



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGURANGAN BIT ERROR PADA MODULASI M-QAM
DALAM KANAL RAYLEIGH FADING DENGAN TEKNIK
SPATIAL MULTIPLEXING DAN METODE ZF-SIC,
MMSE-SIC, MAXIMUM LIKELIHOOD**

TESIS

SRI HARTANTO

0806424674

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM PASCA SARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
DEPOK
DESEMBER 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGURANGAN BIT ERROR PADA MODULASI M-QAM
DALAM KANAL RAYLEIGH FADING DENGAN TEKNIK
SPATIAL MULTIPLEXING DAN METODE ZF-SIC,
MMSE-SIC, MAXIMUM LIKELIHOOD**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

**SRI HARTANTO
0806424674**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM PASCA SARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
DEPOK
DESEMBER 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Makalah tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Sri Hartanto

NPM : 0806424674

Tanda Tangan : 

Tanggal : 17 Desember 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Sri Hartanto

NPM : 0806424674

Program Studi : S-2 Teknik Elektro / Kekhususan S-2 Teknik Telekomunikasi

Judul Tesis : Pengurangan Bit Error Pada Modulasi M-QAM Dalam Kanal Rayleigh Fading Dengan Teknik Spatial Multiplexing Dan Metode ZF-SIC, MMSE-SIC, Maximum Likelihood

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Kekhususan Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Arman D. Diponegoro..... 

Penguji : Prof. Dr. Ir. Dadang Gunawan, M.Eng. 

Penguji : Dr. Ir. Muhammad Asvial, M.Eng. 

Penguji : Filbert Hilman Juwono, S.T, M.T. 

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 23 Desember 2010

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis dengan judul :

PENGURANGAN BIT ERROR PADA MODULASI M-QAM DALAM KANAL RAYLEIGH FADING DENGAN TEKNIK SPATIAL MULTIPLEXING DAN METODE ZF-SIC, MMSE-SIC, MAXIMUM LIKELIHOOD

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Kekhususan Teknik Telekomunikasi, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam presentasi sidang tesis.

Depok, 17 Desember 2010

Dosen Pembimbing



Dr. Ir. Arman D Diponegoro
NIP. 194811131985031001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil ‘alamiin.

Segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala petunjuk, rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan makalah tesis dengan judul : “Pengurangan Bit Error Pada Modulasi M-QAM Dalam Kanal Rayleigh Fading Dengan Teknik Spatial Multiplexing Dan Metode ZF-SIC, MMSE-SIC, Maximum Likelihood”.

Makalah tesis yang penulis susun ini didasarkan pada Pedoman Teknis Penulisan Tugas Akhir Mahasiswa Universitas Indonesia dengan Keputusan Rektor Nomor 628/SK/R/UI/2008 dan teknis penulisan jurnal ilmiah IEEE. Makalah tesis ini dibuat untuk memenuhi persyaratan utama memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi S-2 Teknik Elektro / Kekhususan S-2 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia (UI). Tujuan dari penyusunan tesis ini adalah untuk mengurangi kemungkinan terjadinya *bit error* pada modulasi M-QAM dalam kanal Rayleigh Fading dengan menggunakan teknik *Spatial Multiplexing* di sisi pengirim dan metode ZF-SIC, MMSE-SIC, *Maximum Likelihood* di sisi penerima.

Akhirnya, penulis sampaikan ucapan terima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Arman D. Diponegoro sebagai Dosen Pembimbing Tesis yang telah membimbing penulis dalam menyelesaikan penyusunan makalah tesis ini, serta rekan Machbub yang telah meminjamkan program Matlab versi 7.6.0 (R2008a) original untuk pembuatan simulasi dengan pemrograman m-file.

Besar harapan penulis, makalah tesis yang penulis susun ini dapat bermanfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi di Indonesia, khususnya dalam bidang sistem komunikasi digital.

Depok, 17 Desember 2010

Penyusun,

Sri Hartanto
0806424674

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Sri Hartanto
NPM : 0806424674
Program Studi : S-2 Teknik Elektro / Kekhususan S-2 Teknik Telekomunikasi
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Pengurangan Bit Error Pada Modulasi M-QAM Dalam Kanal Rayleigh
Fading Dengan Teknik Spatial Multiplexing Dan Metode ZF-SIC,
MMSE-SIC, Maximum Likelihood**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya dengan meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 17 Desember 2010

Yang menyatakan



(Sri Hartanto)

ABSTRAK

Nama : Sri Hartanto
Program Studi : S2 Teknik Elektro / Kekhususan S2 Teknik Telekomunikasi
Judul : Pengurangan Bit Error Pada Modulasi M-QAM Dalam Kanal Rayleigh Fading Dengan Teknik Spatial Multiplexing Dan Metode ZF-SIC, MMSE-SIC, Maximum Likelihood

Sinyal yang diterima dari kanal komunikasi dengan modulasi M-QAM dapat berubah karena munculnya sejumlah bit yang salah (*error*). Penyebab terjadinya *bit error* dapat berupa interferensi, seperti *Rayleigh Fading* serta *noise*, seperti *Additive White Gaussian Noise (AWGN)*. Pengurangan *bit error* pada modulasi M-QAM dapat dilakukan dengan teknik *Spatial Multiplexing* di sisi pengirim dan metode pendeteksian dan penerimaan sinyal di sisi penerima. Terdapat beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya mengenai penerapan *Spatial Multiplexing* di sisi pengirim dan metode pendeteksian dan penerimaan sinyal di sisi penerima, seperti penelitian pada komunikasi CDMA dengan metode *OSIC*, *ZF* dan *Maximum Likelihood*. Selain itu, terdapat penelitian tentang *MMSE* dan penelitian mengenai penerapan metode *ZF-SIC* pada modulasi *BPSK*.

Permasalahan yang kemudian dihadapi dan menjadi pokok bahasan dalam penulisan tesis ini adalah bagaimana memaksimalkan pengurangan *bit error* hingga 10^{-4} atau mendekati 0 agar sinyal yang diterima dapat diterjemahkan (*decoding*) kembali dengan benar. Untuk itu, dalam tesis ini, diusulkan penggunaan teknik *Spatial Multiplexing* dengan metode pembatalan atau penekanan terus menerus sinyal interferensi yang terdapat pada sinyal yang diterima, yang diistilahkan dengan *Successive Interference Cancellation (SIC)* pada metode *ZF*, *MMSE* dan *Maximum Likelihood* serta lebih dimaksimalkan dengan menambahkan metode pemilihan sinyal gangguan terberat *MRC*. Penelitian dalam tesis ini meliputi penambahan data maksimum (*M*), pada 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, dan 64-QAM, serta peningkatan *Eb/No*.

Kata Kunci : M-QAM, *Rayleigh Fading*, *Spatial Multiplexing*

ABSTRACT

Name : Sri Hartanto
Study Program : S2 Electro Engineering / S2 Telecommunication Engineering
Title : Bit Error Reduction On M-QAM Modulation In Rayleigh Fading Channels With Spatial Multiplexing Techniques And ZF-SIC, MMSE-SIC, Maximum Likelihood Methods

Signals received from the channel of communication with M-QAM modulation may change due to the number of bit errors. The cause of bit errors can be interference, such as Rayleigh fading and noise, such as Additive White Gaussian Noise (AWGN). Reduction of bit error on M-QAM modulation can be performed with Spatial Multiplexing techniques on the sender and the method of detection and reception of signals at the receiver side. There are several previous studies conducted regarding the implementation of Spatial Multiplexing in the sender and the method of detection and reception of signals at the receiver side, such as research on CDMA communication with OSIC, ZF and Maximum Likelihood method. In addition, there is research on the MMSE and research on the application of the ZF-SIC in BPSK modulation.

The problem that then faced and became the subject of this thesis is how to maximize the reduction in bit errors up to 10^{-4} or close to 0 for a received signal can be decoding it correctly. Therefore, in this thesis, the proposed use of Spatial Multiplexing technique with the method of interference signals cancellation or suppression continuous contained in the received signal, which is called Successive Interference Cancellation (SIC) on the method of ZF, MMSE and Maximum Likelihood and further maximized by adding *weighting branch signal* selection method which is called MRC. Research in this thesis includes the addition of data maximum (M), on 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, and 64-QAM, and increasing Eb/No.

Key Word : M-QAM, Rayleigh Fading, Spatial Multiplexing

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
KATA PENGANTAR	vii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	viii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penulisan	4
1.4. Batasan Masalah	4
1.5. Sistematika Penulisan	5
2. LANDASAN TEORI	6
2.1. Karakteristik Komunikasi Digital	6
2.1.1. Data Rate Dan Bandwidth	6
2.1.2. Jumlah Bit Error	7
2.1.3. Kapasitas Kanal Komunikasi	8
2.1.4. Parameter Eb/No	9
2.2. Sistem Modulasi M-QAM	9
2.2.1. Penentuan Amplitudo Sinyal	11
2.2.2. Gray Mapping (Gray Coding)	12
2.2.3. Pengubahan Sinyal Digital Ke Sinyal Analog	15
2.2.4. Contoh Aplikasi Modulasi M-QAM	17

2.2.3. Perubahan Sinyal Digital Ke Sinyal Analog	15
2.2.4. Contoh Aplikasi Modulasi M-QAM	17
2.3. Gangguan Kanal Komunikasi	18
2.3.1. Noise AWGN	18
2.3.2. Interferensi Fading	19
2.4. Teknik Spasial Multiplexing	23
3. PERMODELAN SISTEM DAN PEMBUATAN SIMULASI	28
3.1. Tahapan Penelitian	28
3.2. Permodelan Sistem	29
3.3. Pembuatan Simulasi	31
3.3.1. Simulasi Proses Data Input	32
3.3.2. Simulasi Spasial Multiplexing	33
3.3.3. Simulasi Modulasi M-QAM	35
3.3.4. Simulasi Rayleigh Fading	36
3.3.5. Simulasi Penambahan AWGN	37
3.3.6. Simulasi Penerimaan Dan Pendeteksian Sinyal ZF-SIC	38
3.3.7. Simulasi Penerimaan Dan Pendeteksian Sinyal MMSE-SIC	43
3.3.8. Simulasi Penerimaan Dan Pendeteksian Sinyal Maximum Likelihood	47
4. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS	49
4.1. Parameter Simulasi	49
4.2. Hasil Simulasi	49
4.3. Analisis Hasil Simulasi	55
4.3.1. Analisis Pengurangan Bit Error Pada Metode ZF-SIC	56
4.3.2. Analisis Pengurangan Bit Error Pada Metode MMSE-SIC	58
4.3.3. Analisis Pengurangan Bit Error Pada Metode Maximum Likelihood	60
4.3.4. Analisis Pengurangan Bit Error Secara Keseluruhan	62
KESIMPULAN	63
DAFTAR REFERENSI	65

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Proses Modulasi M-QAM [6]	10
Gambar 2.2. Proses Demodulasi M-QAM [6]	10
Gambar 2.3. Konstelasi Sinyal 4-QAM	12
Gambar 2.4. Konstelasi Sinyal 8-QAM	13
Gambar 2.5. Konstelasi Sinyal 16-QAM	13
Gambar 2.6. Konstelasi Sinyal 32-QAM	14
Gambar 2.7. Konstelasi Sinyal 64-QAM	14
Gambar 2.8. Representasi Sudut Sinyal Dalam Konstelasi Gray Mapping	16
Gambar 2.9. Representasi Sinyal Analog Dari Data 1010 Pada 16-QAM	17
Gambar 2.10. Kanal AWGN [3]	19
Gambar 2.11. Fading Terjadi Pada Penerima Yang Diam [3]	20
Gambar 2.12. Fading Terjadi Pada Penerima Yang Bergerak [3]	22
Gambar 2.13. Fading Antara Pemancar Dan Penerima Bergerak [3]	23
Gambar 2.14. Kanal Fading [15]	24
Gambar 2.15. Spatial Multiplexing [14]	24
Gambar 2.16. Pemrosesan Bit Di Unit Pengirim	25
Gambar 3.1. Tahapan Penelitian	28
Gambar 3.2. Diagram Blok Sistem	30
Gambar 4.1. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No 4-QAM	51
Gambar 4.2. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No 8-QAM	51
Gambar 4.3. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No 16-QAM	52
Gambar 4.4. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No 32-QAM	51
Gambar 4.5. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No 64-QAM	52

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Modulasi 4-QAM	54
Tabel 4.2. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Modulasi 8-QAM	54
Tabel 4.3. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Modulasi 16-QAM	55
Tabel 4.4. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Modulasi 32-QAM	55
Tabel 4.5. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Modulasi 64-QAM	56
Tabel 4.6. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Pada Metode ZF-SIC	57
Tabel 4.7. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Pada Metode MMSE-SIC	59
Tabel 4.8. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Pada Metode Maximum Likelihood	60

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Modulasi digital telah dikembangkan penggunaannya secara luas dalam berbagai layanan komunikasi. Dengan modulasi digital, sinyal informasi dalam bentuk *binary digit* (bit-bit) dimodulasi dan dikirimkan melalui kanal komunikasi (saluran transmisi) untuk dapat disampaikan ke penerima. Idealnya, sesampainya di penerima, semua urutan bit-bit diterima dengan benar dan tidak terjadi kesalahan kirim. Namun dalam prakteknya, tidak semua bit-bit dapat diterima dengan benar. Dalam hal ini, tidak dapat dihindari terjadinya kesalahan bit (*bit error*) saat bit-bit informasi dikirimkan melalui kanal komunikasi [1].

Penyebab terjadinya *bit error* dapat berasal dari kondisi kanal komunikasi yang dipengaruhi oleh berbagai macam gangguan, baik dari dalam sistem itu sendiri, yang disebut dengan bising (*noise*) dan gangguan dari luar sistem, yang dinamakan dengan interferensi (*interference*). *Noise* yang umum terjadi pada sistem komunikasi adalah *Additive White Gaussian Noise (AWGN)*, yaitu *noise* dengan rapat daya konstan dan terdistribusi secara *gaussian* [2]. Sedangkan interferensi, dapat disebabkan oleh adanya fading. Fading terjadi karena perubahan sudut (*phase*), polarisasi dan atau perubahan level sinyal terhadap waktu, sehingga sinyal yang diterima berubah dengan cepat. Perubahan periodik dari selubung satu komponen *multipath* atau selubung sinyal fading datar (*flat fading*) pada transmisi *No Line Of Sight (NLOS)* yang terdistribusi secara Rayleigh disebut dengan *Rayleigh Fading* [3].

M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) merupakan suatu jenis modulasi digital yang kemungkinan terjadinya *bit error* lebih kecil dibandingkan modulasi digital lainnya. [4]. Namun demikian, untuk lebih meningkatkan unjuk kerja modulasi M-QAM dalam kanal komunikasi yang dipengaruhi oleh *noise* dan interferensi, perlu adanya penerapan metode yang dapat mengurangi *bit error* yang terjadi pada modulasi M-QAM semaksimal

mungkin. Hal ini dapat dilakukan dengan menerapkan berbagai macam metode pengurangan terjadinya *bit error*, seperti misalnya dengan metode *Pilot Symbol Assisted Modulation (PSAM)* yang menggunakan simbol pemandu berupa urutan bit yang telah dilemahkan. Simbol pemandu tersebut digunakan untuk mendeteksi perubahan *phase* dan *amplitudo* yang menimbulkan *bit error* [5]. Penambahan komponen penghitung kanal (*Channel Estimator*) pada PSAM dapat mengurangi terjadinya *bit error* pada kanal tidak sempurna (*Imperfect Channel Estimation*) yang diakibatkan oleh Rayleigh Fading [6] dan Rician Fading [7]. Selain itu, pengurangan terjadinya *bit error* dapat juga dilakukan dengan menggunakan serangkaian antenna pengirim dan penerima yang disebut dengan *Multiple Element Array (MEA)*. Sistem komunikasi yang menggunakan sistem MEA ini disebut dengan *Multiple Input Multiple Output (MIMO)* [8]. Beberapa teknik MIMO yang dapat digunakan untuk mengurangi terjadinya *bit error*, di antaranya adalah *Spatial Multiplexing* [9], *Maximal Ratio Receiver Combining (MRRC)* [10], *Space Time Coding (STC)* [11], *Space Time Block Codes (STBCs)* [12], dan *Space Time Trellis Codes (STTCs)* [13].

Spatial Multiplexing merupakan teknik MIMO yang menggabungkan bit-bit masukan pada sejumlah antenna pengirim (N), di mana aliran bit-bit pada masing-masing antenna bersifat mandiri. Jika aliran bit-bit berhasil diterima oleh sejumlah antenna penerima (P) dan didemodulasi, jumlah efisiensi spektrum meningkat sesuai dengan jumlah antenna pengirim (N). Dalam hal ini, jumlah antenna penerima tidak boleh melebihi antenna pengirim (P) untuk menghindari terjadinya inefisiensi. Untuk mengimplementasikan teknik *Spatial Multiplexing*, dapat dengan menggunakan antenna jenis tersusun (*Array Antenna*) [14,15].

1.2. Perumusan Masalah

Sinyal yang diterima dari kanal komunikasi dengan modulasi M-QAM dapat berubah karena munculnya sejumlah bit yang salah (*error*). Penyebab terjadinya *bit error* dapat berupa interferensi dan *noise* di kanal komunikasi. Pada umumnya, *noise* yang terdapat pada kanal komunikasi adalah *Additive White Gaussian Noise (AWGN)*. Sedangkan, interferensi yang dapat memperbesar

jumlah *bit error*, di antaranya adalah *Rayleigh Fading*. Pengurangan *bit error* dapat dilakukan dengan menerapkan teknik *Spatial Multiplexing* di sisi pengirim dan metode pendeteksian dan penerimaan sinyal di sisi penerima.

Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai penerapan teknik *Spatial Multiplexing* di sisi pengirim antara lain terdapat pada penelitian metode penerimaan dan pendeteksian sinyal *Maximum Likelihood* yang menggunakan modulasi QPSK dengan $E_b/N_0 = 10$ dB dapat menghasilkan pengurangan *bit error* sebesar = 0,01 [9]. Kemudian, terdapat penelitian penerapan metode penerimaan dan pendeteksian sinyal *Minimum Mean Square Error (MMSE)* di sisi penerima pada komunikasi CDMA, di mana dengan $E_b/N_0 = 10$ dB, $N \times P = 2 \times 2$, pada modulasi QPSK dapat menghasilkan pengurangan *bit error* sebesar = 0,0225 [17], sedangkan untuk modulasi MPSK, hanya menghasilkan perbandingan *Symbol Error Probability (SEP)* terhadap *Signal To Noise Ratio (SNR)* [18]. Penelitian penggunaan metode *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)* pada modulasi *Binary Phase Shift Keying (BPSK)* dengan $N \times P = 4 \times 4$, menghasilkan pengurangan *bit error* pada E_b/N_0 dari 0 dB sebesar 0,2 hingga 9 dB sebesar 0,04 [19].

Dari penelitian yang sudah ada, permasalahan yang kemudian dihadapi dan menjadi pokok bahasan dalam penulisan tesis ini adalah bagaimana memaksimalkan pengurangan terjadinya *bit error* hingga 10^{-4} atau mendekati 0 agar sinyal yang diterima dapat diterjemahkan (*decoding*) kembali dengan benar, tanpa ada *bit error* yang dapat mengubah sinyal asli yang dikirimkan. Untuk itu, dalam tesis ini, diusulkan penggunaan teknik *Spatial Multiplexing* dengan metode pembatalan atau penekanan terus menerus sinyal interferensi yang terdapat pada sinyal yang diterima, yang diistilahkan dengan *Successive Interference Cancellation (SIC)* atau *Interference Nulling (IN)* pada ketiga metode pendeteksian dan penerimaan sinyal yang telah diteliti sebelumnya, yaitu : *Zero Forcing*, *Minimum Mean Square Error (MMSE)* dan *Maximum Likelihood*, sehingga selanjutnya dalam tesis ini metode pendeteksian dan penerimaan sinyal dinamakan dengan *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*, *Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC)* dan *Maximum Likelihood (ML)*. Bentuk implementasi SIC ini adalah

menormalisasi sinyal dan merekonstruksi sinyal asli seperti sebelum dipengaruhi oleh sinyal gangguan.

Agar lebih memaksimalkan pengurangan terjadinya *bit error*, diusulkan untuk menambahkan penggunaan metode pemilihan sinyal gangguan terberat (*weighting branch signal*) yang dapat mengaktifkan penekanan atau pembatalan sinyal interferensi yang berasal dari kanal komunikasi. Pemilihan sinyal gangguan terberat ini dapat dilakukan dengan metode penggabungan (*Combining Methods*). Di antara metode *Combining Methods*, yang paling tepat untuk diterapkan pada teknik *Spatial Multiplexing* adalah *Maximum Ratio Combining (MRC)*. Pengamatan yang dilakukan dalam penelitian tesis ini meliputi peningkatan jumlah data maksimum yang dapat dilewatkan melalui kanal komunikasi, yang diistilahkan dengan *multi array modulation (M)*, di mana obyek penelitian dimulai dari 4-QAM dan dibatasi hingga 64-QAM. Selain itu, pengamatan juga dilakukan terhadap peningkatan energi perbit pada setiap kerapatan derau (E_b/N_0) yang digunakan, dengan batasan dimulai dari 0 dB hingga 9 dB.

1.3. Tujuan Penulisan

Tujuan dari penyusunan tesis ini adalah untuk mengurangi kemungkinan terjadinya *bit error* pada modulasi M-QAM dalam kanal Rayleigh Fading dengan menggunakan teknik *Spatial Multiplexing* di sisi pengirim dan metode ZF-SIC, MMSE-SIC, *Maximum Likelihood* di sisi penerima.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian tesis ini adalah bagaimana mengurangi terjadinya *bit error* pada modulasi M-QAM dalam kanal komunikasi yang dipengaruhi oleh interferensi *Rayleigh Fading* dan *noise AWGN* dengan menerapkan teknik *Spatial Multiplexing* di sisi pengirim dan metode penerimaan dan pendeteksian sinyal di sisi penerima, yaitu : *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*, *Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC)* dan *Maximum Likelihood (ML)*.

Pengamatan dalam penelitian tesis ini meliputi peningkatan jumlah data maksimum yang dapat dilewatkan melalui kanal komunikasi, di mana obyek penelitian dimulai dari 4-QAM dan dibatasi hingga 64-QAM. Pengamatan juga dilakukan terhadap peningkatan nilai Eb/No dari 0 dB hingga 9 dB. Penggunaan multi antena dibatasi pada 2 antena pengirim ($N = 2$) dan 2 antena penerima ($P = 2$), sesuai dengan batasan spesifikasi komputer yang digunakan untuk simulasi.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tesis ini adalah sebagai berikut :

1. Bab I. Pendahuluan

Bab ini berisikan tentang latar belakang, perumusan masalah, maksud dan tujuan penulisan, manfaat penulisan, metode penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

2. Bab II. Landasan Teori

Bab ini berisikan tentang karakteristik komunikasi digital, sistem modulasi M-QAM, gangguan kanal komunikasi dan teknik *Spatial Multiplexing*

3. Bab III. Permodelan Sistem dan Perancangan Simulasi

Bab ini berisikan tentang tahapan penelitian, permodelan sistem, dan pembuatan simulasi menggunakan teknik *Spatial Multiplexing*

4. Bab IV. Hasil Simulasi Dan Analisis

Bab ini berisikan tentang parameter simulasi, hasil simulasi, dan analisis hasil simulasi penggunaan teknik *Spatial Multiplexing*

5. Bab V. Kesimpulan

Bab ini memberikan kesimpulan terhadap penggunaan teknik *Spatial Multiplexing* untuk mengurangi terjadinya *bit error* pada sistem modulasi M-QAM secara maksimal.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1. Karakteristik Komunikasi Digital

Komunikasi digital adalah komunikasi berbasis sinyal digital yang bentuk sinyalnya terputus-putus (diskrit) dan menggunakan sistem bilangan biner. Bilangan biner tersebut akan membentuk kode-kode yang merepresentasikan suatu informasi tertentu. Komunikasi digital memiliki kelebihan dibandingkan dengan komunikasi analog, antara lain dalam meminimalisasi *noise* dan atau interferensi. *Noise* merupakan sinyal yang tidak diharapkan dalam sistem telekomunikasi dan bersifat mengganggu serta kehadirannya tidak bisa ditentukan. *Noise* selalu ada dalam setiap sistem telekomunikasi, khususnya pada sistem transmisi. Selama proses transmisi, sinyal informasi yang ditransmisikan akan dipengaruhi oleh *noise* yang bisa mengakibatkan terjadinya *error* atau kesalahan pada penerima (*receiver*).

