



Analisis Penerapan Teknik AMC dan AMS untuk Peningkatan Kapasitas Kanal Sistem MIMO-SOFDMA

Nur Andini¹, Rina Pudji Astuti², A. Ali Muayyadi³

¹S1 Teknik Telekomunikasi, ^{2,3}S2 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

^{1,2,3}Jalan Telekomunikasi No 1, Terusan Buah Batu, Bandung, Indonesia, 40257

Email korespondensi : nurandini@telkomuniversity.ac.id

Dikirim 01 Maret 2017, Direvisi 03 Mei 2017, Diterima 13 Mei 2017

Abstrak – Kapasitas kanal adalah parameter penting sistem komunikasi nirkabel. Suatu sistem komunikasi diharapkan mampu menyediakan kapasitas kanal yang tinggi. Sistem dengan *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) *antenna* mampu menyediakan kapasitas kanal yang tinggi. Pada penelitian ini, kinerja sistem MIMO diamati dengan penerapan *Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (SOFDMA). Teknik *Adaptive Modulation and Coding* (AMC) serta *Adaptive MIMO Switching* (AMS) juga diterapkan pada sistem ini. Jumlah *subcarrier* yang digunakan dalam SOFDMA tersebut yaitu 128 dan 2048. Kinerja sistem yang diamati yaitu kapasitas kanal dengan variasi kecepatan pengguna. Variasi pergerakan pengguna meliputi 0 km/jam dan 120 km/jam. Kapasitas kanal sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS dapat mencapai 419,5115 Mbps saat kecepatan pengguna sebesar 0 km/jam. Saat kecepatan pengguna sebesar 120 km/jam, kapasitas kanal sistem dapat mencapai 23,9820 Mbps.

Kata kunci – kapasitas kanal, MIMO, SOFDMA, AMC, AMS

Abstract - Channel capacity is important parameter of wireless communication system. Communication system should provide the high channel capacity. System with Multiple Input Multiple Output (MIMO) antenna can provide high channel capacity. In this research, MIMO system performance is observed using Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access (SOFDMA) implementation. The Adaptive Modulation and Coding (AMC) and Adaptive MIMO Switching (AMS) techniques are also implemented. The number of subcarrier on SOFDMA are 128 and 2048. The observed performance is channel capacity with various user velocities. The user velocity variation are 0 km/hr and 120 km/hr. The channel capacity of the system with AMC and AMS combination is up to 419.5115 Mbps when user velocity is 0 km/hr. When user velocity is 120 km/hr, channel capacity of the system is up to 23.9820 Mbps.

Keywords - channel capacity, MIMO, SOFDMA, AMC, AMS

I. PENDAHULUAN

Pada sistem komunikasi nirkabel terdapat dua hal penting dalam penentuan performansi sistem tersebut. Kedua hal tersebut adalah kualitas dan kapasitas sistem. Kualitas umumnya dinyatakan dalam *Signal to Noise Ratio* (SNR) maupun *Bit Error Rate* (BER) sedangkan kapasitas sistem umumnya dinyatakan dalam kapasitas kanal. Kapasitas kanal merupakan salah satu parameter penting dalam pengiriman informasi dari pengirim ke penerima. Saat ini suatu sistem komunikasi diharapkan mampu menyediakan kapasitas kanal yang tinggi dengan kualitas yang tetap terjaga. Salah satu teknik untuk meningkatkan

kapasitas kanal dari suatu sistem komunikasi adalah MIMO yang mana pada pengirim maupun penerima terdapat antena dengan jumlah lebih dari satu [1][2]. Peningkatan kapasitas kanal dari suatu sistem sebanding dengan peningkatan jumlah antena yang digunakan [3][4].

Untuk menjaga keseimbangan antara kapasitas kanal dan kualitas sistem komunikasi, teknik AMC dengan variasi teknik modulasi dan *channel coding* dapat diterapkan pada sistem tersebut. Penelitian terkait teknik AMC telah dilakukan khususnya penelitian mengenai penerapan teknik *Adaptive Modulation* (AM). Penerapan teknik AM

memungkinkan sistem untuk dapat mengubah teknik modulasi yang digunakan, sehingga sistem dapat menggunakan teknik modulasi dengan jumlah bit tiap simbol yang bervariasi. Semakin besar jumlah bit dalam tiap simbol, semakin besar juga nilai efisiensi spektral atau kapasitas kanal dari sistem [5][6]. Penelitian lainnya yaitu penerapan teknik AMC pada sistem OFDMA, penerapan teknik AMC dapat meningkatkan efisiensi spektral atau meningkatkan kapasitas kanal dari sistem [7].

Selain teknik AMC, teknik AMS dengan variasi skema MIMO juga dapat diterapkan untuk menjaga keseimbangan antara kapasitas kanal dan kualitas sistem komunikasi. Pada [8] dilakukan evaluasi penerapan kombinasi teknik AMS dan AM pada sistem MIMO-OFDM. Dengan adanya kombinasi teknik AMS dan AM pada sistem MIMO-OFDM ini, kecepatan data rata-rata dapat ditingkatkan hingga $\pm 0,5$ Mbps.

