

ANALISA KAPASITAS PADA SISTEM MIMO-OFDMA UNTUK ARAH DOWNLINK

Andi Zulfikar¹, Rina Puji Astuti², Budi Prasetya³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro IT Telkom, Bandung

¹andi_itttelkom@yahoo.com, ²rpa@itttelkom.ac.id, ³bpy@stttelkom.ac.id

Abstrak

Salah satu skema MIMO adalah *spatial multiplexing* yang menawarkan peningkatan *datarate*. Prinsipnya *transmitter* akan mengirimkan sinyal yang berbeda pada setiap cabang antenna *transmit* secara simultan. Di kanal sinyal tersebut akan bercampur dan masing-masing antenna *receive* akan menerima sinyal yang bercampur ini, sehingga di *receiver* diperlukan *MIMO Detection* untuk memperoleh kembali sinyal yang sebenarnya yang dikirim oleh *transmitter*.

Teknik untuk mewujudkan sistem komunikasi *wireless* yang *high datarate* dapat ditempuh dengan menggunakan modulasi *multicarrier* OFDM, dimana pada OFDM efek kanal *frequency selective fading* akan dirasakan *flat fading* oleh tiap *subcarrier*-nya. Untuk teknik akses jamaknya digunakan OFDMA yang mana pada sistem OFDMA menggunakan OFDM sebagai teknik modulasinya. Di dalam sistem OFDM hanya *single user* yang dapat *transmit* pada semua *subcarrier* sedangkan pada OFDMA *multiple user* dapat *transmit* secara bersamaan pada *subcarrier* yang berbeda tiap simbol OFDM.

Pada Tugas Akhir ini dilakukan analisa kapasitas kanal sistem MIMO-OFDMA yaitu kapasitas kanal BTS pada 1 sektor dalam 1 *cell* dan pada kondisi CSIR atau penerima tahu kondisi kanal. Standard yang digunakan adalah IEEE 802.16e dan kondisi kanal bersifat *multipath rayleigh fading* dan AWGN. Dalam perhitungan kapasitas kanal dilakukan pendekatan dengan teknik SVD.

Abstract

Spatial multiplexing is one of the MIMO schemes that offers the data rate increment. The basic idea, is that, the transmitter is going to transmit the different signal at it's every own branch simultaneously. During the period in the channel, the signal would be blended and each of antennas at the receiving side will receive this., thus the MIMO detection is required to regain the actual signal sent by the transmitter.

To realize the high data rate wireless communication system, it could be achieved by utilizing the OFDM multicarrier modulation technique, due to in OFDM, the selective frequency fading channel will be treat as a flat fading in it's every single subcarrier. For multiple acces technique, OFDMA will be employed. In OFDM system only one user is able to transmit at whole subcarrier, meanwhile OFDMA did better which allowed multiple user to transmit simultaneously at the different subcarrier.

In this final project, channel capacity of MIMO-OFDMA system would be analyzed and channel capacity that intent to be analyzed is that BTS channel capacity for 1 sector in 1 cell at the CSIR condition, on the other hand, the receiving side known the channel condition. The standard used is IEEE 802.16e and the channel condition is multipath rayleigh fading and AWGN. The calculation of channel capacity is using SVD technique approach.

The result of simulation shows that the more user and by MIMO enhancement technique, the channel capacity obtained will be higher too. While at the condition of randomly user speed, the influence will not be felt or it did not influence the channel capacity at all. The enhancement of MIMO technique is also made the histogram the singular value at SVD channel H is increased, where the singular valuer is proportionally straight with the channel capacity.

Keywords: Capacity, MIMO-OFDMA, SVD, Channel State Information Receiver (CSIR).

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi informasi menuntut sistem komunikasi *wireless digital* untuk menyediakan layanan data kecepatan tinggi (*high datarate*) dengan QoS yang *reliable*.

Teknik yang dapat digunakan untuk menyediakan *high datarate* adalah teknik modulasi *multicarrier* OFDM. Konsep dari OFDM adalah membagi *data rate* sinyal informasi *wideband* menjadi deretan data paralel dengan *data rate* yang lebih rendah sehingga akan didapatkan deretan paralel sinyal dengan *data rate* rendah (*narrowband*), kemudian data-data paralel tersebut dimodulasi dengan *subcarrier* yang saling ortogonal^[1]. Hal ini merupakan salah satu keuntungan dari penggunaan OFDM, karena kanal yang semula bersifat *frequency*

selective fading akan dirasakan seperti kanal *flat fading* oleh masing-masing *subcarrier*, sehingga *distorsi* sinyal akibat perlakuan kanal *multipath fading* menjadi berkurang^[1].

OFDMA merupakan teknik akses jamak yang berdasarkan OFDM sebagai teknik modulasinya. Di dalam sistem OFDM hanya *single user* yang dapat *transmit* pada semua *subcarrier* sedangkan pada OFDMA *multiple user* dapat *transmit* secara bersamaan pada *subcarrier* yang berbeda tiap simbol OFDM^[2]. Pada sistem OFDMA, semakin banyak user yang mengakses maka kapasitas kanal yang dihasilkan juga akan semakin besar^[2]. Salah satu standard pada sistem OFDMA dan digunakan pada Tugas Akhir ini adalah IEEE 802.16e^{[1][3]}.

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) merupakan penggunaan banyak antenna di *transmitter* dan *receiver*. Dengan teknik MIMO dapat meningkatkan performansi^[4] dan kapasitas sistem komunikasi *wireless*^[2]. Peningkatan kapasitas terjadi karena dengan MIMO akan menghasilkan *independent channel* yang jumlahnya tergantung dari antenna pemancar dan penerima. Skema MIMO yang digunakan adalah *spatial multiplexing* yang dapat meningkatkan data rate sistem^[4].