2.1.1. Data Rate Dan Bandwidth

Sangatlah penting untuk mengidentifikasi perbedaan antara *data rate* (d) dan *bandwidth* (B) sinyal dalam sistem transmisi. Perbedaan definisi dari kedua parameter tersebut adalah sebagai berikut :

1. *Data rate* adalah jumlah bit yang ditransmisikan tiap detik. Sebagai contohnya, *data rate* 1 Mbps berarti sistem mampu mentransmisikan 1 Mega bit tiap detik.
2. *Bandwidth* sinyal didefinisikan sebagai lebar jalur dimana daya sinyal terkonsentrasi. Sebagai contohnya, *bandwidth* dapat didefinisikan sebagai bagian di mana 99% sinyal terkonsentrasi di bagian tersebut.[1]

Berdasarkan dua pengertian di atas, terlihat bahwa *bandwidth* berbanding lurus dengan *bit rate*. Jika *bit rate* tinggi, T_b kecil dan *bandwidth* menjadi sangat lebar. Hal ini berarti sistem komunikasi dengan *data rate* yang tinggi harus mampu menyediakan *range* frekuensi yang lebar pula.

Apabila data yang dikirimkan dalam sebuah sistem komunikasi ideal memiliki frekuensi (f) = 1 MHz dan $T = 1/f = 1/1.10^6 = 1 \mu\text{s}$ maka *bandwidth* sinyalnya adalah $4 \times 1 \text{ MHz} = 4 \text{ MHz}$, dan kecepatan data (*data rate*) nya adalah $2 \times 1 \text{ MHz} = 2 \text{ Mbps}$. Jika sebuah data memiliki frekuensi = 2 MHz dan $T = 1/f = 1/2.10^6 = 0,5 \mu\text{s}$ maka *bandwidth* sinyalnya adalah $4 \times 2 \text{ MHz} = 8 \text{ MHz}$, dan kecepatan data (*data rate*) nya adalah $2 \times 2 \text{ MHz} = 4 \text{ Mbps}$. Dengan demikian hubungan *data rate* (d) dan *bandwidth* (B) dapat dinyatakan sebagai [1] :

$$B = 4 f = 2 d \quad (2.1)$$

Nyquist menyatakan bahwa bila kecepatan transmisi adalah $2B$, maka suatu sinyal dengan frekuensi tidak lebih besar daripada B cukup memadai untuk menghasilkan kecepatan sinyal. Kebalikannya juga berlaku; suatu *bandwidth* sebesar B , maka kecepatan sinyal tertinggi yang bisa dihasilkan adalah sebesar $2B$. Keterbatasan ini dikarenakan efek gangguan intersymbol, seperti misalnya, yang disebabkan oleh distorsi tunda. Hasilnya berguna untuk pengembangan skema pengkodean digital ke analog. Jadi, untuk *bandwidth* tertentu, *data rate* dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan jumlah elemen-elemen sinyal yang berlainan. Bagaimanapun juga, hal ini menambah beban pada receiver. [1]

2.1.2. Jumlah Bit Error

Jumlah *bit error* merupakan jumlah bit salah yang diterima dibagi dengan jumlah bit yang dikirimkan, mengikuti ketentuan [20] sebagai berikut :

$$\text{Jumlah Bit Error} = \frac{eb}{tb} \quad (2.2)$$

di mana eb = jumlah bit yang salah (*bit error rate*) dan tb = jumlah total bit yang dikirimkan. Sebagai contoh, terdapat sejumlah urutan bit yang dikirimkan, yaitu : 0 1 1 0 0 0 1 0 1 1 (sebanyak 10 bit), yang kemudian, setelah melalui kanal komunikasi, urutan bit yang diterima menjadi : 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 (terjadi *bit error* sebanyak 3 bit). Dengan demikian, kemungkinan jumlah *bit error* pada contoh tersebut dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{Jumlah Bit Error} = \frac{3}{10} = 0,3 \text{ atau } 30 \%$$

2.1.3. Kapasitas Kanal Komunikasi

Untuk data digital, permasalahan yang muncul adalah gangguan kanal komunikasi yang dapat membatasi *data rate* dan *data rate* maksimum yang dapat ditransmisikan melalui suatu kanal komunikasi.

Ada empat konsep tentang kanal komunikasi, yaitu

1. *Data Rate*, merupakan jumlah data pada kanal komunikasi dalam bit per detik
2. *Bandwidth*, merupakan lebar kanal komunikasi dari sinyal yang ditransmisikan
3. *Noise*, merupakan level rata-rata derau sepanjang kanal komunikasi
4. *Error Rate*, merupakan jumlah *error* yang terjadi pada kanal komunikasi

Pernyataan Nyquist tentang *bandwidth* dapat dihubungkan dengan kapasitas kanal komunikasi yang dikemukakan oleh Claude Shannon. Untuk level derau tertentu, daya sinyal yang lebih besar akan meningkatkan kemampuan penerimaan data secara benar di dalam tampilan derau. Dalam hal ini, *Signal to Noise Ratio (SNR)* merupakan perbandingan daya suatu sinyal terhadap daya *noise* yang muncul pada titik tertentu dalam transmisi. Biasanya, SNR diukur pada sebuah penerima, karena nantinya digunakan untuk memproses sinyal yang diterima dan menghilangkan derau yang tidak diinginkan dengan persamaan [2] :

$$(\text{SNR})_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (2.3)$$

di mana P_s = Power Signal (daya sinyal), dan P_n = Power Noise (daya bising). *Signal to Noise Ratio (SNR)* digunakan untuk menentukan batas atas terhadap jumlah data yang mampu diperoleh dari kanal komunikasi. Shannon mengemukakan bahwa kapasitas kanal komunikasi maksimum, dalam bit perdetik, ditentukan dengan persamaan sebagai berikut [2] :

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}) \quad (2.4)$$

C adalah kapasitas kanal komunikasi dalam bit per detik, B adalah *bandwidth* kanal komunikasi dalam Hertz. Persamaan Shannon tersebut menggambarkan nilai maksimum teoritis yang dapat dicapai oleh sistem komunikasi. Sedangkan pada prakteknya, bagaimanapun juga, jumlah data yang dapat ditransmisikan lebih rendah dari ketentuan Shannon tersebut. Satu alasan untuk hal ini adalah ketentuan Shannon tersebut beransumsi hanya pada *white noise* (derau suhu) saja.

Batasan Shannon adalah bahwa kapasitas kanal komunikasi C tidak boleh lebih kecil dari jumlah informasi yang akan dikirimkan.[2]

Untuk level derau tertentu, *data rate* dapat ditingkatkan, baik dengan cara meningkatkan daya sinyal atau meningkatkan *bandwidth*-nya. Bagaimanapun juga, saat daya sinyal meningkat, maka akan meningkat pula efek sifat nonlinier di dalam sistemnya, sekaligus meningkatkan derau intermodulasinya.

2.1.4. Parameter Eb/No

Perbandingan energi sinyal per bit terhadap kerapatan daya derau per hertz disimbolkan dengan E_b/N_0 . Sebuah sinyal, baik digital maupun analog, yang berisikan biner data digital ditransmisikan pada suatu *bit rate* R tertentu. Energi per bit dalam sebuah sinyal dinyatakan sebagai [1] :

$$E_b = S \cdot T_b \quad (2.5)$$

dimana S adalah daya sinyal dan T_b adalah waktu yang diperlukan untuk mengirim satu bit.

Perbandingan E_b/N_0 sangat penting dalam menentukan jumlah bit *error*. Saat jumlah bit R meningkat, daya sinyal yang ditransmisikan relative terhadap derau harus ditingkatkan untuk mempertahankan E_b/N_0 yang diperlukan, di mana hubungan E_b/N_0 dengan S/RN_0 dan S/kTR adalah sebagai berikut [1] :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{R N_0} = \frac{S}{kTR} \quad (2.6)$$

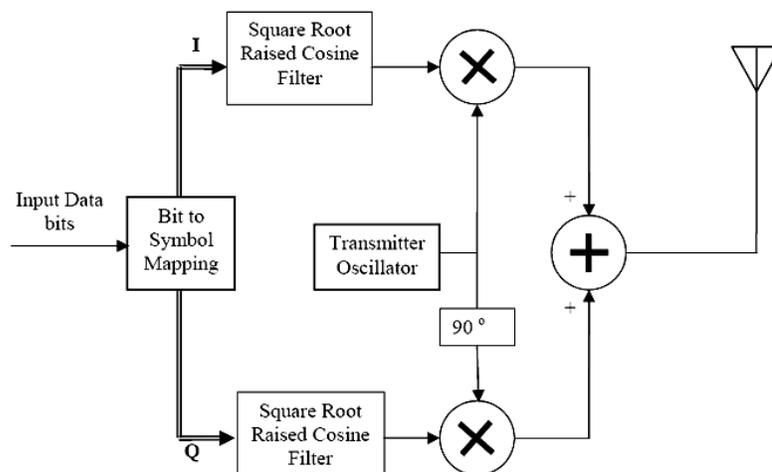
2.2. Sistem Modulasi M-QAM

Untuk mengirim pesan digital, sistem modulasi digital mengalokasikan sepotong waktu yang disebut interval sinyal dan menghasilkan fungsi kontinyu yang mewakili simbol. Dalam modulasi digital, pesan sinyal diubah menjadi sinyal *baseband*. Pada sistem komunikasi nirkabel, bagian kedua dari modulasi adalah mengubah sinyal *baseband* ke frekuensi radio (RF) sinyal, dan memodulasi *phase*, frekuensi atau amplitudo dari sinyal pembawa (*carrier*). Sedangkan pada sistem kabel, sinyal *baseband* dapat dikirimkan secara langsung

tanpa modulasi sinyal pembawa (misalnya dalam jaringan LAN).

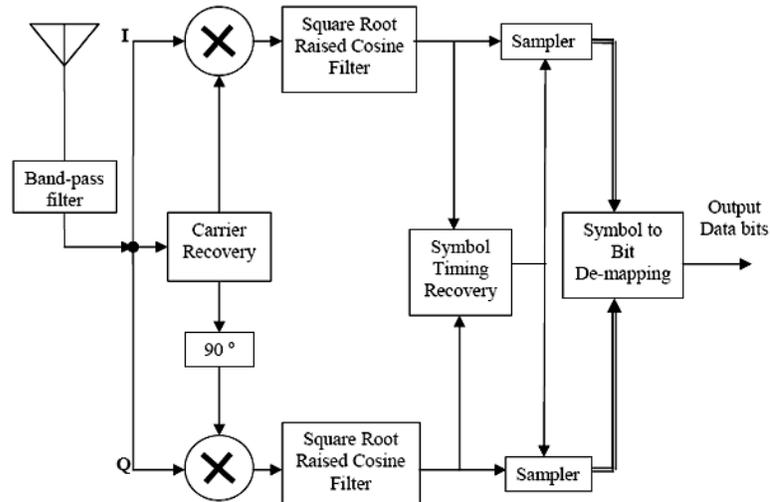
M-ary Quadrature Amplitudo Modulation (M-QAM) merupakan salah satu teknik modulasi digital multi level yang saat ini banyak digunakan pada sistem komunikasi. Hal ini disebabkan karena konstelasi sinyal M-QAM yang tidak begitu rapat, bila dibandingkan dengan sistem modulasi lainnya, misalnya dengan sistem *M-ary Quadrature Phase Shift Keying (M-QPSK)*. [1]. Pada sistem komunikasi nirkabel, penggunaan M-QAM dapat ditemui pada sistem pengkodean dan modulasi adaptif IEEE 802.16 *Worldwide Interoperability for Microwave Access (WIMAX)*, yaitu sebagai salah satu teknik modulasi *subcarrier Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)*, modulasi pada IEEE 802.15 *Wireless Personal Area Network (WPAN)*, yaitu pada aplikasi *bluetooth*, dan modulasi pada IEEE 802.11.a *Wireless Local Area Network (WLAN)*. Selain itu, M-QAM juga digunakan pada sistem komunikasi kabel, misalnya sebagai modem pada *Cable Television* dan *Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)*. [14].

Blok diagram yang menjelaskan proses modulasi M-QAM ditunjukkan pada Gambar 2.1 sebagai berikut :



Gambar 2.1. Proses Modulasi M-QAM [6]

Sedangkan blok diagram yang menjelaskan proses demodulasi M-QAM ditunjukkan pada Gambar 2.2 sebagai berikut :



Gambar 2.2. Proses Demodulasi M-QAM [6]

2.2.1. Penentuan Amplitudo Sinyal

Pada proses modulasi M-QAM, aliran bit-bit pertama kali dipetakan dengan *Gray Mapping* (*Gray Coding*) ke dalam koordinat konstelasi sinyal biner *In-Phase* (I) dan *Quadrature* (Q) seperti pada Gambar 2.1, sedangkan sebaliknya pada proses demodulasi M-QAM, aliran sinyal-sinyal analog akhirnya dikembalikan menjadi sinyal-sinyal biner dengan menggunakan *Gray Mapping* (*Gray Coding*), seperti terlihat pada Gambar 2.2 di atas.

Sinyal hasil modulasi M-QAM dapat dinyatakan ke dalam persamaan [4] :

$$S_m(t) = A_m I \cos \theta + j A_m Q \sin \theta \quad (2.7)$$

di mana sudut atau *phase* dapat diperoleh dari :

$$\theta = \omega_c t = 2\pi f_c t \quad (2.8)$$

dan amplitudo sinyal (A_m) dapat dinyatakan sebagai :

$$A_m = \sqrt{\frac{2 \cdot E_m(t)}{T}} \quad (2.9)$$

Dengan $E_m(t)$ adalah energi sinyal, $m = 1, 2, \dots, M$, dan $0 \leq t \leq T$

M adalah jumlah multilevel modulasi atau jumlah maksimum data pada M-QAM dalam bentuk untaian bit. Untuk sistem modulasi 4-QAM dapat

dikirimkan 4 data dalam biner, sedangkan untuk 64-QAM dapat dikirimkan 64 data dalam biner. Jumlah untaian biner yang dapat merepresentasikan data disebut dengan ukuran konstelasi bit, disimbolkan dengan k , dan dapat dinyatakan sebagai

$$k = \log_2 M \quad (2.10)$$

dengan A_m selain sebagai amplitudo sinyal, juga dapat merepresentasikan jumlah maksimum data yang dikirimkan mengikuti persamaan [4] :

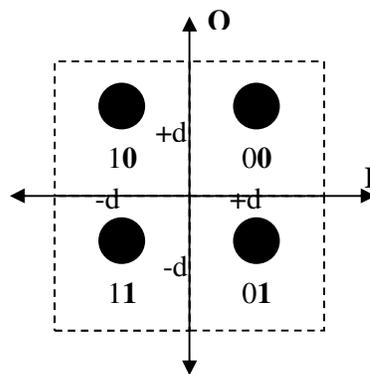
$$A_m = 2^{m-1} - M \quad (2.11)$$

Misalnya, pada sistem modulasi 64-QAM, amplitudo sinyal atau jumlah data yang dapat dikirimkan sebanyak 6 data, yang dimulai dari 0 hingga mencapai nilai maksimum : $2^{m-1} - M = 2^{6-1} - 64 = 128 - 64 = 64$.

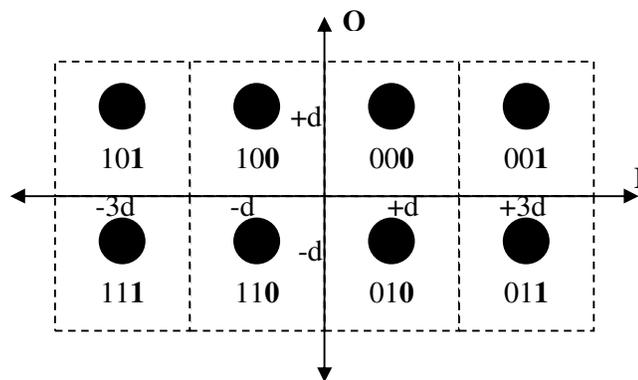
2.2.2. Gray Mapping (Gray Coding)

Pemetaan sinyal pada modulasi M-QAM dengan *Gray Mapping (Gray Coding)* dapat dilakukan dengan mengkombinasikan sisi tegak (*Quadrature = Q*) dan sisi sudut (*In-phase = I*) konstelasi sinyal. Angka-angka yang secara umum digunakan untuk menyatakan nilai A_m sebagai sisi tegak Q dan nilai A_m sebagai sisi sudut I adalah konstanta d .

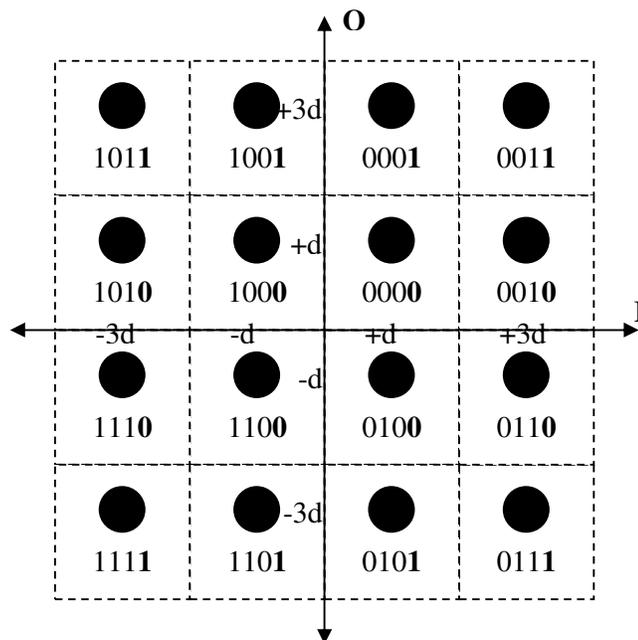
Untuk modulasi 4-QAM, terdapat pasangan $(d, -d)$ di mana nilai d menyatakan bit 0 dan $-d$ menyatakan bit 1. Untuk 8-QAM, pada sisi sudut I ditambahkan nilai $(-3d, +3d)$, di mana pada penambahan titik $-3d$ dan $+3d$, ditambahkan bit 1, sedangkan pada $-d$ dan $+d$, ditambahkan bit 0. Untuk 16-QAM, pada sisi tegak Q dan sisi sudut I ditambahkan nilai $(-3d, +3d)$, di mana pada penambahan titik $-3d$ dan $+3d$ di sisi tegak Q , ditambahkan bit 1, sedangkan pada $-d$ dan $+d$, ditambahkan bit 0. Untuk 32-QAM, pada sisi sudut I ditambahkan nilai $(-5d, +5d)$ dan $(-7d, +7d)$, sedangkan pada 64-QAM, pada sisi sudut I dan sisi tegak Q ditambahkan nilai $(-5d, +5d)$ dan $(-7d, +7d)$, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3, Gambar 2.4, Gambar 2.5, Gambar 2.6 dan Gambar 2.7 sebagai berikut :



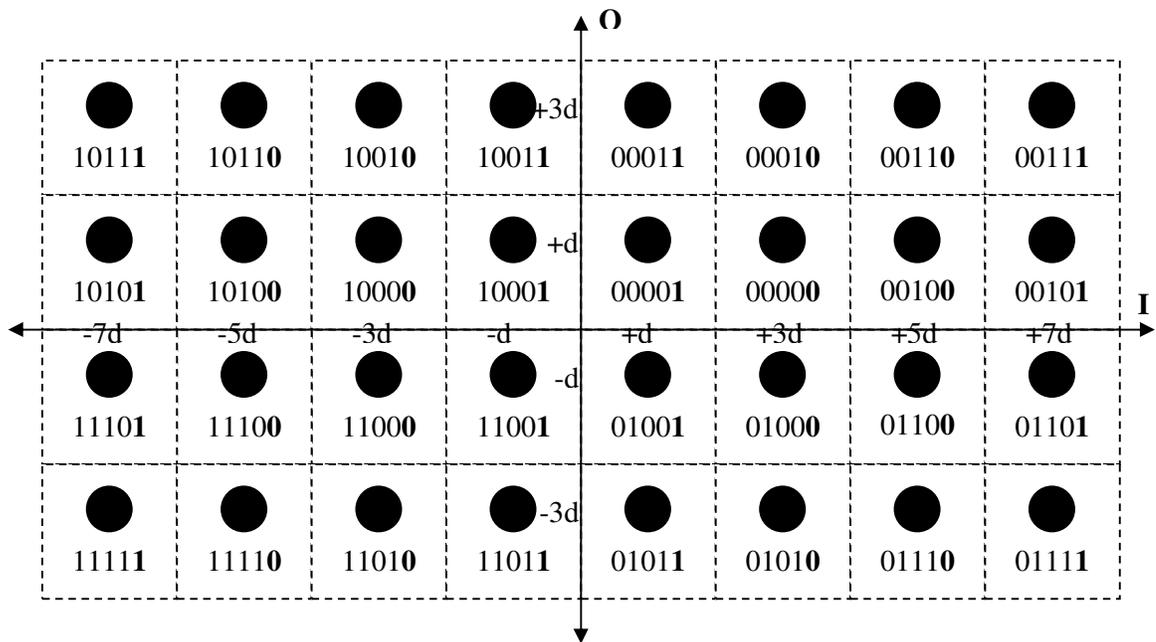
Gambar 2.3. Konstelasi Sinyal 4-QAM



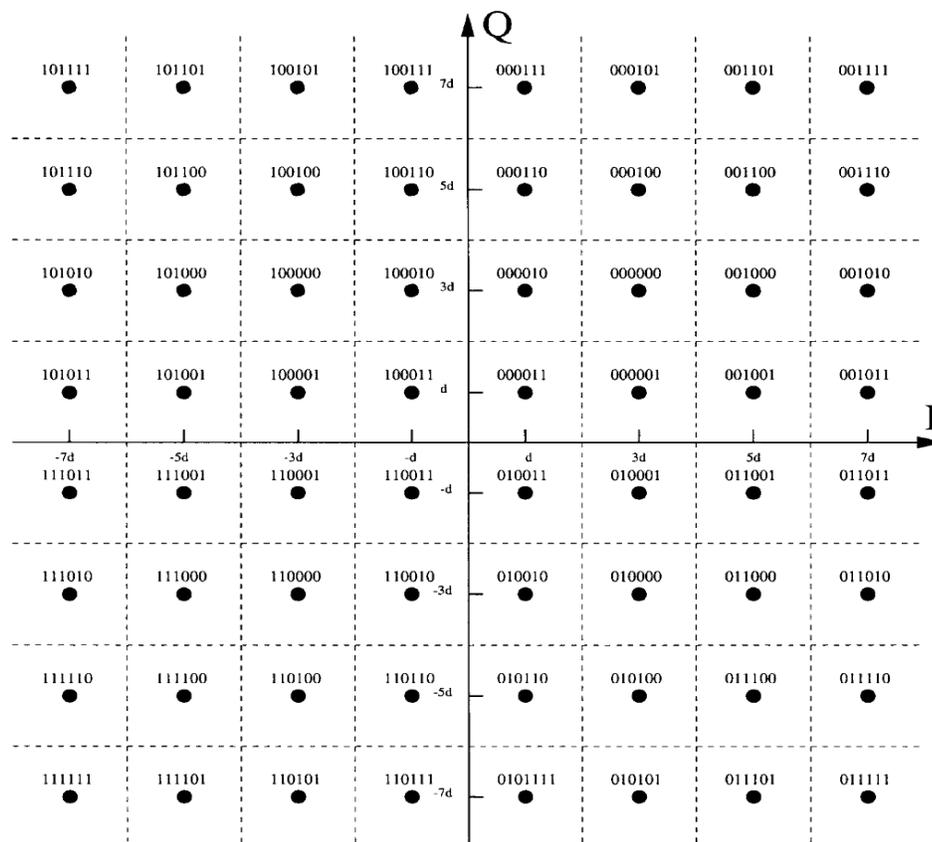
Gambar 2.4. Konstelasi Sinyal 8-QAM



Gambar 2.5. Konstelasi Sinyal 16-QAM



Gambar 2.6. Konstelasi Sinyal 32-QAM



Gambar 2.7. Konstelasi Sinyal 64-QAM

2.2.3. Pengubahan Sinyal Digital Ke Sinyal Analog

Pasangan parameter I $g(t)$ dan Q $g(t)$ menyatakan pasangan konstelasi sinyal dalam *Gray Mapping (Gray Coding)*, yaitu sisi sisi tegak (*Quadrature = Q*) dan sisi sudut (*In-phase = I*), sehingga persamaan (2.6) dapat dituliskan kembali sebagai :

$$A_{m_I} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_m(t)}{T}} \cos(2 \pi f_c t)$$

$$A_{m_Q} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_m(t)}{T}} \sin(2 \pi f_c t) \quad (2.12)$$

di mana untuk A_{m_I} dan A_{m_Q} dapat dinyatakan dengan jarak (*distance*) Hamming

$$\text{Koordinat (I,Q)} = \pm (2n - 1) d \quad \text{dengan } n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.13)$$

