya mirip dengan MIMO-IOFDM Model Yoke dan lebih tinggi jika dibanding MIMO-OFDM konvensional dan MIMO-IOFM subcarrier acak. MIMO-OFDM konvensional memiliki deteksi jarak paling buruk dibandingkan dengan yang lain. Sedangkan MIMO-IOFDM subcarrier acak memiliki level sidelobe paling rendah dibandingkan dengan yang lain, namun hasil deteksinya masih mengandung interferer justru level daya dari interferer lebih tinggi.

#### Kata kunci : Interleaved OFDM; Algoritma MUSIC; Virtual Array; Periodogram; Radar

# MIMO RADAR WAVEFORM DESIGN USING INTERLEAVED-OFDM TECHNIQUE

Muhammad Rizky 2212 100 099

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

#### Abstract

Abstract—A modification of the conventional orthogonal frequency division multiplexing signals is discussed that allows for the creation of a set perfectly orthogonal transmit signals sharing the same bandwidth. These signals can be employed for multi-input multi-output (MIMO) radar system. In this final project, discussed accuration, resolution of range, velocity and Direction of Arrival (DoA) of detection from four type MIMO OFDM there are Conventional MIMO-OFDM. MIMO-Interleaved OFDM Wiesbeck model, MIMO- Interleaved OFDM Yoke model, and MIMO-OFDM using random subcarrier. The transmit OFDM signal is designed in such a way that the multiple transmitters will only radiate at the unique subcarriers. The virtual antenna array concept is utilized to improve resolution, accuration, and maximal number of DoA detection radar DoA detetion. Using MUSIC algorithm to get DoA information and periodogram to get velocity and range information. To reduce mainlobe level of radar detection used Hamming Window but this technique will be reduce the resolution of detection. The result of simulation are MIMO-IOFDM Wiesbeck Model have the best velocity of detection but the sidelobe level is similar with MIMO-IOFDM Yoke Model and higher than MIMO-OFDM Conventional and MIMO-IOFDM Random Subcarrier. Conventional MIMO-OFDM have poor of range detection compared with others, and MIMO-IOFDM random subcarrier have lower sidelobe level of range and velocity detection but the interferer level higher than power level of main target.

#### **Keyword** : Interleaved OFDM; MUSIC Algorithm; Virtual Array; Periodogram; Radar

# KATA PENGANTAR

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

#### DESAIN GELOMBANG RADAR MIMO MENGGUNAKAN TEKNIK INTERLEAVED-OFDM

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

- 1. Ibu, Bapak, dukungan moril dan materiil yang selalu menguatkan penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini.
- Ibu Devy Kuswidiastuti, S.T., M.Sc. dan Bapak Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D., selaku dosen pembimbing, atas bimbingan yang telah diberikan mulai dari awal penelitian hingga proses akhir penelitian.
- 3. Bapak dan Ibu dosen Telekomunikasi Multimedia, khususnya dosen Lab. Antena dan Propagasi, yang telah ikut membimbing penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini.
- 4. Rekan yang sangat membantu dalam penelitian ini, Mas Tyo dan Mas Dika

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

Surabaya, Mei 2016 Penulis

# **DAFTAR ISI**

COVER	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Pembahasan	4
1.7 Relevansi	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Konsep Radar[3]	7
2.2 Sistem MIMO[4]	9
2.3 Modulasi QPSK[5]	10
2.4 Teknik Sinyal OFDM[2]	11
2.4.1 IFFT/FFT	12
2.4.2 Cyclic Prefix	13
2.4.3 Teknik Interleaved-OFDM	14
2.5 Radar OFDM	14
2.5.1 Frekuensi Doppler dan Spasi Frekuensi antar Subca	arrier 15
2.5.2 Jarak Maksimal dan Resolusi Jarak	15
2.5.3 Kecepatan Maksimal dan Resolusi Kecepatan	15
2.6 Radar MIMO[7]	16
2.6.1 Uniform Linear Array MIMO Radar[6]	17

262 Virtual Antonna	18
2.0.2 v muu michia	10 10
2.7.1 Metode Pemrosesan Informasi Jarak dan Kecenatan	
Berdasarkan Simbol dengan Periodogram[1]	19
2.7.2 Window Hamming[1]	17 20
2.7.2 while italianing[1]	20
2.7.5 Algorithia MOSIC[10]	
2.8 1 Recoluci Radar[3]	22 22
2.8.2 Akurasi Deteksi/Kesalahan Deteksi	
2.0.2 / Kulusi Deleksi Kesulululi Deleksi	
BAB 3 METODE PENELITIAN	
3.1 Pemodelan Sistem	
3.2 Spesifikasi Radar	
3.3 Pemodelan Simulasi Sistem	
3.3.1 Pembangkitan Bit Informasi	
3.3.2 Modulasi	
3.3.3 Proses Interleaving	
3.3.4 IFFT	
3.3.5 Penambahan Cyclic Prefix	
3.4 Konfigurasi Pemancar dan Penerima	
3.5 Pemodelan Target	
3.4.1 Pemodelan Jarak	
3.4.2 Pemodelan Kecepatan	
3.4.3 Pemodelan Sudut Kedatangan (DoA)	
3.6 Pemodelan Interferer	
3.7 Pengolahan Sinyal Hasil Deteksi Target	
3.7.1 Algoritma MUSIC	
3.7.2 Periodogram Modulasi Simbol	
3.7.3 Window Hamming	
3.8 Skenario Simulasi Pengujian	44
3.8.1 Perbandingan antara SISO dengan MIMO-IOFDM	Model
Wiesbeck	
3.8.2 Perbandingan antara MIMO-IOFDM Model Yoke	dengan
SISO	47

3.8.3 Perbandingan antara MIMO-IOFDM Subcarrier Acak
dengan SISO50
3.8.4 Perbandingan antara MIMO-IOFDM Konvensional dengan
SISO52
3.8.5 Perbandingan MIMO dengan Virtual Array dan Tanpa
Virtual Array56
3.8.6 Pengujian Kinerja Radar MIMO-OFDM57
BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI SISTEM RADAR
4.1 Analisis Sudut Kedatangan terhadap Level Sidelobe, Akurasi, dan
Resolusi dari Deteksi Jarak, Kecepatan, dan Sudut Kedatangan. 63
4.2 Analisis Penggunaan Window Hamming
4.3 Analisis Perbandingan MIMO dengan SISO
4.4 Analisis Radar MIMO-OFDM Konvensional71
4.4.1 Analisis Resolusi dan Akurasi Jarak pada Radar MIMO-
OFDM Konvensional71
4.4.1.1 Analisis Resolusi Jarak, Kecepatan, dan Sudut
Kedatangan Radar MIMO-OFDM Konvensional73
4.4.1.2 Analisis Akurasi Jarak, Kecepatan, dan Sudut
Kedatangan Radar MIMO-OFDM Konvensional74
4.4.2 Analisis Deteksi Maksimum dan Minimum Radar MIMO-
OFDM Konvensional75
4.4.3 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Jarak Sama
Radar MIMO-OFDM Konvensional75
4.4.4 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Kecepatan
Sama Radar MIMO-OFDM Konvensional78
4.4.5 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Sudut
Kedatangan yang Sama Radar MIMO-OFDM Konvensional
4.5 Analisis Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck
4.5.1 Analisis Resolusi dan Akurasi Jarak pada Radar MIMO-
IOFDM Model Wiesbeck
4.5.1.1 Analisis Resolusi Jarak, Kecepatan, dan Sudut
Kedatangan Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck 83

4.5.1.2 Analisis Akurasi Jarak, Kecepatan, dan Sudut
Kedatangan Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck 83
4.5.2 Analisis Deteksi Maksimum dan Minimum Radar MIMO-
IOFDM Model Wiesbeck
4.5.3 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Jarak Sama
Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck
4.5.4 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Kecepatan
Sama Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck
4.5.5 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Sudut
Kedatangan yang Sama Radar MIMO-IOFDM Model
Wiesbeck
4.6 Analisis Radar MIMO-IOFDM Model Yoke90
4.6.1 Analisis Resolusi dan Akurasi Jarak pada Radar MIMO-
IOFDM Model Yoke90
4.6.1.1 Analisis Resolusi Jarak, Kecepatan, dan Sudut
Kedatangan Radar MIMO-IOFDM Model Yoke 92
4.6.1.2 Analisis Akurasi Jarak, Kecepatan, dan Sudut
Kedatangan Radar MIMO-IOFDM Model Yoke 92
4.6.2 Analisis Deteksi Maksimum dan Minimum Radar MIMO-
IOFDM Model Yoke
4.6.3 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Jarak Sama
Radar MIMO-IOFDM Model Yoke
4.6.4 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Kecepatan
Sama Radar MIMO-IOFDM Model Yoke96
4.6.5 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Sudut
Kedatangan yang Sama Radar MIMO-IOFDM Model Yoke
4.7 Analisis Radar MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak 99
4.7.1 Analisis Resolusi dan Akurasi Jarak pada Radar MIMO-
IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak
4.7.1.1 Analisis Resolusi Jarak, Kecepatan, dan Sudut
Kedatangan Radar MIMO-IOFDM Menggunakan
Subcarrier Acak101

4.7.1.2 Analisis Akurasi Jarak, Kecepatan, dan Sudut
Kedatangan Radar MIMO-IOFDM Menggunakan
Subcarrier Acak102
4.7.2 Analisis Deteksi Maksimum dan Minimum Radar MIMO-
IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak104
4.7.3 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Jarak Sama
Radar MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak 104
4.7.4 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Kecepatan
Sama Radar MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak
4.7.5 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Sudut
Kedatangan yang Sama Radar MIMO-IOFDM Menggunakar
Subcarrier Acak106
4.8 Efek Interferer Terhadap Hasil Deteksi Radar
4.8.1 Analisis Efek Interferer Terhadap Hasil Deteksi Radar
MIMO-OFDM Konvensional
4.8.2 Analisis Efek Interferer Terhadap Hasil Deteksi Radar
MIMO-IOFDM Model Wiesbeck
4.8.3 Analisis Efek Interferer Terhadap Hasil Deteksi Radar
MIMO-IOFDM Model Yoke111
4.8.4 Analisis Efek Interferer Terhadap Hasil Deteksi Radar
MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak
4.9 Sintesis
BAB V
5.1 Kesimpulan
5.2 Saran
DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN A PENGESAHAN PROPOSAL TUGAS AKHIR 121
LAMPIRAN B SCRIPT SIMULASI PADA PERANGKAT LUNAK
MATLAB
LAMPIRAN C PLOT AMBIGUITAS DAN DOA MIMO-OFDM
MODEL WIESBECK VARIASI JUMLAH TARGET

# DAFAR GAMBAR

Gambar 1.1 Konsep Radar MIMO untuk Keperluan Otomotif[1]1
Gambar 2.1 Sistem Radar[3]7
Gambar 2.2 Sistem MIMO secara umum[4]9
Gambar 2.3 Diagram Konstelasi QPSK10
Gambar 2.4 Ilustrasi Simbol OFDM dengan Delapan Subcarrier 12
Gambar 2.5 Ilustrasi Cyclic Prefix
Gambar 2.6 Pemodelan Radar MIMO [7]16
Gambar 2.7 Diagram Collocated ULA-MIMO Radar[6]17
Gambar 2.8 Geomteri Antena Penerima ULA-MIMO Radar[8]17
Gambar 2.9 Geometri Antena dan Virtual Array[9]
Gambar 3.1 Diagram fish bone MIMO-IOFDM
Gambar 3.2 (a) Blok Diagram Sistem
Gambar 3.2 (b) Blok Diagram Sistem
Gambar 3.3 Blok Diagram Parameter Sistem Radar OFDM
Gambar 3.4 Pola Radiasi 16 Elemen Antena Penerima
Gambar 3.5 Ilustrasi Jarak yang Ditempuh oleh Sinyal yang
Dipancarkan Radar hingga kembali diterima Radar
Gambar 3.6 Blok Diagram Pemodelan Sudut Kedatangan (DoA) 38
Gambar 3.7 Skenario Penempatan Interferer
Gambar 3.8 Hasil Deteksi Sudut Menggunakan Algoritma MUSIC 40
Gambar 3.9 Hasil Deteksi Kecepatan Menggunakan Modulasi Simbol40
Gambar 3.10 Gambar 3.9 Hasil Deteksi Jarak Menggunakan Modulasi
Simbol
Gambar 3.11 Plot Ambiguitas
Gambar 3.12 Hasil Deteksi Kecepatan Menggunakan dan Tanpa
Window Hamming43
Gambar 3.13 Hasil Deteksi Jarak Menggunakan dan Tanpa Window
Hamming
Gambar 3.14 Ambiguitas Radar MIMO Menggunakan Window
Hamming
Gambar 3.15 Subcarrier MIMO IOFDM Model Wiesbeck

Gambar 3.16	Perbandingan Deteksi Kecepatan Sistem MIMO-IOFDM
	Model Wiesbeck dan Sistem SISO IOFDM Model
	Wiesbeck
Gambar 3.17	Perbandingan Deteksi Jarak Sistem MIMO-IOFDM Model
	Wiesbeck dan Sistem SISO IOFDM Model Wiesbeck 46
Gambar 3.18	Deteksi Sudut Sistem MIMO-IOFDM Model Wiesbeck47
Gambar 3.19	Pembagian Subcarrier Model Yoke
Gambar 3.20	Hasil Deteksi Kecepatan MIMO-IOFDM Model Yoke dan
	SISO-IOFDM Model Yoke
Gambar 3.21	Hasil Deteksi Jarak MIMO-IOFDM Model Yoke dan
	SISO-IOFDM Model Yoke
Gambar 3.22	Hasil Deteksi Sudut DoA MIMO-IOFDM Model Yoke 50
Gambar 3.23	Hasil Deteksi Kecepatan MIMO IOFDM Acak dan SISO
Gambar 3.24	Hasil Deteksi Jarak MIMO IOFDM Acak dan SISO
	IOFDM Acak
Gambar 3.25	Hasil Deteksi Sudut Kedatangan (DoA) MIMO IOFDM
	Acak
Gambar 3.26	(a) Pembagian Subcarrier Konvensional MIMO OFDM 53
Gambar 3.26	(b) Pembagian Subcarrier Konvensional MIMO OFDM 54
Gambar 3.27	Hasil Deteksi Kecepatan Konvensional MIMO OFDM dan
	SISO
Gambar 3.28	Hasil Deteksi Jarak Konvensional MIMO OFDM dan
	SISO
Gambar 3.29	Hasil Deteksi Sudut Kedatangan (DoA) Konvensional
	MIMO OFDM
Gambar 3.30	Hasil Deteksi Sudut Tanpa Menggunakan Virtual Antena
Gambar 3.31	Hasil Deteksi Sudut Menggunakan Virtual Antena
Gambar 3.32	Ambiguitas Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck 60
Gambar 3.33	Ambiguitas Radar MIMO-IOFDM Model Yoke
Gambar 3.34	Ambiguitas Radar MIMO-IOFDM Subcarrier Acak 61
Gambar 3.35	Ambiguitas Radar MIMO-IOFDM Subcarrier Acak 62

Gambar 4.1	Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan
	Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan 90°
	dan 90°, Kecepatan 20m/s dan 27 m/s77
Gambar 4.2	Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan
	Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan 90°
	dan 60°, Kecepatan 20m/s dan 27 m/s77
Gambar 4.3	Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan Target
	berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan Sama 90°
	dan Kecepatan Sama 20m/s78
Gambar 4.4	Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 70m, Sudut Kedatangan
	90° dan 60° dan Kecepatan Sama 20m/s
Gambar 4.5	Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan
	Sama 90°, Kecepatan 20m/s dan 27m/s80
Gambar 4.6	Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan
	Sama 60°, Kecepatan 20m/s dan 27m/s80
Gambar 4.7	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan
	Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan 90°
	dan 90°, Kecepatan 20m/s dan 27 m/s
Gambar 4.8	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan
	Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan 90°
	dan 60°, Kecepatan 20m/s dan 27 m/s
Gambar 4.9	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan
	90° dan 90°, Kecepatan Sama 20m/s
Gambar 4.1	0 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut
	Kedatangan 90° dan 60°, Kecepatan Sama 20m/s 88
Gambar 4.1	1 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut
	Kedatangan Sama 90°, Kecepatan 20m/s dan 30m/s89

Gambar 4.12	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut
	Kedatangan Sama 30°, Kecepatan 20m/s dan 30m/s 89
Gambar 4.13	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan
	Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan
	80° dan 100°, Kecepatan 20m/s dan 30 m/s
Gambar 4.14	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan
	Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan
	120° dan 80°, Kecepatan 60m/s dan 30 m/s
Gambar 4.15	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut
	Kedatangan 80° dan 100°, Kecepatan Sama 30m/s 96
Gambar 4.16	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 60m, Sudut Kedatangan
	120° dan 80°, Kecepatan Sama 30m/s
Gambar 4.17	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut
	Kedatangan 90° dan 60°, Kecepatan Sama 20m/s 97
Gambar 4.18	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut
	Kedatangan Sama 90°, Kecepatan 20m/s dan 30m/s 98
Gambar 4.19	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan
	Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut
	Kedatangan Sama 30°, Kecepatan 20m/s dan 30m/s 99
Gambar 4.20	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier
	Acak dengan Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut
	Kedatangan 80° dan 100°, Kecepatan 20m/s dan 30 m/s
Gambar 4.21	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier
	Acak dengan Target berada pada Jarak 30m dan 50m,
	Sudut Kedatangan 80° dan 100°, Kecepatan Sama 20m/s
Gambar 4.22	Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier
	Acak dengan Target berada pada Jarak 30m dan 55m,

	Sudut Kedatangan Sama 90°, Kecepatan 20m/s dan 30m/s 
Gambar 4.23	Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c)
	MIMO-OFDM Konvensional dengan kecepatan Interferer
	5m/s
Gambar 4.24	Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c)
	MIMO-OFDM Konvensional dengan kecepatan Interferer
	50m/s
Gambar 4.25	Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c)
	MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan kecepatan
	Interferer 5m/s
Gambar 4.26	Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c)
	MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan kecepatan
	Interferer 50m/s110
Gambar 4.27	Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c)
	MIMO-IOFDM Model Yoke dengan kecepatan Interferer
	5m/s
Gambar 4.28	Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c)
	MIMO-IOFDM Model Yoke dengan kecepatan Interferer
	50m/s112
Gambar 4.29	Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c)
	MIMO-IOFDM Subcarrier Acak dengan kecepatan
	Interferer 5m/s
Gambar 4.30	Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c)
	MIMO-IOFDM Subcarrier Acak dengan kecepatan
	Interferer 50m/s114

# DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Radar MIMO-OFDM yang Diinginkan32
Tabel 4.1 Hasil Perbandingan Efek Arah Kedatangan Konvensional
MIMO-OFDM Terhadap Deteksi Jarak dengan Kecepatan
Target 1=20 m/s dan Target 2=35m/s64
Tabel 4.2 Hasil Perbandingan Efek Arah Kedatangan Konvensional
MIMO-OFDM Terhadap Deteksi Kecepatan dengan Jarak
Target 1=30 m dan Target 2=60m64
Tabel 4.3 Hasil Perbandingan Efek Arah Kedatangan Konvensional
MIMO-OFDM Terhadap Deteksi Sudut dengan Kecepatan
Target 1=20 m/s, Target 2=35m/s, dan Interferer = 40m/s64
Tabel 4.4 Hasil Simulasi Level Sidelobe dan Resolusi dari Deteksi
Kecepatan65
Tabel 4.5 Hasil Simulasi Level Sidelobe dan Resolusi dari Deteksi Jarak
Tabel 4.6 Hasil Deteksi dan Resolusi Jarak Sistem MIMO dan SISO.67
Tabel 4.7 Hasil Deteksi dan Akurasi Jarak Sistem MIMO dan SISO68
Tabel 4.8 Hasil Deteksi dan Level Daya Sistem MIMO dan SISO 68
Tabel 4.9 Hasil Deteksi dan Resolusi Kecepatan Sistem MIMO dan
SISO OFDM69
Tabel 4.10 Hasil Deteksi dan Akurasi Kecepatan Sistem MIMO dan
SISO OFDM70
Tabel 4.11 Hasil Deteksi dan Level Daya Sistem MIMO dan SISO 70
Tabel 4.12 Hasil Resolusi dan Akurasi Jarak MIMO-OFDM
Konvensional72
Tabel 4.13 Hasil Resolusi dan Akurasi kecepatan MIMO-OFDM
Konvensional72
Tabel 4.14 Hasil Resolusi dan Akurasi Sudut MIMO-OFDM
Konvensional73
Tabel 4.15 Tabel Deteksi Dua Target MIMO-OFDM Konvensional 76
Tabel 4.16 Hasil Resolusi dan Akurasi Jarak MIMO-IOFDM Model
Wiesbeck

Tabel 4.17 Hasil Resolusi dan Akurasi kecepatan MIMO-IOFDM Mode
Wiesbeck
Tabel 4.18 Hasil Resolusi dan Akurasi Sudut MIMO-IOFDM Model
Wiesbeck
Tabel 4.19 Tabel Deteksi Dua Target MIMO-IOFDM Wiesbeck 86
Tabel 4.20 Hasil Resolusi dan Akurasi Jarak MIMO-IOFDM Model
Yoke
Tabel 4.21 Hasil Resolusi dan Akurasi kecepatan MIMO-IOFDM Mode
Yoke
Tabel 4.22 Hasil Resolusi dan Akurasi Sudut MIMO-IOFDM Model
Yoke
Tabel 4.23 Tabel Deteksi Dua Target MIMO-IOFDM Model
Tabel 4.24 Hasil Resolusi dan Akurasi Jarak MIMO-IOFDM
Menggunakan Subcarrier Acak
Tabel 4.25 Hasil Resolusi dan Akurasi kecepatan MIMO-IOFDM
Menggunakan Subcarrier Acak 100
Tabel 4.26 Hasil Resolusi dan Akurasi Sudut MIMO-IOFDM
Menggunakan Subcarrier Acak 101
Tabel 4.27 Tabel Deteksi Dua Target MIMO-IOFDM Subcarrier Acak 103

# BAB 1 PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Radar untuk keperluan *automotive* harus mampu mendeteksi jarak, frekuensi Doppler, dan informasi sudut dari target. Radar seperti ini sering diterapkan pada *smartcar* untuk keperluan *cruise control*, *lane change assistance*, *parking assistance*, dan keperluan mengendara lainnya. Radar dengan sistem SISO (*Single Input Single Output*) hanya bisa mendeteksi jarak dan kecepatan, tidak bisa mendeteksi sudut kedatangan dari target. Untuk medapatkan informasi sudut kedatangan dari target maka dibutuhkan antena dengan sistem MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), karena menggunakan sistem MIMO salah satu syarat yang harus dipenuhi adalah penggunaan sinyal yang tidak berkorelasi.

Berdasarkan kebutuhan diatas dipilih bentuk sinyal OFDM dengan memodifikasi penggunaan *subcarrier* sehingga tidak semua *subcarrier* dikirim melainkan dipilih beberapa untuk setiap antena sehingga bisa meningkatkan ortogonalitas antar *subcarrier* sehingga lebih tahan terdadap gangguan ICI (*Interchannel Interference*). Radar dengan teknik sinyal OFDM memiliki cara kerja yang sama seperti radar lainnya seperti radar FMCW. Modifikasi OFDM atau yang nantinya akan disebut *Interleaved*-OFDM sama dengan OFDM konvensional dan mampu mendeteksi jarak, Doppler, dan informasi sudut tetapi nilai *maximum unambiguous range* akan mengalami penurunan.



Gambar 1 Konsep Radar MIMO untuk Keperluan Otomotif[1]

Dengan mempertimbangkan bahwa *automotive* radar kemungkinan digunakan oleh lebih dari satu pengguna yang memiliki sistem sama dan aktif atau bekerja pada waktu yang bersamaan, maka muncul masalah yaitu interferensi antar *automotive* radar. Munculnya interferensi akan menyebabkan turunnya nilai akurasi dan resolusi dari deteksi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan. Untuk menghindari efek dari interferensi maka dibuthkan teknik *mutiple user acces*[2].

Pada tugas akhir ini dibahas sinyal ortogonal yang sesuai untuk *mutiple user acces*, ada beberapa modifikasi *subcarrier* dari teknik sinyal OFDM yang akan dibahas. Dibandingkan beberapa modifikasi OFDM berdasarkan akurasi dan resolusi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan (DoA), serta menganalisis efek jika masing-masing modifikasi OFDM tadi mendapat gangguan atau interferensi dari user lain baik yang menggunakan *subcarrier* yang sama maupun berlainan, akan dilihat bentuk modifikasi seperti apa yang memiliki akurasi dan resolusi dari jarak, kecepatan, dan arah kedatangan (*Direction of Arrival/DoA*) yang memiliki nilai *error* paling kecil dibandingkan dengan nilai perhitungan matematis.

#### 1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

- 1. Bagaimana desain pembangkitan sinyal, konfigurasi pemancar dan penerima, serta pengolahan sinyal pada sistem radar MIMO-IOFDM?
- 2. Bagaimana pengaruh interferensi antar *user* terhadap resolusi dan akurasi jarak, kecepatan, dan DoA?
- 3. Bagaimana bentuk modifikasi teknik sinyal OFDM yang paling tahan terhadap inteterferensi?
- 4. Berapa resolusi dan akurasi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan, serta jarak dan kecepatan maksimum dan minimum target yang bisa dideteksi oleh radar?
- 5. Bentuk MIMO-OFDM apa yang paling sesuai dengan kebutuhan *automotive radar*?

## 1.3 Batasan Masalah

Hal-hal yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Parameter yang akan dianalisis dari radar MIMO-IOFDM adalah resolusi, akurasi, dan level *sidelobe* jarak, kecepatan, dan arah kedatangan.

- 2. Menggunakan konfigurasi MIMO 4x4
- 3. Simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB R2015b

# 1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

- 1. Membuat desain pembangkitan sinyal, konfigurasi pemancar dan penerima, serta pengolahan sinyal pada sistem radar MIMO-IOFDM dan mensimulasikannya
- 2. Menganalisis kemampuan radar MIMO-IOFDM dalam mendeteksi jarak, kecepatan, dan arah kedatangan dari target
- 3. Menganalisis dampak dari interferensi antar *user*, terhadap resolusi dan akurasi jarak, kecepatan, dan arah kedatangan.
- 4. Menganalisis bentuk modifikasi teknik sinyal OFDM yang paling tahan terhadap interferensi.
- 5. Menganalisis bentuk modifikasi teknik sinyal OFDM yang paling sesuai dengan *automotive radar*?

# 1.5 Metodologi

Metode penelitian dilakukan dengan lima tahap yaitu studi literatur, perancangan sistem radar MIMO-IOFDM, pengujian dengan simulasi, pengolahan data hasil simulasi, analisis data, penarikan kesimpulan, dan pembuatan buku laporan tugas akhir.

## Studi literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari dan mempelajari referensi yang berupa *paper* dan jurnal baik nasional maupun internasional serta buku literatur yang sesuai dengan topik tugas akhir. Dimana akan dipelajari lebih dalam mengenai:

- Sistem radar, menyangkut pengetahuan pengertian secara umum dan parameter yang digunakan
- Teknik sinyal OFDM, mempelajari apa yang dimaksud dengan sinyal OFDM, parameternya, dan cara pembangkitan
- Teknik sinyal Interleaved-OFDM, mempelajari bagaimana karakteristik serta cara membangkitkannya
- Teknik deteksi simbol dan algoritma MUSIC, untuk mendapatkan nilai jarak, kecepatan, dan arah kedatangan.

## Perancangan dan Desain Sistem Radar MIMO-IOFDM

Pada tahap ini akan dilakukan simulasi radar MIMO-IOFDM menggunakan perangkat lunak MATLAB. Dalam tahap ini penulis

menentukan spesifikasi sistem radar, pembangkitan sinyal, pemodelan target, pengolahan sinyal hasil deteksi target.

#### Pengujian Skenario Simulasi

Pada tahap ini dilakukan pengujian sistem radar yang telah dirancang dengan skenario yang ditetapkan. Skenario yang dibuat yaitu deteksi target bergerak jamak untuk didapatkan informasi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan (DoA) dari target. Pengujian dilakukan dengan simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB.

#### Pengolahan Data Hasil Simulasi

Pada tahap ini dilakukan pengolahan data berdasarkan hasil yang didapat dari simulasi sistem radar yang telah dibangun dan dengan skenario yang telah ditetapkan.

#### Analisis Data dan Penarikan Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan pengamatan dan analisis terhadap data yang telah diperoleh, beserta penarikan kesimpulan berdasarkan analisis data yang telah dilakukan.

#### 1.6 Sistematika Pembahasan

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

#### - BAB 1 PENDAHULUAN

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

#### - BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan tentang tinjauan pustaka yang akan membahas tentang sistem radar, sistem MIMO, teknik sinyal I-OFDM, radar MIMO, dan algoritma MUSIC.

#### - BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

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

#### - BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI SISTEM RADAR MIMO-IOFDM

Pada bab ini akan dilakukan analisis hasil simulasi radar MIMO-IOFDM, mengacu dari data yang didapatkan yaitu resolusi dan akurasi dari jarak, kecepatan, dan arah kedatangan jika terdapat interferensi dari *user*, baik yang menggunakan *subcarrier* sama maupun berlainan.

#### - BAB 5 PENUTUP

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

# 1.7 Relevansi

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

- 1. Memberikan kontribusi berupa sistem radar baru yang dapat mendapatkan jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan target dengan resolusi dan akurasi yang baik dengan pengaruh interferensi dari *user* lain.
- 2. Menjadi referensi dalam pengimplementasian radar MIMO-IOFDM menggunakan perangkat keras.

# BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Konsep Radar[3]

Radio detection and ranging (Radar) adalah sistem yang mengirimkan frekuensi radio (gelombang elektromagnetik) yang menuju target tertentu dan dilakukan proses deteksi dari hasil pantulan gelombang elektromagnetik tersebut. Radar dioperasikan dengan gelombang elektromagnetik dipancarkan melalui antena pengirim ke suatu arah tertentu. Jika pada arah tersebut ada suatu objek yang bahannya bersifat memantulkan gelombang elektromagnetik maka akan ada gelombang yang sama dipantulkan oleh objek tersebut. Apabila pantulannya mengarah ke antenna penerima yang lokasinya sama dengan antena pengirim, maka akan bisa diambil informasi mengenai eksistensi, jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan objek setelah melakukan pengolahan terhadap sinyal yang kembali tadi.

Prinsip dasar sistem radar dapat dilihat melalui kemampuan untuk mengukur jarak dengan akurasi tinggi dan dapat dioperasikan di segala cuaca menjadi keunggulan utama radar. Prinsip dasar sistem radar dapat dilihat melalui **Gambar 2.1** 



Gambar 2.1 Sistem Radar [3]

Jarak radar ke target dapat ditentukan dengan menghitung waktu ketika sinyal tepat ditransmisikan ke target dan ketika kembali ke radar. Lokasi dari target dalam sudut dapat ditentukan dari arah *narrowbeamwidth* antena radar ketika menerima sinyal *echo* pada amplitudo maksimum. Sedangkan kecepatan dari target dapat dilihat dari pergeseran fasa sinyal *echo* jika dibandingkan dengan sinyal yang dikirim.