Pada Tugas Akhir ini akan dilakukan analisa kapasitas sistem MIMO-OFDMA pada kondisi penerima tahu kanal atau CSIR (*Channel State Information Receive*) untuk arah *downlink*. Kapasitas yang dimaksud disini adalah Kapasitas kanal dari BTS (*Base Transceiver Station*).

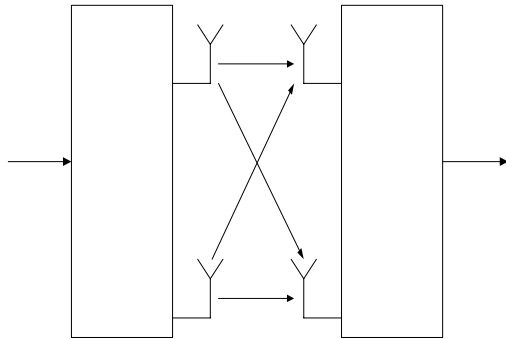
2. Dasar Teori

2.1 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

MIMO merupakan sistem yang menggunakan *multi* antenna pada bagian pengirim dan penerima. Teknik MIMO mampu memberikan *diversity gain* dan *multiplexing gain*.

Diversity gain dapat dicapai dengan menerapkan teknik diversitas pada sistem komunikasi *wireless*. Prinsipnya, diversitas mengirimkan beberapa replika sinyal informasi pada kanal *independent fading*, sehingga di *receiver* minimal ada satu sinyal yang tidak mengalami *fading* terburuk.

Multiplexing gain dapat dicapai dengan menggunakan *spatial multiplexing* atau *space division multiplexing* (SDM) pada sinyal yang akan dikirim.



Gambar 1. MIMO dengan skema *Spatial Multiplexing*

Prinsip dasar *Spatial Multiplexing* yaitu simbol *stream* yang akan dikirim dipecah menjadi beberapa paralel simbol *stream* yang kemudian ditransmisikan secara simultan dengan *bandwidth* yang sama pada masing-masing antenna, sehingga teknik ini memberikan peningkatan data rate.

2.2 MIMO deteksi (*Zero Forcing*)

Prinsip dasar *zero forcing* adalah masing-masing *substream* diyakini sebagai sinyal yang diinginkan, sedangkan sinyal lainnya dianggap sebagai penginterferensi. *Nulling of interferers* dilakukan

dengan memberikan pembobotan secara *linear* terhadap sinyal yang diterima, sehingga semua *interferers* dibatalkan. Untuk *Zero forcing, nulling of interferers* dapat dilakukan dengan memilih bobot vektor \underline{d}_i , $i = 1, 2, \dots, M_T$, sebagai berikut :

$$\underline{w}_i^T \underline{h}_j = \begin{cases} 0, & j \neq i \\ 1, & j = i \end{cases} \quad (1)$$

di mana T melambangkan operasi *transpose* dan j menyatakan kolom ke- j dari matriks kanal \bar{H} . Dari persamaan (1), *nulling of interferers* melakukan proses pe-nol-an jika indeks bobot tidak sama dengan indeks antenna sinyal kirim.

$$\underline{d}_i = \underline{w}_i^T \underline{y} \quad (2)$$

Berdasarkan hal di atas, maka proses yang dilakukan adalah mencari vektor bobot yang memiliki indeks yang sama dengan indeks antenna kirim, dilakukan dengan mencari matriks \bar{D} , seperti berikut :

$$\bar{D} \cdot \bar{H} = \bar{I} \quad (3)$$

$$\bar{D} = \bar{H}^{-1}$$

di mana \bar{D} merepresentasikan *linear processing* di penerima. Baris ke- i dari \bar{D} adalah sama dengan *transpose* pada vektor bobot ke- i dari \underline{d}_i , dan \bar{I} adalah matriks identitas. Jika \bar{H} bukan matriks kuadrat, maka \bar{D} adalah *pseudo-inverse* \bar{H} .

$$\bar{D} = \bar{H}^+ \quad (4)$$

$$\bar{D} = (\bar{H}^* \bar{H})^{-1} \bar{H}^*$$

Di mana $*$ *transpose konjugate*, $+$ *pseudo inverse*. Sehingga \underline{s} dapat diestimasi,

$$\hat{\underline{s}} = \bar{D} \cdot \underline{x} = \bar{H}^+ \cdot \underline{y} \quad (5)$$

Dan masing-masing elemen \underline{s} ke- i dapat diestimasi menggunakan persamaan di atas:

$$\hat{\underline{s}}_i = \bar{H}_i^+ \cdot \underline{y} \quad (6)$$

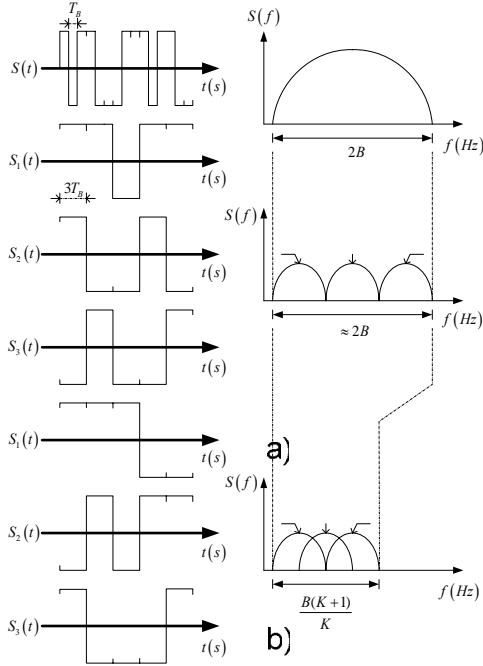
di mana \bar{H}_i^+ menyatakan baris ke- i dari \bar{H}^+ dan \underline{y} adalah sinyal terima.

