

IMPLEMENTASI *MIMO DECODER* BERBASIS METODE NON-LINEAR UNTUK MENINGKATKAN KINERJA WLAN 802.11ac

Zuhrotul Maulida^{*}), Wahyul Amien Syafei, Imam Santoso

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*}E-mail: zuhrotulmaulida@gmail.com

Abstrak

Kebutuhan sistem komunikasi nirkabel yang mendukung laju data dan kinerja yang semakin tinggi mendorong perkembangan teknologi WLAN. Teknologi ini mengerucut pada penggunaan teknologi terkini, yaitu MIMO-OFDM. Implementasi OFDM pada perkembangan WLAN dimulai sejak IEEE 802.11a, hingga saat ini mencapai 900 Mbps pada IEEE 802.11ac. Dengan penggunaan kanal yang sama untuk beberapa data pada setiap antenna, dibutuhkan teknik khusus untuk mendapatkan kembali informasi yang dikirim. Dua teknik yang umum digunakan adalah berbasis metode linear, yaitu ZF dan MMSE. Keduanya memiliki kompleksitas yang rendah, tetapi kinerjanya juga rendah. Teknik yang dikenal optimal adalah berbasis non-linear, yaitu MLD. Teknik ini memiliki kinerja paling baik tetapi tingkat kompleksitasnya tinggi. Untuk menengahi kedua metode tersebut, dikembangkanlah metode non-linear yang sub-optimal, seperti K-Best, Trellis, dan Sphere Detection. Ketiga metode ini memiliki kompleksitas yang rendah dan menghasilkan kinerja yang baik. Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi dan analisa terhadap kinerja MIMO Decoder yang berbasis metode non-linear, yaitu K-Best, Trellis, dan Sphere Detection. Simulasi dilakukan pada MCS 5, 6, dan 7 dengan konfigurasi 6x6 dan 40 MHz bandwidth. Konfigurasi ini akan menghasilkan laju data sebesar 720 Mbps, 810 Mbps, dan 900 Mbps.

Kata Kunci : Peningkatan kinerja, IEEE 802.11ac, MIMO, OFDM, MIMO Decoder, ZF, MMSE, MLD, Trellis, K-Best, SD.

Abstract

The increasing needs of wireless communication system that supports the data rate and performance urges on the development of WLAN technology. This technology leads to the utilizing of the latest technology, which is MIMO-OFDM. The implementation of OFDM on the development of WLAN was started on IEEE802.11a, so far, the data rate has reached 900Mbps on IEEE802.11ac. By using the same canal for several data in each antenna, a special technique is needed to get back the transmitted information. Two techniques which are generally used are linear-based method, ZF and MMSE. Both of them have low complexity, but their performance is also low. The technique which is known to have an optimum performance is a non-linear-based method, MLD. This technique has the best performance but it also has a high complexity. To intercede both of those methods, non-linear sub-optimal methods are developed, such as K-Best, Trellis, and SD. These three methods have low-complexity and produce good performance. This research, a simulation and analysis will be done to the MIMO decoder with non-linear-based method, K-Best, Trellis, SD. Simulation is done to MCS 5, 6, 7 with configuration 6x6, bandwidth 40MHz. This configuration will produce data rate about 720Mbps, 810Mbps, 900Mbps.

Keywords : increasing performance, IEEE 802.11ac, MIMO, OFDM, MIMO Decoder, ZF, MMSE, MLD, Trellis, K-Best, SD.

1. Pendahuluan

Wireless LAN merupakan teknologi jaringan nirkabel yang digunakan untuk komunikasi data. Ada dua teknik yang digunakan dalam perkembangan WLAN, yaitu *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dan teknik *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO). OFDM merupakan suatu teknik transmisi *multi carrier*, dimana tiap frekuensi *orthogonal* satu sama lain,

sehingga terjadinya *overlapping* tidak menyebabkan interferensi.

Di sisi lain, untuk memperbesar efisiensi spektrum digunakan teknik MIMO, yaitu penerapan antenna jamak pada sisi pemancar dan penerima. Teknik OFDM telah diterapkan pada WLAN IEEE 802.11a dengan sistem SISO (*Single Input Single Output* / antenna tunggal) pada

frekuensi 5 GHz [1]. Pengembangan sistem selanjutnya adalah dengan penerapan MIMO pada WLAN IEEE 802.11n [2]. WLAN 802.11n menggunakan antena pemancar sampai dengan empat buah. Penerapan MIMO-OFDM pada WLAN 802.11n menyediakan *data rate* sampai 600 Mbps, ini adalah 10 kali lipat dibandingkan para pendahulunya [3]. Kemudian berkembang hingga mencapai 900 Mbps pada IEEE 802.11ac.

