



TUGAS AKHIR -TE 091399

**ANALISIS KINERJA DAN KAPASITAS SISTEM
KOMUNIKASI MIMO PADA FREKUENSI 60 GHz DI
LINGKUNGAN DALAM GEDUNG**

Hikmah Miladiyah
NRP 2210 100 046

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Suwadi, M.T.
Devy Kuswidiastuti, S.T., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT -TE 091399

**PERFORMANCE AND CAPACITY ANALYSIS OF MIMO
COMMUNICATION SYSTEM AT 60 GHz IN INDOOR
ENVIRONMENT**

Hikmah Miladiyah
NRP 2210 100 046

Advisor
Dr. Ir. Suwadi, M.T.
Devy Kuswidiastuti, S.T., M.Sc.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh November Institute of Technology
Surabaya 2014

ANALISIS KINERJA DAN KAPASITAS SISTEM KOMUNIKASI MIMO PADA FREKUENSI 60 GHz DI LINGKUNGAN DALAM GEDUNG

Nama : Hikmah Miladiyah
Pembimbing : 1. Dr. Ir. Suwadi, M.T.
2. Devy Kuswidiastuti, S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Dalam suatu lingkungan *indoor* terdapat berbagai penghalang yang dapat mempengaruhi kinerja suatu antena karena dapat menimbulkan *multipath* yang dapat merugikan. Penghalang utama pada lingkungan *indoor* diantaranya dinding, atap, dan berbagai *furniture* yang ada di dalamnya. Hal tersebut dapat diatasi salah satunya dengan penggunaan teknik *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) yang memanfaatkan keberadaan *multipath* pada lingkungan *indoor*. Frekuensi 60 GHz pada gelombang millimeter (MMW) dapat dipertimbangkan dalam penggunaan MIMO *indoor*. Keunggulan frekuensi 60 GHz diantaranya adalah tersedianya bandwidth yang lebar dan adanya penyerapan O_2 pada frekuensi 60 GHz yang berguna untuk gelombang millimeter dalam meningkatkan *data rates* dan *spatial reuse*. Model kanal Triple Saleh Valenzuela (lingkungan desktop) dipilih sebagai kanal yang paling cocok untuk gelombang millimeter.

Kinerja sistem berdasarkan hasil simulasi menggunakan Matlab dianalisis berdasarkan nilai *bit error rate* (BER) pada MIMO 2x2-STBC Alamouti dan MIMO 4x4-STBC Tarokh dengan jarak *transceiver* 3 m. Modulasi yang digunakan adalah BPSK dan QPSK. Penggunaan modulasi BPSK memiliki nilai BER yang lebih rendah dari modulasi QPSK. Berdasarkan jumlah antena, MIMO 4x4 mempunyai kinerja dan kapasitas yang lebih baik daripada MIMO 2x2. Pada E_b/N_0 0 dB, kapasitas kanal pada MIMO 2x2 adalah 0.03508 bps/Hz dan 0.12318 bps/Hz untuk MIMO 4x4.

Kata Kunci : Alamouti, MMW, MIMO, Tarokh, TSV

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERFORMANCE AND CAPACITY ANALYSIS OF MIMO COMMUNICATION SYSTEM AT 60 GHz IN INDOOR ENVIRONMENT

Name : Hikmah Miladiyah
Advisor : 1. Dr. Ir. Suwadi, M.T.
2. Devy Kuswidiastuti, S.T., M.Sc.

ABSTRACT

In an indoor environment there are various barriers that may affect the performance of an antenna because it can cause harmful multipath. Blockage by walls, roof, and furniture limits the range indoor. This problem can be resolved by the use of Multiple Input Multiple Output (MIMO) that utilizes the presence of multipath in an indoor environment. The frequency of 60 GHz in millimeter wave could be considered for MIMO in indoor environment. The width of bandwidth available and O₂ absorption present at 60 GHz make the MMW useful for high data rates and spatial reuse. The Triple Saleh Valenzuela model (desktop environment) is chosen as the most suitable channel for Millimeter Wave.

System performance based on the simulation results using Matlab analyzed by bit error rate (BER) value for MIMO 2x2-STBC Alamouti and MIMO 4x4-STBC Tarokh with transceiver distance of 3 meters. BPSK and QPSK are used for modulation schemes. The result of BPSK modulation shows lower BER value than that of QPSK modulation. Based on the number of antennas, MIMO 4x4 has better performance and bigger capacity than MIMO 2x2. At Eb/No 0 dB, the channel capacity is found to be 0.03508 bps/Hz for MIMO 2x2 and 0.12318 bps/Hz for MIMO 4x4.

Key Words: Alamouti, MMW, MIMO, Tarokh, TSV

Halaman ini sengaja dikosongkan


**ANALISIS KINERJA DAN KAPASITAS SISTEM
KOMUNIKASI MIMO PADA FREKUENSI 60 GHz
DI LINGKUNGAN DALAM GEDUNG**

TUGAS AKHIR

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

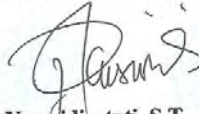
Mengetahui/Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Dr. Ir. Suwadi, M.T.
NIP. 196808181993031002

Dosen Pembimbing II



Devy Kuswidiastuti, S.T., M.Sc.
NIP. 198109252008122003



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan anugerah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan dalam menyelesaikan pendidikan Strata-1 pada Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan judul:

ANALISIS KINERJA DAN KAPASITAS SISTEM KOMUNIKASI MIMO PADA FREKUENSI 60 GHz DI LINGKUNGAN DALAM GEDUNG

Dengan selesainya Tugas Akhir ini, saya mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ayah, Mama, kakak, serta adik yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan kepada saya.
2. Bapak Dr. Ir. Suwadi, M.T. dan Ibu Devy Kuswidiastuti, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing, memotivasi dan memberikan saran kepada penulis.
3. Bapak dan Ibu dosen yang telah memberikan ilmu kepada penulis selama masa perkuliahan.
4. Mas Irsyad, Rana dan teman-teman e50 yang senantiasa menghibur dan menemani dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini.

Saya memohon kepada Allah SWT, semoga kita semua dikaruniai keikhlasan baik dalam ucapan maupun perbuatan, tersembunyi maupun terang-terangan.

Surabaya, Juni 2014

Hikmah Miladiyah

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

	HALAMAN
Halaman Judul	i
Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	iii
Halaman Pengesahan	v
Abstrak	vii
<i>Abstract</i>	ix
Kata Pengantar	xi
Daftar Isi	xiii
Daftar Gambar	xvii
Daftar Tabel	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Permasalahan	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika	3
1.7 Relevansi	4
BAB II SISTEM KOMUNIKASI MIMO PADA FREKUENSI 60 GHz DI LINGKUNGAN DALAM GEDUNG	5
2.1 Karakteristik Kanal Nirkabel	5
2.1.1 Refleksi (Pemantulan)	5
2.1.2 Difraksi (Pembelokan)	5
2.1.3 Hamburan	5
2.2 Fading	6
2.2.1 Kanal Gaussian	8
2.2.2 Kanal Rayleigh	10
2.2.3 Kanal Rician	11
2.3 Sistem MIMO	12
2.3.1 Sistem Antena Jamak Konvensional	12
2.3.1.1 Single Input Single Output (SISO)	13
2.3.1.2 Single Input Multiple Output (SIMO).....	13
2.3.1.3 Multiple Input Single Output (MISO).....	13

2.3.1.4 Multiple Input Multiple Output (MIMO)	14
2.3.2 Prinsip Sistem MIMO	15
2.3.3 Pemodelan Sistem MIMO.....	16
2.3.4 Spatial Multiplexing (SM)	17
2.4 Modulasi Digital	17
2.4.1 Amplitude Shift Keying (ASK).....	18
2.4.2 Frequency Shift Keying (FSK)	19
2.4.3 Phase Shift Keying (PSK).....	19
2.4.3.1 Binary Phase Shift Keying (BPSK).....	20
2.4.3.2 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK).....	20
2.5 Space Time Coding	21
2.5.1 Space Time Block Code (STBC)	22
2.5.2 Space Time Trellis Code (STTC).....	26
2.6 Kanal Indoor 60 GHz	26
2.6.1 Model Saleh-Valenzuela	26
2.6.2 Model Two-Path	27
2.6.3 Model Triple Saleh Valenzuela	28
2.7 Frekuensi 60 GHz	29
2.8 Teknik Estimasi BER	31
2.9 Kapasitas	32
BAB III METODE SIMULASI	35
3.1 Umum	35
3.2 Parameter Lingkungan Indoor	36
3.3 Model Sistem	38
3.3.1 Pemodelan Kanal MIMO 2x2	38
3.3.2 Pemodelan Kanal MIMO 4x4	38
3.4 Pembangkitan Sinyal	39
3.5 Modulasi	39
3.5.1 Proses Modulasi BPSK	39
3.5.2 Proses Modulasi QPSK	40
3.6 Encoder	43
3.6.1 STBC Alamouti 2x2	43
3.6.2 STBC Tarokh 4x4 Code Rate $\frac{1}{2}$	43
3.7 Kanal Transmisi	44
3.8 Decoding	47
3.8.1 Decoding STBC Alamouti 2x2	47
3.8.2 Decoding STBC Tarokh 4x4.....	48
3.9 Demodulasi	49

3.10 Kalkulasi BER	49
3.11 Kapasitas	49
3.12 Analisis Data dan Hasil Simulasi	50
BAB IV ANALISIS HASIL SIMULASI	51
4.1 Implementasi Sistem	51
4.2 Kinerja MIMO Kanal TSV	53
4.2.1 Analisis Perbandingan Kinerja Sistem MIMO pada Kanal TSV terhadap Kurva Teori BPSK dan QPSK	53
4.2.2 Analisis Antena MIMO 2x2	55
4.2.3 Analisis Antena MIMO 4x4.....	56
4.2.4 Analisis Perbandingan Grafik Antena MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 Menggunakan Modulasi BPSK	58
4.2.5 Analisis Perbandingan Grafik Antena MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 Menggunakan Modulasi QPSK	59
4.2.6 Perbandingan Grafik Antena MIMO 2x2 dan MIMO 4x4	60
4.3 Kapasitas MIMO Kanal TSV	62
BAB V PENUTUP	65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran	65
Daftar Pustaka	67
Lampiran A	69
Lampiran B	73
Lampiran C	89
Riwayat Hidup Penulis	99

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 2.1	Urutan pengkodean dan transmisi 23
Tabel 2.2	Kanal antara antena pemancar dan penerima 23
Tabel 2.3	Notasi sinyal terima di antena penerima 23
Tabel 3.1	Parameter LOS Desktop 36
Tabel 3.2	Pemetaan bit Inphase dan Quadrature (BPSK) 40
Tabel 3.3	Pemetaan bit QPSK 41
Tabel 3.4	Pemetaan bit Inphase dan Quadrature (QPSK) 42
Tabel 3.5	Kanal MIMO 2x2 44
Tabel 3.6	Kanal MIMO 4x4 45
Tabel 4.1	BER MIMO 2x2 kanal TSV 56
Tabel 4.2	BER MIMO 4x4 kanal TSV 57
Tabel 4.3	Perbandingan BER MIMO 2x2 dan 4x4 modulasi BPSK 59
Tabel 4.4	Perbandingan BER MIMO 2x2 dan 4x4 modulasi QPSK 60
Tabel 4.5	Perbandingan BER MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 61
Tabel 4.6	Kapasitas MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 63

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1	Mekanisme propagasi sinyal 6
Gambar 2.2	Fungsi rapat probabilitas Gaussian dengan $\sigma = 1$ 9
Gambar 2.3	(a) Kepadatan spektral daya <i>white noise</i> 9 (b) Fungsi otokorelasi <i>white noise</i> 9
Gambar 2.4	Penambahan noise pada sinyal 10
Gambar 2.5	Kanal <i>Rayleigh</i> pdf 11
Gambar 2.6	Perbandingan BER SISO, SIMO, MISO, dan MIMO 12
Gambar 2.7	Model sistem SISO 13
Gambar 2.8	Model sistem SIMO 13
Gambar 2.9	Model sistem MISO 14
Gambar 2.10	Model sistem MIMO (a) 2x2 (b) 4x4 14
Gambar 2.11	Kanal MIMO 16
Gambar 2.12	Modulasi digital (a) ASK (b) FSK (c) PSK 18
Gambar 2.13	Konstelasi BPSK 20
Gambar 2.14	Konstelasi QPSK 21
Gambar 2.15	Skema Alamouti 2x2 22
Gambar 2.16	<i>Impulse Response</i> model TSV 28
Gambar 2.17	Cluster dan Ray 29
Gambar 2.18	Alokasi frekuensi 60 GHz di beberapa negara . 30
Gambar 2.19	Attenuasi sinyal pada atmosfer terhadap fungsi frekuensi 30
Gambar 2.20	Skenario aplikasi kombinasi frekuensi 5 dan 60 GHz di rumah atau kantor 31
Gambar 3.1	Diagram alir pemodelan sistem 35
Gambar 3.2	<i>Layout</i> model LOS desktop 37
Gambar 3.3	Blok sistem MIMO 2x2 38
Gambar 3.4	Blok sistem MIMO 4x4 39
Gambar 3.5	Diagram blok modulasi BPSK 39
Gambar 3.6	Konstelasi bit BPSK pada Matlab 40
Gambar 3.7	Diagram blok modulasi QPSK 41

Gambar 3.8	Konstelasi bit QPSK pada Matlab	42
Gambar 3.9	Model kanal 2x2	44
Gambar 3.10	Model kanal 4x4	45
Gambar 3.11	<i>Reference antenna model</i>	47
Gambar 4.1	Grafik perbandingan BER 2x2 antara kurva teori dengan kanal TSV	53
Gambar 4.2	Grafik perbandingan BER 4x4 antara kurva teori dengan kanal TSV	54
Gambar 4.3	BER MIMO 2x2 kanal TSV	55
Gambar 4.4	BER MIMO 4x4 kanal TSV	57
Gambar 4.5	Perbandingan BER MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 modulasi BPSK kanal TSV	58
Gambar 4.6	Perbandingan BER MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 modulasi QPSK kanal TSV	60
Gambar 4.7	Perbandingan BER MIMO 2x2 dan MIMO 4x4	61
Gambar 4.8	Kapasitas MIMO 2x2 dan MIMO 4x4	62

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam suatu lingkungan *indoor* terdapat berbagai penghalang yang dapat mempengaruhi performansi suatu antenna karena dapat menimbulkan *multipath* yang dapat merugikan. Penghalang utama pada lingkungan *indoor* diantaranya dinding, atap, dan berbagai *furniture* yang ada di dalamnya. Antena *Single Input Single Output* (SISO) dan *Single Input Multiple Output* (SIMO) menganggap keberadaan *multipath* sangat mengganggu karena menimbulkan *fading*.

Fading terjadi akibat proses propagasi dari gelombang radio, meliputi pembiasan, pantulan, difraksi, hamburan, redaman, dan lain sebagainya yang dapat memperlemah penerimaan sinyal pada sisi antenna penerima. Ketika sinyal asli bertemu dengan sinyal pantul maka kedua sinyal tersebut akan saling menghilangkan satu sama lain. Masalah tersebut dapat diatasi salah satunya dengan penggunaan teknik *Multiple Input Multiple Output* (MIMO).

MIMO menggunakan beberapa antenna di sisi pengirim (Tx) maupun sisi penerima (Rx), sehingga diharapkan koneksi *wireless* akan lebih cepat dan jarak jangkauan semakin jauh. MIMO memanfaatkan sinyal pantulan (*multipath*) sebagai penguat sinyal utama.

Pada kasus ini, frekuensi 60 GHz dapat dipertimbangkan dalam penggunaan MIMO *indoor*. Tersedianya bandwidth yang lebar dan adanya penyerapan O_2 pada 60 GHz berguna untuk gelombang millimeter dalam meningkatkan *data rates* dan *spatial reuse*.

Penelitian ini menjelaskan tentang analisis kinerja dan kapasitas sistem komunikasi MIMO pada frekuensi 60 GHz di lingkungan dalam gedung. Hasil Proses yang dilakukan meliputi simulasi program matlab dan pemodelan kanal indoor pada frekuensi 60 GHz menggunakan teori Triple Saleh Valenzuela.

1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dirumuskanlah beberapa permasalahan dalam Tugas Akhir ini yang kemudian dipecahkan menggunakan metodologi yang ada. Adapun Permasalahan yang dijadikan objek penelitian Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana pemodelan kanal MIMO pada frekuensi 60 GHz di lingkungan dalam gedung?
2. Bagaimana analisis kinerja dan kapasitas sistem komunikasi MIMO pada frekuensi 60 GHz di dalam gedung?

1.3 Batasan Masalah

Untuk pemfokusan permasalahan dalam Tugas Akhir ini, beberapa batasan masalah yang diambil adalah sebagai berikut :

1. Simulasi menggunakan program MATLAB R2013b.
2. Model kanal yang digunakan adalah Triple Saleh Valenzuela.
3. Jumlah antena MIMO pemancar dan penerima yaitu 2x2 dan 4x4 dengan frekuensi 60 GHz.
4. Pemancar dan penerima terletak pada satu ruangan dalam gedung.

1.4 Tujuan

Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut:

1. Memodelkan kanal MIMO pada frekuensi 60 GHz di lingkungan dalam gedung.
2. Menganalisis kinerja dan kapasitas sistem komunikasi MIMO pada frekuensi 60 GHz di dalam gedung.

1.5 Metodologi

Untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan, maka diperlukanlah metodologi yang membuat tahapan-tahapan dalam menyelesaikan Tugas Akhir. Adapun metodologi yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi literatur materi yang mendukung analisis MIMO meliputi:
 - Mempelajari tentang pengertian, sistem dan pemodelan MIMO.
 - Mempelajari konfigurasi, arsitektur, dan karakteristik dari antena pengirim (Tx) dan penerima (Rx).
 - Mempelajari kinerja MIMO di dalam ruangan .
 - Mempelajari keunggulan MIMO 60GHz dan karakteristiknya.
 - Mempelajari persamaan dari model kanal Triple Saleh Valenzuela.

- Mempelajari program matlab yang berkaitan dengan MIMO.
- 2. Pemodelan kanal MIMO indoor
 - Memperkirakan jenis ruangan *indoor* yang akan dipakai untuk simulasi
 - Menentukan jarak, letak, dan parameter antena pengirim serta penerima.
 - Mencari bentuk sistematis dan memodelkan kanal MIMO *indoor* berdasarkan *layout* yang telah direncanakan.
- 3. Membuat program dan simulasi
Membuat program dan mensimulasikan model kanal yang di dapat dengan matlab.
- 4. Analisis data
Analisis data berdasarkan hasil yang diperoleh dengan cara membandingkan BER dari antena MIMO 2x2 dan 4x4.
- 5. Penarikan kesimpulan
Kesimpulan diperoleh dari hasil analisis yang telah dilakukan selama pengerjaan tugas akhir.
- 6. Penyusunan buku laporan

1.6 Sistematika

Laporan penelitian Tugas Akhir ini disusun secara sistematis dalam beberapa bab, dengan perincian sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi penjelasan latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika laporan.

BAB II Sistem Komunikasi MIMO pada Frekuensi 60 GHz di Lingkungan Dalam Gedung

Pada bab ini dibahas secara singkat teori-teori yang terkait dalam penulisan Tugas Akhir.

BAB III Metode Simulasi

Dalam bab ini dijelaskan mengenai *step* metode yang harus dilalui untuk mencapai tujuan sehingga didapatkan hasil penelitian yang dapat dianalisa dan ditarik kesimpulannya.

BAB IV Analisis Hasil Simulasi

Bab ini merupakan kelanjutan dari bab tiga, dimana dari simulasi yang didapatkan baik berupa grafik maupun tabulasi, dianalisa dan dibahas serta berorientasi pada tujuan penelitian yang telah ditetapkan.

BAB V Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan pokok dari seluruh rangkaian penelitian yang telah dilakukan dan saran yang dapat dijadikan sebagai pengembangan penelitian selanjutnya.

1.7 Relevansi

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

1. Memberikan informasi mengenai pemodelan sistem komunikasi MIMO 60 GHz di lingkungan dalam gedung.
2. Menjadi dasar untuk penelitian selanjutnya mengenai optimasi sistem komunikasi MIMO 60 GHz di lingkungan dalam gedung.
3. Memberikan referensi beserta parameter-parameter yang harus diperhatikan dan berhubungan dalam implementasi teknologi tersebut.

BAB II

SISTEM KOMUNIKASI MIMO PADA FREKUENSI 60 GHz DI LINGKUNGAN DALAM GEDUNG

2.1 Karakteristik Kanal Nirkabel

Dalam sistem komunikasi nirkabel, sinyal merambat dan mengalami pemantulan oleh berbagai objek dalam beragam lintasan sebelum sampai ke penerima. Fenomena tersebut disebut sebagai *multipath fading* yang mengakibatkan fluktuasi dari amplitudo, fase, dan sudut dari sinyal yang masuk ke penerima.

Mekanisme yang terjadi pada gelombang elektromagnetik secara umum terdapat tiga macam yaitu pemantulan (*reflection*), pembelokan (*diffraction*), dan penghamburan (*scattering*) yang dapat mengakibatkan pelemahan gelombang (attenuasi) atau pelenyapan sinyal secara gradual (*fading*) yang merusak sinyal dan telah menjadi permasalahan umum dari suatu kanal propagasi [1],[2].

2.1.1 Refleksi (Pemantulan)

Refleksi atau pemantulan sinyal terjadi ketika sinyal yang merambat membentur permukaan benda yang halus dengan dimensi yang relatif besar dibandingkan panjang gelombang sinyal tersebut. Redaman sinyal akibat refleksi dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti sudut sinyal memantul, sifat material, dan ketebalan bidang permukaan pantulan. Contoh fenomena refleksi adalah jika suatu gelombang yang berpropagasi mengenai suatu logam, dinding, kaca, dsb.

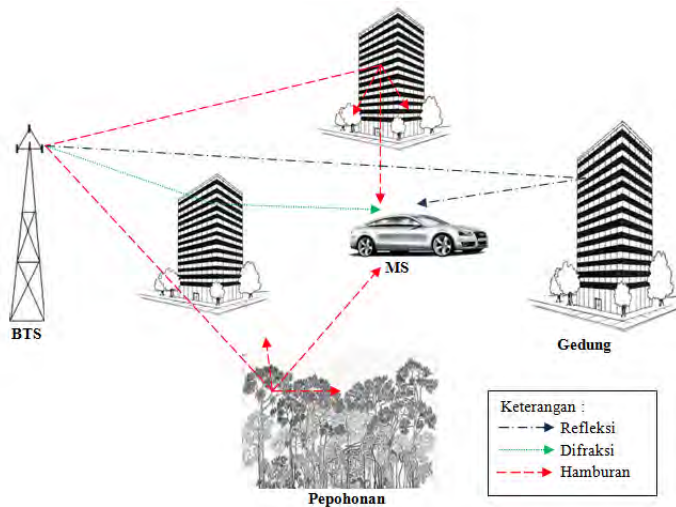
2.1.2 Difraksi (Pembelokan)

Difraksi terjadi ketika lintasan gelombang elektromagnetik yang berpropagasi dihalangi oleh permukaan yang padat (tajam, kecil). Pembelokan sinyal dapat terjadi ke berbagai arah yang bersumber dari sisi penghalang yang dilalui sinyal tersebut. Pada frekuensi tinggi, difraksi tergantung pada geometri objek seperti amplitudo, fase, dan polarisasi gelombang elektromagnetik.

