

IMPLEMENTASI DEKODER MIMO BERBASIS METODE *K-BEST* PADA WLAN 802.11n

Ardea Satya Hasnanta^{*)}, Wahyul Amien Syafei, and Imam Santoso

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

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

Abstrak

Wireless Local Area Network (WLAN) 802.11n adalah teknologi jaringan nirkabel yang digunakan untuk komunikasi data dengan throughput maksimum 600 Mbps. Ciri utama pada standar 802.11n adalah penerapan teknik Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) dan Multiple Input Multiple Output (MIMO). Kinerja dekoder linier pada 802.11n sangat rendah jika dibandingkan Maximum Likelihood Detection (MLD), yang merupakan dekoder dengan kinerja optimal tapi memiliki kompleksitas tinggi. Pada penelitian kali ini akan diimplementasikan metode deteksi K-best pada MIMO dekoder WLAN 802.11n untuk meningkatkan kinerja sistem sebelumnya yang menggunakan teknik Zero Forcing (ZF) dan Minimum Mean Square Error (MMSE). Simulasi sistem dilakukan pada kanal model TGn channel B pada konfigurasi antena 2x2, orde modulasi QPSK, 16QAM, 64QAM. Parameter perbandingan adalah nilai BER dengan target 10^{-4} terhadap SNR, dan perbandingan kompleksitas tiap dekoder. Dari hasil simulasi didapat kesimpulan bahwa detektor K-best memiliki kinerja mendekati MLD, rata-rata berselisih 1 dB. Kinerja dekoder K-best juga lebih baik dibanding dekoder ZF dan MMSE, yaitu rata-rata berselisih 12 dB terhadap ZF dan 8 dB terhadap MMSE. Rasio kompleksitas K-best terhadap MLD akan menurun secara signifikan tergantung jumlah antena pemancar (N_{Tx}) dan jenis modulasi yang digunakan, yaitu dari 46,9 % pada QPSK hingga 5,27 % pada 64 QAM untuk $N_{Tx}=2$.

Kata Kunci : IEEE WLAN 802.11n, MIMO, OFDM, metode K-best.

Abstract

Wireless Local Area Network (WLAN) 802.11n is wireless network technology for data communication with 600 Mbps maximum throughput. The main feature of 802.11n standard are implementation of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and Multiple Input Multiple Output (MIMO) technique. Performance of linear decoder on 802.11n is very low than Maximum Likelihood detection (MLD), which has the most optimal performance but with very high complexity. This final project conduct research to implementing K-best detection method on MIMO decoder of WLAN 802.11n to increase system performance of preceding MIMO decoding method i.e Zero Forcing (ZF), Minimum Mean Square Error (MMSE). Simulation is done under TGn channel B, 2x2 MIMO configuration in QPSK, 16QAM, 64QAM modulation order. Compared parameter are value of BER with target 10^{-4} versus SNR and complexity of each decoder. The result shown, K-best detector gives near-MLD performance, and only degrade 1 dB. K-best decoder performance also better than ZF and MMSE decoder that has average odds of 12 dB to 8 dB against ZF and MMSE. Complexity ratio of K-best to MLD will significantly decrease as increasement of Transmitter antenna (N_{Tx}) and Modulation Scheme, that is from 46,9 % for QPSK to 5,27 % for 64 QAM in $N_{Tx}=2$.

Keyword : IEEE WLAN 802.11n, MIMO, OFDM, K-best Method

1 Pendahuluan

Wireless LAN merupakan teknologi jaringan nirkabel yang digunakan untuk komunikasi data. Ada dua teknik yang digunakan dalam perkembangan WLAN, teknik pertama yaitu Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). 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 (*Multi Input Multi Output*), MIMO merupakan penerapan antena jamak pada sisi pengirim dan penerima. Teknik OFDM telah diterapkan pada 802.11a dengan sistem SISO (*Single Input Single Output* / antena tunggal)

pada frekuensi 5 GHz[1]. Pengembangan sistem selanjutnya adalah dengan penerapan MIMO-OFDM pada 802.11n[2]. Pengiriman beberapa data independen pada sistem MIMO disebut teknik *spatial multiplexing*. WLAN 802.11n menggunakan MIMO dengan jumlah antena pemancar sampai dengan empat buah. Penerapan MIMO-OFDM pada WLAN 802.11n menjanjikan kenaikan *data rate* mencapai 600 Mbps, 10 kali lipat dibandingkan para pendahulunya[3].