Untuk menentukan jarak target dari radar adalah dengan cara menghitung selisih waktu antara sinyal ditransmisikan dan ketika sinyal pantulan (*echo*) kembali ke radar ( $T_R$ ). Rumusan jarak radar ke target (R)adalah

$$R = \frac{cT_R}{2} \tag{2.1}$$

Dimana c merupakan konstanta kecepatan cahaya yakni 300.000.000 m/s. Parameter lain yang perlu diketahui mengenai radar adalah *Maximum Unambiguous Range* (R<sub>unamb</sub>), yaitu jarak yang bisa ditempuh sinyal sebelum sinyal berikutnya ditransmisikan, dirumuskan dengan

$$R_{unamb} = \frac{cT_p}{2} \tag{2.2}$$

Dimana Tp adalah periode pengulangan gelombang yang ditransmisikan.  $R_{un}$  ini menjadi penting karena jika ada lebih dari satu sinyal di ruang pantulan, maka akan menimbulkan sinyal yang ambigu ketika sampai di antenna penerima.

Sementara untuk menentukan kecepatan relatif target (V) terhadap radar ditentukan dengan formula

$$V = \frac{c f_D}{2 f} \tag{2.3}$$

Dimana v adalah kecepatan target (m/s), f adalah frekuensi kerja antenna (Hz), c adalah kecepatan cahaya (m/s), dan  $f_D$  adalah frekuensi Doppler akibat pergerakan target yang terukur oleh radar (Hz).

Untuk mengetahui Maximum Unambiguous Velocity (Vunamb), yaitu kecepatan maksimal yang dapat diukur radar, maka digunakan formula

$$V_{unamb} = \frac{c}{2 f T}$$
(2.4)

Dimana c adalah kecepatan cahaya (m/s), f adalah frekuensi kerja antenna (Hz), dan T adalah periode sinyal (s).
#### 2.2 Sistem MIMO[4]

Sistem *Multiple-Input Multiple Output* (MIMO) merupakan sistem yang terdiri dari sejumlah terminal (antena) pengirim dan penerima. Tidak seperti sistem antena konvensional yang sangat rentan terhadap multipath., sistem MIMO justru bekerja sangat baik pada komponen multipath. Komponen digunakan untuk meningkatkan diversitas dan efisiensi bandwidth.



Gambar 2.2 Sistem MIMO secara umum[4]

Pada **Gambar 2.2** diatas, terlihat sistem MIMO dengan antena pengirim dan penerima yang lebih dari satu. Antena penerima akan menerima sinyal yang dikirimkan oleh antena pengirim setelah sinyal tersebut dikalikan dengan suatu matriks kanal atau lebih mudahnya setiap antena penerima menerima semua sinyal dari semua pengirim, contohnya pada receiver r1 menerima sinyal dari s1,s2,...,sn, begitu pula dengan r2,r2,...rn. Secara umum, dengan matriks kanal H, sinyal yang diterima oleh antena penerima dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$r1 = h11s1 + h12s2 + \dots + h1NsN$$
  
$$r2 = h21s1 + h22s2 + \dots + h2NsN$$

$$rN = hN1s1 + hN2s2 + \dots + hNNsN$$

atau, secara umum dapat digabungkan ke dalam suatu persamaan, yaitu:

$$r_{l}(t) = \sum_{k=1}^{K} h_{lk}(t) s_{k}(t)$$
(2.5)

menghasilkan model sinyal sederhana sistem MIMO:

$$\boldsymbol{r}(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{H}(\boldsymbol{t})\boldsymbol{s}(\boldsymbol{t}) \tag{2.6}$$

Dengan untuk semua Nt sinyal, digunakan notasi matriks:

$$\mathbf{s}(t) = \begin{pmatrix} s_{1}(t) \\ s_{2}(t) \\ s_{3}(t) \\ s_{4}(t) \end{pmatrix}, \mathbf{r}(t) = \begin{pmatrix} x_{1}(t) \\ x_{2}(t) \\ x_{3}(t) \\ x_{4}(t) \end{pmatrix}, \mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} h_{11}(t) & \cdots & h_{1K}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{L1}(t) & \cdots & h_{LK}(t) \end{bmatrix}$$
(2.7)

matriks H merupakan matriks kanal MIMO yang dibentuk dari estimasi nilai hij pada kanal transmisi. Matriks ini akan berguna dalam mendapatkan kembali sinyal informasi pada sisi penerima. Sinyal informasi didapatkan dengan mengalikan inverse matriks H dengan sinyal pada sisi penerima (x), seperti terlihat pada persamaan berikut:

$$H^{-1}(t)r(t) = H^{-1}(t)H(t)s(t) = I_{Nt}s(t) = s(t)$$
(2.8)

# 2.3 Modulasi QPSK[5]

Pada transmisi digital dengan menggunakan teknik modulasi QPSK, yaitu mengirimkan 1 dari 4 sinyal yang mungkin selama interval waktu tertentu dimana setiap sinyal unik sama dengan (pasangan bit) 00, 01, 11, 10. Sinyal termodulasi QPSK dapat didefinisikan dalam bentuk persamaan :

$$s(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} r \cos(2\pi f_c t - \theta)$$
  

$$r = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$$
  

$$\theta = tan^{-1} \left(\frac{a_1}{a_2}\right)$$
(2.9)



Gambar 2.3 Diagram Konstelasi QPSK

Untuk diagram konstelasi **Gambar 2.3**, pada setiap titiknya itu berbeda sudut fasanya sebesar, atau bisa dilihat dari persamaan dibawah ini:

$$\sqrt{\frac{2}{T}} r \cos(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}) \text{ simbol } 00 
\sqrt{\frac{2}{T}} r \cos(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}) \text{ simbol } 01 
\sqrt{\frac{2}{T}} r \cos(2\pi f_c t - \frac{3}{4}) \text{ simbol } 11 
\sqrt{\frac{2}{T}} r \cos(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}) \text{ simbol } 10$$
(2.10)

#### 2.4 Teknik Sinyal OFDM[2]

Konsep teknik sinyal OFDM adalah membagi sinyal dari satu bandwidth ke dalam sejumlah subcarrier yang saling ortogonal sehingga sinyal-sinyal subcarrier dapat ditransmisikan secara bersamaan tanpa terjadi interferensi walaupun frekuensi antar subcarrier saling overlapping. Jarak frekuensi antar dua subcarrier bersebelahan sering disebut spasi frekuensi subcarrier ( $\Delta f$ ).

Pemodelan sinyal yang merepresentasikan sinyal *transmit* radar OFDM x(t) adalah seperti berikut

$$x(t) = \sum_{\mu=0}^{N_{sym}-1} \sum_{n=0}^{N_c-1} D(\mu N_c + n) \exp(j2\pi f_n t) \operatorname{rect}(\frac{t-\mu T}{T}) \quad (2.11)$$

dimana  $N_c$  adalah jumlah *subcarrier* dengan n adalah indeks dari setiap *subcarrier*,  $N_{sym}$  adalah total simbol OFDM yang dikirimkan oleh transmitter,  $\mu$  adalah indeks dari setiap simbol OFDM, D(n) adalah deretan bilangan kompleks dari modulasi yang digunakan pada kasus ini adalah QPSK,  $f_n$  adalah frekuensi setiap *subcarrier*, dan *T* adalah durasi simbol OFDM. Fungsi rect(t/T) adalah *window* persegi dari durasi *T*.

Sedangkan sinyal yang diterima oleh receiver sudah memiliki informasi jarak dan kecepatan karena mengenai suatu target. Saat sinyal mengenai suatu target maka sinyal tersebut telah menempuh jarak sejauh 2R dan jika target adalah bergerak maka akan terjadi pergeseran Doppler, maka sinyal terima bisa dimodelkan seperti persamaan:

$$\mathcal{Y}(t) = \sum_{\mu=0}^{N_{sym}} \sum_{n=0}^{N_c} D_r(\mu, n) \exp(j2\pi f_n t) \theta_{ch}$$
(2.12)

dimana:

$$D_r(\mu, n) = D(\mu, n) \exp\left(-j2\pi k\Delta f \frac{2R}{c_0}\right) \exp(j2\pi f_n t)\theta_{ch} \quad (2.13)$$

dengan membandingkan antara simbol yang dikirim {D( $\mu$ ,n)} dengan simbol yang diterima {D<sub>r</sub>( $\mu$ ,n)} maka didapatkan transfer fungsi dari kanal, dengan menghitung per-elemen maka didapatka persamaan:



Gambar 2.4 Ilustrasi Simbol OFDM dengan Delapan Subcarrier.

#### **2.4.1 IFFT/FFT**

IFFT/FFT adalah bagian yang sangat penting dalam sistem OFDM. IFFT berfungsi sebagai pembuat simbol OFDM. Penggunaan IFFT inilah yang memungkinkan pengalokasian frekuensi yang saling tegak lurus (orthogonal) sehingga sinyal yang berurutan tidak saling menginterferensi. Untuk persamaan IFFT dapat dituliskan sebagai berikut.

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i) exp\left(\frac{j2\pi ik}{N}\right)$$
(2.15)

Dimana:  $k = 0, 1, \dots, N-1$  x(i) = subcarrier ke-i N = jumlah titik IFFT

Pada OFDM sinyal inputan dari IFFT adalah domain waktu, namun hal tersebut tidaklah berpengaruh dikarenakan IFFT merupakan sebuah konsep matematis yang tidak peduli apa yang dihasilkan dan apa inputan awal. Selama yang menjadi inputan berupa amplitude dari beberapa sinyal sinusoidal, IFFT akan menghasilkan suatu nilai dalam domain waktu. Sementara FFT merupakan suatu metode transformasi untuk mengubah suatu fungsi dalam domain waktu menjadi fungsi dalam domain frekuensi khususnya untuk bentuk fungsi suatu sinyal yang kontinyu dan tidak mempunyai perulangan secara periodik. Secara umum dapat dirumuskan pada persamaan di bawah ini.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df$$
  

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) e^{-j2\pi ft} dt$$
(2.16)

Transformasi fourier menggambarkan suatu sinyal x(t) sebagai superposisi linier fungsi sinus dan cosinus yang ditandai dengan nilai frekuensi f dimana X(f) merupakan fungsi kompleks sinusoidal  $e^{j2\pi ft}$  yaitu invers transformasi yang diberikan oleh persamaan x(t).

#### 2.4.2 Cyclic Prefix

Dalam sistem OFDM, *Cyclic Prefix* (CP) memegang peranan penting untuk menjaga keortogonalitasan subcarrier OFDM pada situasi kanal yang frekuensi selektif. CP adalah deretan bit yang dibentuk dengan menyalin ulang sebagian bit-bit tersebut di depan simbol tersebut. Dengan adanya tambahan CP ini, sinyal OFDM tidak akan mengalami ISI selama besar delay spread kanal lebih pendek dari durasi CP, sedangkan simbol OFDM tidak mengalami distorsi akibat ISI.



Gambar 2.5 Ilustrasi Cyclic Prefix

#### 2.4.3 Teknik Interleaved OFDM[6]

Teknik interleaved-OFDM merupakan teknik pengiriman pada sistem MIMO-OFDM dimana tidak semua subcarrier yang dikirim secara keseluruhan, melainkan hanya beberapa subcarrier yang dikirim. Dimana hal ini bertujuan untuk meningkatkan ketahanan setiap subcarrier akan adanya ICI (*Interchannel Interference*). Untuk membangkitkan sinyal *interlaved*-OFDM dapat dimodelkan seperti pada persamaan (2.12)[zong]

$$S_i(t) = \sum_{n=0}^{\frac{Nc}{M}-1} d[Mn + (i-1)] \cdot \exp[j2\pi \cdot (Mn + (i-1)) \cdot \Delta ft]$$
(2.17)

Dimana nilai  $S_i(t)$  menunjukkan gelombang yang dikirim oleh antena ke-i, dimana i merupakan index yang menunjukkan antena pengirim i={1,2,..,M}. M menunjukkan berapa kali sinyal OFDM di *interleaved* dan M juga menunjukkan jumlah antena pengirim, d[n] menunjukkan deretan nilai kompleks dengan nilai amplitudo dan fasa yang bernilai acak,  $\Delta$ ft adalah jarak frekuensi antar *subcarrier*.

#### 2.5 Radar OFDM

Penggunaan sinyal OFDM dalam aplikasi radar tentu bukan tanpa alasan. Diketahui sinyal OFDM sensitif terhadap pergeseran frekuensi Doppler yang dianggap sebagai kekurangan dalam sistem komunikasi namun justru menguntungkan untuk sistem radar. Dikatakan menguntungkan karena dengan sensitif terhadap frekuensi Doppler justru dapat memberi informasi mengenai kecepatan target. Berikut ini adalah beberapa kriteria dalam parameterisasi di sistem radar OFDM:

## 2.5.1 Frekuensi Doppler dan Spasi Frekuensi antar Subcarrier

Jika dibandingkan dengan sistem komunikasi, sistem radar mengalami pergeseran frekuensi Doppler dua kali [10]

$$f_D = \frac{2\nu}{\lambda} \tag{2.18}$$

Dimana fD adalah besarnya frekuensi Doppler (Hz), v adalah kecepatan relatif target terhadap radar (m/s) dan  $\lambda$  adalah panjang gelombang carrier(m). Frekuensi Doppler maksimum didefinisikan dengan mempertimbangkan perancangan berapa kecepatan target maksimum yang akan dideteksi radar. Sementara spasi frekuensi antar subcarrier ( $\Delta$ f) haruslah lebih besar dari sepuluh kali frekuensi Doppler maksimum untuk menjaga ortogonalitas antar subcarrier.

#### 2.5.2 Jarak Maksimal dan Resolusi Jarak

Unambigous range atau jarak maksimal yang dapat dideteksi oleh radar OFDM dinyatakan dengan

$$R_{max} = \frac{c}{2\,\Delta f} \tag{2.19}$$

Sementara resolusi jarak dinyatakan dengan

$$\Delta R = \frac{c}{2 N c \,\Delta f} \tag{2.20}$$

Dimana Nc menyatakan banyaknya subcarrier yang digunakan sistem radar.

#### 2.5.3 Kecepatan Maksimal dan Resolusi Kecepatan

Kecepatan maksimal yang dapat dideteksi radar OFDM dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut

$$V_{max} = \frac{\Delta f \,\lambda}{2} \tag{2.21}$$

Periode simbol OFDM adalah periode OFDM ditambah periode CP. Dimana periode CP ditetapkan sebesar seperdelapan periode simbol OFDM. Periode simbol OFDM mempengaruhi resolusi kecepatan dan dinyatakan dengan formula sebagai berikut

$$\Delta V = \frac{\lambda}{2 T_{OFDM} \Delta f}$$
(2.22)

## 2.6 Radar MIMO [7]

Radar MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) mempunyai karakteristik yaitu kemampuannya untuk mengirimkan sinyal yang saling independen dari banyak elemen pemancar yang memiliki diversitas spasial dan untuk mengamati sinyal yang diterima pada elemen penerima yang juga memiliki diversitas spasial. Operasi dari radar MIMO diilustrasikan pada **Gambar 2.6**.

Untuk radar dengan banyak elemen pemancar, maka sinyal yang ditransmisikan oleh pemancar harus saling orthogonal. Dua sinyal dikatakan saling orthogonal jika memenuhi persamaan (2.23)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(t) \varphi_2^*(t) = 0$$
 (2.23)

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



Gambar 2.6 Pemodelan Radar MIMO [7]

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

#### 2.6.1 Uniform Linear Array MIMO Radar[6]

Untuk memudahkan pemahaman, antena array MIMO yang digunakan adalah *collocated* dan *uniform linear array* (*collocated ULA*). **Gambar 2.7** menunjukkan diagram ULA-MIMO Radar dimana posisi transmiter dan *receiver* berada pada satu lokasi yang berjarak *d* dan masing-masing elemen transmiter dan *receiver* berada dalam satu garis lurus (*stright line*). Antena penerima diletakkan dengan jarak spasi yang sama yaitu *d*. Bisa dilihat pada **Gambar 2.7** bahwa jarak array dengan target jauh lebih besar jika dibandingkan jarak antara *transmitter* dan *receiver*, hal ini merupakan alasan untuk menyamakan nilai sudut pemancar dengan nilai sudut penerima.



Gambar 2.7 Diagram Collocated ULA-MIMO Radar[6]



Gambar 2.8 Geomteri Antena Penerima ULA-MIMO Radar[8]

**Gambar 2.8** merupakan skenario kedatangan sinyal, dimana sinyal ditunjukkan dari tanda panah sedangkan jarak antar *antenna* adalah *d* 

sehingga dengan membandingkan sinyal kedatangan dengan sumbu z didapatkan sudut target atau DoA ( $\theta$ ).

Dari geometri antena penerima pada Gambar 2.8 dapat diturunkan untuk mengetahui *streering vector*, yaitu

$$AF = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{jn(\beta d\cos(\theta) + \alpha)}$$
(2.24)

Dimana nilai  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$  adalah amplitudo sinyal terima,  $\alpha$  adalah beda fasa antar elemen antena, dan  $\theta$  adalah sudut kedatangan dari target, jika nilai  $\alpha$ =0, A=1, dan  $d = \frac{\lambda}{2}$ , maka persamaan 2.24 bisa ditulis menjadi

$$AF = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(2\pi \cos(\theta))}$$
(2.25)

#### 2.6.2 Virtual Antena[9]

Antena MIMO *array* terdiri dari elemen pengirim (N<sub>Tx</sub>) dan elemen penerima (N<sub>Rx</sub>) seperti pada **Gambar 2.6**. Antena penerima adalah d<sub>r</sub> bergantung dari posisi virtual antena, pada kasus ini d<sub>r</sub> =  $\lambda/_2$ , pergeseran jarak antar elemen antena adalah  $d_{ri} = (P_i - 1) \cdot \lambda/_2$ , dimana  $P_i = 1, ..., N_t N_r$ . Nilai *beamsteering vector* adalah:



Gambar 2.9 Geometri Antena dan Virtual Array[9]

*Virtual antena* adalah antena *antenna* yang tidak nyata dimana jumlah *virtual antenna* didapatkan dari perkalian jumlah antena pengirim dan antena penerima, pada kasus ini *antenna* MIMO yang digunakan adalah 4x4 maka jumlah *virtual antenna* adalah 16.

Tujuan penggunaan *virtual antenna* adalah untuk meningkatkan nilai resolusi deteksi sudut dan menambah jumlah target yang bisa dideteksi hal ini berhubungan dengan algoritma MUSIC dimana pada algoritma MUSIC seperti dibahas pada **Subab 2.7.3** dan resolusi sudut seperti pada persamaan 2.36 bisa dilihat bahwa dengan jumlah antena yang lebih banya mampu meningkatkan jumlah deteksi target dan resolusi sudut.

# 2.7 Pemrosesan Radar

Untuk mendapatkan informasi deteksi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan dari target maka terdapat beberapa blok pemrosesan, sebagai beriku:

# 2.7.1 Metode Pemrosesan Berdasarkan Simbol dengan Periodogram [1]

Power Spectral Density (PSD) adalah metode yang banyak digunakan untuk menganalisis hasil sinyal keluaran dan menggambarkan bagaimana daya dari sebuah sinyal atau waktu yang ada didistribusikan terhadap frekuensi, dimana dimensi yang dimiliki dari PSD adalah daya per Hz, atau yang biasa disebut sebagai spektrum dari sinyal. Suatu cara untuk mengestimasi PSD dari suatu proses adalah dengan melakukan FFT kemudian mengambil kuadrat besaran dari hasil tersebut. Hal tersebut disebut dengan periodogram. Periodogram merupakan salah satu jenis estimasi PSD non parametric dimana estimasi PSD dilakukan secara langsung dari sinyal yang diolah.

Pemrosesan informasi radar seringkali menggunakan metode cross korelasi. Namun pemrosesan pada tugas akhir ini menggunakan pemrosesan berdasar simbol karena sidelobe yang dihasilkan lebih kecil dan komputasinya lebih cepat. Pada pemrosesan berdasarkan simbol metodenya adalah seperti berikut

- 1. Simbol di receiver setelah FFT sebelum demodulasi dibandingkan per elemen dengan simbol di transmitter setelah modulasi sebelum IFFT
- 2. Dilakukan operasi IFFT per simbol OFDM sejumlah banyaknya subcarrier yang didefinisikan

$$I_{div}(n) = \exp\left(-j2\pi\Delta f \frac{2R}{c_0}\right), \qquad 0 \le n \le Nc - 1 \qquad (2.27)$$

Sedangkan respon impuls dari kanal yang mengandung informasi jarak merupakan hasil IFFT dari  $\{I_{div}(n)\}$ 

$$r(k) = IDFT(\{I_{div}(n)\}) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{Nc-1} I_{div}(n) exp(2j\pi \frac{n}{N}k), k = 0, ..., Nc - 1$$
(2.28)

3. Dilakukan operasi FFT per simbol sejumlah banyaknya simbol

$$v(l) = DFT(\{d_{div}(\mu)\}) = \sum_{\substack{N_{sym}-1 \\ \mu=0}} d_{div}(\mu) exp\left(-j\frac{2\pi}{N_{sym}}\mu l\right), l$$
(2.29)  
= 0, ..., N<sub>sym</sub> - 1

4. Untuk memperjelas maka data setelah IFFT kemudian dikuadratkan selain untuk menghilangkan nilai negatif

# 2.7.2 Window Hamming[1]

Secara umum, window merupakan derertan koefisien yang digunakan untuk pembobotan sinyal, biasanya ketika resolusi frekuensi meningkan maka terjadi:

- Mainlobe akan menjadi lebih sempit
- Dan sidelobe menjadi lebih kecil

Sayangnya, menurunkan level sidelobe selalu menjadikan main lobe semakin lebar jadi selalu ada *trade off* untuk hal ini. Untuk tugas akhir ini akan menggunakan window hamming yang merupakan salah satu window yang sering digunakan, berikut adalah persamaan matematis dari window hamming:

$$\omega_{h}(n) = \begin{cases} 0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) & \text{when } n \in \{0, \dots, N-1\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
(2.30)

#### 2.7.3 Algoritma MUSIC [10]

MUSIC merupakan akronim dari *Multiple Signal Classification* yang pertama kali diperkenalkan oleh Schmidt dan dikenal sebagai metode *eigenstructure* dengan resolusi yang tinggi. MUSIC dapat digunakan untuk mendapatkan informasi jumlah sinyal yang diterima, *Direction of Arrival* (DoA) atau sudut kedatangan, dan besarnya daya sinyal yang diterima.

Pada algoritma MUSIC, sinyal yang diterima didapatkan dari nilai eigenvalue dan eigenvector. Jumlah sinyal disimbolkan dengan huruf D, jumlah eigenvalue dan eigenvector sinyal adalah D, dan eigenvalue dan eigenvector noise adalah M-D, dimana M adalah jumlah dari elemen array di sisi penerima. Karena algoritma MUSIC juga menggunakan eigenvector noise subspace, maka metode ini juga dikenal dengan nama metode subspace.

Dalam algoritma MUSIC, langkah pertama adalah menentukan matriks kovarian dari sinyal yang diterima ( $\overline{R}_{xx}$ ), yang didapatkan melalui persamaan (2.31)

$$\overline{R}_{xx} = \overline{A} \,\overline{A}^H \tag{2.31}$$

dimana  $\overline{A}$  adalah sinyal yang diterima.

Kemudian menentukan *eigenvector noise subspace*  $\overline{E}_N$  yang memiliki ukuran  $M \ge (M - D)$ . *Eigenvector noise subspace*  $\overline{E}_N$  dapat diperoleh melalui persamaan (2.32)

$$\overline{E}_N = [\overline{e}_1 \ \overline{e}_2 \ \dots \ \overline{e}_{M-D}]$$
(2.32)

Maka didapatkan estimasi DoA dengan algoritma MUSIC ( $P_{MU}(\theta)$ ) menggunakan rumus pada persamaan (2.33)

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{\left|\overline{a}(\theta)^{H} \overline{E}_{N} \overline{E}_{N}^{H} \overline{a}(\theta)\right|}$$
(2.33)

dimana  $\overline{a}(\theta)$  merupakan *array steering vector*.  $\overline{a}(\theta)$  dapat dihitung dengan rumus pada persamaan (2.34)

$$\vec{a}(\theta) = \left[1 \ e^{\frac{j\cos(\theta)2\pi d_T}{\lambda}} \dots e^{\frac{j\cos(\theta)2\pi(P-1)d_T}{\lambda}}\right]^T$$
(2.34)

### 2.8 Indikator Kinerja Radar

# 2.8.1 Resolusi Radar [3]

Resolusi radar adalah kemampuan radar untuk mendeteksi 2 target yang berbeda pada posisi yang saling berdekatan. Semakin kecil resolusi radar, maka kemampuan radar akan semakin baik. Seperti dijelaskan pada sub bab 1.1, sistem radar MIMO-OFDM digunakan untuk mendeteksi jarak dan DoA target, maka akan dicari resolusi jarak dan resolusi sudut untuk mengetahui jarak atau sudut minimum dari target yang bisa dideteksi oleh radar. Resolusi jarak ditulis pada persamaan (2.35)

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \tag{2.35}$$

dimana B adalah *bandwidth*. Sedangkan resolusi sudut ditulis pada persamaan (2.36)

$$t_d = \frac{c_{f}}{2d((MtMr) - 1)\cos(\theta)}$$
(2.36)

dimana d adalah spasi antar elemen *array antenna* penerima, yang ditentukan pada persamaan (2.37)

$$d = \frac{2\pi}{c_{/f}} \tag{2.37}$$

Mt merupakan jumlah elemen pemancar, Mr merupakan jumlah elemen penerima, dan  $\theta$  merupakan *beamwidth* dari *array antenna* penerima. Sedangkan resolusi kecepatan adalah:

$$\Delta V = \frac{\lambda}{2 T_{OFDM} \text{ Tofdm}}$$
(2.38)

## 2.8.2 Akurasi Deteksi/Kesalahan Deteksi[11]

Pada radar, hasil pembacaan dikatakan *error* atau salah jika harga mutlak selisih antara hasil pembacaan (m) dengan nilai aktual target yang seharusnya (n) melebihi resolusi radar ( $\Delta$ ).

$$|m-n| > \Delta \tag{2.39}$$

Akurasi deteksi radar didapatkan dari *Root Mean Square Error* (RMS E) yang bergantung pada nilai SNR sistem. *Root Mean Square Error* (RMS E) yang bergantung pada nilai SNR sistem dapat dihitung melalui persamaan (2.21)

$$\sigma_{RN} = \frac{RMS E}{\sqrt{2 SNR_L}}$$
(2.40)

RMS E sendiri dapat diperoleh menggunakan persamaan (2.41)

$$RMS E = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^{k} (m(t) - n(t))^2}}{k}$$
(2.41)

dimana k adalah banyaknya data, m adalah data hasil simulasi, dan n adalah data sebenarnya. Sehingga, akurasi deteksi radar dapat dihitung melalui persamaan (2.42)

$$Akurasi \ Deteksi = 1 - \sigma_{RN} \tag{2.42}$$

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

# BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

# 3.1 Pemodelan Sistem

Bab ini membahas metodologi dalam melakukan perancangan simulasi sistem radar MIMO-IOFDM untuk deteksi target. Untuk itu akan dijelaskan mengenai pemodelan sistem secara keseluruhan seperti pada **Gambar 3.1**. Adapun penjelasan mengenai pemodelan sistem diterangkan seperti di bawah ini

- 1. Sistem yang dirancang dimulai dengan membangkitkan bit informasi menggunakan random integer pada MatLab.
- 2. Bit informasi kemudian dimodulasi menggunakan modulasi QPSK
- 3. Dilakukan proses *serial-to-parallel* pada bit informasi yang telah dimodulasi QPSK
- 4. Pada teknnik interleaved-OFDM dimana tidak semua *subcarrier* yang dikirim, sehingga pada proses ini *subcarrier* yang tidak diinginkan diberi nilai nol.
- 5. Setelah itu ditambah *cyclic prefix* (CP) sebagai *guard interval* antar simbol yang mencegah terjadinya *intersimbol interference* (ISI) yang dapat merusak informasi antar simbol
- 6. Di kanal, sebagai pemodelan target dilakukan pemodelan kelajuan dan pemodelan jarak dari target
  - Untuk pemodelan kelajuan target maka disisipkan frequensi offset yang setara dengan frequensi Doppler yang merepresentasikan kelajuan relatif dari target (contohnya untuk memodelkan kelajuan 50m/s maka frekuensi offset diatur hingga mencapai angka 809 Hz)
  - Untuk memodelkan jarak maka dipakailah *zero pad* yang setara dengan delay echo yang merepresentasikan jarak target
- 7. Untuk menguji seberapa tahan sistem yang dibuat maka, ditambahkan interferer dari subcarrier yang berbeda dimana prosesnya sama seperti yang telah dijelaskan diatas, setelah itu sinyal dari target utama dan interferer dijumlahkan.
- 8. Setelah itu sinyal yang masuk receiver dalam bentuk serial kemudian diparalelisasi kembali dan dilakukan penghapusan CP.
- 9. Setelah dilakukan penghapusan CP maka kemudian sinyal yang diterima receiver dilakukan operasi FFT.



Gambar 3.1 Diagram fish bone MIMO-IOFDM



Gambar 3.2 (a). Blok Diagram Sistem



Gambar 3.2(b). Blok Diagram Sistem

10. Pada langkah ini, sinyal yang semula masih bercampur dari Tx1, Tx2,Tx3,Tx4, dan sinyal dari interferer maka dipisah sesuai dengan antena penerima (penerima pertama menerima dari pemancar pertama, pemancar kedua, pemancar ketiga, dan pemancar keempat, begitu seterunya untuk Rx2, Rx3, dan Rx4).

Pemrosesan informasi radar digunakan metode periodogram, adapun penjelasan tahapan pemrosesan pada periodogram adalah sebagai berikut

- 1. Data yang sudah dimodulasi/di-mapping di transmitter, yang berbentuk array, dibandingkan per elemen dengan data di receiver setelah proses FFT sebelum demapping/demodulasi, yang bentuknya array juga.
- 2. Kemudian dilakukan operasi FFT per simbol OFDM sejumlah banyaknya subcarrier yang didefinisikan
- 3. Berikutnya dilakukan operasi IFFT per subcarrier sejumlah banyaknya simbol OFDM yang dirancang
- 4. Setelah itu dilakukan proses pengkuadratan

Sementara itu mengenai pemrosesan DoA digunakan metode MUSIC Adapun penjelasan tahapan pemrosesan pada periodogram adalah sebagai berikut[kit]

- 1. Untuk meningkatkan resolusi sudut maka dibuat *virtual array*. Konfigurasi *virtual array* seperti pada **Gambar 2.9**, dimana jumlah antena penerima adalah P=Ntx x Nrx, dalam kasus nilai P adalah berjumlah 16.
- 2. Sinyal yang diterima mengandung informasi jarak dan kecepatan dikalikan dengan *steering vector*.
- 3. Membangkitkan steering vector, dengan nilai sebagai berikut:

$$a(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\cos(\theta)2\pi d_r/\lambda} & \dots & e^{j\cos(\theta)2\pi(P-1)d_r/\lambda} \end{bmatrix}^T$$
(3.1)

4. Setelah itu masuk pemrosesan algoritma MUSIC seperti yang telah dijelaskan diatas.

# 3.2 Spesifikasi Radar

Tugas akhir ini diharapkan mampu menjadi referensi dalam pengimplementasian radar MIMO-OFDM menggunakan perangkat keras, sehingga simulasi sistem dibuat sedekat mungkin dengan spesifikasi perangkat keras yang akan digunakan, yaitu modul Universal Software Radio Peripheral (USRP).