Pada penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap kapasitas kanal dari sistem MIMO dengan menerapkan teknik SOFDMA serta kombinasi teknik AMC dan AMS. Penerapan teknik SOFDMA ditujukan untuk menjaga performansi sistem dalam hal kualitas. Jumlah *subcarrier* yang digunakan dalam SOFDMA tersebut yaitu sebanyak 128 dan 2048 sesuai dengan kecepatan bergerak dari pengguna. Variasi *channel coding* yang digunakan yaitu *Convolutional Code* dan *Convolutional Turbo Code* sedangkan variasi teknik modulasi yang digunakan yaitu QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Selain itu variasi skema MIMO yang digunakan yaitu *Space Frequency Block Code* (SFBC) dan *Spatial Multiplexing* (SM). Kapasitas kanal diamati pada kondisi pengguna yang bergerak dengan kecepatan 0 km/jam dan 120 km/jam.

II. METODE PENELITIAN

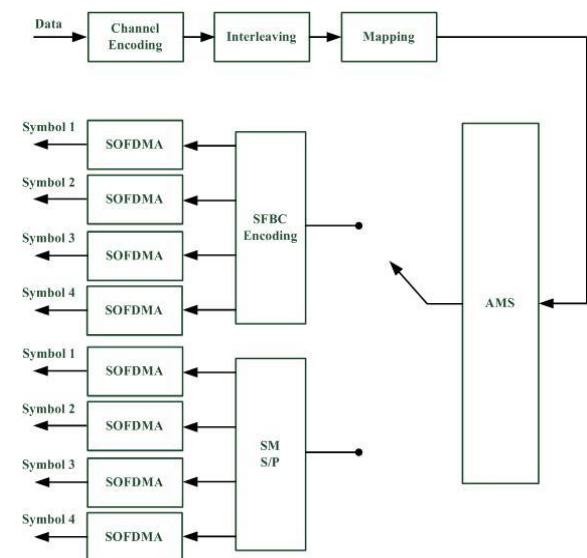
Penelitian dilakukan dengan beberapa tahap yang meliputi pemodelan sistem MIMO dengan SOFDMA serta penerapan teknik AMC dan AMS, simulasi sistem dengan beberapa skenario terkait teknik yang digunakan, serta perhitungan kapasitas kanal.

A. Pemodelan Sistem MIMO-SOFDMA Dengan Kombinasi Teknik AMC Dan AMS

Pemodelan sistem dilakukan dengan memodelkan pengirim, penerima, dan kanal dengan distribusi *Rayleigh* serta *noise* dengan distribusi *Gaussian* yaitu *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). Pada sistem digunakan teknik MIMO dengan jumlah antena sebanyak 4 (empat) pada masing-masing pengirim dan penerima. Model pengirim dengan kombinasi teknik AMC dan AMS ditunjukkan pada Gambar 1.

Penerapan teknik AMC memungkinkan sistem untuk dapat memilih *channel coding* maupun teknik modulasi yang akan digunakan sesuai kondisi kanal sedangkan penerapan AMS memungkinkan sistem

untuk dapat memilih skema MIMO yang akan digunakan.



Gambar 1. Pengirim Sistem MIMO-SOFDMA

Pemilihan teknik maupun skema tersebut dilakukan oleh pengirim dengan didasarkan pada *feedback* yang diberikan oleh penerima yaitu berupa kondisi kanal. Pengirim disusun dengan beberapa blok meliputi.

a) Channel Encoding

Channel encoding merupakan suatu teknik pengkodean sinyal informasi menjadi suatu *codeword* dengan panjang minimal 2 (dua) kali panjang sinyal informasi karena adanya penambahan *parity*. Dalam penelitian ini digunakan *channel encoding* berupa *Convolutional Encoding* yang memiliki polinomial (171, 133) dengan *code rate* 1/2 dan *Convolutional Turbo Encoding* dengan *code rate* 1/3. Pemilihan *channel encoding* terkait teknik AMC yang digunakan didasarkan pada *feedback* yang berasal dari penerima yaitu berupa SNR sinyal setelah melalui kanal.

b) Interleaving

Interleaving merupakan proses pengacakan deretan bit keluaran proses *channel encoding*. Dalam penelitian ini digunakan *matrix interleaver* dengan ukuran $m \times n$ yang mana data masukan dituliskan dalam matriks berdasarkan baris lalu dibaca berdasarkan kolom.

c) Mapping

Mapping merupakan proses pemetaan deretan bit keluaran proses *interleaving* menjadi simbol berdasarkan teknik modulasi yang digunakan. Dalam penelitian ini variasi teknik modulasi yang digunakan antara lain QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Sama halnya dengan *channel encoding*, pemilihan teknik modulasi terkait teknik AMC yang digunakan didasarkan pada *feedback* berupa SNR yang berasal dari penerima.

d) AMS

AMS merupakan suatu teknik untuk pemilihan skema MIMO yang digunakan. Skema MIMO yang diterapkan yaitu SFBC dan SM. Pemilihan skema MIMO ini didasarkan pada kondisi kanal yaitu berupa SNR. Penggunaan AMS ini dikombinasikan dengan penggunaan AMC, sehingga terdapat beberapa variasi penggunaan *channel coding*, teknik modulasi, dan skema MIMO.