Algoritma *zero forcing* mensyaratkan kondisi kanal diketahui *receiver* sehingga dapat dilakukan proses *pseudoinverse* kanal MIMO.

2.3 OFDM

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) merupakan teknik modulasi *multicarrier*, dimana antar *subcarrier* satu dengan yang lain saling ortogonal. Karena sifat ortogonalitas

ini, maka antar *subcarrier* yang berdekatan bisa dibuat *overlapping* tanpa menimbulkan efek *intercarrier interference* (ICI). Hal ini akan membuat sistem OFDM mempunyai efisiensi spektrum yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan teknik modulasi *multicarrier* konvensional, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.



Gambar 2. Teknik Modulasi (a) *Single carrier* (b) *Multi carrier* (c) OFDM

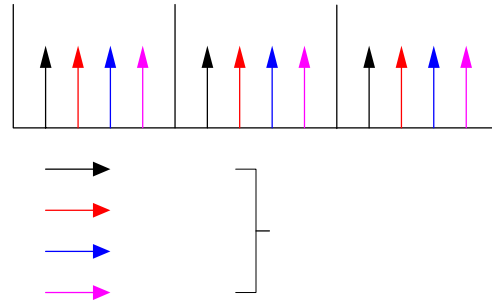
Konsep dari OFDM adalah membagi data *rate* sinyal informasi *wideband* menjadi deretan data paralel dengan data *rate* yang lebih rendah sehingga akan didapatkan deretan paralel sinyal dengan data *rate* rendah (*narrowband*), kemudian data-data paralel tersebut dimodulasi dengan *subcarrier* yang saling orthogonal.

2.4 OFDMA

OFDMA merupakan teknik akses jamak yang berdasarkan OFDM sebagai teknik modulasinya atau sering disebut juga sebagai *multiuser* OFDM. Di dalam sistem OFDM hanya *single user* yang dapat transmit pada semua *subcarrier* sedangkan pada OFDMA *multiple user* dapat transmit secara bersamaan pada *subcarrier* yang berbeda tiap simbol OFDM. OFDMA merupakan penggabungan FDMA dan TDMA. *User* pada OFDMA dibedakan dari frekuensi *subcarrier* yang dipakai seperti pada FDMA dan ditempatkan pada *time slot-time slot* yang berbeda dalam satu frame seperti pada TDMA. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini,

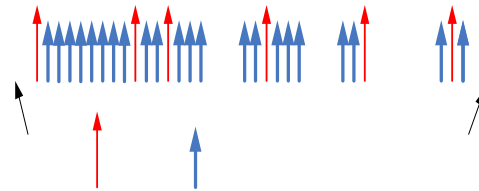


Gambar 3. Sistem OFDM



Gambar 4. Sistem OFDMA

Pada sistem OFDMA, tiap-tiap *subcarrier* akan dikelompokkan menjadi beberapa group, yang disebut subkanal, sehingga 1 subkanal terdiri dari beberapa *subcarrier*, tetapi *subcarrier* tersebut tidak harus saling berdampingan. Salah satu teknik subkanalisasi adalah FUSC (*Fully Usage of Subcarriers*) yang mana pilot *subcarrier* dialokasikan terlebih dahulu atau ditentukan dulu posisinya pada keseluruhan spektrum, lalu *subcarrier* yang lainnya menjadi data *subcarrier* dan dibagi menjadi beberapa subkanal.



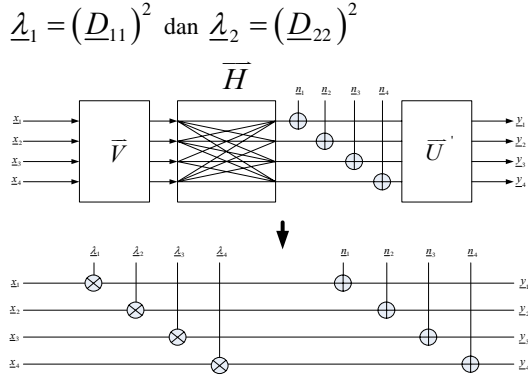
Gambar 5. Teknik Subkanalisasi secara FUSC

2.5 MIMO berbasis SVD

SVD bisa diimplementasikan untuk sistem MIMO. Sistem MIMO berbasis SVD ini menggunakan informasi kanal dalam menghitung nilai SVD dari matriks kanalnya. Secara matematis, *Singular Value Decomposition* (SVD) dari matriks \vec{H} adalah $\vec{H} = \vec{U} \vec{D} \vec{V}'$, dengan (') menotasikan *hermitian transpose* (*Complex Conjugate*), dimana \vec{U} dan \vec{V} adalah *unitary matrix* ($\vec{U} \vec{U}' = \vec{V} \vec{V}' = I$) dan \vec{D} adalah *diagonal matrix* yang elemen matrixnya adalah bilangan real positif. Misalkan \vec{H} adalah matriks 2x2 dimana $\vec{H} = \begin{bmatrix} \vec{H}_{11} & \vec{H}_{12} \\ \vec{H}_{21} & \vec{H}_{22} \end{bmatrix}$, maka hasil dari SVD

(\vec{H}) adalah :

$$\vec{H} = \begin{bmatrix} \vec{U}_1 & \vec{U}_2 \\ \vec{U}_1 & \vec{U}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{D} & 0 \\ 0 & \vec{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_1' & \vec{V}_2' \\ \vec{V}_1' & \vec{V}_2' \end{bmatrix} = \vec{U} \vec{D} \vec{V}' \quad (7)$$