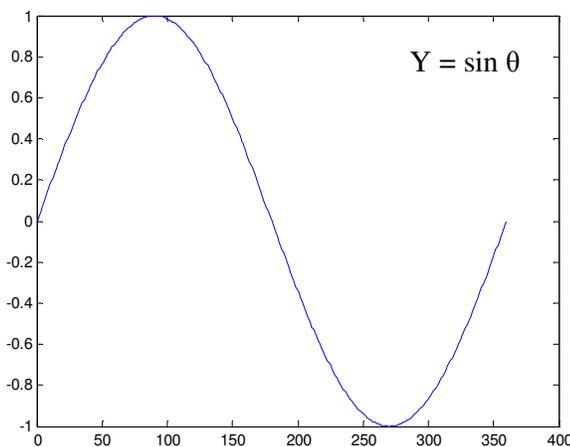
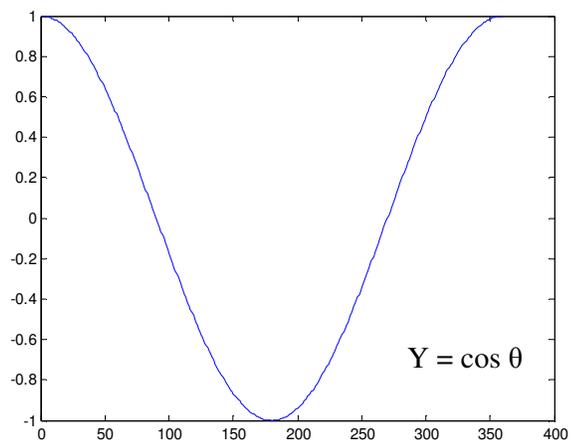
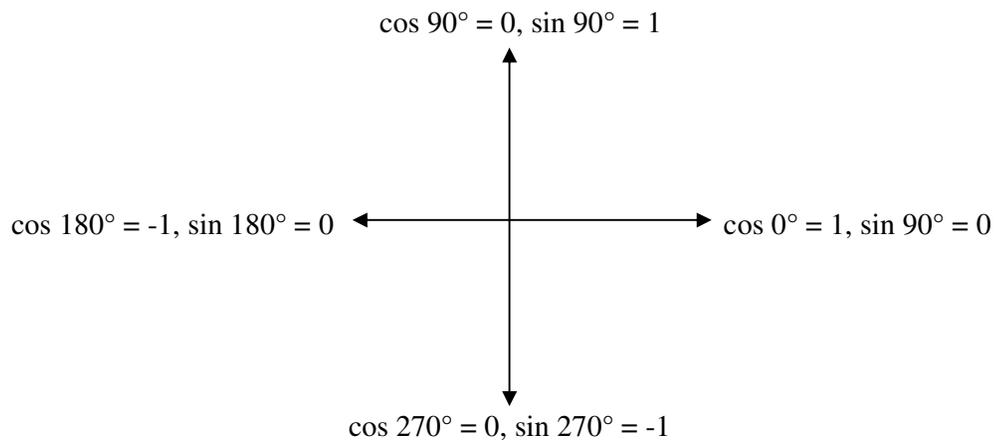
dengan nilai d dapat dicari dengan persamaan [4] :

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot E_m}{A_{m_I}^2 + A_{m_Q}^2}} = \sqrt{\frac{E}{10}} \quad (2.14)$$

Sinyal-sinyal pada M-QAM dapat dinyatakan dengan (I,Q). Untuk 4-QAM, sinyal-sinyal dimulai dari bit (+d,+d), yaitu : 00 (0) hingga (-d,-d), yaitu 11 (3). Sedangkan untuk 64-QAM, sinyal-sinyal dimulai dari bit (+3d,+3d), yaitu 000000 (0) hingga (-7d,-7d), yaitu : 111111 (63). Konstanta d dapat digunakan sebagai deret untuk merepresentasikan angka biner ke amplitudo (A) dan sudut (θ) sinyal sebagai berikut [14] :

$$D = \frac{k}{M} \sum_{i=1}^N (2n_i - 1) \cdot d \quad (2.15)$$

Sedangkan untuk menyatakan sudut (θ), pasangan koordinat (I,Q) disesuaikan dengan penempatannya pada *Gray Mapping (Gray Coding)* dapat dijelaskan pada Gambar 2.8 sebagai berikut :



Gambar 2.8. Representasi Sudut Sinyal Dalam Konstelasi Gray Mapping

2.2.4. Contoh Aplikasi Modulasi M-QAM

Misalnya, akan dimodulasi sinyal 1010 pada konstelasi sinyal 16-QAM, maka amplitudo dan sudut sinyal tersebut dapat ditentukan dengan persamaan (2.12) berdasarkan Gambar 2.5 dan Gambar 2.8. Sinyal 1010 menempati koordinat (I,Q) = (-3d, +d), di mana pada sisi datar (I) berada pada -3d, yaitu sisi konstelasi dengan ($\cos 180^\circ = -1$, $\sin 180^\circ = 0$), dan sisi tegak (Q) berada pada d, yaitu sisi konstelasi dengan ($\cos 90^\circ = 0$, $\sin 90^\circ = 1$).

Pasangan amplitudo dan sudut sinyalnya adalah :

$$Am_I = 3 d \cos 180^\circ = -3 d \text{ dan } Am_Q = d \sin 90^\circ = d$$

$$\text{sehingga : } S_m(t) = -3 d + j d$$

Pada domain frekuensi, energi spektrum sinyal memiliki nilai yang konstan pada -0,5 T sampai dengan 0,5 T. Jika energi yang diberikan adalah

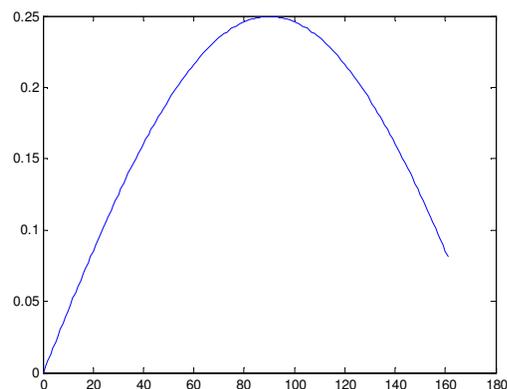
$$1 \text{ watt detik, maka } d = \sqrt{\frac{1}{10}} = 0,316, \text{ sehingga}$$

$$Am_I = -\frac{4}{16} 3 \cdot 0,316 = -0,237 \text{ dan } Am_Q = \frac{4}{16} \cdot 0,316 = 0,0079$$

sehingga sinyal tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk *rectangular* sebagai :

$$S_m(t) = -0,237 + j 0,0079$$

yang dapat diubah ke bentuk polar menjadi : $0,2498 \angle 161,565^\circ$ dan digambarkan dalam grafik sinyal sinusoidal sebagai berikut :



Gambar 2.9. Representasi Sinyal Analog Dari Data 1010 Pada 16-QAM

2.3. Gangguan Kanal Komunikasi

Salah satu pertimbangan dalam mendesain suatu sistem telekomunikasi adalah ketahanan suatu sinyal terhadap gangguan, baik dari sistem itu sendiri, yang disebut dengan bising atau derau (*noise*) maupun dari luar sistem, yang disebut dengan interferensi (*interference*). Dalam sistem komunikasi nirkabel bergerak, yang menggunakan medium *wireless*, *noise* dan *interference* memiliki efek yang signifikan terhadap sistem.

2.3.1. Noise

Noise merupakan gelombang elektromagnetik yang terdapat di alam, dapat bersumber dari matahari, bumi, atmosfer, galaksi, busi kendaraan bermotor (buatan manusia), dan lain-lain. Dalam sistem telekomunikasi, sinyal asli dapat bercampur (ditambahkan) dengan sinyal *noise* ini sehingga *magnitude* sinyal total per satuan waktu merupakan penjumlahan kedua sinyal ini.

Noise untuk keperluan desain sistem komunikasi biasanya dianggap memiliki karakteristik sebagai berikut :

1. Additive

Artinya *noise* ini dijumlahkan dengan sinyal informasi yang dikirimkan

2. White noise

Spektrum rapat daya *noise* dianggap memiliki harga yang sama untuk setiap frekuensi (dalam kanal komunikasi yang digunakan). *Noise* tidak tergantung dari frekuensi operasi sistem dan memiliki rapat daya (*power spectral density* = *psd*) yang konstan. Model sederhana dari *White noise* adalah menganggap bahwa *psd*-nya sama untuk semua frekuensi, yang dapat dinyatakan dengan :

$$S_w(f) = \frac{N_0}{2} \quad (2.16)$$

3. Terdistribusi Gaussian

Besarnya tegangan *noise* memiliki rapat peluang terdistribusi gaussian, di mana pola kemunculan *noise* dianggap terdistribusi Gaussian dengan nilai rata-rata (*mean*) adalah nol dan *varians* tergantung rapat daya yang diperkirakan dari

noise tersebut, dengan ketentuan [15] :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} P_n &= \frac{E[n(t)n^*(t)]}{2} = \frac{E[(x_n(t) + jy_n(t))(x_n(t) + jy_n(t))^*]}{2} \\ &= \frac{E[x^2(t)] + E[y^2(t)]}{2} = \frac{\sigma_n^2 + \sigma_n^2}{2} = \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Noise seperti keadaan di atas disebut dengan *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). Besarnya daya AWGN dapat ditentukan dari persamaan berikut :

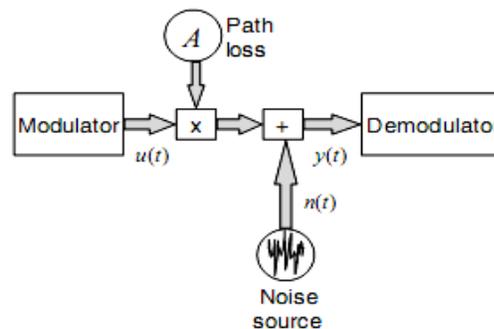
$$N = kTB \quad (2.19)$$

dengan k adalah konstanta Boltzmann, T adalah temperatur operasi sistem dalam kelvin, dan B adalah *bandwidth* sistem tersebut. Dari persamaan 2.15 dapat dipahami bahwa keberadaan *noise* AWGN dalam jaringan *wireless*, bahkan jaringan telekomunikasi manapun, akan selalu ada selama terdapat *bandwidth* dan temperatur perangkat telekomunikasi yang bekerja pada suhu di atas -273°C .

Besarnya *noise* yang menjadi input pada perangkat demodulator berupa nilai SNR (γ), yang dapat dinyatakan sebagai berikut [15] :

$$\gamma = \frac{\text{Signal power}}{\text{Noise power}} = \frac{E[A^2u^2(t)]}{2P_n} = \frac{A^2E[u^2(t)]}{2P_n} = \frac{A^2}{2P_n} \quad (2.20)$$

Kanal AWGN pada Gambar 2.10 adalah kanal ideal, yaitu kanal yang tidak menyebabkan perubahan bentuk sinyal pada sinyal yang dikirimkan dengan *bandwidth* tidak terbatas dan respon frekuensinya tetap.



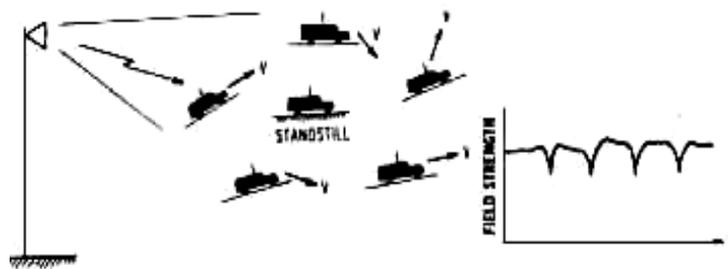
Gambar 2.10. Kanal AWGN [15]

2.3.2. Interferensi Fading

Interferensi pada sistem komunikasi nirkabel bergerak umumnya disebabkan oleh adanya fading. Fading merupakan perubahan fase, polarisasi dan atau perubahan level suatu sinyal terhadap waktu. Definisi dasar dari fading yang paling umum adalah yang berkaitan dengan mekanisme propagasi sinyal radio yang melibatkan refraksi, refleksi, defraksi, hamburan dan redaman dari gelombang radio. Pada sistem komunikasi bergerak terdapat dua macam fading yaitu *short term fading* dan *long term fading*. *Short term fading* sebagian besar disebabkan oleh pantulan *multipath* suatu gelombang transmisi oleh penghambur lokal seperti rumah-rumah, gedung-gedung dan bangunan lain atau oleh halangan lain seperti hutan (pepohonan) yang mengelilingi suatu unit bergerak. Sedangkan *long term fading* sebagian besar disebabkan oleh gunung atau bukit yang terletak di antara lokasi pemancar dan penerima.

Berikut beberapa kondisi yang memberikan gambaran mengenai fenomena *short term fading*, yaitu :

1. Penerima dalam keadaan diam, dikelilingi oleh beberapa obyek yang bergerak seperti kendaraan lain, seperti terlihat pada Gambar 2.11. Sinyal yang diterima akan menunjukkan adanya fading yang bergantung pada laju kendaraan dan jarak dari kendaraan-kendaraan tersebut terhadap unit penerima bergerak.



Gambar 2.11. Fading Terjadi Pada Penerima Yang Diam [3]

2. Unit penerima bergerak dengan kecepatan V , dianggap tidak ada penghambur di antara pemancar dan penerima, seperti terlihat pada Gambar 2.12. Sinyal yang datang dengan sudut (*phase*) θ pada penerima merupakan sinyal Fading :

$$Rf = \alpha \cdot e^{j\theta} \quad (2.21)$$

di mana : Rf = sinyal pengganggu Fading

θ = sudut sinyal datang

α = amplitudo sinyal

Persamaan (2.21) dapat dirumuskan kembali untuk menggambarkan frekuensi transmisi dan jarak perpindahan sinyal sebagai berikut :

$$Rf = \alpha \cdot e^{j 2 \pi \left(f_t - \frac{x}{\lambda} \cos \theta_i \right) t} \quad (2.22)$$

di mana : $\theta =$ sudut sinyal datang $= \omega t = 2 \pi \left(f_t - \frac{x}{\lambda} \cos \theta_i \right) t$ (2.23)

f_t = frekuensi transmisi

x = jarak perpindahan sinyal = $v \times t$ (2.24)

t = lama perpindahan sinyal

λ = panjang gelombang sinyal

Persamaan (2.22) dapat dirumuskan kembali untuk menggambarkan efek

Doppler yang lebih dikenal dengan *Shift Doppler*, sebagai berikut :

$$Rf = \alpha \cdot e^{2 \pi \left(f_t - \frac{v}{\lambda} \cos \theta_i \right) t} \quad (2.25)$$

di mana : $\frac{v}{\lambda} =$ *Shift Doppler* (2.26)

Frekuensi sinyal yang diterima (f_r) dapat ditunjukkan dengan persamaan :

$$f_r = f_t - \frac{v}{\lambda} \cos \theta_i \quad (2.27)$$

Ketika unit penerima bergerak menjauhi sumber, $\theta_i = 0^\circ$, frekuensi diterima

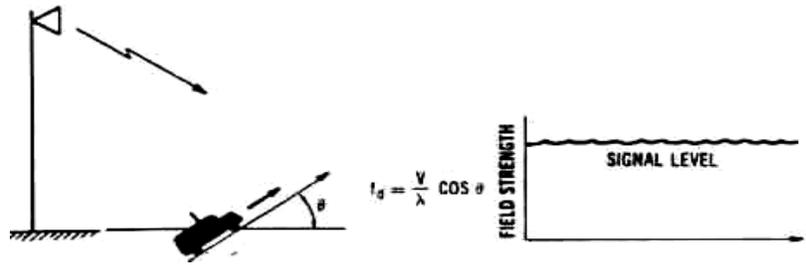
$$f_r = f_t - \frac{v}{\lambda} \quad (2.28)$$

Ketika penerima bergerak mengelilingi sumber, $\theta = 90^\circ$, frekuensi diterima

$$f_r = f_t \quad (2.29)$$

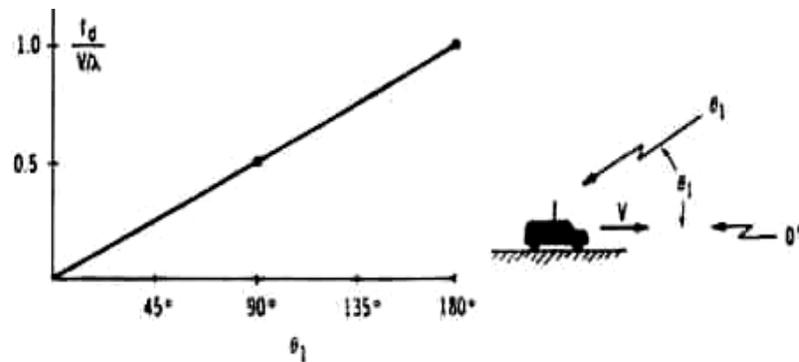
Ketika penerima bergerak menuju sumber, $\theta = 180^\circ$, frekuensi diterima :

$$f_r = f_t + \frac{v}{\lambda} \quad (2.30)$$



Gambar 2.12. Fading Terjadi Pada Penerima Yang Bergerak [3]

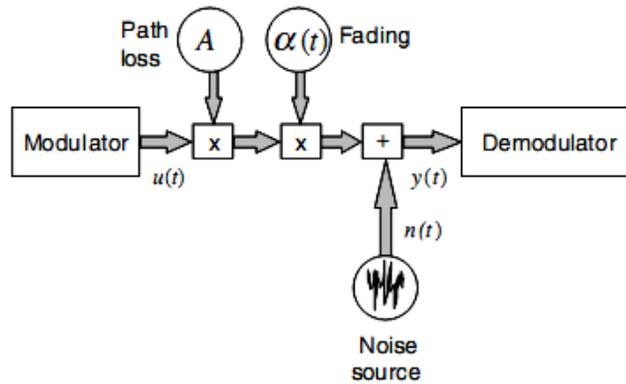
3. Penerima bergerak dengan kecepatan v di antara pemancar dan penerima dengan satu penghambur, seperti terlihat pada Gambar 2.13. Sinyal yang datang pada penerima merupakan jumlah dari sinyal langsung (dengan sudut $\theta = 0^\circ$) dan sinyal yang melewati penghambur (dengan sudut fase θ_i).



Gambar 2.13. Fading Antara Pemancar Dan Penerima Bergerak [3]

Sinyal yang diterima oleh penerima merupakan jumlah superposisi dari keseluruhan sinyal yang dipantulkan akibat banyak lintasan (*multipath*). Hal ini menyebabkan kuat sinyal yang diterima oleh penerima akan bervariasi dengan cepat. Karena rendahnya antena *Mobile Station* (MS) dan adanya struktur bangunan yang mengelilingi MS, menyebabkan perubahan yang cepat pada penjumlahan sinyal-sinyal *multipath* menurut distribusi statistik yang disebut distribusi Rayleigh dan dikenal dengan *Rayleigh Fading*. Pada kanal komunikasi bergerak, distribusi Rayleigh biasa digunakan untuk menjelaskan perubahan waktu dari selubung sinyal fading datar (*flat fading*) yang diterima, atau selubung

dari satu komponen *multipath*. Fenomena *Fading* yang terjadi dapat dimodelkan secara matematis menurut distribusi Rayleigh, dan lebih dikenal dengan *Multipath Rayleigh Fading*, dengan kanal komunikasi seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Kanal Fading [15]

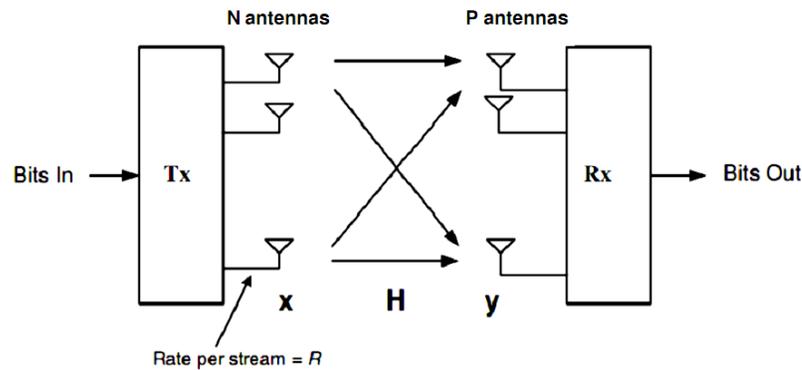
2.4. Teknik Spatial Multiplexing

Penggunaan banyak antena (*multiple antenna*) pada pengirim dan penerima merupakan bagian penting dalam komunikasi banyak masukan banyak keluaran atau *Multiple Input Multiple Output (MIMO)* yang dapat memberikan beberapa keuntungan sebagai berikut :

1. Meningkatkan ketersediaan sistem
2. Mengurangi banyaknya kesalahan bit atau paket data, sehingga meningkatkan jumlah data yang dapat diterima dan kapasitas sistem secara keseluruhan
3. Meningkatkan cakupan data

Spatial Multiplexing merupakan teknik MIMO yang menggabungkan bit-bit masukan pada sejumlah antena pengirim (N), di mana aliran bit-bit pada masing-masing antena bersifat mandiri. Jika aliran bit-bit berhasil diterima oleh sejumlah antena penerima (P) dan didemodulasi, jumlah efisiensi spektrum meningkat sesuai dengan jumlah antena pengirim (N). Dalam hal ini, jumlah antena penerima tidak boleh melebihi antena pengirim (P) untuk menghindari

terjadinya inefisiensi. Untuk mengimplementasikan teknik *Spatial Multiplexing*, dapat dengan menggunakan antenna susun (*Array Antenna*) [14,15].



Gambar 2.15. Spatial Multiplexing [14]

Spatial Multiplexing merupakan teknik pengiriman sinyal dengan menggunakan banyak antena (multi antena). Sebelum sinyal dimodulasi (dengan sistem modulasi M-QAM), aliran bit-bit masukan dapat digabungkan sesuai dengan jumlah antena pengirim (N) yang tersedia sebagai berikut :

$$B_{N \times k} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{Nk} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

di mana elemen matriks pada baris 1 ($a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1k}$) merupakan untaian bit pertama, elemen matriks pada baris 2 ($a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2k}$) merupakan untaian bit kedua begitu seterusnya hingga elemen matriks pada baris k ($a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{Nk}$) yang menyatakan untaian bit terakhir, dengan k = jumlah bit dan N = jumlah antena pengirim. Jumlah dari untaian bit disesuaikan dengan jumlah antena pengirim.

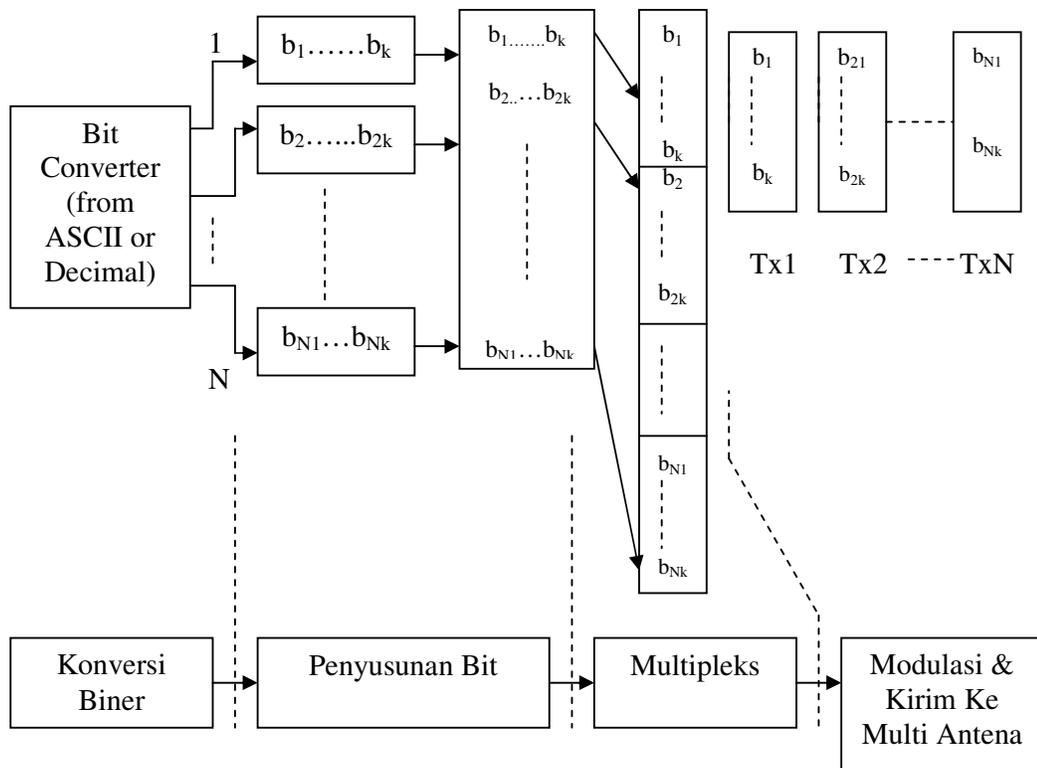
Kemudian, dengan teknik *Spatial Multiplexing*, aliran bit-bit digabungkan secara serial (dalam 1 kolom) untuk kemudian dimodulasi sesuai dengan konstelasi bit M-QAM pada pemetaan *Gray Coding* (*Gray Mapping*), yaitu :

$$M_{2k \times 1} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{2k1} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Sebelum dimodulasi dan dikirimkan, sinyal-sinyal dalam bentuk serial tersebut dipisahkan menjadi beberapa kolom sesuai dengan jumlah antenna pengirim, dengan ketentuan :

$$X_{k \times 2} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Teknik *Spatial Multiplexing* pada sisi pengirim digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.16. Pemrosesan Bit Di Unit Pengirim

2.4.1. Maximum Ratio Combining (MRC)

Sinyal-sinyal yang dikirimkan menggunakan multi antenna secara mandiri (multi cabang) dengan menggunakan teknik *Spatial Multiplexing* merupakan sinyal-sinyal hasil penggabungan (telah dimultipleks) di sisi pengirim. Untuk

memproses *data output*, perlu adanya pengenalan (*detection*) di sisi penerima untuk menemukan kembali sinyal-sinyal sebelum dimultiples dan menghilangkan efek dari pengiriman sinyal gabungan ke dalam kanal komunikasi yang dipengaruhi oleh interferensi dan *noise*. Metode pengenalan sinyal ini disebut dengan *Combining Methods*. Terdapat beberapa metode *Combining Methods*, di antaranya adalah : *Selection Combining* (SIC), *Switched Combining* (SwC), *Equal Gain Combining* (EGC) dan *Maximum Ratio Combining* (MRC) [15].