e) SFBC Encoding dan SM

Skema SFBC yang digunakan merupakan skema MIMO SFBC 4x4 yang memiliki *code rate* 1/2 dengan matriks seperti pada Persamaan 1. Skema SM yang digunakan merupakan skema MIMO SM 4x4. Adapun susunan data keluaran skema SM ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$\begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & s_1^* & -s_2^* & -s_3^* & -s_4^* \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 & s_2^* & s_1^* & s_4^* & -s_3^* \\ s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 & s_3^* & -s_4^* & s_1^* & s_2^* \\ s_4 & s_3 & -s_2 & s_1 & s_4^* & s_3^* & -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

f) SOFDMA

SOFDMA yang diterapkan berbasis pada teknik OFDMA yang terdiri dari proses *subchannelization*, *Inverse Fourier Transform* (IFFT), *Guard Interval Insertion*, serta *Cyclic Prefix Insertion*. Penggunaan SOFDMA memungkinkan adanya perubahan jumlah *subcarrier* yang digunakan berdasarkan kondisi kanal. Hal ini yang menjadi perbedaan antara OFDMA dengan SOFDMA, pada OFDMA digunakan jumlah *subcarrier* yang tetap sedangkan pada SOFDMA digunakan jumlah *subcarrier* yang bervariasi. Jumlah *subcarrier* yang digunakan dalam proses ini yaitu 128 dan 2048.

Model penerima dengan kombinasi teknik AMC dan AMS ditunjukkan pada Gambar 2. Seluruh proses pada penerima merupakan proses kebalikan dari proses yang ada pada pengirim. Penerima disusun dengan beberapa blok meliputi.

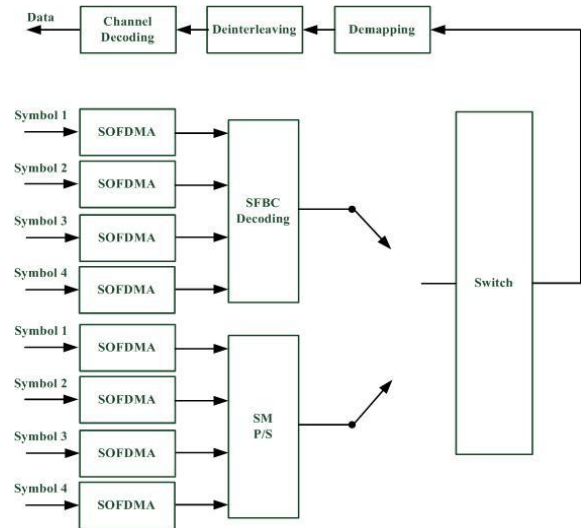
a) SOFDMA

Pada penerima dilakukan proses OFDMA yang merupakan kebalikan dari proses OFDMA pada pengirim. Serangkaian proses OFDMA tersebut terdiri dari beberapa proses yaitu *Cyclic Prefix Removal*, *Guard Interval Removal*, *Fast Fourier Transform* (FFT), dan *Desubchannelization*. Jumlah *subcarrier* yang digunakan disesuaikan dengan jumlah *subcarrier* yang digunakan pada pengirim.

b) SFBC Decoding dan SM

Pada penerima dilakukan proses *decoding* dari skema MIMO SFBC atau proses perubahan aliran data dari aliran paralel menjadi serial untuk

penggunaan skema MIMO SM. Pemilihan penggunaan skema MIMO SFBC atau SM tergantung pada penggunaan skema MIMO yang bersesuaian pada sisi pengirim yang mana pemilihan dikendalikan oleh AMS.



Gambar 2. Penerima Sistem MIMO-SOFDMA

c) Demapping

Demapping merupakan proses perubahan simbol menjadi bit, proses ini merupakan proses kebalikan dari proses *mapping*. Pada proses ini, simbol yang diterima diubah menjadi bit.

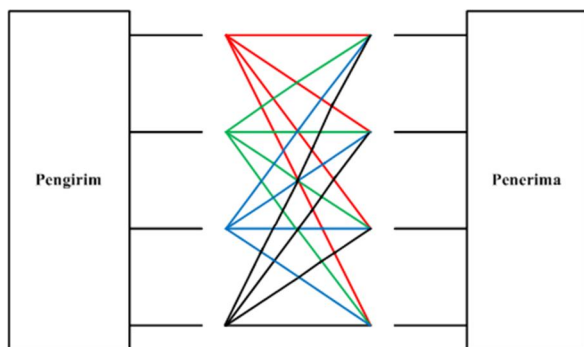
d) Deinterleaving

Deinterleaving merupakan proses kebalikan dari proses *interleaving* untuk mengembalikan data seperti sebelum dilakukan proses *interleaving*. Proses yang dilakukan yaitu bit masukan dituliskan dalam matriks berukuran $m \times n$ berdasarkan kolom lalu dibaca berdasarkan baris.

e) Channel Decoding

Proses *channel decoding* yang digunakan pada sisi penerima berdasarkan prinsip *Viterbi Decoder*. *Viterbi Decoder* yang digunakan yaitu *Viterbi Decoder* dengan *hard decision* yang mana hasil dari proses *decoding* berupa bit 0 atau 1.