Gambar 6. Skema MIMO berbasis SVD

Jadi, SVD berfungsi untuk mendekomposisi atau menguraikan matrix H menjadi matrix \bar{U} , \bar{D} dan \bar{V} . Elemen matrix \bar{D} biasanya disebut *singular value* dari matrix \bar{H} . Elemen-elemen dari matrix \bar{D} merupakan akar kuadrat dari nilai eigen yang positif dari matrix $\bar{H}\bar{H}^H$ atau $\bar{H}^H\bar{H}$. Dengan menggunakan SVD, sistem yang awalnya MIMO sekarang seolah-olah diubah menjadi sebuah sistem yang ekuivalen (beberapa sistem SISO yang paralel).

2.6 Kapasitas Kanal MIMO

Kapasitas kanal merupakan data *rate* per unit *bandwidth* yang dapat dilewatkan secara andal melalui kanal MIMO. Shannon menurunkan kapasitas kanal ternormalisasi (kapasitas per satuan *bandwidth*):

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad \text{bps/Hz} \quad (8)$$

Dimana ρ adalah *signal-to-noise ratio* (SNR) pada penerima. Jika \underline{x} vektor sinyal yang dikirimkan dan \underline{y} adalah vektor sinyal yang diterima, maka kapasitas kanal merupakan *maximal mutual information* antara vektor \underline{x} dan vektor \underline{y} :

$$C = \max_{f(s)} \mathcal{I}(\underline{x}; \underline{y}) \quad (9)$$

dimana $f(s)$ adalah distribusi peluang vector \underline{x} .

$$\begin{aligned} \mathcal{I}(\underline{x}; \underline{y}) &= \mathcal{H}(\underline{y}) - \mathcal{H}(\underline{y} | \underline{x}) \\ &= \mathcal{H}(\underline{y}) - \mathcal{H}((\bar{H}\underline{x} + \underline{n}) | \underline{x}) \\ &= \mathcal{H}(\underline{y}) - \mathcal{H}(\underline{n} | \underline{x}) \\ &= \mathcal{H}(\underline{y}) - \mathcal{H}(\underline{n}) \end{aligned} \quad (10)$$

Pada baris ke-2 persamaan \bar{H} diasumsikan konstan (entropi nol) selama durasi pengiriman seluruh vektor \underline{x} . Karena vektor kirim \underline{x} dan vektor derau \underline{n} diasumsikan saling bebas maka didapatkan $\mathcal{I}(\underline{x}; \underline{y}) = \mathcal{H}(\underline{y}) - \mathcal{H}(\underline{n})$.

Memaksimalkan mutual information $\mathcal{I}(\underline{x}; \underline{y})$ artinya harus memaksimalkan $\mathcal{H}(\underline{y})$. Differential entropy $\mathcal{H}(\underline{y})$ akan maksimal bila \underline{y} adalah ZMCSCG sehingga \underline{x} harus sebuah vektor ZMCSCG. Differential entropy $\mathcal{H}(\underline{y})$ akan maksimal bila \underline{y} adalah ZMCSCG sehingga \underline{x} harus sebuah vektor ZMCSCG.

$$\begin{aligned} C &= \mathcal{H}(\underline{y}) - \mathcal{H}(\underline{n}) \\ &= \log_2(\det(\pi e R_{yy})) - \log_2(\det(\pi e R_{nn})) \end{aligned} \quad (11)$$

$R_{yy} = E[\underline{y}\underline{y}^H]$, dimana $\underline{y} = \sqrt{\frac{E_s}{M_T}} \underline{H}\underline{s} + \underline{n}$ dan memenuhi persamaan

$$R_{yy} = \frac{E_s}{M_T} \underline{H} R_{ss} \underline{H}^H + N_o \underline{I}_{M_r}$$

$$C = \log_2(\det(\pi e (\frac{E_s}{M_T} \underline{H} R_{ss} \underline{H}^H + N_o \underline{I}_{M_r}))) - \log_2(\det(\pi e \{N_o \underline{I}_{M_r}\}))$$

$$C = \log_2 \left(\det \left(\frac{\frac{E_s}{M_T} \underline{H} R_{ss} \underline{H}^H + N_o \underline{I}_{M_r}}{N_o \underline{I}_{M_r}} \right) \right)$$

$$C = \log_2 \left\{ \det \left(\frac{E_s}{M_T N_o} \underline{H} R_{ss} \underline{H}^H + \underline{I}_{M_r} \right) \right\} \quad (12)$$

Bila sifat dari kanal tidak dikenali pada transmitter maka $R_{ss} = \underline{I}_{M_t}$ yang berarti sinyal-sinyal independent dan mempunyai daya yang sama pada tiap-tiap antenna transmit. Maka kapasitas kanal menjadi,

$$C = \log_2 \left\{ \det \left(\underline{I}_{M_r} + \frac{E_s}{M_T N_o} \underline{H} \underline{H}^H \right) \right\} \quad (13)$$

Dengan melakukan proses dekomposisi matriks kanal \bar{H} dengan teknik *Singular Value Decomposition* (SVD) persamaan tersebut menjadi:

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{E_s}{N N_0} \lambda_i \right) \quad (14)$$