Peningkatan kinerja WLAN 802.11ac dapat dilakukan dengan beberapa cara, diantaranya dengan menambah jumlah antena penerima dan juga dengan menambah jarak antar antena [4][5]. Selain itu untuk meningkatkan kinerja WLAN 802.11ac juga dapat dilakukan dengan memperbaiki metode yang dipakai pada *MIMO Decoder*. Metode linear yang dipakai *MIMO Decoder* saat ini pada WLAN IEEE 802.11ac adalah *zero Forcing (ZF)* dan *Minimum Mean Square Error (MMSE)*. Keduanya memiliki kompleksitas yang rendah namun kinerjanya juga rendah. Terdapat metode non-linear dengan kinerja optimal yaitu *Maximum Likelihood Detection (MLD)*, metode ini memiliki kinerja paling baik namun tingkat kompleksitasnya sangat tinggi, seiring bertambahnya orde modulasi dan jumlah antena pemancar [6]. Oleh sebab itu, sekarang banyak dikembangkan metode non-linear sub-optimal sebagai metode turunan MLD dengan kompleksitas lebih rendah. Misalnya metode *Trellis* [7], *Sphere Detection* [8], dan *K-best* [9].

Pada penelitian kali ini difokuskan terhadap peningkatan kinerja pada WLAN IEEE 802.11ac dengan mengimplementasikan *MIMO Decoder* berbasis non-linear sub-optimal, yaitu *K-Best*, *Trellis* dan *Sphere Detection*. Teknik MIMO yang digunakan adalah *Spatial Division Multiplexing (SDM)* [10], pada konfigurasi MIMO 6 x 6 dengan orde modulasi 64QAM. Simulasi dilakukan pada MCS 5, 6, dan 7 dengan model kanal B IEEE 802.11Tgn yang mewakili cakupan area suatu kantor kecil [11]. Parameter pembanding adalah nilai *Bit Error Rate (BER)* terhadap *Signal to Noise Ratio (SNR)* dan kompleksitas masing – masing metode.

2. Metode

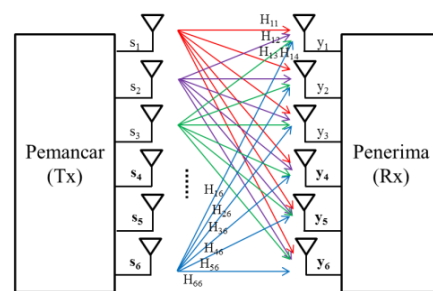
2.1. Sistem MIMO

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) merupakan teknologi yang memungkinkan sebuah receiver maupun transmitter menggunakan antena lebih dari satu. Teknologi ini kali pertama diperkenalkan oleh seorang ahli dari Bell Laboratories pada tahun 1984. Tujuan dari teknik MIMO ini adalah untuk menjadikan sinyal pantulan sebagai penguat sinyal utama sehingga akan mengurangi resiko terjadinya kegagalan sinyal yang dikirim. MIMO merupakan salah satu teknik diversitas, yaitu *spatial diversity*. Teknik ini dapat mengurangi *fading* dan *interferensi* dari pengguna lain. Dan juga dapat

meningkatkan laju data tanpa mengorbankan *bandwidth* maupun daya pancarnya.

MIMO juga memiliki kelemahan, yaitu adanya waktu interval yang menyebabkan adanya sedikit delay pada antena yang akan mengirimkan sinyal, meskipun pengiriman sinyalnya sendiri lebih cepat. Waktu interval ini terjadi karena adanya proses di mana sistem harus membagi sinyal mengikuti jumlah antena yang dimiliki oleh perangkat MIMO yang jumlahnya lebih dari satu.

