

ANALISIS PENGARUH PENERAPAN TEKNIK DIAGONAL ALGEBRAIC SPACE-TIME-FREQUENCY BLOCK CODE PADA MIMO-OFDM

THE EFFECT ANALYSIS OF APPLICATION OF DIAGONAL ALGEBRAIC SPACE-TIME-FREQUENCY BLOCK CODE ON MIMO-OFDM

Citra Dewi Anggraeni¹, Rina Pudji Astuti², Desti Madya Saputri³

¹Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

^{2,3}Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹cdanggraeni@gmail.com, ²rinapudjiastuti@telkomuniversity.ac.id, ³destimadyasaputri@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Penurunan kualitas komunikasi akibat kanal yang mengandung propagasi *multipath* dan *Doppler shift* pada komunikasi nirkabel tidak dapat dihindarkan, namun dapat diminimalisasi salah satunya dengan penggunaan teknik MIMO-OFDM. Teknik MIMO yang dapat memperkuat sinyal dan OFDM yang dapat meningkatkan kapasitas sistem, membuat MIMO-OFDM menjadi solusi yang tepat. Namun begitu, pemilihan teknik pengkodean untuk MIMO-OFDM juga tak kalah pentingnya. Pada tugas akhir ini telah dilakukan analisis terhadap sistem MIMO-OFDM yang menerapkan *Diagonal Algebraic Space-Time-Frequency Block Code* (DASTFBC) sebagai teknik pengkodeannya. Teknik DASTFBC merupakan kombinasi dari *Diagonal Algebraic* dengan tiga kombinasi diversitas yaitu diversitas antena (*space*), waktu (*time*), dan frekuensi (*frequency*). Sistem DASTFBC MIMO-OFDM diuji kinerjanya pada berbagai kondisi kanal dan modulasi, dengan sistem STBC MIMO-OFDM sebagai pembanding. Variasi kanal yang digunakan mengikuti model kanal rekomendasi ITU-R M.1225 yaitu model kanal *Pedestrian A* dan *Vehicular A*. Sedangkan untuk variasi modulasi, digunakan 16 QAM dan 64 QAM. Hasilnya, sistem DASTFBC cocok untuk komunikasi *low mobility*. Terbukti pada kanal *Pedestrian A* dengan kecepatan 3 Km/Jam, ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER DASTFBC $5,8 \times 10^{-3}$, sedangkan STBC $2,8 \times 10^{-2}$. Pada kanal *Vehicular A* kecepatan 120 Km/Jam ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER DASTFBC $6,6 \times 10^{-3}$, sedangkan STBC $6,9 \times 10^{-3}$. Untuk mengoptimalkan sistem DASTFBC dapat digunakan modulasi 64 QAM. Terbukti pada modulasi 64 QAM ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER DASTFBC $33,6 \times 10^{-3}$ sedangkan STBC $31,2 \times 10^{-3}$. Selain itu, penggunaan modulasi 64 QAM mendukung komunikasi *high data rate*, sesuai dengan tuntutan pada komunikasi nirkabel saat ini.

Kata kunci : MIMO-OFDM, DASTFBC, STBC

Abstract

The decreasing of communication quality because of channel containing multipath propagation and doppler shift in wireless communication is unavoidable, but it can be minimized by MIMO-OFDM technique. MIMO techniques that can be amplifying signals and OFDM that can be increasing capacity of system, makes MIMO-OFDM become a right solution. However, the selection of coding techniques for MIMO-OFDM is equally important. In this final project, the MIMO-OFDM system implementing *Diagonal Algebraic Space-Time-Frequency Block Code* (DASTFBC) as the coding technique, has been analyzed. DASTFBC is a combination of *Diagonal Algebraic* with three combinations of diversity, that is the antenna (*space*), time, and frequency diversity. The DASTFBC MIMO-OFDM system performance is tested under various channel condition and modulation, with the STBC MIMO-OFDM system as a comparison. The channel variations that is used, is following the ITU-R M.1225 recommendation channel model that is *Pedestrian A* and *Vehicular A* channel model. While for modulation variation, 16 QAM and 64 QAM are used. As a result, the DASTFBC system is suitable for low mobility communications. Proven on the *Pedestrian A* channel with a speed of 3 Km/hr, viewed at 30 dB SNR, obtained BER DASTFBC $5,8 \times 10^{-3}$ while STBC $2,8 \times 10^{-2}$. On the *Vehicular A* channel speed of 120 Km/hr viewed at SNR 30 dB, obtained BER DASTFBC $6,6 \times 10^{-3}$, while STBC $6,9 \times 10^{-3}$. To optimize DASTFBC system can be used 64 QAM modulation. Proven on 64 QAM modulation reviewed at SNR 30 dB, obtained BER DASTFBC $33,6 \times 10^{-3}$ while STBC $31,2 \times 10^{-3}$. In addition, the use of 64 QAM modulation supports high data rate communication, according to the demands on current wireless communications.