2.1.3 Hamburan

Sinyal akan mengalami hamburan ketika gelombang electromagnet yang merambat mengenai permukaan kasar dengan dimensi lebih besar

dibandingkan dengan panjang gelombang sinyal atau mengenai permukaan berdimensi kecil. Benda yang dapat menyebabkan hamburan sinyal seperti perabotan dalam ruangan. Sinyal yang terhalangi oleh benda-benda tersebut tersebar menjadi beberapa sinyal yang lebih lemah sehingga sinyal asli sulit diperkirakan.



Gambar 2.1 Mekanisme propagasi sinyal

2.2 Fading

Fading dapat didefinisikan sebagai perubahan fase, polarisasi, atau level dari suatu sinyal terhadap waktu. *Fading* disebabkan oleh interferensi antara dua atau lebih versi sinyal yang dikirimkan dan tiba pada penerima dalam waktu yang sedikit berbeda. Sinyal radio tersebut (gelombang *multipath*) berkombinasi pada antena penerima untuk menghasilkan sinyal yang dapat memiliki banyak variasi dalam amplitudo dan fase, tergantung dari distribusi intensitas dan waktu propagasi dari gelombang radio dan *bandwidth* dari sinyal yang dikirimkan.

Definisi dasar dari suatu *fading* berkaitan dengan mekanisme propagasi yang melibatkan refleksi, difraksi, dan hamburan dari gelombang radio. Pengaruh *fading* terhadap sinyal terima dapat memperkuat ataupun memperlemah, tergantung besar fase dari resultan

sinyal langsung (*Line of Sight / LOS*) dan sinyal tidak langsung (*Non Line of Sight / NLOS*). Adanya objek penghalang serta pemantul sepanjang kanal propagasi nirkabel menyebabkan sinyal yang dikirim *transmitter* menuju *receiver* melalui berbagai lintasan (*multipath* atau lintasan jamak).

Kanal *fading* terbagi menjadi dua, yaitu *fading* skala besar atau *large scale fading* dan *fading* skala kecil atau *small scale fading* [6]. *Fading* skala besar merepresentasikan redaman atau *path loss* karena pergerakan sinyal melalui area yang besar. Besar dari atenuasi oleh *fading* skala besar akan sebanding dengan jarak antara pengirim dengan penerima. Distribusi dari *fading* skala besar berbentuk lognormal. *Fading* skala kecil merupakan perubahan sangat cepat yang terjadi pada amplitudo sinyal yang diterima di sekitar tingkat rata-rata sinyal. *Fading* skala kecil termanifestasi menjadi dua mekanisme, *time spreading of the signal* dan *time variance of the channel*. Distribusi dari *small scale fading* berbentuk Rayleigh pada umumnya dan Ricean jika terdapat komponen *Line of Sight (LOS)*.

Pada daerah urban, *fading* terjadi jika tinggi antenna pada *mobile station* lebih rendah daripada tinggi benda-benda yang terletak disekelilingnya sehingga tidak ada lintasan *LOS* antara *base station* dengan *mobile station*. Meskipun lintasan langsung terjadi, lintasan jamak tetap dapat terjadi akibat pantulan oleh permukaan gedung, tanah, dan benda-benda di sekitarnya. Akibatnya, sinyal akan tiba pada penerima dengan sudut datang dan arah yang berbeda-beda serta dengan delay yang berbeda pula.

Sinyal yang diterima oleh *mobile station* dapat terdiri dari beragam bidang gelombang yang mempunyai distribusi amplitudo, fase, dan sudut kedatangan yang acak. Komponen-komponen lintasan jamak ini bergabung secara vektor pada antenna penerima dan menyebabkan sinyal yang diterima *receiver* mengalami distorsi atau *fade*. Hal tersebut dapat terjadi pula meskipun *mobile station* dalam keadaan diam jika pada kanal radio terdapat objek yang bergerak.

Pada keadaan lingkungan yang mengalami *fading*, sinyal rata-rata yang diterima pada *mobile station* bertambah buruk berbanding lurus dengan penambahan jarak. Untuk mengatasi *fading* yang terjadi digunakan teknik *diversity* yang memanfaatkan perubahan sinyal yang cepat. Salah satu sistem yang memanfaatkan teknik *diversity* adalah sistem *multiple input multiple output (MIMO)* yang menggunakan antenna jamak pada sisi pemancar dan penerima.

2.2.1 Kanal Gaussian

Kanal Gaussian adalah kanal yang dipengaruhi oleh *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). AWGN adalah suatu derau thermal yang merusak sinyal dalam bentuk aditif. Artinya, derau ini ditambahkan ke dalam sinyal utama yang memiliki kepadatan spectrum daya yang sama untuk semua daerah frekuensi. Kanal ini tidak memperhitungkan faktor-faktor perusak seperti *fading*, sehingga bisa disebut kanal ideal [3].

Derau kanal dapat merusak sinyal, karena sinyal yang diterima tidak lagi sama dengan sinyal yang dikirimkan. Sinyal yang diterima dalam selang waktu $0 < t < T$, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad , 0 < t < T \quad (2.1)$$

dimana $n(t)$ merupakan derau kanal (*noise*) sebagai sebuah proses acak *zero mean Gaussian*.

Secara teoritis *noise* sering dimodelkan sebagai AWGN. Derau ini dapat dideskripsikan sebagai proses acak yang terdistribusi Gaussian dengan rata-rata (*mean*) sama dengan nol. Proses acak Gaussian $n(t)$ merupakan fungsi acak dengan harga n pada saat t , dan dikarakteristikan secara statistik dengan fungsi rapat probabilitas pdf (*probability distribution function*) Gaussian sebagai berikut:

$$P_x(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{n}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

dimana σ^2 merupakan varian dari v . Grafik pdf Gaussian ternormalisasi dari suatu proses acak dengan nilai rata-rata nol diperoleh dengan mengasumsikan standar deviasi (σ) = 1, sehingga nilai pdf Gaussian dapat diamati dari perhitungan berikut :

1. Jika $E[n] = n = 0$

$$P_x(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} = 0.399$$

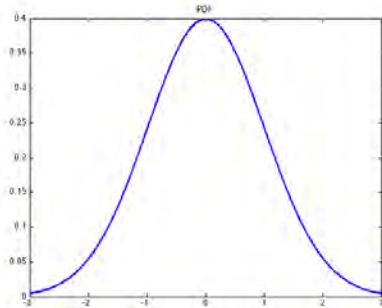
2. Jika $n = 1$

$$P_x(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{1} \right)^2 \right] = 0.242$$

3. Jika $n = 2$

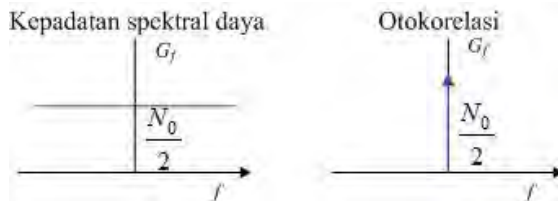
$$P_x(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2}{1} \right)^2 \right] = 0.054$$

Diantara ketiga nilai pdf tersebut, nilai yang tertinggi didapat pada saat $n = 0$. Hal tersebut menunjukkan rata-rata pada proses acak ini adalah nol. Dengan hasil yang diperoleh dapat digambarkan fungsi rapat probabilitas Gaussian dengan $\sigma = 1$ seperti ditunjukkan pada gambar 2.2



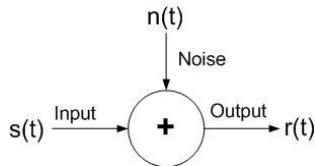
Gambar 2.2 Fungsi rapat probabilitas gaussian dengan $\sigma = 1$

Pada semua frekuensi, *noise thermal* memiliki nilai kepadatan spectrum daya yang sama untuk daerah frekuensi yang lebar, yaitu sebesar $N_0/2$, seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.3(a) sedangkan fungsi otokorelasi AWGN ditunjukkan pada gambar 2.3(b).



Gambar 2.3 (a) Kepadatan spektral daya *white noise*
(b) Fungsi Otokorelasi *white noise*

Karakteristik seperti di atas disebut sebagai *white noise*. *Noise* yang memiliki karakteristik *white* disebut *white noise*, sehingga *noise thermal* merupakan *white noise*. Pergerakan elektron penyebab *noise thermal* bersifat acak, sehingga besarnya *noise thermal* juga berubah secara acak terhadap waktu. Perubahan secara acak tersebut dapat diperkirakan secara statistik, yaitu mengikuti distribusi *Gaussian*, dengan rata-rata nol.



Gambar 2.4 Penambahan noise pada sinyal

Pada gambar 2.4 menunjukkan bahwa *noise* merusak sinyal dalam bentuk aditif, yaitu ditambahkan ke sinyal utama setelah melewati kanal, sehingga *noise thermal* pada perangkat penerima tersebut disebut *Additive White Gaussian Noise* (AWGN).

2.2.2 Kanal Rayleigh

Berdasarkan penelitian, *fading* dapat diperkirakan secara statistik berupa perubahan nilai secara acak dengan distribusi tertentu. Salah satu distribusi tersebut adalah distribusi *Rayleigh*. Distribusi *Rayleigh* merupakan salah satu distribusi yang dapat menjadi model untuk mewakili *fading*, sehingga *fading* yang memiliki distribusi *Rayleigh* disebut *Rayleigh fading*.

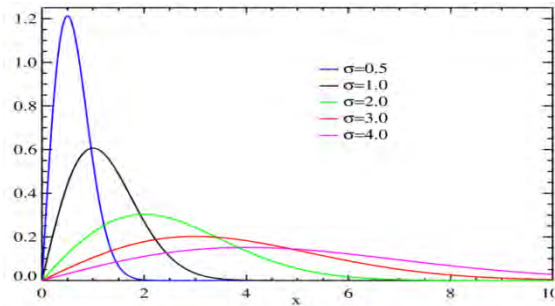
Rayleigh fading terjadi bila sebuah sinyal yang dikirim akan mengalami proses interaksi yang mengakibatkan sinyal yang diterima akan berbeda baik itu level energinya, fasenya atau polarisasinya dengan mengikuti distribusi *Rayleigh*. Distribusi *Rayleigh* mengindikasikan bahwa pada daerah propagasi tidak ada hubungan LOS antara pengirim dan penerima.

Pemodelan dengan *Rayleigh fading* sering dipakai bila lingkungan dari propagasi yang ada memiliki banyak objek sehingga akan menghamburkan sinyal sebelum sampai di penerima. Agar jumlah penghambur mencukupi maka *impulse response* dari kanal akan dimodelkan sebagai proses Gaussian. Dengan tidak adanya komponen

sinyal yang dominan maka proses tersebut akan memiliki rata-rata nol dan fase diantara 0 dan 2π radian. *Probability Density Function* (pdf) dari distribusi kanal *Rayleigh* ini diberikan sebagai berikut [3]:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & 0 \leq r \leq \infty \\ 0 & r < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

dengan σ^2 merupakan daya rata-rata sinyal yang diterima terhadap waktu sebelum deteksi tegangan (*envelope*) dan r nilai mean. Pola pdf kanal *Rayleigh* ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kanal *Rayleigh* pdf

2.2.3 Kanal Rician

Dalam proses pengiriman sinyal informasi, tidak menutup kemungkinan jalur yang digunakan terdapat komponen LOS. Dengan adanya kondisi tersebut maka distribusi selubung pada *small-scale fading*nya adalah model *Ricean*. Pada sebuah situasi, komponen multipath yang bernilai acak datang dengan sudut yang berbeda dan saling berhimpit dengan sinyal *non-fading*. Dengan adanya dinyal *non-fading* yang datang, maka sinyal multipath akan melemah. Kondisi ini akan memberikan peningkatan pada distribusi *Ricean*. Ketika *non-fading* melemah maka sinyal yang berbeda menyerupai sebuah sinyal yang mempunyai selubung disebut dengan *Rayleigh*. Jadi distribusi *Ricean* membangkitkan kembali distribusi *Rayleigh* ketika *non-fading*nya

melemah. Distribusi *Ricean* selalu digambarkan dengan parameter K yang ditetapkan sebagai rasio perbandingan dari daya sinyal dengan variasi dari multipath. Parameter K tersebut merupakan konstanta *Rice* dengan persamaannya sebagai berikut.

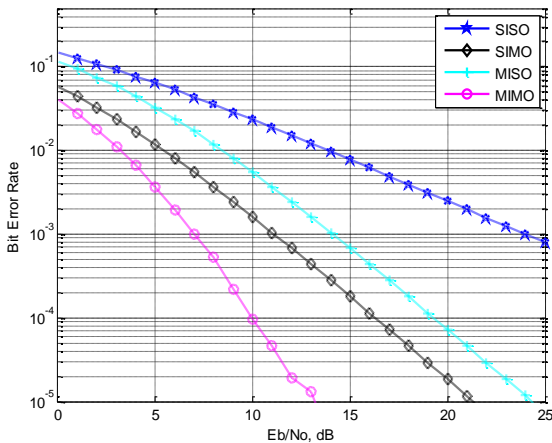
$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (2.4)$$

2.3 Sistem MIMO

Teknik yang menggunakan susunan antenna jamak pada sisi pengirim dan penerima dapat menawarkan kapasitas tinggi untuk sistem komunikasi nirkabel saat ini dan masa yang akan datang. Sistem *multiple input multiple output* (MIMO) memberikan peningkatan linier dari kapasitas dengan jumlah antenna dan juga menawarkan peningkatan sistem dibandingkan dengan antenna *single input single output* (SISO).

2.3.1 Sistem Antena Jamak Konvensional

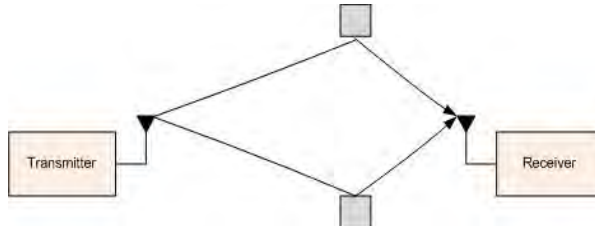
Ada beberapa sistem antenna jamak konvensional yaitu SISO, SIMO, MISO, dan MIMO. Gambar berikut ini menunjukkan perbandingan BER untuk antenna SISO, SIMO, MISO, dan MIMO pada kanal Rayleigh.



Gambar 2.6 Perbandingan BER SISO, SIMO, MISO, dan MIMO

2.3.1.1 *Single Input Single Output (SISO)*

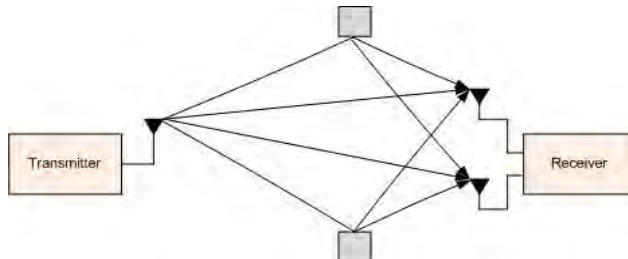
Antena SISO terdiri dari satu antena pada sisi pengirim dan penerima untuk mentransmisikan sinyal melalui kanal komunikasi. Sistem antena ini banyak digunakan oleh masyarakat pada umumnya. Model sistem SISO dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Model sistem SISO

2.3.1.2 *Single Input Multiple Output (SIMO)*

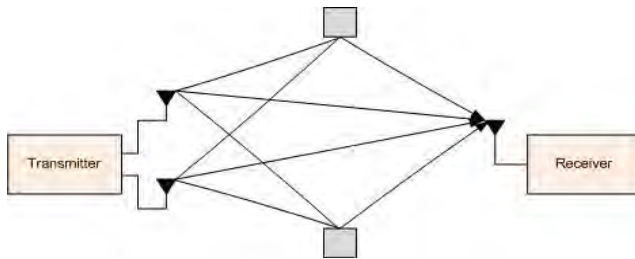
Sistem SIMO menggunakan antena pemancar tunggal dan N antena penerima untuk dapat mentransmisikan sinyal informasi ke beberapa pengguna sejumlah N user (*receive diversity*). Model sistem SIMO dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Model sistem SIMO

2.3.1.3 *Multiple Input Single Output (MISO)*

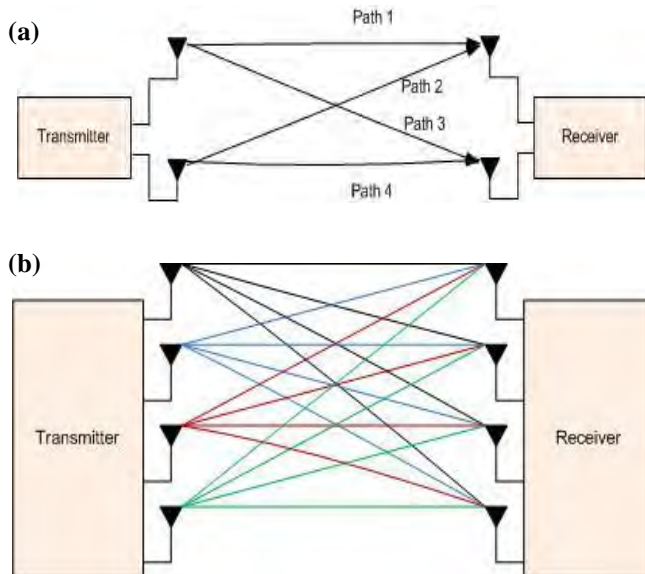
Sistem ini menggunakan sejumlah N antena pada sisi pemancar (*transmit diversity*) dan menggunakan antena tunggal pada sisi penerima untuk dapat mentransmisikan sinyal informasi dari beberapa pengirim ke sebuah penerima. Model sistem MISO dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Model sistem MISO

2.3.1.4 *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*

Sistem MIMO menggunakan sejumlah M antena pemancar dan sejumlah N antena penerima untuk mentransmisikan sinyal informasi dari beberapa pengirim ke beberapa penerima. Model sistem MIMO dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Model sistem MIMO (a) 2x2 (b) 4x4

2.3.2 Prinsip Sistem MIMO

Sistem *multiple input multiple output* (MIMO) dalam komunikasi nirkabel didefinisikan sebagai sistem yang memiliki banyak terminal (antena) pengirim dan penerima [4]. Komponen *multipath* yang pada sistem konvensional merupakan suatu kelemahan, pada sistem ini dieksploitasi untuk meningkatkan diversitas dan efisiensi *bandwidth*. Untuk dapat meningkatkan kapasitas kanal tanpa harus melakukan peningkatan *bandwidth* kanal, sistem MIMO menggunakan antena array dengan sejumlah N pengguna atau penerima secara bergantian. Ini dikarenakan penggunaan sejumlah N elemen array akan mampu membangun sejumlah N lintasan. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi unjuk kerja (performa) dari sistem ini, diantaranya adalah impedansi dari antena Tx dan Rx, konfigurasi dan ukuran elemen antena, polarisasi antena, serta propagasi dari gelombang elektromagnetik yang melalui kanal tersebut.

Penggunaan *space diversity* pada sisi pemancar maupun penerima dapat meningkatkan *throughput* dan *coverage* sehingga memungkinkan peningkatan efisiensi spektrum yang pada akhirnya akan meningkatkan kapasitas sistem. Selama ini lintasan LOS antara pemancar dan penerima lebih diinginkan karena mampu mengurangi penghamburan serta absorpsi sinyal. Namun dalam kondisi tertentu, *multipath fading* yang disebabkan oleh penghambur sinyal (*scatterer*) justru menghasilkan kapasitas kanal yang lebih besar daripada lintasan LOS.

Kapasitas kanal akan meningkat pesat jika *antenna array* digunakan pada sisi pemancar maupun penerima dimana lingkungan propagasi yang ada memberikan *scattering* yang cukup. *Fading* pada link antara pasangan-pasangan antena pengirim dan penerima adalah i.i.d. (*independent identical distribution*), kapasitas kanal rata-rata dari sistem yang menggunakan N antena pada kedua sisi akan menjadi N kali lebih besar dari sistem antena tunggal dengan *bandwidth* dan daya pancar total yang sama. Sistem ini disebut dengan *multiple input multiple output* (MIMO).

Dasar pemikiran awal dalam penggunaan antena *array* adalah bahwa kandungan informasi yang dikirim dan diterima oleh setiap elemen antena adalah sama atau identik. Hal ini cukup logis karena jika sinyal-sinyal yang tidak berkorelasi ditransmisikan melalui elemen-elemen antena yang berbeda, sinyal-sinyal ini akan saling menginterferensi satu sama lain pada penerima. Akan tetapi, pada sistem MIMO antena *array* mengirimkan informasi yang berbeda dan

independen dari setiap elemen. Sampai saat ini, peningkatan efisiensi spektrum setinggi yang diberikan sistem MIMO belum pernah dicapai dengan menggunakan berbagai metode lain yang telah ada.

2.3.3 Pemodelan Sistem MIMO

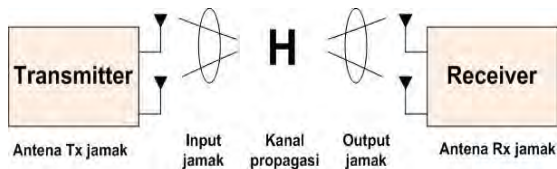
Berkaitan dengan matriks kanal linier tetap dengan AWGN sinyal dipandang sebagai *baseband* kompleks. Meskipun tetap, koefisien kanal selalu dibangkitkan secara random untuk setiap pengiriman *burst* dalam domain waktu diskrit. Notasi-notasi yang mewakili beberapa asumsi dasar dijelaskan sebagai berikut.

- Sinyal yang dikirim, $s(t)$, berdimensi M dimana M merupakan jumlah elemen pada pemancar. Daya total yang dipancarkan sebesar P_{tot} .
- Noise pada penerima, $n(t)$, merupakan AWGN kompleks berdimensi N dengan komponen-komponen yang *independent* secara statistik dengan daya identik sebesar σ^2 dari setiap elemen dari N elemen yang digunakan. Daya rata-rata pada output dari setiap antenna penerima dinyatakan sebagai P_{avg} .
- Sinyal yang diterima, $r(t)$, berdimensi N . Jadi, pada setiap saat masing-masing elemen penerima menerima satu komponen vektor kompleks.
- SNR rata-rata pada setiap cabang penerima adalah $\rho = P_{avg} / \sigma^2$.
- *Response impulse*, $h(t)$, merupakan matriks respon impuls kanal dengan respon waktu diskrit dari suatu kanal.

Persamaan vektor *input output* dari sistem MIMO secara umum seperti berikut.

$$r(t) = h(t) * s(t) + n(t) \tag{2.5}$$

Gambaran secara umum persamaan di atas dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Kanal MIMO

dimana

$$s(t) = \begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_{N_t}(t) \end{pmatrix}, h(t) = \begin{pmatrix} h_{1,1}(t, \varphi) & \cdots & h_{1,N_t}(t, \varphi) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_r,1}(t, \varphi) & \cdots & h_{N_r,N_t}(t, \varphi) \end{pmatrix}, \text{ dan}$$

$$n(t) = \begin{pmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_{N_r}(t) \end{pmatrix}$$

2.3.4 Spatial Multiplexing (SM)

Spatial Multiplexing merupakan suatu teknik yang bertujuan untuk mencapai kapasitas kanal yang besar atau meningkatkan *bit rate*. Pada SM aliran data berkecepatan tinggi dipecah-pecah menjadi sejumlah aliran paralel sesuai dengan jumlah antenna transmitter dan dengan kecepatan yang lebih rendah dari aslinya. Sebelum masuk ke antenna aliran data ini dilewatkan pada matriks khusus yang berfungsi menggabungkan semua data dengan kombinasi tertentu untuk dipancarkan melalui setiap antenna. Salah satu tekniknya adalah *Singular Value Decomposition* (SVD) dengan menerapkan operasi dekomposisi nilai singular pada matriks respon kanal.