MIMO menggunakan beberapa antena pada transmitter dan receiver untuk meningkatkan performansi komunikasi data. Skema MIMO diilustrasikan pada Gambar 1 berikut:



Gambar 1. Sistem MIMO 6x6

Pada gambar 1 di atas merupakan sistem MIMO dengan jumlah antena pemancar 6 yang disimbolkan oleh $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ dan pada bagian penerima terdapat 6 antena yang disimbolkan oleh $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6$. Kanal propagasi sinyal pada gambar 1 disimbolkan oleh H . H_{11} merupakan kanal propagasi sinyal dari antena penerima pertama dan antena pemancar pertama, sedangkan H_{36} merupakan kanal propagasi sinyal dari antena penerima ketiga dan antena pemancar keenam. Adapun persamaan dari sistem MIMO diberikan pada persamaan 1.

$$Y = H S + N \quad (1)$$

dengan Y : simbol yang diterima, H : respon impuls kanal, S : simbol yang ditransmisikan, N : noise.

Sistem dengan 6 antena pengirim dan 6 antena penerima dapat dijabarkan secara matematis dan dalam notasi vektor, dengan persamaan (2) :

$$\begin{aligned} Y_1 &= H_{11} \cdot S_1 + H_{12} \cdot S_2 + \dots + H_{16} \cdot S_6 + N_1 \\ Y_2 &= H_{21} \cdot S_1 + H_{22} \cdot S_2 + \dots + H_{26} \cdot S_6 + N_2 \\ Y_3 &= H_{31} \cdot S_1 + H_{32} \cdot S_2 + \dots + H_{36} \cdot S_6 + N_3 \\ Y_4 &= H_{41} \cdot S_1 + H_{42} \cdot S_2 + \dots + H_{46} \cdot S_6 + N_4 \\ Y_5 &= H_{51} \cdot S_1 + H_{52} \cdot S_2 + \dots + H_{56} \cdot S_6 + N_5 \\ Y_6 &= H_{61} \cdot S_1 + H_{62} \cdot S_2 + \dots + H_{66} \cdot S_6 + N_6 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{16} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{26} \\ H_{31} & H_{32} & \dots & H_{36} \\ H_{41} & H_{42} & \dots & H_{46} \\ H_{51} & H_{52} & \dots & H_{56} \\ H_{61} & H_{62} & \dots & H_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \\ N_5 \\ N_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2. MIMO Decoder

2.2.1. Metode Linier

Metode linier yang umum digunakan ada 2 yaitu:

a. Zero Forcing (ZF)

Untuk mendapatkan nilai s dalam metode ZF dicari matriks bobot W yang memenuhi $WH = I$. Sehingga dapat dituliskan

$$W = (H^H H)^{-1} H^H \quad (3)$$

maka nilai estimasi \hat{s} adalah

$$\begin{aligned} \hat{s} &= Wy \\ \hat{s} &= W(Hs + n) \\ \hat{s} &= s + Wn \end{aligned} \quad (4)$$

b. Minimum Mean Square Error (MMSE)

Dari persamaan (3), metode *Minimum Mean Square Error* (MMSE) mencari invers matriks kanal dengan memperhitungkan *noise*, sehingga persamaan (3) menjadi:

$$W = [H^H H + \alpha I]^{-1} H^H \quad (5)$$

Dengan I adalah matriks identitas. Ketika faktor noise adalah nol, MMSE akan sama dengan persamaan ZF. Untuk menghitung kompleksitas dekoder linear menggunakan rumus sebagai berikut :

$$K = N_{Tx}^2 + N_{Tx} \quad (6)$$

2.2.2. Metode Non-Linear

a. Maximum Likelihood Detection (MLD)

Metode Maximum Likelihood merupakan metode deteksi dengan kinerja optimal. MLD membandingkan jarak *eucledis* sinyal yang diterima dengan semua kandidat simbol yang ada. MLD mencari jarak minimum di antara simbol-simbol tersebut. Semakin kecil perbedaan sinyal yang diterima dengan suatu kandidat simbol, maka semakin besar kemungkinan bahwa kandidat simbol tersebut adalah informasi yang dikirim oleh pemancar, sebagaimana persamaan berikut :

$$\hat{s} = \underset{s}{\operatorname{argmin}} \|y - Hs\|^2 \quad (7)$$

Estimasi dari simbol yang dikirim dipilih berdasarkan nilai minimum dari semua jarak *euclidean*. Kompleksitas dalam metode MLD bisa dihitung dengan persamaan :

$$\text{Kompleksitas} = M^{N_{Tx}} \quad (9)$$

dimana M adalah orde modulasi yang digunakan.