Informasi yang ingin didapatkan dari sistem ini adalah informasi jarak, kecepatan, dan DoA. Informasi kecepatan dan jarak didapatkan dari pengolahan sinyal menggunakan periodogram (modulasi simbol), sedangkan informasi DoA didapatkan dari pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC.

Kemampuan algoritma MUSIC memiliki keterbatasan yaitu hanya mampu mendeteksi target sebanyak *Mr*-1 (*Mr* adalah jumlah antenna array di sisi penerima) [9], maka sistem radar ini menggunakan sistem MIMO 4x4 agar dapat mendeteksi lebih dari 1 target. Dengan teori pada [9], maka jumlah maksimum target yang dapat dideteksi adalah sebanyak 3 target. Oleh karena itu untuk meningkatkan jumlah deteksi target maka digunakan *virtual antenna* yang memiliki jumlah 16.

Berikut ini akan dipaparkan mengenai alur parameterisasi sistem radar OFDM



Gambar 3.3 Blok Diagram Parameter Sistem Radar OFDM

Pada kasus ini, radar yang didesain merupakan *automotive* radar, sehingga untuk menyesuaikan dengan keadaan yang sebenarnya atau relita maka parameter yang digunakan sesuai dengan spesifikasi radar *automotive* sesuai yang dibahas di [2].

**Gambar 3.3** merupakan alur dalam medesain *automotive radar* yang dijelaskan seperti berikut:

- 1. Radar OFDM bekerja pada frekuensi 24 GHz ( $\lambda = 0.0125$  m)
- 2. Kelajuan relatif maksimal ( $v_{r max}$ ) target adalah 55.6 m/s
- 3. Jarak maksimal target adalah 206.3 m
- 4. Hal yang perlu diperhatikan dalam perancangan selanjutnya adalah spasi antar subcarrier ( $\Delta f_c$ ), namun sebelum itu perlu mengetahui frekuensi Doppler maksimal ( $f_{D max}$ ) terlebih dahulu. Untuk radar, pergeseran Doppler terjadi dua kali

$$f_{D max} = 2 v_r / \lambda$$

sehingga  $f_D$  bernilai 8.9 kHz pada frekuensi 24 GHz dan kecepatan relatif maksimum adalah 55.6 m/s.

5. Agar keorgotonalitasan antar subcarrier tercapai, maka  $\Delta f_c$  harus lebih besar dari sepuluh kali  $f_{D max}$ 

$$\Delta f_c > 10 f_{D \max} \tag{3.3}$$

dipilih  $\Delta f_c$  sebesar 90.909 kHz

- 6. Bandwidth (B) dari USRP sebesar 120 MHz , maka dipilih nilai Bandwidth adalah 93.1 MHz
- Setelah Δf<sub>c</sub> dan B diketahui, dapat dihitung banyaknya subcarrier (Nc) yang mungkin dimana banyaknya subcarrier ditentukan dengan lebar bandwidth dibagi dengan spasi antar subcarrier. Nc yang dimungkinkan untuk digunakan haruslah merupakan bilangan dua pangkat, sehingga Nc ada sebanyak 1024
- Periode simbol OFDM (T<sub>o</sub>) merupakan perbandingan antara banyaknya subcarrier dengan bandwidth yang terpakai (B<sub>u</sub>), atau satu per periode simbol OFDM, sehingga didapatkan T<sub>o</sub> berdurasi 11 μs
- Periode OFDM (T<sub>OFDM</sub>) merupakan penjumlahan T<sub>o</sub> dengan periode cyclic prefix (T<sub>cp</sub>). T<sub>cp</sub> ditetapkan sepanjang seperdelapan T<sub>o</sub> dengan pertimbangan durasi cyclic prefix lebih besar dibanding waktu *delay* untuk jarak maksimum, sehingga T<sub>OFDM</sub> berdurasi selama 1.375 μs

Resolusi jarak ( $\Delta R$ ) hanya dipengaruhi lebarnya bandwidth yang dipakai dimana resolusi jarak berbanding terbalik terhadap bandwidth, dan resolusi kecepatan juga berbanding terbalik dengan jumlah simbol yang digunakan, dimana nilai resolusi jarak adalah sebesasr 1.61 m, nilai resolusi kecepatan adalah sebesar 1.97m/s, dan nilai resolusi sudut bergangung pada jumlah antenna yang digunakan, didapatkan nilai resolusi sudut adalah sebesar 0.05°.

Simbol	Parameter	Nilai
$f_c$	Frekuensi carrier	24 GHz
Nc	Jumlah Subcarrier	1024
Nct	Jumlah subcarrier/transmitter	128
Nch	Jumlah channel	8
Т	Durasi OFDM dasar	11 µs
$T_{cp}$	Durasi Cyclic prefix	1.375 μs
T <sub>sym</sub>	Total durasi simbol OFDM	12.375 μs
В	Bandwidth	93.1 MHz
$\Delta r$	Resolusi jarak	1.61 m
<i>r<sub>max</sub></i>	Maksimum jarak	206.3 m
Vmax	Maksimum kecepatan	55.6 m/s
Nsym	Jumlah simbol	256
$\Delta v$	Resolusi kecepatan	1.97 m/s
$\Delta \theta$	Resolusi Sudut	0.05°

Tabel 3.1 Spesifikasi Radar MIMO-OFDM yang Diinginkan

# 3.3 Pemodelan Simulasi Sistem

Pada pemodelan simulasi sistem tugas akhir ini, digunakan beberapa asumsi dan parameter sesuai dengan perancangan sistem, yaitu

- 1. Simulasi digunakan pada model baseband equivalent
- 2. Lebar bandwidth 93.1 MHz
- 3. Banyak subcarrier yang digunakan sebanyak 1024 subcarrier
- 4. Panjang *cyclic prefix* sepanjang seperdelapan dari banyaknya subcarrier yang digunakan, atau dalam hal ini berarti sepanjang 128 subcarrier
- 5. Banyak simbol OFDM sebanyak 256 simbol OFDM
- 6. Modulasi menggunakan jenis modulasi QPSK
- 7. Jumlah Titik FFT yang digunakan sebanyak 1024 titik

# 3.3.1 Pembangkitan Bit Informasi

Pada sistem radar ini, untuk pembangkitan bit informasi digunakan pembangkit *random integer*. Di MatLab ada fungsi yang digunakan untu membagkitkan *random integer*. Input yang perlu didefinisikan di antaranya total bit yang ingin dibangkitkan yang bernilai jumlah subcarrier dikalikan dengan jumlah simbol dan IRANGE yang bernilai *vector scalar* karena modulasi yang akan digunakan adalah QPSK maka nilai IRANGE (M) adalah 4.

```
Data = randint(1,Nsym*Nc,M);
```

# 3.3.2 Modulasi

Bit output dari *random integer* menjadi bit input untuk modulasi. Bit input kemudian dimapping dengan modulasi QPSK menjadi simbol modulasi QPSK. Setelah mapping modulasi QPSK didapatkanlah data sebanyak satu frame dari yang sebelumnya sebanyak dua frame karena satu simbol QPSK berisi 2 bit data.

```
map_data=(1/4)*modulate(modem.pskmod(M,pi/4),D
ata);
```

## 3.3.3 Proses Interleaving

Tahap selanjutnya adalah dengan melakukan proses paralelisasi dan pemilihan *subcarrier* yang digunakan. Paralelisasi dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi *reshape* sesuai dengan jumlah subcarrier. Sementara untuk operasi pemilihan *subcarrier* dilakukan dengan cara memberi nilai nol, untuk subcarrier yang tidak diinginkan.

```
par_data=reshape(map_data,Nc,[]);
Tx1a=par_data;Tx2a=par_data;Tx3a=par_data;Tx4a
=par_data;
for i = 5:8:Nc;
    Tx1a(i,:)=0;
end
Ch Tx1 = par data-Tx1a;
```

#### 3.3.4 IFFT

Sementara untuk operasi IFFT dapat menggunakan fungsi dari MatLab yaitu *IFFT*. Untuk IFFT mempunyai input simbol modulasi QPSK dan panjang IFFT yang digunakan adalah 1024, outputnya adalah simbol OFDM.

```
ifft_Tx1 = ifft(Ch_Tx1,Nc);
```

## 3.3.5 Penambahan Cyclic Prefix

Penambahan cyclic prefix dilakukan dengan menyalin seperdelapan informasi terakhir dari simbol OFDM hasil IFFT untuk kemudian disematkan ke depan simbol OFDM tersebut sendiri yang berguna sebagai guard interval dan berfungsi untuk mencegah terjadinya ISI (intersimbol interference).

cp\_Tx1=[ifft\_Tx1((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft\_Tx1];

# 3.4 Konfigurasi Pemancar dan Penerima

Konfigurasi pemancar dan penerima sistem MIMO-IOFDM terdiri dari empat antena pemancar dan empat antena penerima, atau disebut juga sebagai MIMO dengan ukuran 4x4, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Pada sisi pemancar terdapat empat antena dengan jarak masing-masing antena adalah  $\lambda/2$  dimana saat melakukan simulasi pada sisi pemancar tidak dilakukan proses steering vector dengan asumsi bahwa sinyal yang keluar adalah menyebar disegala arah sehingga tidak diperlukan pengarahan beam dari antena pemancar. Sedangkan pada sisi penerima terdapat dua skenario yang pertama adalah ketika dilakukan pemrosesan jarak dan kecepatan maka menggunakan empat antena yang nyata seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2(b) dengan jarak antar antena adalah  $\lambda/_2$ , sehingga sinyal yang akan diolah adalah bersumber dari empat antena saja. Sedangkan skenario kedua vaitu untuk pemrosesan sudut kedatangan (DoA) digunakan konsep virtual antenna seperti yang dijelaskan pada Subab 2.6.2, dimana yang semula hanya terdiri empat antena penerima, dengan penggunaan virtual antenna maka jumlah antena penerima menjadi enam belas vaitu dari hasil perkalian antara jumlah antena pengirim dengan jumlah antena penerima yang sama-sama bernilai empat. Konfigurasi ini hanya digunakan dalam pemrosesan arah kedatangan target (DoA) khususnya pada saat penggunaan algoritma MUSIC. Dimana dalam algoritma MUSIC seperti yang dibahas pada Subab 2.7.3, pada proses steering vector dibutuhkan informasi jumlah antena penerima. Dengan penggunaan virtual antenna yang berjumlah enam belas maka jumlah maksimum target yang bisa dideteksi radar adalah lima belas dan keuntungan lain penggunaan virtual antenna ini adalah mampu meningkatkan akurasi deteksi sudut kedatangan (DoA) seperti yang telah dibahas pada Persamaan 2.36. Untuk hasil pola radiasi enam belas antena penerima ditunjukkan pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 Pola Radiasi 16 Elemen Antena Penerima

Analisa pola radiasi antena penerima dapat menggunakan *pattern multiplication theorema* yang menyatakan sebagai berikut: "*array pattern* = *array element pattern x array factor*". Array elemen pattern adalah pola radiasi dari masing-masing element. Array factor (AF) tidak bergantung pada tipe antena dengan mengasumsikan seluruh elemen antena adalah identik. Sehingga pemancar isotropik dapat digunakan dalam penurunan array faktor untuk mempermudah perhitungan

Dari **Gambar 3.4** dapat diketahui, jika target berada pada sudut 90° maka level daya yang diterima bernilai tertinggi. Sedangkan saat target berada di sudut yang merupakan hasil pencerminan, seperti 80° dengan  $100^{\circ}$ , 70° dengan  $110^{\circ}$ , 60° dengan  $120^{\circ}$ , dst maka level daya yang diterima akan bernilai sama. Sedangkan jika sudut kedatangan target mendekati 90° maka nilainya akan semakin besar, namun jika sudut kedatangan target mendekati 0° dan 180° maka level daya yang diterima akan semakin menurun. Misalkan terdapat dua target yang berada pada sudut 80° dan 160° maka nilai level daya dari deteksi kecepatan, jarak, dan sudut akan bernilai tinggi pada sudut 80°.

## **3.5 Pemodelan Target**

Sebelum melakukan pemodelan target, harus ditentukan parameter target yang akan diidentifikasi oleh radar. Pada tugas akhir ini ditentukan tiga parameter target yang akan diidentifikasi oleh radar MIMO-OFDM, yaitu informasi kecepatan, jarak dan DoA.

# 3.5.1 Pemodelan Jarak



# Gambar 3.5 Ilustrasi Jarak yang Ditempuh oleh Sinyal yang Dipancarkan Radar hingga kembali diterima Radar

Jika melihat **Gambar 3.5**, radar memancarkan sinyal ke udara lalu mendeteksi sinyal *echo* yang diterima dari pantulan target. Waktu tempuh sinyal sejak dipancarkan hingga kembali ke radar dinotasikan sebagai *time delay* ( $t_d$ ). *Time delay* ( $t_d$ ) tersebut setara dengan 2 x jarak radar (R) ke target. Sehingga untuk mendapatkan informasi jarak target yang dideteksi, sesuai dengan persamaan (2.1), dapat dihitung menggunakan persamaan (3.4)

$$R = \frac{ct_d}{2} \tag{3.4}$$

Berdasarkan ilustrasi tersebut, maka pemodelan untuk menambahkan informasi jarak pada target adalah dengan menambahkan *delay* pada sinyal.

Pada simulasi, *delay* diperoleh dari hasil penambahan sejumlah deretan nilai 0 pada sinyal yang dipancarkan. *Delay* pada sinyal didapatkan menggunakan persamaan (2.18).

Sebelum *delay* tersebut ditambahkan pada sinyal, harus ditentukan jumlah sampel yang setara dengan nilai *delay* tersebut  $(n_d)$ . Rumus yang digunakan sama seperti persamaan (3.4), namun variabel  $\tau$  diganti dengan  $t_d$ . Sesuai persamaan (3.5)

$$n_d = \frac{t_d}{t_b} \tag{3.5}$$

dimana B adalah *bandwidth*,  $t_d$  adalah *time delay* sesuai skenario jarak target yang ditentukan, dan  $t_b$  adalah durasi bit yang dihitung dari persamaan (3.6).

$$t_b = \frac{T_{sym}}{N_c + N_{cp}} \tag{3.6}$$

Setelah mengetahui jumlah sampel dari *delay*, kemudian membangkitkan nilai nol pada matriks ukuran [1 x (jumlah sampel setara *delay*)]. Lalu matriks tersebut disisipkan di deretan depan matriks sinyal yang dipancarkan.

#### 3.5.2 Pemodelan Kecepatan

Untuk memodelkan target yang sedang bergerak maka ditambahkan pergeseran Doppler, pertama-tama dilakukan perhitungan berdasarkan kecepatan yang diinginkan misalkan 20m/s setara dengan frekuensi Doppler sebesar 3200 Hz, setelah didapatkan pergeseran Doppler maka dimasukkan pada persamaan(3.7), dimana persamaan tersebut dikalikan dengan deretan bit data yang dikirim.

$$k_D(m) = \exp(j2\pi m T_{OFDM} f_D) \tag{3.7}$$

## 3.5.3 Pemodelan Sudut Kedatangan (DoA)

Untuk memberikan informasi DoA pada target, dilakukan proses *steering vector*. Proses *steering vector* dapat dilihat melalui diagram blok pada **Gambar 3.6**. Yang pertama dilakukan adalah menentukan skenario DoA yang diinginkan, sebagai contoh DoA pada sudut 70° dan 110°, kemudian melakukan perhitungan *steering vector* menggunakan persamaan (2.26). Hasil perhitungan *steering vector* akan menghasilkan matriks dengan ukuran [(jumlah elemen penerima) x (jumlah DoA target)]. Karena skenario DoA ditentukan pada sudut 70° dan 110°, sedangkan sistem radar MIMO-FMCW yang dibangun menggunakan sistem MIMO 4x4 (4 penerima), maka hasil perhitungan *steering vector* akan menghasilkan matriks berukuran [4 x 2].



Gambar 3.6. Blok Diagram Pemodelan Sudut Kedatangan (DoA)

# 3.6 Pemodelan Interferer

Untuk mengetahui ketahanan dari sinyal yang dikirim maka dibangkitkan interference dari sistem yang sama, dimana pada interferer ini tidak ada blok *post processing* melainkan hanya sinyal yang dikirim dan pemodelan informasi jarak dan kecepatan. Dimanan interfer ini berada di jarak tertentu dari radar utama, sehingga informasi target yang sampai dipenerima radar utama akan bercampur dengan informasi dari interferer, nantinya akan dihitung berapa nilai SIR (signal to interference ratio) yang dihitung dari persamaan berikut[2]:

$$SIR = \frac{R_{int}^2 \sigma}{(4\pi) R_{obj}^4}$$
(3.8)

Dari persamaan (3.8) diatas  $R_{int}$  adalah jarak radar dengan interferer,  $\sigma$  adalah radar cross section,  $R_{obj}$  adalah jarak target dengan radar utama. Untuk menambahkan interferer, yang pertama adalah memodelkan interferer dengan memberikan informasi jarak dan kecepatan (tanpa melalui *block processing*) setelah itu sinyal interferer dijumlahkan dengan sinyal asli setelah itu masuk *bolck processing* radar utama. **Gambar 3.5** menunjukkan skenario penempatan interferer pada pengujian sistem radar yang dibuat, dimana dari gambar tersebut dimisalkan terdapat dua interferer dan satu radar utama, dimana interferer tersebut berada berlawanan arah dengan radar utama dan sinyal dari interferer masuk kedalam daerah kerja dari sistem radar utama.



Gambar 3.7. Skenario Penempatan Interferer

# 3.7 Pengolahan Sinyal Hasil Deteksi Target

Informasi yang didapatkan dalam proses ini adalah informasi jarak dan DoA. Seperti yang telah diatur pada **Subab 3.1**, informasi jarak dan kecepatan didapatkan dari proses pengolahan sinyal menggunakan modulasi simbol. Sedangkan informasi DoA didapatkan dari proses pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC.

# 3.7.1 Algoritma MUSIC

Algoritma MUSIC digunakan untuk mendapatkan informasi DoA dari target. Diagram blok proses pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC dapat dilihat pada **Gambar 3.2 (b)** 

Langkah pertama adalah menentukan matriks kovarian dari sinyal yang diterima ( $\overline{R}_{xx}$ ), yang didapatkan dengan melalui persamaan (2.27).

Setelah itu dilakukan proses *steering vector* (untuk mendapatkan nilai  $\theta$  pada kasus ini ditambahkan virtual antena sehingga yang pada mulanya MIMO mempunyai konfigurasi 4x4 dibuat menjadi memliliki

16 penerima yang didapatkan dari perkalian jumlah antena penerima dengan jumlah antena pengirim. Karena DoA sistem pada rentang 0°-180°, proses ini akan menghasilkan matriks berukuran [16 x 181]. Maka didapatkan estimasi DoA dengan algoritma MUSIC ( $P_{MU}(\theta)$ ).

Plot hasil pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC untuk deteksi 2 target dengan skenario DoA pada sudut 20° dan 60° dapat dilihat pada **Gambar 3.8** 



Gambar 3.8 Hasil Deteksi Sudut Menggunakan Algoritma MUSIC

## 3.7.2 Periodogram Modulasi Simbol

Periodogram modulasi simbol digunakan utnuk mendapatkan informasi jarak dan kecepatan dari target. Diagram blok proses modulasi simbol bisa dilihat **Gambar** (3.2 b)

Tahap pertama yang dilakukan adalah melakukan proses pembagian antara data yang diterima sesudah proses FFT dengan data yang berada dipengirim sebelum proses IFFT. Untuk mendapatkan informasi jarak dari target adalah dengan melakukan proses IFFT untuk setiap simbol, sedangkan untuk mendapatkan informasi kecepatan adalah dengan melakukan FFT untuk setiap simbol.dari hasil pembagian.

Plot hasil pengolahan sinyal deteksi radar dengan skenario kecepatan 20 m/s dan 35 m/s ditampilkan pada **Gambar** (3.9), sedangkan hasil pengolahan sinyal dengan skenario jarak 30 m dan 60 m, ditampilkan pada **Gambar** (3.10).



Gambar 3.9 Hasil Deteksi Kecepatan Menggunakan Modulasi Simbol



Gambar 3.10 Hasil Deteksi Jarak Menggunakan Modulasi Simbol



Gambar 3.11 Plot Ambiguitas

#### 3.7.3 Window Hamming

Untuk menurunkan level *sidelobe* dari hasil deteksi jarak dan kecepatan seperti pada **Gambar 3.9** dan **Gambar 3.10** maka digunakan window hamming. Window hamming diterapkan pada sisi penerima yaitu sebelum proses periodogram, matrik hasil pembagian seperti pada persamaan 2.10, Window Hamming diterapkan pada setiap *subcarrier* dan simbol dari OFDM. Langkah pertama yang dilakukan adalah membangkitkan window hamming dua dimensi pada Matlab dengan nilai masukan adalah panjang window hamming sesuai dengan panjang *subcarrier* dan simbol OFDM.

```
hamm_div_j = hamming(1024)*ones(1,256);
ham_div_k =
(ones(1,1024).'*hamming(256).').*hamm_div_j;
divk = ham_div_k.*div;
divm = ham_div_k.*div;
```

Matriks dua dimensi hasil pembangkitan window hamming dikalikan dengan persamaaan 2.10, hasil perkalian ini akan masuk pada proses periodogram untuk mendapatkan nilai jarak dan kecepatan dari target.

Dengan menggunakan window hamming nilai level *sidelobe* dari deteksi jarak dan kecepatan, seperti pada **Gambar 3.12** dan **Gambar 3.13**.



Gambar 3.12 Hasil Deteksi Kecepatan Menggunakan dan Tanpa Window Hamming



Gambar 3.13 Hasil Deteksi Jarak Menggunakan dan Tanpa Window Hamming



Gambar 3.14 Ambiguitas Radar MIMO Menggunakan Window Hamming

Dari Gambar 3.12 dan Gambar 3.13 dapat diketahui bahwa dengan menggunakan window hamming nilai level *sidelobe* dari deteksi jarak dan kecepatan, dengan menggunakan window hamming level *sidelobe* dari deteksi kecepatan jarak bisa diturunkan tetapi nilai main lobe semakin melebar yang berarti nilai resolusi semakin jelek.

## 3.8 Skenario Simulasi Pengujian

Untuk menguji kinerja sistem radar MIMO-IOFDM yang telah dibuat maka dilakukan beberapa skenario pengujian simulasi system, sebagai berikut:

## 3.8.1 Perbandingan antara SISO dengan MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

Tahap pengujian yang pertama adalah membandingkan antara sistem SISO dengan MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan parameter pengujian adalah akurasi, resolusi, dan level daya dari hasil deteksi. Sistem MIMO mempunyai keunggulan bisa mendeteksi sudut kedatangan sedangkan sistem SISO tidak bisa mendeteksi sudut kedatangan dari target dikarenakan sistem SISO hanya memiliki satu antena penerima dan satu antena pemancar.
Pada pengujian MIMO dimodelkan terdapat dua Sistem, dimana Sistem 1 sebagai radar utama yang terdiri dari Tx5, Tx6, Tx7, dan Tx8 bisa dilihat pada **Gambar 3.15**, sedangkan Sistem 2 dimodelkan sebagai interferer yang terdiri dari Tx1, Tx2, Tx3, dan Tx4. Begitu pula dengan pengujian SISO juga terdapat dua Sistem, dimana Sistem 1 bertindak sebagai radar utama terdapat semua *subcarrier*, sedangkan Sistem 2 terdiri dari Tx1, Tx2, Tx3, dan Tx4 sebagai interferer. Pada tahap ini dimodelkan terdapat dua target dimana target pertama berada pada jarak 20 m, kecepatan 20m/s dan sudut kedatangan 70° dan target kedua pada jarak 30 m, kecepatan 35 m/s, dan sudut kedatangan 90°.



Gambar 3.15 Subcarrier MIMO IOFDM Model Wiesbeck

Interferer datang dari jarak 40m, kecepatan 40 m/s, dan sudut kedatangan 110°, dengan menghitung nilai SIR (*Signal to Interference Ratio*) dari persamaan (3.8) dengan asumsi nilai RCS (*Radar Cross Section*) dari mobil adalah 10 m<sup>2</sup>, didapatkan nilai SIR untuk jarak 60m sebesar -21 dB sedangkan untuk target yang 30 m nilai SIR adalah -28 dB maka untuk proses simulasi diambil nilai SIR yang terkecil yaitu -28 dB.



Gambar 3.16 Perbandingan Deteksi Kecepatan Sistem MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dan Sistem SISO IOFDM Model Wiesbeck



Gambar 3.17 Perbandingan Deteksi Jarak Sistem MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dan Sistem SISO IOFDM Model Wiesbeck



Gambar 3.18 Deteksi Sudut Sistem MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

Dari hasil diatas dapat diketahui dengan parameter yang sama antara MIMO dan SISO didapatkan *sidelobe* level dari MIMO lebih rendah, hal ini dikarenakan dalam sistem MIMO 4x4 memiliki jumlah antena yang lebih banyak sehingga sinyal hasil penjumlahan dari setiap antena membuat level sidelobe dari sistem MIMO lebih rendah. Dengan menggunakan window hamming, *sidelobe level* dari deteksi jarak dan kecepatan lebih rendah jika dibandingkan tanpa menggunakan window hamming, *sidelobe level* nya dirata-rata sehingga menghasilkan nilai yang lebih rendah.

# 3.8.2 Perbandingan Antara MIMO-IOFDM Model Yoke dengan SISO

Untuk mengetahui model pengiriman MIMO yang tahan terhadap interferensi maka diuji beberapa metode pengiriman. Pada metode ini tetap menggunakan konsep *interleaved* dimana tidak semua *subcarrier* dikirim bersamaan melainkan dipilih beberapa *subcarrier* untuk meningkatkan ketahanan terhadap ICI (*Interchannel Interference*). Untuk skenario penggunaan *subcarrier* adalah seperti pada **Gambar 3.19**, dimana terdapat dua Sistem dimana Sistem 1 sebagai radar utama yang terdiri dari Tx1, Tx2, Tx5, dan Tx6 sedangkan Sistem 2 terdiri dari Tx3, Tx4, Tx7, dan Tx8 sebagai interferer. Model Yoke akan dibandingkan

dengan SISO yang juga terdapat dua Sistem yaitu Sistem 1 terdiri dari Tx1, sedangkan Sistem 2 terdiri dari Tx3, Tx4, Tx7, dan Tx8 sebagai interferer.



Gambar 3.19 Pembagian Subcarrier Model Yoke

Sebagai skenario pengujian adalah terdapat dua target yang terletak pada jarak 20 m dengan kecepatan 30 m/s dan target kedua terletak pada jarak 30 m dengan kecepatan 35 m/s, sedangkan interferer berada pada

jarak 40 m dengan kecepatan 40 m/s. Untuk nilai SIR (*Signal to Interference Ratio*) dihitung dengan persamaan (3.8) dengan asumsi nilai RCS (*Radar Cross Section*) dari mobil adalah 10 m<sup>2</sup>, didapatkan nilai SIR untuk jarak 30m sebesar -33 dB sedangkan untuk target yang 20 m nilai SIR adalah -21 dB maka untuk proses simulasi diambil nilai SIR yang terkecil yaitu -33 dB.



Gambar 3.20 Hasil Deteksi Kecepatan MIMO-IOFDM Model Yoke dan SISO-IOFDM Model Yoke



Gambar 3.21 Hasil Deteksi Jarak MIMO-IOFDM Model Yoke dan SISO-IOFDM Model Yoke



Gambar 3.22 Hasil Deteksi Sudut DoA MIMO-IOFDM Model Yoke

# 3.8.3 Perbandingan antara MIMO-IOFDM Subcarrier Acak dengan SISO

Penggunaan *subcarrier* acak bertujuan untuk menghindari peluang terjadinya interferensi dengan Sistem yang lain, pada pemodelan ini setiap transmitter akan dibangkitkan 128 *subcarrier* dengan distribusi acak, sehingga untuk setiap kali *running* program akan menghasilkan subcarrier yang berbeda-beda. Interferensi yang dibangkitkan juga mempunyai distribusi acak sehingga peluang terjadinya interferensi antar Sistem tidak bisa direncanakan. Dengan penggunaan *subcarrier* acak memiliki kemungkinan untuk diterapkan pada kenyataan, mengingat nantinya akan banyak Sistem yang ada, sehingga akan sulit untuk mengatur *subcarrier* yang digunakan untuk setiap Sistem yang ada, dengan menggunakan *subcarrier* acak ini akan lebih realistis untuk bisa diterapkan.

Sebagai skenario pengujian adalah terdapat dua target yang terletak pada jarak 20 m dengan kecepatan 30 m/s dan target kedua terletak pada jarak 30 m dengan kecepatan 35 m/s, sedangkan interferer berada pada jarak 40 m dengan kecepatan 40 m/s. Untuk nilai SIR (*Signal to Interference Ratio*) dihitung dengan persamaan (3.8) dengan asumsi nilai RCS (*Radar Cross Section*) dari mobil adalah 10 m<sup>2</sup>, didapatkan nilai SIR untuk jarak 60m sebesar -33 dB sedangkan untuk target yang 20 m nilai SIR adalah -21 dB maka untuk proses simulasi diambil nilai SIR yang terkecil yaitu -33 dB.



Gambar 3.23 Hasil Deteksi Kecepatan MIMO IOFDM Acak dan SISO



Gambar 3.24 Hasil Deteksi Jarak MIMO IOFDM Acak dan SISO IOFDM Acak



Gambar 3.25 Hasil Deteksi Sudut Kedatangan (DoA) MIMO IOFDM Acak

Dari Gambar 3.23 dan Gambar 3.24 dapat dilihat bahwa hasil deteksi dengan menggunakan *subcarrier* acak menunjukkan hasil yang kurang baik karena dari hasil deteksi seharusnya hanya terdiri dari target utama tetapi dari hasil deteksi *subcarrier* acak terdapat interferer yang masuk dalam radar dengan level daya yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan target utama. Untuk deteksi sudut kedatangan menunjukkan hasil yang serupa, yaitu nilai interferer masuk dalam deteksi radar dengan nilai level daya yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan target utama.

# 3.8.4 Perbandingan antara MIMO-OFDM Konvensional dengan SISO

Pada sub-bab ini dibahas mengenai konvensional OFDM dimana pada setiap transmitter akan mengirim *subcarrier* secara berurutan tanpa adanya interleaveing. Konsep konvensional MIMO OFDM yaitu setiap transmitter mengirim semua *subcarrier* dalam kasus ini sejumlah 128 subcarrier setiap transmitter secara berurutan dari *subcarrier* nomor 1-128, transmitter kedua dikirim *subcarrier* sejumlah 128 dengan urutan *subcarrier* 129-256, pada *subcarrier* ketiga dikirim *subcarrier* ke 257-384, dan transmitter keempat mengirim *subcarrier* ke 385-512 ini yang disebut sebagai Sistem 1 yang bertindak sebagai radar utama. Sedangkan Sistem 2 yang bertindak sebagai interferer, transmitter pertama dari

interferer menggunakan *subcarrier* ke 513-640, transmitter kedua menggunakan *subcarrier* 641-768, transmitter ketiga menggunakan *subcarrier* 769-896, dan transmitter keempat menggunakan *subcarrier* 897-1024, untuk lebih jelasnya dari pembagian *subcarrier* dapat dilihat dari Gambar 3.26. sedangakan untuk pengujian sistem SISO juga terdapat dua Sistem, yaitu Sistem 1 yang bertindak sebagai radar utama terdiri dari seluruh *subcarrier*, sedangkan Sistem 2 yang bertindak sebagai interferer, transmitter pertama dari interferer menggunakan *subcarrier* 129-256, transmitter ketiga menggunakan *subcarrier* 257-384, dan transmitter keempat menggunakan *subcarrier* 385-512.