Peningkatan kapasitas kanal yang dimaksud di atas seperti contoh berikut ini. Misal terdapat M saluran yang terpisah satu sama lain untuk membawa M aliran data yang berbeda dengan kecepatan rata-rata masing-masing $1/M$ dari laju aliran data aslinya, padahal seluruh sistem multi-antenna bekerja pada frekuensi yang sama, sehingga telah terjadi penghematan *bandwidth* sebesar $1/M$ kali atau terjadi peningkatan kapasitas kanal M kali.

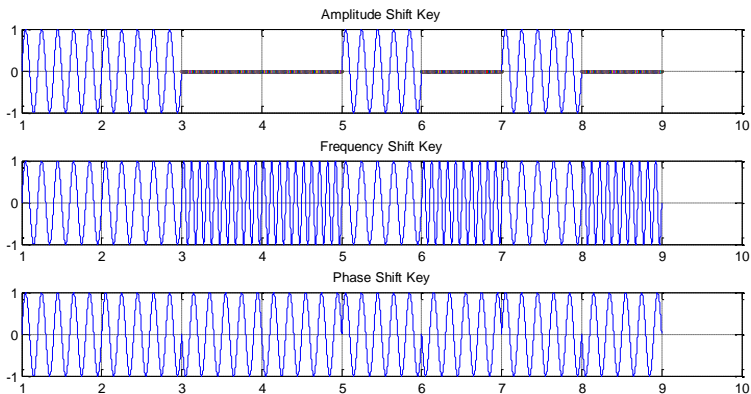
2.4 Modulasi Digital

Modulasi adalah suatu proses dimana parameter dari suatu gelombang divariasikan secara proposional terhadap gelombang lain. Proses modulasi membutuhkan dua buah sinyal pemodulasi yang berupa sinyal informasi dan sinyal pembawa (*carrier*) dimana sinyal informasi tersebut ditumpangkan oleh sinyal *carrier*.

Modulasi dapat didefinisikan sebagai suatu proses dimana gelombang sinyal termodulasi ditransmisikan dari pengirim ke penerima. Pada sisi penerima sinyal modulasi yang diterima dikonversikan kembali ke bentuk asalnya, proses ini disebut dengan demodulasi.

Modulasi terbagi menjadi 2 macam, yaitu modulasi analog dan modulasi digital. Modulasi digital adalah teknik pengkodean sinyal dari sinyal analog ke sinyal digital. Dalam komunikasi digital, sinyal informasi dinyatakan dalam bentuk digital berupa biner “0” dan “1”, sedangkan gelombang pembawa berbentuk sinusoidal yang termodulasi disebut juga modulasi digital.

Gambar 2.12 menunjukkan sinyal yang telah termodulasi digital, dengan sinyal asli = [1 1 0 0 1 0 1 0].



Gambar 2.12 Modulasi digital (a) ASK (b) FSK (c) PSK

2.4.1 *Amplitude Shift Keying (ASK)*

Amplitude Shift Keying (ASK) merupakan salah satu modulasi digital dimana pengiriman sinyal digital berdasarkan pergeseran amplitudo. Pada sistem ini *input* sinyal pemodulasi dalam bentuk gelombang biner dan kemunculan frekuensi pembawa tergantung pada ada tidaknya sinyal informasi digital. Bentuk dari sinyal modulasi digital ASK dapat dilihat pada gambar 2.12a. Persamaan ASK secara umum sebagai berikut [5].

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + f) \quad \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T \\ i=1, \dots, M \end{array} \quad (2.6)$$

2.4.2 Frequency Shift Keying (FSK)

Modulasi Frequency Shift Keying (FSK) merupakan sejenis Frequency Modulation (FM), dimana sinyal pemodulasinya (sinyal digital) menggeser outputnya antara dua frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya, yang biasa diistilahkan frekuensi mark and space. Jenis amplitudo seperti ini tidak mengubah amplitudo dari sinyal carrier yang berubah hanya frekuensi. Bentuk sinyal modulasi digital FSK dapat dilihat pada gambar 2.12b. Persamaan FSK secara umum sebagai berikut [5].

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_i t + f) \quad \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T \\ i=1, \dots, M \end{array} \quad (2.7)$$

2.4.3 Phase Shift Keying (PSK)

Modulasi ini merupakan modulasi yang menyatakan pengiriman sinyal digital berdasarkan pergeseran fase. Biner 0 diwakilkan dengan mengirim suatu sinyal dengan fase yang sama terhadap sinyal yang dikirim sebelumnya dan biner 1 diwakilkan dengan mengirim suatu sinyal dengan fase berlawanan dengan sinyal yang dikirim sebelumnya. Fase dari frekuensi gelombang pembawa berubah-ubah sesuai dengan perubahan status sinyal informasi digital. Bentuk sinyal modulasi digital PSK dapat dilihat pada gambar 2.12c. Persamaan PSK secara umum sebagai berikut [5].

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[\omega_0 t + f_i(t)] \quad \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T \\ i=1, \dots, M \end{array} \quad (2.8)$$

dimana

$$f_i(t) = \frac{2\pi i}{M} \quad i = 1, \dots, M \quad (2.9)$$

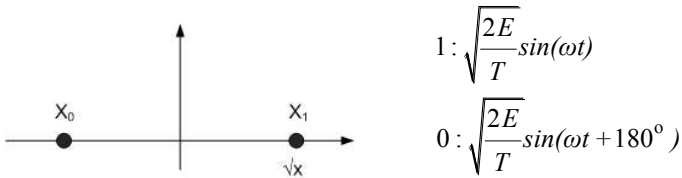
Berikut ini akan dijelaskan mengenai *M*-array PSK, diantaranya adalah *Binary Phase Shift Keying* atau BPSK dengan $M = 2$ dan *Quadrature Phase Shift Keying* atau QPSK dengan $M=4$.

2.4.3.1 *Binary Phase Shift Keying (BPSK)*

Salah satu modulasi PSK adalah *Binary PSK (BPSK)*. Dengan BPSK satu frekuensi pembawa tunggal dapat menghasilkan dua fase keluaran. Satu fase menyatakan logika 1 dan fase yang lain menyatakan logika 0. Ketika sinyal input berubah, fase dari pembawa keluaran bergeser antara dua nilai sudut yang berjarak 180° . Sinyal yang termodulasi secara BPSK didefinisikan mempunyai bentuk:

$$x_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \sin[2\pi ft + f_i(t)] \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.10)$$

Gambar 2.13 menunjukkan diagram BPSK pada bidang kompleks dengan konstelasi dari setiap bit.



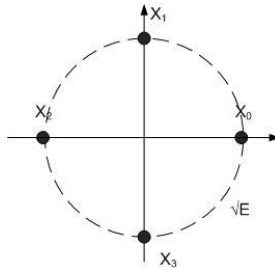
Gambar 2.13 Konstelasi BPSK

2.4.3.2 *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)*

Sinyal yang termodulasi secara QPSK mempunyai persamaan seperti di bawah ini.

$$x_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \sin[2\pi ft + f_i(t)] \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.11)$$

Dengan konstelasi dari setiap bit seperti berikut:



Gambar 2.14 Konstelasi QPSK

$$00 : \quad x_0 = \sqrt{\frac{2E}{T}} \sin(\omega t)$$

$$01 : \quad x_1 = \sqrt{\frac{2E}{T}} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$10 : \quad x_2 = \sqrt{\frac{2E}{T}} \sin(\omega t + 180^\circ)$$

$$11 : \quad x_3 = \sqrt{\frac{2E}{T}} \sin(\omega t + 270^\circ)$$

Gambar 2.14 menunjukkan posisi setiap pasangan bit di bidang kompleks. Titik-titik tersebut berada di atas lingkaran yang beradius \sqrt{E} . Jadi sinyal termodulasi tersebut tetap mempunyai energi yang sama untuk setiap bitnya.

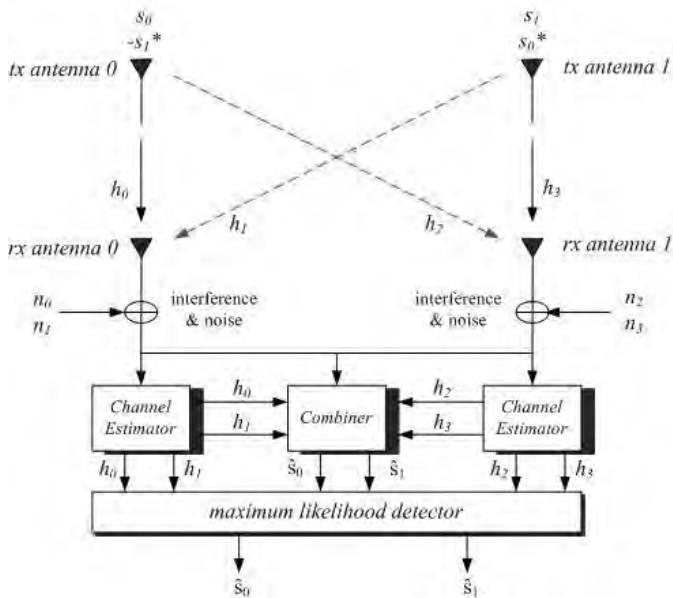
2.5 Space Time Coding (STC)

Space Time Coding (STC) bertujuan untuk mendapatkan kualitas sinyal setinggi mungkin dengan memanfaatkan teknik *diversity* pada *transmitter* dan *receiver*. Teknik *diversity* diterapkan dengan memasang lebih dari satu antena pada penerima. Dengan menggunakan teknik tersebut diharapkan kualitas sinyal yang diterima dapat ditingkatkan dari sistem satu antena yang diukur dengan parameter *diversity gain*. Penggunaan STC pada sistem MIMO dengan M antena *transmitter* dan N antena *receiver* menjanjikan kenaikan *diversity* menjadi $M \times N$.

Ada dua skema STC, yaitu *Space Time Block Code* (STBC) dan *Space Time Trellis Code* (STTC).

2.5.1 *Space Time Block Code* (STBC)

STBC diperkenalkan oleh Siavash M. Alamouti pada tahun 1998 yang penerapannya terbatas pada sistem dengan dua antenna *transmitter* [6]. Pada sistem tersebut aliran data yang sama dipancarkan melalui kedua antenna *transmitter*. Namun sebelum dipancarkan, aliran data yang menuju ke setiap antenna mengalami perlakuan yang berbeda. Setiap dua simbol data akan tetap dikirimkan dalam dua periode simbol, namun pada antenna kedua urutan simbol dibalik, dikonjugasikan, dan salah satunya dinegatifkan, tujuannya adalah untuk memudahkan pemisahan kedua simbol pada penerima sehingga deteksi dua simbol yang semula harus dilakukan bersamaan pada sinyal campuran sekarang dapat dipecah menjadi dua proses deteksi simbol yang terpisah. Salah satu skema yang digunakan Alamouti adalah skema Alamouti 2x2.



Gambar 2.15 Skema Alamouti 2x2

Gambar 2.15 menunjukkan skema Alamouti 2x2 yang terdiri dari 2 antenna pemancar dan 2 antenna penerima. Dua buah sinyal dapat dikirimkan dari 2 antenna dalam waktu yang bersamaan. Sinyal yang dipancarkan dari antenna 0 dinotasikan s_0 dan dari antenna 1 adalah s_1 . Simbol berikutnya yang dipancarkan untuk antenna 0 dinotasikan $-s_1^*$ dan untuk antenna 1 dinotasikan s_0^* , dimana $*$ adalah operasi *complex conjugate*, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Urutan pengkodean dan transmisi [9]

	antena 0	antena 1
time T	s_0	s_1
time t+T	$-s_1^*$	s_0^*

Tabel 2.2 Kanal antara antenna pemancar dan penerima [9]

	antena Tx 0	antena Tx 1
antena Rx 0	h_0	h_2
antena Rx 1	h_1	h_3

Tabel 2.3 Notasi sinyal terima di antenna penerima [9]

	antena 0	antena 1
time T	r_0	r_2
time t+T	r_1	r_3

Dengan mengasumsikan *fading* bersifat konstan antara dua simbol yang berurutan, dapat ditulis:

$$\begin{aligned}
 h_0(t) &= h_0(t+T) = h_0 = \alpha_0 e^{j\theta_0} \\
 h_1(t) &= h_1(t+T) = h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1} \\
 h_2(t) &= h_2(t+T) = h_2 = \alpha_2 e^{j\theta_2} \\
 h_3(t) &= h_3(t+T) = h_3 = \alpha_3 e^{j\theta_3}
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

dimana T merupakan durasi simbol. Sinyal yang diterima dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
r_0 &= h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\
r_1 &= -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \\
r_2 &= h_2 s_0 + h_3 s_1 + n_2 \\
r_3 &= -h_2 s_1^* + h_3 s_0^* + n_3
\end{aligned} \tag{2.13}$$

$n_0, n_1, n_2,$ dan n_3 adalah noise dan interferensi yang dibangkitkan dengan variabel random kompleks. Pada persamaan berikut dari *combiner* dua sinyal yang dikirimkan ke *maximum likelihood detector* dapat ditulis [6]:

$$\begin{aligned}
\bar{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1 r_1^* + h_2^* r_2 + h_3 r_3^* \\
\bar{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0 r_1^* + h_3^* r_2 - h_2 r_3^*
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Kombinasi sinyal di atas selanjutnya dikirimkan ke maximum likelihood detector dengan pengambilan keputusan untuk sinyal s_0 jika memenuhi kriteria pada persamaan 2.15 dan 2.16 untuk sinyal PSK .

$$\begin{aligned}
& \left(\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1 \right) |s_i|^2 + d^2(\bar{s}_0, s_i) \\
& \leq \left(\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1 \right) |s_i|^2 + d^2(\bar{s}_0, s_k)
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Dipilih s_i jika :

$$d^2(\bar{s}_0, s_i) \leq d^2(\bar{s}_0, s_k) ; \forall_i \neq k \tag{2.16}$$

Dengan cara yang sama, pengambilan keputusan untuk s_1 jika memenuhi kriteria pada persamaan 2.17 dan 2.18 untuk sinyal PSK .

$$\begin{aligned}
& \left(\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1 \right) |s_i|^2 + d^2(\bar{s}_1, s_i) \\
& \leq \left(\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1 \right) |s_i|^2 + d^2(\bar{s}_1, s_k)
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Dipilih s_i jika :

$$d^2(\bar{s}_1, s_i) \leq d^2(\bar{s}_1, s_k) ; \quad \forall_i \neq k \quad (2.18)$$

Sistem STBC berkembang menjadi *Orthogonal Space Time Block Code* (OSTBC) yang menggunakan lebih dari dua antena pemancar. Skema OSTBC dikenalkan oleh Vahid Tarokh. Karena orthogonal berarti simbol yang dipancarkan dari setiap antena pengirim tidak mempengaruhi satu sama lain. Berikut adalah matrik STBC Tarokh dengan 4 antena pemancar menggunakan code rate $\frac{1}{2}$ [7].

$$G_{4, \frac{1}{2}} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 \\ -s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 \\ -s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 \\ s_1^* & s_2^* & s_3^* & s_4^* \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ -s_3^* & s_4^* & s_1^* & -s_2^* \\ -s_4^* & -s_3^* & s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Kode ini memberikan rate $\frac{1}{2}$ karena 4 simbol (s_1, s_2, s_3, s_4) dikirimkan dalam 8 slot waktu. Pada matrik transmisi G_4 , jumlah kolom mempresentasikan jumlah antena, sedangkan jumlah baris mempresentasikan jumlah slot waktu.

Skema *combiner* dan deteksi ML untuk STBC Tarokh adalah sebagai berikut:

$$\sum_{j=1}^n \left(\left| \left[\sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^m r \alpha_{\epsilon_t(i), j}^* \delta_t(i) \right] - s_j \right|^2 + \left(-1 + \sum_{k,t} |\alpha_{k,t}|^2 \right) |s_j|^2 \right) \quad (2.20)$$

$$s_j = \arg \min_{s \in A} |R_j - s|^2 + \left(-1 + \sum_{k,t} |\alpha_{k,t}|^2 \right) |s|^2 \quad (2.21)$$

dengan,

$$R_i = \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^m r_t \alpha_{\epsilon_t(i),j}^* \delta_t(i) , \quad i=1,2,\dots,n \quad (2.22)$$

2.5.2 Space Time Trellis Code (STTC)

STTC merupakan teknik STC yang diperoleh dengan menggunakan kode trellis dengan kompleksitas yang lebih tinggi daripada STBC.

2.6 Kanal Indoor 60 GHz

2.6.1 Model Saleh-Valenzuela

Model Saleh-Valenzuela (SV) adalah model kanal untuk mengekspresikan *impulse response* yang kompleks antara pengirim dan penerima pada komunikasi *broadband*. Model ini juga mengekspresikan model tap dalam domain waktu kontinyu. Pada area atau lingkungan yang berbeda maka parameter yang digunakan berbeda pula [8]. Berikut ini merupakan persamaan model SV secara umum.

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K_l-1} \alpha_k \delta(t - T_l - \tau_{k,l}) \quad (2.23)$$

dimana

L = jumlah *cluster*

K_l = jumlah komponen *multipath* (jumlah ray) pada cluster ke l

$\alpha_{k,l}$ = koefisien *gain multipath* pada ray ke k di cluster ke l

T_l = waktu kedatangan ray pertama pada cluster ke l

$\tau_{k,l}$ = delay ray ke k pada cluster ke l

Setiap ray merupakan milik sebuah cluster. Cluster dan ray dibangkitkan menggunakan proses distribusi Poisson [2],[11].

$$p(T_l | T_{l-1}) = \lambda \exp[-\lambda(T_l - T_{l-1})] \quad (2.24)$$

$$p(\tau_l | \tau_{l-1}) = \lambda \exp[-\lambda(\tau_l - \tau_{l-1})] \quad (2.25)$$

Λ dan λ adalah parameter yang menunjukkan rasio setiap kedatangan masing-masing cluster dan ray.

Model SV selanjutnya dimodifikasi oleh Spencer untuk menangani angle-of-arrival (AOA) atau sudut kedatangan dengan menggunakan persamaan 2.26.

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K_l-1} \alpha_k \delta(t - T_l - \tau_{k,l}) \delta(f - \Psi_l - \psi_{k,l}) \quad (2.26)$$

dimana Ψ_l adalah sudut kedatangan cluster ke l . $\Psi_{l,m}$ adalah sudut kedatangan ray ke- m pada cluster ke- l . Distribusi sudut diasumsikan menggunakan distribusi Laplace.

$$p(\psi_{l,m}) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_\phi} e^{-\sqrt{2}\psi_{l,m}/\sigma_\phi} \quad (2.27)$$

σ_ϕ adalah *angle spread* ray di dalam cluster.

2.6.2 Model Two-Path

Faktor amplitudo dari respon *two-path*, β diekspresikan dengan persamaan berikut [8]:

$$\beta = \frac{\mu_D}{D} \left| 1 + \Gamma_0 \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda_f} \frac{2h_1 h_2}{D} \right] \right| \quad (2.28)$$

$$D \propto \text{Uniform}(\mu_D - \Delta D, \mu_D + \Delta D)$$

$$h_1 \propto \text{Uniform}(0, \Delta h_1)$$

$$h_2 \propto \text{Uniform}(0, \Delta h_2)$$

$$|\Gamma_0| \cong 1 : \text{Koefisien refleksi (sudut kedatangan } \cong \pi/2)$$

Keterangan:

μ_D = rata-rata distribusi jarak

D = jarak antara antena pengirim dan penerima

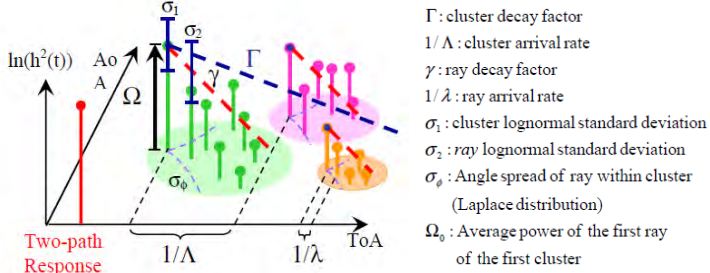
- h_1 = tinggi antenna pengirim
 h_2 = tinggi antenna penerima
 λ_f = panjang gelombang f_c
 Γ_0 = koefisien refleksi permukaan

Nilai β sangat sensitif dengan pergerakan antenna sekecil apapun [2][11]. Pada persamaan 2.21, uniform (*,*) menunjukkan distribusi uniform antara range (*,*) yang menunjukkan nilai maksimum dan minimum model two-path.

2.6.3 Model Triple Saleh Valenzuela

Model Triple Saleh Valenzuela merupakan singkatan dari Shoji, Sawada, Saleh (Triple S), dan Valenzuela model. Triple Saleh Valenzuela atau TSV merupakan perkembangan baru sistem WPAN pada frekuensi 60 GHz [9].

TSV merupakan gabungan dari model two-path dan model SV. *Impulse response* untuk model TSV ditunjukkan pada gambar 2.16 yang diuraikan pada persamaan 2.29 hingga 2.32.



Gambar 2.16 *Impulse Response* model TSV [11]

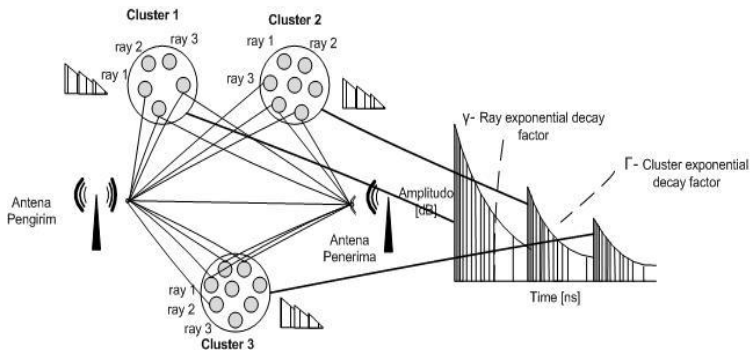
$$h(t) = \beta\delta(t) + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_{l,m} \delta(t - T_l - \tau_{l,m}) \delta(\phi - \Psi_l - \psi_{l,m}) \quad (2.29)$$

$$\beta = \frac{\mu_D}{D} \left| Gt_1 Gr_1 + Gt_2 Gr_2 \Gamma_0 \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda_f} \frac{2h_1 h_2}{D} \right] \right| \quad (2.30)$$

$$|\bar{\alpha}_{l,m}|^2 = \Omega_0 e^{-T_l/\Gamma} e^{-\tau_{l,m}/\gamma - k[1-\delta(m)]} \sqrt{G_r(0, \Psi_l + \psi_{l,m})} \quad (2.31)$$

$$\angle\alpha_{l,m} \propto \text{Uniform}(0, 2\pi] \quad (2.32)$$

Kanal TSV merupakan salah satu kanal yang dipengaruhi oleh cluster dan ray. Cluster dapat dikaitkan dengan sifat diskrit *scatterer* dalam kanal fisik. Setiap *scatterer* akan membentuk jalan yang membawa energi dari sisi pengirim ke sisi penerima. Pada sisi penerima, cluster datang pada waktu yang berbeda dengan sudut yang berbeda pula. Setiap cluster terdiri dari sejumlah komponen *multipath* yang disebut sebagai *ray*. *Cluster* dapat juga dikatakan sebagai sekelompok komponen *multipath* yang memiliki parameter yang hampir sama satu sama lain.