Maximum Ratio Combining (MRC) merupakan metode pengenalan sinyal yang memilih cabang sinyal (vektor sinyal) V terbaik dari beberapa cabang (vektor) sinyal yang diterima dengan gangguan terberat (*branch weight*). Sinyal yang dipilih adalah sinyal dengan gangguan terberat yang dipengaruhi oleh Rayleigh Fading H . Dengan metode MRC, sinyal terbaik dengan pengurangan *noise* (MRC) secara maksimal dapat diperoleh dengan memilih nilai minimal dari kuadrat invers sinyal Rayleigh Fading G sehingga dapat dihasilkan sinyal keluaran dengan pengurangan *noise* (SNR) semaksimal mungkin mengikuti rumus sebagai berikut [15] :

$$|V| = \arg \min |G|^2 \quad (2.34)$$

2.4.2. Metode Pendeteksian Sinyal Error

Penerimaan dan pendeteksian sinyal pada teknik *Spatial Multiplexing* dapat dibedakan atas *Maximum Likelihood Detection* dan *Linear Detection*. Jika kanal komunikasi tidak terdeteksi, maka *detector* di sisi penerima dapat menggunakan *Maximum Likelihood Decoder* yang mencari kemungkinan vektor input X yang sangat mirip (dengan perkiraan maksimum) melalui kriteria jarak minimum (*min dist*), dengan persamaan [14] :

$$X = \arg \min |Y - H.X|^2 \quad (2.35)$$

di mana Y = sinyal yang diterima dan H = sinyal gangguan. Pada metode ML, proses perhitungan iteratif digunakan untuk meminimalkan perbedaan antara *sample* dengan model yang diimplementasikan [16].

Apabila pencarian dengan Maximum Likelihood terlalu kompleks, metode pendeteksian secara linear dapat dilakukan untuk *me-recovery* vektor

sinyal X yang dikirimkan. *Detector Linear* yang paling nyata adalah *Zero Forcing Detector*. Sesuai namanya, *Zero Forcing Detector* menghapus sinyal *spatial interference* (sinyal *Rayleigh Fading*) pada sinyal yang diterima hingga mendekati nilai nol. Pendeteksian sinyal dapat dilakukan dengan mensek sinyal interferensi H menjadi invers kanal G_{ZF} dengan persamaan [14] :

$$G_{ZF} = H^{-1} \quad (2.36)$$

Zero Forcing Detector dapat diterapkan pada sistem *Spatial Multiplexing* dengan jumlah antena pengirim (N) sama dengan jumlah antena penerima (P).

Penerimaan dan pendeteksian sinyal dengan metode *Minimum Mean Square Error (MMSE)* pada teknik *Spatial Multiplexing* adalah metode untuk mengurangi sinyal interferensi (*Rayleigh Fading*) pada sinyal yang diterima hingga mendekati nilai kesalahan rata-rata minimum. Setelah antena penerima memperoleh sinyal dari kanal komunikasi yang telah dipengaruhi oleh gangguan interferensi *Rayleigh Fading* dan *Additive White Gaussian Noise*, detektor MMSE mendeteksi sinyal asli sebelum dikirimkan dengan menggunakan persamaan [14] :

$$\mathbf{G}_{mmse} = (\mathbf{H}^* \mathbf{H} + \frac{\sigma_z^2}{P_t} \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^* \quad (2.37)$$

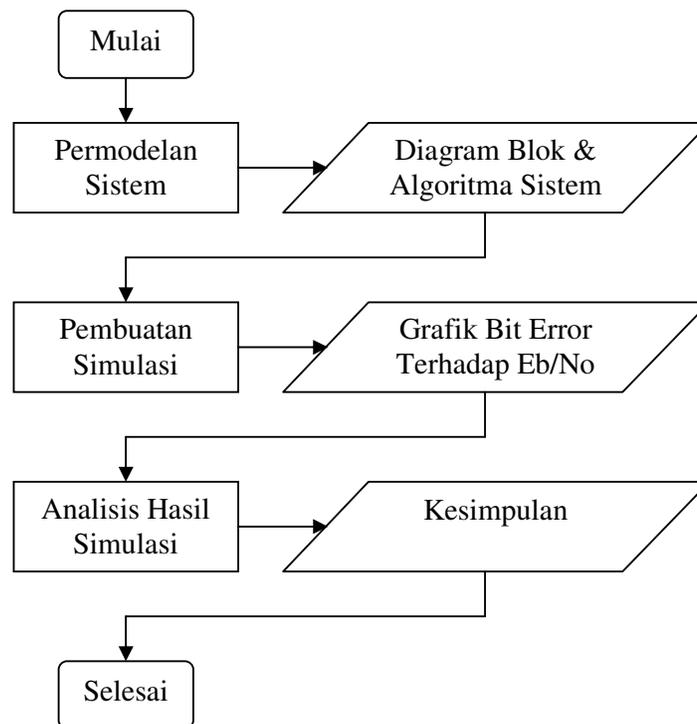
di mana H = sinyal *spatial interference* (sinyal *Rayleigh Fading*), \mathbf{H}^* = invers atau kebalikan dari sinyal H, I = sinyal identitas (berlogika 1), dengan sinyal *noise* dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$n = \frac{\sigma_z^2}{P_t} = \frac{N}{10^{0,1.n}} \quad (2.38)$$

BAB 3
PERMODELAN SISTEM DAN PEMBUATAN SIMULASI

3.1. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang diperlukan untuk menganalisa penggunaan metode penerimaan dan pendeteksian sinyal dengan teknik *Spatial Multiplexing* pada sistem modulasi M-QAM sesuai dengan pemetaan *Gray Coding* dalam kanal komunikasi yang dipengaruhi oleh *Rayleigh Fading* diuraikan sebagai berikut :



Gambar 3.1. Tahapan Penelitian

1. Permodelan Sistem

Tahapan pertama penelitian adalah membuat permodelan yang menghasilkan diagram blok sistem yang menggambarkan penggunaan teknik *Spatial Multiplexing* pada sistem modulasi M-QAM dipengaruhi Rayleigh Fading.

2. Pembuatan Simulasi

Pembuatan simulasi dilakukan dengan membuat program m-file pada perangkat lunak Matlab versi 7.6.0 (R2008a) untuk menguji penggunaan teknik *Spatial Multiplexing* dengan ketiga metode penerimaan dan pendeteksian sinyal dalam teknik *Spatial Multiplexing*, yaitu : *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*, *Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC)* dan *Maximum Likelihood (ML)*. Hasil simulasi berupa Grafik Perbandingan Jumlah Bit Error terhadap Eb/No pada modulasi 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM

3. Analisis Hasil Simulasi

Bagian ini (yang akan diuraikan dalam Bab IV) akan menganalisa hasil simulasi berupa Grafik Perbandingan Jumlah Bit Error terhadap Eb/No pada modulasi 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM sehingga didapat suatu kesimpulan (thesa) tentang pengaruh peningkatan jumlah data maksimum (M) dan peningkatan nilai Eb/No dengan metode penerimaan dan pendeteksian sinyal dalam teknik *Spatial Multiplexing* pada kelima modulasi M-QAM. Selanjutnya, kesimpulan diuraikan pada Bab V

3.2. Permodelan Sistem

Diagram blok sistem yang dibuat untuk menggambarkan penggunaan teknik *Spatial Multiplexing* pada sistem modulasi M-QAM yang dipengaruhi oleh interferensi Rayleigh Fading dan *noise* AWGN, dapat dibagi atas :

1. Unit Pengirim (Transmitter)

Diagram blok sistem yang terdapat pada unit pengirim (*transmitter*), terdiri atas Proses Data Input, *Spatial Multiplexing*, dan Modulasi M-QAM

2. Unit Kanal Komunikasi

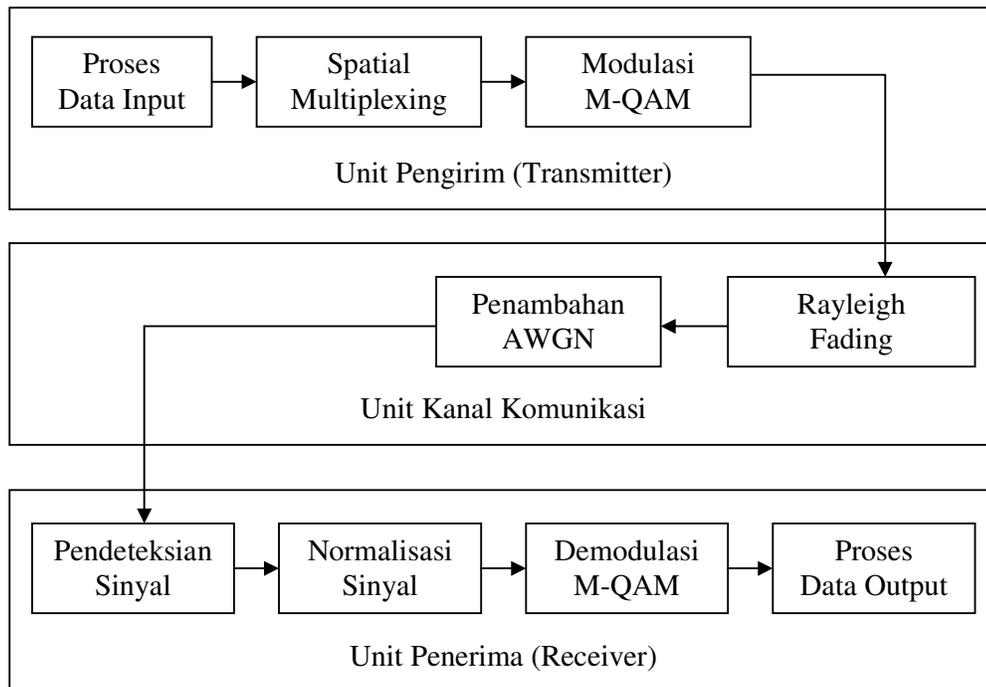
Diagram blok sistem yang terdapat pada unit kanal komunikasi, terdiri atas : Rayleigh Fading dan Penambahan AWGN

3. Unit Penerima (Receiver)

Diagram blok sistem yang terdapat pada unit penerima (*receiver*) menggambarkan proses penerimaan dan pendeteksian sinyal. Pada dasarnya, diagram blok

sistem untuk ketiga metode pendeteksian dan penerimaan sinyal dalam teknik *Spatial Multiplexing*, yaitu : *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*, *Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC)* dan *Maximum Likelihood (ML)* adalah sama. Perbedaannya terletak pada metode pendeteksian interferensi dari sinyal yang diterima. Diagram blok sistem yang terdapat pada unit penerima (*receiver*), terdiri atas : Pendeteksian Sinyal, Normalisasi Sinyal, Demodulasi M-QAM, dan Proses Data Output.

Pembuatan diagram blok sistem yang menjelaskan permodelan sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 3.2. berikut :



Gambar 3.2. Diagram Blok Sistem

Algoritma pada permodelan sistem di atas dapat diuraikan sebagai berikut

1. Di Unit Pengirim (Transmitter)

Proses pembentukan sinyal diawali dengan memproses masukan data (*data input*), yaitu dengan menghasilkan bilangan biner dan membentuk matriks bit

B sesuai jumlah antena pengirim (N), dilanjutkan dengan penerapan teknik *Spatial Multiplexing*, yaitu penggabungan untaian bit dengan baris yang terpisah pada matriks bit menjadi satu kolom matriks bit yang dapat dikirimkan secara mandiri dengan beberapa antena pengirim (N). Sebelum dikirimkan, konstelasi sinyal disusun sesuai dengan pemetaan *Gray Coding* untuk kemudian dimodulasi dengan teknik modulasi M-QAM.

2. Di Unit Kanal Komunikasi

Dalam proses *Rayleigh Fading*, sinyal hasil modulasi dikalikan dengan sinyal *Rayleigh Fading*. Kemudian, dilanjutkan dengan menghitung *Signal To Noise Ratio (SNR)* untuk ditambahkan sebagai *noise Additive White Gaussian Noise (AWGN)* pada sinyal hasil perkalian dengan sinyal *Rayleigh Fading*.

3. Di Unit Penerima (Receiver)

Interferensi yang terdapat pada sinyal yang diterima dideteksi dengan ketiga metode penerimaan dan pendeteksian sinyal dalam teknik *Spatial Multiplexing*, yaitu : *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*, *Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC)* dan *Maximum Likelihood (ML)*. Normalisasi sinyal dilakukan untuk menemukan kembali bit-bit informasi yang telah dipengaruhi gangguan. Setelah itu sinyal didemodulasi dan hasil demodulasi diproses untuk menghasilkan keluaran data (*data output*) yang sesuai dengan masukan data (*data input*).

3.3. Pembuatan Simulasi

Pembuatan simulasi dilakukan dengan pembuatan program m-file pada perangkat lunak *Matrix Laboratory (Matlab)* versi 7.6.0 (R2008a) sehingga dapat dihasilkan Grafik Perbandingan Jumlah Bit Error terhadap Eb/No. Simulasi dibuat pada ketiga metode penerimaan dan pendeteksian sinyal dalam teknik *Spatial Multiplexing*, yaitu : *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*, *Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC)* dan *Maximum Likelihood (ML)*, yang diimplementasikan pada sistem modulasi M-QAM, yaitu 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM dalam kanal

yang dipengaruhi oleh *Rayleigh Fading*. Multi antena dibatasi pada 2 antena pengirim Tx ($N = 2$) dan 2 antena penerima Rx ($P = 2$).

3.3.1. Simulasi Proses Data Input

Proses masukan data (*data input*) pada pemrograman m-file dilakukan dengan fungsi pembentukan matriks 'reshape' untuk menghasilkan matriks bit. Algoritma untuk memproses masukan data (*data input*) adalah sebagai berikut :

1. Konversi Ke Biner

Semua masukan data (*data input*) diubah menjadi bilangan biner (bit). Dalam tesis ini digunakan *sample* bilangan-bilangan desimal sebagai data awal yang kemudian diubah ke biner. Untuk 4-QAM, dengan 4 data masukan ($M = 4$) dapat diubah menjadi 2 bit ($k = 2$), yaitu : $0_{10} = 00_2$, $1_{10} = 01_2$, $2_{10} = 10_2$, $3_{10} = 11_2$. Sedangkan untuk 64-QAM, dengan 64 data masukan ($M = 64$) dapat diubah menjadi 6 bit ($k = 6$), yang dimulai dari $0_{10} = 000000_2$ hingga $63_{10} = 111111_2$. Dengan $M =$ jumlah data masukan, $k =$ jumlah bit, direlasikan dengan

$$k = \log_2 M \quad (3.1)$$

2. Pembuatan Multi Bit

Dengan menggunakan sejumlah antena pengirim (N) dan sejumlah antena penerima ($P \geq N$), data yang dapat dikirimkan diperbanyak, sehingga jumlah bit yang dapat dikirimkan menjadi :

$$b = N \times k \quad (3.2)$$

Data masukan yang dapat diubah menjadi bit-bit (b) dimulai dari 0_{10} sampai dengan L_{10} , di mana nilai L_{10} dapat ditentukan dengan persamaan :

$$L_{10} = 2^b - 1 \quad (3.3)$$

Dengan menentukan jumlah antena pengirim ($N = 2$) dan jumlah antena penerima ($P = 2$) untuk sistem modulasi M-QAM, yang dimulai dari 4-QAM ($k = 2$) hingga 64-QAM ($k = 6$), maka untaian biner dapat digandakan. Untuk 4-QAM, jumlah bit dapat diperbanyak menjadi 4 bit ($N \times k = 2 \times 2 = 4$) dengan kombinasi data masukan yang dimulai dari 0_{10} hingga 15_{10} ($2^{2 \times 2} - 1 = 15_{10}$), sedangkan untuk 64-QAM, jumlah bit dapat diperbanyak menjadi 12 bit ($N \times k = 2 \times 6 = 12$) dengan kombinasi data masukan yang dimulai dari 0_{10} hingga

$4095_{10} (2^{6.2} - 1 = 4095_{10})$. Penempatan untaian bit-bit dilakukan dalam baris yang terpisah pada matriks bit $[B]_{N \times k}$, di mana untuk 4-QAM, pada baris ke-1 dan baris ke-2 ditempatkan 2 bit (00_2 hingga 11_2), sedangkan untuk 64-QAM, pada baris ke-1 dan baris ke-2 ditempatkan 6 bit (000000_2 hingga 111111_2)

Bentuk matriks bit $[B]_{N \times k}$ dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$B_{N \times k} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{N.k} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dengan $N = 2$, $P = 2$, $k = 2$, untuk 4-QAM, didapat matrks bit $[B]_{N \times k}$ berikut

$$B_{2 \times 2} \text{ 4-QAM}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ hingga } B_{2 \times 2} \text{ 4-QAM}_{15} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Dengan $N = 2$, $P = 2$, $k = 6$, untuk 64-QAM, didapat matrks bit $[B]_{N \times k}$ berikut

$$B_{6 \times 2} \text{ 64-QAM}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ hingga}$$

$$B_{6 \times 2} \text{ 64-QAM}_{4095} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3.2. Simulasi Spatial Multiplexing

Spatial Multiplexing merupakan teknik pengiriman sinyal dengan menggunakan banyak antena (multi antena) yang dapat menggabungkan pengiriman sinyal sekaligus dalam saat yang bersamaan. Algoritma yang menjelaskan penerapan teknik *Spatial Multiplexing* di unit pengirim dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Penggabungan Bit (Bit Multiplexing)

Data berupa untaian bit-bit dalam matriks bit $[B]_{N \times k}$ yang terpisah dalam N baris dan k kolom digabungkan menjadi 1 kolom dengan jumlah baris = $2k$ sehingga dihasilkan matriks penggabungan bit $[M]_{2k \times 1}$, yaitu :

$$M_{2k \times 1} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{2k1} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

dengan $a_{11} = 2^0, a_{21} = 2^1, a_{31} = 2^2, \dots, a_{2k1} = 2^{k-1}$ (3.6)

Pada modulasi 4-QAM, matriks $[M]_{2k \times 1}$ yang dihasilkan adalah :

$$M_{4 \times 1 \text{ 4-QAM}_0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ hingga } M_{4 \times 1 \text{ 4-QAM}_{15}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Pada modulasi 64-QAM, matriks $[M]_{2k \times 1}$ yang dihasilkan adalah :

$$M_{6 \times 1 \text{ 64-QAM}_0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ hingga } M_{6 \times 1 \text{ 64-QAM}_{4095}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

2. Penyusunan Konstelasi Bit (Bit Array)

Untuk menyusun konstelasi bit sesuai dengan pemetaan *Gray Coding*, matriks bit yang telah dihasilkan pada proses *Spatial Multiplexing* disusun kembali sesuai dengan ukuran konstelasi sinyal (k) dengan 2 antena pengirim, sehingga matriks $[M]_{2k \times 1}$ diubah menjadi $[X]_{k \times 2}$ sebagai berikut :

$$X_{k \times 2} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

di mana a_{k1} pada matriks $[X]_{k \times 2}$ merupakan $(a_{2k1} / 2)$ pada matriks $[M]_{2k \times 1}$,

dan a_{k2} pada matriks $[X]_{k \times 2}$ merupakan a_{2k1} pada matriks $[M]_{2k \times 1}$. Contoh dari perubahan matriks $[M]_{2k \times 1}$ menjadi $[X]_{k \times 2}$ dijelaskan sebagai berikut :

$$X_{2 \times 2} \text{ 4-QAM}_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ dihasilkan dari matriks } M_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$X_{6 \times 2} \text{ 64-QAM}_{520} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ dihasilkan dari matriks } M_{12 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

3.3.3. Simulasi Modulasi M-QAM

Proses modulasi sinyal dengan teknik modulasi M-QAM dilakukan pada masing-masing kolom yang telah dihasilkan pada langkah sebelumnya (Penyusunan Konstelasi Bit) dengan mengacu pada pemetaan *Gray Coding*. Pemetaan *Gray Coding* terdiri atas sisi tegak (*Quadrature = Q*) yang menyatakan tinggi rendah sinyal (amplitudo) dan sisi datar (*In-Phase = I*) yang menyatakan sudut sinyal (*phase*) sesuai dengan Gambar 2.3, Gambar 2.4, Gambar 2.5, Gambar 2.6 dan Gambar 2.7 yang telah dijelaskan sebelumnya di Bab II, di mana (Q,I) merupakan pasangan bilangan real yang menyatakan amplitudo dan *phase* pada modulasi M-QAM.

Untuk sinyal $X_{2 \times 2} \text{ 4-QAM}_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ dapat diterjemahkan ke dalam

sinyal analog sebagai tinggi gelombang (amplitudo) dan sudut sinyal (*phase*) yang

disesuaikan dengan konstelasi sinyal (I,Q) = (-3d,+d) pada antenna kirim 1 (Tx₁) dan antenna kirim 2 (Tx₂), Penjelasan lebih detil ada di Bab II (2.2.4).

Proses modulasi sinyal dengan teknik modulasi M-QAM pada pemrograman m-file dilakukan dengan instruksi program :

```
hMod = modem.qammod('M', 'SymbolOrder', 'InputType');
```

Untuk modulasi M-QAM dengan perintah modem.qammod, terdapat 3 masukan yang perlu diberikan, yaitu :

1. Nilai Multilevel Modulasi (M)

Merupakan banyaknya data yang dapat dikirimkan, yang dapat dinyatakan dengan k ($\log_2 M$) bit, sesuai rumus (3.1) di atas. Jadi M-QAM untuk 32-QAM, memiliki jumlah data yang dapat dikirimkan sebanyak $M = 32$, yang dapat dinyatakan ke dalam bit sebanyak $k = \log_2 M = \log_2 32 = 5$ bit.

2. Jenis Pemetaan Sinyal (SymbolOrder)

Merupakan jenis pemetaan yang digunakan dalam proses modulasi M-QAM, dengan pilihan : binary, gray atau user-defined. Dalam tesis ini digunakan jenis pemetaan *Gray*, yang pembahasannya telah dijelaskan di Bab II.

3. Jenis Masukan (InputType)

Merupakan jenis masukan, dengan pilihan : biner (bit) atau bulat (real). Dari proses yang dihasilkan sebelumnya, dalam tesis ini digunakan input type = bit.

3.3.4. Simulasi Rayleigh Fading

Setelah memasuki kanal komunikasi, sinyal yang dikirimkan melalui 2 antenna kirim (Tx₁ dan Tx₂), mengalami gangguan. Gangguan dalam kanal komunikasi dapat berupa interferensi *Rayleigh Fading* (R_f). Untuk memberikan sinyal gangguan interferensi *Rayleigh Fading*, dalam simulasi ini diberikan sinyal pengganggu mengikuti persamaan R_f [6] sebagai berikut :

$$R_f = \alpha \cdot e^{j\theta} = \alpha(\cos \theta + j \sin \theta) \quad (3.8)$$

dengan $\theta = 45^\circ$, $\alpha = [H]_{P \times N}$, maka persamaan (3.8) dapat dinyatakan sebagai :

$$R_f = [H]_{P \times N} (\cos \theta + j \sin \theta) = [H]_{P \times N} (\cos 45^\circ + j \sin 45^\circ)$$

$$R_f = [H]_{P \times N} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + j \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = \left(\frac{[H]_{P \times N} + j[H]_{P \times N}}{\sqrt{2}} \right) \quad (3.9)$$

Dengan $P = 2$, $N = 2$ dalam simulasi ini, penambahan sinyal gangguan dibuat dalam bentuk matriks $[H]_{2 \times 2}$, sebagai berikut

$$H_{2 \times 2} = \frac{\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}}{\sqrt{2}}$$

$$H_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \\ \frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

sehingga sinyal akhir setelah mengalami gangguan *Rayleigh Fading* adalah :

$$F_{k \times 2} = X_{k \times 2} \times H_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \\ \frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

atau dapat juga dinyatakan sebagai :

$$F_{k \times 2} = \begin{bmatrix} a_{11} \left(\frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} \right) + a_{12} \left(\frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} \right) & a_{11} \left(\frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \right) + a_{12} \left(\frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \right) \\ a_{21} \left(\frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} \right) + a_{22} \left(\frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} \right) & a_{21} \left(\frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \right) + a_{22} \left(\frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \right) \\ \vdots & \vdots \\ a_{k1} \left(\frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} \right) + a_{k2} \left(\frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} \right) & a_{k1} \left(\frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \right) + a_{k2} \left(\frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \right) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

3.3.5. Simulasi Penambahan AWGN

Simulasi *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) atau (n) dilakukan dengan fungsi 'awgn' pada pemrograman m-file, yaitu dengan menambahkan nilai *Signal To Noise Ratio* (SNR) pada matriks sinyal *Rayleigh Fading* $F_{k \times 2}$. Pencarian SNR dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2.3) berikut :

$$n = (\text{SNR})_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) = 10 \log_{10} P \quad (3.13)$$

Sample untuk P dalam simulasi ini adalah nilai k dalam watt, sehingga :

1. Pada 4-QAM

$P = 2$ watt, sehingga $n = \text{SNR} = 10 \log_{10} 2 = 3,01$ dB.