Dengan penggunaan kanal yang sama untuk mengirim beberapa data independen, dibutuhkan teknik khusus untuk mendapatkan kembali informasi yang dikirim. Dua teknik dekoder linier yang digunakan pada WLAN IEEE 802.11n adalah *zero Forcing* (ZF) dan *Minimum Mean Square Error* (MMSE). Keduanya memiliki kompleksitas yang rendah namun kinerjanya rendah. Teknik dengan kinerja optimal adalah *Maximum Likelihood Detection* (MLD), teknik ini memiliki kinerja paling baik namun tingkat kompleksitasnya akan bertambah seiring dengan bertambahnya orde modulasi dan jumlah antena pemancar [4]. Oleh sebab itu, sekarang banyak dikembangkan metode sub-optimal sebagai metode turunan MLD dengan kompleksitas lebih rendah. Misalnya metode deteksi *Trellis, sphere*, [5] [6] dan *K-best*.

Pada penelitian kali ini difokuskan terhadap peningkatan kinerja pada WLAN IEEE 802.11n dengan menerapkan metode *K-Best* sebagai detektor MIMO. Teknik MIMO yang digunakan adalah *Spatial Division Multiplexing* (SDM) pada konfigurasi MIMO 2 x 2 dengan orde modulasi QPSK, 16 QAM, dan 64QAM. Simulasi dilakukan pada model kanal B IEEE 802.11Tn yang mewakili cakupan area suatu kantor kecil. Parameter perbandingan adalah nilai *Bit Error Rate* (BER) terhadap *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan kompleksitas masing – masing metode, serta perbandingan kompleksitas antara metode *K-best* dan MLD.

2 Metode

2.1 Sistem MIMO

MIMO merupakan salah satu teknik diversitas, dimana penggunaan teknik diversitas dapat mengurangi *fading* dan interferensi dari user lain dan meningkatkan *data rate* tanpa mengorbankan *bandwidth* maupun daya pancarnya. Teknik MIMO menggunakan beberapa antena pemancar dan penerima. Skema MIMO yang biasa digunakan dibedakan menjadi dua jenis. Skema MIMO tersebut adalah *Space Time Code* (STC) dan *Spatial Division Multiplexing* (SDM). Prinsip SDM adalah deretan simbol yang akan dikirim dipecah menjadi beberapa paralel deretan simbol yang kemudian ditransmisikan secara simultan dengan *bandwidth* yang sama pada masing-masing antena, sehingga teknik ini memberikan peningkatan laju data sesuai jumlah antena pengirim. Pada sistem MIMO dengan N_{Tx} transmitter dan N_{Rx}

receiver, persamaan dasar sistem dideskripsikan sebagai berikut [7] :

$$\mathbf{y}_c = \mathbf{H}_c \mathbf{s}_c + \mathbf{n}_c \quad (1)$$

\mathbf{y}_c adalah simbol yang diterima, \mathbf{H}_c adalah matriks kanal , \mathbf{s}_c adalah simbol yang ditransmisikan, sedangkan \mathbf{n}_c adalah *noise*.

Persamaan (1) masih dalam bentuk kompleks, dan dimungkinkan untuk merubah persamaan sinyal kompleks (1) berdimensi N_{Tx} ke persamaan bentuk real berdimensi- $2N_{Tx}$ yang setara sehingga diperoleh persamaan :

$$\begin{bmatrix} Re\{y_c\} \\ Im\{y_c\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Re\{H_c\} & -Im\{H_c\} \\ Im\{H_c\} & Re\{H_c\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Re\{s_c\} \\ Im\{s_c\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Re\{n_c\} \\ Im\{n_c\} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Persamaan (2) bisa disederhanakan kembali menjadi persamaan dasar sistem :

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (3)$$

Maka dimensi dari \mathbf{y} , \mathbf{H} dan \mathbf{s} adalah $2N_{Rx} \times 1$, $2N_{Rx} \times 2N_{Tx}$, dan $2N_{Tx} \times 1$. Untuk menyederhanakan perhitungan, *noise* diabaikan terlebih dahulu.

2.2 MIMO Decoding

2.2.1 Metode Linier

Metode linier yang umum digunakan ada 2 yaitu:

a. Zero Forcing (ZF)

Untuk mendapatkan nilai \mathbf{s} dalam metode ZF dicari matriks bobot \mathbf{W} yang memenuhi $\mathbf{W}\mathbf{H} = \mathbf{I}$. Sehingga dapat dituliskan

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (4)$$

maka nilai estimasi \mathbf{s} adalah

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}} &= \mathbf{W}\mathbf{y} \\ \hat{\mathbf{s}} &= \mathbf{W}(\mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}) \\ \hat{\mathbf{s}} &= \mathbf{s} + \mathbf{W}\mathbf{n} \end{aligned} \quad (5)$$

b. Minimum Mean Square Error (MMSE)

Dari persamaan (4), metode *Minimum Mean Square Error* (MMSE) mencari invers matriks kanal dengan memperhitungkan *noise*, sehingga persamaan (4) menjadi:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{H}^H \quad (6)$$

Dengan \mathbf{I} adalah matriks identitas. Ketika faktor noise adalah nol, MMSE akan sama dengan persamaan ZF.