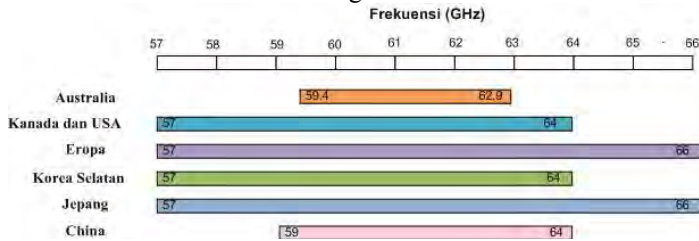
Gambar 2.17 Cluster dan Ray [10]

2.7 Frekuensi 60 GHz

Dalam beberapa tahun terakhir, pengetahuan substansial tentang gelombang millimeter (MMW) 60 GHz telah terakumulasi dan banyak riset yang telah dilakukan dalam mengembangkan sistem komunikasi MMW untuk aplikasi komersial. Pada tahun 2001, Federal Communications Commission (FCC) mengalokasikan 7 GHz dalam rentang 57-64 GHz untuk bebas lisensi (*unlicensed use*). Peluang segera terlihat di wilayah tertentu dari spektrum termasuk generasi selanjutnya yaitu Wireless Personal Area Networks (WPAN) [11].

Di Kanada, pita 57-64 GHz tersedia untuk aplikasi bebas lisensi. Di Amerika, pita 60 GHz (57-64 GHz) digunakan untuk aplikasi broadband wireless. Di Jepang, sistem WPAN menggunakan 60 GHz untuk

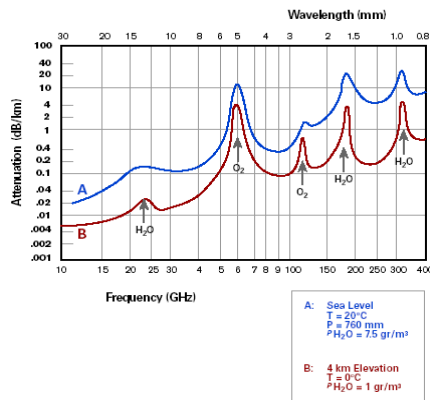
komunikasi jarak pendek dengan layanan high speed multimedia yang terletak di kamar-kamar atau di ruang kantor.



Gambar 2.18 Alokasi frekuensi 60 GHz di beberapa negara

Semakin banyaknya pengguna internet di dunia maka servis yang disediakan juga semakin bertambah, tak terkecuali pada jaringan nirkabel. Saat ini dibutuhkan transfer data dengan kecepatan tinggi pada jaringan nirkabel, sehingga muncullah teknologi nirkabel baru dengan kecepatan tinggi (lihat gambar 2.18) [12].

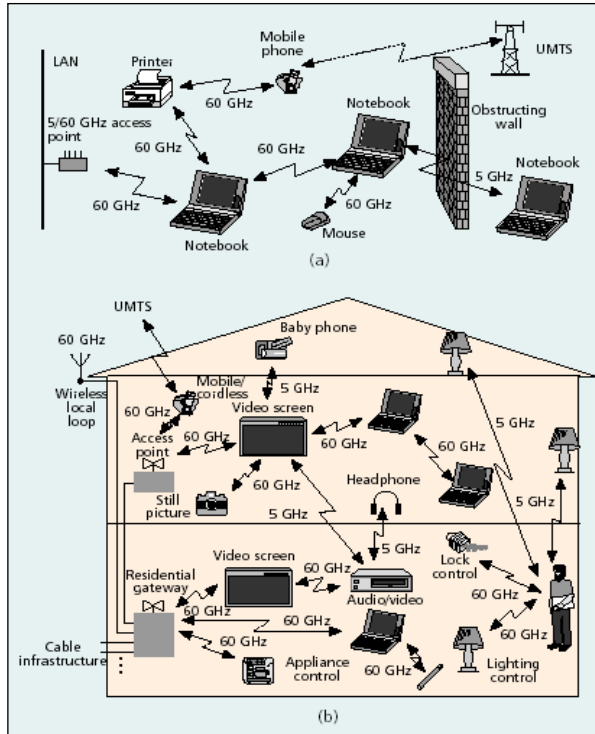
Dibalik itu semua, kita juga perlu mengetahui bahwa *path loss* pada 60 GHz lebih besar daripada *losses* di pita frekuensi lain karena adanya penyerapan oksigen, dimana hal ini dapat merugikan propagasi sinyal.



Gambar 2.19 Attenuasi sinyal pada atmosfer terhadap fungsi frekuensi [12]

Tetapi hal tersebut membuat frekuensi 60 GHz cocok untuk digunakan pada jaringan nirkabel dengan kepadatan tinggi seperti area

metropolitan. Dengan jaringan tersebut dimana terdapat banyak hotspots yang dapat menurunkan attenuasi karakteristik pada sistem 60 GHz [12].



Gambar 2.20 Skenario aplikasi kombinasi frekuensi 5 dan 60 GHz di rumah atau kantor [12]

2.8 Teknik Estimasi BER

Teknik Estimasi BER yang sering digunakan adalah metode simulasi Monte Carlo. Metode simulasi Monte Carlo merupakan metode yang paling sederhana tetapi memerlukan waktu running yang cukup lama. Jika kondisi dikirim dinyatakan sebagai “noI” dan peluang bersyarat bit terkirim salah sebagai ‘noI’, maka dapat dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut:

$$P(\text{error} | 0) = P_0 = \int_{V_T}^- f_0(v) dv \quad (2.33)$$

dimana V_T adalah tegangan threshold pada proses decision dan $f_v(v)$ adalah pdf dari tegangan input pada saat pencuplikan, jika bit yang dikirim adalah nol. Persamaan diatas, dapat ditulis dalam bentuk :

$$P_0 = \int_{-\infty}^{\infty} h_0(v) \cdot f_0(v) \cdot dv \quad (2.34)$$

$$\text{dengan } h_0(v) = \begin{cases} 1, \dots v \geq V_T \\ 0, \dots v < V_T \end{cases} \quad (2.35)$$

dan estimasi nilai P_0 adalah nilai rata-rata sampel:

$$P_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N h_0(v(t_i)) \quad (2.36)$$

dengan t_i adalah waktu spasi simbol saat decision dilakukan dan $h_0(v)$ adalah penjumlahan kesalahan yang terjadi. Sehingga bila dalam sistem terdapat banyak N bit yang diproses dan ada n bit yang error, maka BER dapat dihitung dengan mudah, dengan rata-rata sampel:

$$\text{BER} = \frac{n}{N} \quad (2.37)$$

Pada teknik Monte Carlo, nilai BER yang kita inginkan akan menentukan besarnya jumlah data minimum yang harus kita bangkitkan. Jika jumlah data minimal yang harus dibangkitkan adalah B , maka hubungan tersebut dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$B = \frac{10}{\text{BER}} \quad (2.38)$$

2.9 Kapasitas

Perhitungan kapasitas dipengaruhi oleh kondisi kanal dan jumlah antenna yang digunakan. Semakin tinggi jumlah antenna yang digunakan

maka semakin tinggi pula kapasitas yang tersedia. Kapasitas juga dipengaruhi oleh nilai E_s/N_0 .

Persamaan kapasitas kanal mimo sebagai berikut:

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{E_s}{M_T N_0} \lambda_i \right) \quad (2.39)$$

Keterangan :

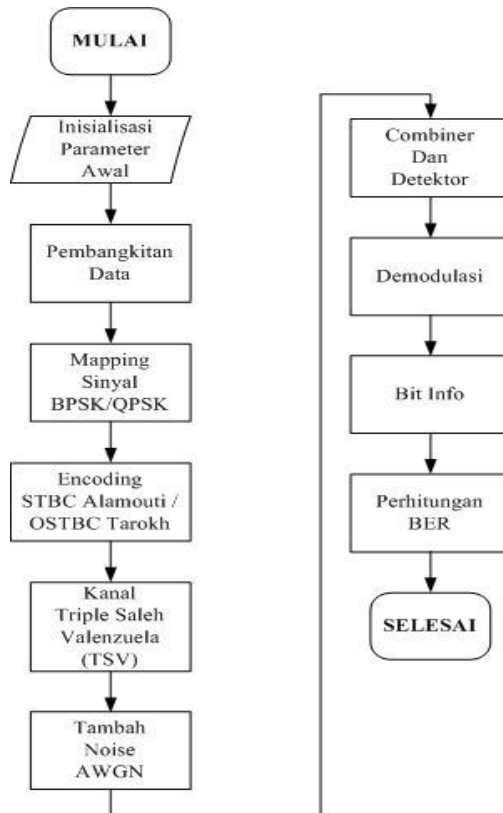
- r merupakan jumlah terkecil dari antenna pemancar/penerima
- E_s/N_0 merupakan nilai *Energy Symbol to Noise Power*
- M_T merupakan jumlah antenna pemancar
- λ merupakan nilai eigen menunjukkan *power gain* kanal yang didapatkan dari operasi *Singular Value Decomposition* (SVD)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODE SIMULASI

3.1 Umum

Pada bab ini akan dibahas model kanal MIMO untuk frekuensi 60 GHz yang akan disimulasikan, yaitu berupa parameter-parameter yang digunakan untuk simulasi dan blok diagram sistem. Serta langkah-langkah dalam melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai BER versus SNR.



Gambar 3.1 Diagram alir pemodelan sistem

Pemodelan dimulai dengan parameter-parameter lingkungan *indoor* yang dipakai dalam simulasi. Pembahasan dilanjutkan dengan penjelasan blok-blok sistem yang akan disimulasikan. Terakhir adalah mensimulasikan model kanal pada *software* Matlab.

3.2 Parameter Lingkungan *Indoor*

Model kanal pada lingkungan dalam gedung yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah lingkungan LOS desktop dengan model kanal TSV. Berikut ini parameter-parameter yang akan digunakan berdasarkan IEEE 802.15.3c [13]:

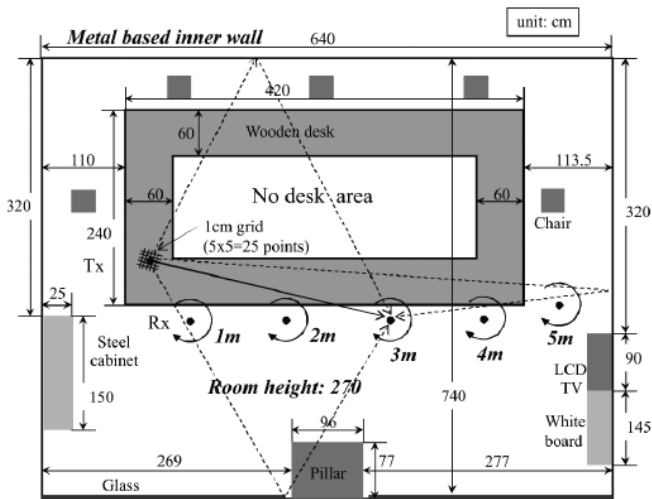
Tabel 3.1 Parameter LOS desktop

Parameter	Keterangan	Nilai
d [m]	Jarak antara Tx dan Rx	3
PL_d [dB]	Komponen LOS pathloss	-77.54
L_{mean}	Jumlah rata-rata kedatangan cluster	3
Λ [1/ns]	Inter-cluster (cluster) arrival rate	0.037
λ [1/ns]	Intra-cluster (Ray) arrival rate	0.641
Γ [ns]	Cluster decay rate	21.1
γ [ns]	Ray decay rate	8.85
$\sigma_{cluster}$	Standard deviasi untuk variabel lognormal pada cluster fading	3.01
σ_{ray}	Standard deviasi untuk variabel lognormal pada ray fading	7.69
σ_ϕ [deg]	Sudut kedatangan cluster (angle spread)	34.6
Δk [dB]	Ray rician factor	11
$\Omega_0(d)$ [dB]	Rata-rata power pada ray pertama di cluster pertama	-92.08
n_d	PL exponent	2
h_1	Ketinggian antenna Tx	Uniform dist Range : 0-0.3

Parameter	Keterangan	Nilai
h_2	Ketinggian antenna Rx	Uniform dist Range : 0-0.3
d	Rata-rata jarak antara Tx dan Rx	Uniform dist Range : $d \pm 0.3$

Kanal TSV mempunyai RMS delay rata-rata sebesar 1.289 ns dengan maksimum RMS delay 0.004 ns dan minimum RMS delay 0.015 ns [14]. Karena delay spread < periode simbol maka kanal yang digunakan adalah flat-fading.

Parameter pada tabel 3.1 didapatkan dari pengukuran pada ruang *meeting* (gambar 3.2) yang disebut sebagai model LOS desktop [13]. Model LOS desktop menggambarkan ruang kantor atau *meeting* dimana terdapat banyak komputer di dalamnya. Jarak antara antenna pengirim dan penerima adalah 3 meter, seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.2 Layout model LOS desktop [15]

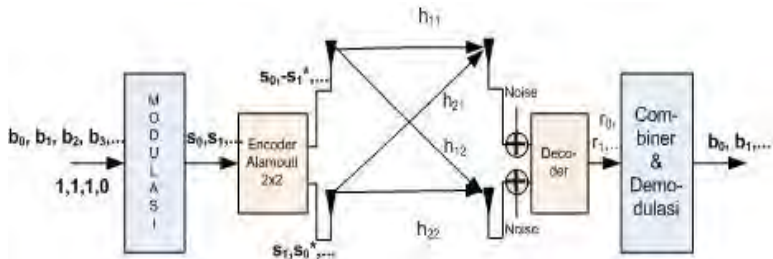
Model LOS desktop merupakan suatu model dimana terdapat lintasan LOS dan NLOS di dalamnya. Lintasan NLOS diibaratkan dengan adanya waktu kedatangan (TOA) dan sudut kedatangan (AOA) yang berbeda-beda pada tiap *ray* atau lintasan.

3.3 Model Sistem

Seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, dua model sistem yang akan disimulasikan secara umum sama, yang membedakan adalah jumlah antenna yang digunakan yaitu 2x2 dan 4x4. Sehingga proses *Encoding* dan *Decoding* yang dilalui berbeda pula, MIMO 2x2 menggunakan sistem Alamouti dan MIMO 4x4 menggunakan sistem Tarokh.

3.3.1 Pemodelan Kanal MIMO 2x2

Dalam simulasi ini, sinyal yang masuk akan dimapping terlebih dahulu menggunakan modulasi BPSK dan QPSK. Kemudian data hasil mapping tersebut di *Encoding* menggunakan Alamouti 2x2. Lalu ditransmisikan melalui kanal TSV dengan adanya tambahan noise AWGN. Setelah diterima dengan antenna penerima sinyal akan didemodulasi dan didemapping. Setelah itu dihitung *bit error rate* (BER) pada data tersebut. Selanjutnya dilakukan perhitungan kapasitas pada MIMO 2x2. Diagram blok dari sistem ini ditunjukkan pada gambar 3.3.

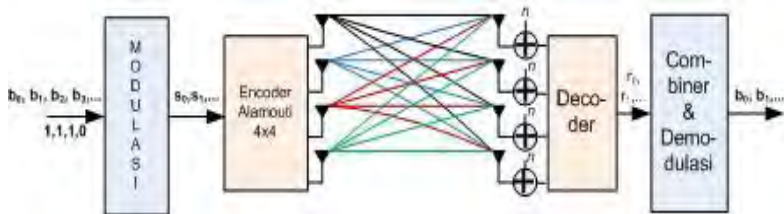


Gambar 3.3 Blok sistem MIMO 2x2

3.3.2 Pemodelan Kanal MIMO 4x4

Dalam simulasi ini, sinyal yang masuk akan dimapping terlebih dahulu menggunakan modulasi BPSK dan QPSK. Kemudian data hasil mapping tersebut di *Encoding* menggunakan Tarokh 4x4. Lalu ditransmisikan melalui kanal TSV dengan adanya tambahan noise AWGN. Setelah diterima dengan antenna penerima sinyal akan didemodulasi dan didemapping. Setelah itu dihitung *bit error rate* (BER) pada data tersebut. Selanjutnya dilakukan perhitungan kapasitas

pada MIMO 4x4. Diagram blok dari sistem ini ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Blok sistem MIMO 4x4

3.4 Pembangkitan Sinyal

Data yang diinputkan berisi bit-bit informasi yang dibangkitkan secara acak dan terdistribusi *uniform* dengan nilai antara 0 dan 1. Dalam simulasi, bit yang akan dibangkitkan berjumlah 10^6 bit. Data input tersebut dibangkitkan dengan menggunakan fungsi “*randi*” pada Matlab.

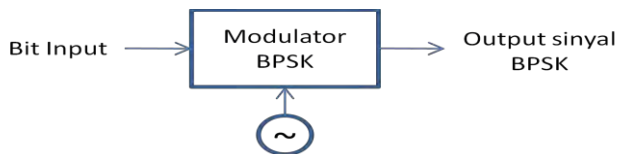
```
X = randi([0,1],1,N);
```

3.5 Modulasi

Data yang dibangkitkan tersebut kemudian masuk ke dalam blok modulasi. Modulasi yang dipakai dalam tugas akhir ini adalah modulasi BPSK dan QPSK.

3.5.1 Proses Modulasi BPSK

Modulasi BPSK merupakan modulasi dimana tiap simbol hanya mewakili satu bit data saja. Setiap bit data yang masuk didistribusikan ke bagian *riil* saja (*Inphase*) karena tidak terdapat komponen pada bagian imajiner (*Quadrature*).



Gambar 3.5 Diagram blok modulasi BPSK

Modulasi BPSK mengubah bit '1' menjadi level '1' dan bit '0' menjadi level '-1'. Perintah yang digunakan untuk modulasi BPSK adalah:

$$X_{\text{mod}} = X * 2 - 1$$

Maka didapatkan:

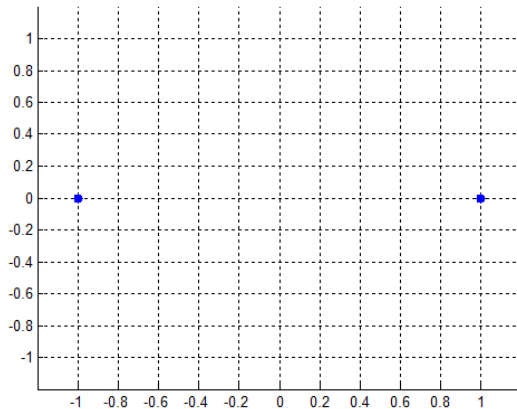
Jika $X = 0$ maka $X_{\text{mod}} = 0 * 2 - 1 = -1$

Jika $X = 1$ maka $X_{\text{mod}} = 1 * 2 - 1 = 1$

Tabel 3.2 Pemetaan bit Inphase dan Quadrature (BPSK)

Bit	Inphase	Quadrature
0	-1	0
1	1	0

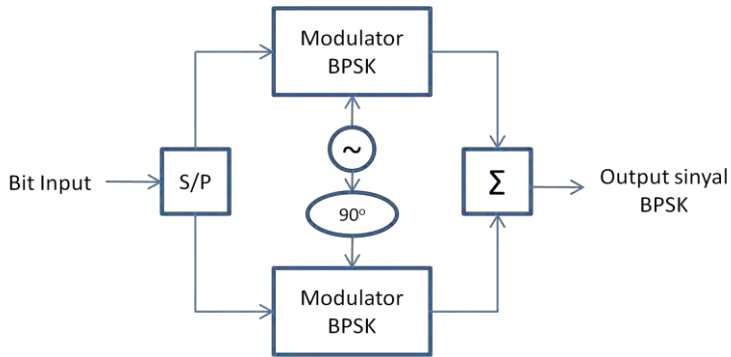
Konstelasi BPSK yang dibangkitkan dari Matlab ditunjukkan pada gambar 3.5



Gambar 3.6 Konstelasi bit BPSK pada Matlab

3.5.2 Proses Modulasi QPSK

Modulasi QPSK merupakan modulasi salah satu modulasi PSK yang mempunyai 4 level sinyal dan mempresentasikan 4 kode binary yaitu '00', '01', '10', dan '11'. Masing-masing level sinyal mempunyai perbedaan fasa sebesar 90°.



Gambar 3.7 Diagram blok modulasi QPSK

Modulasi jenis ini lebih sering digunakan pada transmisi digital dibandingkan dengan jenis modulasi lainnya karena memiliki kelebihan-kelebihan performansi interferensinya lebih baik, jumlah level kode yang dikodekan lebih banyak dan bandwidth yang digunakan lebih kecil.

Tabel 3.3 Pemetaan bit QPSK

Bit Value	Phase Shift
00	45°
01	135°
10	315°
11	225°

Langkah awal dalam modulasi QPSK yaitu bit informasi yang telah dibangkitkan, dibagi menjadi dua baris, baris pertama merupakan nilai riil (*Inphase*) dan baris kedua nilai imajiner (*Quadrature*). Langkah tersebut menggunakan perintah:

```
X_in = reshape(X, 2, N/2)
```

Pada baris pertama dan kedua, data biner yang bernilai '0' dan '1' mengalami modulasi BPSK yaitu mengubah bit '0' menjadi '-1' dan bit '1' menjadi '1'. Karena baris kedua (*Quadrature*) bernilai imajiner maka bit informasi dikalikan dengan j menggunakan perintah:

$$I = 2 * X_in(1, :) - 1$$

$$Q = (2 * X_in(2, :) - 1) * j$$

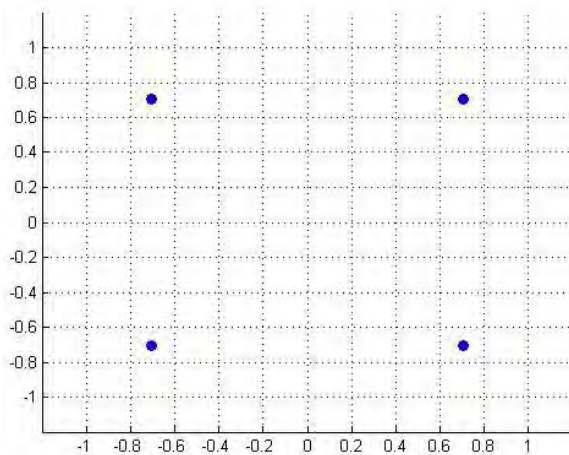
Tabel 3.4 Pemetaan bit Inphase dan Quadrature (QPSK)

Bit	Inphase	Quadrature
00	-1	-j
01	-1	j
10	1	-j
11	1	j

Setelah itu dilakukan penjumlahan nilai riil (*Inphase*) dan nilai imajiner (*Quadrature*) untuk mendapatkan sinyal yang telah dimodulasi QPSK. Hasil penjumlahan tersebut menghasilkan simbol s_1 , s_2 , dan seterusnya yang akan diteruskan ke proses *encoding*.

$$X_mod = 1/\sqrt{2} * (I+Q)$$

Konstelasi QPSK yang dibangkitkan dari Matlab ditunjukkan pada gambar 3.5 dengan perbedaan fasa tiap node sebesar 90° dengan nilai tiap node $(\frac{1}{\sqrt{2}} + j\frac{1}{\sqrt{2}})$, $(\frac{1}{\sqrt{2}} - j\frac{1}{\sqrt{2}})$, $(-\frac{1}{\sqrt{2}} + j\frac{1}{\sqrt{2}})$, $(-\frac{1}{\sqrt{2}} - j\frac{1}{\sqrt{2}})$.