2. Pada 8-QAM

$P = 3$ watt, sehingga $n = \text{SNR} = 10 \log_{10} 3 = 4,771$ dB.

3. Pada 16-QAM

$P = 4$ watt, sehingga $n = \text{SNR} = 10 \log_{10} 4 = 6,02$ dB

4. Pada 32-QAM

$P = 5$ watt, sehingga $n = \text{SNR} = 10 \log_{10} 5 = 6,989$ dB

5. Pada 64-QAM

$P = 6$ watt, sehingga $n = \text{SNR} = 10 \log_{10} 6 = 7,781$ dB

Hasil $(\text{SNR})_{\text{dB}}$ kemudian ditambahkan ke persamaan (3.13) sehingga dihasilkan sinyal yang telah dipengaruhi oleh gangguan interferensi *Rayleigh Fading* dan *Additive White Gaussian Noise* sebagai berikut :

$$Y = \sum_{k=1}^K X.H + n \quad (3.14)$$

$$[Y]_{k \times 2} = \{ [X]_{k \times 2} \times [H]_{2 \times 2} \} + n$$

$$[Y]_{k \times 2} = [F]_{k \times 2} + n \quad (3.15)$$

Matriks sinyal $[Y]_{k \times 2}$ yang telah dipengaruhi gangguan dalam kanal komunikasi dapat dijelaskan sebagai berikut :

$$Y_{k \times 2} = \begin{bmatrix} a_{11} \left(\frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} \right) + a_{12} \left(\frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} \right) + n & a_{11} \left(\frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \right) + a_{12} \left(\frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \right) + n \\ a_{21} \left(\frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} \right) + a_{22} \left(\frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} \right) + n & a_{21} \left(\frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \right) + a_{22} \left(\frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \right) + n \\ \vdots & \vdots \\ a_{k1} \left(\frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \right) + a_{k2} \left(\frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \right) + n & a_{k1} \left(\frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \right) + a_{k2} \left(\frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \right) + n \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

3.3.6. Simulasi Penerimaan Dan Pendeteksian Sinyal ZF-SIC

Penerimaan dan pendeteksian sinyal dengan metode *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)* pada teknik *Spatial Multiplexing* adalah metode untuk menghapus sinyal interferensi (*Rayleigh Fading*) pada sinyal

yang diterima secara berurutan hingga mencapai nilai nol. Algoritma penerimaan dan pendeteksian sinyal dengan metode *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)* terdiri atas :

1. Pendeteksian Sinyal
2. Normalisasi Sinyal
3. Demodulasi M-QAM
4. Proses Data Output
5. Penghitungan Jumlah Bit Error

A. Pendeteksian Sinyal

Algoritma pendeteksian sinyal dengan metode ZF-SIC adalah :

1. Penentuan Invers Rayleigh Fading

Setelah antenna penerima (P) menerima sinyal yang berasal dari kanal komunikasi yang telah dipengaruhi oleh gangguan interferensi *Rayleigh Fading* dan *Additive White Gaussian Noise*, $[Y]_{k \times 2}$, Detektor ZF-SIC mendeteksi sinyal asli sebelum dikirimkan $[X]_{k \times 2}$ dengan mengikuti persamaan sebagai berikut

$$[Y]_{k \times 2} = \{ [X]_{k \times 2} \times [H]_{2 \times 2} \} + n$$

$$[X]_{k \times 2} = \frac{[Y]_{k \times 2} - n}{[H]_{2 \times 2}}$$

$$[X]_{k \times 2} = \{ [Y]_{k \times 2} - n \} \times [H]^{-1}_{2 \times 2} \quad (3.17)$$

Jika , $[G]_{2 \times 2} = [H]^{-1}_{2 \times 2} \quad (3.18)$

maka persamaan (3.17) dapat ditulis ulang sebagai :

$$[X]_{k \times 2} = \{ [Y]_{k \times 2} - n \} \times [G]_{2 \times 2} \quad (3.19)$$

di mana matriks $[G]_{2 \times 2}$ yang dihasilkan dari $[H]^{-1}_{2 \times 2}$ adalah :

$$G_{2 \times 2} = \frac{\begin{bmatrix} \frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} & -\frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \\ -\frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}}{\left(\frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} \times \frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \right) - \left(\frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \times \frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} \right)} \quad (3.20)$$

Matriks $G_{2 \times 2}$ dapat disederhanakan menjadi :

$G_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$ dengan elemen-elemen matriks sebagai berikut :

$$g_{11} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [-a_{22} \{(a_{11} \cdot a_{22}) + (a_{12} \cdot a_{21})\} + ja_{22} \{(a_{11} \cdot a_{22}) + (a_{12} \cdot a_{21})\}]$$

$$g_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [a_{12} \{(a_{11} \cdot a_{22}) + (a_{12} \cdot a_{21})\} - ja_{12} \{(a_{11} \cdot a_{22}) + (a_{12} \cdot a_{21})\}]$$

$$g_{21} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [a_{21} \{(a_{11} \cdot a_{22}) + (a_{12} \cdot a_{21})\} - ja_{21} \{(a_{11} \cdot a_{22}) + (a_{12} \cdot a_{21})\}]$$

$$g_{22} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [-a_{11} \{(a_{11} \cdot a_{22}) + (a_{12} \cdot a_{21})\} + ja_{11} \{(a_{11} \cdot a_{22}) + (a_{12} \cdot a_{21})\}]$$

2. Penentuan Sinyal Gangguan Minimum

Untuk pendeteksian sinyal interferensi (dan *noise*) terbaik, nilai mutlak minimum (V) dapat dihitung dari $[G]_{2 \times 2}$ sebagai berikut [8] :

$$|V| = \arg \min | [G]_{2 \times 2} |^2 \quad (3.21)$$

di mana $\arg \min$ singkatan dari *argument of the minimum* untuk menyatakan elemen-elemen matriks yang paling kecil (minimum). Persamaan (3.21) dapat diimplementasikan ke dalam matriks $[V]_{2 \times 1}$ dengan matriks $[G]_{2 \times 2}$ berikut

$$V_{2 \times 2} = \arg [G]_{2 \times 2}^2 = \begin{bmatrix} g_{11}^2 + g_{12}^2 \\ g_{21}^2 + g_{22}^2 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Apabila $(g_{11}^2 + g_{12}^2) < (g_{21}^2 + g_{22}^2)$ maka dihasilkan nilai mutlak minimum sebesar $(g_{11}^2 + g_{12}^2)$, dan apabila sebaliknya, maka dihasilkan nilai mutlak minimum sebesar $(g_{21}^2 + g_{22}^2)$.

Misalnya, nilai $g_{11} = 3$, $g_{12} = 4$, $g_{21} = 5$, $g_{22} = 6$, maka nilai

$$V_{2 \times 2} = \arg [G]_{2 \times 2}^2 = \begin{bmatrix} 3^2 + 4^2 \\ 5^2 + 6^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25 \\ 81 \end{bmatrix}$$

$$|V| = \arg \min |[G]_{2 \times 2}|^2 = \min \begin{bmatrix} 25 \\ 81 \end{bmatrix} = 25$$

3. Pemilihan Vektor Sinyal Gangguan Terberat (Maximum Ratio Combining)

Setelah itu, untuk memilih vektor gangguan dengan pengaruh terberat $[W]_{1 \times 2}$, dipilih baris pada $[G]_{2 \times 2}$ dengan elemen-elemen yang apabila dijumlahkan memiliki nilai lebih besar. Apabila $(g_{11}^2 + g_{12}^2) > (g_{21}^2 + g_{22}^2)$, maka

$[W]_{1 \times 2} = [g_{11} \quad g_{12}]$, begitupula sebaliknya mengikuti ketentuan berikut :

$$\begin{aligned} W_{1 \times 2} &= [g_{11} \quad g_{12}], (g_{11}^2 + g_{12}^2) > (g_{21}^2 + g_{22}^2) \\ W_{1 \times 2} &= [g_{21} \quad g_{22}], (g_{11}^2 + g_{12}^2) < (g_{21}^2 + g_{22}^2) \end{aligned} \quad (3.23)$$

4. Penyusunan Kembali Sinyal Gangguan

Sinyal Gangguan Terberat $[W]_{1 \times 2}$ diputar (di-*transpose*) sehingga menghasilkan matriks $[R]_{2 \times 1}$, sebagai berikut :

$$[R]_{2 \times 1} = [W]_{1 \times 2}^T \quad (3.24)$$

5. Penentuan Sinyal Gangguan Maksimum

Sinyal Gangguan Maksimum $[U]_{k \times 1}$ dapat ditentukan dari perkalian $[Y]_{k \times 2}$ yang dihasilkan dari rumus (3.15) dengan $[R]_{2 \times 1}$, sebagai berikut :

$$[U]_{k \times 1} = [Y]_{k \times 2} \times [R]_{2 \times 1} \quad (3.25)$$

B. Normalisasi Sinyal

Normalisasi sinyal dengan metode ZF-SIC dilakukan untuk mencari sinyal sebelum mengalami gangguan interferensi *Rayleigh Fading* dan *Additive White Gaussian Noise* $[X]_{k \times 2}$. Dari rumus (3.19), (3.20), (3.22) dan 3.25), maka sinyal asli dapat direkonstruksi kembali menjadi :

$$\begin{aligned} [X]_{k \times 2} &= \{ [Y]_{k \times 2} - n \} \times [G]_{2 \times 2} \\ [X]_{k \times 2} &= \{ [Y]_{k \times 2} \times [G]_{2 \times 2} \} - \{ n \times [G]_{2 \times 2} \} \\ [N]_{k \times 2} &\text{ diasumsikan sama dengan } [X]_{k \times 2} \\ n &= V \\ [Y]_{k \times 2} \times [G]_{2 \times 2} &= [U]_{k \times 1} \\ [N]_{k \times 2} &= [U]_{k \times 1} - \{ V \times [G]_{2 \times 2} \} \end{aligned} \quad (3.26)$$

C. Demodulasi M-QAM

Proses demodulasi sinyal dengan teknik demodulasi M-QAM dilakukan pada sinyal $[N]_{k \times 2}$ yang telah dihasilkan pada langkah sebelumnya (Normalisasi

Sinyal) dengan mengacu pada pemetaan *Gray Coding*. Proses modulasi sinyal dengan teknik modulasi M-QAM pada pemrograman m-file dilakukan dengan instruksi program :

```
hDemod = modem.gamdemod(hMod);
```

dengan parameter yang sama pada proses modulasi M-QAM. Dalam proses demodulasi M-QAM, sinyal $[U]_{1 \times k}$ yang direpresentasikan dengan bilangan kompleks (kombinasi bilangan real dan imajiner) dikonversi kembali menjadi bilangan biner (bit).

D. Proses Data Output

Proses *data output* adalah tahapan akhir untuk menghasilkan data sebelum dimodulasi dengan teknik modulasi M-QAM dan dimultipleks dengan teknik *Spatial Multiplexing*, yaitu dalam bentuk untaian biner pada matriks bit $[B]_{N \times k}$.

Matriks $[N]_{k \times 2}$ yang dihasilkan dari proses demodulasi M-QAM dikembalikan menjadi matriks $[M]_{k \times 1}$, untuk kemudian selanjutnya diubah menjadi matriks bit $[Z]_{N \times k}$ dengan elemen-elemen matriks seperti matriks bit $[B]_{N \times k}$

Dengan dihasilkannya matriks bit $[Z]_{N \times k}$, maka keseluruhan rangkaian proses komunikasi yang menggunakan teknik *Spatial Multiplexing* dengan teknik modulasi M-QAM dalam kanal komunikasi yang dipengaruhi oleh gangguan interferensi *Rayleigh Fading* dan *Additive White Gaussian Noise* dianggap selesai.

E. Penghitungan Jumlah Bit Error

Untuk menganalisa hasil simulasi, diperlukan keluaran berupa Grafik Perbandingan Jumlah Bit Error terhadap Eb/No. Oleh karena itu, perlu dilakukan penghitungan adanya *bit error* yang masih terjadi pada proses penerimaan dan pendeteksian sinyal dengan metode *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*. Penghitungan adanya *bit error* dilakukan sesuai dengan persamaan (2.2) sebagai berikut [19] :

$$[E]_{1 \times 2} = \frac{[U]^T_{1 \times k}}{[X]_{k \times 2}} = [U]^T_{1 \times k} \cdot [X]^{-1}_{k \times 2} \quad (3.27)$$

Dengan elemen-elemen matriks $[E]_{k \times 2}$ sebagai berikut :

$$E_{1 \times 2} = [a_{11} \quad a_{12}] \quad (3.28)$$

Nilai absolut (mutlak) dari matriks $[E]_{1 \times 2}$, yaitu $|E|$ dapat dicari dengan :

$$|E| = \arg \max [E]_{1 \times 2} \quad (3.29)$$

di mana $\arg \max$ singkatan dari *argument of the maximum* untuk menyatakan elemen-elemen matriks yang paling besar (maksimum). Jumlah *bit error* maksimum ($|E|$) yang ditentukan oleh persamaan (3.29) adalah nilai elemen matriks yang paling besar dari kedua elemen matriks yang ada.

3.3.7. Simulasi Penerimaan Dan Pendeteksian Sinyal MMSE-SIC

Penerimaan dan pendeteksian sinyal dengan metode *Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC)* pada teknik *Spatial Multiplexing* adalah metode untuk menghapus sinyal interferensi (*Rayleigh Fading*) pada sinyal yang diterima secara berurutan hingga mendekati nilai kesalahan rata-rata minimum. Algoritma penerimaan dan pendeteksian sinyal dengan metode *Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC)* terdiri atas

1. Pendeteksian Sinyal
2. Normalisasi Sinyal
3. Demodulasi M-QAM
4. Proses Data Output
5. Penghitungan Jumlah Bit Error

A. Pendeteksian Sinyal

Algoritma pendeteksian sinyal dengan metode *MMSE-SIC* adalah :

1. Penentuan Invers Rayleigh Fading

Setelah antenna penerima (P) menerima sinyal yang berasal dari kanal komunika-

si yang telah dipengaruhi oleh gangguan interferensi *Rayleigh Fading* dan *Additive White Gaussian Noise*, $[Y]_{k \times 2}$, Detektor MMSE-SIC mendeteksi sinyal asli sebelum dikirimkan $[X]_{k \times 2}$ dengan menggunakan persamaan (3.17). Untuk menentukan matriks $[G]_{2 \times 2}$ digunakan deteksi MMSE-SIC dengan ketentuan sebagai berikut [14] :

$$[G]_{2 \times 2} = \text{inv} \left[\{ [H]^T_{2 \times 2} \times [H]_{2 \times 2} \} + \left\{ \frac{N}{10^{0,1,n}} \times [I]_{2 \times 2} \right\} \right] \times [H]^T_{2 \times 2} \quad (3.30)$$

Jika $\{ [H]^T_{2 \times 2} \times [H]_{2 \times 2} \} + \left\{ \frac{N}{10^{0,1,n}} \times [I]_{2 \times 2} \right\} = [L]_{2 \times 2}$, maka persamaan (3.30) dapat ditulis ulang sebagai :

$$[G]_{2 \times 2} = [L]^{-1}_{2 \times 2} \times [H]^T_{2 \times 2} \quad (3.31)$$

dengan matriks $[H]_{2 \times 2}$ yang dihasilkan pada persamaan (3.10) sebagai berikut

$$H_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \\ \frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Transpose (putaran) matriks $[H]_{2 \times 2}$ adalah $[H]^T_{2 \times 2}$ adalah :

$$H^T_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} \\ \frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Sedangkan matriks identitas $[I]_{2 \times 2}$ adalah :

$$I_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dengan $\lambda = \frac{N}{10^{0,1,n}}$ maka matriks $[L]_{2 \times 2}$ dapat dirumuskan sebagai :

$$L_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} \\ \frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} \\ \frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
L_{2 \times 2} &= \begin{bmatrix} \frac{j2a_{11}^2}{2} + \frac{j2a_{21}^2}{2} & \frac{j2a_{11}a_{12}}{2} + \frac{j2a_{21}a_{22}}{2} \\ \frac{j2a_{12}a_{11}}{2} + \frac{j2a_{21}a_{22}}{2} & \frac{j2a_{12}^2}{2} + \frac{j2a_{22}^2}{2} \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \\
L_{2 \times 2} &= \begin{bmatrix} \lambda \left\{ \frac{j2a_{11}^2}{2} + \frac{j2a_{21}^2}{2} \right\} & \lambda \left\{ \frac{j2a_{11}a_{12}}{2} + \frac{j2a_{21}a_{22}}{2} \right\} \\ \lambda \left\{ \frac{j2a_{12}a_{11}}{2} + \frac{j2a_{21}a_{22}}{2} \right\} & \lambda \left\{ \frac{j2a_{12}^2}{2} + \frac{j2a_{22}^2}{2} \right\} \end{bmatrix} \quad (3.32)
\end{aligned}$$

Dengan demikian, $[L]^{-1}_{2 \times 2}$ dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
L^{-1}_{2 \times 2} &= \frac{\begin{bmatrix} \lambda \left\{ \frac{j2a_{12}^2}{2} + \frac{j2a_{22}^2}{2} \right\} & -\lambda \left\{ \frac{j2a_{11}a_{12}}{2} + \frac{j2a_{21}a_{22}}{2} \right\} \\ -\lambda \left\{ \frac{j2a_{12}a_{11}}{2} + \frac{j2a_{21}a_{22}}{2} \right\} & \lambda \left\{ \frac{j2a_{11}^2}{2} + \frac{j2a_{21}^2}{2} \right\} \end{bmatrix}}{\frac{\lambda^2}{4} \left[\left(\left(j2a_{12}^2 + j2a_{22}^2 \right) \left(j2a_{11}^2 + j2a_{21}^2 \right) \right) - \left(j2a_{12}a_{11} + j2a_{21}a_{22} \right)^2 \right]} \\
& \quad (3.33)
\end{aligned}$$

Sehingga $[G]_{2 \times 2}$ dapat ditulis sebagai :

$$\begin{aligned}
G_{2 \times 2} &= \frac{\begin{bmatrix} \lambda \left\{ \frac{j2a_{12}^2}{2} + \frac{j2a_{22}^2}{2} \right\} & -\lambda \left\{ \frac{j2a_{11}a_{12}}{2} + \frac{j2a_{21}a_{22}}{2} \right\} \\ -\lambda \left\{ \frac{j2a_{12}a_{11}}{2} + \frac{j2a_{21}a_{22}}{2} \right\} & \lambda \left\{ \frac{j2a_{11}^2}{2} + \frac{j2a_{21}^2}{2} \right\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{a_{11} + ja_{11}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{21} + ja_{21}}{\sqrt{2}} \\ \frac{a_{12} + ja_{12}}{\sqrt{2}} & \frac{a_{22} + ja_{22}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}}{\frac{\lambda^2}{4} \left[\left(\left(j2a_{12}^2 + j2a_{22}^2 \right) \left(j2a_{11}^2 + j2a_{21}^2 \right) \right) - \left(j2a_{12}a_{11} + j2a_{21}a_{22} \right)^2 \right]} \\
& \quad (3.34)
\end{aligned}$$

2. Penentuan Sinyal Gangguan Minimum

Untuk pendeteksian sinyal interferensi (dan *noise*) terbaik, nilai mutlak minimum (V) dapat dihitung dari $[G]_{2 \times 2}$ sesuai persamaan (3.21) dan (3.22)

3. Pemilihan Vektor Sinyal Gangguan Terberat (Maximum Ratio Combining)

Setelah itu, untuk memilih vektor gangguan dengan pengaruh terberat $[W]_{1 \times 2}$, dipilih baris pada $[G]_{2 \times 2}$ dengan elemen-elemen yang apabila dijumlahkan memiliki nilai lebih besar, sesuai dengan persamaan (3.23).

4. Penyusunan Kembali Sinyal Gangguan

Sinyal Sinyal Gangguan Terberat $[W]_{1 \times 2}$ diputar (di-*transpose*) sehingga

menghasilkan matriks $[R]_{2 \times 1}$ sesuai persamaan (3.24)

5. Penentuan Sinyal Gangguan Maksimum

Sinyal Gangguan Maksimum $[U]_{k \times 1}$ dapat ditentukan dari perkalian $[Y]_{k \times 2}$ yang dihasilkan dari persamaan (3.15) dengan $[R]_{2 \times 1}$ sesuai persamaan (3.25)

B. Normalisasi Sinyal

Normalisasi sinyal dengan metode MMSE-SIC dilakukan untuk mencari sinyal sebelum mengalami gangguan interferensi *Rayleigh Fading* dan *Additive White Gaussian Noise* $[X]_{k \times 2}$. Dari persamaan (3.19), (3.20), (3.22) dan 3.25), maka sinyal asli dapat direkonstruksi kembali sesuai persamaan (3.26)

C. Demodulasi M-QAM

Proses demodulasi sinyal dengan teknik demodulasi M-QAM dilakukan pada sinyal $[N]_{k \times 2}$ yang telah dihasilkan pada langkah sebelumnya (Normalisasi Sinyal) dengan mengacu pada pemetaan *Gray Coding*. Proses demodulasi sinyal dengan teknik demodulasi M-QAM pada pemrograman m-file dilakukan dengan instruksi program :

```
hDemod = modem.qamdemod(hMod);
```

dengan parameter yang sama pada proses modulasi M-QAM. Dalam proses demodulasi M-QAM, sinyal $[U]_{1 \times k}$ yang direpresentasikan dengan bilangan kompleks (kombinasi bilangan real dan imajiner) dikonversi kembali menjadi bilangan biner (bit).

D. Proses Data Output

Proses *data output* adalah tahapan akhir untuk menghasilkan data sebelum dimodulasi dengan teknik modulasi M-QAM dan dimultipleks dengan teknik *Spatial Multiplexing*, yaitu dalam bentuk untaian biner pada matriks bit $[B]_{N \times k}$.

Matriks $[N]_{k \times 2}$ yang dihasilkan dari proses demodulasi M-QAM dikembalikan menjadi matriks $[M]_{k \times 1}$, untuk kemudian selanjutnya diubah menjadi matriks bit $[Z]_{N \times k}$ dengan elemen-elemen matriks seperti matriks bit $[B]_{N \times k}$

Dengan dihasilkannya matriks bit $[Z]_{N \times k}$, maka keseluruhan rangkaian proses komunikasi yang menggunakan teknik *Spatial Multiplexing* dengan teknik modulasi M-QAM dalam kanal komunikasi yang dipengaruhi oleh gangguan interferensi *Rayleigh Fading* dan *Additive White Gaussian Noise* dianggap selesai.

E. Penghitungan Jumlah Bit Error

Untuk menganalisa hasil simulasi, diperlukan keluaran berupa Grafik Perbandingan Jumlah Bit Error terhadap E_b/N_0 . Oleh karena itu, perlu dilakukan penghitungan adanya *bit error* yang masih terjadi pada proses penerimaan dan pendeteksian sinyal, seperti halnya pada metode *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*. Penghitungan Jumlah Bit Error dilakukan sesuai persamaan (3.27), (3.28) dan (3.29).

3.3.8. Simulasi Penerimaan Dan Pendeteksian Sinyal Maximum Likelihood

Penerimaan dan pendeteksian sinyal dengan metode *Maximum Likelihood* pada teknik *Spatial Multiplexing* adalah metode untuk memaksimalkan penghapusan sinyal interferensi (*Rayleigh Fading*) pada sinyal yang diterima secara berurutan hingga mencapai nilai nol. Algoritma penerimaan dan pendeteksian sinyal dengan metode *Maximum Likelihood* terdiri atas

1. Pendeteksian Sinyal

Pendeteksian sinyal gangguan dilakukan menurut rumus berikut :

$$[G]_{2 \times 2} = \arg \min | [Y]_{k \times 2} - \{ [H]_{2 \times 2} \times [X]_{k \times 2} \} |^2 \quad (3.35)$$

2. Minimum Normalisasi

Dilakukan dengan meminimalkan gangguan $[G]_{2 \times 2}$ untuk setiap bit.