Sebagai skenario pengujian adalah sama dengan pengujian sistem yang sebelumnya yaitu terdapat dua target yang terletak pada jarak 20 m dengan kecepatan 30 m/s dan target kedua terletak pada jarak 30 m dengan kecepatan 35 m/s, sedangkan interferer berada pada jarak 40 m dengan kecepatan 40 m/s. Untuk nilai SIR (*Signal to Interference Ratio*) dihitung dengan persamaan (3.8) dengan asumsi nilai RCS (*Radar Cross Section*) dari mobil adalah 10 m<sup>2</sup>, didapatkan nilai SIR untuk jarak 60m sebesar -33 dB sedangkan untuk target yang 20 m nilai SIR adalah -21 dB maka untuk proses simulasi diambil nilai SIR yang terkecil yaitu -33 dB.

Gambar 3.26 menunjukkan pembagian *subcarrrier* untuk setiap tranmitter, sedangkan hasil simulasi untuk skenario pengujian yang telah dijelaskan diatas, ditunjukkan pada Gambar 3.27, 3.28, 3.29.



Gambar 3.26(a) Pembagian Subcarrier Konvensional MIMO OFDM



Gambar 3.26(b) Pembagian Subcarrier Konvensional MIMO OFDM



Gambar 3.27 Hasil Deteksi Kecepatan Konvensional MIMO OFDM dan SISO



Gambar 3.28 Hasil Deteksi Jarak Konvensional MIMO OFDM dan SISO



Gambar 3.29 Hasil Deteksi Sudut Kedatangan (DoA) Konvensional MIMO OFDM

# 3.8.5 Perbandingan MIMO dengan Virtual Array dan Tanpa Virtual Array

Penggunaan *virtual* antena bertujuan untuk meningkatkan resolusi sudut hasil deteksi target dan mampu mendeteksi jumlah target yang lebih banyak. Pada kasus ini terdapat MIMO dengan ukuran 4x4 terdiri dari 4 antena transmitter dan 4 antena receiver, jika hanya menggunakan empat antena penerima, resolusi sudut yang dihasilkan bernilai jurang bagus dan jumlah target yang bisa dideteksi sedikit yaitu tiga sesuai dengan teori algoritma musik yaitu jumlah maksimum deteksi target adalah jumlah antena penerima dikurang satu. Ukuran virtual antena adalah 1x16, yaitu hasil dari perkalian antara jumlah antena penerima dikalikan dengan jumlah antena pengirim, pada kasus ini virtual antena pada receiver berjumlah 16. Dengan menggunakan jumlah antena penerima sejumlah 16 maka maksimum jumlah target yang bisa adalah 15 sesuai dengan algoritma MUSIC yaitu jumlah antena penerima dikurang satu.



Gambar 3.30 Hasil Deteksi Sudut Tanpa Menggunakan Virtual Antena



Gambar 3.31 Hasil Deteksi Sudut Menggunakan Virtual Antena

#### 3.8.6 Pengujian Kinerja Radar MIMO-OFDM

Untuk menguji kinerja sistem radar MIMO-OFDM yang telah dibuat, maka diperlukan beberapa skenario simulasi. Sesuai dengan permasalahan yang ingin diselesaikan pada Tugas Akhir ini ada beberapa parameter pengujian yaitu akurasi dan resolusi deteksi kecepatan, jarak dan sudut kedatangan serta ketahanan terhadap interferer yang dilihat dari kenaikan *sidelobe level* (SLL), maka skenario yang dibuat berdasarkan kemampuan deteksi radar MIMO-OFDM, ada beberapa parameter yang dijadikan acuan untuk menguji kinerja radar yang telah dibuat, yaitu:

 Akurasi dan resolusi dari jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan (DoA), parameter ini merupakan salah satu parameter yang paling penting dari desain radar. Resolusi dari kecepatan sangat bergantung dari jumlah simbol yang digunakan semakin banyak simbol yang digunakan resoulusi kecepatan semakin kecil begitu pula sebaliknya, keunggulan dari radar OFDM adalah sangat sensitif terhadap pergeseran Doppler sehingga akurasi deteksi kecepatan radar OFDM lebih baik jika dibandingkan dengan radar yang lain seperti radar FMCW. Sedangkan untuk resolusi dari jarak sangat bergantung pada besar *bandwidth* yang digunakan, semakin besar *bandwidth* yang digunakan maka resolusi semakin kecil begitu pula sebaliknya. Untuk resolusi sudut kedatangan atau DoA sangat berpengaruh dari jumlah antena yang digunakan, semakin banyak antena yang digunakan resolusi dan jumlah target yang bisa dideteksi semakin banyak pula, salah satu untuk meningkatkan resolusi dan jumlah deteksi dari sudut kedatangan bisa menggunakan *virtual* atau *pseudo* antena, dimana dalam kasus ini yang pada mulanya terdiri dari antena MIMO 4x4 maka dengan menggunakan *virtual* antena *array* terdiri dari 16 antena *virtual* penerima dengan begitu resolusi dan jumlah dari target yang dideteksi bisa semakin baik dan banyak (sesuai dengan ketentuan algoritma MUSIC dimana jumlah maksimal target yang bisa dideteksi adalah minus satu dari jumlah antena penerima).

- 2. Jarak deteksi minimum dan maksimum dari deteksi jarak, kecepatan, dan sudut. Parameter ini juga penting dalam mendesain radar pada Tugas Akhir ini parameter yang digunakan adalah sesuai dengan spesifikasi automotive radar. Untuk radar MIMO-Interleaved OFDM dimana tidak semua subcarrier dikirim untuk setiap antena, maka nilai dari deteksi jarak maksimum akan mengalami penurunan sesuai dengan jumlah antena yang digunakan atau sesuai dengan berapa kali sinyal OFDM di interleaving. Sedangkan nilai deteksi maksimum dan minimum dari kecepatan bergantung pada nilai frekuensi *carrier* yang digunakan semakin besar frekuensi carrier maka deteksi maksimumnya akan menurun. Untuk nilai maksimum dan minimum dari sudut kedatangan diatur pada 0°-180°, diasumsikan 0° pada sisi kiri gambar dan 180° di sisi kanan gambar. Masing-masing skenario dilakukan 10 kali iterasi atau running.
- 3. SLL atau *silelobe level* hasil deteksi jarak dan kecepatan dipengaruhi oleh seberapa besar frekuensi Doppler dari radar interferer. Dimana semakin tinggi frekuensi Doppler dari interferer maka kenaikan SLL hasil deteksi jarak dan kecepatan juga semakin tinggi. Dalam hal ini akan dilihat model MIMO-OFDM seperti apa yang paling tahan terhadap interferer atau setidaknya seberapa tahan model MIMO-OFDM terhadap interferer dalam kaitannya dengan deteksi jarak dan kecepatan.

Mekanisme pengujian kinerja radar adalah sebagai berikut:

1. Pengujian resolusi jarak adalah dengan melakukan simulasi dua target, jarak antar kedua target ini diatur mulai dari jarak 10 m sampai jarak

dimana deteksi radar tidak bisa membedakan kedua target tersebut atau jarak sebelum radar mendeteksi satu target saja. Selain cara tersebut, untuk melakukan pengujian resolusi jarak bisa dilihat dengan melakukan plot ambiguitas, seperti paga gambar

- 2. Pengujian resolusi kecepatan dengan melakukan simulasi dua target dimana kedua target tersebut pada mulanya terpisah 10 m/s, setelah itu selisih kecepatan kedua target tersebut diturunkan sampai radat tidak mampu mendeteksi bahwa terdapat dua target atau selisih kecepatan sebelum radar hanya mendeteksi satu target. Selain cara tersebut, untuk melakukan pengujian resolusi kecepatan bisa dilihat dengan melakukan plot ambiguitas, seperti paga gambar
- 3. Pengujian akurasi jarak dilakukan dengan melakukan simulasi satu target, dengan mengatur pada simulasi dengan jarak tertentu setelah itu dilihat hasil deteksi dari jarak target.
- 4. Pengujian akurasi kecepatan dilakukan dengan melakukan simulasi satu target, dengan mengatur pada simulasi dengan kecepatan tertentu setelah itu dilihat hasil deteksi dari kecepatan target.
- 5. Pengujian maksimum deteksi jarak dilakukan dengan menempatkan target 10m dari jarak maksimum deteksi hasil perhitungan matematis, selanjutnya jarak dari target akan dibuat semakin dekat dengan jarak maksimum sampai radar tidak mampu untuk mendeteksi target tersebut atau terjadi kesalahan deteksi dari radar yang seharusnya mendeteksi target ada di jarak A justru mendeteksi di jarak yang lain.
- 6. Pengujian maksimum deteksi kecepatan dilakukan dengan menempatkan target 10m/s dari kecepatan maksimum deteksi hasil perhitungan matematis, selanjutnya kecepatan dari target akan dibuat semakin dekat dengan kecepatan maksimum sampai radar tidak mampu untuk mendeteksi target tersebut atau terjadi kesalahan deteksi dari radar yang seharusnya mendeteksi target ada di kecepatan A justru mendeteksi di kecepatan yang lain.
- Pengujian minimum deteksi jarak dilakukan dengan menempatkan target 10m dari jarak minimum (sesuai dengan resolusi jarak), selanjutnya jarak dari target akan dibuat semakin dekat dengan jarak

minimum (sesuai dengan resolusi jarak) sampai radar tidak mampu untuk mendeteksi target tersebut atau terjadi kesalahan deteksi dari radar yang seharusnya mendeteksi target ada di jarak A justru mendeteksi di jarak yang lain.

- 8. Pengujian minimum deteksi kecepatan dilakukan dengan menempatkan target 10m/s dari kecepatan minimum (sesuai dengan resolusi kecepatan), selanjutnya kecepatan dari target akan dibuat semakin dekat dengan kecepatan minimum (sesuai dengan resolusi kecepatan) sampai radar tidak mampu untuk mendeteksi target tersebut atau terjadi kesalahan deteksi dari radar yang seharusnya mendeteksi target ada di kecepatan A justru mendeteksi di kecepatan yang lain.
- 9. Pengujian ketahanan terhadap interferer dilakukan dengan memvariasikan frekuensi Doppler interferer setelah itu dilihat seberapa tinggi kenaikan *sidelobe level* dari deteksi jarak dan kecepatan setiap model MIMO-OFDM.



Plot Ambiguitas

Gambar 3.32 Ambiguitas Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck



Gambar 3.33 Ambiguitas Radar MIMO-IOFDM Model Yoke



Gambar 3.34 Ambiguitas Radar MIMO-IOFDM Subcarrier Acak



Gambar 3.35 Ambiguitas Radar MIMO-IOFDM Subcarrier Acak

## BAB 4

# ANALISIS HASIL SIMULASI SISTEM RADAR

Pada bab ini akan dilakukan pembahasan dan analisis data berdasarkan simulasi sistem radar MIMO-OFDM dengan berbagai skenario yang telah ditentukan pada bab 3.

# 4.1 Analisis Sudut Target terhadap Level *Sidelobe*, Akurasi, dan Resolusi dari Deteksi Jarak, Kecepatan, dan Sudut Kedatangan

Sudut kedatangan target sangat berpengaruh terhadap hasil deteksi kecepatan dan jarak, dimana telah dijelaskan pada subab 3.6 bahwa jika sudut kedatangan target mendekati  $0^{\circ}$  dan  $180^{\circ}$  maka level daya terima, resolusi, dan akurasi akan semakin menurun, sedangkan saat sudut kedatangan target berasal dari sudut 90° nilai level daya, akurasi, dan resolusi dari deteksi jarak dan kecepatan akan menemui nilai terbaiknya. Untuk mengetahui efek dari arah kedatangan terhadap level sidelobe, resolusi, dan akurasi dari deteksi jarak dan kecepatan. Sedangkan interferer dimodelkan berada pada jarak 40m dengan kecepatan 40m/s sedangkan berada pada sudut  $110^{\circ}$ .

Untuk menunjukkan efek arah kedatangan terhadap resolusi dan level daya dari kecepatan dan jarak pada radar konvensional MIMO-OFDM seperti pada Tabel 4.1, 4.2, 4.3 dapat disimpulkan saat arah kedatangan mendekati endfire (0° dan 180°) nilai level daya yang rendah dan sidelobe level yang tinggi sedangkan saat target berada pada sudut endfire  $(0^{\circ} \text{ dan } 180^{\circ})$  maka nilai level daya sama dengan nol atau target tidak bisa terdeteksi, sedangkan saat target berada pada atau mendekati broadside (90°) maka level daya akan semakin tinggi dan sidelobe level akan semakin rendah. Saat jarak antar kedua target berbeda yaitu 30m dan 60m maka nilai level daya sidelobe lebih tinggi jika dibanding saat jarak antar kedua target sama vaitu 60m dan saat jarak target sama, nilai level daya dari target akan bernilai lebih tinggi. Untuk beberapa sudut kedatangan seperti 60° dan 120° maka radar tidak bisa mendekteksi target karena sudut tersebut merupakan *null-null* dari *array factor* seperti terdapat pada Gambar 3.4. Sedangkan hasil deteksi sudut menunjukkan nilai interferensi masih terdeteksi karena sinyal yang diolah belum di filter untuk menghilangkan interferensi dan nilai level daya sudut

interferer lebih tinggi dibandingkan dengan sudut target utama, hal ini diakarenakan nilai SIR yang tinggi.

Su Tai	dut rget	Jar Tar (n	ak get n)	Hasil I (r	Deteksi n)	Level Daya Hasil Deteksi (dB)		Sidelobe Level			
Ι	II	Ι	II	Ι	II	Ι	Π	( <b>dB</b> )			
00	180°	30	60	-	-	-	-	-			
20 <sup>o</sup>	160 <sup>o</sup>	30	60	31.5	60.3	0	-1.15	-63.3			
40 <sup>o</sup>	140 <sup>o</sup>	30	60	31.5	60.3	0	-2.53	-42			
60 <sup>o</sup>	120°	30	60	-	-	-	-	-			
80°	100°	30	60	31.5	60.3	0	-0.06	-114			
90°	90°	30	60	31.5	60.3	0	-0.25	-133			
120 <sup>o</sup>	70 <sup>o</sup>	30	60	-	60.3	-	0	-83			
150 <sup>o</sup>	50 <sup>o</sup>	30	60	31.5	60.3	-26	0	-50.81			
180°	70 <sup>o</sup>	30	60	-	60.3	-	0	-85			

**Tabel 4.1** Hasil Perbandingan Efek Arah Kedatangan Konvensional MIMO-OFDM Terhadap Deteksi Jarak dengan Kecepatan Target 1=20 m/s dan Target 2=35m/s

**Tabel 4.2** Hasil Perbandingan Efek Arah Kedatangan Konvensional MIMO-OFDM Terhadap Deteksi Kecepatan dengan Jarak Target 1=30 m dan Target 2=60m

Su Tai	dut rget	Kecej Tar (m	patan get /s)	Hasil I (m	Deteksi /s)	Level Daya Hasil Deteksi (dB)		Sidelobe Level
Ι	II	Ι	II	Ι	II	Ι	II	(dB)
00	180°	20	35	-	-	-	-	-
20 <sup>o</sup>	160 <sup>o</sup>	20	35	20.4	35.2	-0.85	0	-40.45
40 <sup>o</sup>	140 <sup>o</sup>	20	35	20.4	35.2	-0.85	0	-50.45
60°	120°	20	35	-	-	-	-	-
80°	100°	20	35	20.4	35.2	-0.03	0	-89
90°	90 <sup>o</sup>	20	35	20.4	35.2	0	-0.01	-137
120 <sup>o</sup>	70 <sup>o</sup>	20	35	-	35.2	-	0	-61
150 <sup>o</sup>	50 <sup>o</sup>	20	35	20.4	35.2	0	0	-4.6
180°	70 <sup>o</sup>	20	35	-	35.2	-	0	-51

**Tabel 4.3** Hasil Perbandingan Efek Arah Kedatangan Konvensional MIMO-OFDM Terhadap Deteksi Sudut dengan Kecepatan Target 1=20 m/s, Target 2=35m/s. dan Interferer = 40m/s

Sudut Target		Jarak Target		Hasil Deteksi (°)			Level Daya Hasil				
			( <b>m</b> )			Deteksi (dB)					
Ι	II	Int	Ι	II	Int	Ι	Π	Int	Ι	II	Int
00	18090	110 <sup>o</sup>	30	60	40	00	180%	110	-90	-95	0

20 <sup>o</sup>	160 <sup>o</sup>	110 <sup>o</sup>	30	60	40	20	160	110	-82	-83	0
40 <sup>o</sup>	140 <sup>o</sup>	110 <sup>o</sup>	30	60	40	40	140	110	-77	-79	0
60°	120 <sup>o</sup>	110 <sup>o</sup>	30	60	40	60	120	110	-72	-70	0
80°	100°	110°	30	60	40	80	100	110	-69	-70	0
90°	90°	110°	30	60	40	90	90	110	-68	-68	0
120°	70 <sup>o</sup>	110 <sup>o</sup>	30	60	40	120	70 <sup>0</sup>	110 <sup>o</sup>	-73	-66	0
150°	50°	1100	30	60	40	150	50°	110°	-72	-67	0
180°	70 <sup>o</sup>	110 <sup>o</sup>	30	60	40	180	70 <sup>0</sup>	110 <sup>o</sup>	-95	-74	0

# 4.2 Analisis Penggunaan Window Hamming

Seperti telah dijelaskan pada subab 2.7.2 bahwa penggunaan window hamming mampu menurunkan *sidelobe level* pada hasil deteksi jarak dan kecepatan namun harus mengorbankan resolusi radar, dimana resolusi dari jarak dan kecepatan akan menurun. Pada subab ini dianalisis efek penggunaan window hamming terhadap *sidelobe level* dan resolusi kecepatan dan jarak dari sistem radar konvensional OFDM. Dengan menempatkan dua target pada jarak 60m dengan kecepatan 25m/s pada sudut 80° dan 60m dengan kecepatan 35m/s pada sudut 100°, posisi interferer berada pada jarak 40m dengan kecepatan 40m/s pada sudut 120°.

	Level Sidelobe I	Level Sidelobe II	Resolusi I	Resolusi II
Model I	-53.89 dB	-151.2 dB	2 m/s	4 m/s
Model II	-52.7 dB	-137.4 dB	2 m/s	4 m/s
Model III	-52.76 dB	-137.6 dB	2 m/s	4 m/s
Model IV	-55.57 dB	-160.7 dB	-	4 m/s

<b>1 abel 4.4</b> Hasii Simulasi Level Sidelobe dan Kesolusi dari Deteksi Kecepa
--

Keterangan:

Model I	: Konvensional MIMO-OFDM
Model II	: MIMO-IOFDM Model Wiesbeck
Model III	: MIMO-IOFDM Model Yoke
Model IV	: MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak
Level Sidelobe I	: Level Sidelobe tertinggi tanpa window hamming
Level Sidelobe II	:Level Sidelobe tertinggi menggunakan window
	hamming
Resolusi I	: Resolusi Kecepatan tanpa Window Hamming
Resolusi II	: Resolusi Kecepatan menggunakan Window Hamming

Dari **Tabel 4.4** dapat diketahui bahwa penggunaan window hamming mampu menurunkan level sidelobe dari deteksi kecepatan tetapi terdapat *trade off* dengan resolusi kecepatan, dimana resolusi kecepatan menjadi lebih besar. Untuk model MIMO-IOFDM mengunakan *subcarrier* acak tanpa menggunakan Window Hamming, resolusi kecepatan tidak bisa diketahui karena hanya terdeteksi target pertama sedangkan target kedua tidak diketahui karena level *sidelobe* yang tinggi namun jika dilihat dari lebar mainlobe maka bernilai lebih besar hal ini juga menunjukkan bahwa nilai resolusi kecepatan juga semakin besar.

	Level Sidelobe I	Level Sidelobe II	Resolusi I	Resolusi II
Model I	-53.98 dB	-81.63 dB	5 m	7 m
Model II	-51.01 dB	-105.1 dB	3 m	5 m
Model III	-50.21 dB	-97.34 dB	3 m	5 m
Model IV	-42.27 dB	-52.58 dB	-	5 m
Keterangan:				
Model I	: Konven	sional MIMO-0	OFDM	
Model II	: MIMO-	IOFDM Model	Wiesbeck	
Model III	: MIMO-	IOFDM Model	Yoke	
Model IV	: MIMO-	IOFDM Mengg	gunakan <i>Subce</i>	arrier Acak
Level Sidelob	be I : Level S	idelobe tertingg	i tanpa windo	w hamming
Level Sidelob	e II :Level	Sidelobe tertir	nggi menggu	ınakan window
	hamming	g	00 00	
Resolusi I	: Resolus	i Kecepatan tan	pa Window H	lamming
Resolusi II	: Resolus	i Kecepatan me	nggunakan W	vindow
	Hammin	g		

**Tabel 4.5** Hasil Simulasi Level Sidelobe dan Resolusi dari Deteksi Jarak

Dari **Tabel 4.5** dapat diketahui bahwa penggunaan Window Hamming mampu menurunkan level sidelobe dari deteksi jarak tetapi terdapat *trade off* dengan resolusi jarak, dimana resolusi jarak menjadi lebih besar.

#### 4.3 Analisis Perbandingan MIMO dengan SISO

Radar dengan sistem MIMO memiliki beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan radar dengan sistem SISO diantaranya adalah, dengan menggunakan sistem MIMO mampu mendeteksi sudut

kedatangan dari target dan sistem MIMO memiliki sidelobe level yang lebih rendah. Untuk resolusi dan akurasi deteksi jarak antara sistem MIMO dengan SISO memliliki nilai yang sama karena resolusi dari deteksi jarak bergantung pada *bandwidth* yag digunakan oleh radar, untuk sistem MIMO dan SISO bandwidth mempunyai nilai yang sama sehingga nantinya akan menghasilkan nilai resolusi yang sama. Sedangkan untuk resolusi kecepatan dari radar bergantung pada penggunaan jumlah simbol OFDM yang digunakan, jika sistem MIMO dan SISO menggunakan jumlah simbol OFDM yang sama seharunsya miliki resolusi kecepatan yang sama. Sedangkan akurasi dari deteksi jarak dan kecepatan adalah bergantung pada nilai SIR (Signal to Interference Ratio) semakin kecil nilai interferer maka akurasi dari radar akan semakin baik. Radar dengan sistem MIMO memiliki nilai daya transmit per antena yang lebih rendah jika dibandingkan dengan sistem SISO, jika terdapat MIMO dengan ukuran 4x4 maka setiap antena memiliki daya transmit <sup>1</sup>/<sub>4</sub> dari daya transmit pada sistem SISO.

Dengan menggunakan skenario pengujian yang telah dibahas pada subab 3.8.1, maka akan dianalisis perbandingan sistem MIMO dengan SISO dilihat dari level daya terima dari deteksi jarak dan kecepatan, resolusi dan akurasi dari deteksi jarak dan kecepatan, serta perbandingan level *sidelobe level*. Untuk membandingkan secara *fair* antara sistem MIMO dengan SISO maka level daya setiap antena pengirim dari sistem MIMO akan dibuat <sup>1</sup>/<sub>4</sub> kali daya pancar yang dikirim oleh antena sistem SISO dan target diasumsikan pada sudut 90<sup>0</sup>.

Skei	nario	Н	Hasil Deteksi Jarak (m)				
Targe	et (m)					Resolusi Jarak	
т	п	Targ	et I	Target II		(m)	
1	п	MIMO	SISO	MIMO	SISO	MIMO	SISO
10	12	-	10.81	11.17	-		
10	13	9.907	10.81	14.41	-	2.1	15
10	14	11.71	10.81	14.41	-		
50	52	50.44	51.34	-	-		
50	53	50.44	-	54.94	52.24	2.4	15
50	54	52.24	5.44	54.04	53.14		
100	102	-	-	101.8	101.8		
100	103	99.97	100.9	104.5	102.7	2.4	15
100	104	101.8	-	104.5	103.6		

 Tabel 4.6 Hasil Deteksi dan Resolusi Jarak Sistem MIMO dan SISO

150	152	-	-	151.3	151.3		
150	153	150.4	154.9	154.9	152.2	2.3	15
150	154	152.2	-	154	153.1		
200	202	-	-	201.7	201.7		
200	203	119.9	201.7	204.4	-	2.3	15
200	204	201.7	-	204.4	202.6		

Tabel 4.7 Hasil Deteksi dan Akurasi Jarak Sistem MIMO dan SISO

Skei	nario	H	asil Detek	si Jarak (m	ı)	Alturnoi Datakai	
Targe	et (m)					(%)	
Т	п	Targ	et I	Target II		(70)	
1	11	MIMO	SISO	MIMO	SISO	MIMO	SISO
10	12	-	10.81	11.17	-	95.12	95.23
10	13	9.907	10.81	14.41	-	93.5	93
10	14	10.81	10.81	14.41	-	96.6	81.24
50	52	50.44	51.34	-	-	97.41	96.12
50	53	50.44	-	54.04	52.24	93	92.12
50	54	50.44	-	54.94	53.14	93.1	86.8
100	102	-	-	101.8	101.8	98.82	98.82
100	103	99.97	-	104.5	102.7	95.5	84.12
100	104	101.8	-	104.5	103.6	93.24	78.82
150	152	-	-	151.3	151.3	95.88	95.88
150	153	150.4	-	154	152.2	95.9	87.06
150	154	152.2	-	154.9	153.1	90.88	81.76
200	202	-	-	201.7	201.7	98.24	98.24
200	203	199.9	201.7	204.4	-	95.59	90
200	204	201.7	-	204.4	202.6	93.8	84.7
	ŀ	Rata-rata A	Akurasi F	Radar MIN	40		94.11
		Rata-rata	Akurasi	Radar SIS	0		85.94

Tabel 4.8 Hasil Deteksi dan Level Daya Sistem MIMO dan SISO

Sker	nario	Level Daya (dB)					
Target (m)					Level Sidelobe		
т	п	I	Ι		Ι	(dB)	
1 11		MIMO	SISO	MIMO	SISO	MIMO	SISO
10	12	-	0	0	-	-117	-11.9
10	13	-0.032	0	0	-	-133	-12.8
10	14	-0.11	0	-0.15	-	-135	-16.4

50	52	-	0.121	0	-	-133	-11.2
50	53	0	-	-0.497	0	-136	-11.9
50	54	0	-	-0.144	0	-137	-14.7
100	102	-	0	0	0	-138	-15.6
100	103	-0.381	-	0	0	-138	-12.6
100	104	0		-0.089	0	-130	-13.4
150	152	-	-	0	0	-137	-15.3
150	153	0	-	-0.586	0	-138	-15.7
150	154	-0.122	-	0	0	-137	-8.48
200	202	-	-	0	0	-139	-11.4
200	203	-0.457	0	0	-	-145	-11.4
200	204	0	-	-0.204	0	-143	-13.5

 Tabel 4.9 Hasil Deteksi dan Resolusi Kecepatan Sistem MIMO dan SISO
 OFDM

Skei	nario	Hasil	Deteksi l	Kecepatan	(m/s)		
Kece	patan					Reso	olusi
(m	n/s)					Kecepat	an (m/s)
Т	П	Targ	et I	Targ	get II		
1	п	MIMO	SISO	MIMO	SISO	MIMO	SISO
5	7	-	-	6.516	6.516		
5	8	5.647	5.647	8.253	8.253	2.9	2.9
5	9	5.213	5.213	9.556	9.556		
15	17	-	-	16.07	16.07		
15	18	15.2	15.2	18.24	18.24	2.9	2.9
15	19	15.2	15.2	19.11	19.11		
25	27	-	25.63	26.06	-		
25	28	25.19	25.19	28.23	28.23	2.9	2.9
25	29	25.19	25.19	29.1	29.1		
35	37	36.05	35.62	-	-		
35	38	35.18	35.15	38.23	38.23	2.9	2.9
35	39	35.18	35.18	39.09	39.09		
45	47	45.61	-	-	46.04		
45	48	45.18	45.18	47.78	47.78	2.9	2.9
45	49	45.18	45.18	49.08	49.08		

Skei	nario	Hasil	Deteksi l	Kecepatan	(m/s)		
Kece	patan			_		Akurasi	Deteksi
(m	/s)					Kecepa	tan (%)
т	п	Targ	et I	Targ	get II		
1	п	MIMO	SISO	MIMO	SISO	MIMO	SISO
5	7	-	-	6.516	6.516	97.12	97.15
5	8	5.647	5.647	8.253	8.253	97.35	97.65
5	9	5.213	5.213	9.556	9.556	97.74	97.74
15	17	-	-	16.07	16.07	94.53	94.53
15	18	15.2	15.2	18.24	18.24	98.71	98.71
15	19	15.2	15.2	19.11	19.11	99.09	99.09
25	27	-	25.63	26.06	-	94.47	91.94
25	28	25.19	25.19	28.23	28.23	98.77	98.77
25	29	25.19	25.19	29.1	29.1	99.15	99.15
35	37	36.05	35.62	-	-	94.41	96.35
35	38	35.18	35.15	38.23	38.23	98.8	98.77
35	39	35.18	35.18	39.09	39.09	99.21	99.18
45	47	45.61	-	-	46.04	96.41	94.35
45	48	45.18	45.18	47.78	98.82	98.82	
45	49	45.18	45.18	49.08	49.08	99.24	99.24
	Ι	Rata-rata A	Akurasi F	Radar MIN	ЛО		97.59
		Rata-rata	Akurasi	Radar SIS	0		97.43

 Tabel 4.10 Hasil Deteksi dan Akurasi Kecepatan Sistem MIMO dan SISO
 OFDM

Tabel 4.11 Hasil Deteksi dan Level Daya Sistem MIMO dan SISO

Sker Kece (m	nario patan √s)		Level D	aya (dB)		Level Sidelobe (dB)			
т	п		Ι	Ι	Ι				
1	11	MIMO	SISO	MIMO	SISO	MIMO	SISO		
5	7	-	-	0	0	-168	-41.4		
5	8	-0.22	0	0	0	-159	-41.4		
5	9	0	0	-0.119	-0.03	-162	-41.7		
15	17	-	-	0	0 0		-40.1		
15	18	-0.163	-0.163 -0.131		0	-155	-40.1		
15	19	0	0 0		-0.038	-155	-40.1		
25	27	-	0	0	-	-153	-40.1		
25	28	0 0		-0.098	-0.023	-149	-40		

25	29	0	0	-0.027	-0.017	-145	-35
35	37	0	0	-	-	-148	-35.2
35	38	0	0	-0.383	-0.084	-142	-34.3
35	39	0	-0.004	-0.026	0	-141	-34
45	47	0	-	-	0	-144	-35
45	48	0/0	0	-0.106	-0.01	-135	-33
45	49	-0.029	0	0	0	-130	-32

Dari Tabel 4.6 dan Tabel 4.9 dapat diketahui dimana resolusi jarak dari radar jenis MIMO-OFDM konvensional sekitar 2.3 m dan resolusi kecepatan 2.8 m/s, hasil ini melebihi nilai resolusi dari hasil perhitungan matematis vaitu 1.61 m dan 1.9 m/s, hal ini dikarenakan nilai interferer yang cukup besar dan efek dari penggunaan Window Hamming. Sedangkan kesalahan deteksi masih memenuhi nilai dari resolusi jarak dan kecepatan sehingga belum dikatakan sebagai kesalahan radar dalam mendeteksi target. Perbandingan resolusi jarak dan kecepatan antara sistem MIMO dengan SISO bernilai hampir sama namun sistem MIMO memiliki perbedaan level antar mainlobe yang lebih baik. Untuk level daya antara MIMO dan SISO berbeda cukup besar yakni empat kali lipat, hal ini terjadi karena dengan sistem MIMO, sinyal yang diterima akan berjumlah lebih banyak jika dibandingkan sistem SISO. Sedangkan akurasi deteksi jarak dan kecepatan dari radar MIMO dan SISO bisa dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 10, dimana dari tabel tersebut bisa dilihat rata-rata akurasi kecepatan radar MIMO adalah 97.59% sedangkan ratarata akurasi kecepatan radar SISO adalah 97.43%. Untuk rata-rata akurasi jarak radar MIMO adalah 94.11% dan 85.94%, dari hasil tersebut bisa dilihat bahwa akurasi kecepatan dan jarak radar MIMO adalah lebih baik dibandingkan dengan radar SISO.