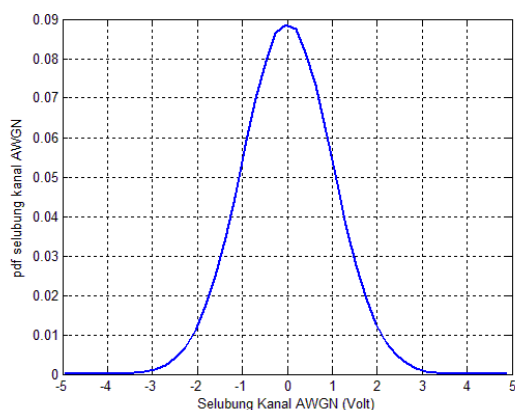
Selain pemodelan pengirim dan penerima sistem MIMO-SOFDMA, pemodelan kanal dengan distribusi *Rayleigh* juga dilakukan. Pemodelan kanal dilakukan dengan jumlah *tap* sebanyak 6 (enam) yang mana masing-masing *tap* memiliki *gain*, *delay*, dan koefisien kanal. Pemodelan kanal ini dilakukan untuk masing-masing jalur pada skema pengiriman informasi dari pengirim ke penerima yang ditunjukkan pada Gambar 3. Adapun parameter dari kanal *Rayleigh* yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1. Setelah melewati kanal terdistribusi *Rayleigh*, sinyal informasi melewati kanal AWGN dengan *probability density function* (pdf) ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Skema Pengiriman Informasi dari Pengirim ke Penerima

Tabel 1. Parameter Kanal Rayleigh

Skenario	Tap	Parameter Kanal	
		Delay propagasi (ns)	Gain (dB)
Indoor (0 km/jam)	1	0	0
	2	50	-3
	3	110	-10
	4	170	-18
	5	290	-26
	6	310	-32
Vehicular (120 km/jam)	1	0	0
	2	310	-1
	3	710	-9
	4	1090	-10
	5	1730	-15
	6	2510	-20



Gambar 4. Nilai Pdf Kanal AWGN

B. Simulasi Sistem MIMO-SOFDMA

Simulasi ini ditujukan untuk mendapatkan besarnya SNR masing-masing sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS. Sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS yaitu sistem dengan kombinasi *channel coding*, teknik modulasi, dan skema MIMO yang berbeda-beda. Dari simulasi ini didapat SNR

threshold masing-masing sistem tanpa kombinasi AMC dan AMS untuk nilai BER tertentu. SNR *threshold* ini digunakan dalam skema adaptif untuk menentukan kombinasi *channel coding*, teknik modulasi, dan skema MIMO yang selanjutnya digunakan dalam pengiriman informasi.

Skema adaptif yang diterapkan untuk kombinasi teknik AMC dan AMS didasarkan pada SNR *threshold* dari masing-masing sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS, yaitu berupa besarnya SNR yang dibutuhkan untuk mencapai BER 10^{-3} . Penerima mengirimkan *feedback* kepada pengirim berupa SNR. Lalu nilai SNR ini dibandingkan dengan SNR *threshold* masing-masing sistem. Jika SNR yang didapat lebih besar dari SNR *threshold*, selanjutnya digunakan kombinasi *channel coding*, teknik modulasi, dan skema MIMO yang memiliki kapasitas kanal lebih tinggi. Skema ini memungkinkan sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS dapat mencapai kapasitas kanal yang lebih tinggi dari seluruh sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS.

C. Perhitungan Kapasitas Kanal

Kapasitas kanal dapat diketahui berdasarkan *Shannon's Channel Capacity Theorem*. Adapun persamaan kapasitas kanal berdasarkan *Shannon's Channel Capacity Theorem* ditunjukkan pada Persamaan 3 [3]. C merupakan besarnya kapasitas kanal dalam bps, B merupakan besarnya *bandwidth* dalam Hz, dan SNR merupakan *Signal to Noise Ratio*.

$$C = B \log_2 (1 + SNR) \quad (3)$$

Perhitungan kapasitas kanal dalam penelitian ini didasarkan pada Persamaan 3. Besarnya *bandwidth* yang digunakan sesuai dengan jumlah *subcarrier* yaitu 128 dan 2048. Adapun *bandwidth* yang bersesuaian dengan masing-masing jumlah *subcarrier* tersebut ditunjukkan pada Tabel 2. Adanya SOFDMA memungkinkan digunakannya jumlah *subcarrier* yang berubah-ubah. Pemilihan penggunaan jumlah *subcarrier* didasarkan pada kondisi kanal. Dalam hal ini kondisi kanal dipengaruhi oleh besarnya kecepatan pengguna yaitu 0 km/jam atau 120 km/jam. Dari hasil simulasi didapat bahwa saat pengguna bergerak dengan kecepatan 0 km/jam, jumlah *subcarrier* yang cocok untuk digunakan yaitu 2048. Namun saat pengguna bergerak dengan kecepatan 120 km/jam, jumlah *subcarrier* yang cocok untuk digunakan yaitu 128. Penentuan jumlah *subcarrier* ini berdasarkan pada kebutuhan SNR terkecil untuk mencapai BER tertentu. Jumlah data yang dibangkitkan untuk masing-masing penggunaan jumlah *subcarrier* berbeda-beda untuk menghasilkan satu simbol OFDMA. Jumlah data yang dibangkitkan untuk menghasilkan satu simbol OFDMA dengan jumlah *subcarrier* 2048 lebih banyak dibandingkan jumlah data yang dibangkitkan untuk menghasilkan satu simbol OFDMA dengan jumlah *subcarrier* 128. Hal ini sangat memungkinkan bahwa saat pengguna