Gambar 3.8 Konstelasi bit QPSK pada Matlab

3.6 Encoder

Encoder sistem MIMO yang digunakan adalah STBC Alamouti 2x2 dan STBC Tarokh 4x4 dengan code rate $\frac{1}{2}$.

3.6.1 STBC Alamouti 2x2

Encoder STBC Alamouti dapat digambarkan dengan matriks STBC Alamouti. Berikut adalah matriks STBC Alamouti 2x2 [6]:

$$\begin{bmatrix} s_0 & s_1 \\ -s_1^* & s_0^* \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Pada slot waktu pertama, antenna 1 akan mentransmisikan simbol s_0 dan antenna 2 mentransmisikan simbol s_1 . Setelah itu pada slot waktu kedua, antenna 1 mengirimkan simbol $-s_1^*$ dan antenna 2 mentransmisikan simbol s_0^* .

3.6.2 STBC Tarokh 4x4 Code Rate $\frac{1}{2}$

Matriks STBC Tarokh 4x4 dengan code rate $\frac{1}{2}$ sebagai berikut [7]:

$$G_{4, \frac{1}{2}} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 \\ -s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 \\ -s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 \\ s_1^* & s_2^* & s_3^* & s_4^* \\ s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ s_1^* & s_2^* & s_3^* & s_4^* \\ -s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 \\ s_2^* & s_1^* & s_4^* & s_3^* \\ -s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 \\ s_3^* & s_4^* & s_1^* & s_2^* \\ -s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 \\ s_4^* & s_3^* & s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Pada encoder ini, setiap 4 simbol akan dikirimkan dalam 8 slot waktu. Pada matrik transmisi G_4 , jumlah kolom mempresentasikan jumlah antenna, sedangkan jumlah baris mempresentasikan jumlah slot waktu.

Pada slot waktu pertama, antenna pemancar 1 mengirimkan sinyal berupa simbol s_1 , antenna 2 mengirimkan simbol s_2 , antenna pemancar 3 mengirimkan simbol s_3 , dan antenna 4 mengirimkan simbol s_4 . Begitu

seterusnya proses pengiriman sinyal sesuai dengan matriks transmisi hingga slot waktu ke-8.

3.7 Kanal Transmisi

Kanal yang digunakan pada MIMO 60 GHz pada tugas akhir ini adalah model *Triple Saleh Valenzuela* (TSV). Model kanal ini merupakan gabungan model *two-path* yang diindikasikan untuk lintasan LOS dan model *saleh-valenzuela* yang diindikasikan untuk lintasan NLOS. Pada tugas akhir ini, tipe ruangan *indoor* yang dipakai adalah LOS desktop.

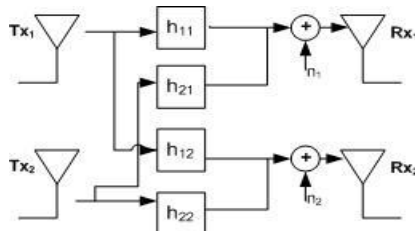
Pembangkitan kanal model ini berkaitan dengan *cluster* dan *ray* berdasarkan waktu dan sudut kedatangannya. Rumus respon *impulse* yang digunakan adalah persamaan 3.3, yaitu:

$$h(t) = \beta\delta(t) + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_{l,m} \delta(t - T_l - \tau_{l,m}) \delta(\varphi - \Psi_l - \psi_{l,m}) \quad (3.3)$$

Dalam pemodelan kanal MIMO, diasumsikan bahwa setiap *link* pada tiap antenna pengirim dan penerima memiliki kanal respon yang dinotasikan dengan matriks H. Tabel kanal MIMO ditunjukkan pada tabel 3.5 untuk MIMO 2x2 dan tabel 3.6 untuk MIMO 4x4. Gambar model kanal MIMO ditunjukkan pada gambar 3.9 dan 3.10.

Tabel 3.5 Kanal MIMO 2x2

	Tx 0	Tx 1
Rx 0	h_{00}	h_{10}
Rx 1	h_{01}	h_{11}

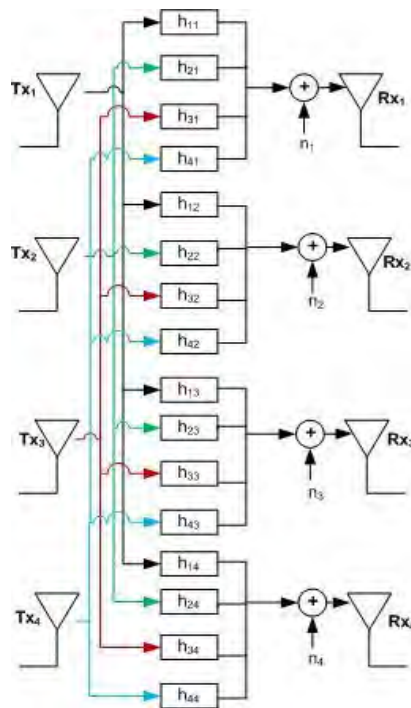


Gambar 3.9 Model kanal 2x2

Berdasarkan gambar di atas, setiap antenna pengirim mengirimkan sinyal menuju kedua antenna penerima melalui dua kanal yang berbeda. Sinyal pada Tx_1 menuju antenna penerima Rx_1 melalui kanal h_{11} dan menuju antenna penerima Rx_2 melalui kanal h_{12} . Sinyal pada Tx_2 menuju antenna penerima Rx_1 melalui kanal h_{21} dan menuju antenna penerima Rx_2 melalui kanal h_{22} .

Tabel 3.6 Kanal MIMO 4x4

	Tx 0	Tx 1	Tx 2	Tx 3
Rx 0	h_{00}	h_{10}	h_{20}	h_{30}
Rx 1	h_{01}	h_{11}	h_{21}	h_{31}
Rx 2	h_{02}	h_{12}	h_{22}	h_{32}
Rx 3	h_{03}	h_{13}	h_{23}	h_{33}



Gambar 3.10 Model kanal 4x4

Berdasarkan gambar di atas, setiap antenna pengirim mengirimkan sinyal menuju keempat antenna penerima melalui empat kanal yang berbeda. Sinyal pada Tx₁ menuju antenna penerima Rx₁ melalui kanal h₁₁, menuju antenna penerima Rx₂ melalui kanal h₁₂, menuju antenna penerima Rx₃ melalui kanal h₁₃, dan menuju antenna penerima Rx₄ melalui kanal h₁₄. Proses tersebut juga dilakukan pada antenna pengirim Tx₂, Tx₃, dan Tx₄ melalui berbagai kanal yang berbeda.

Perbedaan model LOS desktop dibandingkan model lainnya adalah adanya pengaruh gain antenna pada proses pembangkitan kanal. Berdasarkan IEEE 802.15.3c, terdapat dua macam model antenna yang digunakan, yaitu *reference antenna model* dan *gaussian-distributed antenna model*. Model antenna yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *reference antenna model* [13].

Antena referensi yang digunakan memiliki pola simetris pada bidang E dan H. Sehingga gain antenna untuk antenna referensi dapat dinyatakan sebagai,

$$G(\theta, \varphi)[dB] = G_0 - 3.01 \times \left(\frac{2\theta}{\theta_{-3dB}} \right)^2 \quad 0 \leq \theta \leq \theta_{ml}/2 \quad (3.4)$$

$$G(\theta, \varphi)[dB] = -0.4111 \times \ln(\theta_{-3dB}) - 10.597 \quad \theta_{ml}/2 \leq \theta \leq 180^\circ \quad (3.5)$$

dimana

$$\theta_{ml} = 2,6 \times \theta_{-3dB} \quad (3.6)$$

dan

$$G_0 = 10 \log \left(\left(\frac{1.6162}{\sin(\theta_{-3dB}/2)} \right)^2 \right) \quad (3.7)$$

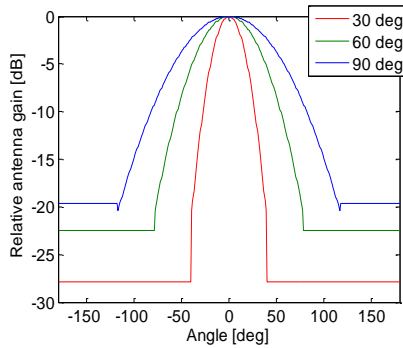
Skalar θ , θ_{-3dB} dan θ_{ml} adalah sudut *beam*, *half-power beamwidth*, dan *main-lobe beamwidth*. Model tersebut berlaku untuk HPBW antenna kurang dari 80°.

```
g = zeros(size(fai));
for ii=1:length(fai)
    theta_ml=2.6*hpbw;
    G0=10*log10((1.6162./sin(hpbw*pi/180/2))^2);
```

```

if abs(fai(ii)) <= theta_ml/2
    G = G0 - 3.01 * (2*abs(fai(ii))./hpbw).^2;
else
    G = -0.4111.*log(hpbw)-10.597;
end
g0=G-G0;
g(ii) = 10.^(g0/20);
end

```



Gambar 3.11 Reference antenna model [16]

3.8 Decoding

Setelah melewati kanal dan ditambah dengan noise, selanjutnya dilakukan proses decoding di sisi penerima. Diperlukan combiner pada penerima untuk mengeliminasi komponen sinyal yang tidak dibutuhkan. Combining yang digunakan adalah *Maximum Ratio Combining* (MRC). MRC dilakukan dengan mengalikan sinyal yang diterima (r) dengan *conjugate* kanal (h). Hasil perkalian tersebut selanjutnya dilakukan *hard-decision*.

3.8.1 Decoding STBC Alamouti 2x2

Decoding s_0 dan s_1 untuk STBC Alamouti 2x2 [6]:

1. Decoding s_1

$$\sum_{j=1}^m (r_j^{(1)} h_{j,1}^* + (r_j^{(2)})^* h_{j,2}) \quad (3.8)$$

2. Decoding s_2

$$\sum_{j=1}^m (r_j^{(1)} h_{j,2}^* - (r_j^{(2)})^* h_{j,1}) \quad (3.9)$$

3.8.2 Decoding STBC Tarokh 4x4

Decoding tiap simbol untuk STBC Tarokh 4x4 berupa matriks s_1 , s_2 , s_3 , dan s_4 . Untuk memperoleh nilai decoding tersebut digunakan persamaan 3.10 hingga 3.13 dengan nilai m adalah jumlah antena sehingga $m = 4$ [7]. Persamaan di bawah ini merupakan penjabaran proses *combining* dari persamaan 2.20 dan 2.21.

1. Decoding s_1

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m (r_j^{(1)} h_{j,1}^* + r_j^{(2)} h_{j,2}^* + r_j^{(3)} h_{j,3}^* + r_j^{(4)} h_{j,4}^* + (r_j^{(5)})^* h_{j,1} + (r_j^{(6)})^* h_{j,2} \\ + (r_j^{(7)})^* h_{j,3} + (r_j^{(8)})^* h_{j,4}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

2. Decoding s_2

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m (r_j^{(1)} h_{j,2}^* - r_j^{(2)} h_{j,1}^* + r_j^{(3)} h_{j,4}^* + r_j^{(4)} h_{j,3}^* + (r_j^{(5)})^* h_{j,2} - (r_j^{(6)})^* h_{j,1} \\ + (r_j^{(7)})^* h_{j,4} + (r_j^{(8)})^* h_{j,3}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

3. Decoding s_3

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m (r_j^{(1)} h_{j,3}^* - r_j^{(2)} h_{j,4}^* + r_j^{(3)} h_{j,1}^* + r_j^{(4)} h_{j,2}^* + (r_j^{(5)})^* h_{j,3} + (r_j^{(6)})^* h_{j,4} \\ + (r_j^{(7)})^* h_{j,1} + (r_j^{(8)})^* h_{j,2}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

4. Decoding s_4

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m (r_j^{(1)} h_{j,4}^* - r_j^{(2)} h_{j,3}^* + r_j^{(3)} h_{j,2}^* + r_j^{(4)} h_{j,1}^* - (r_j^{(5)})^* h_{j,4} - (r_j^{(6)})^* h_{j,3} \\ + (r_j^{(7)})^* h_{j,2} + (r_j^{(8)})^* h_{j,1}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.9 Demodulasi

Demodulasi berfungsi untuk mendapatkan kembali sinyal hasil modulasi. Proses demodulasi tergantung pada modulasi yang digunakan yaitu BPSK atau QPSK.

Pada modulasi BPSK, terdapat dua simbol berbeda yang mewakili bit '0' dan bit '1'. Proses pemetaan kembali simbol ke dalam bit-bit informasi dilakukan dengan mengkonversikan level '-1' menjadi bit '0' dan level '1' menjadi bit '1'.

Pada modulasi QPSK, terdapat empat simbol berbeda yang mewakili bit '00', '01', '10', dan '11'. Proses demodulasi yang dilakukan pertama yaitu dengan memisahkan bagian riil dan imajiner pada sinyal estimasi, setelah itu mengkonversikan sinyal yang lebih dari 0 menjadi bit '1' sedangkan yang kurang dari 0 adalah bit '0'.

3.10 Kalkulasi BER

Kalkulasi BER dilakukan dengan membandingkan data yang dikirim dengan data yang diterima. Jumlah bit *error* dibagi dengan total bit yang dikirim. Dari hasil simulasi, dibandingkan grafik BER terhadap Eb/No.

Jika data yang dikirimkan berjumlah 10^6 , maka BER yang harus dicapai sebesar;

$$BER = \frac{10}{N} \quad (3.14)$$

$$BER = \frac{10}{10^6}$$

$$BER = 10^{-5}$$

Maka untuk data sebanyak 10^6 , BER yang harus dicapai sebesar 10^{-5} . Oleh karena hal tersebut, maka perbandingan hasil simulasi untuk MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 dilakukan ketika bilai BER 10^{-5} .

3.11 Kapasitas

Pada tugas akhir ini akan dilakukan perbandingan kapasitas MIMO pada kanal TSV dengan menggunakan antena 2x2 dan 4x4. Besar kapasitas dapat dipengaruhi oleh kondisi kanal yang dilalui. Semakin banyak jumlah antena yang digunakan, maka semakin banyak pula

kapasitas yang tersedia dengan menerapkan operasi dekomposisi nilai singular (*singular value decomposition* atau SVD) pada matriks respon kanal. Rumus kapasitas yang digunakan yaitu:

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{E_s}{M_T N_0} \lambda_i \right) \quad (3.15)$$

Listing pada matlab untuk menghitung kapasitas adalah seperti berikut:

```
[S V D] = svd(H*H');

C_MIMO2 = 0;
for k=1:N
    lamda(k) = V(k,k);
    C_MIMO2 = C_MIMO2 + log2(1+SNR*lamda(k)/Nt);
end
```

Sedangkan hubungan antara laju data dengan kapasitas adalah sebagai berikut:

data rates (bps) = kapasitas × Bandwidth

data rates ~ kapasitas, bandwidth

bandwidth ~ frekuensi carrier

Laju data berbanding lurus dengan besar kapasitas dan lebar bandwidth sehingga semakin besar kapasitas dan lebar bandwidth yang tersedia maka semakin besar pula laju data-nya (*data rates*). Lebar bandwidth dipengaruhi oleh frekuensi carrier, semakin tinggi nilai frekuensi carrier maka semakin tinggi pula bandwidth yang tersedia.

3.12 Analisis Data dan Hasil Simulasi

Kinerja suatu sistem komunikasi digital dipengaruhi oleh besarnya nilai BER. Oleh karena itu untuk mengetahui kinerja suatu sistem maka diperlukan perhitungan BER yang diperoleh dari hasil simulasi. Metode perhitungan BER yang digunakan adalah metode *Monte Carlo* yaitu dengan membandingkan bit yang dikirim dengan bit yang diterima. Selanjutnya dilakukan perhitungan kapasitas yang dipengaruhi oleh nilai E_b/N_0 dan nilai eigen dari kanal.

BAB IV

ANALISIS HASIL SIMULASI

Pada bab ini dilakukan analisis dari hasil simulasi sistem MIMO 2x2 dan 4x4 IEEE 802.15.3c pada lingkungan dalam gedung. Parameter kanal yang digunakan telah dijelaskan pada Tabel 3.1. Encoding yang digunakan adalah Alamouti STBC untuk MIMO 2x2 dan Tarokh STBC code rate $\frac{1}{2}$ untuk MIMO 4x4.

Kanal yang digunakan adalah Triple Saleh Valenzuela (TSV). Performansi sistem dianalisis dengan menggunakan modulasi dan detektor yang berbeda. Kapasitas dianalisis menggunakan sistem *Shannon Capacity* pada MIMO 2x2 dan 4x4.

4.1 Implementasi Sistem

Pada simulasi sistem MIMO 2x2 dan 4x4 pada kanal TSV, deretan informasi yang dikirimkan melalui dua proses yaitu modulasi dan spreading. Data parameter dari simulasi dalam tugas akhir ini:

1. Jumlah antena pemancar
2. Jumlah antena penerima
3. Data yang ditransmisikan
4. Modulasi yang digunakan
5. Kanal yang digunakan
6. Rate yang digunakan (untuk STBC Tarokh)

Dari simulasi yang dibuat akan dihasilkan grafik sinyal serta nilai *Bit Error Rate* (BER) terhadap nilai E_b/N_0 (dB) dari sistem MIMO 2x2 Kanal TSV 2x2 STBC-Alamouti dan 4x4 STBC-Tarokh dengan modulasi BPSK dan QPSK. BER merupakan suatu parameter dalam sistem komunikasi digital yang akan dianalisis untuk mengetahui performansi kinerja suatu sistem. Metode perhitungan BER yang digunakan adalah metode *Monte Carlo*, selain itu analisis BER dilakukan untuk mengetahui efektivitas dari antena penerima yang dipakai sistem MIMO 2x2 Kanal TSV STBC-Alamouti dan MIMO 4x4 STBC-Tarokh.

Kinerja sistem yang disimulasikan dilakukan melalui beberapa tahap dalam implementasinya untuk mendapatkan nilai probabilitas kesalahan bit sebagai fungsi nilai terhadap SNR dengan menggunakan Matlab.

Pada tahap awal dilakukan proses *encoding* sinyal. *Encoder* dilakukan sebelum sinyal informasi dipancarkan melalui transmitter.

Tahap-tahap yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Modulasi dengan M-PSK

Dalam simulasi untuk tugas akhir ini menggunakan modulasi BPSK dan QPSK. Modulasi BPSK menggunakan 1 bit per simbol yaitu 1 dan -1. Modulasi QPSK menggunakan 2 bit per simbol yaitu $(\frac{1}{\sqrt{2}} + j\frac{1}{\sqrt{2}})$, $(\frac{1}{\sqrt{2}} - j\frac{1}{\sqrt{2}})$, $(-\frac{1}{\sqrt{2}} + j\frac{1}{\sqrt{2}})$, $(-\frac{1}{\sqrt{2}} - j\frac{1}{\sqrt{2}})$.

2. *Encoding*

Simulasi dalam tugas akhir ini menggunakan sistem STBC-Alamouti untuk MIMO 2x2 dan sistem STBC-Tarokh untuk MIMO 4x4 dengan menggunakan code rate $\frac{1}{2}$. Pengkodean melalui *encoder* kode menghasilkan *codeword* sinyal informasi akan mengandung informasi tambahan.

3. Kanal Triple Saleh Valenzuela

Proses pentransmisiian sinyal informasi melalui sistem *transmitter* sinyal informasi yang dipancarkan akan dipengaruhi oleh *noise* AWGN dan fading yang dihasilkan oleh lingkungan *indoor*.

4. *Decoding*

Penggabungan sinyal yang diterima (r) dengan kanal transmisi (h) dalam proses *combining* yang bertujuan untuk mendapatkan sinyal yang utuh.

5. Perhitungan BER

Perhitungan BER dilakukan dengan membandingkan antara deretan bit yang dikirimkan dengan deretan bit yang dideteksi pada penerima. Kemudian total jumlah bit yang salah dibagi dengan jumlah bit yang dibangkitkan. Nilai BER sangat dipengaruhi oleh kondisi kanal.

6. Kapasitas

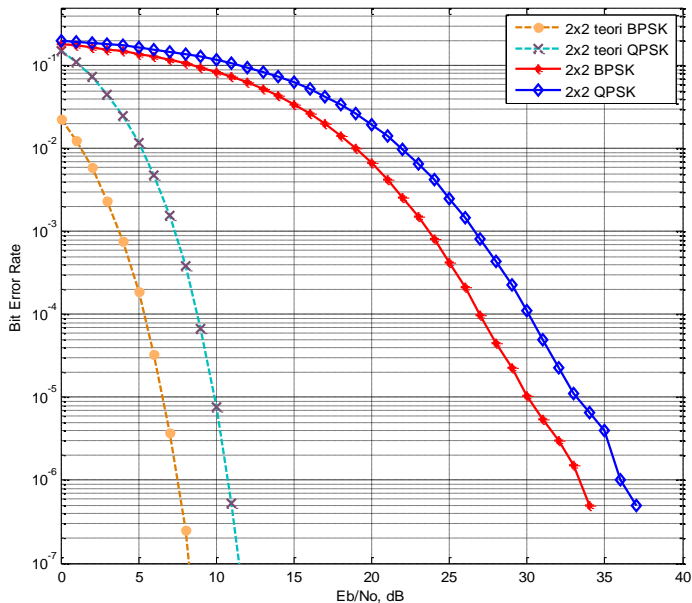
Parameter ini menyatakan banyaknya bit yang dapat dikirimkan melalui setiap satuan *bandwidth* dalam satu satuan waktu. Semakin besar kapasitas sistem atau semakin tinggi nilai efisiensi *bandwidth* yang dimiliki sistem, maka dapat dikatakan bahwa sistem tersebut lebih baik. Besarnya kapasitas juga dipengaruhi oleh kondisi kanal yang dilewati.

4.2 Kinerja MIMO Kanal TSV

Kinerja MIMO dianalisis dengan membangkitkan bit data sebanyak 10^6 bit. Dari hasil simulasi sistem komunikasi MIMO dengan kanal TSV dapat diuraikan pada subbab-subbab di bawah ini.

4.2.1 Analisis Perbandingan Kinerja Sistem MIMO Kanal TSV terhadap Kurva Teori BPSK dan QPSK

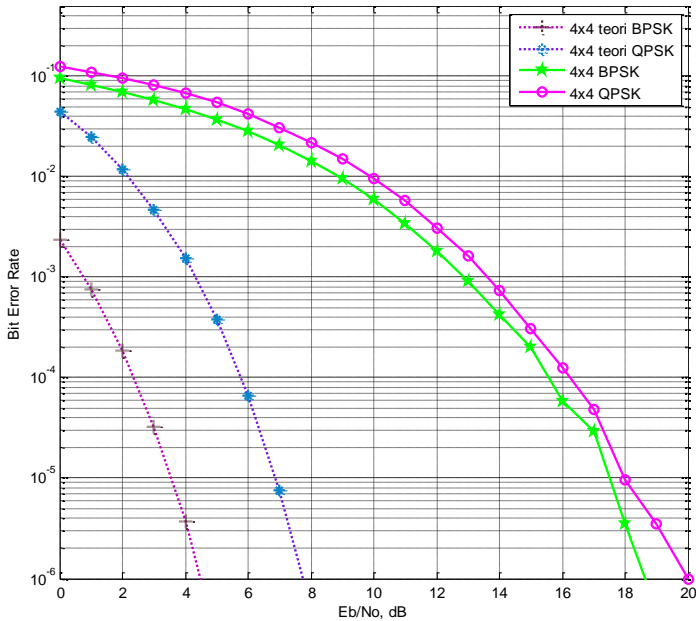
Simulasi ini menunjukkan perbandingan kurva teori BPSK dan QPSK dengan kanal TSV. Kurva teori BPSK dan QPSK disimulasikan berdasarkan persamaan probabilitas BER pada modulasi BPSK dan QPSK. Gambar 4.1 dan 4.2 merupakan grafik yang menggambarkan perbandingan kurva teori dan kanal TSV terhadap nilai E_b/N_0 .