#### 4.4. Analisis Radar MIMO-OFDM Konvensional

Setelah mengetahui bahwa sistem MIMO lebih unggul dari sistem SISO, maka pada subab ini dianalisis sistem MIMO-OFDM Konvensional dari segi resolusi dan akurasi jarak, kecepatan, dan sudut, serta level *sidelobe* hasil deteksi.

## 4.4.1 Analisis Resolusi dan Akurasi Jarak pada Radar MIMO-OFDM Konvensional

Parameter resolusi jarak didapatkan dari jarak terdekat antara dua target dimana radar masih bisa membedakan kedua target tersebut.

Sedangkan akurasi dari deteksi jarak adalah selisih antara jarak sebenarnya dengan jarak yang terdeteksi pada sistem radar. Hasil resolusi dan deteksi jarak ditampilkan pada **Tabel 4.12**.

$\theta_1$	$\theta_2$	$V_1$	$V_2$	$R_1$	$R_2$	$R_1'$	$R_2'$	Res
		(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
90°	90°	20	35	10	12	11	.7	
90 <sup>o</sup>	90°	20	35	10	13	9.907	14.41	2.1
90°	90°	20	35	10	14	11.71	14.41	
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	50	52	51	.34	
90°	90°	20	35	50	53	50.44	54.94	2.4
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	50	54	52.24	54.04	
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	100	102	10	1.8	
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	100	103	99.97	104.5	2.4
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	100	104	101.8	104.5	
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	150	152	15	1.3	
90°	90°	20	35	150	153	150.4	154.9	2.3
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	150	154	152.2	154	
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	200	202	20	1.7	
90°	90°	20	35	200	203	119.9	204.4	2.3
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	200	204	201.7	204.4	
		Rata	-rata Res	olusi Jar	ak (m)			2.3
		Rata	a-rata <i>err</i>	or detek	csi (m)			0.93
		Rata-	rata Aku	rasi dete	ksi (%)			94.53

 Tabel 4.12 Hasil Resolusi dan Akurasi Jarak MIMO-OFDM Konvensional

 Tabel 4.13 Hasil Resolusi dan Akurasi kecepatan MIMO-OFDM Konvensional

$\theta_1$	$\theta_2$	$V_1$	$V_2$	$R_1$	$R_2$	$V_1'$	$V_2'$	Res
		(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
90°	90°	5	7	30	60	6.5	516	
90°	90°	5	8	30	60	5.647	8.253	2.9
90°	90°	5	9	30	60	5.213	9.556	
90°	90°	15	17	30	60	16	.07	
90 <sup>o</sup>	90°	15	18	30	60	15.2	18.24	2.9
90°	90°	15	19	30	60	15.2	19.11	
90°	90°	25	27	30	60	26	.06	
90 <sup>o</sup>	90°	25	28	30	60	25.19	28.23	2.9

90°	90 <sup>o</sup>	25	29	30	60	25.19	29.1	
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	35	37	30	60	36	.05	
90°	90 <sup>0</sup>	35	38	30	60	35.18	38.23	2.9
90°	90 <sup>0</sup>	35	39	30	60	35.18	39.09	
90°	90 <sup>o</sup>	45	47	30	60	45	.61	
90°	90 <sup>0</sup>	45	48	30	60	45.18	47.78	2.9
90°	90 <sup>0</sup>	45	49	30	60	45.18	49.08	
		Rata-rata	a Resolus	i Kecep	atan (m	/s)		2.9
		Rata-	-rata <i>erro</i>	r deteks	i (m/s)			0.22
		Rat	a-rata Ak	curasi de	eteksi			98.71

Tabel 4.14 Hasil Resolusi dan Akurasi Sudut MIMO-OFDM Konvensional

$\theta_1$	$\theta_2$	$V_1$	$V_2$	$R_1$	$R_2$	$\theta_1'$	$\theta_2'$	Res
		(m/s)	(m/s)	(m)	(m)			
10 <sup>0</sup>	11°	20	35	30	60	11	1 <i>°</i>	
10 <sup>o</sup>	12 <sup>0</sup>	20	35	30	60	10 <sup>0</sup>	12 <sup>0</sup>	2 <sup>0</sup>
10 <sup>o</sup>	13°	20	35	30	60	10 <sup>0</sup>	13°	
40 <sup>o</sup>	41 <sup>0</sup>	20	35	30	60	42	1 <i>°</i>	
40 <sup>o</sup>	42 <sup>o</sup>	20	35	30	60	40 <sup>o</sup>	42 <sup>o</sup>	2 <sup>0</sup>
40 <sup>o</sup>	43 <sup>o</sup>	20	35	30	60	40 <sup>o</sup>	43 <sup>o</sup>	
90°	91°	20	35	30	60	91	1 <i>°</i>	
90°	92°	20	35	30	60	90°	92°	2 <i>°</i>
90°	93°	20	35	30	60	90 <sup>o</sup>	93°	
120°	121°	20	35	30	60	12	1º	
120 <sup>o</sup>	122°	20	35	30	60	120 <sup>o</sup>	122°	2 <sup>0</sup>
120 <sup>o</sup>	123°	20	35	30	60	120 <sup>o</sup>	123°	
160°	161°	20	35	30	60	16	00	
160°	162°	20	35	30	60	160°	162°	2 <sup>0</sup>
160°	163°	20	35	30	60	160°	163°	
		Rata	rata Res	olusi S	udut			20
		Rata	a-rata <i>eri</i>	ror dete	ksi			00
		Rata-	rata Aku	ırasi det	eksi			100%

# 4.4.1.1 Analisis Resolusi Jarak, Kecepatan, dan Sudut Kedatangan Radar MIMO-OFDM Konvensional

Dari **Tabel 4.12** dapat dilihat bahwa resolusi dari jarak adalah 2.3m nilai ini bergeser dari nilai resolusi jarak hasil perhitungan matematis

yaitu senilai 1.6m, sehingga terjadi *error* resolusi jarak sebesar 0.5m. Hal ini dikarenakan nilai interferensi yang tinggi sehingga terjadi *error* pada resolusi jarak.

Resolusi kecepatan dari MIMO-OFDM konvensional dapat dilihat pada **Tabel 4.13** yaitu senilai 2.9m/s nilai ini bergeser dari nilai resolusi kecepatan hasil perhitungan matematis yaitu senilai 1.97m/s, sehingga terjadi *error* resolusi jarak sebesar 0.93m/s. Hal ini dikarenakan nilai interferensi yang tinggi dan efek dari penggunaan Window Hamming sehingga terjadi *error* pada resolusi kecepatan.

Sedangkan resolusi sudut dari MIMO-OFDM konvensional dapat dilihat pada **Tabel 4.14** yaitu senilai 2<sup>o</sup> nilai ini bergeser dari nilai resolusi kecepatan hasil perhitungan matematis yaitu senilai 0.05<sup>o</sup>, sehingga terjadi *error* resolusi jarak sebesar 1.95<sup>o</sup>. Hal merupakan kelemahan dari algoritma MUSIC yang mempunyai nilai *error* tinggi.

### 4.4.1.2 Analisis Akurasi Jarak, Kecepatan, dan Sudut Radar MIMO-OFDM Konvensional

Akurasi deteksi jarak, kecepatan, dan sudut dihitung menggunakan rumus RMS E seperti pada Subab 2.8.2 selain itu untuk melihat seberapa akurat radar dalam mendeteksi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan bisa dilakukan dengan menghitung selisih nilai jarak, kecepatan, dan sudut yang sebenarnya setelah itu dihitung selisih dengan hasil deteksinya, jika nilai selisihnya masih lebih kecil dibanding resolusinya maka radar bisa dikatakan akurat. Dari Tabel 4.12 dapat diketahui error rata-rata dari deteksi jarak adalah 0.93m nilai ini masih lebih kecil dari resolusi hasil deteksi dan resolusi hasil perhitungan, sehingga selisih deteksi antara jarak nyata dengan jarak hasil deteksi masih masuk dalam batas toleransi sehingga belum bisa dikatakan sebagai kesalahan deteksi sedangkan prosentasi rata-rata akurasi deteksi jarak adalah 94.5% ditunjukkan pada Tabel 4.12. Begitu pula untuk deteksi kecepatan dimana selisih deteksi antara kecepatan sebenarnya dengan kecepatan hasil deteksi adalah 0.22m/s, kurang dari resolusi hasil perhitungan yaitu 1.97m/s dan resolusi hasil deteksi yaitu 2.9 m/s sehingga belum bisa diakatakan sebagai kesalahan deteksi sedangkan prosentasi rata-rata akurasi deteksi kecepatan adalah 98.71%, ditunjukkan pada Tabel 4.13 Untuk deteksi sudut kedatangan (DoA) memiliki error 0% sehingga prosentasi rata-rata akurasi deteksi sudut adalah 100% seperti yang ditunjukkan pada Tabel **4.14**, hal ini dikarenakan penggunaan *virtual antenna* yang mampu meningkatkan akurasi deteksi sudut kedatangan (DoA).

## 4.4.2 Analisis Deteksi Maksimum dan Minimum Radar MIMO-OFDM Konvensional

Salah satu parameter yang penting dalam mendesain radar adalah nilai maksimum dan minimum deteksi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan dari radar tersebut dimana nilai ini bisa dihitung dengan menempatkan target pada jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan semaksimum dan seminimum mungkin selama radar masih bisa membedakan nilai jarak. kecepatan, dan sudut kedatangan tersebut, nilai maksimum dan minimum ini seharusnya memiliki hasil yang mirip dengan nilai resolusi jarak, kecepatan dan sudut kedatangan idealnya nilai maksimum hasil deteksi adalah nilai maksumum hasil perhitungan dikurangi dengan nilai resolusi baik dari jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan begitu pula dengan nilai minumumnya, dari Tabel 4.15 dapat diketahui jarak deteksi minimum dan maksimum adalah 0.9007m dan 206.3m, nilai ini sesuai dengan teori karena selisih deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum matematis adalah kurang dari resolusi jarak. Kecepatan maksimum dan minimum adalah 0.4344 m/s dan 54.73 m/s nilai ini sesuai dengan teori karena selisih hasil deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum matematis adalah kurang dari resolusi kecepatan. Sedangkan untuk sudut maksimum dan minimum deteksi sudut adalah  $0^{\circ}$  dan  $180^{\circ}$ , nilai ini sesuai dengan teori karena selisih hasil deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum matematis adalah kurang dari resolusi sudut.

## 4.4.3 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Jarak Sama Radar MIMO-OFDM Konvensional

Dari **Tabel 4.15** ditunjukkan deteksi dua target dengan jarak yang sama yaitu 30m, dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa radar tidak mampu mendeteksi keberadaan dua target saat deteksi jarak, hal ini dikarenakan resolusi jarak adalah 2.3 m sehingga radar tidak mampu mendeteksi jarak tersebut. Sedangakan deteksi sudut dan kecepatan tidak terlalu terpengaruh oleh jarak dari target. Jika target berada pada sudut 90° dan 90° maka radar mampu mendeteksi kecepatan kedua target karena sudut 90° dalah *mainlobe* dari *array factor* sedangkan saat target berada pada sudut 90° dan 60° maka radar tidak mampu mendeteksi target karena berada pada *null-null* dari *array factor*, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.1** dan **Gambar 4.2** dengan menggunakan plot ambiguitas dapat dibedakan meskipun berada pada jarak yang sama karena masih terdapat kecepatan yang berbeda.

006	006	ە06	ە06	ە06	ە06	006	006	006	006	ە06	006	006	006	006	006	006	06	006	006	006		$\theta^{1}$
180°	150°	120°	ە06	60 <i>°</i>	30°	00	180°	150°	120°	°06	60 <i>°</i>	30°	00	ە06	000	006	006	000	006	ە06		$\theta_2$
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	(B)	$R_1$
206	175	140	105	70	35	0	30	30	30	30	30	30	30	206	175	140	105	70	35	0	(B)	$R_2$
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	(m/s)	$V_1$
20	20	20	20	20	20	20	55	45	36	27	18	9	0	55	45	36	27	18	9	0	(m/s)	$V_2$
006	006	٥06	٥06	006	٥06	٥06	006	006	٥06	006	006	٥06	٥06	9	9	9	6	9	9	9		$\theta_1$
180°	150°	120°	°06	60°	300	00	180°	150°	120°	<i>o</i> 06	60 <i>°</i>	300	00	00	00	00	00	00	00	00		$\theta_{2}'$
31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31	31	31	3	31	31	31	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	(B)	$R_1'$
			104.5				1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	206.3	176.5	141.4	105.4	70.25	36.03	0.9007	(B)	$R_2'$
20	20	20	20	20	20	20	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	19	20.42	20.42	(m/s)	$V_1'$
).42	).42	).42	).42	).42	).42	).42	'	,	'	27.37	,	'	,	54.73	45.18	36.05	27.37	).11	9.556	0.4344	(m/s)	$V_2'$

т
a
ĕ
-
+
5
1
e,
ğ
Ê
Ы
æ
Ē.
8
2
5
н
R
αġ
8
$\geq$
$\leq$
0
5
H
Ĥ
ž
$\Sigma$
B
_
$\leq$
ven
vensi
vension
vensiona



Gambar 4.1 Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan 90° dan 90°, Kecepatan 20m/s dan 27 m/s



Gambar 4.2 Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan 90° dan 60°, Kecepatan 20m/s dan 27 m/s

### 4.4.4 Analisis Skenario Dua Target dengan Kecepatan yang Sama Radar MIMO-OFDM Konvensional

Dari **Tabel 4.15** ditunjukkan deteksi dua target dengan kecepatan yang sama yaitu 20m/s, dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa radar tidak mampu mendeteksi keberadaan dua target saat deteksi kecepatan, hal ini dikarenakan resolusi kecepatan adalah 2.9 m/s sehingga radar tidak mampu mendeteksi kecepatan tersebut. Sedangakan deteksi sudut dan jarak tidak terlalu terpengaruh oleh jarak dari target. Jika target berada pada sudut 90° dan 90° maka radar mampu mendeteksi kedua target karena sudut 90° adalah mainlobe dari array factor sedangkan saat target berada pada sudut 90° dan 60° maka radar tidak mampu mendeteksi target karena berada pada null-null dari arrav factor hal ini merupakan kelemahan dari sistem yang dibuat dimana pada sistem ini hanya menggunakan single beam sehinga tidak semua sudut bisa tercover oleh beam dari antena tersebut, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4, dengan menggunakan plot ambiguitas dapat dibedakan meskipun berada pada kecepatan yang sama karena masih terdapat jarak vang berbeda.



Gambar 4.3 Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan Sama 90° dan Kecepatan Sama 20m/s



Gambar 4.4 Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan Target berada pada Jarak 30m dan 70m, Sudut Kedatangan 90° dan 60° dan Kecepatan Sama 20m/s

## 4.4.5 Analisis Skenario Dua Target dengan Sudut Kedatangan yang Sama Radar MIMO-OFDM Konvensional

Sudut kedatangan dari target sangat berdampak pada hasil deteksi kecepatan dan jarak, karena dari arah kedatangan yang berasal dari sudut 90° maka nilai level daya deteksi kecepatan dan jarak bernilai maksimal sehingga radar mampu mendeteksi jarak dan kecepatan target keadaan ini juga berlaku pada deteksi sudut kedatangan target dimana saat target berada di sudut 90° maka akan memiliki nilai level yang paling tinggi hal ini diakarenakan karakteristik antena yang bersifat *broadside* maka saat target berada pada *sidelobe* dari antena maka nilai levelnya lebih rendah jika dibandingkan saat target berada pada sudut *broadside* (90°). Selain itu saat sudut kedatangan target berada pada *null-null* dari *array factor* maka radar tidak mampu mendeteksi informasi dari target karena level dayanya sangat rendah sehingga radar tidak mampu mendeteksi informasi dari target tersebut baik tentang informasi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan dari target, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.5** dan **Gambar 4.6**.



Gambar 4.5 Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan Sama 90°, Kecepatan 20m/s dan 27m/s



Gambar 4.6 Plot Ambiguitas MIMO OFDM Konvensional dengan Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan Sama 60°, Kecepatan 20m/s dan 27m/s
#### 4.5. Analisis Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

Setelah mengetahui bahwa sistem MIMO lebih unggul dari sistem SISO, maka pada subab ini dianalisis sistem MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dari segi resolusi dan akurasi jarak, kecepatan, dan sudut, serta level *sidelobe* hasil deteksi.

# 4.5.1 Analisis Resolusi dan Akurasi Jarak pada Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

Parameter resolusi jarak didapatkan dari jarak terdekat antara dua target dimana radar masih bisa membedakan kedua target tersebut. Sedangkan akurasi dari deteksi jarak adalah selisih antara jarak sebenarnya dengan jarak yang terdeteksi pada sistem radar. Hasil resolusi dan deteksi jarak ditampilkan pada **Tabel 4.16**.

$\theta_1$	$\theta_2$	$V_1$	$V_2$	$R_1$	$R_2$	$R_1'$	$R_2'$	Res					
		(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)					
90°	90°	20	35	10	12	11	.7						
90°	90°	20	35	10	13	10.81	13.51	2.1					
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	10	14	10.81	15.31						
90°	90°	20	35	50	52	51	.34						
90°	90°	20	35	50	53	50.44	54.04	2.4					
90°	90°	20	35	50	54	50.44	55.84						
90° 90° 20 35 100 102 101.8													
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20 35 100 103 100.9 103.6						2.4					
90°	90°	20	35	100	104	100.9	105.4						
90°	90° 90° 20 35 150 152 151.3												
90°	90°	20	35	150	153	150.4	154	2.3					
90°	90°	20	35	150	154	150.4	156						
90°	90°	20	35	200	202	20	1.7						
90 <sup>o</sup>	90° 90° 20 35 200 203 200.8 203.5												
90 <sup>o</sup>	90° 90° 20 35 200 204 200.8 205.3												
Rata-rata Resolusi Jarak (m)													
Rata-rata error deteksi (m)													
Rata-rata Akurasi deteksi (%)													

Tabel 4.16 Hasil Resolusi dan Akurasi Jarak MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

$\theta_1$	$\theta_2$	$V_1$	$V_2$	$R_1$	$R_2$	$V_1'$	$V_2'$	Res					
-	-	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)					
90 <sup>o</sup>	90°	5	7	30	60	6.5	516						
90 <sup>o</sup>	90°	5	8	30	60	5.213	8.253	2.8					
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	5	9	30	60	5.213	9.556						
90 <sup>o</sup>	90°	15	17	30	60	16	.07						
90 <sup>o</sup>	90°	15	18	30	60	15.2	18.24	2.8					
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	15	19	30	60	15.2	19.11						
90 <sup>o</sup>	90°         90°         25         27         30         60         26.06												
90°         90°         25         28         30         60         25.19         28.23													
90° 90° 25 29 30 60 25.19 29.1													
90° 90° 35 37 30 60 36.05													
90° 90° 35 38 30 60 35.15 38.23													
90° 90° 35 39 30 60 35.18 39.09													
90 <sup>o</sup>	90° 90° 45 47 30 60 45.61												
90 <sup>o</sup>	90° 90° 45 48 30 60 45.18 47.78												
90° 90° 45 49 30 60 45.18 49.08													
Rata-rata Resolusi Kecepatan (m/s)													
Rata-rata error deteksi (m/s)													
		Rata-	rata Aku	rasi dete	ksi (%)			98.82					

 Tabel 4.17 Hasil Resolusi dan Akurasi kecepatan MIMO-IOFDM Model

 Wiesbeck

Tabel 4.18 Hasil Resolusi dan Akurasi Sudut MIMO-IOFDM Model Wiesbe	eck
---	-----

$\theta_1$	$\theta_2$	$V_1$	$V_2$	$R_1$	$R_2$	$\theta_1'$	$\theta_2'$	Res
		(m/s)	(m/s)	(m)	(m)			
10 <sup>0</sup>	11°	20	35	30	60	1	1 <sup>0</sup>	
10 <sup>0</sup>	12 <sup>0</sup>	20	35	30	60	10 <sup>0</sup>	12 <sup>0</sup>	2 <i>°</i>
10 <sup>0</sup>	13°	20	35	30	60	10 <sup>o</sup>	13°	
40 <sup>o</sup>	41 <sup>0</sup>	20	35	30	60	4	1 <i>°</i>	
40 <sup>o</sup>	42 <sup>o</sup>	20	35	30	60	40 <sup>o</sup>	42 <sup>o</sup>	2°
40 <sup>o</sup>	43 <sup>o</sup>	20	35	30	60	40 <sup>o</sup>	43 <sup>o</sup>	
90 <sup>o</sup>	91°	20	35	30	60	9	$1^o$	
90°	92°	20	35	30	60	90°	92°	2 <sup>0</sup>
90 <sup>o</sup>	93°	20	35	30	60	90 <sup>o</sup>	93°	
120°	121 <sup>o</sup>	20	35	30	60	12	1 <sup>0</sup>	
120°	122°	20	35	30	60	120°	122°	2 <i>°</i>

120 <sup>o</sup>	123°	20	35	30	60	120 <sup>o</sup>	123°				
160°	161°	20	35	30	60	16	0 <sup>0</sup>				
160°	162°	20	35	30	60	160°	162°	2 <sup>0</sup>			
$160^{\circ}  163^{\circ}  20  35  30  60  160^{\circ}  163^{\circ}$											
Rata-rata Resolusi Kecepatan											
Rata-rata error deteksi											
Rata-rata Akurasi deteksi											

### 4.5.1.1 Analisis Resolusi Jarak, Kecepatan, dan Sudut Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

Dari **Tabel 4.16** dapat dilihat bahwa resolusi dari jarak adalah 2.3m nilai ini bergeser dari nilai resolusi jarak hasil perhitungan matematis yaitu senilai 1.6m, sehingga terjadi *error* resolusi jarak sebesar 0.5m. Hal ini dikarenakan nilai interferensi yang tinggi dan efek dari penggunaan Window Hamming sehingga terjadi *error* pada resolusi jarak.

Resolusi kecepatan dari MIMO-IOFDM model Wiesbeck dapat dilihat pada **Tabel 4.17** yaitu senilai 2.8m/s nilai ini bergeser dari nilai resolusi kecepatan hasil perhitungan matematis yaitu senilai 1.97m/s, sehingga terjadi *error* resolusi jarak sebesar 0.83m/s. Hal ini dikarenakan nilai interferensi yang tinggi sehingga terjadi *error* pada resolusi kecepatan.

Sedangkan resolusi sudut dari MIMO-IOFDM model Wiesbeck dapat dilihat pada **Tabel 4.18** yaitu senilai 2<sup>o</sup> nilai ini bergeser dari nilai resolusi kecepatan hasil perhitungan matematis yaitu senilai 0.05<sup>o</sup>, sehingga terjadi *error* resolusi jarak sebesar 1.95<sup>o</sup>. Hal merupakan kelemahan dari algoritma MUSIC yang mempunyai nilai *error* tinggi.

# 4.5.1.2 Analisis Akurasi Jarak, Kecepatan, dan Sudut Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

Akurasi deteksi jarak, kecepatan, dan sudut dihitung dari jarak terdekat yang mampu dideteksi oleh sistem radar. Dari **Tabel 4.16** dapat diketahui *error* rata-rata dari deteksi jarak adalah 0.91m nilai ini masih lebih kecil dari resolusi hasil deteksi dan resolusi hasil perhitungan, sehingga selisih deteksi antara jarak nyata dengan jarak hasil deteksi masih masuk dalam batas toleransi sehingga belum bisa dikatakan sebagai kesalahan deteksi, prosentase rata-rata akurasi deteksi jarak adalah 94.65%. Begitu pula untuk deteksi antara kecepatan sebenarnya dengan

kecepatan hasil deteksi adalah 0.22m/s, kurang dari resolusi hasil perhitungan yaitu 1.97m/s dan resolusi hasil deteksi yaitu 2.8 m/s sehingga belum bisa diakatakan sebagai kesalahan deteksi sedangkan prosentase rata-rata akurasi deteksi kecepatan adalah 98.82%. Untuk deteksi sudut kedatangan (DoA) memiliko *error* 0% sehingga prosentase rata-rata akurasi deteksi sudut adalah 100%, hal ini dikarenakan penggunaan *virtual antenna* yang mampu meningkatkan akurasi deteksi sudut kedatangan (DoA).

#### 4.5.2 Analisis Deteksi Maksimum dan Minimum Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

Salah satu parameter yang penting dalam mendesain radar adalah jarak maksimum dan minimum dari radar tersebut, dari **Tabel 4.17** dapat diketahui jarak deteksi minimum dan maksimum adalah 0.9007m dan 206.3m, nilai ini sesuai dengan teori karena selisih deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum matematis adalah kurang dari resolusi jarak. Kecepatan maksimum dan minimum adalah 0.4344 m/s dan 54.73 m/s nilai ini sesuai dengan teori karena selisih hasil deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum adalah 0.4344 m/s dan 54.73 m/s nilai ini sesuai dengan teori karena selisih hasil deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum matematis adalah kurang dari resolusi kecepatan. Sedangkan untuk sudut maksimum dan minimum deteksi sudut adalah 0° dan 180°, nilai ini sesuai dengan teori karena selisih hasil deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum matematis adalah kurang dari resolusi sudut.

# 4.5.3 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Jarak Sama Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

Dari **Tabel 4.17** ditunjukkan deteksi dua target dengan jarak yang sama yaitu 30m, dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa radar tidak mampu mendeteksi keberadaan dua target saat deteksi jarak, hal ini dikarenakan resolusi jarak adalah 2.3 m sehingga radar tidak mampu mendeteksi jarak tersebut. Sedangakan deteksi sudut dan kecepatan tidak terlalu terpengaruh oleh jarak dari target. Jika target berada pada sudut 90° dan 90° maka radar mampu mendeteksi kecepatan kedua target karena sudut 90° dalah *mainlobe* dari *array factor* sedangkan saat target berada pada sudut 90° dan 60° maka radar tidak mampu mendeteksi target karena berada pada *null-null* dari *array factor*, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.7** dan **Gambar 4.8** dengan menggunakan plot ambiguitas dapat dibedakan meskipun berada pada jarak yang sama karena masih terdapat kecepatan yang berbeda.



Gambar 4.7 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan 90° dan 90°, Kecepatan 20m/s dan 27 m/s



Gambar 4.8 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan 90° dan 60°, Kecepatan 20m/s dan 27 m/s

_		-		-	-	_			_		_						_		_		-		
°06	<sub>0</sub> 06	$_{o}06$	<sub>0</sub> 06	<sub>0</sub> 06	<sub>0</sub> 06	<sub>0</sub> 06	$_{o}06$	<sub>0</sub> 06	<sub>0</sub> 06	<sub>0</sub> 06		θ											
$180^{o}$	$150^{o}$	$120^{o}$	006	60 <i>°</i>	300	00	$180^{o}$	$150^{o}$	$120^{o}$	006	60°	300	00	006	006	006	006	006	006	006		$\theta_2$	
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	(H	R	
206	175	140	105	70	35	0	30	30	30	30	30	30	30	206	175	140	105	70	35	0	(m)	$R_2$	
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	(m/s)	$V_1$	c
20	20	20	20	20	20	20	55	45	36	27	18	9	0	55	45	36	27	18	9	0	(m/s)	$V_2$	
°06	°06	°06	°06	°06	°06	<sub>0</sub> 06	°06	°06	<sub>0</sub> 06	°06	°06	°06	°06	9	9	9	6	9	9	9		θ,	
$180^{0}$	$150^{0}$	$120^{0}$	°06	60 <i>°</i>	300	00	$180^{0}$	$150^{0}$	$120^{0}$	°06	60 <i>°</i>	300	00	00	00	00	00	00	00	00		$\theta_2'$	
31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31	3	31	31	3	31	31	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	(H	R1 (	
			104.5				52	52	.52	52	.52	.52	.52	206.3	176.5	141.4	105.4	70.25	36.03	0.9007	(H)	$R_2^{\prime}$	
2	2	2	2	2	2	2	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	1	20.42	20.42	(m/s)	$V_1^{\prime}$	
0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42				27.37				54.73	45.18	36.05	27.37	9.11	9.556	0.4344	(m/s)	$V_2'$	

Tabel 4.19 Tabel Deteksi Dua Target MIMO-IOFDM Wiesbeck

#### 4.5.4 Analisis Skenario Dua Target dengan Kecepatan yang Sama Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

Dari Tabel 4.19 ditunjukkan deteksi dua target dengan kecepatan yang sama yaitu 20m/s, dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa radar tidak mampu mendeteksi keberadaan dua target saat deteksi kecepatan. hal ini dikarenakan resolusi kecepatan adalah 2.8 m/s sehingga radar tidak mampu mendeteksi kecepatan tersebut. Sedangakan deteksi sudut dan jarak tidak terlalu terpengaruh oleh jarak dari target. Jika target berada pada sudut 90° dan 90° maka radar mampu mendeteksi kedua target karena sudut 90° adalah mainlobe dari array factor sedangkan saat target berada pada sudut 90° dan 60° maka radar tidak mampu mendeteksi target karena berada pada null-null dari array factor hal ini merupakan kelemahan dari sistem yang dibuat dimana pada sistem ini hanya menggunakan single beam sehinga tidak semua sudut bisa tercover oleh beam dari antena tersebut, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10, dengan menggunakan plot ambiguitas dapat dibedakan meskipun berada pada kecepatan yang sama karena masih terdapat jarak vang berbeda.



Gambar 4.9 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan 90° dan 90°, Kecepatan Sama 20m/s



Gambar 4.10 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan 90° dan 60°, Kecepatan Sama 20m/s

## 4.5.5 Analisis Skenario Dua Target dengan Sudut Kedatangan yang Sama Radar MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

Sudut kedatangan dari target sangat mempengaruhi terhadap hasil deteksi kecepatan dan jarak, karena dari arah kedatangan yang berasal dari sudut 90° maka nilai level daya deteksi kecepatan dan jarak bernilai maksimal sehingga radar mampu mendeteksi jarak dan kecepatan target keadaan ini juga berlaku pada deteksi sudut kedatangan target dimana saat target berada di sudut 90° maka akan memiliki nilai level yang paling tinggi hal ini diakarenakan karakteristik antena yang bersifat *broadside* maka saat target berada pada *sidelobe* dari antena maka nilai levelnya lebih rendah jika dibandingkan saat target berada pada sudut *broadside* (90°). Selain itu saat sudut kedatangan target berada pada *null-null* dari *array factor* maka radar tidak mampu mendeteksi informasi dari target karena level dayanya sangat rendah sehingga radar tidak mampu mendeteksi informasi dari target tersebut baik tentang informasi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan dari target, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.11** dan **Gambar 4.12**.