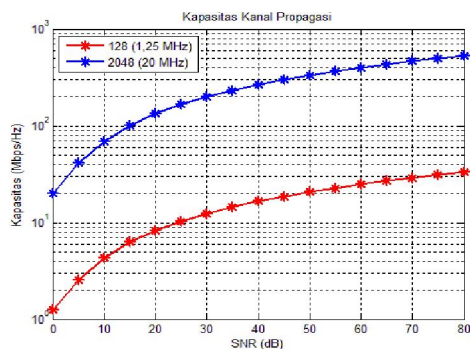
bergerak dengan kecepatan 0 km/jam, performansi dalam hal kualitas sistem dengan jumlah *subcarrier* 2048 paling baik. Dengan demikian saat pengguna bergerak dengan kecepatan 0 km/jam, dibutuhkan SNR paling kecil untuk mencapai BER tertentu dan jumlah data yang dikirimkan juga besar. Lain halnya dengan kondisi saat pengguna bergerak dengan kecepatan 120 km/jam, dibutuhkan SNR paling kecil untuk mencapai BER tertentu tetapi jumlah data yang dikirimkan juga kecil. Walaupun demikian kondisi ini memungkinkan sistem untuk dapat mempertahankan performansinya dalam melayani pengguna yang bergerak dengan kecepatan 120 km/jam. Dengan demikian sistem dapat melayani pengguna dengan performansi yang baik dalam kondisi pengguna bergerak dengan kecepatan 0 km/jam maupun 120 km/jam.

Tabel 2. *Bandwidth* Tiap *Subcarrier* [9]

Jumlah <i>subcarrier</i>	<i>Bandwidth</i> (MHz)
128	1,25
2048	20

III. HASIL PENELITIAN

Hasil dari penelitian ini meliputi hasil simulasi pengiriman data dari pengirim ke penerima melalui kanal dengan distribusi *Rayleigh* dan AWGN yaitu berupa nilai SNR serta hasil perhitungan kapasitas kanal untuk sistem tanpa kombinasi AMC dan AMS maupun sistem dengan kombinasi AMC dan AMS. Masing-masing hasil didapat dengan kondisi pergerakan pengguna yang berbeda yaitu 0 km/jam dan 120 km/jam dengan target BER sebesar 10^{-3} . Perhitungan kapasitas kanal dilakukan berdasarkan Persamaan 3 dengan hasil grafik kapasitas kanal terhadap SNR yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 5. Kapasitas Kanal Berdasarkan Jumlah *Subcarrier*

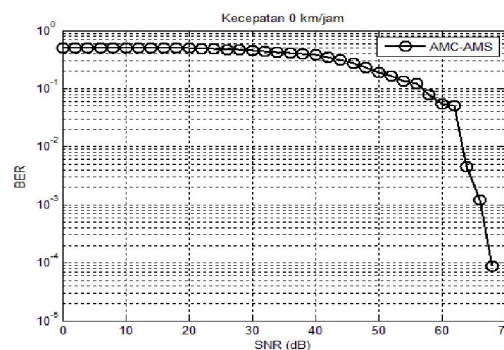
A. Kapasitas Kanal Saat Pengguna Bergerak Dengan Kecepatan 0 Km/Jam

Jumlah *subcarrier* saat pengguna bergerak dengan kecepatan 0 km/jam yaitu 2048. Untuk mencapai BER 10^{-3} , besarnya SNR yang dibutuhkan sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS ditunjukkan pada Tabel 3 sedangkan besarnya SNR yang dibutuhkan sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS yaitu sebesar 66,21 dB seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Besarnya SNR masing-masing sistem mempengaruhi

besarnya kapasitas kanal seperti ditunjukkan Persamaan 3. Kapasitas kanal untuk sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS berdasarkan Persamaan 3 dapat mencapai 419,5115 Mbps. Untuk kapasitas kanal masing-masing sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. SNR dan Kapasitas Kanal Masing-Masing Sistem Tanpa Kombinasi AMC dan AMS Saat Kecepatan Bergerak Pengguna Sebesar 0 Km/Jam

Skenario	SNR (dB)	Kapasitas Kanal Propagasi (Mbps)
QPSK-SFBC-CTC	21,14	134,1555
QPSK-SFBC-CC	23,1	146,4978
QPSK-SM-CTC	27,58	174,7969
QPSK-SM-CC	30,83	195,3639
16QAM-SFBC-CTC	41,81	264,9131
16QAM-SFBC-CC	46,99	297,7327
64QAM-SFBC-CTC	50	316,8040
256QAM-SFBC-CTC	52,18	330,6166
16QAM-SM-CTC	52,23	330,9334
64QAM-SFBC-CC	53,76	340,6275
256QAM-SFBC-CC	56,43	357,5448
16QAM-SM-CC	57,08	361,6632
64QAM-SM-CTC	60,27	381,8753
256QAM-SM-CTC	61,52	389,7954
64QAM-SM-CC	62,2	394,1039
256QAM-SM-CC	65,84	417,1672



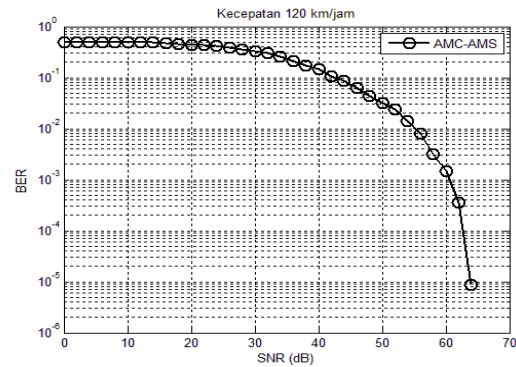
Gambar 6. Grafik BER Terhadap SNR Sistem dengan Kombinasi Teknik AMC dan AMS Saat Kecepatan Bergerak Pengguna Sebesar 0 Km/Jam