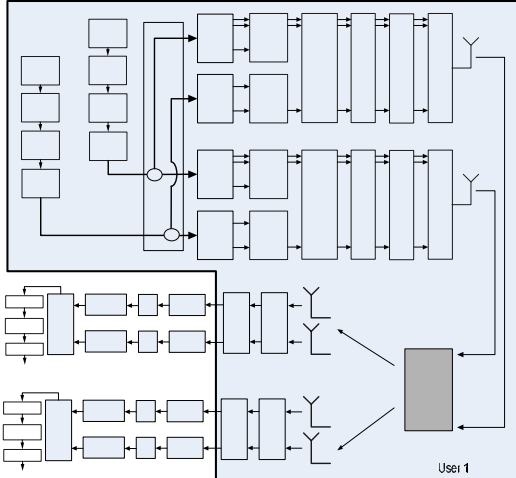
dimana λ_i ($i=1,2,\dots,r$) adalah nilai eigen matriks $\bar{H}\bar{H}^H$ dan r adalah *rank* kanal. Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa kapasitas kanal MIMO adalah jumlah kapasitas r kanal SISO, masing-masing mempunyai *power gain* λ_i ($i=1,2,\dots,r$) dan daya transmit E_s / N . Untuk kondisi transmitter tidak

mempunyai pengetahuan tentang kanal artinya untuk setiap sinyal-sinyal independen mendapat energi yang sama.

3. Model Sistem

3.1 Sistem MIMO-OFDMA Untuk Analisa Kapasitas Kanal

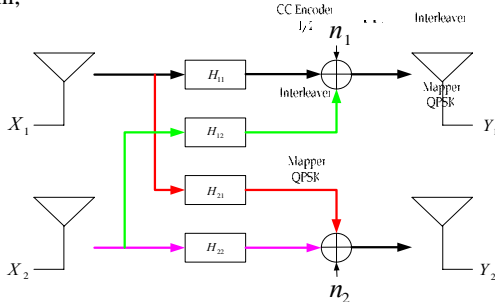
Adapun blok sistem MIMO-OFDMA ditunjukkan pada gambar dibawah ini,



Gambar 7. Blok Diagram MIMO-OFDMA

3.2 Pemodelan Kanal MIMO

Secara umum pemodelan kanal MIMO pada Tugas Akhir ini ditunjukkan pada gambar di bawah ini,

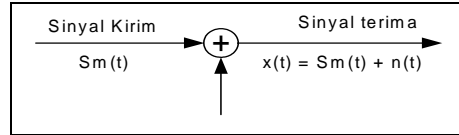


Gambar 8. Model Kanal MIMO 2x2

Untuk sistem MIMO 2x2 kombinasi kanal yang dihasilkan ada 4, yaitu \bar{H}_{11} , \bar{H}_{12} , \bar{H}_{21} dan \bar{H}_{22} . \bar{H}_{11} , \bar{H}_{12} disini maksudnya kanal dihasilkan oleh antenna TX 2 menuju antenna RX 1 dan sama halnya untuk kanal \bar{H}_{21} , \bar{H}_{22} . Untuk system MIMO 4x4, teknik pemodelan kanalnya sama dengan system MIMO 2x2.

3.2.1 Additive White Gaussian Noise (AWGN)

Pemodelan dari kanal Additive White Gaussian Noise diperlihatkan gambar 9. yaitu :



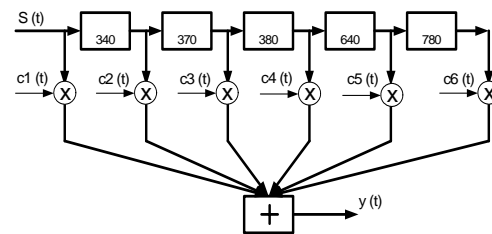
Gambar 9. Pemodelan kanal AWGN

Didefinisikan sinyal informasi $S_m(t)$ ditransmisikan pada interval $0 \leq t \leq T$, maka sinyal terima setelah terdistorsi noise adalah :

$$r(t) = s_m(t) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (15)$$

3.2.2 Kanal Multipath Rayleigh Fading

Pada simulasi digunakan model kanal multipath fading Rayleigh dengan 6 path delay, seperti terlihat pada gambar 10.



Gambar 10. Kanal multipath fading Rayleigh dengan 6 path delay

Dimana :
 $S(t)$ = sinyal yang dipancarkan pengirim.
 $c_i(t)$ = variabel dengan distribusi rayleigh $i=1,2,3,\dots,6$
 $y(t)$ = Penjumlahan sinyal terima di antenna, dimana tiap lintasan telah mengalami delay multipath.
 $c_i(t)$ merupakan variabel Rayleigh (channel gain) yang diangkitkan dari dua variabel acak Gaussian dengan mean nol dan variansi σ^2 . Generator pembangkit ini dibuat dengan pemodelan Jakes.

3.3 Parameter OFDMA

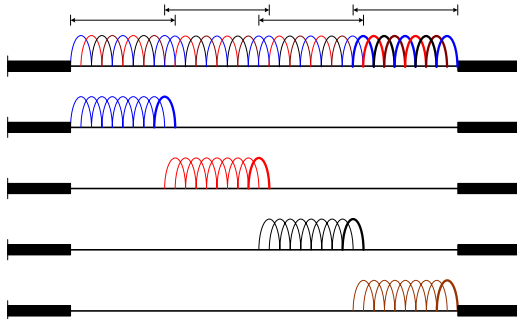
Standar yang digunakan dalam analisa Kapasitas kanal adalah IEEE 802.16e. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel di bawah ini,

Tabel 3.3. Parameter OFDMA IEEE 802.16e

Parameter	Nilai
Bandwith (MHz)	5
FFT size	512
Spasi antar subcarrier (KHz)	10.94
Periode simbol (μ S)	91,4
Cyclic prefix overhead	1/8
Jumlah pilot subcarrier	42
Jumlah data subcarrier	384