Gambar 4.1 Grafik perbandingan BER 2x2 antara kurva teori dengan kanal TSV

Pada saat pentransmisian sinyal dari antenna pemancar ke antenna penerima sinyal yang melewati kanal TSV akan mengalami redaman oleh *fading* dan *noise*, sehingga sinyal informasi yang diterima tidak

sebaik yang dikirim. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar di atas, dimana BER 2x2 kanal kurva teori modulasi BPSK bernilai 10^{-5} ketika nilai Eb/No 7 dB, sedangkan pada kanal TSV dengan BER yang sama terjadi saat nilai Eb/No 24 dB. BER 2x2 kurva teori modulasi QPSK bernilai 10^{-5} ketika nilai Eb/No 10 dB, sedangkan pada kanal TSV dengan BER yang sama terjadi saat nilai Eb/No 27 dB.



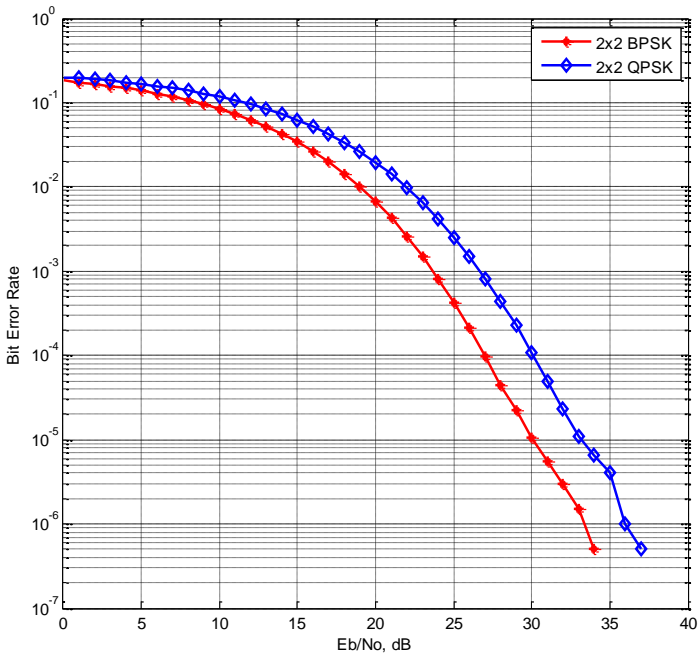
Gambar 4.2 Grafik perbandingan BER 4x4 antara kurva teori dengan kanal TSV

Pada saat pentransmisian sinyal dari antenna pemancar ke antenna penerima sinyal yang melewati kanal TSV akan mengalami redaman oleh *fading* dan *noise*, sehingga sinyal informasi yang diterima tidak sebaik sinyal yang dikirim. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar di atas, dimana BER 4x4 kurva teori modulasi BPSK bernilai 10^{-5} ketika nilai Eb/No 3.5 dB, sedangkan pada kanal TSV dengan BER yang sama terjadi saat nilai Eb/No 17.5 dB. BER 4x4 kurva teori modulasi QPSK bernilai 10^{-5} ketika nilai Eb/No sekitar 7 dB, sedangkan pada kanal TSV dengan BER yang sama terjadi saat nilai Eb/No 18 dB.

4.2.2 Analisis Antena MIMO 2x2

Simulasi yang ketiga adalah pemodelan sistem MIMO 2x2 STBC Alamouti yang menggunakan modulasi yang berbeda. Simulasi model ini bertujuan untuk mengetahui kinerja antenna MIMO 2x2 modulasi BPSK dan QPSK. Proses *combining* yang digunakan pada simulasi ini adalah *Maximum Ratio Combining* (MRC) yang dilanjutkan dengan *hard-decision*.

Untuk mengetahui kinerja MIMO 2x2 pada kanal TSV dengan modulasi BPSK dan QPSK, dilakukan simulasi dengan membandingkan nilai *bit error rate* (BER) terhadap E_b/N_0 yang bernilai 0 dB hingga 40 dB. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 BER MIMO 2x2 kanal TSV

Tabel 4.1 menunjukkan perbandingan nilai BER pada MIMO 2x2 modulasi BPSK dan QPSK yang didapatkan dari hasil simulasi pada gambar 4.3 pada nilai BER 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , dan 10^{-6} .

Tabel 4.1 BER MIMO 2x2 kanal TSV

Konfigurasi Antena	BER			
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
2x2 BPSK	24 dB	27 dB	30 dB	34 dB
2x2 QPSK	27 dB	30 dB	33 dB	36 dB

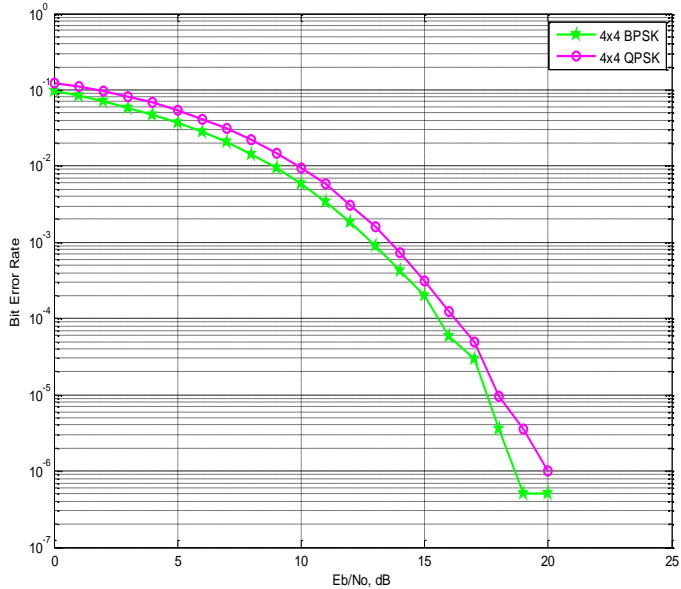
Nilai *Bit Error Rate* (BER) didapatkan dari kinerja MIMO 2x2 modulasi BPSK dan QPSK dengan nilai BER 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , dan 10^{-6} . Ketika BER 10^{-3} MIMO 2x2 BPSK memiliki nilai Eb/No 24 dB, sedangkan MIMO 2x2 QPSK memiliki nilai Eb/No 27 dB. Ketika BER 10^{-4} MIMO 2x2 BPSK memiliki nilai Eb/No 27 dB, sedangkan MIMO 2x2 QPSK memiliki nilai Eb/No 30 dB. Ketika BER 10^{-5} MIMO 2x2 BPSK memiliki nilai Eb/No 30 dB, sedangkan MIMO 2x2 QPSK memiliki nilai Eb/No 33 dB. Ketika BER 10^{-6} MIMO 2x2 BPSK memiliki nilai Eb/No 34 dB, sedangkan MIMO 2x2 QPSK memiliki nilai Eb/No 36 dB.

Dari hasil simulasi yang diperoleh menunjukkan bahwa MIMO 2x2 BPSK memiliki kinerja yang lebih baik dari MIMO 2x2 QPSK. Hal ini terjadi karena pada modulasi QPSK, satu simbol terdiri dari 2 bit sehingga rentan terjadi error pada proses encoding. Selain itu QPSK yang terdiri dari 2 bit dalam 1 simbol menyebabkan QPSK mengkonsumsi daya yang lebih besar daripada modulasi BPSK. Sedangkan pada BPSK, 1 simbol mewakili 1 bit sehingga probabilitas kesalahannya pun lebih rendah.

4.2.3 Analisis Antena MIMO 4x4

Simulasi yang keempat adalah pemodelan sistem MIMO 4x4 STBC Tarokh yang menggunakan modulasi berbeda. Metode pengkodean STBC Tarokh dipilih karena pengkodean STBC Alamouti hanya dapat digunakan untuk jumlah antena transmit maksimal dua antena. Simulasi model ini bertujuan untuk mengetahui kinerja MIMO 4x4 modulasi BPSK dan QPSK. MIMO 4x4 dipilih karena berdasarkan teori, semakin banyak jumlah antena maka nilai BER yang dihasilkan akan semakin baik.

Untuk mengetahui kinerja MIMO 4x4 pada kanal TSV dengan modulasi BPSK dan QPSK, dilakukan simulasi dengan Eb/No bernilai 0 dB hingga 40 dB. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 BER MIMO 4x4 kanal TSV

Tabel 4.2 menunjukkan perbandingan nilai BER pada MIMO 4x4 modulasi BPSK dan QPSK.

Tabel 4.2 BER MIMO 4x4 kanal TSV

Konfigurasi Antena	BER			
	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
4x4 BPSK	13 dB	16 dB	17.5 dB	18.5dB
4x4 QPSK	13.5 dB	16.5 dB	18 dB	20 dB

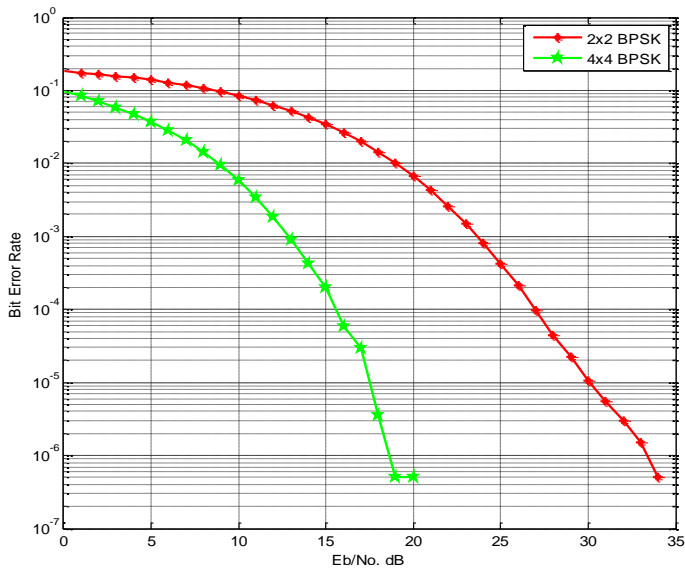
Nilai *Bit Error Rate* (BER) didapatkan dari kinerja MIMO 4x4 modulasi BPSK dan QPSK dengan nilai BER 10⁻³, 10⁻⁴, 10⁻⁵, dan 10⁻⁶. Ketika BER 10⁻³ MIMO 4x4 BPSK memiliki nilai Eb/No 13 dB, sedangkan MIMO 4x4 QPSK memiliki nilai Eb/No 13.5 dB. Ketika BER 10⁻⁴ MIMO 4x4 BPSK memiliki nilai Eb/No 16 dB, sedangkan MIMO 4x4 QPSK memiliki nilai Eb/No 16.5 dB. Ketika BER 10⁻⁵

MIMO 4x4 BPSK memiliki nilai E_b/N_0 17.5 dB, sedangkan MIMO 4x4 QPSK memiliki nilai E_b/N_0 18 dB. Ketika BER 10^{-6} MIMO 4x4 BPSK memiliki nilai E_b/N_0 18.5 dB, sedangkan MIMO 4x4 QPSK memiliki nilai E_b/N_0 20 dB.

Dari hasil simulasi yang diperoleh menunjukkan bahwa MIMO 4x4 BPSK memiliki kinerja yang lebih baik dari MIMO 4x4 QPSK. Hal ini terjadi karena pada modulasi QPSK, satu simbol terdiri dari 2 bit sehingga rentan terjadi error pada proses encoding. Selain itu QPSK yang terdiri dari 2 bit dalam 1 simbol menyebabkan QPSK mengkonsumsi daya yang lebih besar daripada modulasi BPSK. Sedangkan pada BPSK, 1 simbol mewakili 1 bit sehingga probabilitas kesalahannya pun lebih rendah.

4.2.4 Analisis Perbandingan Grafik Antena MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 Menggunakan Modulasi BPSK

Simulasi kinerja yang selanjutnya menunjukkan perbandingan MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 dengan menggunakan modulasi BPSK. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Perbandingan BER MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 modulasi BPSK kanal TSV

Tabel 4.3 Perbandingan BER MIMO 2x2 dan 4x4 modulasi BPSK

Konfigurasi Antena	BER			
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
2x2 BPSK	24 dB	27 dB	30 dB	34 dB
4x4 BPSK	13 dB	16 dB	17.5 dB	18.5 dB

Gambar dan tabel di atas menunjukkan bahwa MIMO 4x4 memiliki kinerja yang lebih baik dari MIMO 2x2. Selisih SNR pada BER 10^{-3} adalah 11 dB, pada BER 10^{-4} adalah 11 dB, pada BER 10^{-5} adalah 12.5 dB, dan pada BER 10^{-6} adalah 18.5 dB. Dapat disimpulkan bahwa, semakin bertambah jumlah antena maka semakin baik pula BER yang dihasilkan.

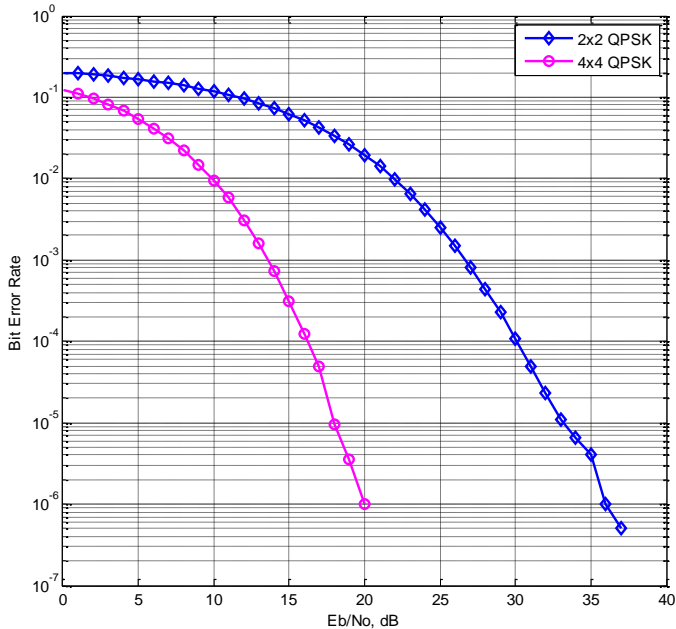
MIMO 4x4 yang digunakan adalah sistem *Orthogonal Space Time Block Code* (OSTBC). Pada sistem ini data dikirim secara orthogonal sehingga probabilitas kesalahan dalam pengiriman data pun lebih kecil dari metode lainnya. Selain itu, semakin banyak jumlah antena yang digunakan, maka semakin cepat pula proses coding dan pentransmisian data.

4.2.5 Analisis Perbandingan Grafik Antena MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 Menggunakan Modulasi QPSK

Simulasi kinerja yang selanjutnya menunjukkan perbandingan MIMO 2x2 dan 4x4 dengan menggunakan modulasi QPSK. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.6 sedangkan untuk hasil BER dapat dilihat pada tabel 4.4.

Gambar 4.6 dan tabel 4.4 menunjukkan bahwa MIMO 4x4 memiliki kinerja yang lebih baik dari MIMO 2x2. Selisih SNR pada BER 10^{-3} adalah 13.5 dB, pada BER 10^{-4} adalah 13.5 dB, pada BER 10^{-5} adalah 15 dB, dan pada BER 10^{-6} adalah 16 dB. Dapat disimpulkan bahwa, semakin bertambah jumlah antena maka semakin baik pula BER yang dihasilkan.

MIMO 4x4 pada simulasi ini menggunakan sistem *Orthogonal Space Time Block Code* (OSTBC). Pada sistem ini data dikirim secara orthogonal sehingga probabilitas kesalahan dalam pengiriman data pun lebih kecil dari STBC. Selain itu, semakin banyak jumlah antena yang digunakan, maka semakin cepat pula proses coding dan pentransmisian data.



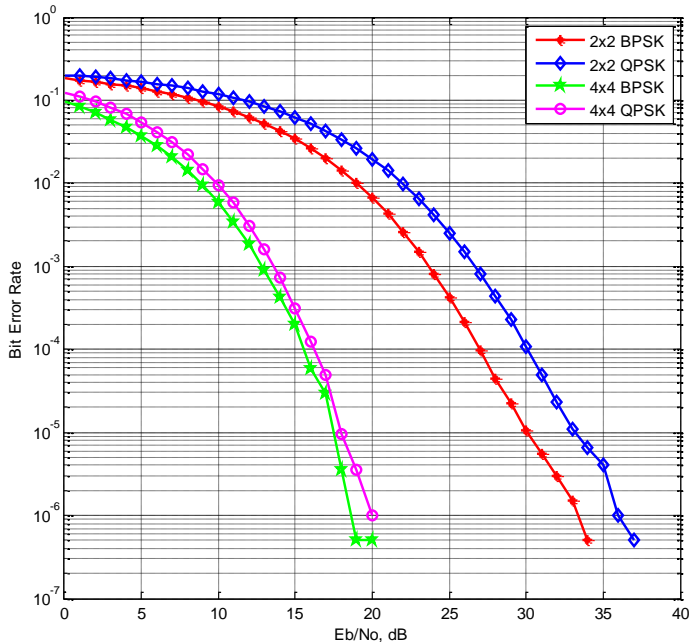
Gambar 4.6 Perbandingan BER MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 modulasi QPSK kanal TSV

Tabel 4.4 Perbandingan BER MIMO 2x2 dan 4x4 modulasi QPSK

Konfigurasi Antena	BER			
	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
2x2 QPSK	27 dB	30 dB	33 dB	36 dB
4x4 QPSK	13.5 dB	16.5 dB	18 dB	20 dB

4.2.6 Perbandingan Grafik Antena MIMO 2x2 dan MIMO 4x4

Simulasi berikut ini menunjukkan perbandingan antena MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 menggunakan modulasi BPSK dan modulasi QPSK. Berdasarkan jumlah daya yang digunakan, modulasi QPSK memiliki konsumsi daya yang lebih besar daripada modulasi BPSK sehingga untuk nilai BER yang sama, daya QPSK lebih besar daripada BPSK. Gambar 4.7 merupakan hasil dari gabungan gambar 4.5 dan 4.6.



Gambar 4.7 Perbandingan BER MIMO 2x2 dan MIMO 4x4

Tabel 4.5 Perbandingan BER MIMO 2x2 dan MIMO 4x4

Konfigurasi Antena	BER			
	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
2x2 BPSK	24 dB	27 dB	30 dB	34 dB
2x2 QPSK	27 dB	30 dB	33 dB	36 dB
4x4 BPSK	13 dB	16 dB	17.5 dB	18.5 dB
4x4 QPSK	13.5 dB	16.5 dB	18 dB	20 dB

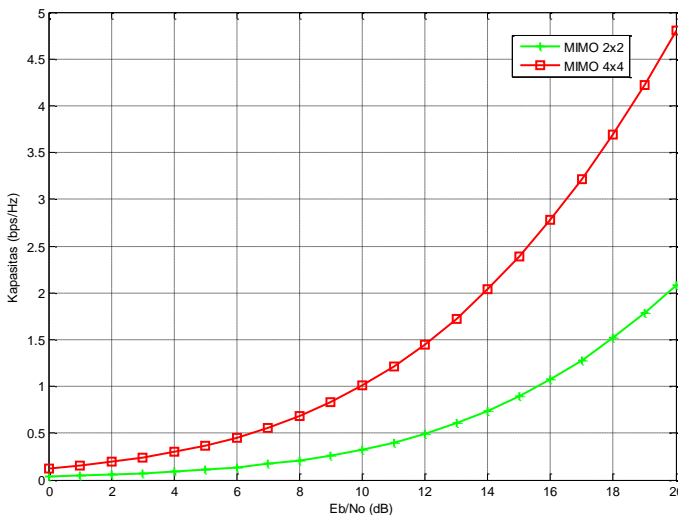
Berdasarkan gambar tersebut, MIMO 4x4 dengan modulasi BPSK memiliki kinerja yang paling bagus dibandingkan konfigurasi antena yang lainnya. Dimana pada BER 10⁻⁵, MIMO 4x4 BPSK memiliki selisih 0.5 dB dengan MIMO 4x4 QPSK, 11 dB dengan MIMO 2x2 BPSK, dan 14 dB dengan MIMO 2x2 QPSK.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa kinerja antenna MIMO dipengaruhi oleh jenis modulasi dan konfigurasi antenna. Modulasi BPSK memiliki kinerja yang lebih baik daripada QPSK karena pada BPSK 1 simbol mewakili 1 bit sehingga probabilitas errornya lebih kecil dari QPSK.

4.3 Kapasitas MIMO Kanal TSV

Besar kapasitas suatu sistem MIMO dipengaruhi oleh kondisi kanal. Kanal *indoor* dikenal dengan banyaknya hambatan atau *fading*. Jika hambatan semakin banyak, maka sinyal yang akan dikirimkan akan mengalami delay lebih lama sehingga mempengaruhi *data rate*. Nilai *data rate* sendiri berpengaruh pada jumlah kapasitas sistem dalam satuan waktu.

Kapasitas mempunyai satuan bps/Hz. Jika MIMO dibangkitkan dengan frekuensi carrier 60 GHz, maka besar kapasitas dikalikan dengan frekuensi carrier akan didapatkan nilai *data rate*.



Gambar 4.8 Kapasitas MIMO 2x2 dan MIMO 4x4

Berdasarkan gambar 4.8 pada Eb/No 0 dB MIMO 2x2 mempunyai kapasitas 0.350789 bps/Hz sedangkan pada MIMO 4x4 kapasitas yang tersedia lebih dari 3 kali lipatnya yaitu 1.231755 bps/Hz.

Dari gambar tersebut terlihat bahwa kapasitas untuk MIMO 4x4 lebih besar daripada MIMO 2x2. Sehingga dapat disimpulkan bahwa peningkatan jumlah antena pada sisi pengirim dan penerima akan meningkatkan jumlah kapasitas yang tersedia.