b. K-best

Detektor *Maximum Likelihood* menentukan transmit vektor \hat{s} , yang meminimalkan jarak *Euclidean* di antara vektor yang diterima s , dirumuskan sebagai berikut [7] [8] [9]:

$$\hat{s} = \underset{s}{\operatorname{argmin}} \|\hat{y} - Hs\|^2 \quad (10)$$

Berdasar penyederhanaan standar dengan mengaplikasikan dekomposisi *QR* pada matrik kanal H kita dapat menyederhanakan persamaan diatas menjadi [9] :

$$\hat{s} = \underset{s}{\operatorname{argmin}} \|\hat{y} - Rs\|^2 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{dengan } H &= QR \\ \text{dan } \hat{y} &= Q^H y \end{aligned}$$

Q adalah matriks berukuran $N_{Tx} \times N_{Rx}$ yang memiliki sifat $QQ^H = I$, dan R adalah matriks *upper triangular*. Dengan menjabarkan persamaan (11) maka didapat persamaan [9]:

$$\hat{s} = \underset{s}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^{N_{Tx}} \left| \hat{y}_i - \sum_{j=i}^{N_{Tx}} R_{ij} s_j \right|^2 \quad (12)$$

Dimulai dari $i = N_{Tx}$, persamaan (12) dapat diselesaikan sebagai berikut [9] :

$$\begin{aligned} T_i(P_i) &= T_{i+1}(P_{i+1}) + |e_i(P_i)| \\ T_{N_{Tx}+1}(P_{N_{Tx}+1}) &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

dengan

$$T_i(P_i) > T_{i+1}(P_{i+1})$$

dan

$$e_i(P_i) = \hat{y}_i - \sum_{j=i}^{N_{Tx}} R_{ij} s_j \quad (14)$$

Pada persamaan (13) dan (14) $P_i = [s_i, s_{i+1}, \dots, s_{N_{Tx}}]^T$ disebut sebagai *partial symbol vector*. Dalam algoritma *K-best* yang digambarkan dalam diagram pohon masing – masing node/titik percabangan disebut sebagai *Partial Euclidean Distance (PED)* dan dituliskan dalam persamaan (13) sebagai $T_i(P_i)$, dimana $T_{N_{Tx}+1}(P_{N_{Tx}+1}) = 0$ [9]. Pada persamaan pada (14), $|e_i(P_i)|^2$ menunjukkan penambahan jarak pada 2 node yang berturutan pada diagram pohon.

Algoritma *K-best* hanya menyimpan / mempertimbangkan sejumlah-*K* node yang memiliki PED akumulasi terkecil sebelum melanjutkan ke level pendeteksian berikutnya. Setelah menyelesaikan pendeteksian untuk seluruh level pada diagram pohon, akan didapat sejumlah-*K* cabang dengan PED terkecil. Tiap-tiap jalur pada diagram pohon melambangkan vektor sinyal *s*. Jalur dengan PED terkecil adalah hasil dari deteksi *K-best*. Pemilihan nilai *K* merupakan faktor penentu dalam performa BER dan kompleksitas deteksi [9]. Kompleksitas metode *K-Best* yaitu:

$$K = (\text{node } K)^{N_{Tx}} \quad (15)$$

dimana *K* = kompleksitas, Node *K* = nilai node *K*, dan N_{Tx} = jumlah antenna pemancar

Nilai *K* yang $\leq N_{Tx}$ dipilih sebagai *trade-off* antara performa dan perhitungan kompleksitas.

c. Trellis

Dalam metode *Trellis*, setelah kanal matriks **H** diuraikan menjadi matriks **Q** dan matriks **R**, sinyal yang diterima dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} y &= \mathbf{QR}x + \mathbf{N}_0 \\ \mathbf{Q}^H y &= \mathbf{Q}^H (\mathbf{QR}x + \mathbf{N}_0) \\ \mathbf{Q}^H y &= \mathbf{R}x + \mathbf{Q}^H \mathbf{N}_0 \end{aligned} \quad (15)$$