Jumlah <i>guardband subcarrier</i>	86
Subkanalisasi	FUSC
<i>Guard Time</i> (μS)	11,4
Durasi simbol OFDMA (μS)	102,9
Frekuensi untuk aplikasi <i>mobile</i> (GHz)	2 - 6

Untuk mekanisme subkanalisasi yang digunakan pada arah *downlink* adalah FUSC (*Fully Usage of Subcarriers*) yang dapat diilustrasikan sebagai berikut :



Gambar 11. Model subkanalisasi FUSC untuk *downlink*

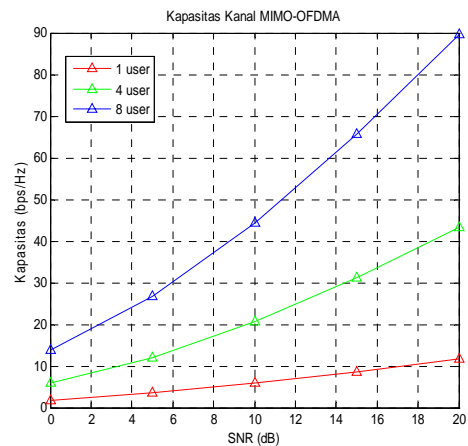
Berdasarkan gambar diatas dapat dilihat bahwa keseluruhan spektrum frekuensi pada *bandwidth* yang diberikan dibagi-bagi menjadi beberapa subkanal. Tiap subkanal terdiri dari beberapa *subcarrier* yang berdampingan saling orthogonal, merupakan data dan pilot *subcarrier*, sedangkan *guard subcarrier* terletak di ujung kanan kiri spektrum. Tiap subkanal yang berbeda dialokasikan untuk *user* yang berbeda.

4 Hasil Simulasi

4.1 Pengaruh Jumlah User Terhadap Kapasitas Kanal

Kapasitas kanal yang dianalisa adalah kapasitas kanal BTS dan sistem MIMO-OFDMA merupakan sistem *multiuser*. Penambahan jumlah *user* akan mempengaruhi besarnya kapasitas kanal^[2]. Dalam analisa pengaruh jumlah *user* terhadap kapasitas kanal, variasi jumlah *user* yang digunakan adalah 1 *user*, 4 *user* dan 8 *user*. Sistem MIMO-OFDMA yang dianalisa menggunakan konfigurasi antena MIMO 2x2 dan kecepatan *user* yang digunakan adalah *medium speed moving user*. Analisa sistem dilakukan dengan melihat grafik SNR terhadap

kapasitas kanal yang didapat dari hasil simulasi.



Gambar 12. Perbandingan Kapasitas Kanal Terhadap Jumlah User

Berdasarkan gambar 12, antara jumlah *user* dan kapasitas kanal berbanding lurus sehingga semakin banyak jumlah *user* maka kapasitas kanal yang didapatkan juga semakin besar^[2]. Kapasitas kanal BTS merupakan penjumlahan kapasitas kanal dari masing-masing *user*, sehingga jika terdapat peningkatan jumlah *user*, kapasitas kanal BTS akan meningkat. Untuk kasus jumlah *user* 4, kapasitas kanal BTS merupakan penjumlahan kapasitas kanal dari *User 1*, *user 2*, *user 3* dan *user 4* dan untuk kasus jumlah *user* 8, kapasitas kanal BTS merupakan penjumlahan kapasitas kanal dari *user 1*, *user 2*, *user 3*, *user 4*, *user 5*, *user 6*, *user 7* dan *user 8*. Dengan jumlah *user* 8, kapasitas kanal yang didapatkan lebih besar jika dibandingkan dengan jumlah *user* 1 dan jumlah *user* 4. Begitu pula untuk jumlah *user* 4, kapasitas kanal yang didapatkan lebih besar dari jumlah *user* 1 dan lebih kecil dari jumlah *user* 8. Untuk melihat lebih jelas perbedaan kapasitas kanal pada masing-masing jumlah *user* yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 1. Perbandingan Kapasitas Kanal Terhadap Jumlah User

Jumlah User	Kapasitas Kanal (bps/Hz)				
	SNR (dB)				
	0	5	10	15	20
1 user	1.80	3.50	5.80	8.56	11.60
4 user	5.93	11.98	20.59	31.23	43.21
8 user	13.90	26.79	44.41	65.76	89.60

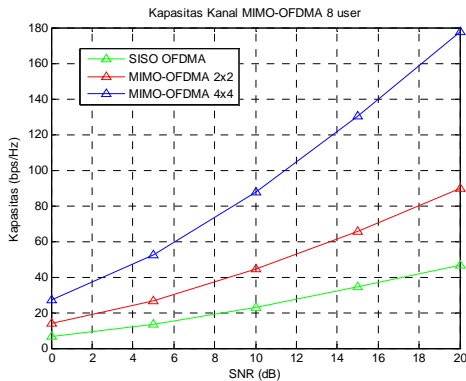
Berdasarkan tabel 1, untuk nilai SNR 5 dB sistem MIMO-OFDMA dengan 8 *user* mengalami peningkatan kapasitas kanal sebesar 14.8089 bps/Hz. terhadap sistem MIMO-OFDMA dengan 4 *user* dan begitupula dengan sistem MIMO-OFDMA dengan 4 *user* mengalami peningkatan kapasitas kanal sebesar 8.4807 bps/Hz terhadap sistem MIMO-OFDMA

dengan 1 *user*. Semakin besar SNR, maka kapasitas kanal yang didapatkan juga semakin besar dan peningkatan kapasitas kanal dari 1 *user* ke 4 *user* ataupun dari 4 *user* ke 8 *user* juga semakin besar.