Tabel 4.6 Kapasitas MIMO 2x2 dan MIMO 4x4

Konfigurasi Antena	Eb/No (dB)				
	0	5	10	15	20
MIMO 2x2	0.03508 bps/Hz	0.10885 bps/Hz	0.32555 bps/Hz	0.89045 bps/Hz	2.08146 bps/Hz
MIMO 4x4	0.12318 bps/Hz	0.36822 bps/Hz	1.00836 bps/Hz	2.38404 bps/Hz	4.79912 bps/Hz

Laju data berbanding lurus dengan besar kapasitas dan lebar bandwidth sehingga semakin besar kapasitas dan lebar bandwidth yang tersedia maka semakin besar pula laju data-nya (*data rates*). Lebar bandwidth dipengaruhi oleh frekuensi carrier, semakin tinggi nilai frekuensi carrier maka semakin tinggi pula bandwidth yang tersedia.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Performansi frekuensi 60 GHz pada kanal Triple Saleh Valenzuela (TSV) dengan antena MIMO 2x2 dan 4x4 telah dianalisis dan membuktikan bahwa kanal TSV dapat dipertimbangkan untuk digunakan pada lingkungan dalam gedung. Berdasarkan hasil pengujian sistem maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. MIMO 4x4 BPSK memiliki kinerja yang terbaik dibandingkan dengan metode lainnya sehingga direkomendasikan untuk sistem komunikasi MIMO pada frekuensi 60 GHz. Pada BER 10^{-5} , MIMO 4x4 BPSK memiliki selisih 0.5 dB dengan MIMO 4x4 QPSK, selisih 12.5 dB dengan MIMO 2x2 BPSK, dan selisih 15.5 dB dengan MIMO 2x2 QPSK.
2. Jenis modulasi mempengaruhi kinerja suatu antena. Dalam hal ini, modulasi BPSK memiliki kinerja yang lebih baik daripada modulasi QPSK. Pada BER 10^{-5} , MIMO 2x2 modulasi BPSK memiliki selisih 3 dB dari MIMO 2x2 QPSK sedangkan untuk MIMO 4x4 BPSK memiliki selisih 0.5 dB dari MIMO 4x4 QPSK.
3. Kapasitas yang tersedia pada MIMO 4x4 lebih besar daripada MIMO 2x2. MIMO 2x2 memiliki kapasitas 0.03508 bps/Hz sedangkan MIMO 4x4 memiliki kapasitas 0.12318 bps/Hz.

5.2 Saran

Saran untuk pengembangan sistem komunikasi MIMO pada kanal frekuensi 60 GHz di lingkungan dalam gedung antara lain:

1. Untuk sisi penerima dapat digunakan *equalizer* seperti *Zero Forcing* (ZF), *Maximum Likelihood* (ML), dan *Minimum Mean Square Error* (MMSE) untuk meningkatkan kinerja sistem agar lebih optimal dengan mengurangi ISI.

2. Untuk meminimalisir *bit error*, dapat digunakan *error control coding* yang dapat mendeteksi kesalahan dan mengoreksinya.
3. Pada saat pengiriman simbol dapat digunakan pilot sehingga kesalahan dalam proses deteksi simbol dapat diperkecil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Freeman, Roger L.. “*Telecommunication Transmission Handbook Fourth Edition*”, Wiley, New Jersey, 2004
- [2] Jankiraman, Mohinder. “*Space-Time Codes and MIMO Systems*”, Artech House, London, 2004
- [3] Rappaport, T.S. , “*Wireless Communication*”, Prentice Hall, New Jersey, 1996
- [4] Jensen, M.A. ; Wallace, J.W., “*Review of Antennas and Propagation for MIMO Wireless Communication*”. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.52, no.11, November, 2004
- [5] Sklar, Bernard., “*Digital Communication*”, Prentice Hall, New York, 2001
- [6] Alamouti, Siavash M. “*A simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications*”. IEEE Journal on Select Areas in Communications, vol.16, no.8, pp.1451-1458, Oktober, 1998
- [7] Tarokh, V.; Jafarkhani, H.; Calderbank, A.R., “*Space-Time Block Coding for Wireless Communications: Performance Results*”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.17, No.3, pp.451-460, March, 1999
- [8] K. Sato, H. Sawada, Y. Shoji, S. Kato., “*Channel Model for Millimeter Wave WPAN*”, The 18th annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC’07)
- [9] Sawada, H.; Y. Shoji; Choi, C.S., “*Proposal of novel statistic channel model for millimeter-wave WPAN*”. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2006
- [10] Grejtak, F; Prokes, A., “*UWB – Ultra Wideband Characteristics and the Saleh-Valenzuela Modeling*”, Acta Electrotechnica et Informatica, Vol.13, No.2, pp.32-38, 2013
- [11] Guo, Nan; Qiu R.C.; Mo, Shaomin S.; Takahashi K., “*60-GHz Millimeter-Wave Radio: Principle, Technology, and New Results*”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol.2007
- [12] Smulders, P., “*Exploiting the 60 GHz Band for Local Wireless Multimedia Access: Prospects and Future Directions*”. IEEE Communication Magazine, pp.140-147, January, 2002

- [13] S.K. Yong, “*TG3c Channel Modelling Sub-committee Final Report*”, IEEE P.802.15-07-0584, <http://www.ieee802.org/15/>
- [14] Kirthiga, S. ; Jayakumar, M., “*Performance and Capacity analysis of MIMO system at 5 GHz and 60 GHz in Indoor Environment*”, WSEAS Transactions on Communications, pp.415-426, November, 2012
- [15] H. Sawada; Y. Shoji; C. Choi; H. Ogawa., “*A Modified SV-Model Suitable for Line-of-Sight Desktop Usage of Millimeter-Wave WPAN System*”. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.57, No.10, pp.2940-2948, October, 2009
- [16] H. Harada; R. Funada; Sawada, H.; Kato, Shuzo; Roberts, Rick., “*CM Matlab Release Support Document*”, Doc.: IEEE 802.15-07/0559r3, March, 2007

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Hikmah Miladiyah lahir di Sidoarjo pada tanggal 25 Februari 1992. Penulis merupakan anak ketiga dari empat bersaudara, dari pasangan M.Chanif dan Zuhroh. Penulis lulus dari SMA Negeri 1 Waru Sidoarjo pada tahun 2010, setelah penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada tahun 2010. Penulis mengambil bidang studi Telekomunikasi Multimedia. Dan penulis aktif di kegiatan mahasiswa di BEM FTI dan Himatekro. Selain itu penulis juga pernah menjadi asisten Komunikasi Data dan Pengolahan Sinyal Komunikasi. Pada bulan Juni 2014, penulis mengikuti seminar dan ujian Tugas Akhir di Jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar S1 Teknik Elektro.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A

Tabel A.1 Hasil BER MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 terhadap Eb/No sistem MIMO pada kanal frekuensi 60 GHz *indoor* dengan modulasi BPSK dan QPSK

Eb/No (dB)	BER			
	2x2 BPSK	2x2 QPSK	4x4 BPSK	4x4 QPSK
0	0.1814965	0.200085	0.095004	0.124097
1	0.174202	0.194549	0.0827175	0.110091
2	0.1663265	0.188343	0.0705785	0.0962545
3	0.1576875	0.1815875	0.0586365	0.0815425
4	0.1485405	0.1742865	0.047459	0.067842
5	0.138893	0.1663615	0.0372135	0.054502
6	1.29E-01	0.157856	0.0282255	0.0417145
7	1.18E-01	0.148663	0.0206475	0.030998
8	1.07E-01	0.1389425	0.0143565	0.0220025
9	9.58E-02	0.128679	0.00949	0.0149495
10	8.46E-02	0.118036	0.0059125	0.0095695
11	0.0734365	0.107094	0.003428	0.005835
12	0.0626035	0.0958175	0.0018245	0.0031015
13	0.0522955	0.0846465	0.0009105	0.001626
14	0.042654	0.073469	0.000427	0.0007335
15	0.0339555	0.0627965	0.0002	0.000311
16	0.0262375	0.0524765	5.85E-05	0.0001255
17	0.019643	0.0428675	2.90E-05	4.85E-05
18	0.0142845	0.0341065	3.50E-06	9.50E-06
19	0.0099355	0.0264765	5.00E-07	3.50E-06
20	0.0066645	0.019796	5.00E-07	1.00E-06
21	0.0042415	0.014383	0	0
22	0.0025415	0.01006	0	0

Eb/No (dB)	BER			
	2x2 BPSK	2x2 QPSK	4x4 BPSK	4x4 QPSK
23	0.001469	0.0067255	0	0
24	0.000824	0.0042645	0	0
25	0.000415	0.0025505	0	0
26	0.000206	0.001482	0	0
27	0.0001015	0.000819	0	0
28	4.70E-05	0.00044	0	0
29	2.35E-05	0.0002345	0	0
30	1.15E-05	0.000108	0	0
31	5.50E-06	4.65E-05	0	0
32	2.50E-06	2.45E-05	0	0
33	1.00E-06	1.00E-05	0	0
34	5.00E-07	4.00E-06	0	0
35	0.00E+00	2.00E-06	0	0
36	0.00E+00	1.00E-06	0	0
37	0.00E+00	5.00E-07	0	0
38	0.00E+00	0.00E+00	0	0
39	0.00E+00	0.00E+00	0	0
40	0	0	0	0

Tabel A.2 Kapasitas MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 sistem MIMO pada kanal frekuensi 60 GHz *indoor*

Eb/No (dB)	Kapasitas	
	MIMO 2x2	MIMO 4x4
0	0.0350789	0.12317552
1	4.41E-02	1.54E-01
2	5.53E-02	1.92E-01
3	6.94E-02	2.39E-01

Eb/No (dB)	Kapasitas	
	MIMO 2x2	MIMO 4x4
4	0.08694743	0.29727035
5	0.10884591	0.36821882
6	0.13607309	0.45453113
7	0.16982569	0.55883716
8	0.21151803	0.68395107
9	0.26279695	0.83280231
10	0.32554572	1.00835478
11	0.401872	1.21352611
12	0.49407488	1.45112033
13	0.60458782	1.72378453
14	0.735898	2.03399172
15	0.89044718	2.38404232
16	1.07052462	2.77606798
17	1.27816565	3.21201913
18	1.51506891	3.69362293
19	1.78254037	4.22230967
20	2.081464	4.79911921

LAMPIRAN B

Tabel A.3 **Pembangkitan Kanal**

```
clear all
close all
clc

fc0 = 60;           %GHz
fc = fc0*1e9;      %Hz (carrier center frequency)
ramda = 3e8/fc;
fs = 1;
ts = 1./fs;

Nch = 25e4; %membangkitkan kanal 250000
nRx=2;
nTx=2;

randn('state',28);
rand('state',29);

azimuth = 30;
h_len = 1000;

%PARAMETER
adist      = 3;           %asumsi jarak Tx dan Rx
nlos       = 0;           %LOS
los_beta_flag = 1;       %untuk perhitungan beta
Omega0     = 4.44*adist - 105.4; %cluster power level
smallk     = 2.53;        %small rician factor
Lmean     = 3;           %jumlah rata2 kedatangan cluster
Lam       = 1/27.0;      %tingkat kedatangan cluster(clusters
                        per nsec)
lambda    = 1/1.56;      %tingkat kedatangan ray(ray per
                        nsec)
Gam       = 21.1;        %cluster decay factor (time
                        constant, nsec)
```

```

gamma      = 8.85;           %ray decay factor (time constant,
                             nsec)
std_ln_1   = 3.01;         %standard deviasi variabel log-
                             normal untuk fading cluster
std_ln_2   = 7.69;         %standard deviasi variabel log-normal
                             untuk fading ray
sigma_fai  = 34.6;         %cluster angle-of-arrival spread (deg)
tx_hpbw    = 30;           %Tx half-power angle in deg
rx_hpbw    = 30;           %Rx half-power angle in deg
L_pl       = -20*log10(4*pi*adist/ramda); %pathloss komponen LOS
                                                dinormalisasi dgn 1m

```

```
%Precompute
```

```

std_L      = 1/sqrt(2*Lam);
std_lam    = 1/sqrt(2*lambd);

```

```
%Impulse
```

```
%Output variabel
```

```

beta = zeros(1,Nch);
h     = zeros(h_len,Nch);
t     = zeros(h_len,Nch);
t0    = zeros(1,Nch);
np    = zeros(1,Nch);
aoa   = zeros(h_len,Nch);
h_sum = zeros(1,N);

```

```
for k = 1:Nch
```

```

tmp_h = zeros(size(h,1),1);
tmp_t = zeros(size(h,1),1);
tmp_aoa = zeros(size(h,1),1);

```

```
%men-generate jumlah cluster yg dihasilkan
```

```
L = max(1, tsv_poisrnd(Lmean)); % tsv_poissonrnd.m
```

```
%Inisialisasi perhitungan ray yg ada dalam cluster
```

```
%komponen LOS
```

```
path_ix = 0;
```

```

%Komponen LOS
%-----
% Perhitungan komponen LOS menggunakan model TSV
[beta0] = hitung_beta(fc, adist, tx_hpbw, rx_hpbw, azimuth);
% beta0 dikalikan dengan LOS path loss
beta(k) = beta0;

path_ix = path_ix + 1;
tmp_h(path_ix)=beta(k);
tmp_t(path_ix) = 0;
tmp_aoa(path_ix) = 0;

%SV cluster (NLOS path)
% Menentukan TOA dan AOA pada cluster SV pertama
Tc = (std_L*randn)^2 + (std_L*randn)^2;

%cluster AOA didistribusi menggunakan distribusi uniform
cl_ang_deg = 360*rand-180;

%faktor delta K
dK = L_pl-Omega0;
Tc0 = Tc;

for ncluster = 1:L
    % relative arrival time pada ray pertama di-set 0 di setiap cluster
    Tr = 0;
    %fray: flag diatur menjadi 1 pada kedatangan ray pertama
    fray = 1;
    Mcluster = std_ln_1*randn;
    %Ray pertama pada cluster pertama terkait dengan faktor delta K
    Pcluster = (-dK-10*(Tc-Tc0)/Gam./log(10))+Mcluster;
    Tr_len = 10*gamma;

    while (Tr < Tr_len),
        t_val = (Tc+Tr); % TOA pada ray

```

```

%-----
if fray == 1 % AOA = cluster arrival angle (Ray pertama pada
              setiap cluster)
    ray_ang_deg = cl_ang_deg;
else % AOA = cluster arrival angle + ray arrival angle
    % Menghitung kembali apakah AOA lebih dari 180 deg atau
    % kurang dari -180 deg
    while 1
        % Menentukan AOA pada ray menggunakan distribusi
        % Laplace (deg)
        ray_ang_deg0 = tsv_laplacernd(sigma_fai); % average is 0
                                                    deg
        if abs(ray_ang_deg0) <= 180
            break;
        end
    end
    ray_ang_deg = cl_ang_deg+ray_ang_deg0;
end
ray_aoa_c = exp(1i.*ray_ang_deg./180*pi);
aoa_val = angle(ray_aoa_c)/pi*180;

Mray = std_ln_2*randn;
if fray == 1 %Ray pertama pada cluster
    Pray = Mray; %Tr = 0 if small_dk = 0
    % Set flag menjadi 0 setelah perhitungan power pada ray
    % pertama
    fray=0;
else
    % Convert small Rician factor
    small_dk = smalllk.*10*log10(exp(1));
    Pray = -10*Tr/gamma./log(10)-small_dk+Mray;
end

h_val = 10^((Pcluster+Pray)/20);

% Increment the number of paths
path_ix = path_ix + 1;

```

```

tmp_h(path_ix) = h_val;
tmp_t(path_ix) = t_val;
tmp_aoa(path_ix) = aoa_val;

Tr = Tr + (std_lam*randn)^2 + (std_lam*randn)^2;
end
% Set TOA dan AOA untuk cluster selanjutnya yang akan
dibangkitkan
Tc = Tc + (std_L*randn)^2 + (std_L*randn)^2;
cl_ang_deg = 360*rand-180;
end

%Sorting
%-----
np(k) = path_ix; % Jumlah ray/path
[sort_tmp_t,sort_ix] = sort(tmp_t(1:np(k))); % sort ascending
t(1:np(k),k) = sort_tmp_t;
h(1:np(k),k) = tmp_h(sort_ix(1:np(k)));
aoa(1:np(k),k) = tmp_aoa(sort_ix(1:np(k)));
end

%Generate CIR dengan konvolusi gain antenna
tGrh = hitung_gain(rx_hpbw, aoa, 0);
for ij=1:Nch
    tGrh(np(ij)+1:end,ij)=0;
end
h2_ct = h.*tGrh;
h2_ct(2:end,:) = exp(j*2*pi*rand(size(h2_ct(2:end,:)))).*h2_ct(2:end,:);

h1=sum(h2_ct,1); %kanal TSV (1x250000)
save h1.mat %save dalam bentuk (namafilename).mat

```

```

%Function untuk mencari beta
function [beta] = hitung_beta(fc, muD, tx_hpbw, rx_hpbw, azimuth)

% gamma0 : Koefisien refleksi
gamma0 = 1; % Dimisalkan sudut kedatangan besar

```

```

% Parameter yang akan digunakan
D0 = [-0.3 0.3]+muD; % Range of D (m)
Ht = [0.0 0.30]; % Range of Ht (m)
Hr = [0.0 0.30]; % Range of Hr (m)

% Menentukan tinggi Tx dan Rx dengan metode monte-carlo
h1 = (Ht(2)-Ht(1))*rand+Ht(1);
h2 = (Hr(2)-Hr(1))*rand+Hr(1);

% Menentukan jarak Tx dan Rx dengan metode monte-carlo
D = (D0(2)-D0(1))*rand+D0(1);

% Panjang gelombang
ramda = 3e8/fc;

%***** Menentukan reflection point dari lintasan pantul *****
tx_p = i.*h1;
rx_p = D+i.*h2;
rfl_p = D*h1/(h1+h2);

%Menentukan arah dari lintasan lurus dan lintasan pantul
tp = angle([rx_p-tx_p (tx_p-rx_p) rfl_p-tx_p (rfl_p-rx_p)]);
tp = tp./pi*180;

dr_theta = tp(1);
dr_fai = dr_theta;
rfl_theta = tp(3);
rfl_fai = -rfl_theta;

%Menentukan gain antena horizontal
% TX
% Lintasan langsung
gt1 = hitung_gain(tx_hpbw, dr_theta, azimuth);
% Lintasan pantul
gt2 = hitung_gain(tx_hpbw, rfl_theta, azimuth);

% RX

```



```

% Lintasan langsung
gr1 = hitung_gain(rx_hpbw, dr_fai, azimuth);
% Lintasan pantul
gr2 = hitung_gain(rx_hpbw, rfl_fai, azimuth);

beta = (muD/D).*abs(gt1.*gr1+gt2.*gr2...
.*gamma0.*exp(j.*(2*pi./ramda).*(2.*h1.*h2./D)));

```

```

%Function untuk mendapatkan gain
function [g, fai] = hitung_gain(hpbw, fai0, azimuth)

if azimuth ~=0
    ray_aoa_azi = exp(j.*(fai0+azimuth)./180*pi);
    fai = angle(ray_aoa_azi)/pi*180;
else
    fai= fai0;
end

%Reference antenna model
G0 = 10*log10((1.6162./sin(hpbw*pi/180/2))^2);
theta_ml=2.6*hpbw;
G_side = -0.4111.*log(hpbw)-10.597;
G = G0 - 3.01 .* (2.*abs(fai)./hpbw).^2;

pos=find(abs(fai)>theta_ml/2);
G(pos)=G_side;
g0 = G-G0;
g = 10.^(g0/20);
end

```

```

%Function disribusi Poisson
function [out] = tsv_poissrnd(lamda)

ar=exp(lamda)*rand;
if ar<=1
    out=0;

```

```

        return
    end

    out=1;
    while 1
        ar=ar*rand;
        if ar<=1
            return
        end
        out=out+1;
    end

```

```

%Function distribusi laplace
function [out]=tsv_laplacernd(a)

U1=rand;
U2=rand;
out=(2.*(U1>=0.5)-1).*(a./sqrt(2)).*log(U2);

```

Tabel A.4 MIMO 2 x 2 QPSK

```

close all
clear all
clc

fc0 = 60;            %GHz
fc = fc0*1e9;       %Hz (carrier center frequency)
ramda = 3e8/fc;
fs = 1;
ts= 1./fs;

%Parameter Awal-----
N = 1e6; %Jumlah bit informasi
nTx = 2; %Jumlah antenna Tx
nRx = 2; %Jumlah antenna Rx
EbNo = [0:40]; %Eb/N0 (dB)

```

```

%Membangkitkan bit 0/1-----
X = randi([0,1],1,N);

%Modulasi QPSK-----
X_in = reshape(X,2,N/2); %Membuat matriks 2xN/2 dari matriks 'X'
I = 2*X_in(1,:)-1; %Inphase merubah bit {0}->{-1} dan {1}->{1}
Q = (2*X_in(2,:)-1)*j; %Quadratur merubah bit {0}->{-i1} dan {1}-
>{i1}
X_mod = 1/sqrt(2)*(I+Q); %Modulasi QPSK
Nsym = length(X_mod);

%Alamouti Encoding at Tx-----
S_ant0 = zeros(1,Nsym);
S_ant1 = zeros(1,Nsym);
S_ant0(1,[1:2:end]) = X_mod(1,[1:2:end]);
S_ant0(1,[2:2:end]) = -conj(X_mod(1,[2:2:end]));
S_ant1(1,[1:2:end]) = X_mod(1,[2:2:end]);
S_ant1(1,[2:2:end]) = conj(X_mod(1,[1:2:end]));

%Kanal-----
load kanalh1.mat
ht0 = h1; clear h1;
load kanalh2.mat
ht1 = h2; clear h2;
load kanalh3.mat
ht2 = h3; clear h3;
load kanalh4.mat
ht3 = h4; clear h4;

ha0 = kron(ht0,ones(1,2));
ha1 = kron(ht1,ones(1,2));
ha2 = kron(ht2,ones(1,2));
ha3 = kron(ht3,ones(1,2));

%Noise-----
n0 = 1/sqrt(2)*[randn(1,Nsym/2)+j*(randn(1,Nsym/2))];
n1 = 1/sqrt(2)*[randn(1,Nsym/2)+j*(randn(1,Nsym/2))];
n2 = 1/sqrt(2)*[randn(1,Nsym/2)+j*(randn(1,Nsym/2))];

```

```
n3 = 1/sqrt(2)*[randn(1,Nsym/2)+j*(randn(1,Nsym/2))];
```

```
n01 = zeros(1,Nsym);  
n23 = zeros(1,Nsym);  
n01(1,[1:2:end]) = n0;  
n01(1,[2:2:end]) = n1;  
n23(1,[1:2:end]) = n2;  
n23(1,[2:2:end]) = n3;
```

```
%Receiver-----
```

```
for aa = 1:length(EbNo)  
    Noise01 = 10^(-EbNo(aa)/20).*n01;  
    Noise23 = 10^(-EbNo(aa)/20).*n23;
```

```
%Perkalian kanal dan simbol yg dikirim + Noise-----
```

```
%Sinyal yg diterima di Ant 0
```

```
r_ant0 = (1/sqrt(2)*(S_ant0.*ha0)) + (1/sqrt(2)*(S_ant1.*ha1)) +  
Noise01;
```

```
%Sinyal yg diterima di Ant 1
```

```
r_ant1 = (1/sqrt(2)*(S_ant0.*ha2)) + (1/sqrt(2)*(S_ant1.*ha3)) +  
Noise23;
```

```
%Combiner -----
```

```
r_m = zeros(4,Nsym);  
r_m([1:2],:) = kron(reshape(r_ant0,2,[],[1 1]));  
r_m([3:4],:) = kron(reshape(r_ant1,2,[],[1 1]));
```

```
r_mc = r_m;  
r_mc(2,[1:2:end]) = conj(r_mc(2,[1:2:end]));  
r_mc(4,[1:2:end]) = conj(r_mc(4,[1:2:end]));  
r_mc(2,[2:2:end]) = -conj(r_mc(2,[2:2:end]));  
r_mc(4,[2:2:end]) = -conj(r_mc(4,[2:2:end]));
```

```
hc = [ha0;ha1;ha2;ha3];  
temp = hc;  
hc(1,[2:2:end]) = conj(temp(2,[2:2:end]));  
hc(2,[2:2:end]) = temp(1,[2:2:end]);  
hc(3,[2:2:end]) = conj(temp(4,[2:2:end]));
```

```

hc(4,[2:2:end]) = temp(3,[2:2:end]);
hc(1,[1:2:end]) = conj(hc(1,[1:2:end]));
hc(3,[1:2:end]) = conj(hc(3,[1:2:end]));