Sebagai contoh, dalam sistem MIMO $M \times N$, untuk mendapatkan kembali simbol *x* yang dikirimkan, jarak Eucledis (Λ) pada tiap sinyal *y* yang diterima dihitung sebagai berikut:

$$\Lambda = \left\| \begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \vdots \\ \hat{y}_M \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1N} \\ 0 & R_{22} & \dots & R_{2N} \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & R_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (16)$$

dimana $\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{Q}^H \mathbf{y}$. Λ dapat dipisah menjadi:

$$\Lambda = \omega^{(1)} + \omega^{(2)} + \dots + \omega^{(N)} \quad (17)$$

dimana $\omega^{(i)}$ adalah jarak Eucledis *I-D* Euclidean untuk antenna ke-*t*. Jika ada enam antenna pemancar dan penerima, maka:

$$\begin{aligned} \omega^{(1)} &= \|\hat{y}_6 - R_{44}x_6\|^2 \\ \omega^{(2)} &= \|\hat{y}_5 - (R_{55}x_5 + R_{56}x_6)\|^2 \\ \omega^{(3)} &= \|\hat{y}_4 - (R_{44}x_4 + R_{45}x_5 + R_{46}x_6)\|^2 \\ \omega^{(4)} &= \|\hat{y}_3 - (R_{33}x_3 + R_{34}x_4 + \dots + R_{36}x_6)\|^2 \\ \omega^{(5)} &= \|\hat{y}_2 - (R_{22}x_2 + R_{23}x_3 + \dots + R_{26}x_6)\|^2 \\ \omega^{(6)} &= \|\hat{y}_1 - (R_{11}x_1 + R_{12}x_2 + \dots + R_{16}x_6)\|^2 \end{aligned} \quad (18)$$

Dalam metode *Trellis*, jumlah *Partial Euclidean Distance (PED)* adalah M^2P pada tiap-tiap tingkat antenna, maka kompleksitasnya yaitu:

$$K = N_{Tx} M^2 P \quad (19)$$

dimana *K* : kompleksitas, *M* : jumlah poin konstelasi, N_{Tx} : jumlah antenna pemancar.

dengan *P* merupakan jumlah jalur dengan berat minimum yang dipilih pada tiap-tiap node. Jika demikian, maka *P* adalah 1.

d. Sphere Detection (SD)

Sphere Detection (SD) menghitung semua vector *x* yang memenuhi :

$$\|\mathbf{y} - \mathbf{R}\mathbf{x}\|^2 < \mathbf{Z}^2 \quad (20)$$

dimana **Z** merupakan jari-jari *Sphere*. Dalam metode *ZF* ini, memilih nilai **Z** merupakan hal penting untuk menentukan kompleksitas dan performa dari *SD*. Ketika nilai **Z** besar, *SD* akan memiliki jumlah hipotesis kandidat simbol yang besar pula. Dalam hal ini, *SD* memerlukan kompleksitas yang tinggi dan memberikan performa *error* yang tinggi juga. Sedangkan, jika nilai **Z** kecil, *SD* akan memiliki hipotesis kosong. Tidak ada kandidat simbol untuk dikalkulasikan dalam jarak eucledis bagi sinyal yang diterima sehingga menyebabkan *error*. Saat hal ini terjadi, pencarian harus diulangi dengan meningkatkan radius *Sphere*. Proses pencarian untuk memenuhi persamaan (15) dapat dipecahkan dengan menggunakan algoritma *back-substitution* (2.22). Kompleksitas dekoder *Sphere* dapat dihitung dengan persamaan:

$$K = N^2 + \sum_{i=1}^N ((i-1)S_{i-1} + 2 + S_i) \quad (21)$$

dimana *S_i* merupakan jumlah kandidat simbol yang berada di dalam radius.

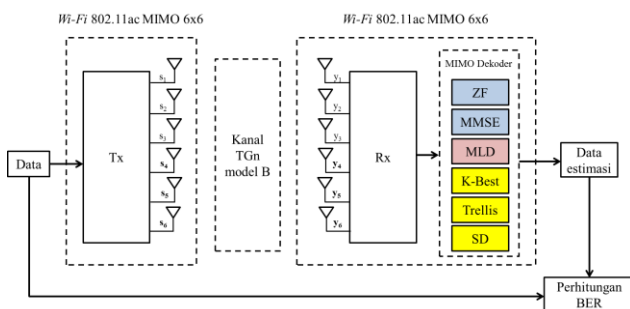
2.2. Perancangan Sistem

Perancangan metode *K-Best*, *Trellis*, dan *Sphere Detection* dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Matlab versi 7.6.0 (R2008a). Teknik MIMO yang digunakan adalah *Spatial Division Multiplexing* (SDM), dengan orde modulasi 64QAM.