Untuk menghitung kompleksitas dekoder linear menggunakan rumus sebagai berikut[8] :

$$K = N_{Tx}^2 + N_{Tx} \quad (7)$$

2.2.2 Metode Non Linier

a. Maximum Likelihood Detection (MLD)

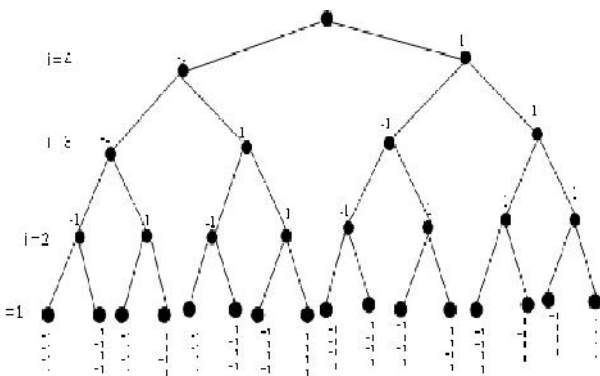
Metode Maximum Likelihood merupakan metode deteksi dengan kinerja optimal. Pada metode deteksi *Maximum Likelihood*, dicari jarak *euclidean* antara sinyal yang diterima dari pemancar dan hasil perkalian kanal, dengan kandidat simbol dari sinyal yang ditransmisikan. Metode ini dirumuskan sebagai berikut :

$$\hat{s} = \underset{s}{\operatorname{argmin}} \|y - Hs\|^2 \quad (8)$$

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

$$\text{Kompleksitas} = M^{N_{Tx}} \cdot N_{Tx}^2 \quad (9)$$

dimana M adalah orde modulasi yang digunakan.



Gambar 1 Diagram pohon deteksi MLD , untuk sistem dengan modulasi BPSK dan jumlah antenna pemancar = 4 (i=1,2,, N_{TX}).

b. K-best Decoder

Dari persamaan jarak *euclidean* metode MLD (8), matrik kanal H didekomposisi menggunakan dekomposisi QR, menjadi [7][9] :

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

dimana

$$H = QR$$

dan

$$\hat{y} = Q^H y$$

Q adalah matriks berukuran N_{TX} x N_{RX} yang memiliki sifat QQ^H = I, dan R adalah matriks *upper triangular*.

Dimulai dari i = N_{TX}, persamaan (10) dapat diselesaikan sebagai berikut :

$$T_i(P_i) = T_{i+1}(P_{i+1}) + |e_i(P_i)|^2 \quad (11)$$

$$T_{N_{Tx}+1}(P_{N_{Tx}+1}) = 0$$

dimana

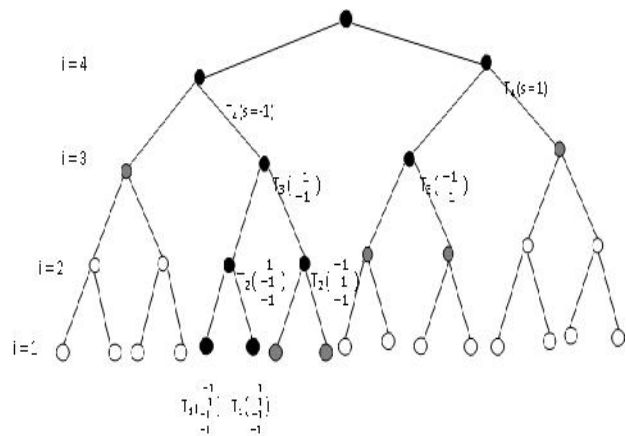
$$T_i(P_i) > T_{i+1}(P_{i+1})$$

dan

$$e_i(P_i) = \hat{y}_i - \sum_{j=i}^{N_{Tx}} R_{ij} s_j \quad (12)$$

Pada persamaan (11) dan (8) P_i = [s_i, s_{i+1}, ..., s_{N_{TX}}]^T disebut sebagai *partial symbol vector*. Dalam algoritma *K-best* yang digambarkan dalam diagram pohon pada gambar 2,

masing – masing node / titik percabangan disebut *Partial Euclidean Distance* (PED) dan dituliskan dalam persamaan (10) sebagai T_i(P_i). Pada persamaan (12) , e_i (P_i) menunjukkan penambahan jarak pada 2 node yang berturutan pada diagram pohon. Algoritma *K-best* hanya menyimpan / mempertimbangkan sejumlah-K node yang memiliki akumulasi PED terkecil sebelum melanjutkan ke level pendeteksian berikutnya. Setelah menyelesaikan pendeteksian untuk seluruh level pada diagram pohon, akan didapat sejumlah 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.