4.2 Pengaruh Perubahan Jumlah Antena Terhadap Kapasitas Kanal

MIMO merupakan sistem yang menggunakan *multi* antena pada bagian pengirim dan penerima. Dalam analisa pengaruh perubahan jumlah antena terhadap kapasitas kanal, jumlah user dan kecepatan user dibuat tetap sedangkan teknik MIMO yang digunakan berubah-ubah. Terdapat 3 sistem yang dibandingkan yaitu, SISO-OFDMA, MIMO-OFDMA 2x2 dan MIMO-OFDMA 4x4. Jumlah *user* yang digunakan adalah 4 *user* dan kecepatan *user* adalah *medium speed moving user*. Kanal transmisi yang digunakan bersifat *multipath rayliegh fading* dan AWGN. Analisa sistem dilakukan dengan melihat grafik SNR terhadap kapasitas kanal yang didapat dari hasil simulasi.

Secara teori, peningkatan jumlah antena akan menyebabkan peningkatan kapasitas kanal^[10]. Hal ini sesuai dengan persamaan kapasitas kanal pada bab sebelumnya. Gambar 4.2 menunjukkan grafik besarnya kapasitas kanal yang didapatkan terhadap perubahan jumlah antena.



Gambar 13. Perbandingan Kapasitas Kanal Terhadap Perubahan Jumlah Antena

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan oleh gambar 13, konfigurasi MIMO-OFDMA 4x4 mempunyai kapasitas kanal yang paling besar jika dibandingkan dengan sistem MIMO-OFDMA 2x2 dan SISO-OFDMA. Dan begitupula berlaku untuk sistem MIMO-OFDMA 2x2 yang mana kapasitas kanal yang dihasilkan lebih besar dari sistem SISO-OFDMA. Berdasarkan hal diatas, maka semakin banyak jumlah antena yang digunakan maka kapasitas kanal yang dihasilkan juga semakin besar^[12]. Hal ini disebabkan karena dengan bertambahnya jumlah antena maka *parallel independent channel* yang terbentuk semakin banyak sehingga kapasitas kanal MIMO semakin meningkat. *Parallel independent channel* merupakan kapasitas kanal SISO sebanyak rank kanal yang dihasilkan. *Parallel independent channel* dihasilkan dari teknik SVD. Untuk melihat lebih jelas perbedaan

kapasitas kanal pada sistem MIMO-OFDMA 4x4, MIMO-OFDMA 2x2 dan SISO-OFDMA ditunjukkan pada tabel 4.2.

Tabel 2. Perbandingan Kapasitas kanal terhadap peningkatan jumlah antena

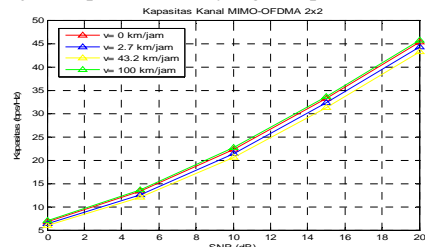
Sistem	Kapasitas Kanal (bps/Hz)				
	SNR (dB)				
	0	5	10	15	20
SISO	6.74	13.53	23.04	34.41	46.78
MIMO-OFDMA 2x2	13.90	26.79	44.41	65.76	89.60
MIMO-OFDMA 4x4	27.07	52.56	87.59	130.0	177.5

Berdasarkan tabel 2 pada SNR 5 dB, sistem dengan konfigurasi MIMO-OFDMA 4x4 mengalami peningkatan kapasitas kanal sebesar 25.7677 bps/Hz jika dibandingkan dengan MIMO-OFDMA 2x2 dan jika dibandingkan terhadap SISO-OFDMA mengalami peningkatan sebesar 39.0217 bps/Hz.

4.3 Pengaruh Pergerakan User Terhadap Kapasitas Kanal

Pada analisa ini, terdapat 4 kondisi *user* yaitu Statis (0 km/jam), Pejalan kaki (2.7 km/jam), *medium speed moving user* (43.2 km/jam) dan *high speed moving user* (100 km/jam). Sistem MIMO yang digunakan adalah MIMO-OFDMA 2x2 dengan jumlah *user* 4. Analisa sistem dilakukan dengan melihat grafik SNR terhadap kapasitas kanal yang didapat dari hasil simulasi.

Berdasarkan gambar 14 di bawah, kapasitas kanal yang didapatkan dari tiap-tiap kondisi *user* memberikan hasil yang tidak berbeda jauh. Grafik yang dihasilkan untuk kecepatan *user* 0 km/jam, 2.7 km/jam, 43.2 km/jam dan 100 km/jam saling berdekatan. Dan untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 3. Pada nilai SNR 5 dB, untuk kecepatan *user* 0 km/jam kapasitas kanal yang didapatkan 13.3212 dB, untuk kecepatan *user* 2.7 km/jam kapasitas kanal yang didapatkan 12.6135 dB, untuk kecepatan *user* 43.2 km/jam kapasitas kanal yang didapatkan 11.9850 dB dan untuk kecepatan *user* 100 km/jam kapasitas kanal yang didapatkan 13.6232 dB.



Gambar 14. Perbandingan Kapasitas Kanal Terhadap Pergerakan User

Karena dengan kecepatan *user* 0 km/jam, 2.7 km/jam, 43.2 km/jam dan 100 km/jam sudah membuat matriks kanal MIMO menjadi *full rank* maka semakin cepat pergerakan *user* tidak begitu berpengaruh terhadap kapasitas kanal.