Gambar 4.11 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan Sama 90°, Kecepatan 20m/s dan 30m/s



Gambar 4.12 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan Sama 30°, Kecepatan 20m/s dan 30m/s

### 4.6. Analisis Radar MIMO-IOFDM Model Yoke

Setelah mengetahui bahwa sistem MIMO lebih unggul dari sistem SISO, maka pada subab ini dianalisis sistem MIMO-IOFDM Model Yoke dari segi resolusi dan akurasi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan dari target, serta level *sidelobe* hasil deteksi jarak dan kecepatan.

# 4.6.1 Analisis Resolusi dan Akurasi Jarak pada MIMO-IOFDM Model Yoke

Parameter resolusi jarak didapatkan dari jarak terdekat antara dua target dimana radar masih bisa membedakan kedua target tersebut. Sedangkan akurasi dari deteksi jarak adalah selisih antara jarak sebenarnya dengan jarak yang terdeteksi pada sistem radar. Hasil resolusi dan deteksi jarak ditampilkan pada **Tabel 4.20**.

$\theta_1$	$\theta_2$	$V_1$	$V_2$	<i>R</i> <sub>1</sub>	$R_2$	$R_1'$	$R_2'$	Res					
		(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)					
90°	90°	20	35	10	12	11	.7						
90 <sup>o</sup>	90°	20	35	10	13	10.81	13.51	2.1					
90°	90°	20	35	10	14	10.81	15.31						
90°	90°	20	35	50	52	51	.34						
90 <sup>o</sup>	90°	20	35	50	53	50.44	54.04	2.4					
90°	90°	20	35	50	54	50.44	55.84						
90° 90° 20 35 100 102 101.8													
90 <sup>o</sup>	90 <sup>0</sup>	20	35	100	103	100.9	103.6	2.4					
90 <sup>o</sup>	90°	20	35	100	104	100.9	105.4						
90°	90° 90° 20 35 150 152 151.3												
90°	90° 90° 20 35 150 153 150.4 154												
90° 90° 20 35 150 154 150.4 155.8													
90°	90°	20	35	200	202	20	1.7						
90°	90°	20	35	200	203	200.8	203.5	2.3					
90°	90°	20	35	200	204	200.8	205.3						
Rata-rata Resolusi Jarak (m)													
Rata-rata error deteksi (m)													
		Rata-	rata Aku	rasi dete	ksi (%)			94.65					

Tabel 4.20 Hasil Resolusi dan Akurasi Jarak MIMO-IOFDM Model Yoke

$\theta_1$	$\theta_2$	$V_1$	$V_2$	$R_1$	$R_2$	$V_1'$	$V_2'$	Res					
		(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)					
90 <sup>0</sup>	90 <sup>0</sup>	5	7	30	60	6.5	516						
90 <sup>o</sup>	90°	5	8	30	60	5.213	8.253	2.9					
90°	90°	5	9	30	60	5.213	9.556						
90°	90°	15	17	30	60	16	.07						
90°	90°	15	18	30	60	15.2	18.24	2.9					
90°	90°	15	19	30	60	15.2	19.11						
90° 90° 25 27 30 60 26.06													
90 <sup>o</sup>	90°	)° 25 28 30 60 25.19 28.23											
90 <sup>o</sup>	90°	25	29	30	60	25.19	29.1						
90° 90° 35 37 30 60 36.05													
90 <sup>o</sup>	90° 90° 35 38 30 60 35.15 38.23												
90° 90° 35 39 30 60 35.18 39.09													
90 <sup>o</sup>	90°	45	47	30	60	46	.04						
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	45	48	30	60	45.18	47.78	2.9					
90°	90°	45	49	30	60	45.18	49.08						
Rata-rata Resolusi Kecepatan (m/s)													
Rata-rata error deteksi (m/s)													
		Rata-	rata Aku	rasi dete	ksi (%)			98.82					

Tabel 4.21 Hasil Resolusi dan Akurasi kecepatan MIMO-IOFDM Model Yoke

Tabel 4.22 Hasil Resolusi dan Akurasi Sudut MIMO-IOFDM Model Yoke

$\theta_1$	$\theta_2$	$V_1$	$V_2$	$R_1$	$R_2$	$\theta_1'$	$\theta_2'$	Res
		(m/s)	(m/s)	(m)	(m)			
$10^{o}$	11 <sup>0</sup>	20	35	30	60	1	1 <sup>0</sup>	
$10^{o}$	12 <sup>0</sup>	20	35	30	60	10 <sup>0</sup>	12 <sup>0</sup>	2 <sup>0</sup>
$10^{o}$	13°	20	35	30	60	$10^{o}$	13 <sup>0</sup>	
40 <sup>o</sup>	41 <sup>o</sup>	20	35	30	60	42	1 <i>°</i>	
$40^{o}$	42 <sup>o</sup>	20	35	30	60	40 <sup>o</sup>	42 <sup>o</sup>	2 <i>°</i>
40 <sup>o</sup>	43 <sup>o</sup>	20	35	30	60	40 <sup>o</sup>	43 <sup>o</sup>	
90 <sup>o</sup>	91°	20	35	30	60	91	1 <i>°</i>	
90 <sup>o</sup>	92°	20	35	30	60	90 <sup>o</sup>	92°	2 <sup>0</sup>
90 <sup>o</sup>	93°	20	35	30	60	90 <sup>o</sup>	93°	
120°	121°	20	35	30	60	12	10	
120°	122°	20	35	30	60	120°	122°	2 <sup>0</sup>
1200	123°	20	35	30	60	120°	123°	

160°	161°	20	35	30	60	16	$0^{o}$				
160°	162°	20	35	30	60	160°	162°	2 <sup>0</sup>			
160°	163°	20	35	30	60	160°	163°				
Rata-rata Resolusi Kecepatan											
Rata-rata error deteksi											
Rata-rata Akurasi deteksi											

#### 4.6.1.1 Analisis Resolusi Jarak, Kecepatan, dan Sudut Radar MIMO-IOFDM Model Yoke

Dari **Tabel 4.20** dapat dilihat bahwa resolusi dari jarak adalah 2.3m nilai ini bergeser dari nilai resolusi jarak hasil perhitungan matematis yaitu senilai 1.6m, sehingga terjadi *error* resolusi jarak sebesar 0.5m. Hal ini dikarenakan nilai interferensi yang tinggi dan efek dari penggunaan Window Hamming sehingga terjadi *error* pada resolusi jarak.

Resolusi kecepatan dari MIMO-IOFDM model Yoke dapat dilihat pada **Tabel 4.21** yaitu senilai 2.8m/s nilai ini bergeser dari nilai resolusi kecepatan hasil perhitungan matematis yaitu senilai 1.97m/s, sehingga terjadi *error* resolusi jarak sebesar 0.83m/s. Hal ini dikarenakan nilai interferensi yang tinggi dan efek dari penggunaan Window Hamming sehingga terjadi *error* pada resolusi kecepatan.

Sedangkan resolusi sudut dari MIMO-IOFDM model Yoke dapat dilihat pada **Tabel 4.22** yaitu senilai 2<sup>o</sup> nilai ini bergeser dari nilai resolusi kecepatan hasil perhitungan matematis yaitu senilai 0.05<sup>o</sup>, sehingga terjadi *error* resolusi sudut sebesar 1.95<sup>o</sup>. Hal merupakan kelemahan dari algoritma MUSIC yang mempunyai nilai *error* tinggi.

# 4.6.1.2 Analisis Akurasi Jarak, Kecepatan, dan Sudut Radar MIMO-IOFDM Model Yoke

Akurasi deteksi jarak, kecepatan, dan sudut dihitung dari jarak terdekat yang mampu dideteksi oleh sistem radar. Dari **Tabel 4.20** dapat diketahui *error* rata-rata dari deteksi jarak adalah 0.91m nilai ini masih lebih kecil dari resolusi hasil deteksi dan resolusi hasil perhitungan, sehingga selisih deteksi antara jarak nyata dengan jarak hasil deteksi masih masuk dalam batas toleransi sehingga belum bisa dikatakan sebagai kesalahan deteksi, prosentase rata-rata akurasi deteksi adalah 94.65%. Begitu pula untuk deteksi kecepatan dimana selisih deteksi antara kecepatan sebenarnya dengan kecepatan hasil deteksi adalah 0.22m/s, kurang dari resolusi hasil perhitungan yaitu 1.97m/s dan resolusi hasil

deteksi yaitu 2.9 m/s sehingga belum bisa diakatakan sebagai kesalahan deteksi, untuk prosentase rata-rata akurasi kecepatan adalah 98.82% seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 4.21**. Untuk deteksi sudut kedatangan (DoA) memiliko *error* 0% atau akurasinya adalah 100%, hal ini dikarenakan penggunaan *virtual antenna* yang mampu meningkatkan akurasi deteksi sudut kedatangan (DoA) seperti ditunjukkan pada **Tabel 4.22**.

#### 4.6.2 Analisis Deteksi Maksimum dan Minimum Radar MIMO-IOFDM Model Yoke

Salah satu parameter yang penting dalam mendesain radar adalah jarak maksimum dan minimum dari radar tersebut, dari **Tabel 4.23** dapat diketahui jarak deteksi minimum dan maksimum adalah 0.9007m dan 206.3m, nilai ini sesuai dengan teori karena selisih deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum matematis adalah kurang dari resolusi jarak. Kecepatan maksimum dan minimum adalah 0.4344 m/s dan 54.73 m/s nilai ini sesuai dengan teori karena selisih hasil deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum adalah 0.4344 m/s dan 54.73 m/s nilai ini sesuai dengan teori karena selisih hasil deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum matematis adalah kurang dari resolusi kecepatan. Sedangkan untuk sudut maksimum dan minimum deteksi sudut adalah 0° dan 180°, nilai ini sesuai dengan teori karena selisih hasil deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum matematis adalah kurang dari resolusi sudut.

# 4.6.3 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Jarak Sama Radar MIMO-IOFDM Model Yoke

Dari **Tabel 4.23** ditunjukkan deteksi dua target dengan jarak yang sama yaitu 30m, dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa radar tidak mampu mendeteksi keberadaan dua target saat deteksi jarak, hal ini dikarenakan resolusi jarak adalah 2.3 m sehingga radar tidak mampu mendeteksi jarak tersebut. Sedangakan deteksi sudut dan kecepatan tidak terlalu terpengaruh oleh jarak dari target. Jika target berada pada sudut 90° dan 90° maka radar mampu mendeteksi kecepatan kedua target karena sudut 90° adalah *mainlobe* dari *array factor* sedangkan saat target berada pada sudut 120° dan 60° maka radar tidak mampu mendeteksi target karena berada pada *null-null* dari *array factor*, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.13** dan **Gambar 4.14** dengan menggunakan plot ambiguitas dapat dibedakan meskipun berada pada jarak yang sama karena masih terdapat kecepatan yang berbeda. Gamabar 4.13 menunjukkan target berada pada sudut 80° dan 100° yang bukan

merupakan sudut *broadside* dan *null*, melainkan sudut *sidelobe* dari *array factor* antenna penerima.



Gambar 4.13 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan 80° dan 100°, Kecepatan 20m/s dan 30 m/s



**Gambar 4.14** Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan 120<sup>o</sup> dan 80<sup>o</sup>, Kecepatan 60m/s dan 30 m/s

$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
$\begin{array}{c ccccc} (m/s) & (m/s) & (m/s) \\ 20.42 & 0.4344 \\ 20.42 & 9.556 \\ \hline 19.11 \\ 20.42 & 27.37 \\ 20.42 & 36.05 \\ 20.42 & -36.0$
(m/s) 0.4344 9.11 9.11 27.37 36.05 36.05 36.05 36.05 36.05 36.05 27.37 27.37 27.37 0.42 0.42 0.42 0.42 0.42 0.42 0.42 0.42 0.42 0.42 0.42 0.42

#### 4.6.4 Analisis Skenario Dua Target dengan Kecepatan yang Sama

Dari Tabel 4.23 ditunjukkan deteksi dua target dengan kecepatan vang sama vaitu 30m/s, dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa radar tidak mampu mendeteksi keberadaan dua target saat deteksi kecepatan, hal ini dikarenakan resolusi kecepatan adalah 2.9 m/s sehingga radar tidak mampu mendeteksi kecepatan tersebut. Sedangakan deteksi sudut dan jarak tidak terlalu terpengaruh oleh jarak dari target. Jika target berada pada sudut 90° dan 90° maka radar mampu mendeteksi kedua target karena sudut 90° adalah mainlobe dari array factor sedangkan saat target berada pada sudut 90° dan 60° maka radar tidak mampu mendeteksi target karena berada pada null-null dari array factor. Dari Gambar 4.15 diketahui bahwa terdapat dua target dengan kecepatan sama yaitu 30 m/s sedangkan jarak dan sudutnya berbeda sedangakan Gambar 4.16 menunjukkan plot ambiguitas dengan kecepatan sama, jarak berbeda, dimana nilai sudut kedatangan berada pada 120° dan 80° dimana pada sudut 120° tidak terdeteksi informasi jarak dan kecepatan diakarenakan merupakan sudut null dari array factor penerima.



Gambar 4.15 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan 80° dan 100°, Kecepatan Sama 30m/s



Gambar 4.16 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan Target berada pada Jarak 30m dan 60m, Sudut Kedatangan 120° dan 80°, Kecepatan Sama 30m/s



Gambar 4.17 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan 90° dan 60°, Kecepatan Sama 20m/s

#### 4.6.5 Analisis Skenario Dua Target dengan Sudut Kedatangan yang Sama Radar MIMO-IOFDM Model Yoke

Sudut kedatangan dari target sangat mempengaruhi terhadap hasil deteksi kecepatan dan jarak, karena dari arah kedatangan yang berasal dari sudut 90° maka nilai level daya deteksi kecepatan dan jarak bernilai maksimal sehingga radar mampu mendeteksi jarak dan kecepatan target keadaan ini juga berlaku pada deteksi sudut kedatangan target dimana saat target berada di sudut 90° maka akan memiliki nilai level yang paling tinggi hal ini diakarenakan karakteristik antena yang bersifat *broadside* maka saat target berada pada *sidelobe* dari antena maka nilai levelnya lebih rendah jika dibandingkan saat target berada pada *sudut broadside* (90°). Selain itu saat sudut kedatangan target berada pada *null-null* dari *array factor* maka radar tidak mampu mendeteksi informasi dari target karena level dayanya sangat rendah sehingga radar tidak mampu mendeteksi informasi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan dari target, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.18** dan **Gambar 4.19**.



Gambar 4.18 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan Sama 90°, Kecepatan 20m/s dan 30m/s



Gambar 4.19 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Model Yoke dengan Target berada pada Jarak 30m dan 105m, Sudut Kedatangan Sama 30°, Kecepatan 20m/s dan 30m/s

#### 4.7. Analisis Radar MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak

Setelah mengetahui bahwa sistem MIMO lebih unggul dari sistem SISO, maka pada subab ini dianalisis sistem MIMO-IOFDM menggunakan *Subcarrier* Acak dari segi resolusi dan akurasi jarak, kecepatan, dan sudut, serta level *sidelobe* hasil deteksi.

## 4.7.1 Analisis Resolusi dan Akurasi Jarak pada MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak

Parameter resolusi jarak didapatkan dari jarak terdekat antara dua target dimana radar masih bisa membedakan kedua target tersebut. Sedangkan akurasi dari deteksi jarak adalah selisih antara jarak sebenarnya dengan jarak yang terdeteksi pada sistem radar. Hasil resolusi dan deteksi jarak ditampilkan pada **Tabel 4.24**.

 Tabel 4.24
 Hasil Resolusi dan Akurasi Jarak MIMO-IOFDM Menggunakan

 Subcarrier Acak
 Subcarrier Acak

$\theta_1$	$\theta_2$	$V_1$	$V_2$	$R_1$	$R_2$	$R_1'$	$R_2'$	Res
		(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
90°	90°	20	35	10	12	11	11.7	

90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	10	13	10.81	13.51	2.1			
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	10	14	10.81	15.31				
90°	90°	20	-								
90°	90°	20	35	50	53	-	-	2.4			
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	20	35	50	54	-	-				
90°	90°	20	35	100	102						
90°	90°	20	35	100	103	-	-	-			
90°	90°	20	35	100	104	-	-				
90°	90 <sup>o</sup>	20	35	150	152						
90°	90°	20	35	150	153	-					
90°	90°	20	35	150	154	-	-				
90°	90 <sup>o</sup>	20	35	200	202		-				
90 <sup>o</sup>	90°	20	35	200	203	-					
90°	90°	20	35	200	204	-	-				
Rata-rata Resolusi Jarak											
		Ra	ata-rata e	rror det	eksi			0.91			
		Rata-	rata Aku	rasi dete	ksi (%)			94.65			

 Tabel 4.25 Hasil Resolusi dan Akurasi kecepatan MIMO-IOFDM

 Menggunakan Subcarrier Acak

Δ	Δ	V	V	D	D	<i>V</i> ′	V'	Res	
$v_1$	$v_2$	V1	V <sub>2</sub>	$n_1$	<sup>n</sup> 2	V1	V <sub>2</sub>	KCS	
		(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	
90°	90°	5	7	30	60	6.5	516		
90°	90°	5	8	30	60	5.213	8.253	2.9	
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	5	9	30	60	5.213	9.556		
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	15	17	30	60	16	16.51		
90°	90°	15	18	30	60	15.2	18.24	2.9	
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	15	19	30	60	15.2	19.11		
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	25	27	30	60	26.93			
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	25	28	30	60	25.19	28.23	2.9	
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	25	29	30	60	25.19	29.1		
90°	90°	35	37	30	60	35.62			
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	35	38	30	60	-	-	2.9	
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	35	39	30	60	-	-		
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	45	47	30	60	46	46.04		
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	45	48	30	60	45.18	47.78	2.9	
90 <sup>o</sup>	90 <sup>o</sup>	45	49	30	60	45.18	49.08		

Rata-rata Resolusi Kecepatan (m/s)	2.9
Rata-rata error deteksi (m/s)	0.2
Rata-rata Akurasi Deteksi (%)	98.82

 Tabel 4.26 Hasil Resolusi dan Akurasi Sudut MIMO-IOFDM Menggunakan

 Subcarrier Acak

$\theta_1$	$\theta_2$	$V_1$	$V_2$	$R_1$	$R_2$	$\theta_1'$	$\theta_2'$	Res	
		(m/s)	(m/s)	(m)	(m)				
10 <sup>0</sup>	11 <sup>0</sup>	20	35	30	60	1			
10 <sup>0</sup>	12 <sup>0</sup>	20	35	30	60	10 <sup>0</sup>	12 <sup>0</sup>	2°	
10 <sup>0</sup>	13 <sup>0</sup>	20	35	30	60	10 <sup>0</sup>	13 <sup>0</sup>		
40 <sup>o</sup>	41 <sup>0</sup>	20	35	30	60	4			
40 <sup>o</sup>	42 <sup>o</sup>	20	35	30	60	40 <sup>o</sup>	42 <sup>0</sup>	2 <sup>0</sup>	
40 <sup>o</sup>	43 <sup>o</sup>	20	35	30	60	40 <sup>o</sup>	43 <sup>0</sup>		
90°	91°	20	35	30	60	9			
90 <sup>o</sup>	92 <sup>o</sup>	20	35	30	60	90°	92 <sup>0</sup>	2 <sup>0</sup>	
90°	93°	20	35	30	60	90° 93°			
120°	121°	20	35	30	60	12			
120 <sup>o</sup>	122 <sup>o</sup>	20	35	30	60	120 <sup>o</sup>	122 <sup>o</sup>	2 <sup>0</sup>	
120°	123°	20	35	30	60	120°	123°		
160°	161°	20	35	30	60	16			
160°	162°	20	35	30	60	160°	162°	2 <sup>0</sup>	
160°	163°	20	35	30	60	160°	163°		
		Rata-ra	ta Resolu	usi Kec	epatan			2 <sup>0</sup>	
		Rata	a-rata <i>eri</i>	ror dete	ksi			00	
		Rata-	rata Aku	ırasi det	teksi			100%	

# 4.7.1.1 Analisis Resolusi Jarak, Kecepatan, dan Sudut Radar MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak

Dari **Tabel 4.24** dapat dilihat bahwa resolusi dari jarak adalah 2.3m nilai ini bergeser dari nilai resolusi jarak hasil perhitungan matematis yaitu senilai 1.6m, sehingga terjadi *error* resolusi jarak sebesar 0.5m. pada deteksi jarak menggunakan *subcarrier* acak saat target berada mendekati 40m atau lebih dari 40 mater tidak mampu mendeteksi jarak hal ini dikarenakan pada sistem acak tidak mampu memisahkan antara interferer dan target utama sehingga dari hasil deteksi masih mengandung interferer yang mempunyai nilai level daya yang tinggi sehingga saat

target melebihi jarak dari interferer maka radar akan mendeteksi informasi dari interferer.

Resolusi kecepatan dari MIMO-IOFDM menggunakan *subcarrier* acak dapat dilihat pada Tabel **4.25** yaitu senilai 2.9m/s nilai ini bergeser dari nilai resolusi kecepatan hasil perhitungan matematis yaitu senilai 1.97m/s, sehingga terjadi *error* resolusi jarak sebesar 0.83m/s. Hal ini dikarenakan nilai interferensi yang tinggi sehingga terjadi *error* pada resolusi kecepatan. Pada mimo menggunakan *subcarrier* acak saat kecepatan target mendekati kecepatan interferer maka radar tidak mampu mendeteksi kecepatan target justru radar mendeteksi kecepatan interferer alasannya adalah sama pada saat deteksi jarak.

Sedangkan resolusi sudut dari MIMO-IOFDM menggunakan subcarrier acak dapat dilihat pada **Tabel 4.26** yaitu senilai 2° nilai ini bergeser dari nilai resolusi kecepatan hasil perhitungan matematis yaitu senilai 0.05°, sehingga terjadi *error* resolusi jarak sebesar 1.95°. Hal merupakan kelemahan dari algoritma MUSIC yang mempunyai nilai *error* tinggi.

#### 4.7.1.2 Analisis Akurasi Jarak, Kecepatan, dan Sudut Radar MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak

Akurasi deteksi jarak, kecepatan, dan sudut dihitung dari jarak terdekat yang mampu dideteksi oleh sistem radar. Dari Tabel 4.24 dapat diketahui error rata-rata dari deteksi jarak adalah 0.91m nilai ini masih lebih kecil dari resolusi hasil deteksi dan resolusi hasil perhitungan, sehingga selisih deteksi antara jarak nyata dengan jarak hasil deteksi masih masuk dalam batas toleransi sehingga belum bisa dikatakan sebagai kesalahan deteksi, untuk prosentae rata-rata akurasi deteksi jarak adalah 94.65%. Begitu pula untuk deteksi kecepatan dimana selisih deteksi antara kecepatan sebenarnya dengan kecepatan hasil deteksi adalah 0.22m/s, kurang dari resolusi hasil perhitungan yaitu 1.97m/s dan resolusi hasil deteksi yaitu 2.9 m/s sehingga belum bisa diakatakan sebagai kesalahan deteksi untuk prosentae rata-rata akurasi deteksi kecepatan adalah 98.82% ditunjukkan pada Tabel 4.25. Untuk deteksi sudut kedatangan (DoA) memiliki error 0% atau memiliki akurasi deteksi sebesar 100%, hal ini dikarenakan penggunaan virtual antenna yang mampu meningkatkan akurasi deteksi sudut kedatangan (DoA). Pada deteksi jarak dan kecepatan menggunakan subcarrier acak saat target berada mendekati 40m dan 40m/s atau lebih dari 40 mater tidak mampu mendeteksi jarak dan kecepatan.

	_																							
	٥06	<i>°</i> 06	006	006	٥06	٥06	006	<i>0</i> 06	٥06	006	006	006	٥06	006	006	٥06	٥06	000	006	٥06	006		$\theta_1$	Label 4.2
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	180°	150°	120°	006	60 <i>°</i>	300	00	180°	150°	120°	006	60 <i>°</i>	300	00	006	°06	٥06	006	<i>o</i> 06	°06	<i>0</i> 06		$\theta_2$	/ Label L
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	(B)	$R_1$	veteksi Luu
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	206	175	140	105	70	35	0	30	30	30	30	30	30	30	206	175	140	105	70	35	0	(B)	$R_2$	a rarger i
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	(m/s)	$V_1$	ATTAINA
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	20	20	20	20	20	20	20	55	45	36	27	18	9	0	55	45	36	27	18	9	0	(m/s)	$V_2$	FUM Sub
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	006	°06	°06	°06	°06	006	<i>°</i> 06	<i>°</i> 06	°06	°06	006	006	006	000	9	9	9	9	9	9	9		$\theta_{1}$	camer A
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	180°	150°	120°	°06	60 <i>°</i>	30°	00	180°	150°	120°	006	60°	300	00	00	00	00	00	00	00	00		$\theta_2$	Cak
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31.52	31	31	31	31	31	31	31					31.52	31.52	31.52	(B)	$R_1$	
20.42         9.556           19.11         20.42         27.37           20.42         36.05           20.42         36.05           20.42         54.73           20.42         - <td></td> <td></td> <td></td> <td>104.5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>.52</td> <td>.52</td> <td>1.52</td> <td>1.52</td> <td>1.52</td> <td>1.52</td> <td>1.52</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>70.25</td> <td>36.03</td> <td>0.9007</td> <td>(B)</td> <td><math>R_2'</math></td> <td></td>				104.5				.52	.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52					70.25	36.03	0.9007	(B)	$R_2'$	
9.11 9.11 27.37 36.05 44.74 54.73 54.73 54.73 27.37 27.37 27.37 27.37 0.42 0.42 0.42 0.42 0.42 0.42	20.42 20.42 20.42	2	2	2	2	2	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	20.42	1	20.42	20.42	(m/s)	$V_1'$		
		0.42	0.42	0.42	0.42				27.37				54.73	44.74	36.05	27.37	9.11	9.556	0.4344	(m/s)	$V_2'$			

Hal ini dikarenakan pada sistem acak tidak mampu memisahkan antara interferer dan target utama sehingga dari hasil deteksi masih mengandung interferer yang mempunyai nilai level daya yang tinggi sehingga saat target melebihi jarak atau mendekati kecepatan dari interferer maka radar akan mendeteksi informasi dari interferer seperti ditunjukkan pada **Tabel 4.26**.

# 4.7.2 Analisis Deteksi Maksimum dan Minimum Radar MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak

Salah satu parameter yang penting dalam mendesain radar adalah nilai maksimum dan minimum deteksi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan dari radar tersebut dimana nilai ini bisa dihitung dengan menempatkan target pada jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan semaksimum dan seminimum mungkin selama radar masih bisa membedakan nilai jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan tersebut, nilai maksimum dan minimum ini seharusnya memiliki hasil yang mirip dengan nilai resolusi jarak, kecepatan dan sudut kedatangan idealnya nilai maksimum hasil deteksi adalah nilai maksumum hasil perhitungan dikurangi dengan nilai resolusi baik dari jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan begitu pula dengan nilai minumumnya yaitu nilai minimum hasil perhitungan ditambah dengan nilai resolusi baik jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan (DoA), dari 
 Tabel 4.27 dapat diketahui jarak deteksi minimum dan maksimum adalah
 0.9007m dan 40m, nilai jarak maksimum menjadi lebih dekat diakrenakan terdapat interferensi pada jarak 40m. Kecepatan maksimum dan minimum adalah 0.4344 m/s dan 54.73 m/s nilai ini sesuai dengan teori karena selisih hasil deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum matematis adalah kurang dari resolusi kecepatan. Sedangkan untuk sudut maksimum dan minimum deteksi sudut adalah 0° dan 180°, nilai ini sesuai dengan teori karena selisih hasil deteksi maksimum dan minimum dengan maksimum dan minimum matematis adalah kurang dari resolusi sudut.

#### 4.7.3 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Jarak Sama Radar MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak

Pada **Gambar 4.20** menunjukkan plot ambiguitas radar mimo menggunakan *subcarrier* acak dimana target berada pada jarak 30m, kecepatan 20m/s dan 30m/s, dan sudut kedatangan 80° dan 100°, sedangkan interferer berada pada jarak 40m, kecepatan 40m/s, dan berada pada sudut 110°. Dari gambar dapat dilihat bahwa nilai level daya dari

interferer lebih tinggi jika dibandingkan dengan daya target. Hal ini merupakan kelemahan dari *subcarrier* acak dimana kemungkinan penggunaan *subcarrier* antara target dan interferer mempunyai kemungkinan sama sehingga radar menganggap interferer sebagai target selain itu sudut kedatangan target juga sangat berpengaruh dimana sudut 80° dan 100° merupakan *sidelobe* dari *array factor*.



Gambar 4.20 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak dengan Target berada pada Jarak Sama 30m, Sudut Kedatangan 80° dan 100°, Kecepatan 20m/s dan 30 m/s

# 4.7.4 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Kecepatan Sama Radar MIMO-IOFDM Menggunakan *Subcarrier* Acak

Pada **Gambar 4.21** menunjukkan plot ambiguitas radar mimo menggunakan *subcarrier* acak dimana target berada pada jarak 30m dan 50m, dan dengan nilai kecepatan target yang sama yaitu 20m/s, dan sudut kedatangan 80° dan 100°, sedangkan interferer berada pada jarak 40m, kecepatan 40m/s, dan berada pada sudut 110°. Dari gambar dapat dilihat bahwa radar tidak mampu mendeteksi target karena jarak target kedua adalah lebih jauh jika dibanding jarak interferer sehingga radar tidak mampu medeteksi, selain itu sudut kedatangan target juga sangat berpengaruh dimana sudut 80° dan 100° merupakan *sidelobe* dari *array factor*.



Gambar 4.21 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak dengan Target berada pada Jarak 30m dan 50m, Sudut Kedatangan 80° dan 100°, Kecepatan Sama 20m/s

#### 4.7.5 Analisis Skenario Deteksi Dua Target dengan Sudut Sama Radar MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak

Sudut kedatangan dari target sangat mempengaruhi terhadap hasil deteksi kecepatan dan jarak, karena dari arah kedatangan yang berasal dari sudut 90° maka nilai level daya deteksi kecepatan dan jarak bernilai maksimal sehingga radar mampu mendeteksi jarak dan kecepatan target keadaan ini juga berlaku pada deteksi sudut kedatangan target dimana saat target berada di sudut 90° maka akan memiliki nilai level yang paling tinggi hal ini diakarenakan karakteristik antena yang bersifat *broadside* maka saat target berada pada *sidelobe* dari antena maka nilai levelnya lebih rendah jika dibandingkan saat target berada pada sudut *broadside* (90°). Selain itu saat sudut kedatangan target berada pada *null-null* dari *array factor* maka radar tidak mampu mendeteksi informasi dari target karena level dayanya sangat rendah sehingga radar tidak mampu mendeteksi informasi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan dari target.

Pada **Gambar 4.22** menunjukkan plot ambiguitas radar mimo menggunakan *subcarrier* acak dimana target berada pada jarak 30m dan 55m, kecepatan 20m/s dan 30m/s, dan sudut kedatangan 90°, sedangkan interferer berada pada jarak 40m, kecepatan 40m/s, dan berada pada sudut

 $110^{\circ}$ . Dari gambar dapat dilihat bahwa nilai level daya dari target lebih kecil jika dibanding level daya interferer hal ini dikarenakan target kedua lebih jauh jika dibanding jarak interferer sehingga level daya target lebih kecil.