Gambar 2 Diagram pohon deteksi K-best , untuk sistem MIMO dengan modulasi BPSK , jumlah antenna pemancar = 4, nilai K = 2 (i=1,2,, N_{TX}).

Gambar 2 mengilustrasikan pendeteksian algoritma *K-Best* dengan nilai K = 2 pada sistem MIMO 4x4 antenna dan modulasi BPSK. Node – node hitam menunjukkan node K terbaik pada tiap level dan node – node abu – abu adalah node yang dipangkas, yang tidak diteruskan pada saat pemilihan PED minimum. Node – node yang tidak dilewati sama sekali ditunjukkan dengan node berwarna putih.

Perhitungan kompleksitas *K-best* dilakukan per tahap ke-*i*, dengan menjabarkan perkalian matriks pada persamaan (10),(11) dan (12). Dari persamaan (10) terlihat bahwa terdapat 1 operasi penjumlahan/ pengurangan matriks dan 1 operasi perkalian matriks. Pada tahap awal akan dihitung jumlah penjumlahan dan perkalian yang ada untuk semua node yang dilewati. Pada contoh diagram, saat i=1 setiap kombinasi simbol akan dikalikan terhadap sinyal yang diterima, sehingga terdapat 2 kombinasi sesuai titik konstelasi BPSK. Node yang dihitung adalah node yang berwarna hitam dan abu-abu, sehingga dengan mengambil nilai K = 2, terdapat 4 node perhitungan pada i= 3 sampai i = 1. Sehingga banyaknya operasi penjumlahan sama dengan operasi perkalian yaitu 14.

Jumlah ini akan berbeda, tergantung modulasi dan nilai K . Kemudian, pada tiap node juga terjadi operasi perkalian dan penjumlahan matriks. Contoh perhitungan PED pada sistem MIMO 4x4 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} T_4(P_4) &= T_3(P^3) + |\hat{y} - \sum_{j=2}^4 R_{4j} s_j|^2 \\ T_3(P_3) &= T_4(P^4) + |\hat{y} - \sum_{j=2}^4 R_{3j} s_j + R_{44} s_4|^2 \\ T_2(P_2) &= T_3(P^3) + |\hat{y} - \sum_{j=2}^4 R_{2j} s_j + R_{32} s_3 + R_{44} s_4|^2 \\ T_1(P_1) &= T_2(P^2) + |\hat{y} - \sum_{j=2}^4 R_{1j} s_j + R_{22} s_2 + R_{32} s_3 + R_{44} s_4|^2 \end{aligned} \quad (13)$$

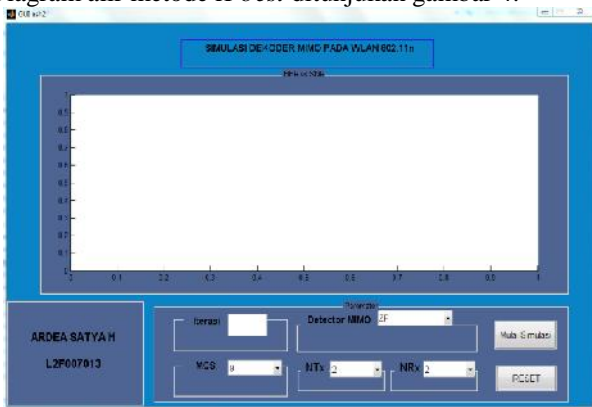
matriks kanal setelah dekomposisi QR adalah

$$R = \begin{bmatrix} R_{00} & R_{01} & R_{02} & R_{03} \\ 0 & R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ 0 & 0 & R_{22} & R_{23} \\ 0 & 0 & 0 & R_{33} \end{bmatrix}$$