B. Kapasitas kanal saat pengguna bergerak dengan kecepatan 120 km/jam

Jumlah *subcarrier* saat pengguna bergerak dengan kecepatan 120 km/jam yaitu 128. Untuk mencapai BER 10^{-3} , besarnya SNR yang dibutuhkan sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS ditunjukkan pada Tabel 4 sedangkan besarnya SNR yang dibutuhkan sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS yaitu sebesar 60,56 dB seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Pada Tabel 4 juga ditunjukkan kapasitas kanal masing-masing sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS. Besarnya SNR masing-masing sistem mempengaruhi besarnya kapasitas kanal seperti ditunjukkan Persamaan 3. Kapasitas kanal untuk sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS berdasarkan Persamaan 3 dapat mencapai 23,9820 Mbps.

Tabel 4. SNR dan Kapasitas Kanal Masing-Masing Sistem Tanpa Kombinasi AMC dan AMS Saat Kecepatan Bergerak Pengguna Sebesar 120 Km/Jam

Skenario	SNR (dB)	Kapasitas kanal propagasi (Mbps)
QPSK-SFBC-CTC	8,24	3,5034
QPSK-SFBC-CC	11,83	4,7940
QPSK-SM-CTC	15,56	6,2090
QPSK-SM-CC	17,8	7,0772
16QAM-SFBC-CTC	38,74	15,3415
16QAM-SFBC-CC	41,02	16,2442
16QAM-SM-CTC	45,11	17,8638
64QAM-SFBC-CTC	45,73	18,1093
16QAM-SM-CC	50,92	20,1646
64QAM-SFBC-CC	52,5	20,7903
256QAM-SFBC-CTC	52,79	20,9051
64QAM-SM-CTC	55,82	22,1050
64QAM-SM-CC	59,41	23,5266
256QAM-SFBC-CC	60,38	23,9108
256QAM-SM-CTC	63,42	25,1146
256QAM-SM-CC	65,69	26,0135



Gambar 7. Grafik BER Terhadap SNR Sistem Dengan Kombinasi Teknik AMC Dan AMS Saat Kecepatan Bergerak Pengguna Sebesar 120 Km/Jam

IV. PEMBAHASAN

Pada Tabel 3 ditunjukkan SNR dan kapasitas kanal dari sistem dengan masing-masing kombinasi *channel coding*, teknik modulasi, dan skema MIMO saat pengguna bergerak dengan kecepatan 0 km/jam. Sistem-sistem ini tidak menggunakan kombinasi teknik AMC dan AMS. Untuk mencapai BER 10^{-3} , sistem dengan kombinasi *Convolutional Turbo Code*, QPSK, dan SFBC membutuhkan SNR paling kecil yaitu sebesar 21,14 dB, sehingga kapasitas kanal sistem ini pun paling kecil yaitu sebesar 134,1555 Mbps. Sebaliknya untuk mencapai BER 10^{-3} , sistem dengan kombinasi *Convolutional Code*, 256-QAM, dan SM membutuhkan SNR paling besar yaitu sebesar 65,84 dB, sehingga kapasitas kanal sistem ini pun paling besar yaitu sebesar 417,1672 Mbps. Untuk sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS membutuhkan SNR lebih besar dari seluruh sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS yaitu sebesar 66,21 dB. Dalam hal ini performansi sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS dari segi kebutuhan SNR paling buruk tetapi kapasitas kanal yang dicapai paling besar sesuai dengan SNR yang dibutuhkan tersebut. Besarnya kapasitas kanal sistem tersebut dapat mencapai 419,5115 Mbps. Penerapan teknik AMC dan AMS ini sangat memungkinkan untuk kondisi pengguna yang bergerak dengan kecepatan 0 km/jam atau diam karena saat pengguna diam, kapasitas kanal yang dicapai menjadi paling besar. Dengan meningkatnya kapasitas kanal yang dicapai, hal ini berarti bahwa efisiensi spektral juga meningkat.

Saat pengguna bergerak dengan kecepatan 120 km/jam, besarnya SNR dan kapasitas kanal yang dicapai oleh masing-masing sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS ditunjukkan pada Tabel 4. Sama halnya dengan saat kondisi pengguna bergerak dengan kecepatan 0 km/jam, sistem dengan kombinasi *Convolutional Turbo Code*, QPSK, dan SFBC membutuhkan SNR paling kecil yaitu sebesar 8,24 dB untuk mencapai BER 10^{-3} . Selain itu sistem dengan kombinasi *Convolutional Code*, 256-QAM, dan SM juga membutuhkan SNR paling besar yaitu sebesar 65,69 dB untuk mencapai BER 10^{-3} . Besarnya kapasitas kanal yang dapat dicapai oleh sistem dengan

kombinasi *Convolutional Turbo Code*, QPSK, dan SFBC yaitu 3,5034 Mbps sedangkan besarnya kapasitas kanal yang dapat dicapai oleh sistem dengan kombinasi *Convolutional Code*, 256-QAM, dan SM yaitu 26,0135 Mbps. Untuk sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS, SNR yang dibutuhkan untuk mencapai BER 10^{-3} yaitu sebesar 60,56 dB dengan kapasitas kanal yang bisa dicapai sebesar 23,9820 Mbps. Namun kapasitas kanal sistem ini masih lebih kecil dibandingkan kapasitas kanal sistem dengan teknik modulasi 256-QAM dan skema MIMO SM.