3. Demodulasi M-QAM

Proses demodulasi sinyal dengan teknik demodulasi M-QAM dilakukan pada

sinyal $[N]_{k \times 2}$ yang telah dihasilkan pada langkah sebelumnya (Normalisasi Sinyal) dengan mengacu pada pemetaan *Gray Coding*. Proses demodulasi sinyal dengan teknik demodulasi M-QAM pada pemrograman m-file dilakukan dengan instruksi program : `hDemod = modem.qamdemod(hMod);` dengan parameter yang sama pada proses modulasi M-QAM. Dalam proses demodulasi M-QAM, sinyal $[U]_{1 \times k}$ yang direpresentasikan dengan bilangan kompleks (kombinasi bilangan real dan imajiner) dikonversi kembali menjadi bilangan biner (bit).

4. Proses Data Output

Proses *data output* adalah tahapan akhir untuk menghasilkan data sebelum dimodulasi dengan teknik modulasi M-QAM dan dimultipleks dengan teknik *Spatial Multiplexing*, yaitu dalam bentuk untaian biner pada matriks bit $[B]_{N \times k}$. Matriks $[N]_{k \times 2}$ yang dihasilkan dari proses demodulasi M-QAM dikembalikan menjadi matriks $[M]_{k \times 1}$, untuk kemudian selanjutnya diubah menjadi matriks bit $[Z]_{N \times k}$ dengan elemen-elemen matriks seperti matriks bit $[B]_{N \times k}$. Dengan dihasilkannya matriks bit $[Z]_{N \times k}$, maka keseluruhan rangkaian proses komunikasi yang menggunakan teknik *Spatial Multiplexing* dengan teknik modulasi M-QAM dalam kanal komunikasi yang dipengaruhi oleh gangguan interferensi *Rayleigh Fading* dan *AWGN* dianggap selesai.

5. Penghitungan Jumlah Bit Error

Untuk menganalisa hasil simulasi, diperlukan keluaran berupa Grafik Perbandingan Jumlah Bit Error terhadap E_b/N_0 . Oleh karena itu, perlu dilakukan penghitungan adanya *bit error* yang masih terjadi pada proses penerimaan dan pendeksian sinyal seperti dengan metode *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*. Penghitungan Jumlah Bit Error dilakukan sesuai persamaan (3.27), (3.28) dan (3.29).

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

4.1. Parameter Simulasi

Untuk menghasilkan simulasi yang sesuai dengan tujuan penelitian, dalam pemrograman m-file Matlab 7.6.0 (R2008a) ini, batasan parameter-parameter yang digunakan adalah sebagai berikut :

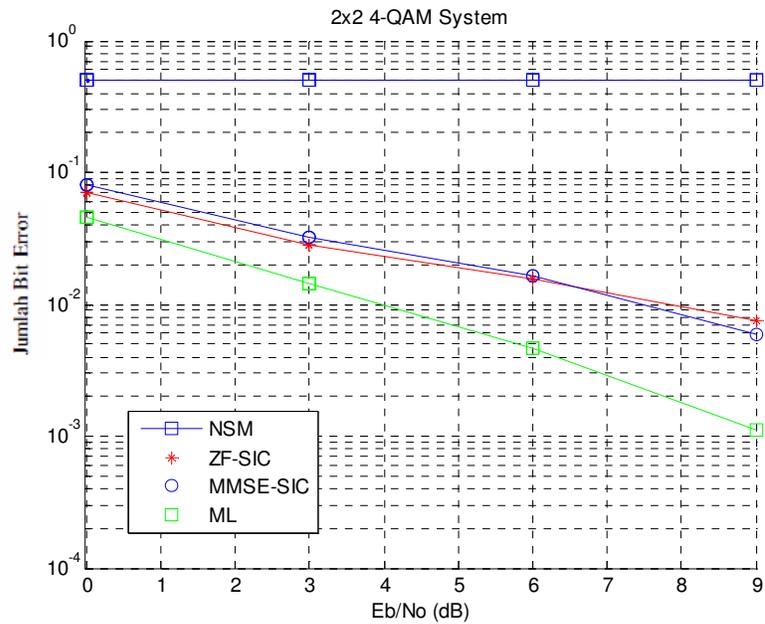
1. Jumlah antena pengirim atau *Transmit Antenna* (Tx), $N = 2$
2. Jumlah antena penerima atau *Receive Antenna* (Rx), $P = 2$
3. Batasan pengukuran $E_b/N_0 = 0$ dB hingga 9 dB dengan interval : 1 dB.
4. Ukuran konstelasi ($\text{modOrd} = k$) pada multilevel modulasi QAM (M-QAM) ditentukan dengan : $k = \log_2 M$ atau $M = 2^k$, di mana untuk :
 - Sistem modulasi 4-QAM, $k = 2$, $M = 4$
 - Sistem modulasi 8-QAM, $k = 3$, $M = 8$
 - Sistem modulasi 16-QAM, $k = 4$, $M = 16$
 - Sistem modulasi 32-QAM, $k = 5$, $M = 32$
 - Sistem modulasi 64-QAM, $k = 6$, $M = 64$
5. Jumlah simbol = jumlah antena pengirim = $N = 2$
6. *Sample* data berupa bilangan desimal dari 0 hingga $2^{Nk} - 1$
7. Pengukuran Jumlah Bit Error dari 1 (10^0) hingga 0,0001 (10^{-4})

4.2. Hasil Simulasi

Hasil simulasi perbandingan jumlah kesalahan bit (*bit error*) terhadap penggunaan energi per bit pada setiap kerapatan derau (E_b/N_0) ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel untuk setiap modulasi M-QAM. Pada setiap grafik, ditampilkan perbandingan ketiga metode penerimaan dan pendeteksian sinyal, yaitu *Zero Forcing Successive Interference Cancellation* (ZF-SIC), *Minimum Mean Square Error SIC* (MMSE-SIC) dan *Maximum Likelihood* (ML) serta yang tidak menggunakan teknik *Spatial Multiplexing* (NSM), sebagai berikut :

1. Hasil Simulasi Pada Modulasi 4-QAM

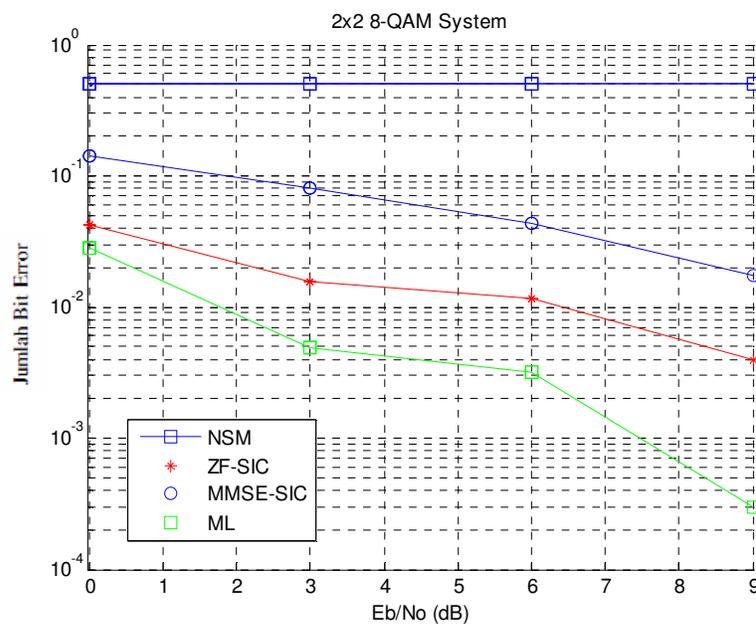
Hasil simulasi pada modulasi 4-QAM ditunjukkan pada Gambar 4.1. berikut :



Gambar 4.1. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No 4-QAM

2. Hasil Simulasi Pada Modulasi 8-QAM

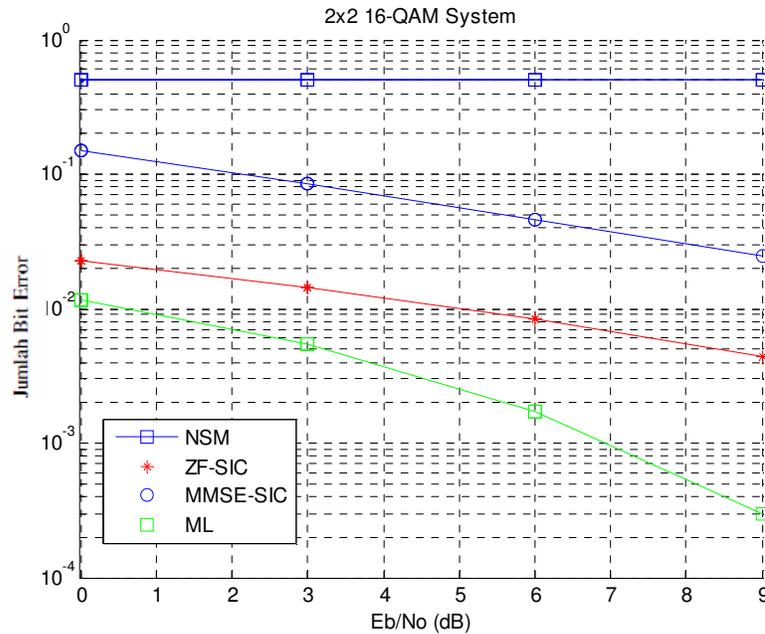
Hasil simulasi pada modulasi 8-QAM ditunjukkan pada Gambar 4.2. berikut :



Gambar 4.2. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No 8-QAM

3. Hasil Simulasi Pada Modulasi 16-QAM

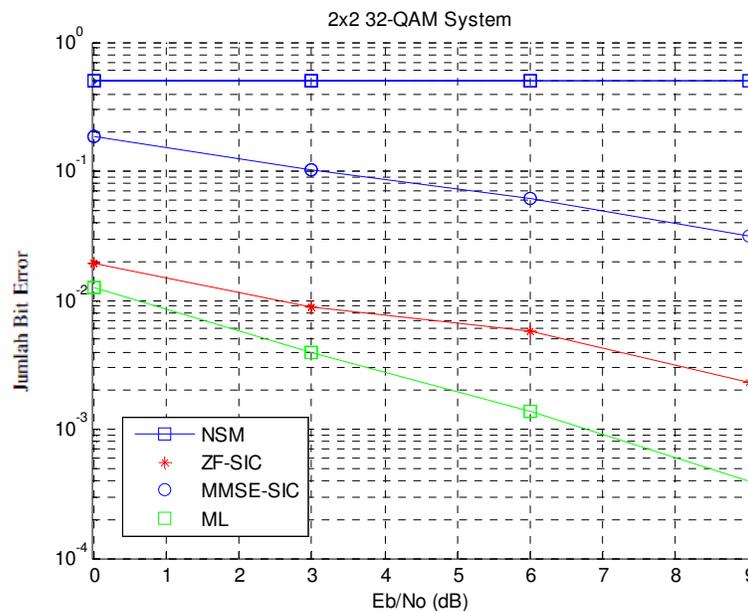
Hasil simulasi pada modulasi 16-QAM ditunjukkan pada Gambar 4.3. berikut :



Gambar 4.3. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No 16-QAM

4. Hasil Simulasi Pada Modulasi 32-QAM (Eb/No = 0 dB hingga 9 dB)

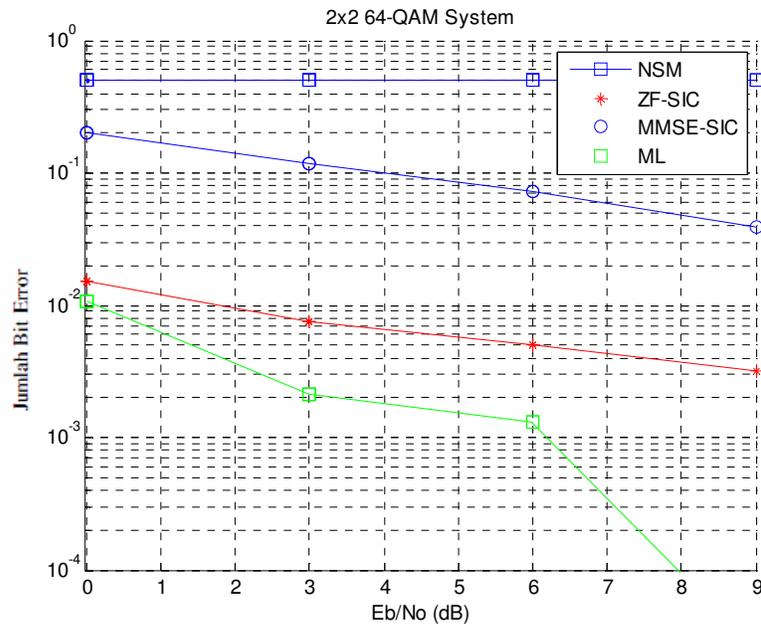
Hasil simulasi pada modulasi 32-QAM ditunjukkan pada Gambar 4.4. berikut



Gambar 4.4. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No 32-QAM

5. Hasil Simulasi Pada Modulasi 64-QAM ($E_b/N_0 = 0$ dB hingga 9 dB)

Hasil simulasi pada modulasi 64-QAM ditunjukkan pada Gambar 4.5. berikut



Gambar 4.5. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap E_b/N_0 64-QAM

Analisis kuantitatif berupa perhitungan statistik terhadap pengurangan *bit error* terhadap ketiga metode penerimaan dan pendeteksian sinyal, yaitu *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*, *Minimum Mean Square Error SIC (MMSE-SIC)* dan *Maximum Likelihood (ML)* dapat dilakukan dengan membuat tabel perbandingan jumlah kesalahan bit terhadap penggunaan energi per bit pada setiap kerapatan derau (E_b/N_0) yang dihasilkan dari gambar grafik simulasi di atas. Tabel-tabel tersebut digunakan untuk menentukan :

1. Pengurangan jumlah *bit error* rata-rata maksimum
2. Jumlah *bit error* terendah (pengurangan *bit error* maksimum) dan jumlah *bit error*.tertinggi (pengurangan *bit error* minimum)

Perbandingan jumlah kesalahan bit terhadap penggunaan energi per bit pada setiap kerapatan derau (E_b/N_0) disusun dalam bentuk tabel. sebagai berikut :

1. Perbandingan Jumlah Bit Error terhadap E_b/N_0 4-QAM

Jumlah Bit Error terhadap E_b/N_0 ditunjukkan pada Tabel 4.1 sebagai berikut :

Tabel 4.1. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Modulasi 4-QAM

Eb/No	Jumlah Bit Error			
	NSM	ZF-SIC	MMSE-SIC	ML
0 dB	0,5000	0,0700	0,0800	0,0450
1 dB	0,5000	0,0500	0,0600	0,0300
2 dB	0,5000	0,0375	0,0450	0,0200
3 dB	0,5000	0,0300	0,0325	0,0150
4 dB	0,5000	0,0225	0,0250	0,0100
5 dB	0,5000	0,0190	0,0200	0,0070
6 dB	0,5000	0,0175	0,0175	0,0050
7 dB	0,5000	0,0125	0,0125	0,0030
8 dB	0,5000	0,0100	0,0080	0,0018
9 dB	0,5000	0,0075	0,0070	0,0012

2. Perbandingan Jumlah Bit Error terhadap Eb/No 8-QAM

Jumlah Bit Error terhadap Eb/No ditunjukkan pada Tabel 4.2 sebagai berikut :

Tabel 4.2. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Modulasi 8-QAM

Eb/No	Jumlah Bit Error			
	NSM	ZF-SIC	MMSE-SIC	ML
0 dB	0,5000	0,0400	0,1500	0,03000
1 dB	0,5000	0,0300	0,1250	0,01500
2 dB	0,5000	0,0275	0,1000	0,00900
3 dB	0,5000	0,0175	0,0800	0,00500
4 dB	0,5000	0,0150	0,0650	0,00425
5 dB	0,5000	0,0125	0,0500	0,00375
6 dB	0,5000	0,0120	0,0450	0,00200
7 dB	0,5000	0,0080	0,0310	0,00150
8 dB	0,5000	0,0060	0,0250	0,00065
9 dB	0,5000	0,0040	0,0175	0,00030

3. Perbandingan Jumlah Bit Error terhadap Eb/No 16-QAM pada Tabel 4.3 :

Tabel 4.3. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Modulasi 16-QAM

Eb/No	Jumlah Bit Error			
	NSM	ZF-SIC	MMSE-SIC	ML
0 dB	0,5000	0,0225	0,1500	0,01250
1 dB	0,5000	0,0200	0,1250	0,00900
2 dB	0,5000	0,0175	0,1000	0,00700
3 dB	0,5000	0,0150	0,0800	0,00550
4 dB	0,5000	0,0125	0,0700	0,00375
5 dB	0,5000	0,0100	0,0550	0,00325
6 dB	0,5000	0,0080	0,0450	0,00175
7 dB	0,5000	0,0070	0,0375	0,00100
8 dB	0,5000	0,0055	0,0300	0,00055
9 dB	0,5000	0,0045	0,0250	0,00030

4. Perbandingan Jumlah Bit Error terhadap Eb/No 32-QAM

Jumlah Bit Error terhadap Eb/No ditunjukkan pada Tabel 4.4 sebagai berikut :

Tabel 4.4. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Modulasi 32-QAM

Eb/No	Jumlah Bit Error			
	NSM	ZF-SIC	MMSE-SIC	ML
0 dB	0,5000	0,02000	0,1800	0,01250
1 dB	0,5000	0,01500	0,1600	0,00850
2 dB	0,5000	0,01250	0,1250	0,00550
3 dB	0,5000	0,00900	0,1000	0,00400
4 dB	0,5000	0,00700	0,0900	0,00275
5 dB	0,5000	0,00600	0,0700	0,00200
6 dB	0,5000	0,00550	0,0600	0,00125
7 dB	0,5000	0,00425	0,0500	0,00080
8 dB	0,5000	0,00300	0,0400	0,00060
9 dB	0,5000	0,00250	0,0300	0,00040

5. Perbandingan Jumlah Bit Error terhadap Eb/No 64-QAM

Jumlah Bit Error terhadap Eb/No ditunjukkan pada Tabel 4.5 sebagai berikut :

Tabel 4.5. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Modulasi 64-QAM

Eb/No	Jumlah Bit Error			
	NSM	ZF-SIC	MMSE-SIC	ML
0 dB	0,5000	0,01600	0,20000	0,01250
1 dB	0,5000	0,01200	0,17500	0,00600
2 dB	0,5000	0,0100 0	0,15000	0,00375
3 dB	0,5000	0,00700	0,12500	0,00200
4 dB	0,5000	0,00650	0,10000	0,00185
5 dB	0,5000	0,00550	0,08000	0,00175
6 dB	0,5000	0,00500	0,07000	0,00070
7 dB	0,5000	0,00450	0,06000	0,00035
8 dB	0,5000	0,00375	0,04750	0,00010
9 dB	0,5000	0,00300	0,04000	0,00000

4.3. Analisis Hasil Simulasi

Dari hasil simulasi yang telah didapatkan, baik dari grafik maupun tabel, analisis terhadap penggunaan teknik *Spatial Multiplexing* untuk meningkatkan unjuk kerja modulasi M-QAM dengan cara mengurangi jumlah bit yang *error* dapat dilakukan dengan membandingkan penurunan *bit error* terhadap :

1. Penambahan nilai energi per bit pada setiap kerapatan derau (Eb/No).

Dalam hal ini, pengamatan dilakukan pada setiap nilai M, dari 4 (4-QAM) hingga 64 (64-QAM).

2. Penambahan maksimum jumlah data (M) yang dikirimkan melalui dua antena pengirim (N). Dalam hal ini, pengamatan dilakukan pada penurunan *bit error* saat nilai M dinaikkan, dari 4 (4-QAM) hingga 64 (64-QAM).

3. Penggunaan ketiga metode penerimaan dan pendeteksian sinyal, yaitu *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*, *Minimum Mean*

Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC) dan *Maximum Likelihood (ML)* pada masing-masing M-QAM. Dalam hal ini, pengamatan dilakukan pada setiap nilai M, dari 4 (4-QAM) hingga 64 (64-QAM).

Analisis hasil simulasi secara kualitatif dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Pengurangan *bit error* terjadi pada penerapan teknik *Spatial Multiplexing* dengan ketiga metode penerimaan dan pendeteksian sinyal saat nilai energi per bit pada setiap kerapatan derau (E_b/N_0) bertambah.
2. Pengurangan *bit error* tidak terjadi pada modulasi M-QAM yang tidak menggunakan teknik *Spatial Multiplexing*, walaupun nilai energi per bit pada setiap kerapatan derau (E_b/N_0) bertambah. Begitupula saat jumlah maksimum data yang dikirimkan (M) dinaikkan, pengurangan *bit error* tidak juga terjadi pada modulasi M-QAM.
3. Pengurangan *bit error* terjadi saat nilai multilevel modulasi (M) bertambah setelah diterapkan teknik *Spatial Multiplexing*. Dengan kata lain, semakin bertambah jumlah maksimum data yang dikirimkan (dimultipleks pengirimannya menggunakan dua antena pengirim), maka semakin berkurang jumlah *bit error* yang dihasilkan. Ini membuktikan bahwa teknik *Spatial Multiplexing* dapat mengurangi *bit error* dengan meningkatnya jumlah data yang dikirimkan.
4. Pengurangan *bit error* secara maksimal diperoleh dengan metode penerimaan dan pendeteksian sinyal *Maximum Likelihood (ML)* dibandingkan kedua metode penerimaan dan pendeteksian sinyal lainnya, yaitu : *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)* dan *Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC)*.

4.3.1. Analisis Pengurangan Bit Error Pada Metode ZF-SIC

Analisis pengurangan *bit error* terhadap peningkatan jumlah maksimum data yang dapat dikirimkan (M) pada metode ZF-SIC dengan penambahan E_b/N_0 dari 0 dB hingga 9 dB ditunjukkan pada Tabel 4.6 sebagai berikut :

Tabel 4.6. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Pada Metode ZF-SIC

Eb/No	Jumlah Bit Error Pada Metode ZF-SIC				
	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
0 dB	0,07000	0,04000	0,02250	0,02000	0,01600
1 dB	0,05000	0,03000	0,02000	0,01500	0,01200
2 dB	0,03750	0,02750	0,01750	0,01250	0,01000
3 dB	0,03000	0,01750	0,01500	0,00900	0,00700
4 dB	0,02250	0,01500	0,01250	0,00700	0,00650
5 dB	0,01900	0,01250	0,01000	0,00600	0,00550
6 dB	0,01750	0,01200	0,00800	0,00550	0,00500
7 dB	0,01250	0,00800	0,00700	0,00425	0,00450
8 dB	0,01000	0,00600	0,00550	0,00300	0,00375
9 dB	0,00750	0,00400	0,00450	0,00250	0,00300
Total	0,27650	0,17250	0,12250	0,08475	0,07325
Rata-rata	0,02765	0,01725	0,01225	0,008475	0,007325

Dengan menggunakan jumlah *bit error* rata-rata yang diperoleh dengan persamaan :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

di mana $n = 10$ (0 dB hingga 9 dB) dan $x_i =$ jumlah *bit error*, maka dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya jumlah maksimum data yang dapat dikirimkan (M), dalam hal ini dari 4-QAM, $M = 4$ meningkat hingga 64-QAM, $M = 64$, maka pengurangan *bit error* rata-rata dari $E_b/N_0 = 0$ dB hingga $E_b/N_0 = 9$ dB adalah :

$$\begin{aligned} \text{Pengurangan } \textit{bit error} \text{ rata-rata} &= (\textit{bit error} \text{ rata-rata } 4\text{-QAM}) - (\textit{bit error} \text{ rata-rata } \\ &\quad 64\text{-QAM}) \\ &= (0,02765) - (0,007325) \\ &= 0,020325 = 2,0325 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$

Dari Tabel 4.6, dapat dianalisis bahwa :

1. Jumlah *bit error* terendah dalam metode ZF-SIC, diperoleh pada modulasi

- 32-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : 0,00250
2. Jumlah *bit error* tertinggi dalam metode ZF-SIC, diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan $E_b/N_0 = 0$ dB, yaitu : 0,07000
 3. Pada E_b/N_0 terendah (0 dB), jumlah *bit error* tertinggi diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan jumlah *bit error* = 0,07 dan terendah pada modulasi 64-QAM dengan jumlah *bit error* = 0,016
 4. Pada E_b/N_0 tertinggi (9 dB), jumlah *bit error* tertinggi diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan jumlah *bit error* = 0,0075 dan terendah pada modulasi 32-QAM dengan jumlah *bit error* = 0,0025

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada metode ZF-SIC :

1. Dengan E_b/N_0 yang sama, jumlah *bit error* berkurang dengan penambahan jumlah data maksimum (M), dengan catatan untuk $E_b/N_0 = 9$ dB, jumlah *bit error* berkurang dari 4-QAM hingga 32-QAM dan kembali naik pada modulasi 64-QAM.
2. Dengan M yang sama (pengamatan pada masing-masing modulasi M-QAM), jumlah *bit error* berkurang dengan bertambahnya E_b/N_0 dari 0 dB hingga 9 dB.