Simulasi dilakukan pada MCS 5, 6, dan 7 pada IEEE 802.11ac dengan model kanal B IEEE 802.11TGn yang mewakili cakupan area suatu kantor kecil [11].

Setelah dilakukan perancangan dekoder MIMO dengan metode *K-Best*, *Trellis*, dan *Sphere Detection*, selanjutnya akan disimulasikan sehingga diperoleh grafik BER (*Bit Error Rate*) dan PER (*Packet Error Rate*) vs SNR (*Signal to Noise Ratio*). Grafik ini akan menunjukkan kinerja sistem algoritma ketiga metode tersebut pada MIMO decoder *Wi-Fi* 802.11ac, dan selanjutnya akan dibandingkan dengan algoritma deteksi dengan metode linier yang sudah ada yaitu ZF, MMSE, dan metode non linier optimal yaitu MLD.

Kompleksitas dari masing-masing metode juga akan dibandingkan. Diagram blok perancangan sistem dapat dilihat pada Gambar 2.



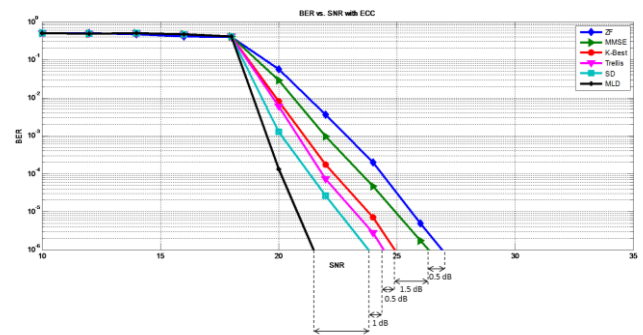
Gambar 2. Diagram blok perancangan sistem

3. Hasil dan Analisa

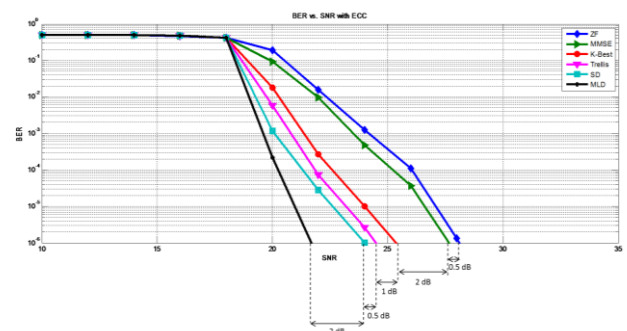
Parameter sistem saat pengujian ditampilkan pada tabel 1. Pada simulasi ini akan diteliti kinerja MIMO decoder pada konfigurasi antena 6 x 6 dengan orde modulasi 64QAM. Pada standar IEEE 802.11ac, konfigurasi ini termasuk dalam *Modulation and Coding Scheme* (MCS) 5, 6 dan 7. Ketiga MCS tersebut memiliki laju pengkodean masing-masing bernilai 2/3, 3/4 dan 5/6. Simulasi dilakukan pada model kanal B dengan iterasi sebanyak 1000 kali.

Tabel 1. Parameter simulasi

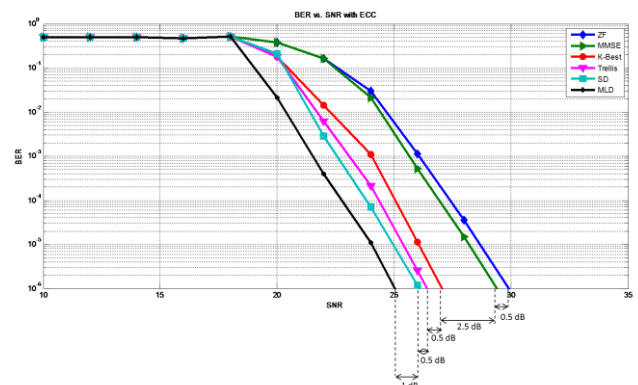
Parameter	Nilai
Konfigurasi antena	6x6
Modulasi Subcarrier	64 QAM
MCS	5, 6, 7
Tipe MIMO	SDM
Jumlah data per paket	1000 octet
Model kanal	TGn Channel B
Channel Code	Convolutional coding
Laju pengkodean	2/3, 3/4, 5/6
Dekoder MIMO	ZF, MMSE, MLD, <i>K-Best</i> , <i>Trellis</i> dan <i>Sphere Detection</i> (SD)
Throughput(Mbps)	720, 810, 900