Sistem dengan kombinasi *Convolutional Turbo Code*, QPSK, dan SFBC memiliki kapasitas kanal paling kecil baik saat pengguna bergerak dengan kecepatan 0 km/jam maupun 120 km/jam. Namun sistem ini memiliki performansi paling bagus dari segi kebutuhan SNR untuk mencapai BER tertentu. Hal ini juga berarti bahwa sistem ini mampu mencapai BER paling kecil untuk kebutuhan SNR yang sama dengan sistem yang lain. Penggunaan kombinasi teknik *Convolutional Turbo Code*, QPSK, dan SFBC dapat menunjang performansi sistem dalam hal pencapaian BER untuk kebutuhan SNR yang sama karena teknik-teknik tersebut pada dasarnya memiliki performansi yang lebih baik dari teknik lainnya dalam pencapaian BER. Berikut hal-hal yang mendasari penggunaan teknik-teknik tersebut dalam pencapaian BER:

- a) *Convolutional Turbo Code* lebih baik dibandingkan *Convolutional Code*

Pada *Convolutional Turbo Code* dengan *code rate* 1/3, setiap 1 bit masukan dikodekan menjadi 3 bit keluaran sedangkan pada *Convolutional Code* dengan *code rate* 1/2, setiap 1 bit masukan dikodekan menjadi 2 bit keluaran. Dari panjang keluaran masing-masing *channel coding* tersebut jika salah satu bit mengalami kesalahan saat dikirimkan, pada *Convolutional Turbo Code* masih terdapat 2 bit yang benar sementara pada *Convolutional Code* hanya terdapat 1 bit yang benar.

- b) QPSK lebih baik dari 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM

Pada QPSK, setiap simbol keluarannya terdiri dari 2 bit masukan sementara pada 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM tiap simbol keluarannya masing-masing terdiri dari 4 bit, 6 bit, dan 8 bit masukan. Dengan demikian pada QPSK terdapat 4 variasi simbol keluaran sedangkan pada 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM masing-masing terdapat 16 variasi simbol, 64 variasi simbol, dan 256 variasi simbol. Banyaknya variasi simbol ini berpengaruh pada saat proses deteksi simbol di penerima. Semakin banyak variasi simbol, semakin kecil *decision region* untuk proses deteksi simbol dan semakin dekat jarak antarsymbol tersebut. Saat proses deteksi, jika jumlah variasi simbol semakin sedikit, ketepatan deteksi akan semakin meningkat. Hal inilah yang menyebabkan performansi QPSK

lebih baik dari teknik modulasi lainnya yang digunakan dalam pencapaian BER.

- c) SFBC lebih baik dari SM

Pada penggunaan SFBC dilakukan pengkodean terhadap simbol masukannya seperti ditunjukkan pada Persamaan 1 sedangkan pada penggunaan SM, deretan masukan hanya diubah alirannya dari serial menjadi paralel seperti ditunjukkan Persamaan 2. Adanya pengkodean pada SFBC dapat menekan besarnya BER karena saat proses pengkodean dibentuk replika dari simbol-simbol tersebut. Oleh karena itu, jika saat pengiriman terdapat kesalahan pada suatu simbol, besarnya BER dapat ditekan karena deteksi juga dapat dilakukan pada replika simbol tersebut. Lain halnya dengan SM, jika terdapat kesalahan simbol saat pengiriman, hasil deteksinya pun akan salah karena hanya simbol tersebut yang dideteksi akibat tidak adanya replika simbol.

Sistem dengan kombinasi *Convolutional Code*, 256-QAM, dan SM memiliki performansi paling buruk dari segi kebutuhan SNR untuk mencapai BER tertentu baik saat pengguna bergerak dengan kecepatan 0 km/jam maupun 120 km/jam. Walaupun demikian sistem ini memiliki efisiensi spektral yang tinggi. Dengan efisiensi spektral yang tinggi, hal ini juga berarti bahwa sistem dapat mencapai kapasitas kanal yang tinggi juga. Penggunaan kombinasi teknik *Convolutional Code*, 256-QAM, dan SM dapat menunjang performansi sistem dalam hal efisiensi spektral karena teknik-teknik tersebut pada dasarnya memiliki performansi yang lebih baik dari teknik lainnya dalam hal efisiensi spektral. Berikut hal-hal yang mendasari penggunaan teknik-teknik tersebut dalam hal efisiensi spektral:

- a) *Convolutional Code* lebih baik dibandingkan *Convolutional Turbo Code*

Convolutional Code memiliki panjang keluaran yang lebih pendek dari panjang keluaran *Convolutional Turbo Code*. Karena keluaran *Convolutional Code* lebih pendek, *Convolutional Code* memiliki efisiensi spektral yang lebih tinggi.

- b) 256-QAM lebih baik dari QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM

Jumlah bit masukan teknik modulasi 256-QAM lebih banyak dibandingkan teknik modulasi lainnya yang digunakan, sehingga jumlah simbol yang dihasilkan lebih sedikit untuk panjang bit masukan yang sama. Dengan demikian teknik modulasi 256-QAM memiliki efisiensi spektral yang paling tinggi.