4.3.2. Analisis Pengurangan Bit Error Pada Metode MMSE-SIC

Analisis pengurangan *bit error* terhadap peningkatan jumlah maksimum data yang dapat dikirimkan (M). pada metode MMSE-SIC dengan penambahan E_b/N_0 dari 0 dB hingga 9 dB ditunjukkan pada Tabel 4.7. Dengan menggunakan jumlah *bit error* rata-rata yang diperoleh dari persamaan (4.1), maka dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya jumlah maksimum data yang dapat dikirimkan (M), dalam hal ini dari 4-QAM, $M= 4$, meningkat hingga 64-QAM, $M = 64$, maka pengurangan *bit error* rata-rata dari $E_b/N_0 = 0$ dB sampai dengan $E_b/N_0 = 9$ dB adalah :

$$\begin{aligned} \text{Pengurangan } \textit{bit error} \text{ rata-rata} &= (\textit{bit error} \text{ rata-rata } 4\text{-QAM}) - (\textit{bit error} \text{ rata-rata} \\ &\quad 64\text{-QAM}) \\ &= (0,03075) - (0,10475) = -0,074 = -74 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$

Tabel 4.7. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap Eb/No Metode MMSE-SIC

Eb/No	Jumlah Bit Error Pada Metode MMSE-SIC				
	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
0 dB	0,08000	0,1500	0,15000	0,1800	0,20000
1 dB	0,06000	0,1250	0,12500	0,1600	0,17500
2 dB	0,04500	0,1000	0,10000	0,1250	0,15000
3 dB	0,03250	0,0800	0,08000	0,1000	0,12500
4 dB	0,02500	0,0650	0,0700 0	0,0900	0,10000
5 dB	0,02000	0,0500	0,05500	0,0700	0,08000
6 dB	0,01750	0,0450	0,04500	0,0600	0,07000
7 dB	0,01250	0,0310	0,03750	0,0500	0,06000
8 dB	0,00800	0,0250	0,03000	0,0400	0,04750
9 dB	0,00700	0,0175	0,02500	0,0300	0,04000
Total	0,30750	0,6885	0,71750	0,9050	1,04750
Rata-rata	0,03075	0,06885	0,07175	0,0905	0,10475

Dengan demikian, pada metode MMSE-SIC, pengurangan *bit error* tidak terjadi dengan meningkatnya jumlah data maksimum (M), malah terjadi sebaliknya, yaitu terjadi peningkatan jumlah *bit error*. Jadi, dengan menggunakan metode penerimaan dan pendeteksian sinyal MMSE-SIC, semakin besar jumlah data maksimum (M) yang dikirimkan, maka jumlah *bit error* semakin bertambah.

Dari Tabel 4.7, dapat dianalisis bahwa :

1. Jumlah *bit error* terendah dalam metode MMSE-SIC, diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan Eb/No = 9 dB, yaitu : 0,00700
2. Jumlah *bit error* tertinggi dalam metode MMSE-SIC, diperoleh pada modulasi 64-QAM dengan Eb/No = 0 dB, yaitu : 0,20000
3. Pada Eb/No terendah (0 dB), jumlah *bit error* tertinggi diperoleh pada modulasi 64-QAM dengan jumlah *bit error* = 0,20000 dan terendah pada modulasi 4-QAM dengan jumlah *bit error* = 0,08000
4. Pada Eb/No tertinggi (9 dB), jumlah *bit error* tertinggi diperoleh pada modulasi 64-QAM dengan jumlah *bit error* = 0,04000 dan terendah pada modulasi

4-QAM dengan jumlah *bit error* = 0,00700

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pada metode MMSE-SIC :

1. Dengan E_b/N_0 yang sama, jumlah *bit error* bertambah dengan peningkatan jumlah data maksimum (M). Jadi, semakin besar jumlah data maksimum (M) yang dikirimkan, jumlah *bit error* semakin bertambah.
2. Dengan M yang sama (pengamatan pada masing-masing modulasi M-QAM), jumlah *bit error* berkurang dengan bertambahnya E_b/N_0 dari 0 dB hingga 9 dB. Jadi, dengan meningkatkan nilai E_b/N_0 , jumlah *bit error* dapat berkurang pada masing-masing modulasi M-QAM.

4.3.3. Analisis Pengurangan Bit Error Pada Metode Maximum Likelihood

Analisis pengurangan *bit error* terhadap peningkatan jumlah maksimum data yang dapat dikirimkan (M) pada metode Maximum Likelihood (ML) dengan penambahan E_b/N_0 dari 0 dB hingga 9 dB ditunjukkan pada Tabel 4.8. berikut :

Tabel 4.8. Perbandingan Jumlah Bit Error Terhadap E_b/N_0 Pada Metode ML

Eb/No	Jumlah Bit Error Pada Metode Maximum Likelihood				
	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
0 dB	0,0450	0,03000	0,01250	0,01250	0,01250
1 dB	0,0300	0,01500	0,00900	0,00850	0,00600
2 dB	0,0200	0,00900	0,00700	0,00550	0,00375
3 dB	0,0150	0,00500	0,00550	0,00400	0,00200
4 dB	0,0100	0,00425	0,00375	0,00275	0,00185
5 dB	0,0070	0,00375	0,00325	0,00200	0,00175
6 dB	0,0050	0,00200	0,00175	0,00125	0,00070
7 dB	0,0030	0,00150	0,00100	0,00080	0,00035
8 dB	0,0018	0,00065	0,00055	0,00060	0,00010
9 dB	0,0012	0,00030	0,00030	0,00040	0,00000
Total	0,1380	0,07145	0,0446	0,03830	0,02900
Rata-rata	0,0138	0,007145	0,00446	0,00383	0,00290

Dengan menggunakan jumlah *bit error* rata-rata yang diperoleh dari persamaan (4.1), maka dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya jumlah maksimum data yang dapat dikirimkan (M), dalam hal ini dari 4-QAM, $M= 4$ meningkat hingga 64-QAM, $M = 64$, maka pengurangan *bit error* rata-rata dari $E_b/N_0 = 0$ dB sampai dengan $E_b/N_0 = 9$ dB adalah :

$$\begin{aligned} \text{Pengurangan } \textit{bit error} \text{ rata-rata} &= (\textit{bit error} \text{ rata-rata } 4\text{-QAM}) - (\textit{bit error} \text{ rata-rata} \\ &\quad 64\text{-QAM}) \\ &= (0,0138) - (0,00290) \\ &= 0,0109 = 1,09 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$

Dari Tabel 4.8, dapat dianalisis bahwa :

1. Jumlah *bit error* terendah dalam metode ML, diperoleh pada modulasi 64-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : $0,00000 = 0$
2. Jumlah *bit error* tertinggi dalam metode ML, diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan $E_b/N_0 = 0$ dB, yaitu : $0,0450$
3. Pada E_b/N_0 terendah (0 dB), jumlah *bit error* tertinggi diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan jumlah *bit error* = $0,0450$ dan terendah pada modulasi 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM dengan jumlah *bit error* = $0,01250$
4. Pada E_b/N_0 tertinggi (9 dB), jumlah *bit error* tertinggi diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan jumlah *bit error* = $0,0012$ dan terendah pada modulasi 64-QAM dengan jumlah *bit error* = $0,00000$.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pada metode ML :

1. Dengan E_b/N_0 yang sama, jumlah *bit error* berkurang tanpa anomali dengan penambahan jumlah data maksimum (M) (bandingkan anomali yang terjadi pada metode ZF-SIC, di mana untuk $E_b/N_0 = 9$ dB, jumlah *bit error* berkurang dari 4-QAM hingga 32-QAM dan kembali naik pada modulasi 64-QAM).
2. Dengan M yang sama (pengamatan pada masing-masing modulasi M-QAM), jumlah *bit error* berkurang dengan bertambahnya E_b/N_0 dari 0 dB hingga 9 dB.
3. Jumlah *bit error* mendekati atau ekuivalen dengan 0 pada sistem modulasi 64-QAM (M terbesar) dengan E_b/N_0 terbesar.

4.3.4. Analisis Pengurangan Bit Error Secara Keseluruhan

Analisis terhadap ketiga metode penerimaan dan pendeteksian sinyal, yaitu *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)*, *Minimum Mean Square Error SIC (MMSE-SIC)* dan *Maximum Likelihood (ML)* adalah :

1. Pengurangan *bit error* maksimum

Metode ZF-SIC, pengurangan *bit error* rata-rata = $2,0325 \cdot 10^{-2}$

Metode MMSE-SIC, pengurangan *bit error* rata-rata = $-74 \cdot 10^{-2}$

Metode Maximum Likelihood, pengurangan *bit error* rata-rata = $1,09 \cdot 10^{-2}$

Dari ketiga metode tersebut, pengurangan *bit error* maksimum diperoleh dengan menggunakan metode penerimaan dan pendeteksian sinyal *Maximum Likelihood (ML)*.

2. Jumlah *bit error* tertinggi (pengurangan *bit error* minimum)

Jumlah *bit error* tertinggi dalam metode ZF-SIC, diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan $E_b/N_0 = 0$ dB, yaitu : 0,07000

Jumlah *bit error* tertinggi dalam metode MMSE-SIC, diperoleh pada modulasi 64-QAM dengan $E_b/N_0 = 0$ dB, yaitu : 0,20000

Jumlah *bit error* tertinggi dalam metode Maximum Likelihood, diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan $E_b/N_0 = 0$ dB, yaitu : 0,0450

Dari ketiga metode tersebut dapat disimpulkan bahwa :

a. Jumlah *bit error* tertinggi umumnya dihasilkan pada $E_b/N_0 = 0$ dB dengan modulasi 4-QAM pada metode ZF-SIC dan Maximum Likelihood, dan modulasi 64-QAM pada metode MMSE-SIC.

b. Jumlah *bit error* tertinggi maksimum dihasilkan pada metode penerimaan dan pendeteksian sinyal MMSE-SIC.

3. Jumlah *bit error* terendah (pengurangan *bit error* maksimum)

Jumlah *bit error* terendah dalam metode ZF-SIC, diperoleh pada modulasi 32-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : 0,00250

Jumlah *bit error* terendah dalam metode MMSE-SIC, diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : 0,00700

Jumlah *bit error* terendah dalam metode Maximum Likelihood, diperoleh pada modulasi 64-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : $0,00000 = 0$.

BAB 5

KESIMPULAN

Dari analisis hasil simulasi, dapat disimpulkan beberapa hal penting berkaitan dengan pengurangan *bit error* pada modulasi M-QAM dalam kanal Rayleigh Fading dengan teknik *Spatial Multiplexing* dan metode ZF-SIC, MMSE-SIC, Maximum Likelihood, sebagai berikut :

1. *Bit error* pada modulasi M-QAM dapat berkurang setelah diterapkannya teknik *Spatial Multiplexing* dengan ketiga metode penerimaan dan pendeteksian sinyal ZF-SIC, MMSE-SIC, Maximum Likelihood pada saat nilai energi per bit pada setiap kerapatan derau (E_b/N_0) bertambah. Kesimpulan ini dihasilkan dari analisis hasil simulasi yang menyatakan bahwa :
 - a. Jumlah *bit error* terendah dalam metode ZF-SIC, diperoleh pada modulasi 32-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : 0,00250
 - b. Jumlah *bit error* terendah dalam metode MMSE-SIC, diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : 0,00700
 - c. Jumlah *bit error* terendah dalam metode Maximum Likelihood, diperoleh pada modulasi 64-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : 0,00000 = 0.
3. Pengurangan *bit error* terjadi saat nilai multilevel modulasi atau jumlah data maksimum yang dapat dikirimkan (M) bertambah dengan diterapkannya teknik *Spatial Multiplexing* pada metode ZF-SIC dan Maximum Likelihood. Kesimpulan ini dihasilkan dari analisis hasil simulasi yang menyatakan bahwa
 - a. Dengan E_b/N_0 yang sama (E_b/N_0 maksimal = 9 dB) pada metode ZF-SIC, jumlah *bit error* berkurang dengan bertambahnya jumlah data maksimum (M), dari 4-QAM sebesar 0,00750 hingga 32-QAM sebesar 0,00250, walaupun kembali naik pada modulasi 64-QAM sebesar 0,00300.
 - b. Dengan E_b/N_0 yang sama (E_b/N_0 maksimal = 9 dB) pada metode Maximum Likelihood, jumlah *bit error* berkurang dengan bertambahnya jumlah data maksimum (M), dari 4-QAM sebesar 0,0012 hingga 64-QAM sebesar 0.
4. Pengurangan *bit error* pada metode MMSE-SIC hanya efektif digunakan bila jumlah data yang dikirimkan pada modulasi M-QAM seminimal mungkin

- (M minimal), dan E_b/N_0 yang diberikan semaksimal mungkin. Kesimpulan ini dihasilkan dari analisis hasil simulasi yang menyatakan bahwa :
- a. Jumlah *bit error* terendah dalam metode MMSE-SIC, diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : 0,00700
 - b. Jumlah *bit error* tertinggi dalam metode MMSE-SIC, diperoleh pada modulasi 64-QAM dengan $E_b/N_0 = 0$ dB, yaitu : 0,20000
5. Pengurangan *bit error* secara maksimal diperoleh dengan metode penerimaan dan pendeteksian sinyal *Maximum Likelihood (ML)* dibandingkan kedua metode penerimaan dan pendeteksian sinyal lainnya, yaitu : *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)* dan *Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC)*. Kesimpulan ini dihasilkan dari analisis hasil simulasi yang menyatakan bahwa :
- a. Jumlah *bit error* terendah dalam metode ZF-SIC, diperoleh pada modulasi 32-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : 0,00250
 - b. Jumlah *bit error* terendah dalam metode MMSE-SIC, diperoleh pada modulasi 4-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : 0,00700
 - c. Jumlah *bit error* terendah dalam metode Maximum Likelihood, diperoleh pada modulasi 64-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB, yaitu : 0,00000 = 0.
6. Dari ketiga metode penerimaan dan pendeteksian sinyal, yaitu : *Maximum Likelihood (ML)*, *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)* dan *Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC)* secara umum dapat disimpulkan bahwa :
- a. *Bit error* terendah umumnya dihasilkan pada $E_b/N_0 = 9$ dB dengan modulasi 64-QAM pada metode ZF-SIC dan *Maximum Likelihood*, dan modulasi 4-QAM pada metode MMSE-SIC.
 - b. Pengurangan *Bit error* maksimum terjadi pada modulasi 64-QAM dengan $E_b/N_0 = 9$ dB pada metode penerimaan dan pendeteksian sinyal *Maximum Likelihood (ML)*.
 - b. Pengurangan *Bit error* minimum terjadi pada modulasi 64-QAM dengan $E_b/N_0 = 0$ dB pada metode penerimaan dan pendeteksian sinyal MMSE-SIC.

DAFTAR REFERENSI

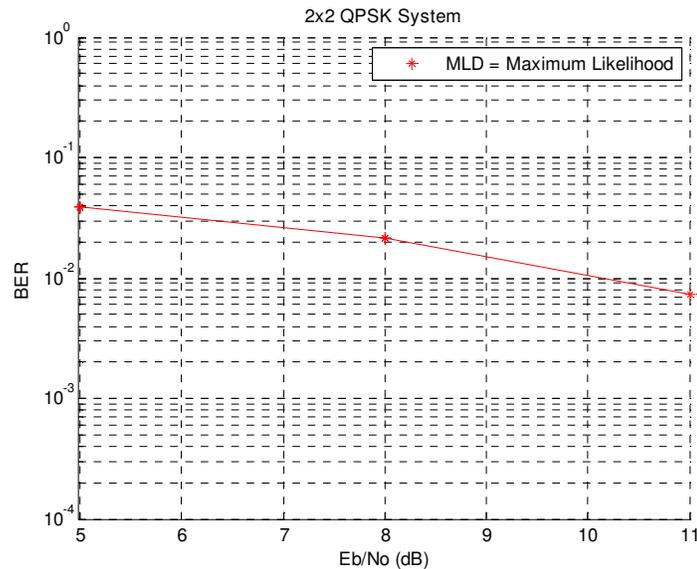
- [1] Bernard Sklar, "Digital Communications, Fundamentals and Applications", 2nd Edition, Prentice Hall Int, Inc, 2001, pp. 30-33 and pp. 521-587
- [2] G. L. Stuber, "Principles of Mobile Communication", Norwell, MA Kluwer Academic Publishers second ed., 2003. Third Printing. pp 412-436
- [3] Nashrudin Ismail, "Kanal Rayleigh Fading Pada Komunikasi CDMA", Elektro Indonesia, Edisi Keduabelas, Maret 1998. pp.1-10
- [4] Bee Leong Yeap, Choong Hin Wong and Laios Hanzo, "Reduced Complexity In-Phase Quadrature Phase M-QAM Turbo Equalization Using Iterative Channel Estimation ", IEEE Transaction On Wireless Communication Vol. 2 No. 1, January 2003. pp.2-10
- [5] James K Cavers, "An Analysis of Pilot Symbol Assisted Modulation for Rayleigh Fading Channels", IEEE Transaction On Vehicular Technology Vol. 40 No. 4, November 1991. pp.686-693
- [6] Xiaoyi Tang, Mohamed Slim Alouni, "Effect of Channel Estimation Error on M-QAM BER Performance in Rayleigh Fading", IEEE Transaction On Communication Vol. 47 No. 12, December 1999. pp.1856-1864
- [7] Yao Ma, Robert Schober and Dongbo Zhang, "Exact BER For M-QAM With MRC And Imperfect Channel Estimation In Rician Fading Channels", IEEE Trans On Wireless Comm Vol. 6 No. 3, March 2007. pp. 926-936
- [8] George Tsoulos, Ed., "MIMO System Technology for Wireless Communications", CRC Press, Boca Raton, FL, 2006. pp 175-201
- [9] Xu Zhu and Ross D. Murch, "Performance Analysis Of Maximum Likelihood Detection In A MIMO Antenna System, IEEE Transaction On Communication Vol. 50 No. 2, February 2002. pp.187-191
- [10] Siavash. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique For Wireless Communication", IEEE Journal On Selected Areas In Communication, Vol 16 No. 8, October 1998.. pp 1451-1458
- [11] Hamanth Sampath and Arogyaswami, "Linear Precoding for Space Time Coded Systems With Known Fading Correlations", IEEE Communication

- Letters, Vol. 6, No 6, June 2002. pp 239-241
- [12] Vahid Tarokh, Hamid Jafarkhani and A. Robert Calderback, "Space Time Block Coding for Wireless Communications : Performance Results", IEEE Journal On Selected Areas In Communication, Vol 17 No. 3, March 1999. pp 451-460
- [13] S.M. Alamouti, V. Tarokh and P. Poon, "Trellis Coded Modulation and Transmit Diversity : Design Criteria and Performance Evaluation", IEEE ICUPC 98, October 1998, pp. 703-707
- [14] G.Andrews, Jeffrey, Arunabha Ghosh and Rias Muhamed, "Fundamental of WIMAX:Understanding Broadband Wireless Networking", Prentice Hall Communication Engineering and Emerging Technologies Series,2000
- [15] Simon R Saunders and Alejandro Aragon Zavala, " Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems", John Wiley & Sons, Ltd, 2007. pp 209-239 and 453-466
- [16] Diana Mindrila, "Maximum Likelihood (ML) And Diagonally Weighted Least Squares Estimation Procedures A Comparison Of Estimation Bias With Ordinal And Multivariate Non Normal Data", International Journal of Digit Society (IJDS), Vol.1, issue 1, March 2010. pp. 1-7
- [17] Prasad Shamain and Laurence B. Milstein, " Minimum Mean Square Error (MMSE) Receiver Employing 16-QAM in CDMA Channel with Narrowband Gaussian Interference", IEEE 1999. pp. 1-5.
- [18] Alberto Zanella, Marco Chiani and Moe Z Win, " MMSE Reception And Successive Interference Cancellation For MIMO Systems With High Spectral Efficiency", IEEE Transaction On Wireless Communication Vol. 4 No. 3, May 2005. pp. 1244-1254
- [19] Cong Shen, Yan Zhu, Shidong Zhou and Jinjing Jiang, "On The Performance Of V-BLAST With Zero Forcing Successive Interference Cancellation Receiver", IEEE Communicaton Society Globecom 2004. pp 2818-2822
- [20] Gary Breed, "Bit Error Rate : Fundamental Concepts And Measurement Issues", High Frequency Electronics, January 2003, Summit Technical Media,LLC. pp 46-48.

LAMPIRAN I VALIDASI PROGRAM

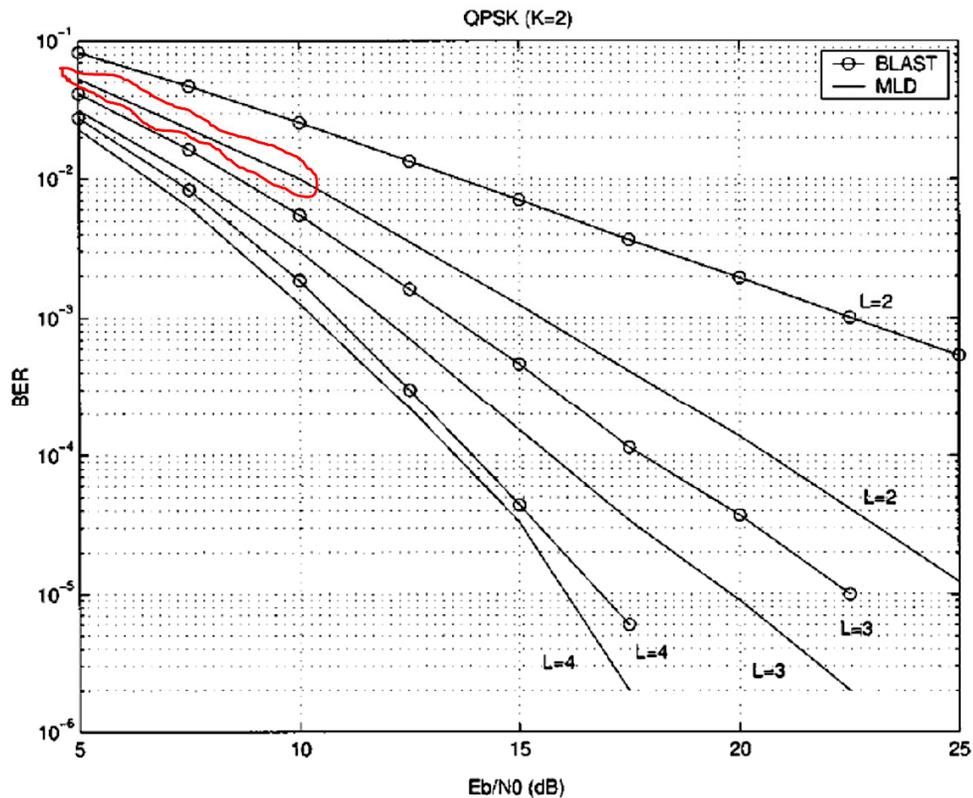
A. Validasi Program Pada Metode Maximum Likelihood

Pembuktian kebenaran (validasi) dari program yang telah dibuat untuk simulasi penggunaan teknik *Spatial Multiplexing* pada modulasi M-QAM dengan metode penerimaan dan pendeteksian sinyal *Maximum Likelihood* dapat dilakukan dengan menjadikan program tersebut mampu menghasilkan simulasi untuk modulasi *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)*. Kemudian, hasil simulasi pada modulasi QPSK dibandingkan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [9]. Dari perbandingan tersebut dihasilkan Grafik Perbandingan BER Terhadap Eb/No yang kurang lebih sama, seperti ditunjukkan pada Gambar I.1 dan Gambar I.2 sebagai berikut :



Gambar I.1. Grafik Perbandingan BER Terhadap Eb/No Pada Metode ML

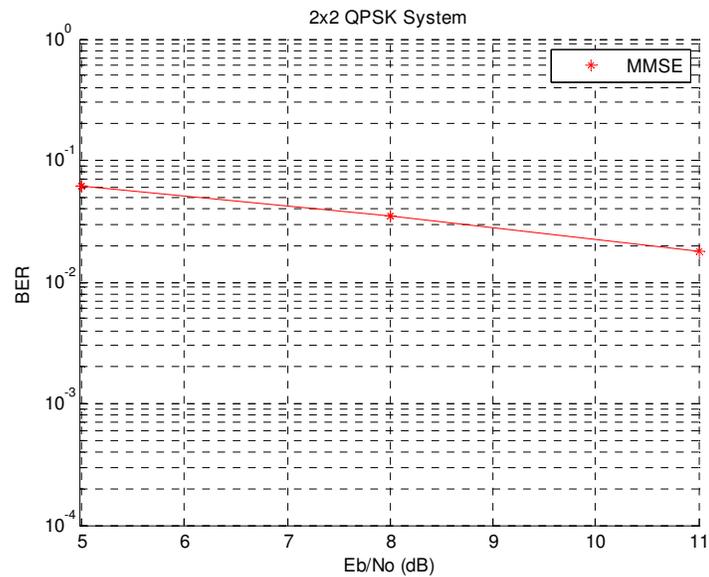
Bila dibandingkan, pada Gambar I.1 menunjukkan BER = 0,04 pada Eb/No = 5 dB dan 0,01 (10^{-2}) pada Eb/No = 10 dB sebagaimana halnya pada Gambar I.2, dengan L (receiver antennas = antena penerima) = 2 memiliki hasil yang sama.