Gambar 3. Hasil simulasi detektor MIMO pada MCS 5



Gambar 4. Hasil simulasi detektor MIMO pada MCS 6



Gambar 5. Hasil simulasi detektor MIMO pada MCS 7

Hasil pengujian pada MCS 5 dapat dilihat pada gambar 3. Decoder ZF dapat mencapai nilai tersebut pada SNR 27 dB, MMSE 26,5 dB, *K-Best* 25 dB, *Trellis* 24,5 dB, *Sphere Detection* 23,5 dB dan MLD 21,5 dB. Hal ini berarti bahwa kinerja dekoder metode non-linear lebih baik dari metode linear ZF dan MMSE. Dari ketiga metode non-linear sub-optimal, metode *Sphere Detection* yang paling mendekati MLD, maka kinerjanya yang paling mendekati optimal. Selisih kinerja dekoder *Sphere Detection* dan MLD adalah 2 dB.

Hasil pengujian pada MCS 6 dapat dilihat pada gambar 4. Decoder ZF dapat mencapai nilai tersebut pada SNR 28 dB, MMSE 27,5 dB, *K-Best* 25,5 dB, *Trellis* 24,5 dB, *Sphere Detection* 24 dB dan MLD 22 dB. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja dekoder metode non-linear lebih baik dari metode linear ZF dan MMSE. Dari ketiga metode non-linear sub-optimal, metode *Sphere Detection* yang paling mendekati MLD, maka kinerjanya yang paling mendekati optimal. Selisih kinerja dekoder *Sphere Detection* dan MLD adalah 2 dB.

Hasil pengujian pada MCS 7 dapat dilihat pada gambar 5. Decoder ZF dapat mencapai nilai tersebut pada SNR 30 dB, MMSE 29,5 dB, *K-Best* 27 dB, *Trellis* 26,5 dB, *Sphere Detection* 26 dB dan MLD 25 dB. Hal ini berarti bahwa kinerja dekoder metode non-linear lebih baik dari metode linear ZF dan MMSE. Dari ketiga metode non-linear sub-optimal, metode *Sphere Detection* yang paling mendekati MLD, maka kinerjanya yang paling mendekati optimal. Selisih kinerja dekoder *Sphere Detection* dan MLD adalah 1 dB. Untuk selisih kinerja tiap decoder lainnya dapat di lihat pada tabel 2.

Dari semua hasil simulasi diatas, untuk lebih jelasnya dapat dilihat rangkuman pada tabel 2 dan 3 di bawah ini :

Tabel 2. Perbandingan Hasil Simulasi pada BER 10⁻⁶

MCS	ZF	MMSE	K-Best	Trellis	SD	MLD
5	27	26,5	25	24,5	23,5	21,5
6	28	27,5	25,5	24,5	24	22
7	30	29,5	27	26,5	26	25

Tabel 3. Perbandingan selisih kinerja tiap decoder

MCS	K-Best			Trellis			SD		
	a ¹⁾	b ¹⁾	c ¹⁾	a ¹⁾	b ¹⁾	c ¹⁾	a ¹⁾	b ¹⁾	c ¹⁾
5	2	1,5	3,5	2,5	2	3	3,5	3	2
6	2,5	2	3,5	3,5	3	2,5	4	3,5	2
7	3	2,5	2	3,5	3	1,5	4	3,5	1

¹⁾ a : ZF, b : MMSE, c : MLD

3.2. Analisis Kompleksitas

Analisis kompleksitas meliputi jumlah operasi penjumlahan dan perkalian. Setiap operasi matriks akan dipecah dalam bentuk penjumlahan dan perkalian.