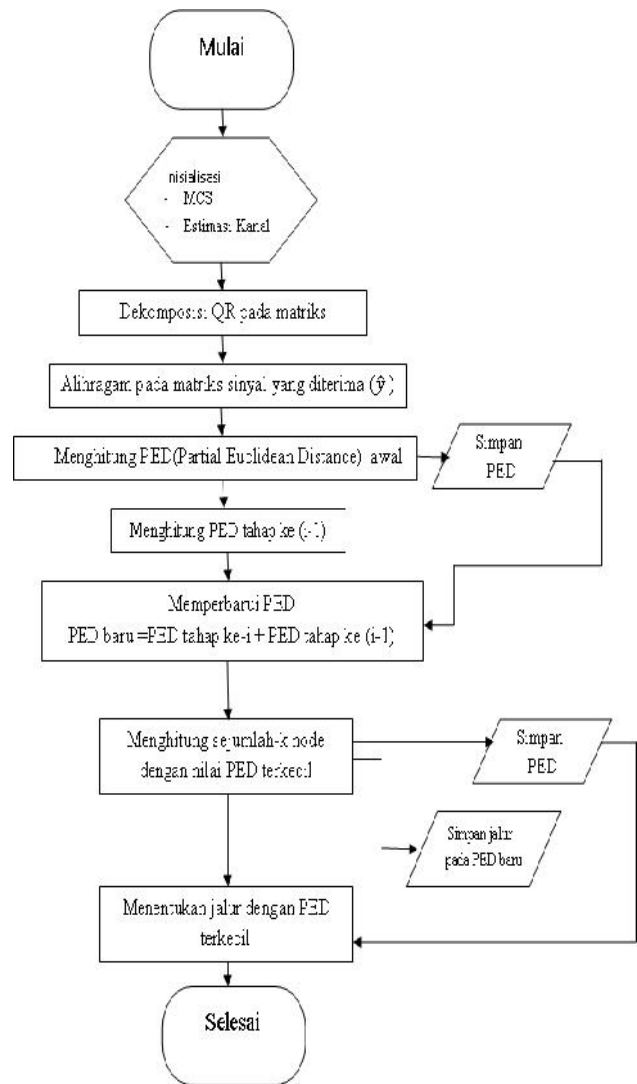
- Pada $i = 4$ (baris 4), banyaknya anggota matriks dengan nilai 0 adalah 1 (R_{33}), jumlah operasi perkalian adalah 1, operasi penjumlahan adalah 0.
- Pada $i = 3$ (baris 3), banyaknya anggota matriks dengan nilai 0 adalah 2 (R_{22} dan R_{23}), jumlah operasi perkalian adalah 2, operasi penjumlahan adalah 1.
- Pada $i = 2$ (baris 2), banyaknya anggota matriks dengan nilai 0 adalah 3 (R_{11} , R_{12} dan R_{13}), jumlah operasi perkalian adalah 3, operasi penjumlahan adalah 2.
- Pada $i = 1$ (baris 1), banyaknya anggota matriks dengan nilai 0 adalah 4 (R_{00} , R_{01} , R_{02} dan R_{03}), jumlah operasi perkalian adalah 4, operasi penjumlahan adalah 3. Operasi penjumlahan juga terjadi pada tahap penambahan PED. Penambahan PED terjadi pada setiap node pada tahap ke- i . Sehingga terdapat sejumlah M^2 penjumlahan PED pada tahap $i=N_{Tx}-1$, dan sejumlah- $K \times M$ pada $i=(N_{Tx}-2)$ sampai $i = 1$.

2.3 Perancangan Sistem

Pada bagian ini akan dipaparkan perancangan sistem dan parameter simulasi. GUI program simulasi MIMO dekoder pada WLAN 802.11n ditunjukkan pada gambar 3. Diagram alir metode K -best ditunjukkan gambar 4.



Gambar 3 GUI program simulasi MIMO dekoder pada WLAN 802.11n



Gambar 4 Diagram alir metode K -best

Contoh syntax pada bahasa pemrograman matlab untuk sistem MIMO 2x2 dengan jenis modulasi QPSK dan nilai $K = 4$ sebagai berikut:

```

case {9,10} %Ntx = 2, modulasi = QPSK
for sym = 1 : Nsym
    for nsd = 1 : Nsd
        Q = 0;
        R = 0;
        Y = CHEQin(:,nsd+(sym-1)*Nsd);
        CH_EST = W(:, :, nsd);
        [Q,R] = qr (CH_EST);
        Y_qr = Q'*Y;
    end
    for n=1:4
        T(n) = Y_qr(2, :) - R(2, :) * [0 QPSK_TABLE(n)].';
    end
    T_0 = abs(T).^2;
    T=0;

```

Pada tahap ini dilakukan inisialisasi parameter simulasi dan proses dekomposisi QR pada matriks kanal H . Kemudian dicari PED untuk antenna ke- $(i=N_{Tx})$ seperti ditunjukkan pada syntax baris ke 11 kemudian disimpan

dengan nama T_0. PED awal ini digunakan untuk proses *update* PED tahap selanjutnya.

```
A = reshape (T_0,[],1);
Z = sort(A);
minZ = Z(1:4);
pos=[];
path=[];
for n = 1:size(minZ);
    [row,col,v]=find(minZ(n,1)==T_0);
    p=[col,row];
    pos = [pos;p];
end
path_1 = [ 0 QPSK_TABLE(pos(1,1)) ]; path_2 = [
0 QPSK_TABLE(pos(2,1)) ];
path_3 = [ 0 QPSK_TABLE(pos(3,1)) ];
path_4 = [ 0 QPSK_TABLE(pos(4,1)) ];
path = [path_1;path_2;path_3;path_4];
wT_0 = minZ;
for n = 1:4
    for m = 1:4
        T (m,n)= Y_qr(1,:)-R(1,:)*[QPSK_TABLE(n)
QPSK_TABLE(m)].';
        end
        end
        T_1 = abs(T).^2;
        T =0;
        for c = 1:4
            T_1(:,c) = T_0.' + T_1(:,c);
        end
    End
```