Gambar I.2. (Fig 4) Performance Comparison Between MLD and BLAST With Two Transmit Antennas (K = 2) [9]

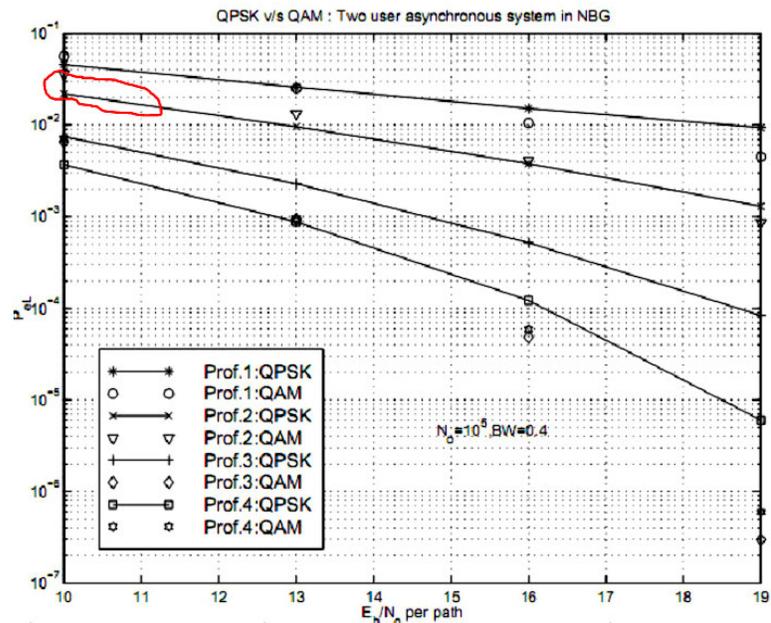
B. Validasi Program Pada Metode MMSE

Pembuktian kebenaran (validasi) dari program yang telah dibuat untuk simulasi penggunaan teknik *Spatial Multiplexing* pada modulasi M-QAM dengan metode penerimaan dan pendeteksian sinyal *Minimum Mean Square Error* (MMSE) dapat dilakukan dengan menjadikan program tersebut mampu menghasilkan simulasi untuk modulasi *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK). Kemudian, hasil simulasi pada modulasi QPSK dibandingkan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [17]. Dari perbandingan tersebut dihasilkan Grafik Perbandingan BER Terhadap Eb/No yang kurang lebih sama, seperti ditunjukkan pada Gambar I.3 dan Gambar I.4 sebagai berikut :



Gambar I.3. Grafik Perbandingan BER Terhadap E_b/N_0 Pada Metode MMSE

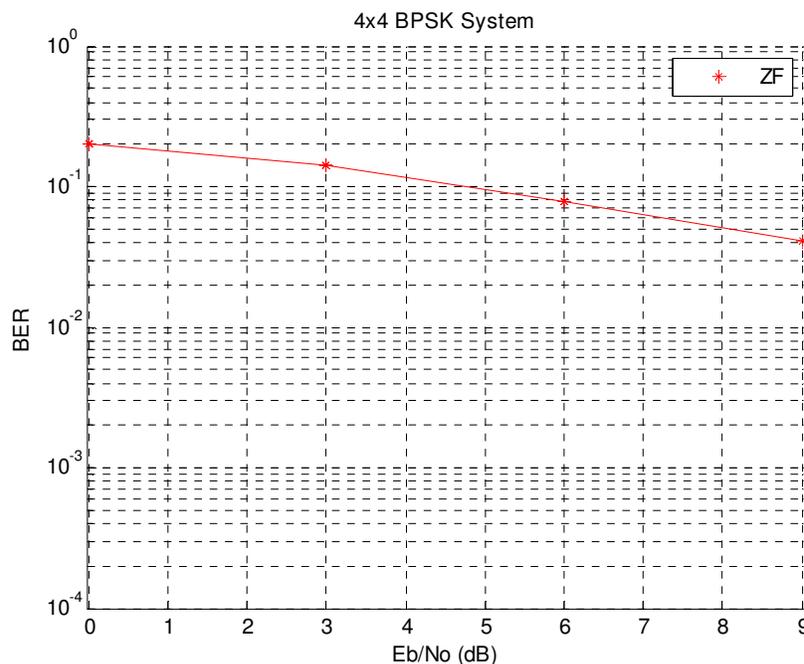
Bila dibandingkan, pada Gambar I.3 menunjukkan BER = 0,0225 pada $E_b/N_0 = 10$ dB dan 0,0175 pada $E_b/N_0 = 11$ dB sebagaimana halnya pada Gambar I.4, dengan Prof 2 (Profile Number = 2) QPSK memiliki hasil yang sama.



Gambar I.4. (Figure 6) QPSK vs QAM two-user system in NBG system [17]

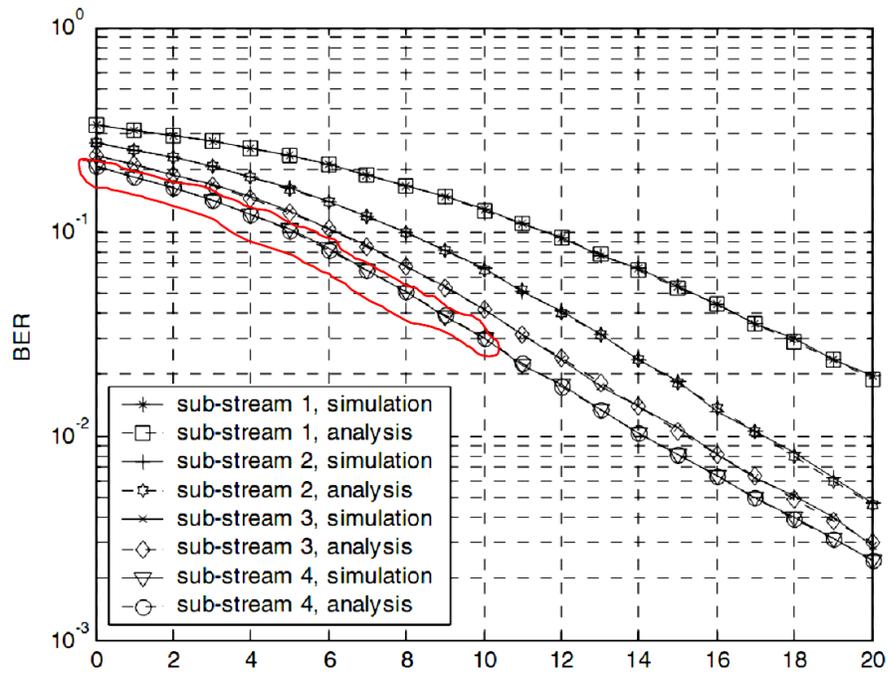
C. Validasi Program Pada Metode ZF-SIC

Pembuktian kebenaran (validasi) dari program yang telah dibuat untuk simulasi penggunaan teknik *Spatial Multiplexing* pada modulasi M-QAM dengan metode penerimaan dan pendeteksian sinyal *Zero Forcing Successive Interference Cancellation (ZF-SIC)* dapat dilakukan dengan menjadikan program tersebut mampu menghasilkan simulasi untuk modulasi *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)* menggunakan 4 x 4 antena. Kemudian, hasil simulasi pada modulasi QPSK dibandingkan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [19]. Dari perbandingan tersebut dihasilkan Grafik Perbandingan BER Terhadap Eb/No yang kurang lebih sama, seperti ditunjukkan pada Gambar I.5 dan Gambar I.6 sebagai berikut :



Gambar I.5. Grafik Perbandingan BER Terhadap Eb/No Pada Metode ZF-SIC

Bila dibandingkan, pada Gambar I.5 menunjukkan BER = 0,2 pada Eb/No = 0 dB hingga 0,04 pada Eb/No = 9 dB sebagaimana halnya pada Gambar I.4, dengan Prof 2 (Profile Number = 2) QPSK memiliki hasil yang sama.



Gambar I.6. (Fig .1) Comparison between simulation results and our analysis,
 $M=N=4$ BPSK modulation ZF-SIC V-BLAST [19]

LAMPIRAN II

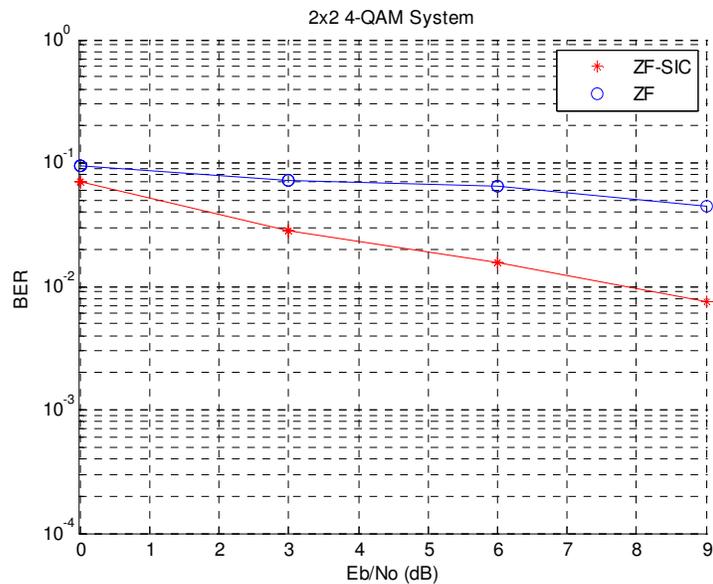
PERBANDINGAN TEORI DAN USULAN

A. Perbandingan Antara ZF Dan ZF-SIC

Perbandingan antara teori (Zero Forcing = ZF) dan usulan (Zero Forcing Successive Interference Cancellation = ZF-SIC) dapat ditampilkan dalam Grafik Perbandingan ZF dan ZF-SIC, sebagai berikut :

1. Modulasi 4-QAM

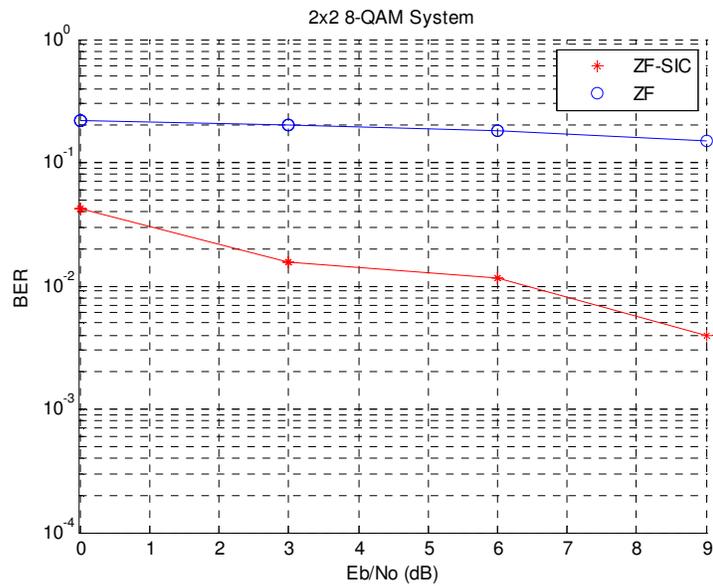
Grafik Perbandingan ZF dan ZF-SIC pada modulasi 4-QAM dapat dilihat pada Gambar II.1 berikut :



Gambar II.1. Grafik Perbandingan ZF dan ZF-SIC Modulasi 4-QAM

2. Modulasi 8-QAM

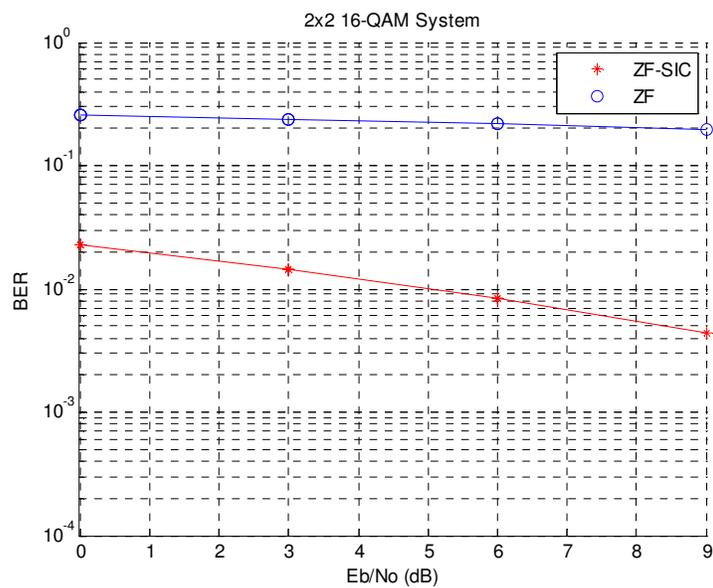
Grafik Perbandingan ZF dan ZF-SIC pada modulasi 8-QAM dapat dilihat pada Gambar II.2 berikut :



Gambar II.2. Grafik Perbandingan ZF dan ZF-SIC Modulasi 8-QAM

3. Modulasi 16-QAM

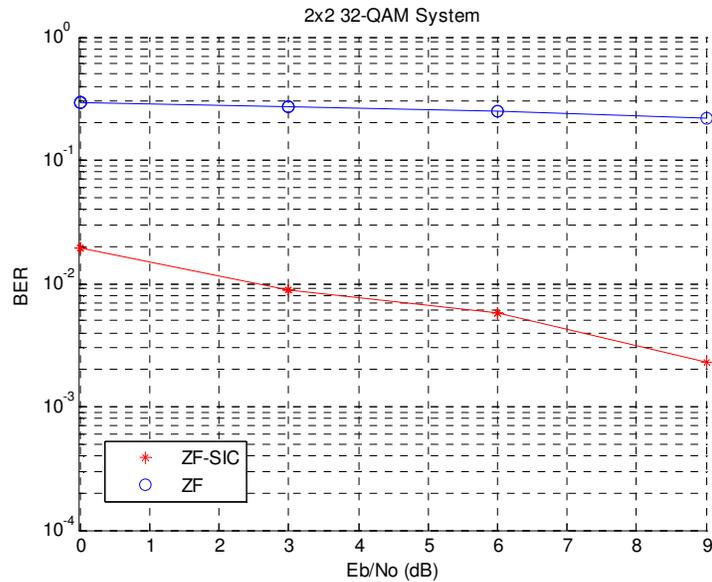
Grafik Perbandingan ZF dan ZF-SIC pada modulasi 16-QAM dapat dilihat pada Gambar II.3 berikut :



Gambar II.3. Grafik Perbandingan ZF dan ZF-SIC Modulasi 16-QAM

4. Modulasi 32-QAM

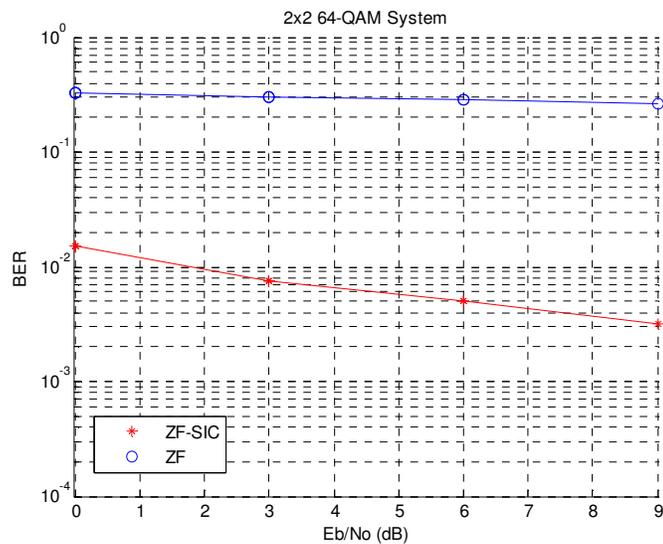
Grafik Perbandingan ZF dan ZF-SIC pada modulasi 32-QAM dapat dilihat pada Gambar II.4 berikut :



Gambar II.4. Grafik Perbandingan ZF dan ZF-SIC Modulasi 32-QAM

5. Modulasi 64-QAM

Grafik Perbandingan ZF dan ZF-SIC pada modulasi 64-QAM dapat dilihat pada Gambar II.5 berikut :



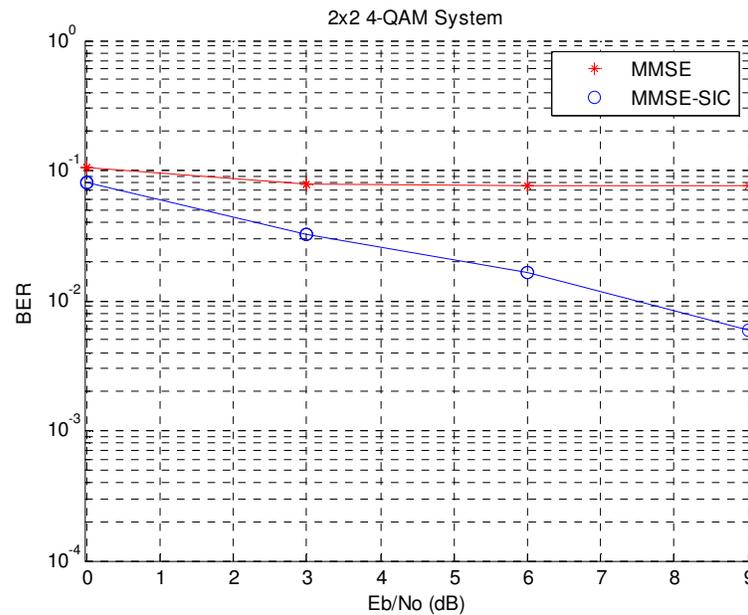
Gambar II.5. Grafik Perbandingan ZF dan ZF-SIC Modulasi 64-QAM

B. Perbandingan Antara MMSE Dan MMSE-SIC

Perbandingan antara teori (Minimum Mean Square Error = MMSE) dan usulan (Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation = MMSE-SIC) dapat ditampilkan dalam Grafik Perbandingan MMSE dan MMSE-SIC, sebagai berikut :

1. Modulasi 4-QAM

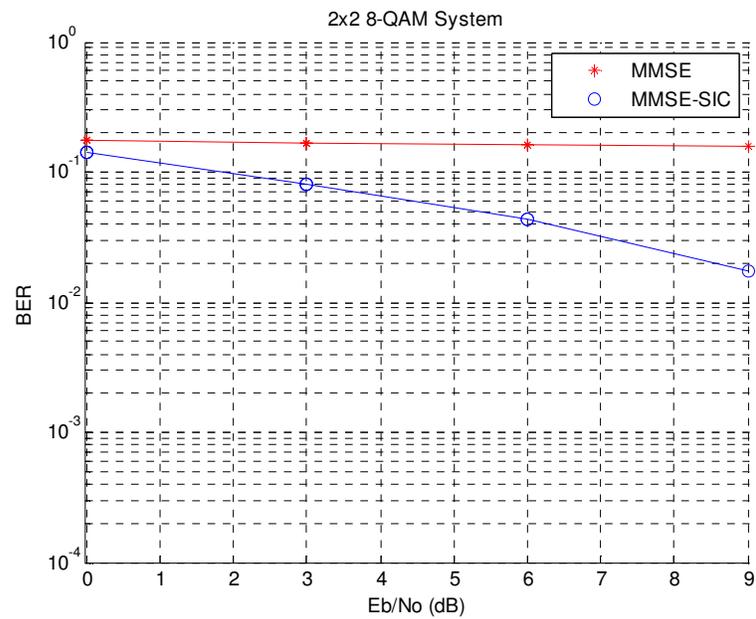
Grafik Perbandingan MMSE dan MMSE-SIC pada modulasi 4-QAM dapat dilihat pada Gambar II.6. berikut :



Gambar II.6. Grafik Perbandingan MMSE dan MMSE-SIC Modulasi 4-QAM

2. Modulasi 8-QAM

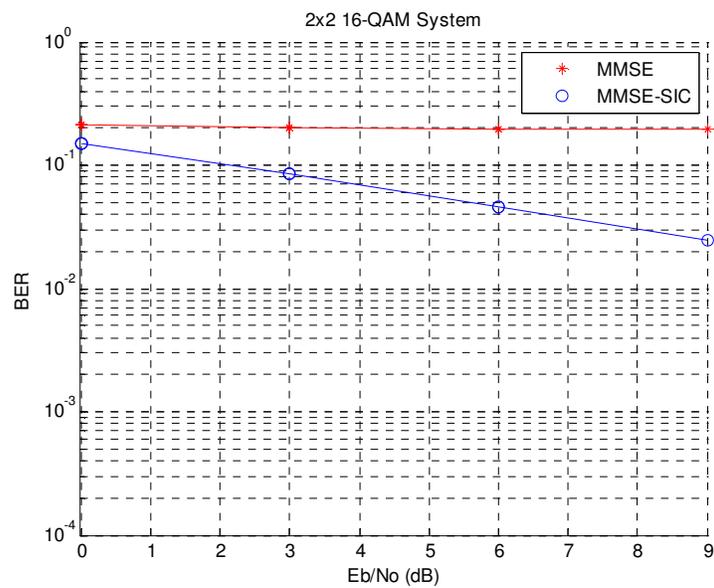
Grafik Perbandingan MMSE dan MMSE-SIC pada modulasi 8-QAM dapat dilihat pada Gambar II.7. berikut :



Gambar II.7. Grafik Perbandingan MMSE dan MMSE-SIC Modulasi 8-QAM

3. Modulasi 16-QAM

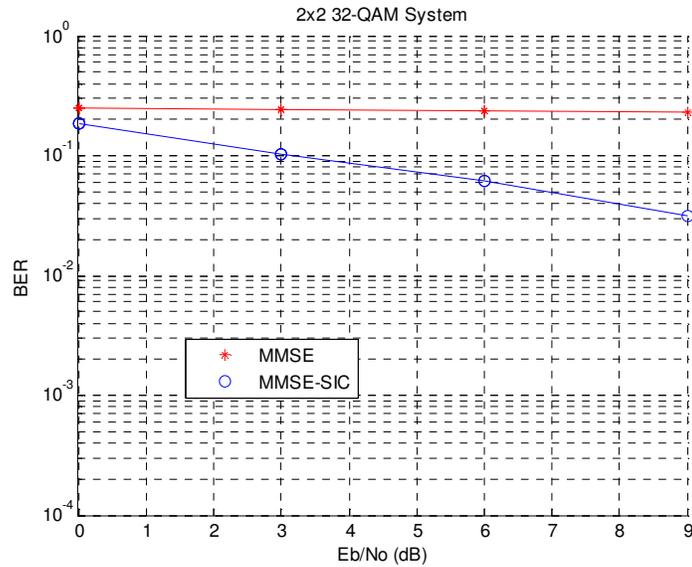
Grafik Perbandingan MMSE dan MMSE-SIC pada modulasi 16-QAM dapat dilihat pada Gambar II.8. berikut :



Gambar II.8. Grafik Perbandingan MMSE dan MMSE-SIC Modulasi 16-QAM

4. Modulasi 32-QAM

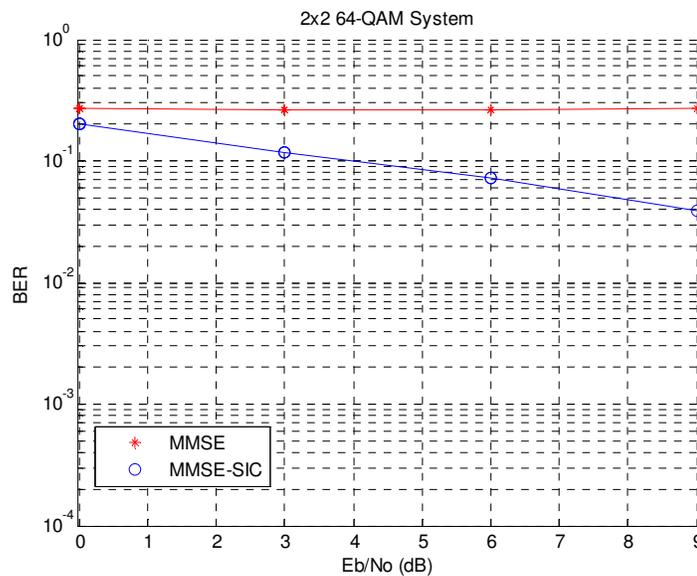
Grafik Perbandingan MMSE dan MMSE-SIC pada modulasi 32-QAM dapat dilihat pada Gambar II.9. berikut :



Gambar II.9. Grafik Perbandingan MMSE dan MMSE-SIC Modulasi 32-QAM

5. Modulasi 64-QAM

Grafik Perbandingan MMSE dan MMSE-SIC pada modulasi 64-QAM dapat dilihat pada Gambar II.10. berikut :



Gambar II.10. Grafik Perbandingan MMSE dan MMSE-SIC Modulasi 64-QAM