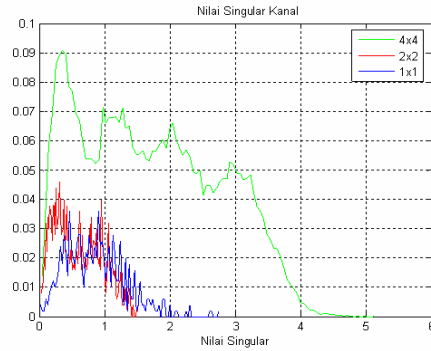
Tabel 3. Perbandingan Kapasitas Kanal Terhadap Pergerakan *User*

Kecepatan User (Km/jam)	Kapasitas Kanal (bps/Hz)				
	SNR (dB)				
	0	5	10	15	20
0	6.79	13.32	22.32	33.21	45.31
2.7	6.34	12.61	21.43	32.24	44.32
43.2	5.93	11.98	20.59	31.23	43.21
100	6.99	13.62	22.72	33.66	45.76

4.4 Pengaruh nilai *singular* pada SVD kanal \bar{H}

Pada analisa pengaruh nilai *singular* pada SVD kanal \bar{H} ada 3 jenis sistem yang akan dianalisa yaitu sistem SISO-OFDMA, MIMO-OFDMA 2x2 dan MIMO-OFDMA 4x4. Kecepatan *user* yang digunakan adalah 43.2 km/jam dan jumlah *user* 4. Analisa dilakukan dengan melihat perbandingan histogram dari OFDMA, MIMO-OFDMA 2x2 dan MIMO-OFDMA 4x4.

Nilai *singular* σ_i mempengaruhi besarnya kapasitas kanal. Dalam perhitungan kapasitas kanal terdapat nilai *eigen* λ_i , dimana nilai *eigen* λ_i merupakan kuadrat dari nilai *singular* σ_i dan nilai *singular* σ_i sendiri didapatkan dari teknik SVD (*Singular Value Decomposition*) kanal \bar{H} . Berdasarkan persamaan pada Bab II, kapasitas kanal berbanding lurus dengan nilai *eigen* λ_i . Dengan perbedaan teknik MIMO yang digunakan, maka nilai *singular* σ_i yang didapatkan juga bervariasi dan akan mempengaruhi besarnya kapasitas kanal.



Gambar 15. Histogram nilai *singular* sesuai dengan teknik MIMO yang digunakan

5. Kesimpulan

Berdasarkan analisa kapasitas kanal pada sistem MIMO-OFDMA, maka dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Semakin banyak jumlah user pada sistem MIMO-OFDMA maka kapasitas kanal yang didapatkan juga akan semakin besar. hal ini disebabkan karena kapasitas kanal yang dihitung merupakan kapasitas kanal BTS dimana kapasitas kanal BTS merupakan penjumlahan kapasitas kanal masing-masing user.
2. Dengan penggunaan jumlah antena yang lebih besar maka kapasitas kanal MIMO-OFDMA juga akan semakin besar. Dengan sistem MIMO-OFDMA 4x4, kapasitas kanal yang didapatkan merupakan kapasitas kanal yang paling besar jika dibandingkan dengan sistem MIMO-OFDMA 2x2 dan sistem SISO-OFDMA.
3. Semakin cepat pergerakan user, tidak terlalu mempengaruhi besarnya kapasitas kanal.
4. Nilai *singular* berbanding lurus dengan kapasitas kanal. Dengan peningkatan teknik MIMO yang digunakan, maka nilai *singular* yang didapatkan juga akan semakin besar.

6. Daftar Pustaka

- [1] Andrews, Jeffrey G., Arunabha Ghosh., dan Rias Muhammed, “*Fundamentals of WiMAX : Understanding Broadband Wireless Networking*”, Prentice Hall, 2007
- [2] Ian C. Wong, Zukang Shen, Jeffrey G. Andrews, Brian L. Evans, “*A Low Complexity Algorithm for Proportional Resource Allocation in OFDMA Systems*”, The University of Texas, Wireless Networking and Communications Group, Austin, Texas, 2004
- [3] WiMAX Forum, “*Mobile WiMAX - Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*”, 2006
- [4] Efendi, Rustam, “*Limited Feedback Precoding dan MIMO Spatial Multiplexing untuk Aplikasi*”, Tesis Program Pasca Sarjana

- STTTelkom, Bandung, 2007.
- [5] Hardianto, Fariz Tri. "*Analisis Performansi Algoritma Deteksi Bertingkat MIMO-OFDM Kanal Berkorelasi Pada Standar IEEE 802.16e*", Tugas Akhir Program Sarjana STTTelkom, Bandung, 2007.
- [6] Hamdan, "*Kajian Performansi Pengkodean Kanal Low Density Parity Check Code pada Sistem MIMO-OFDM*", Tesis Program Pasca Sarjana STTTelkom, Bandung, 2007.
- [7] Ruth, Emyana. "*Analisa dan Simulasi Sistem Orthogonal Frequency Division Multiple Acces (OFDMA) pada Standar Mobile WIMAX*", Tugas Akhir Program Sarjana STTTelkom, Bandung, 2008.
- [8] Sinaga, Boslem, "*Analisis Performansi Penggunaan Beamforming pada OFDMA 802.16e*", Tesis Program Pasca Sarjana STTTelkom, Bandung, 2008
- [9] Adriansyah, Nachwan Mufti, "*Diktat Kuliah Sistem Komunikasi Bergerak*", STT Telkom, Bandung, 2003.
- [10] Tjondronegoro, Suhartono. "*Space Time Block Coding untuk Wireless Communications*", ITB, Bandung, 2006.
- [11] WiMAX Forum, "*Mobile WiMAX - Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks*", 2006
- [12] www.mathworks.com/mimo.m