Pada tahap ini dicari 4 node dengan nilai PED terkecil, kemudian ditentukan jalur sesuai node – node tersebut yang akan digunakan sebagai acuan dalam proses deteksi pada tahap berikutnya. Caranya adalah merubah matriks PED awal (T_0) menjadi 1 kolom lalu dicari 4 nilai minimalnya dan dicari letak 4 nilai tersebut pada matriks PED awal tadi.

Tahap selanjutnya adalah mencari PED pada tahap ke-(i-1) yang disimpan dengan nama T_1. Selanjutnya dilakukan penambahan PED tahap ke-i dan PED tahap ke-(i-1).

```
temp_path = path;
for c = 1:
[a,x] = min(T_1(:,c));
path(c,:)=[0 QPSK_TABLE(x)];
PED(c) = a;
end
path(:,1)= QPSK_TABLE;
T_1=PED.';
[PED,m] = min(T_1);
output = path(m,:);
CHEQout(:,nsd+(sym-1)*Nsd) = output;
end
end
```

setelah didapat nilai PED T_1 kemudian dilakukan perbaruan jalur.

Tahap terakhir pada simulasi ini adalah menentukan jalur dengan PED minimum dari jalur baru yang telah dibentuk.

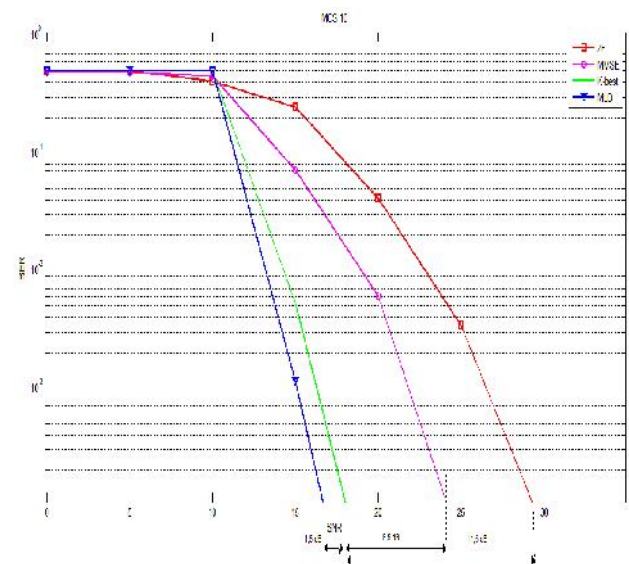
Jalur inilah yang kemudian disimpan sebagai hasil deteksi.

3. Hasil dan Analisis

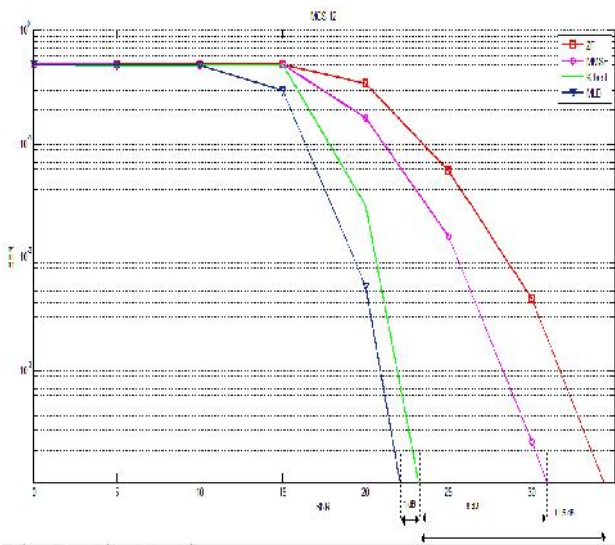
Parameter sistem saat pengujian ditampilkan pada tabel 1. Pada simulasi ini akan diteliti kinerja MIMO *decoder* pada konfigurasi antena 2 x 2 dengan orde modulasi QPSK, 16 QAM, 64QAM. Pada standar IEEE 802.11n, konfigurasi ini termasuk dalam *Modulation and Coding Scheme* (MCS) 10,12 dan 14. Ketiga MCS tersebut memiliki laju pengkodean masing- masing bernilai 3/4. Simulasi dilakukan pada model kanal B dengan iterasi sebanyak 1000 kali.