Gambar 4.22 Plot Ambiguitas MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak dengan Target berada pada Jarak 30m dan 55m, Sudut Kedatangan Sama 90°, Kecepatan 20m/s dan 30m/s

# 4.8 Efek Interferer Terhadap Hasil Deteksi Radar

Untuk mengetahui ketahanan sistem radar terhadap interferensi dari sitem radar yang lain untuk skenario pengujian interferer sudah dibahas pada **Subab 3.6**, dengan nilai parameter pengujian adalah terdapat dua target yang terletak pada jarak 30m dan 60m dengan kecepatan 5m/s dan 8m/s keduanya terletak pada sudut 90° hal ini merupakan posisi sudut paing baik karena berada pada *broadside* dari antena sehingga nantinya daya yang diterima oleh radar akan bernilai maksimum sehingga pengujian interferer ini bisa berlangsung secara baik tanpa adanya penurunan level daya yang dipengaruhi oleh sudut kedatangan target. Sedangkan interferer berada pada jarak 40m dengan sudut kedatangan 110° untuk kecepatan interferer akan diuji dua kali yaitu saat kecepatan 5m/s dan 50m/s hal ini bertujuan untuk menguji sistem radar utama apakah *subcarrier* dari interferer setelah mengalami pergeseran Doppler masuk ke ranah *subcarrier* sistem radar utama.



# 4.8.1 Analisis Efek Interferer Terhadap Hasil Deteksi Radar MIMO-OFDM Konvensional

(c)

Gambar 4.23 Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c) MIMO-OFDM Konvensional dengan kecepatan Interferer 5m/s





Gambar 4.24 Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c) MIMO-OFDM Konvensional dengan kecepatan Interferer 50m/s

Dari **Gambar 4.23** dan **Gambar 4.24** dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan interferer sehingga interferer akan mengalami pergeseran Doppler yang mengakibatkan *subcarrier* dari interferer bergeser mendekati *subcarrier* dari radar utama sehingga akan mengganggu radar utama. Interferer tidak berdampak pada akurasi dan resolusi deteksi karena pada sisi penerima terjadi pemisahan antara interferer dan target. Efek dari interferer hanya berdampak pada kenaikan level daya dari *sidelobe*. Untuk deteksi kecepatan terjadi kenaikan level sidelobe sebesar 23.9dB sedangkan deteksi jarak terjadi kenaikan level *sidelobe* sebesar 11.3dB, sedangkan pada deteksi sudut hampir tidak terjadi perubahan level *sidelobe*.







Gambar 4.25 Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c) MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan kecepatan Interferer 5m/s



Gambar 4.26 Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c) MIMO-IOFDM Model Wiesbeck dengan kecepatan Interferer 50m/s

Dari Gambar 4.25 dan Gambar 4.26 dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan interferer sehingga interferer akan mengalami pergeseran Doppler yang mengakibatkan *subcarrier* dari interferer bergeser mendekati *subcarrier* dari radar utama sehingga akan mengganggu radar utama. Interferer tidak berdampak pada akurasi dan resolusi deteksi karena pada sisi penerima terjadi pemisahan antara interferer dan target. Efek dari interferer hanya berdampak pada kenaikan level daya dari *sidelobe*. Untuk deteksi kecepatan terjadi kenaikan level sidelobe sebesar 66.5dB sedangkan deteksi jarak terjadi kenaikan level *sidelobe* sebesar 60.59dB, sedangkan pada deteksi sudut hampir tidak terjadi perubahan level *sidelobe*.



4.8.3 Analisis Efek Interferer Terhadap Hasil Deteksi Radar MIMO-IOFDM Model Yoke

Gambar 4.27 Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c) MIMO-IOFDM Model Yoke dengan kecepatan Interferer 5m/s



Gambar 4.28 Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c) MIMO-IOFDM Model Yoke dengan kecepatan Interferer 50m/s

Dari **Gambar 4.27** dan **Gambar 4.28** dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan interferer sehingga interferer akan mengalami pergeseran Doppler yang semkin tinggi pula sehingga mengakibatkan *subcarrier* dari interferer bergeser mendekati *subcarrier* dari radar utama sehingga akan mengganggu radar utama. Interferer tidak berdampak pada akurasi dan resolusi deteksi karena pada sisi penerima terjadi pemisahan antara interferer dari *sidelobe* deteksi jarak dan kecepatan. Untuk deteksi kecepatan terjadi kenaikan level sidelobe sebesar 68.66dB sedangkan deteksi jarak terjadi kenaikan level *sidelobe* sebesar 66.96dB, sedangkan pada deteksi sudut hampir tidak terjadi perubahan level *sidelobe*.



# 4.8.4 Analisis Efek Interferer Terhadap Hasil Deteksi Radar MIMO-IOFDM Menggunakan *Subcarrier* Acak

(c) Gambar 4.29 Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c) MIMO-IOFDM Subcarrier Acak dengan kecepatan Interferer 5m/s





Gambar 4.30 Hasil Deteksi Kecepatan(a), Jarak(b), dan Sudut(c) MIMO-IOFDM Subcarrier Acak dengan kecepatan Interferer 50m/s

Pada *subcarrier* acak, efek interferensi tidak bisa diperkirakan karena penggunaan *subcarrier* antar pemancar adalah acak, jadi interferer belum tentu menaikkan nilai level daya *sidelobe* bisa saja interferer justru menurunkan nilai level *sidelobe*. Dari **Gambar 4.29** dan **Gambar 4.30** bisa dilihat bahwa, untuk deteksi kecepatan terjadi kenaikan level sidelobe sebesar 11.5dB sedangkan deteksi jarak terjadi penurunan level *sidelobe* sebesar 5.36dB, sedangkan pada deteksi sudut hampir tidak terjadi perubahan level *sidelobe*.

Dari penjelasan diatas didapatkan hasil analisis bahwa kenaikan level sidelobe terbesar (berturut-turut) yang diakibatkan oleh interferer terjadi pada MIMO-IOFDM model Yoke, MIMO-IOFDM model Wiesbeck, MIMO-OFDM Konvensional, dan MIMO-IOFDM subcarrier acak. Setiap model memiliki kelemahan dan kelebisan tersendiri, pada MIMO-IOFDM model Yoke dan Wiesbeck memiliki level daya yang lebih baik jika dibanding dengan MIMO-OFDM konvensional, namun MIMO-OFDM konvensional memiliki level daya deteksi kecepatan yang lebih baik. Sedangkan MIMO-IOFDM subcarrier acak memiliki level daya sidelobe dari deteksi jarak dan kecepatan yang lebih rendah, namun deteksi MIMO-OFDM subcarrier acak masih mengandung interferer justru nilai level daya interferer lebih tinggi dibandingkan dengan level daya dari target. Untuk model MIMO-OFDM yang paling tahan terhadap interferensi adalah MIMO-OFDM menggunakan subcarrier acak namun hasil deteksinya masih mengandung nilai interferer, justru nilai interferer lebih tinggi dibanding target hal ini yang membuat model ini tahan terhadap interferer karena sinyal yang diolah merupakan sinyal dari interferer yang masuk ke sistem radar utama.

# 4.9 Sintesis

Sistem radar yang dibangun merupakan *automotive radar* sehingga parameter performansi disesuaikan dengan kebutuhan pada *automotive radar*. Radar untuk keperluan otomotif harus mampu mendeteksi kecepatan, jarak, dan sudut kedatangan (DoA) dari target. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut maka digunakan radar MIMO yang mampu mendeteksi arah kedatangan (DoA). Pada sistem MIMO, bentuk sinyal yang digunakan harus memiliki ortogonalitas yang baik sehingga dipilih bentuk sinyal OFDM yang memiliki keunggulan ortogonalitas antar *subcarrier* yang baik, selain itu kenggulan lain dari bentuk sinyal OFDM adalah sensitif terhadap pergeseran *Doppler* sehingga bisa digunakan untuk mendeteksi kecepatan target.

radar MIMO-OFDM dengan konfogurasi MIMO 4x4, menggunakan bentuk sinyal OFDM, dan pemrosesan sinyal menggunakan modulasi simbol periodogram untuk medapatkan informasi jarak dan kecepatan, serta algoritma MUSIC untuk mendapatkan informasi arah kedatangan (DoA).

Untuk meningkatkan ortogonalitas antar pemancar serta membuat sistem radar yang tahan terhadap interferensi dari sistem radar yang sama, maka dari MIMO-OFDM akan dianalisis model pengiriman yang paling tahan terhadap interferensi yang ditunjukkan dari nilai resolusi dan akurasi deteksi jarak, kecepatan, dan sudut yang baik. Untuk itu dianalisis empat bentuk model MIMO-OFDM yaitu MIMO-OFDM konvensional, MIMO-IOFDM model Wiesbeck, MIMO-IOFDM model Yoke, dan MIMO-IOFDM menggunakan *subcarrier* acak.

Dari hasil deteksi jarak dan kecepatan didapatkan nilai *sidelobe* level yang tinggi sehingga digunakan *Window Hamming* untuk menurunkan *sidelobe* level hasil deteksi.

Desain pengolahan sinyal yang dibuat untuk mendapatkan informasi DoA yaitu menggunakan algoritma MUSIC. Namun terdapat beberapa kelemahan dalam algoritma MUSIC, yaitu *error* dan akurasi deteksi akan semakin buruk ketika semakin banyak target yang dideteksi, serta kemampuan algoritma MUSIC yang hanya bisa mendeteksi target kurang dari jumlah antena penerima, untuk mengatasi hal tersebut maka digunakanlah *virtual antenna*. Dengan menggunakan *virtual antenna*, ukuran MIMO yang semula 4x4 maka akan menjadi 1x16 sehingga dapat meningkatkan akurasi deteksi dan mampu mendeteksi target yang lebih banyak.

Array factor yang dibentuk oleh 16 antena penerima adalah bersifat *broadside* sehingga saat target berada di sudut 90° nilai deteksinya paling bagus. Ada beberapa *null* dari *array factor* tersebut sehingga saat target berada pada *null-null* dari *array factor* radar tidak bisa mendeteksi informasi target karena level daya yang diterima bernilai sangat kecil atau setara dengan *sidelobe*.

Automotive radar mempunyai beberapa kriteria yaitu mampu mendeteksi jarak, kecepatan, dan sudut kedatangan (DoA) dengan nilai akurasi dan resolusi yang paling baik, mempunyai level *sidelobe* yang rendah, mampu membedakan target dan interferer, dan tahan terhadap interferensi dari radar lain. Dari keempat model MIMO yang telah dianalisis, setiap model memiliki kelebihan dan kekurangan masingmasing MIMO-IOFDM Model Wiesbeck memiliki resolusi kecepatan paling baik dan diikuti oleh MIMO-IOFDM model Yoke dengan perbedaan yang sangat tipis. Akurasi kecepatan dan jarak keempatnya memiliki nilai yang sama. MIMO-OFDM konvesional dan MIMO-IOFDM *subcarrier* acak memiliki leve *sidelobe* deteksi jarak yang tinggi. Level *sidelobe* deteksi kecepatan MIMO-OFDM konvensional dan MIMO-IOFDM *subcarrier* acak memiliki nilai yang sama baik dibanding dua yang lainnya, tetapi MIMO-IOFDM *subcarrier* acak memiliki nilai yang sama baik dibanding dua yang paling tinggi dibanding yang lain.
## LAMPIRAN B SCRIPT SIMULASI PADA PERANGKAT LUNAK MATLAB

#### A. Script Simulasi MIMO-OFDM Konvensional

fc=24e9; c=3e8; lamda=c/fc: Ncu=128; deltafc=90.909e3; Nch=8; Nc=Ncu\*Nch; T=11e-6; Tp=1.375e-6; Ttotal=T+Tp; B=93.1e6; R max=206.3; Nsvm=256; Gpdb=45.2; cp=1/8; Ncp=cp\*Nc; Vrmax=55.6; deltar=1.61; deltav=1.97; M=4; n=2; max range=(c\*T)/2;Mr=4; Mt=4;d=1/2: angle res = lamda/(2\*((Mt\*Mr)-1)\*d\*cos(180\*pi/180));  $Vr = [20 \ 35];$ sudut=[70 90 110]; R=[20 30]; SIRdb=10\*log10(((40^2)\*10)/((4\*pi)\*(R(2)^4))); SIR=10^(SIRdb/10); 응응 &User 1 %Membangkitkan Data Data = randint(1,Nsym\*Nc,M); map data=(1/4)\*modulate(modem.pskmod(M,pi/4),Data); par data=reshape(map data,Nc,[]); Tx1a=par data;Tx2a=par data;Tx3a=par data;Tx4a=par data; 응응 %Proses Tx1 for i = 4 \* (Nc/8) + 1:5 \* (Nc/8);Tx1a(i,:)=0;

```
end
Ch Tx1 = par data-Tx1a;
%IFFT
ifft Tx1 = ifft(Ch Tx1,Nc);
cp Tx1=[ifft Tx1((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx1];
Tx1=reshape(cp Tx1,1,[]);
응응
%Proses Tx2
for i = 5*(Nc/8)+1:6*(Nc/8);
    Tx2a(i,:)=0;
end
Ch Tx2 = par data-Tx2a;
%IFFT
ifft Tx2 = ifft(Ch Tx2,Nc);
cp Tx2=[ifft Tx2((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx2];
Tx2=reshape(cp Tx2,1,[]);
응응
%Proses Tx3
for i = 6*(Nc/8)+1:7*(Nc/8);
    Tx3a(i,:)=0;
end
Ch Tx3 = par data-Tx3a;
%IFFT
ifft Tx3 = ifft(Ch Tx3,Nc);
cp Tx3=[ifft Tx3((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx3];
Tx3=reshape(cp Tx3,1,[]);
응응
%Proses Tx4
for i = 7*(Nc/8)+1:8*(Nc/8);
    Tx4a(i,:)=0;
end
Ch Tx4 = par data-Tx4a;
%TFFT%
ifft Tx4 = ifft(Ch Tx4, Nc);
cp Tx4=[ifft Tx4((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx4];
Tx4=reshape(cp Tx4,1,[]);
Tx = Tx1+Tx2+Tx3+Tx4;
응응
%Pemodelan Target
Td1 = 2*(R(1)/c);
Tb1 = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzeros1 = round(Td1/Tb1);
Ptot delay1 = [zeros(1,Nzeros1),Tx];
Ptot delay1 = Ptot delay1(1:length(Tx));
Td2 = 2*(R(2)/c);
Tb2 = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzeros2 = round (Td2/Tb2);
Ptot delay2 = [zeros(1,Nzeros2),Tx];
```

```
Ptot delay2 = Ptot delay2(1:length(Tx));
Ptot delay=[Ptot delay1; Ptot delay2];
% Pemodelan Kecepatan Target
t=(0:length(Ptot delay)-1)./(Nc);
for r=1:n;
    fd(r) = 2 * Vr(r) / lamda;
end
for k=1:n;
dop ef(k,:)=Ptot delay(k,:).*exp(1j*2*pi*t*(fd(k))*Ttotal);
end
dat utama = dop ef(1,:)+dop ef(2,:);
응응
%Interferer
%Membangkitkan Data Interferer
map data int= (1/4)*sqrt(1/SIR)*pskmod(Data,M);
par data int=reshape(map data int,Nc,[]);
Tx1a int=par data int;Tx2a int=par data int;Tx3a int=par dat
a int; Tx4a int=par data int;
응응
%Proses Tx1
for i = 1: (Nc/8);
    Tx1a int(i,:)=0;
end
Ch Tx1 int = par data int-Tx1a int;
%IFFT
ifft Tx1 int = ifft(Ch Tx1 int,Nc);
cp Tx1 int=[ifft Tx1 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx1 int];
Tx1_int=reshape(cp_Tx1_int,1,[]);
응응
%Proses Tx2 Interferer
for i = (Nc/8) + 1:2*(Nc/8);
    Tx2a int(i,:)=0;
end
Ch Tx2 int = par data int-Tx2a int;
%IFFT
ifft Tx2 int = ifft(Ch Tx2 int,Nc);
cp Tx2 int=[ifft Tx2 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx2 int];
Tx2_int=reshape(cp_Tx2_int,1,[]);
응응
%Proses Tx3 Interferer
for i = 2*(Nc/8)+1:3*(Nc/8);
    Tx3a int(i,:)=0;
end
Ch Tx3 int = par data int-Tx3a int;
%IFFT
ifft Tx3 int = ifft(Ch Tx3 int,Nc);
```

```
cp Tx3 int=[ifft Tx3 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx3 int];
Tx3 int=reshape(cp Tx3 int,1,[]);
88
%Proses Tx4
for i = 3*(Nc/8)+1:4*(Nc/8);
    Tx4a int(i,:)=0;
end
Ch Tx4 int = par data int-Tx4a int;
%TFFT
ifft Tx4 int = ifft(Ch Tx4 int,Nc);
cp Tx4 int=[ifft Tx4 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx4 int];
Tx4 int=reshape(cp Tx4 int,1,[]);
응응
Tx int=Tx1 int+Tx2 int+Tx3 int+Tx4 int;
응응
%Pemodelan Interferer
%Parameter Jarak Interferer
Rint=40:
%Parameter Kecepatan Interferer
Vrint = 20;
n=1;
응응
% Pemodelan Jarak Interferer
fdint=Vrint/lamda;
Tdint = (Rint/c);
Tbint = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzerosint = round(Tdint/Tbint);
Ptot delayint = [zeros(1,Nzerosint),Tx int];
Ptot delayint = Ptot delayint(1:length(Tx int));
% Pemodelan Kecepatan Interferer
t=(0:length(Ptot delayint)-1)./(Nc);
for r=1:n;
    fdint(r)=Vrint(r)/lamda;
end
for k=1:n;
    %doppler
dop ef int(k,:)=Ptot delayint(k,:).*exp(1j*2*pi*t*fdint*Ttot
al);
end
deretteta = sudut*(pi/180); %skenario sudut kedatangan (DoA)
Mr=16;
s = length(deretteta);
for m=1:s
    Ax(m,:) = exp(-1i*pi*cos(deretteta(m))*([0:Mr-1]));
end
A = Ax';
```

```
rxs = A*[dop ef(1,:);dop ef(2,:);dop ef int(1,:)]; %sinyal
dengan informasi sudut
dat = sum(rxs);
응응
aa = 4* (Nc/8) +1:5* (Nc/8); bb = 5* (Nc/8) +1:6* (Nc/8); cc =
6*(Nc/8)+1:7*(Nc/8);dd = 7*(Nc/8)+1:8*(Nc/8);
de intlvd = [aa bb cc dd].';
de intlvd = sortrows(de intlvd).';
%Antena Penerima
par rx1=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx1=[par rx1((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx1=fft(cp rem Tx1,Nc);
fft data a rx1=fft data rx1;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx1(i,:)=0;
end
demod de rx1 = fft data a rx1-fft data rx1;
div = (demod de rx1)./par data;
hamm div j = hamming(1024)*ones(1,Nsym);
ham div k = (ones(1,1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
divk = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:))) *Vrmax;
pp=norma(square);
bb1=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm, 1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc1=10*log10(squ/pp);
%Antena Penerima Kedua
par rx2=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx2=[par rx2((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx2=fft(cp rem Tx2,Nc);
fft data a rx2=fft data rx2;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx2(i,:)=0;
end
demod de rx2 = fft data a rx2-fft data rx2;
```

```
div = (demod de rx2)./par data;
hamm div j = hamming(1024)*ones(1,Nsym);
ham \operatorname{div} \overline{k} = (\operatorname{ones}(1, 1024).'*\operatorname{hamming}(\operatorname{Nsym}).').*\operatorname{hamm} \operatorname{div} j;
div\overline{k} = \overline{d}iv.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb2=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc2=10*log10(squ/pp);
22
%Antena Penerima Ketiga
par rx3=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx3=[par rx3((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx3=fft(cp rem Tx3,Nc);
fft data a rx3=fft data rx3;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx3(i,:)=0;
end
demod de rx3 = fft data a rx3-fft data rx3;
div = (demod de rx3)./par data;
hamm div j = hamming(1024)*ones(1,Nsym);
ham div k = (ones(1, 1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
divk = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb3=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
```

```
pp=norma(squ);
cc3=10*log10(squ/pp);
88
%Antena Penerima Keempat
par rx4=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx4=[par rx4((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx4=fft(cp rem Tx4,Nc);
fft data a rx4=fft data rx4;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx4(i,:)=0;
end
demod de rx4 = fft data a rx4-fft data rx4;
div = (demod de rx4)./par data;
hamm div j = hamming(1024) *ones(1, Nsym);
ham \operatorname{div} \overline{k} = (\operatorname{ones}(1, 1024).'*\operatorname{hamming}(\operatorname{Nsym}).').*\operatorname{hamm} \operatorname{div} j;
div\overline{k} = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:))) *Vrmax;
pp=norma(square);
bb4=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc4=10*log10(squ/pp);
응응
bb=bb1+bb2+bb3+bb4;
cc=cc1+cc2+cc3+cc4;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
figure(1)
[Vmax,vmax] = findpeaks(bb, xaxis, 'MinPeakHeight',-
50, 'SortStr', 'descend');
findpeaks(bb, xaxis, 'MinPeakHeight', -50)
xlim([0 Vrmax])
title('Deteksi Kecepatan')
xlabel('Kecepatan(m/s)', 'FontSize',12)
ylabel('Jarak(m)', 'FontSize', 12)
text(vmax+.3, Vmax,num2str((1:numel(Vmax))'))
grid on
```

```
figure(2)
[Rmax,rmax] = findpeaks(cc,xaxism, 'MinPeakHeight',-
50, 'SortStr', 'descend');
findpeaks(cc,xaxism,'MinPeakHeight',-50)
title('Deteksi Jarak')
xlabel('Jarak(m)', 'FontSize',12)
vlabel('Amplitudo(dB)', 'FontSize',12)
grid on
%Plot Kecepatan dan Jarak dalam Satu Figure
dop img=fft(divk.',Nc);
range img=ifft(dop img.',Nc);
dat img=(abs(range img)).^2;
sbx =
(((1:length(dat img(1,:)))/length(dat img(1,:))))*(Vrmax);
sby=((1:length(dat img(:,1)))/length(dat img(:,1)))*max rang
e;
figure(3)
imagesc(sbx,sby,dat img)
title('Plot Ambiguitas','FontSize',14)
xlabel('Kecepatan(m/s)', 'FontSize',12)
ylabel('Jarak(m)', 'FontSize', 12)
R=(rxs*rxs')/length(rxs); %matriks kovarian
[V,N]=eig(R); %eigenvector(V) dan eigenvalue(N)
N = diag(N);
NN=V(:,1:3); %noise subspace
theta = 0:1:180;
SS = zeros(1,length(Mr));
     for ii=1:length(theta)
         for jj=1:Mr
             SS(jj,ii) = exp(-j*jj*pi*cos(theta(ii)*pi/180));
%steering vector
         end
     end
     for kk = 1:length(theta)
         PP(kk)=SS(:,kk).'*NN*NN.'*SS(:,kk);
     end
Pmusic=abs(1./PP); %algoritma music
Pmusic = 10*loq10(Pmusic/max(Pmusic)); %Spatial spectrum
function
figure(4)
plot(0:180, Pmusic, 'k-')
```

```
title('Deteksi DoA Menggunakan Algoritma
MUSIC','FontSize',14)
legend('MIMO')
xlabel('sudut \theta (degree)','FontSize',12)
ylabel('Amplitudo(dB)','FontSize',12)
xlim([0 180])
```

## B. Script Simulasi MIMO-IOFDM Model Wiesbeck

```
%Membangkitkan Data
Data = randint(1,Nsym*Nc,M);
map data=(1/4) *modulate(modem.pskmod(M,pi/4),Data);
% scatterplot(map data),grid;
par data=reshape(map data,Nc,[]);
Tx1a=par data;Tx2a=par data;Tx3a=par data;Tx4a=par data;
%Proses Tx1
for i = 5:8:Nc;
    Tx1a(i,:)=0;
end
Ch Tx1 = par data-Tx1a;
%IFFT
ifft Tx1 = ifft(Ch Tx1,Nc);
cp Tx1=[ifft Tx1((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx1];
Tx1=reshape(cp Tx1,1,[]);
응응
%Proses Tx2
for i = 6:8:Nc;
    Tx2a(i,:)=0;
end
Ch Tx2 = par data-Tx2a;
%IFFT
ifft Tx2 = ifft(Ch Tx2,Nc);
cp_Tx2=[ifft_Tx2((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft_Tx2];
Tx2=reshape(cp Tx2, 1, []);
응응
%Proses Tx3
for i = 7:8:Nc;
    Tx3a(i,:)=0;
end
Ch Tx3 = par data-Tx3a;
%IFFT
ifft Tx3 = ifft(Ch_Tx3,Nc);
cp Tx3=[ifft Tx3((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx3];
Tx3=reshape(cp Tx3,1,[]);
응응
%Proses Tx4
for i = 8:8:Nc;
    Tx4a(i,:)=0;
end
```

```
Ch Tx4 = par data-Tx4a;
%IFFT
ifft Tx4 = ifft(Ch Tx4,Nc);
cp Tx4=[ifft Tx4((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx4];
Tx\overline{4}=reshape(cp Tx4,1,[]);
응응
Tx = Tx1+Tx2+Tx3+Tx4;
Td1 = 2*(R(1)/c);
Tb1 = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzeros1 = round (Td1/Tb1);
Ptot delay1 = [zeros(1,Nzeros1),Tx];
Ptot delay1 = Ptot delay1(1:length(Tx));
Td2 = 2*(R(2)/c);
Tb2 = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzeros2 = round(Td2/Tb2);
Ptot delay2 = [zeros(1,Nzeros2),Tx];
Ptot delay2 = Ptot delay2(1:length(Tx));
Ptot delay=[Ptot delay1;Ptot delay2];
% Pemodelan Kecepatan Target
t=(0:length(Ptot delay)-1)./(Nc);
for r=1:n;
    fd(r) = 2 * Vr(r) / lamda;
end
for k=1:n;
    %doppler
dop ef(k,:)=Ptot delay(k,:).*exp(1j*2*pi*t*(fd(k))*Ttotal);
end
dat utama = dop ef(1, :) + dop ef(2, :);
응응
%Interferer
%Membangkitkan Data Interferer
map data int= (1/4)*sqrt(1/SIR)*pskmod(Data,M);
par data int=reshape(map data int,Nc,[]);
Tx1a int=par data int;Tx2a int=par data int;Tx3a int=par dat
a int; Tx4a int=par data int;
88
%Proses Tx1
for i = 1:8:Nc;
    Tx1a int(i,:)=0;
end
Ch Tx1 int = par data int-Tx1a int;
%IFFT
ifft Tx1 int = ifft(Ch Tx1 int,Nc);
cp Tx1 int=[ifft Tx1 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx1 int];
```

```
Tx1 int=reshape(cp Tx1 int,1,[]);
응응
%Proses Tx2 Interferer
for i = 2:8:Nc:
    Tx2a int(i,:)=0;
end
Ch Tx2 int = par data int-Tx2a int;
81777
ifft Tx2 int = ifft(Ch Tx2 int,Nc);
cp Tx2 int=[ifft Tx2 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx2 int];
Tx2 int=reshape(cp Tx2 int,1,[]);
88
%Proses Tx3 Interferer
for i = 3:8:Nc;
    Tx3a int(i,:)=0;
end
Ch Tx3 int = par data int-Tx3a int;
%IFFT
ifft Tx3 int = ifft(Ch Tx3 int,Nc);
cp Tx3 int=[ifft Tx3 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx3 int];
Tx3 int=reshape(cp Tx3 int,1,[]);
응응
%Proses Tx4
for i = 4:8:Nc;
    Tx4a int(i,:)=0;
end
Ch Tx4 int = par data int-Tx4a int;
%TFFT
ifft Tx4 int = ifft(Ch Tx4 int,Nc);
cp Tx4 int=[ifft Tx4 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx4 int];
Tx4 int=reshape(cp Tx4 int,1,[]);
응응
Tx int=Tx1 int+Tx2 int+Tx3 int+Tx4 int;
응응
%Pemodelan Interferer
%Parameter Jarak Interferer
Rint=80;
%Parameter Kecepatan Interferer
Vrint = 80;
n=1;
응응
% Pemodelan Jarak Interferer
fdint=Vrint/lamda;
Tdint = (Rint/c);
Tbint = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzerosint = round(Tdint/Tbint);
Ptot delayint = [zeros(1, Nzerosint), Tx int];
Ptot delayint = Ptot delayint(1:length(Tx int));
```

```
% Pemodelan Kecepatan Interferer
t=(0:length(Ptot delayint)-1)./(Nc);
for r=1:n;
    fdint(r)=Vrint(r)/lamda:
end
for k=1:n;
    %doppler
dop ef int(k,:)=Ptot delayint(k,:).*exp(1j*2*pi*t*fdint*Ttot
al);
end
deretteta = sudut/180*pi; %skenario sudut kedatangan (DoA)
Mr=16;
s = length(deretteta);
for m=1:s
    Ax(m,:)=exp(-li*pi*cos(deretteta(m))*([0:Mr-1]));
end
A = Ax';
rxs = A*[dop ef(1,:);dop ef(2,:);dop ef int(1,:)]; %sinyal
dengan informasi sudut
dat = sum(rxs);
88
aa = 5:8:Nc;bb = 6:8:Nc;cc = 7:8:Nc;dd = 8:8:Nc;
de intlvd = [aa bb cc dd].';
de intlvd = sortrows(de intlvd).';
%Antena Penerima
par rx1=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx1=[par rx1((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx1=fft(cp rem Tx1,Nc);
fft data a rx1=fft data rx1;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx1(i,:)=0;
end
demod de rx1 = fft data a rx1-fft data rx1;
div = (demod de rx1)./par data;
hamm div j = hamming(1024) * ones(1, Nsym);
ham div k = (ones(1,1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
divk = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb1=10*log10(square/pp);
```

```
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc1=10*log10(sgu/pp);
%Antena Penerima Kedua
par rx2=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx2=[par rx2((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx2=fft(cp rem Tx2,Nc);
fft data a rx2=fft data rx2;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx2(i,:)=0;
end
demod de rx2 = fft data a rx2-fft data rx2;
div = (demod de rx2)./par data;
hamm div j = hamming(1024) * ones(1, Nsym);
ham \operatorname{div} \overline{k} = (\operatorname{ones}(1, 1024).'*\operatorname{hamming}(\operatorname{Nsym}).').*\operatorname{hamm} \operatorname{div} j;
divk = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb2=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc2=10*log10(squ/pp);
응응
%Antena Penerima Ketiga
par rx3=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx3=[par rx3((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx3=fft(cp rem Tx3,Nc);
fft data a rx3=fft data rx3;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx3(i,:)=0;
end
```

```
demod de rx3 = fft data a rx3-fft data rx3;
div = (demod de rx3)./par data;
hamm div j = hamming(1024) * ones(1, Nsym);
ham div k = (ones(1,1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
divk = div.*ham div k;
divm = div.*ham_div_k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb3=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc3=10*log10(squ/pp);
%Antena Penerima Keempat
par rx4=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx4=[par rx4((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx4=fft(cp rem Tx4,Nc);
fft data a rx4=fft data rx4;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx4(i,:)=0;
end
demod de rx4 = fft data a rx4-fft data rx4;
div = (demod de rx4)./par data;
hamm div j = hamming(1024) * ones(1, Nsym);
ham div k = (ones(1, 1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
divk = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb4=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
```

```
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc4=10*log10(squ/pp);
응응
bb=bb1+bb2+bb3+bb4;
cc=cc1+cc2+cc3+cc4;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
figure(1)
[Vmax,vmax] = findpeaks(bb,xaxis, 'MinPeakHeight',-
50, 'SortStr', 'descend');
findpeaks(bb, xaxis, 'MinPeakHeight', -50)
title('Deteksi Kecepatan')
xlabel('Kecepatan(m/s)', 'FontSize',12)
ylabel('Jarak(m)', 'FontSize', 12)
text(vmax+.3, Vmax,num2str((1:numel(Vmax))'))
grid on
figure(2)
[Rmax,rmax] = findpeaks(cc,xaxism, 'MinPeakHeight',-
50, 'SortStr', 'descend');
findpeaks(cc,xaxism,'MinPeakHeight',-50)
title('Deteksi Jarak')
xlabel('Jarak(m)', 'FontSize',12)
ylabel('Amplitudo(dB)', 'FontSize', 12)
arid on
% Plot Kecepatan dan Jarak dalam Satu Figure
dop img=fft(divk.',Nc);
range_img=ifft(dop_img.',Nc);
dat img=(abs(range img)).^2;
sbx =
(((1:length(dat img(1,:)))/length(dat img(1,:))))*(Vrmax);
sby=((1:length(dat img(:,1)))/length(dat img(:,1)))*max rang
e;
figure(3)
imagesc(sbx,sby,dat img)
title('Plot Ambiguitas', 'FontSize',14)
xlabel('Kecepatan(m/s)', 'FontSize', 12)
ylabel('Jarak(m)', 'FontSize',12)
R=(rxs*rxs')/length(rxs); %matriks kovarian
[V,N]=eig(R); %eigenvector(V) dan eigenvalue(N)
N = diaq(N);
NN=V(:,1:3); %noise subspace
theta = 0:1:180;
SS = zeros(1,length(Mr));
     for ii=1:length(theta)
```

```
for jj=1:Mr
             SS(jj,ii) = exp(-j*jj*pi*cos(theta(ii)*pi/180));
end
     end
     for kk = 1:length(theta)
         PP(kk)=SS(:,kk).'*NN*NN.'*SS(:,kk);
     end
Pmusic=abs(1./PP); %algoritma music
Pmusic = 10*log10(Pmusic/max(Pmusic));
figure(4)
plot(0:180, Pmusic, 'k-')
title('Deteksi DoA Menggunakan Algoritma
MUSIC', 'FontSize', 14)
legend('MIMO','SISO')
xlabel('sudut \theta (degree)', 'FontSize', 12)
vlabel('Amplitudo(dB)', 'FontSize',12)
```

```
xlim([0 180])
```