```

%Perkalian nilai masing2 matriks untuk memperoleh S_0^{\wedge} dan S_1^{\wedge}

```

S_est = r_mc.*hc;
S_est = sum(S_est,1);

```

%Demodulasi QPSK-----

%mengambil nilai [real , imag] dari simbol $S_0^{\wedge}, S_1^{\wedge}, S_3^{\wedge}, \dots$

```

X_dem = [real(S_est) imag(S_est)];

```

%Deteksi bit informasi dari simbol2 QPSK

```

for bb = 1:length(X_dem)
    if X_dem(bb) > 0
        Y(bb) = 1;
    else
        Y(bb) = 0;
    end
end
Y = [Y(1:length(Y)/2) ; Y(length(Y)/2+1:length(Y))];
Y = reshape(Y,1,[]); %Bit Informasi Estimasi di Rx

```

%Menghitung Bit yg Error

```

nErr(aa) = size(find([Y - X]),2) ;
end

```

%Bit Error Rate-----

```

BER = nErr/N;

```

%Plot Grafik BER vs EbNo-----

```

figure
semilogy(EbNo,BER,'c-h','LineWidth',2);
grid on
legend('2x2 QPSK')
xlabel('Eb/No, dB');
ylabel('Bit Error Rate');

```

Tabel A.5 **MIMO 4 x 4 QPSK**

```
clear all;
clc;

format long
N = 1000000; %Jumlah bit info
M = 4; %M-ary
k = log2(M);
EbNo=[0:40]; %Eb/No (dB)

%Generate bits info
x = randi([0 1],1,N);

%Modulasi QPSK
x_re = reshape(x,k,length(x)/2).'; %Reshape bit info from 1xN to 2
x(N/2)
x_de = bi2de(x_re,'left-msb'); %Biner to decimal
sym = pskmod(x_de,M,pi/4).'; %M-ary PSK Modulation

load kanalh1.mat;
load kanalh2.mat;
load kanalh3.mat;
load kanalh4.mat;
load kanalh5.mat;
load kanalh6.mat;
load kanalh7.mat;
load kanalh8.mat;
H=[h1 h2 h3 h4;h5 h6 h7 h8];
H_tot=reshape(H,M,M,[]);

% Noise
for jj = 1:length(EbNo)

    for ii=1:length(sym)/4
        h_tsv(:,,ii)=H_tot(:,,[ii]);

        a1 = (ii*4)-3;
```

```

s = sym(1,[a1:a1+3]);
c = [s(1) -s(2) -s(3) -s(4) conj(s(1)) -conj(s(2)) -conj(s(3)) -
conj(s(4));...
s(2) s(1) s(4) -s(3) conj(s(2)) conj(s(1)) conj(s(4)) -conj(s(3));...
s(3) -s(4) s(1) s(2) conj(s(3)) -conj(s(4)) conj(s(1)) conj(s(2));...
s(4) s(3) -s(2) s(1) conj(s(4)) conj(s(3)) -conj(s(2)) conj(s(1))];

```

```

n = 1/sqrt(2)*randn(4,8)+(sqrt(-1)*randn(4,8));
Noise = 10^(-EbNo(jj)/20).*n;

```

% Receive signal pada Rx

```

r = h_tsv(:,ii)*c+Noise;

```

% Decoding s1, s2, s3, s4

```

s1 = sum(sum([r(:,1:4)] conj(r(:,5:8]))).' .*
[conj(h_tsv(:,ii).');h_tsv(:,ii).']));

```

```

hc = h_tsv(:,ii).';
htemp = hc;
hc(1,:) = htemp(2,:);
hc(2,:) = -htemp(1,:);
hc(3,:) = -htemp(4,:);
hc(4,:) = htemp(3,:);
s2 = sum(sum([r(:,1:4)] conj(r(:,5:8]))).' .* [conj(hc);hc]);

```

```

hc(1,:) = htemp(3,:);
hc(2,:) = htemp(4,:);
hc(3,:) = -htemp(1,:);
hc(4,:) = -htemp(2,:);
s3 = sum(sum([r(:,1:4)] conj(r(:,5:8]))).' .* [conj(hc);hc]);

```

```

hc(1,:) = htemp(4,:);
hc(2,:) = -htemp(3,:);
hc(3,:) = htemp(2,:);
hc(4,:) = -htemp(1,:);
s4 = sum(sum([r(:,1:4)] conj(r(:,5:8]))).' .* [conj(hc);hc]);

```

```

s_est(1,[a1:a1+3]) = [s1;s2;s3;s4];

```

```

%deteksi sinyal hasil combining
stx = sign(real(s_est))+i*sign(imag(s_est));
end

%Demodulasi QPSK
% k_est = qpskdemod(s_est);
y_de = pskdemod(stx,M,pi/4); %Decimal symbols of QPSK {0,1,2,3}
y_bi = de2bi(y_de,'left-msb'); %Konversi desimal ke biner
y= reshape(y_bi.',N,[]).'; %Bit informasi Estimasi di Rx

%Check Error
BER(jj) = biterr(y,x)/N;

end

%Plot grafik BER vs EbNo
semilogy(EbNo,BER,'LineWidth',2);
xlabel('Eb/No, dB');
ylabel('Bit Error Rate');
grid on
legend('4x4 QPSK')

```

Tabel A.6 KAPASITAS

```

clc;
clear all;
EbNo = [0:20];
SNR = 10.^(EbNo/10);

fc0 = 60;            %GHz
fc = fc0*1e9;       %Hz
ramda = 3e8/fc;
fs = 1;
ts= 1./fs;

```



```

load kanalh9.mat
load kanalh10.mat

% Kapasitas MIMO 2x2
%-----
Nr = 2;
Nt = 2;

N = min(Nr,Nt);
H = zeros(Nr,Nt);
for k=1:Nr
    for l=1:Nt
        h9 = reshape(h9,Nt,[]);
        H(k,l) = h9(k,l);
    end
end

[S V D] = svd(H*H');

C_MIMO2 = 0;
for k=1:N
    lamda(k) = V(k,k);
    C_MIMO2 = C_MIMO2 + log2(1+SNR*lamda(k)/Nt);
end

plot(EbNo,C_MIMO2, '-+', 'LineWidth', 1.5, 'Color','g');
hold on;

% Kapasitas MIMO 4x4
Nr = 4;
Nt = 4;

N = min(Nr,Nt);
H = zeros(Nr,Nt);
for k=1:Nr
    for l=1:Nt
        h10 = reshape(h10,Nt,[]);
        H(k,l) = h10(k,l);
    end
end

```

```

    end
end
[S V D] = svd(H*H');

C_MIMO3 = 0;
for k=1:N
    lamda(k) = V(k,k);
    C_MIMO3 = C_MIMO3 + log2(1+SNR*lamda(k)/Nt);
end

plot(EbNo,C_MIMO3, '-s', 'LineWidth', 1.5, 'Color', 'r');
grid on;
title ('Perbandingan Kapasitas MIMO 2x2 dan 4x4 (Kanal TSV)')
legend('MIMO 2x2', 'MIMO 4x4');
xlabel('Eb/No (dB)');
ylabel('Kapasitas (bps/Hz)');

```

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN C

Jurusan Teknik Elektro – FTI
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

TE 091399 TUGAS AKHIR - 4 SKS

Nama Mahasiswa : Hikmah Miladiyah
Nomor Pokok : 2210100046
Bidang Studi : Telekomunikasi Multimedia
Tugas Diberikan : Semester Gasal 2013/2014
Dosen Pembimbing 1 : Dr. Ir. Suwadi, MT.
Dosen Pembimbing 2 : Devy Kuswidiastuti, ST., MSc
Judul Tugas Akhir : **Analisa Kinerja dan Kapasitas Sistem Komunikasi MIMO pada Frekuensi 60 GHz di Lingkungan dalam Gedung**
(*Performance and Capacity Analysis of MIMO Communication System at 60GHz in Indoor Environment*)

10 SEP 2013


Uraian Tugas Akhir :

Dalam suatu lingkungan *indoor* terdapat berbagai penghalang yang dapat mempengaruhi performansi suatu antena karena dapat menimbulkan *multipath* yang dapat merugikan. Penghalang utama pada lingkungan *indoor* diantaranya dinding, atap, dan berbagai *furniture* yang ada di dalamnya. Hal tersebut dapat diatasi salah satunya dengan penggunaan teknik MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).


Antena MIMO terdiri dari *multiple antena* pada sisi pengirim maupun penerima. Keberadaan *multipath* pada lingkungan *indoor* akan menjadi keuntungan. Pada kasus ini, frekuensi 60 GHz dapat dipertimbangkan dalam penggunaan MIMO *indoor*. Keunggulan frekuensi 60 GHz diantaranya adalah tersedianya bandwidth yang lebar dan adanya penyerapan O₂ pada frekuensi 60GHz yang berguna untuk gelombang millimeter dalam meningkatkan *data rates* dan *spatial reuse*.


Penelitian ini menjelaskan tentang analisa kinerja dan kapasitas sistem komunikasi MIMO pada frekuensi 60 GHz di lingkungan dalam gedung. Hasil yang diharapkan berupa simulasi program matlab dan pemodelan kanal *indoor* pada frekuensi 60 GHz menggunakan teori Triple Saleh Valenzuela.

Dosen Pembimbing 1,


Dr. Ir. Suwadi, MT.
NIP. 196808181993031002

Dosen Pembimbing 2,


Devy Kuswidiastuti, ST., MSc
NIP. 198109252008122003


Ketua


Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT.
NIP. 197002121995121001

Menyetujui,
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia
Koordinator,
09 05 13


Devy Kuswidiastuti, ST., MSc
NIP. 198109252008122003

A. JUDUL TUGAS AKHIR

Analisis Kinerja dan Kapasitas Sistem Komunikasi MIMO pada Frekuensi 60 GHz di Lingkungan dalam Gedung

B. RUANG LINGKUP

1. Sistem Komunikasi Digital
2. Propagasi dan Sistem Komunikasi Radio
3. Antena
4. Pemodelan Kanal

C. LATAR BELAKANG

Dalam suatu lingkungan *indoor* terdapat berbagai penghalang yang dapat mempengaruhi performansi suatu antena karena dapat menimbulkan *multipath* yang dapat merugikan. Penghalang utama pada lingkungan *indoor* diantaranya dinding, atap, dan berbagai *furniture* yang ada di dalamnya. Hal tersebut dapat diatasi salah satunya dengan penggunaan teknik *Multiple Input Multiple Output* (MIMO).

MIMO menggunakan beberapa antena di sisi pengirim (Tx) maupun sisi penerima (Rx), sehingga diharapkan koneksi *wireless* akan lebih cepat dan jarak jangkauan semakin jauh. MIMO memanfaatkan sinyal pantulan (*multipath*) sebagai penguat sinyal utama, berbeda dengan *Single Input Single Output* (SISO) dan *Single Input Multiple Output* (SIMO) yang justru keberadaan *multipath* sangat merugikan karena menimbulkan *fading*.

Pada kasus ini, frekuensi 60GHz dapat dipertimbangkan dalam penggunaan MIMO *indoor*. Tersedianya bandwidth yang lebar dan adanya penyerapan O₂ pada 60GHz berguna untuk gelombang millimeter dalam meningkatkan *data rates* dan *spatial reuse*.

Penelitian ini menjelaskan tentang analisis kinerja dan kapasitas sistem komunikasi MIMO pada frekuensi 60 GHz di lingkungan dalam gedung. Hasil yang diharapkan berupa simulasi program matlab dan pemodelan kanal indoor pada frekuensi 60 GHz menggunakan teori Triple Saleh Valenzuela.

D. RUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang dijadikan objek penelitian Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana pemodelan kanal MIMO pada Frekuensi 60 GHz di lingkungan dalam gedung?
2. Bagaimana analisis kinerja dan kapasitas sistem komunikasi MIMO pada frekuensi 60 GHz di lingkungan dalam gedung?

E. BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Simulasi menggunakan program MATLAB.
2. Model kanal yang digunakan adalah Triple Saleh Valenzuela.
3. Jumlah antena MIMO pemancar dan penerima yaitu 2x2 dan 4x4 dengan frekuensi 60GHz.
4. Pemancar dan penerima terletak pada satu ruangan dalam gedung.

F. TUJUAN TUGAS AKHIR

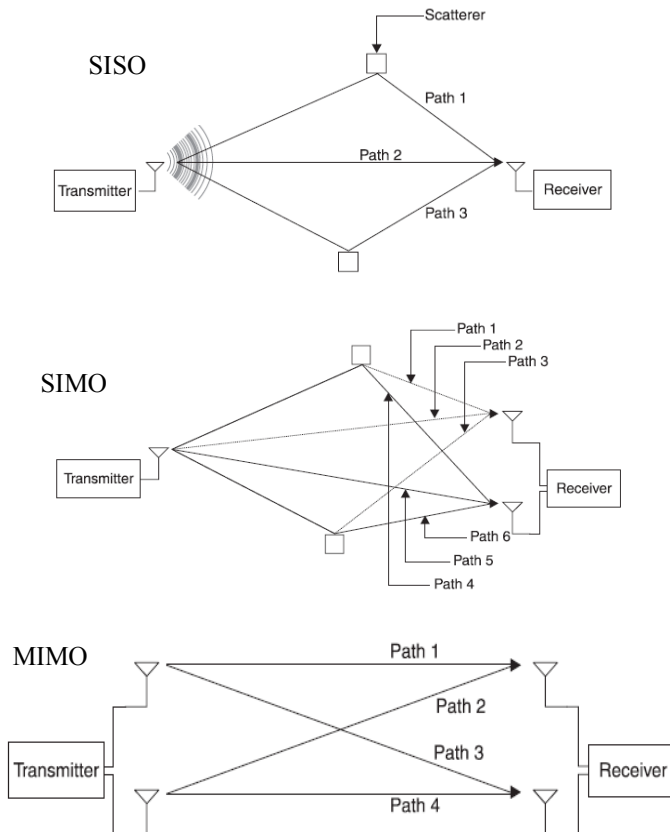
Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut:

1. Memodelkan kanal MIMO pada frekuensi 60 GHz di lingkungan dalam gedung.
2. Menganalisis kinerja dan kapasitas sistem komunikasi MIMO pada frekuensi 60 GHz di lingkungan dalam gedung.

G. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

1. MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)

MIMO mempunyai beberapa antena di sisi pemancar maupun penerima. Tidak seperti sistem antena sebelumnya *Single Input Single Output* (SISO) dan *Single Input Multiple Output* (SIMO) yang rentan terhadap keberadaan *multipath* karena menimbulkan *fading* yang dapat merugikan, Sebaliknya, MIMO justru bekerja sangat baik pada komponen *multipath*.

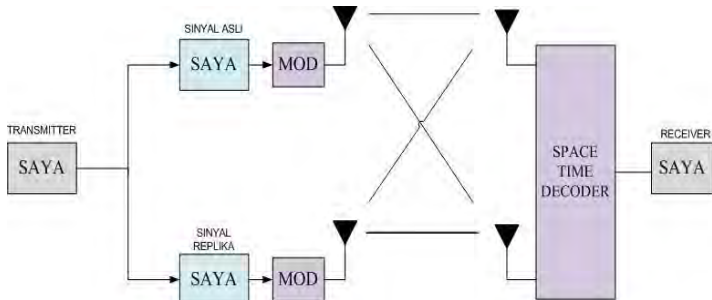


Gambar 1. SISO, SIMO, dan MIMO [1]

Dengan menggunakan sistem MIMO kita dapat menggabungkan sinyal yang diterima oleh masing-masing antenna, sehingga sinyal pada sisi penerima lebih kuat (*receive-diversity*). Sedangkan peningkatan jumlah antenna pada sisi pemancar berfungsi untuk melawan timbulnya *multipath fading* (*transmit-diversity*). MIMO dapat meningkatkan jumlah informasi yang ditransmisikan dengan mengirim beberapa sinyal pada kanal dengan *bandwidth* yang sama. [1]

2. Teknik MIMO

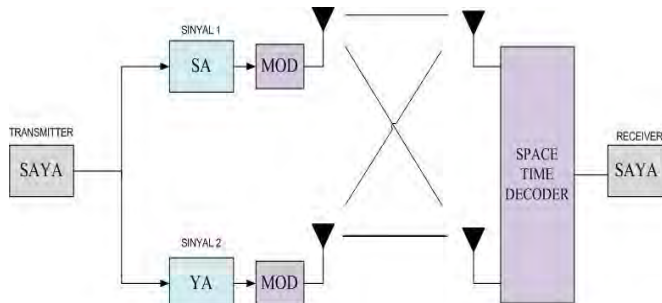
2.1.1 *Spatial Multiplexing*



Gambar 2. *Spatial Multiplexing*

Teknik *spatial multiplexing* bertujuan untuk meningkatkan kapasitas kanal dengan cara memecah aliran data secara paralel sesuai dengan jumlah antena *transmitter* pada waktu yang sama. *Spatial Multiplexing* juga dapat meningkatkan *data-rate*, semakin banyak jumlah antena maka semakin tinggi pula *data-ratenya*. Pada teknik ini juga terdapat saluran *feedback* dari antena penerima ke antena pengirim untuk mendapatkan kapasitas kanal yang maksimal.

2.1.2 *Spatial Diversity*



Gambar 3. *Spatial Diversity*

Teknik *spatial diversity* bertujuan untuk meningkatkan kualitas sinyal sehingga dapat meningkatkan SNR. Sinyal informasi asli dan beberapa replika sinyal (replika dari sinyal asli) dikirim melalui beberapa antena yang berbeda dengan menggunakan *coding* yang berbeda pula sehingga keandalannya lebih terjamin. *Spatial diversity* dapat meningkatkan SNR dengan cara mengurangi *fading* dan dapat meningkatkan kualitas sinyal dengan cara memanfaatkan teknik *diversity* pada antena pengirim dan penerima.

3. Model TSV (Triple Saleh Valenzuela) untuk Lingkungan Indoor

Model kanal *indoor* dinilai sulit karena banyaknya jumlah penghalang, variasi tata ruang pada gedung, dan juga pergerakan manusia di dalamnya. Model Triple Saleh Valenzuela (TSV) merupakan gabungan dari model Saleh-Valenzuela (S-V) dan model two-path. Respon impuls memberikan informasi dari power relatif sinar pertama dengan komponen sinyal yang diterima terakhir. Faktor amplitude pada respon impuls dalam model TSV ditentukan oleh jarak antara posisi perangkat millimeter dan ketinggian dari antena. Ketidakpastian dan tingginya kerentanan posisi perangkat dan penyebab *fading* dimodelkan oleh TSV dengan variable-variabel acak yang dihasilkan oleh Poisson dan distribusi Laplace. [2]

CIR (*Complex Impulse Response*) pada model TSV seperti berikut :

$$h(t) = \beta \delta(t) + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_{l,m} \delta(t - T_l - \tau_{l,m}) \delta(\varphi - \psi_l - \psi_{l,m})$$

dimana

β adalah komponen gelombang langsung yang memegang informasi tentang ketinggian antena pemancar dan penerima, jarak antar antena, koefisien refleksi dan panjang gelombang dari frekuensi pusat.

$\alpha_{l,m}$ adalah amplitudo kompleks dari masing-masing sinyal

t adalah waktu, T_l waktu delay dari cluster ke l

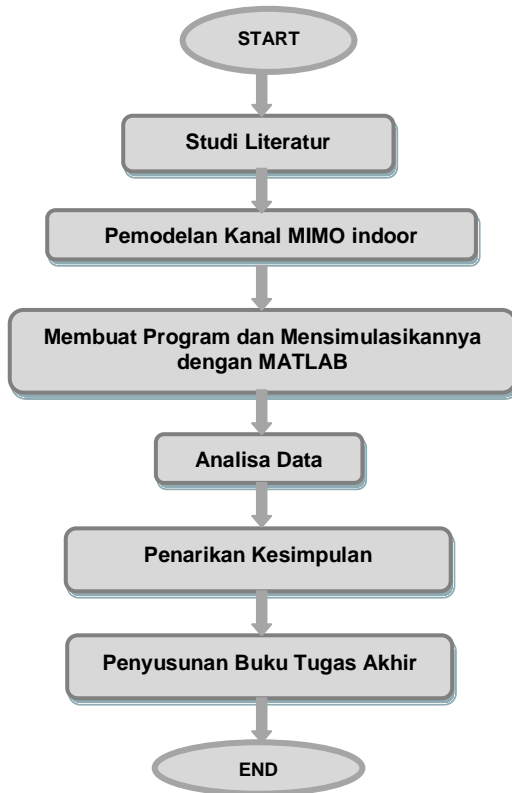
$\tau_{l,m}$ adalah waktu delay dari sinyal ke m pada cluster ke l

φ_l adalah sudut kedatangan dari cluster ke l , $\psi_{l,m}$ adalah sudut kedatangan sinyal ke m pada cluster ke l

Persamaan di atas merupakan modifikasi dari model Saleh Valenzuela. Komponen gelombang langsung menggunakan model *two-path* karena dapat mengatasi *fading* yang disebabkan oleh pergerakan perangkat. [3]

H. METODOLOGI

Metode yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah :



Gambar 4. Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

1. Studi literatur materi yang mendukung analisis MIMO yang meliputi :
 - Mempelajari tentang pengertian, sistem dan pemodelan MIMO.
 - Konfigurasi, arsitektur, dan karakteristik dari antena pengirim (Tx) dan penerima (Rx).
 - Performansi dan Kinerja MIMO di dalam ruangan .
 - Keunggulan MIMO 60GHz dan karakteristiknya.
 - Mempelajari persamaan dari model kanal Triple Saleh Valenzuela.
 - Mempelajari program matlab yang berkaitan dengan MIMO.
2. Pemodelan kanal MIMO indoor
 - Membuat *layout* ruangan yang akan dipakai dan disimulasikan.
 - Menentukan jarak, letak, dan parameter antena pengirim serta penerima.
 - Mencari bentuk sistematis dan memodelkan kanal MIMO *indoor* berdasarkan *layout* yang telah direncanakan.
3. Membuat Program dan Simulasi
Membuat program dan mensimulasikan model kanal yang di dapat dengan matlab.
4. Analisis Data
Analisis data berdasarkan hasil yang diperoleh dengan cara membandingkan BER dari antena MIMO 2x2 dan 4x4.
5. Penarikan Kesimpulan
Kesimpulan diperoleh dari hasil analisis yang telah dilakukan selama pengerjaan tugas akhir.
6. Penyusunan Buku Laporan

I. JADWAL KEGIATAN

No	Kegiatan	I				II				III				IV			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Studi Literatur	■	■	■	■	■	■										
2	Pemodelan Kanal MIMO indoor				■	■	■	■									
3	Membuat Program dan Simulasi							■	■	■							
4	Analisis Data									■	■	■	■				
5	Penarikan Kesimpulan											■	■	■			
6	Penyusunan Buku Laporan													■	■	■	■

J. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Costa, Nelson dkk. 2010. *Multiple-Input Multiple-Output Channel Models*. Canada : Wiley
- [2] Kirthiga, S. ; Jayakumar, M.. “Performance and Capacity analysis of MIMO system at 5 GHz and 60GHz in Indoor Environment”. IEEE jurnal, November 2012
- [3] Manojna, D.S.. “Study of 2x2 Spatial Multiplexed System in 60 GHz Indoor Environment”. IEEE jurnal, Juli 2011

Halaman ini sengaja dikosongkan