Tabel 1 Parameter simulasi

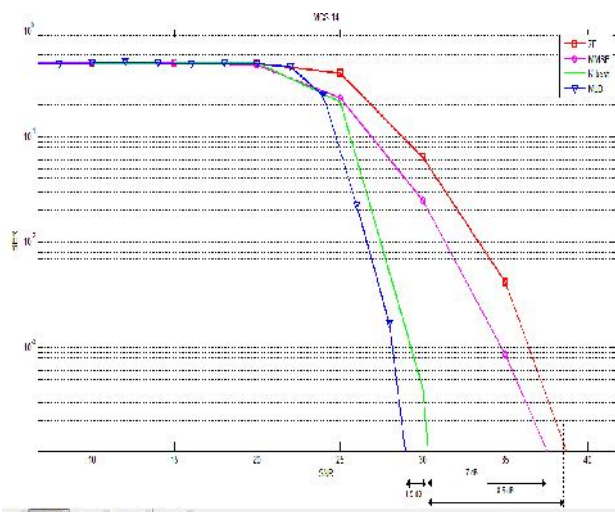
Parameter	Nilai
Konfigurasi antena	2x2
MCS	10,12,14
Modulasi Subcarrier	64 QAM
Tipe MIMO	SDM
Jumlah data per paket	1000 octet
Model kanal	TGn Channel B
Channel Code	Convolutional coding
Laju pengkodean	3/4
MIMO decoder	ZF,MMSE,MLD,K-best
Throughput(Mbps)	81,162,243



Gambar 5 Hasil simulasi detektor *K-best* pada MCS 10



Gambar 6 Hasil simulasi detektor *K-best* pada MCS 12



Gambar 7 Hasil simulasi detektor *K-best* pada MCS 14

Hasil pengujian pada MCS 10 dapat dilihat pada gambar 6. Dekoder MLD dapat mencapai target BER pada SNR 16,5 dB, ZF 29,5 dB, MMSE 24 dB, *K-best* 18 dB. Hal ini berarti bahwa kinerja dekoder *K-best* lebih baik 11,5 dB dari ZF, dan 6,5 dB dari MMSE. Selisih kinerja metode *K-best* terhadap MLD adalah 1,5 dB.

Hasil pengujian pada MCS 12 dapat dilihat pada gambar 7. dekoder MLD dapat mencapai target BER pada SNR 22 dB, ZF 34,5 dB, MMSE 31 dB, *K-best* 23 dB. Hal ini berarti bahwa kinerja dekoder *K-best* lebih baik 8,5 dB dari ZF, dan 8 dB dari MMSE. Selisih kinerja metode *K-best* terhadap MLD adalah 1 dB.

Hasil pengujian pada MCS 14 dapat dilihat pada gambar 8. Dekoder MLD dapat mencapai target BER pada SNR 29 dB, ZF 39 dB, MMSE 37,5 dB, *K-best* 30,5 dB. Hal

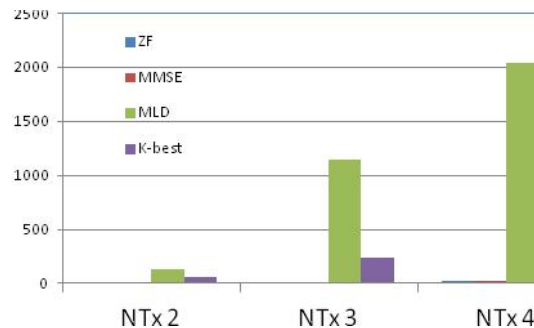
ini berarti bahwa kinerja dekoder *K-best* lebih baik 8,5 dB dari ZF, dan 7 dB dari MMSE. Selisih kinerja metode *K-best* terhadap MLD adalah 1,5 dB.

3.2 Analisa Kompleksitas

Analisis kompleksitas meliputi jumlah operasi penjumlahan dan perkalian. Setiap operasi matriks akan dipecah dalam bentuk penjumlahan dan perkalian. Perbandingan kompleksitas untuk masing – masing dekoder MIMO dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2 Perbandingan kompleksitas dekoder MIMO

NTx	Modulasi	Kompleksitas (= operasi perkalian + penjumlahan)			Rasio Kompleksitas <i>K-best</i> : MLD
		Linear Receiver	MLD	<i>K-best</i>	
2	QPSK	6	128	60	46,9%
	16QAM	6	1048	400	38,2%
	64QAM	6	32768	1728	5,27%
3	QPSK	12	1152	244	21,2%
	16QAM	12	36864	2096	5,69%
	64QAM	12	2359296	26816	1,14%
4	QPSK	20	2048	392	19,14%
	16QAM	20	2097152	2736	0,13%
	64QAM	20	536870912	29376	0,0055%



Gambar 8 Grafik perbandingan kompleksitas *K-best*: MLD.