- c) SM lebih baik dari SFBC

Deretan simbol keluaran SM lebih pendek dibandingkan deretan simbol SFBC akibat tidak adanya proses pengkodean yang menyebabkan adanya replika simbol. Hal ini yang menyebabkan SM memiliki efisiensi spektral yang tinggi dibandingkan SFBC.

Saat pengguna bergerak dengan kecepatan 0 km/jam, kapasitas kanal yang dicapai oleh sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS lebih besar daripada kapasitas kanal yang dicapai seluruh sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS. Hal ini karena skema adaptif yang digunakan memungkinkan untuk melakukan pemilihan kombinasi *channel coding*, teknik modulasi, dan skema MIMO yang memiliki kapasitas kanal lebih tinggi saat SNR yang diterima pengirim sebagai *feedback* dari penerima lebih besar dari SNR *threshold*. Namun saat pengguna bergerak dengan kecepatan 120 km/jam, kapasitas kanal yang dicapai oleh sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS lebih kecil dari sistem dengan teknik modulasi 256-QAM dan skema MIMO SM.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Penerapan kombinasi teknik AMC dan AMS pada sistem MIMO-SOFDMA dapat meningkatkan kapasitas kanal dari sistem tersebut. Saat pengguna bergerak dengan kecepatan 0 km/jam, kapasitas kanal sistem dapat mencapai 419,5115 Mbps dan besarnya kapasitas kanal ini lebih besar dari seluruh kapasitas kanal sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS. Saat pengguna bergerak dengan kecepatan 120 km/jam, kapasitas kanal sistem dapat mencapai 23,9820 Mbps dan besarnya kapasitas kanal ini lebih besar dari kapasitas kanal beberapa sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS. Namun besarnya kapasitas kanal sistem ini lebih kecil dari kapasitas kanal sistem dengan teknik modulasi 256-QAM dan skema MIMO SM. Besarnya kapasitas kanal tersebut didapat saat sistem mencapai BER 10^{-3} . Peningkatan kapasitas kanal pada sistem dengan kombinasi teknik AMC dan AMS dibandingkan dengan sebagian besar sistem tanpa kombinasi teknik AMC dan AMS disebabkan oleh penggunaan skema adaptif pada kombinasi teknik AMC dan AMS. Penggunaan skema adaptif tersebut memungkinkan pemilihan kombinasi *channel coding*, teknik modulasi, dan skema MIMO yang memiliki kapasitas kanal lebih tinggi saat SNR yang diterima pengirim sebagai *feedback* dari penerima lebih besar dari SNR *threshold*.

B. Saran

Pada penelitian ini tidak diterapkan teknik estimasi kanal sehingga estimasi kanal dianggap sempurna atau diasumsikan tidak ada kesalahan dalam melakukan estimasi nilai SNR. Untuk itu sebagai kelanjutan dari penelitian, pada penelitian selanjutnya dapat diterapkan teknik estimasi kanal.

Salah satu metode yang dapat diterapkan untuk estimasi kanal yaitu invers matrik [10].

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Mohamed and A. M. Abdulsattar, "Evaluation of MIMO System Capacity Over Rayleigh Fading Channel," in *International Journal of Computer Science & Engineering Survey*, Vol. 6 No. 3, June 2015.
- [2] Y. Devlal and M. Awasthi, "Capacity Analysis of MIMO Technology," in *International Journal Of Engineering And Computer Science*, Volume 4 Issue 1, January 2015, pp. 9819-9824.
- [3] A. K. Grewal and S. Chakravorty, "Determination of MIMO Channel Capacity and Enhancement of MIMO System Performance Using Tomlinson Harashima Precoding," in *International Journal of Signal Processing Systems*, Vol. 3 No. 1, June 2015.
- [4] E. Ghayoula, A. Bouallegue, R. Ghayoula, and J. Y. Chouinard, "Capacity and Performance of MIMO systems for Wireless Communications," in *Journal of Engineering Science and Technology*, Review 7(3), 2014, pp. 108-111.
- [5] Suhasini N., "Brief Survey on Rate Adaption Techniques with Adaptive Modulation," in *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 4 Issue 4, April 2016.
- [6] H. I. Anwar, I. Ibrahim, K. W. Hon, and Y. A. Razak, "Performance and Simulation of Adaptive Modulation Techniques of the WIMAX Network via AWGN Channel," in *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(4), 2014, pp. 291-293.
- [7] S. Y. Diaba, T. Anafo, and Z. Abdul-Rahman, "Performance Analysis of Adaptive Modulation and Coding Schemes on OFDMA Physical Layer," in *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 4 Issue 12, December 2015.
- [8] H. S. Azis, *Analisis Performansi Teknik AMS dan AM pada Sistem MIMO-OFDM (IEEE 802.16e) untuk Kanal SUI-2*. Bandung: Institut Teknologi Telkom, 2009.
- [9] H. Yaghoobi, Intel Communications Group, and Intel Corporation, "Scalable OFMA Physical Layer in IEEE 802.16 WirelessMAN," in *Intel Technology Journal*, Volume 08 Issue 03, Agustus 2004.
- [10] K. Nugroho dan R. Utami, "Analisis Estimasi Kanal Dengan Menggunakan Metode Invers Matrik Pada Sistem MIMO-OFDM," *Jurnal Infotel*, Vol. 7 No. 1, Mei 2015.