### C. Script Simulasi MIMO-IOFDM Model Yoke

```
%Membangkitkan Data
Data = randint(1,Nsym*Nc,M);
map data=(1/4)*modulate(modem.pskmod(M,pi/4),Data);
par data=reshape(map data,Nc,[]);
Tx1a=par data;Tx2a=par data;Tx3a=par data;Tx4a=par data;
88
%Proses Tx1
for i = 1:8:Nc;
    Tx1a(i,:)=0;
end
Ch Tx1 = par data-Tx1a;
%IFFT
ifft Tx1 = ifft(Ch Tx1,Nc);
cp Tx1=[ifft Tx1((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx1];
Tx1=reshape(cp Tx1,1,[]);
응응
%Proses Tx2
for i = 2:8:Nc;
    Tx2a(i,:)=0;
end
Ch Tx2 = par data-Tx2a;
%IFFT
ifft_Tx2 = ifft(Ch_Tx2,Nc);
cp Tx2=[ifft Tx2((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx2];
Tx2=reshape(cp Tx2, 1, []);
응응
```

```
%Proses Tx3
for i = 5:8:Nc;
    Tx3a(i,:)=0;
end
Ch Tx3 = par data-Tx3a;
%TFFT
ifft Tx3 = ifft(Ch Tx3,Nc);
cp Tx3=[ifft Tx3((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx3];
Tx3=reshape(cp Tx3,1,[]);
응응
%Proses Tx4
for i = 6:8:Nc;
    Tx4a(i,:)=0;
end
Ch Tx4 = par data-Tx4a;
%TFFT
ifft Tx4 = ifft(Ch Tx4,Nc);
cp Tx4=[ifft Tx4((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx4];
Tx4=reshape(cp Tx4,1,[]);
Tx = Tx1+Tx2+Tx3+Tx4;
Td1 = 2*(R(1)/c);
Tb1 = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzeros1 = round (Td1/Tb1);
Ptot delay1 = [zeros(1,Nzeros1),Tx];
Ptot delay1 = Ptot delay1(1:length(Tx));
Td2 = 2*(R(2)/c);
Tb2 = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzeros2 = round(Td2/Tb2);
Ptot delay2 = [zeros(1,Nzeros2),Tx];
Ptot delay2 = Ptot delay2(1:length(Tx));
Ptot delay=[Ptot delay1;Ptot delay2];
% Pemodelan Kecepatan Target
t=(0:length(Ptot delay)-1)./(Nc);
for r=1:n;
    fd(r) = 2*Vr(r)/lamda;
end
for k=1:n;
    %doppler
dop ef(k,:)=Ptot delay(k,:).*exp(1j*2*pi*t*(fd(k))*Ttotal);
end
dat utama = dop ef(1,:)+dop ef(2,:);
응응
%Interferer
%Membangkitkan Data Interferer
```

```
map data int= (1/4)*sqrt(1/SIR)*pskmod(Data,M);
par data int=reshape(map data int,Nc,[]);
Tx1a int=par data int;Tx2a int=par data int;Tx3a int=par dat
a int; Tx4a int=par data int;
22
%Proses Tx1
for i = 3:8:Nc;
    Tx1a int(i,:)=0;
end
Ch Tx1 int = par data int-Tx1a int;
%IFFT
ifft Tx1 int = ifft(Ch Tx1 int,Nc);
cp Tx1 int=[ifft Tx1 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx1 int];
Tx1 int=reshape(cp Tx1 int,1,[]);
응응
%Proses Tx2 Interferer
for i = 4:8:Nc;
    Tx2a int(i,:)=0;
end
Ch_Tx2_int = par_data_int-Tx2a int;
%IFFT
ifft Tx2 int = ifft(Ch Tx2 int,Nc);
cp Tx2 int=[ifft Tx2 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx2 int];
Tx2 int=reshape(cp Tx2 int,1,[]);
응응
%Proses Tx3 Interferer
for i = 7:8:Nc;
    Tx3a int(i,:)=0;
end
Ch Tx3 int = par data int-Tx3a int;
%IFFT
ifft Tx3 int = ifft(Ch Tx3 int,Nc);
cp Tx3 int=[ifft Tx3 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx3 int];
Tx3 int=reshape(cp Tx3 int,1,[]);
응응
%Proses Tx4
for i = 8:8:Nc;
    Tx4a int(i,:)=0;
end
Ch Tx4 int = par data int-Tx4a int;
%IFFT
ifft Tx4 int = ifft(Ch Tx4 int,Nc);
cp Tx4 int=[ifft Tx4 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx4 int];
Tx4 int=reshape(cp_Tx4_int,1,[]);
응응
Tx int=Tx1 int+Tx2 int+Tx3 int+Tx4 int;
응응
%Pemodelan Interferer
%Parameter Jarak Interferer
Rint=80;
```

```
%Parameter Kecepatan Interferer
Vrint = 80;
n=1;
응응
% Pemodelan Jarak Interferer
fdint=Vrint/lamda:
Tdint = (Rint/c);
Tbint = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzerosint = round(Tdint/Tbint);
Ptot delayint = [zeros(1, Nzerosint), Tx int];
Ptot delayint = Ptot delayint(1:length(Tx int));
% Pemodelan Kecepatan Interferer
t=(0:length(Ptot delayint)-1)./(Nc);
for r=1:n;
    fdint(r)=Vrint(r)/lamda;
end
for k=1:n;
    %doppler
dop ef int(k,:)=Ptot delayint(k,:).*exp(1j*2*pi*t*fdint*Ttot
al):
end
deretteta = sudut/180*pi; %skenario sudut kedatangan (DoA)
Mr=16;
s = length(deretteta);
for m=1:s
    Ax(m,:)=exp(-li*pi*cos(deretteta(m))*([0:Mr-1]));
end
A = Ax';
rxs = A*[dop ef(1,:);dop ef(2,:);dop ef int(1,:)]; %sinyal
dengan informasi sudut
dat = sum(rxs);
88
aa = 1:8:Nc;bb = 2:8:Nc;cc = 5:8:Nc;dd = 6:8:Nc;
de intlvd = [aa bb cc dd].';
de intlvd = sortrows(de_intlvd).';
%Antena Penerima
par rx1=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx1=[par rx1((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx1=fft(cp rem Tx1,Nc);
fft data a rx1=fft data rx1;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx1(i,:)=0;
end
demod de rx1 = fft data a rx1-fft data rx1;
div = (demod de rx1)./par data;
```

```
hamm div j = hamming(1024)*ones(1,Nsym);
ham \overline{\text{div } k} = (ones(1,1024).'*hamming(Nsym).').*hamm \overline{\text{div } j};
divk = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb1=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc1=10*log10(squ/pp);
%Antena Penerima Kedua
par rx2=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx2=[par rx2((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx2=fft(cp rem Tx2,Nc);
fft data a rx2=fft data rx2;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx2(i,:)=0;
end
demod de rx2 = fft data a rx2-fft data rx2;
div = (demod de rx2)./par data;
hamm div j = hamming(1024)*ones(1,Nsym);
ham div k = (ones(1, 1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
div\bar{k} = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb2=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc2=10*log10(squ/pp);
```

```
응응
%Antena Penerima Ketiga
par rx3=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx3=[par rx3((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx3=fft(cp rem Tx3,Nc);
fft data a rx3=fft data rx3;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx3(i,:)=0;
end
demod de rx3 = fft data a rx3-fft data rx3;
div = (demod de rx3)./par data;
hamm_div_j = hamming(1024) * ones(1,Nsym);
ham div k = (ones(1,1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
div\overline{k} = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb3=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc3=10*log10(squ/pp);
응응
%Antena Penerima Keempat
par rx4=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx4=[par rx4((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx4=fft(cp rem Tx4,Nc);
fft data a rx4=fft data rx4;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx4(i,:)=0;
end
demod de rx4 = fft data a rx4-fft data rx4;
div = (demod de rx4)./par data;
hamm div j = hamming(1024)*ones(1,Nsym);
ham div k = (ones(1,1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
divk = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
```

```
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb4=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc4=10*log10(squ/pp);
응응
bb=bb1+bb2+bb3+bb4;
cc=cc1+cc2+cc3+cc4;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
figure(1)
[Vmax,vmax] = findpeaks(bb,xaxis, 'MinPeakHeight',-
50, 'SortStr', 'descend');
findpeaks(bb, xaxis, 'MinPeakHeight', -50)
title('Deteksi Kecepatan')
xlabel('Kecepatan(m/s)', 'FontSize',12)
ylabel('Jarak(m)', 'FontSize', 12)
text(vmax+.3, Vmax,num2str((1:numel(Vmax))'))
grid on
figure(2)
[Rmax,rmax] = findpeaks(cc,xaxism, 'MinPeakHeight',-
50, 'SortStr', 'descend');
findpeaks(cc,xaxism,'MinPeakHeight',-50)
title('Deteksi Jarak')
xlabel('Jarak(m)', 'FontSize',12)
ylabel('Amplitudo(dB)', 'FontSize', 12)
grid on
%Plot Kecepatan dan Jarak dalam Satu Figure
dop img=fft(divk.',Nc);
range img=ifft(dop img.',Nc);
dat_img=(abs(range_img)).^2;
sbx =
(((1:length(dat img(1,:)))/length(dat img(1,:))))*(Vrmax);
sby=((1:length(dat img(:,1)))/length(dat img(:,1)))*max rang
e;
figure(3)
imagesc(sbx,sby,dat img)
title('Plot Ambiguitas', 'FontSize',14)
```

```
xlabel('Kecepatan(m/s)', 'FontSize',12)
ylabel('Jarak(m)', 'FontSize',12)
R=(rxs*rxs')/length(rxs); %matriks kovarian
[V,N]=eig(R); %eigenvector(V) dan eigenvalue(N)
N = diag(N);
NN=V(:,1:3); %noise subspace
theta = 0:1:180;
SS = zeros(1,length(Mr));
     for ii=1:length(theta)
         for jj=1:Mr
             SS(jj,ii) = exp(-j*jj*pi*cos(theta(ii)*pi/180));
         end
     end
     for kk = 1:length(theta)
         PP(kk) = SS(:, kk). '*NN*NN. '*SS(:, kk);
     end
Pmusic=abs(1./PP); %algoritma music
Pmusic = 10*log10(Pmusic/max(Pmusic)); %Spatial spectrum
function
figure(4)
plot(0:180, Pmusic, 'k-')
title('Deteksi DoA Menggunakan Algoritma
MUSIC', 'FontSize', 14)
xlabel('sudut \theta (degree)', 'FontSize', 12)
vlabel('Amplitudo(dB)', 'FontSize',12)
xlim([0 180])
```

#### D. Script Simulasi MIMO-IOFDM Menggunakan Subcarrier Acak

```
%Membangkitkan Data
Data = randint(1,Nsym*Nc,M);
map data=(1/4) *modulate(modem.pskmod(M,pi/4),Data);
par_data=reshape(map_data,Nc,[]);
Tx1a=par data;Tx2a=par data;Tx3a=par data;Tx4a=par data;
Txaa=randi(1024,8,128);
응응
Txaa1 = Txaa(1,:).';
Txaa1 = sortrows(Txaa1).';
%Proses Tx1
for i = Txaal;
    Tx1a(i,:)=0;
end
Ch Tx1 = par_data-Tx1a;
%IFFT
ifft Tx1 = ifft(Ch Tx1,Nc);
```

```
cp Tx1=[ifft Tx1((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx1];
Tx1=reshape(cp Tx1,1,[]);
응응
%Proses Tx2
Txaa2 = Txaa(2,:).';
Txaa2 = sortrows(Txaa2).';
for i = Txaa2;
    Tx2a(i,:)=0;
end
Ch Tx2 = par data-Tx2a;
%⊺₽₽Т&
ifft Tx2 = ifft(Ch Tx2,Nc);
cp Tx2=[ifft Tx2((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx2];
Tx2=reshape(cp Tx2,1,[]);
응응
Txaa3 = Txaa(3,:).';
Txaa3 = sortrows(Txaa3).';
%Proses Tx3
for i = Txaa(3,:);
    Tx3a(i,:)=0;
end
Ch Tx3 = par data-Tx3a;
%Hadamard Transform
%тттт%
ifft Tx3 = ifft(Ch Tx3,Nc);
cp Tx3=[ifft Tx3((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx3];
Tx3=reshape(cp Tx3,1,[]);
응응
Txaa4 = Txaa(4,:).';
Txaa4 = sortrows(Txaa4).';
%Proses Tx4
for i = Txaa4;
    Tx4a(i,:)=0;
end
Ch Tx4 = par data-Tx4a;
81777
ifft Tx4 = ifft(Ch Tx4,Nc);
cp Tx4=[ifft Tx4((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx4];
Tx4=reshape(cp_Tx4,1,[]);
응응
Tx=Tx1+Tx2+Tx3+Tx4;
응응
%Pemodelan Target
%Parameter Jarak Target
% R=[20 30];
%Parameter Kecepatan Target
% Vr = [20 35];
응응
```

```
% Pemodelan Jarak Target
Td1 = 2*(R(1)/c);
Tb1 = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzeros1 = round(Td1/Tb1);
Ptot delay1 = [zeros(1,Nzeros1),Tx];
Ptot delay1 = Ptot delay1(1:length(Tx));
Td2 = 2*(R(2)/c);
Tb2 = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzeros2 = round(Td2/Tb2);
Ptot delay2 = [zeros(1,Nzeros2),Tx];
Ptot delay2 = Ptot delay2(1:length(Tx));
Ptot delay=[Ptot delay1;Ptot delay2];
% Pemodelan Kecepatan Target
t=(0:length(Ptot delay)-1)./(Nc);
for r=1:n;
    fd(r) = 2*Vr(r)/lamda;
end
for k=1:n;
    %doppler
dop ef(k,:)=Ptot delay(k,:).*exp(1j*2*pi*t*(fd(k))*Ttotal);
end
dat utama = dop ef(1,:)+dop ef(2,:);
88
%Interferer
%Membangkitkan Data Interferer
map data int= (1/4)*sqrt(1/SIR)*pskmod(Data,M);
par data int=reshape(map data int,Nc,[]);
Txla int=par data int;Tx2a int=par data int;Tx3a int=par dat
a int; Tx4a int=par data int;
응응
Txaa5 = Txaa(5,:).';
Txaa5 = sortrows(Txaa5).';
%Proses Tx1
for i = Txaa5;
    Tx1a int(i,:)=0;
end
Ch Tx1 int = par data int-Tx1a int;
%IFFT
ifft Tx1 int = ifft(Ch Tx1 int,Nc);
cp Tx1 int=[ifft Tx1 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx1 int];
Tx1 int=reshape(cp Tx1 int,1,[]);
응응
Txaa6 = Txaa(6,:).';
Txaa6 = sortrows(Txaa6).';
%Proses Tx2 Interferer
for i = Txaa6;
```

```
Tx2a int(i,:)=0;
end
Ch Tx2 int = par data int-Tx2a int;
%IFFT
ifft Tx2 int = ifft(Ch Tx2 int,Nc);
cp Tx2 int=[ifft Tx2 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx2 int];
Tx2 int=reshape(cp Tx2 int,1,[]);
응응
Txaa7 = Txaa(7,:).';
Txaa7 = sortrows(Txaa7).';
%Proses Tx3 Interferer
for i = Txaa7;
    Tx3a int(i,:)=0;
end
Ch Tx3 int = par data int-Tx3a int;
81777
ifft Tx3 int = ifft(Ch Tx3 int,Nc);
cp Tx3 int=[ifft Tx3 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx3 int];
Tx3 int=reshape(cp Tx3 int,1,[]);
응응
Txaa8 = Txaa(8,:).';
Txaa8 = sortrows(Txaa8).';
%Proses Tx4
for i = Txaa8;
    Tx4a int(i,:)=0;
end
Ch Tx4 int = par data int-Tx4a int;
%TFFT
ifft Tx4 int = ifft(Ch Tx4 int,Nc);
cp Tx4 int=[ifft_Tx4_int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft_Tx4_int];
Tx4 int=reshape(cp Tx4 int,1,[]);
응응
Tx int=Tx1 int+Tx2 int+Tx3 int+Tx4 int;
응응
%Pemodelan Interferer
%Parameter Jarak Interferer
Rint=80;
%Parameter Kecepatan Interferer
Vrint = 80;
n=1;
응응
% Pemodelan Jarak Interferer
fdint=Vrint/lamda;
Tdint = (Rint/c);
Tbint = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzerosint = round(Tdint/Tbint);
Ptot delayint = [zeros(1,Nzerosint),Tx int];
Ptot delayint = Ptot delayint(1:length(Tx int));
```

```
% Pemodelan Kecepatan Interferer
t=(0:length(Ptot delayint)-1)./(Nc);
for r=1:n;
    fdint(r)=2*Vrint(r)/lamda;
end
for k=1:n;
    %doppler
dop ef int(k,:)=Ptot delayint(k,:).*exp(1j*2*pi*t*fdint*Ttot
al);
end
응응
% sudut=[90 90 110];
deretteta = sudut/180*pi; %skenario sudut kedatangan (DoA)
Mr=16:
s = length(deretteta);
for m=1:s
    Ax(m,:)=exp(-li*pi*cos(deretteta(m))*([0:Mr-1]));
end
A = Ax';
rxs = A*[dop ef(1,:);dop ef(2,:);dop ef int(1,:)]; %sinyal
dengan informasi sudut
dat = sum(rxs);
응응
aa = Txaa1;bb = Txaa2;cc = Txaa3;dd = Txaa4;
de intlvd = [aa bb cc dd].';
de intlvd = sortrows(de intlvd).';
%Antena Penerima
par rx1=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx1=[par rx1((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx1=fft(cp rem Tx1,Nc);
fft data a rx1=fft data rx1;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data_rx1(i,:)=0;
end
demod de rx1 = fft data a rx1-fft data rx1;
div = (demod de rx1)./par data;
hamm div j = hamming(1024)*ones(1,Nsym);
ham div k = (ones(1,1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
divk = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
```

```
pp=norma(square);
bb1=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc1=10*log10(sgu/pp);
%Antena Penerima Kedua
par rx2=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx2=[par rx2((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx2=fft(cp rem Tx2,Nc);
fft data a rx2=fft data rx2;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx2(i,:)=0;
end
demod de rx2 = fft data a rx2-fft data rx2;
div = (demod de rx2)./par data;
hamm div j = hamming(1024) *ones(1, Nsym);
ham div k = (ones(1,1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
divk = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb2=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc2=10*log10(squ/pp);
응응
%Antena Penerima Ketiga
par rx3=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx3=[par rx3((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx3=fft(cp rem Tx3,Nc);
fft data a rx3=fft data rx3;
%de MIMO
```

```
for i = de intlvd;
    fft data rx3(i,:)=0;
end
demod de rx3 = fft data a rx3-fft data rx3;
div = (demod de rx3)./par data;
hamm div j = hamming(1024) *ones(1, Nsym);
ham \overline{\text{div} k} = (\text{ones}(1, 1024).'*\text{hamming}(\text{Nsym}).').*\text{hamm div };
div\overline{k} = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb3=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc3=10*log10(squ/pp);
응응
%Antena Penerima Keempat
par rx4=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx4=[par rx4((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data rx4=fft(cp rem Tx4,Nc);
fft data a rx4=fft data rx4;
%de MIMO
for i = de intlvd;
    fft data rx4(i,:)=0;
end
demod de rx4 = fft data a rx4-fft data rx4;
div = (demod de rx4)./par_data;
hamm div j = hamming(1024) * ones(1, Nsym);
ham div k = (ones(1,1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
divk = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:))) *Vrmax;
pp=norma(square);
bb4=10*log10(square/pp);
```

```
%Pemrosesan Jarak
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc4=10*log10(sgu/pp);
응응
bb=bb1+bb2+bb3+bb4;
cc=cc1+cc2+cc3+cc4;
xaxis=((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
figure(1)
[Vmax,vmax] = findpeaks(bb,xaxis, 'MinPeakHeight',-
120, 'SortStr', 'descend');
findpeaks(bb, xaxis, 'MinPeakHeight', -120)
title('Deteksi Kecepatan')
xlabel('Kecepatan(m/s)', 'FontSize',12)
ylabel('Amplitudo(dB)', 'FontSize',12)
text(vmax+.3, Vmax,num2str((1:numel(Vmax))'))
grid on
figure(2)
[Rmax,rmax] = findpeaks(cc,xaxism, 'MinPeakHeight',-
10, 'SortStr', 'descend');
findpeaks(cc,xaxism,'MinPeakHeight',-10)
title('Deteksi Jarak')
xlabel('Jarak(m)', 'FontSize', 12)
ylabel('Amplitudo(dB)', 'FontSize', 12)
grid on
%Plot Kecepatan dan Jarak dalam Satu Figure
dop img=fft(divk.',Nc);
range img=ifft(dop img.',Nc);
dat img=(abs(range img)).^2;
sbx =
(((1:length(dat img(1,:)))/length(dat img(1,:))))*(Vrmax);
sby=((1:length(dat img(:,1)))/length(dat img(:,1)))*max rang
e;
figure(3)
imagesc(sbx,sby,dat img)
title('Plot Ambiguitas', 'FontSize',14)
xlabel('Kecepatan(m/s)', 'FontSize',12)
ylabel('Jarak(m)', 'FontSize',12)
R=(rxs*rxs')/length(rxs); %matriks kovarian
[V,N]=eig(R); %eigenvector(V) dan eigenvalue(N)
N = diaq(N);
NN=V(:,1:2); %noise subspace
theta = 0:1:180;
```

```
SS = zeros(1,length(Mr));
     for ii=1:length(theta)
         for jj=1:Mr
             SS(jj,ii)=exp(-j*jj*pi*cos(theta(ii)*pi/180));
         end
     end
     for kk = 1:length(theta)
         PP(kk)=SS(:,kk).'*NN*NN.'*SS(:,kk);
     end
Pmusic=abs(1./PP); %algoritma music
Pmusic = 10*log10(Pmusic/max(Pmusic));
figure(4)
plot(0:180, Pmusic, 'k-')
title('Deteksi DoA Menggunakan Algoritma
MUSIC', 'FontSize', 14)
legend('MIMO','SISO')
xlabel('sudut \theta (degree)', 'FontSize', 12)
ylabel('Amplitudo(dB)', 'FontSize', 12)
xlim([0 180])
```

#### E. Script Simulasi OFDM SISO

```
%Membangkitkan Data
Data = randint(1,Nsym*Nc,M);
map data=modulate(modem.pskmod(M,pi/4),Data);
par data=reshape(map data,Nc,[]);
                                                      %Serial
to parallel
%IFFT
ifft Ch = ifft(par data, Nc);
cp Ch=[ifft Ch((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Ch];
Tx=reshape(cp Ch,1,[]);
응응
%Pemodelan Target
%Parameter Jarak Target
R=[20 30];
%Parameter Kecepatan Target
Vr = [20 \ 35];
응응
% Pemodelan Jarak Target
Td1 = 2*(R(1)/c);
Tb1 = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzeros1 = round (Td1/Tb1);
Ptot delay1 = [zeros(1,Nzeros1),Tx];
Ptot delay1 = Ptot delay1(1:length(Tx));
Td2 = 2*(R(2)/c);
```

```
Tb2 = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzeros2 = round (Td2/Tb2);
Ptot delay2 = [zeros(1,Nzeros2),Tx];
Ptot delay2 = Ptot delay2(1:length(Tx));
Ptot delay=[Ptot delay1;Ptot delay2];
% Pemodelan Kecepatan Target
t=(0:length(Ptot delay)-1)./(Nc);
for r=1:n;
    fd(r) = 2 * Vr(r) / lamda;
end
for k=1:n;
    %doppler
dop ef(k,:)=Ptot delay(k,:).*exp(1j*2*pi*t*(fd(k))*Ttotal);
end
응응
dat=dop ef(1,:)+dop ef(2,:);
응응
%Interferer
%Membangkitkan Data Interferer
map data int= (1/4)*sqrt(1/SIR)*pskmod(Data,M);
par data int=reshape(map data int,Nc,[]);
Tx1a int=par data int;Tx2a int=par data int;Tx3a int=par dat
a int; Tx4a int=par data int;
88
%Proses Tx1
for i = 1:8:Nc;
    Tx1a int(i,:)=0;
end
Ch Tx1 int = par data int-Tx1a int;
TTT
ifft Tx1 int = ifft(Ch Tx1 int,Nc);
cp Tx1 int=[ifft Tx1 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx1 int];
Tx1_int=reshape(cp_Tx1_int,1,[]);
응응
%Proses Tx2 Interferer
for i = 2:8:Nc;
    Tx2a int(i,:)=0;
end
Ch Tx2 int = par data int-Tx2a int;
%IFFT
ifft Tx2 int = ifft(Ch Tx2 int,Nc);
cp Tx2 int=[ifft Tx2 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx2 int];
Tx2 int=reshape(cp Tx2 int,1,[]);
응응
%Proses Tx3 Interferer
```

```
for i = 3:8:Nc;
    Tx3a int(i,:)=0;
end
Ch Tx3 int = par data int-Tx3a int;
%TFFT
ifft Tx3 int = ifft(Ch Tx3 int,Nc);
cp Tx3 int=[ifft Tx3 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx3 int];
Tx3 int=reshape(cp Tx3 int,1,[]);
응응
%Proses Tx4
for i = 4:8:Nc;
    Tx4a int(i,:)=0;
end
Ch Tx4 int = par data int-Tx4a int;
응 T 두 두 ㅜ
ifft Tx4 int = ifft(Ch Tx4 int,Nc);
cp Tx4 int=[ifft Tx4 int((Nc-Ncp+1):Nc,:) ;ifft Tx4 int];
Tx4 int=reshape(cp Tx4 int,1,[]);
응응
Tx int=Tx1 int+Tx2 int+Tx3 int+Tx4 int;
88
%Pemodelan Interferer
%Parameter Jarak Interferer
Rint=80;
%Parameter Kecepatan Interferer
Vrint = 80;
n=1;
응응
% Pemodelan Jarak Interferer
fdint=Vrint/lamda;
Tdint = (Rint/c);
Tbint = Ttotal/(Nc+Ncp);
Nzerosint = round(Tdint/Tbint);
Ptot delayint = [zeros(1,Nzerosint),Tx int];
Ptot delayint = Ptot delayint(1:length(Tx int));
% Pemodelan Kecepatan Interferer
t=(0:length(Ptot delayint)-1)./(Nc);
for r=1:n;
    fdint(r)=Vrint(r)/lamda;
end
for k=1:n;
    %doppler
dop ef int(k,:)=Ptot delayint(k,:).*exp(1j*2*pi*t*fdint*Ttot
al);
end
```

```
응응
dat int=dop ef int(1,:);
dat=dat+dat int;
응응
%Antena Penerima
par rx=reshape(dat,Nc+Ncp,[]);
cp rem Tx1=[par rx((Ncp+1):(Nc+Ncp),:)];
fft data=fft(cp rem Tx1,Nc);
div = (fft data)./par data;
hamm div j = hamming(1024) * ones(1, Nsym);
ham div k = (ones(1, 1024).'*hamming(Nsym).').*hamm div j;
div\bar{k} = div.*ham div k;
divm = div.*ham div k;
%Pemrosesan Antena
%Pemrosesan Kecepatan
dop=fft(divk.',Nc);
square=(abs(dop)).^2;
xaxis=8*((1:length(square(1,:)))/length(square(1,:)))*Vrmax;
pp=norma(square);
bb=10*log10(square/pp);
%Pemrosesan Jarak
divm=fft data./par data;
range=ifft(divm,1.79*Nc);
squ=(abs(range)).^2;
xaxism=((1:length(squ(:,1)))/length(squ(:,1)))*max range;
pp=norma(squ);
cc=10*log10(squ/pp);
```

# LAMPIRAN C PLOT AMBIGUITAS DAN DOA MIMO-OFDM MODEL WIESBECK VARIASI JUMLAH TARGET



Gamabar C1. Plot Ambiguitas 4 Target



Gamabar C2. Plot Deteksi DoA 4 Target



Gamabar C3. Plot Ambiguitas 6 Target



Gamabar C4. Plot Deteksi DoA 6 Target


Gamabar C5. Plot Ambiguitas 8 Target



Gamabar C6. Plot Deteksi DoA 8 Target



Gamabar C7. Plot Ambiguitas 10 Target





Gamabar C9. Plot Ambiguitas 12 Target



Gamabar C10. Plot Deteksi DoA 12 Target



Gamabar C11. Plot Ambiguitas 14 Target



Gamabar C12. Plot Deteksi DoA 14 Target



Gamabar C13. Plot Ambiguitas 16 Target



Gamabar C14. Plot Deteksi DoA 16 Target

[Halaman ini sengaja dikosongkan]