4. Penutup

Kami telah berhasil mengimplementasikan metode deteksi *K-best* pada dekoder untuk WLAN 802.11n. Dari simulasi terlihat kinerja dekoder *K-best* mendekati kinerja dekoder MLD, dan terjadi peningkatan kinerja dibanding kinerja dekoder ZF dan MMSE. Untuk MCS 10 ,12,dan 14 selisih rata-rata dekoder MLD dari *K-best* adalah 1 dB. Sedangkan *K-best* berselisih rata-rata 9,5 dB dari ZF dan 7 dB dari MMSE.

Perbandingan kompleksitas setiap MIMO dekoder dapat dilihat pada tabel 2. Dari tabel tersebut terlihat bahwa rasio kompleksitas *K-best* terhadap MLD menurun secara signifikan seiring dengan bertambahnya jumlah antena

pemancar (N_{Tx}) dan jenis modulasi yang digunakan. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat dicari nilai K yang optimal. Penentuan nilai K berpengaruh pada kinerja dan kompleksitas.

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]. E. Perahia and Robert Stacey, "Next Generation Wireless LANs- Throughput, Robustness, and Reliability in 802.11n".Cambridge University Press, 2008.
- [4]. Wahyul Amien SYAFEI, Reza "Perbaikan Kinerja WLAN IEEE802.11n Dengan Implementasi Dekoder MIMO Berbasis Maximum Likelihood Detection," Konferensi Nasional Forum Pendidikan Tinggi Teknik Elektro Indonesia (FORTEI), Universitas Indonesia, Jakarta, 20 – 22 September 2012.
- [5]. 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.
- [6]. 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.
- [7]. Ramin Shariat-Yazdi, Tad Kwasniewski. 2008."Configurable K-Best MIMO Detector Architectur".Department of Electronics Carleton University, Ottawa, Canada.
- [8]. E. Zimmerman, W. Rave, Gerhard Fettweis. "On the complexity of Spere Decoding" Dresden University of Technology, Vodafone Chair Mobile Coomunication Systems, D-01062 Dresden, Germany.2003
- [9]. Markus Wenk,Martin Zellweger, Andreas Burg, Norbert Felber, wolfgang Fichtner."K-Best MIMO Detection VLSI Architectures Achieving up to 424 Mbps"Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ), Zurich, Switzerland
- [10]. Wahyul Amien SYAFEI, Yuhei Nagao, Ryuta Imashioya, Masayuki Kurosaki and Hiroshi Ochi, "Performance Evaluation of Low Density Parity Check CODEC for IEEE802.11n and Its RTL Design." Smart Info-Media System in Bangkok (SISB 2008), December 8, 2008, Bangkok, Thailand.
- [11]. Jalden Joakim. 2004. "Maximum Likelihood Detection for the linear MIMO Channel".Sweden
- [12]. Pei-Yun Tsai, Wei-Tzuo Chen, Xing-Cheng Lin, Meng-Yuan Huang. 2010. "A 4x4 64-QAM Reduced-Complexity K-Best MIMO Detector up to 1.5 Gbps", Department of Electrical Engineering, National Central University. Taoyuan,Taiwan.
- [13]. Wahyul Amien SYAFEI and Hayu Pratista, "Performance Evaluation of Wireless LAN IEEE802.11n by Antenna Spacing." International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) 2011, Jogjakarta, Indonesia, July 28, 2011.
- [14]. A. van Zelst. "Space Division Multiplexing Algorithms".Paper for IEEE, Eindhoven University of Technologies, Eindhoven. 2000.
- [15]. Wahyul Amien SYAFEI, Yuhei NAGAO, Ryuichi YOHENA, Hiroyuki SHIMAJIRI, Takeo YOSHIDA, Masayuki KUROSAKI, Baiko SAI, and Hiroshi OCHI, "Performance Evaluation of Low Density Parity Check Codes for IEEE 802.11n and Its ASIC Design." International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2008), No. D3-AM, Don Chan Palace, Vientiane, Lao PDR, October 21-23, 2008.
- [16]. Wahyul Amien SYAFEI, Ryuichi YOHENA, Hiroyuki SHIMAJIRI, Takeo YOSHIDA, Masayuki KUROSAKI, and Hiroshi OCHI, "Performance Evaluation and ASIC Design of LDPC Decoder for IEEE802.11n." 6th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (IEEE CCNC 2009), No. 1569141488, Las Vegas, Nevada, USA, January 10-13, 2009.