Perbandingan kompleksitas untuk masing – masing MIMO decoder dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan kompleksitas MIMO decoder dengan 6 antena modulasi 64-QAM

ZF	MMSE	MLD	K-Best	Trellis	SD
42	42	6.871x10 ¹⁰	46656	24576	384

4. Kesimpulan

Dekoder MIMO dengan metode *K-best*, *Trellis* dan *Sphere Detection* telah berhasil diimplementasikan pada dekoder untuk WLAN 802.11ac. Dari hasil simulasi terlihat bahwa kinerja dekoder *Sphere Detection* mendekati kinerja dekoder MLD dengan selisih rata-rata 1,67 dB dan terjadi peningkatan kinerja dibanding dekoder ZF sebesar 3,5 – 4 dB dan MMSE sebesar 3 – 3,5 dB.

Pada target BER 10⁻⁶ nilai SNR tertinggi masing – masing dekoder dicapai pada MCS 7, yaitu 30 dB untuk ZF, 29,5 dB untuk MMSE, 27 dB untuk *K-best*, 26,5 dB untuk *Trellis*, 26 dB untuk *Sphere Detection* dan 25 dB untuk MLD. Sedangkan nilai SNR terendah dicapai pada MCS 5, yaitu 27 dB untuk ZF, 26,5 dB untuk MMSE, 25 dB untuk *K-best*, 24,5 dB untuk *Trellis*, 23,5 dB untuk *Sphere Detection* dan 21,5 dB untuk MLD.

Kompleksitas pada MCS 5, 6 dan 7 dengan modulasi 64-QAM dan jumlah antena 6 pada metode linear, ZF dan MMSE sebesar 42. Metode linear ini kompleksitasnya paling rendah. Sedangkan untuk kompleksitas paling tinggi yaitu decoder MLD dengan kinerja yang optimal, sebesar 6,8719x10¹⁰. Metode non-linear sub-optimal dengan kompleksitas rendah tetapi mampu menghasilkan kinerja mendekati MLD yaitu decoder *Sphere Detection*, dengan kompleksitas sebesar 382.

Referensi

- [1]. "Supplement to IEEE STANDARD for information Technology – Telecommunication and information exchange between systems – Local and Metropolitan area Networks – Specific Requirements", IEEE Std 802.11a – 1999(R2003), Juni 2003
- [2]. "Draft STANDARD for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements", IEEE P802.11n./D9.0, March 2009.
- [3]. Eldad, Perahia and Robert Stacey. 2008. "Next Generation Wireless LANs- Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n". Cambridge University Press.
- [4]. Maulana, Aulia Iqbal. "Peningkatan Kinerja WLAN 802.11n dengan Keragaman Penerima dan Pengaturan Jarak Antar Antena". Laporan Tugas Akhir S1 Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia.

- [5]. Wahyul Amien Syafei and Hayu Pratista. 2011. "Performance Evaluation of Wireless LAN IEEE802.11n by Antenna Spacing". International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) 2011, Jogjakarta, Indonesia.
- [6]. Qisthi, Amelia Syarfina. "Peningkatan Kinerja Wi-Fi 802.11n Menggunakan MIMO Decoder Berbasis MLD (Maximum Likelihood Detection) pada Konfigurasi Antena 4x4". Laporan Tugas Akhir S1 Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia.
- [7]. Yama Aryadanangjaya, Wahyul Amien SYAFEI, Imam Santoso, "Implementation of Trellis Detector Based MIMO Decoder in WLAN IEEE 802.11n," International Joint Conference on Advanced Engineering (IJCAE) 2012, Diponegoro University, Semarang, Indonesia, October, 18-19, 2012. Proceedings pp.117-121. ISBN: 978-602-097-299-2.
- [8]. Wahyul Amien SYAFEI, Anky Setyadea, Imam Santoso "High Performance Low Complexity for High Throughput WLAN 802.11n System," The 1st Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (CITACEE) 2013, Diponegoro University, Semarang, Indonesia, November, 16, 2013. Proceedings pp.84 - 88. ISSN: 2338 - 5154.
- [9]. Hasnanta, Ardea Satya. "Implementasi Dekoder MIMO Berbasis Metode K-Best pada WLAN 802.11n". Laporan Tugas Akhir S1 Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia.
- [10]. Eldad, Perahia and Robert Stacey. 2008. "Next Generation Wireless LANs- Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n". Cambridge University Press.
- [11]. "TGN Channel Models", IEEE P802.11 Wireless LANs, Mei 2004.
- [12]. "IEEE STANDARD for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements", IEEE Std 802.11ac, 2013.