Keywords: MIMO-OFDM, DASTFBC, STBC

1. Pendahuluan

Trend permintaan komunikasi *wireless* saat ini menghendaki bukan hanya kehandalan, namun juga peningkatan kapasitas sistem. Untuk mengakomodasi permintaan tersebut, banyak peneliti meneliti MIMO-OFDM. Teknik MIMO yang dapat memperkuat sinyal, dan OFDM yang dapat meningkatkan kapasitas sistem, membuat MIMO-OFDM menjadi solusi yang tepat. Namun begitu, pemilihan teknik pengkodean untuk MIMO-OFDM juga tak kalah pentingnya. Oleh sebab itu, penelitian tentang pengkodean mana yang paling optimal dan apa saja yang harus ditingkatkan dari pengkodean tersebut menjadi penting untuk dilakukan. Pada [1] disebutkan bahwa teknik pengkodean STFBC memiliki performa yang baik saat kanal mengalami *fast fading* maupun *frequency selective fading*. Pada [2] disebutkan bahwa teknik *Diagonal Algebraic* memanfaatkan *rotated constellation* dan *hadamard transform*. Diketahui pada [3], bahwa fungsi dari *rotated constellation* adalah untuk memperbaiki kinerja sistem dengan cara memutar konstelasi sinyal. Karena berfokus pada perbaikan kualitas sinyal, pada tugas akhir ini teknik MIMO *diversity gain* yang dikombinasikan dengan teknik *Diagonal Algebraic* [2]. Teknik diversitas yang digunakan meliputi diversitas antena (*space*), waktu (*time*), dan frekuensi (*frequency*) [1]. Selanjutnya kombinasi ini disebut teknik *Diagonal Algebraic Space-Time-Frequency Block Code* (DASTFBC). Sebagai salah satu alternatif teknik pengkodean pada MIMO-OFDM, penelitian tentang pengaruh penerapan teknik DASTFBC pada MIMO-OFDM ini menjadi penting untuk dilakukan. Adapun tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian tugas akhir ini adalah menganalisis pengaruh penerapan teknik DASTFBC pada MIMO-OFDM. Penelitian ini diharapkan dapat memberi wawasan baru, memberikan kontribusi dalam bidang keilmuan yang berfokus pada pengkodean MIMO-OFDM, juga dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam pemilihan teknik pengkodean untuk MIMO-OFDM.

2. Konsep Dasar MIMO-OFDM

A. STBC (Space Time Block Code)

STBC merupakan salah satu teknik dalam MIMO yang menggunakan diversitas ruang dan waktu [4]. Prinsipnya sebuah simbol memiliki replika yang akan ditransmisikan ortogonal satu sama lainnya dengan cara menggeser ke-kompleksitasannya.

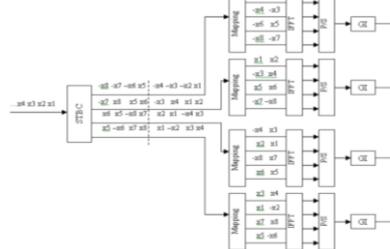
$$\begin{aligned}
 X_2 &= \begin{matrix} T_x & T_x \\ t & \\ t+T & \end{matrix} \begin{bmatrix} Tx_1 & Tx_2 \\ x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix} & X_3 &= \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ -x_2 & x_1 & -x_1 \\ -x_3 & x_4 & x_1 \\ -x_1 & -x_3 & x_2 \end{bmatrix} & X_4 &= \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ -x_2 & x_1 & -x_1 & x_1 \\ -x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 \\ -x_1 & -x_3 & x_2 & x_1 \end{bmatrix} \\
 \text{(a)} & & \text{(b)} & & \text{(c)}
 \end{aligned}$$

Gambar 1. Skema STBC [4] (a) dua antena (b) tiga antena (c) empat antena

Pada pengirim, skema STBC dua antena mengikuti skema *Alamouti* seperti yang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 (a). Pada saat t , Tx_1 memancarkan sinyal x_1 dan Tx_2 memancarkan sinyal x_2 , kemudian saat $t + T$, Tx_1 memancarkan sinyal $-x_2^*$, dan Tx_2 memancarkan sinyal x_1^* . Tanda * merupakan operasi *conjugate* dari persamaan sinyal yang dimaksud. Dengan cara yang sama, untuk skema orthogonal STBC tiga antena dan empat antena ditunjukkan oleh Gambar 1 (b) dan (c). Di sisi penerima, persamaan sinyal yang diterima merupakan sinyal yang sudah bercampur dengan *noise* AWGN dan *gain* koefisien kanal. Sinyal yang diterima tersebut kemudian akan dilakukan *combining* oleh *matched filter*. Sinyal-sinyal yang didapat dari blok *combiner* kemudian dilewatkan ke *maximum likelihood detector* untuk mendapatkan simbol yang sesungguhnya.

B. STFBC (Space Time Frequency Block Code)

STFBC merupakan suatu skema *coding* yang memanfaatkan sumber diversitas yang berbeda: waktu, dan frekuensi, dan antena [4]. Proses utama STFBC adalah melakukan *encoding* STBC, kemudian masing-masing keluaran *encoding* STBC tersebut dilakukan *frequency mapping* pada lengan OFDM.



Gambar 2. Skema STFBC [1]

Pada gambar terlihat bahwa simbol-simbol pada suatu matriks ortogonal untuk dua simbol pertama dipetakan pada domain waktu yang berbeda tetapi pada *subcarrier* yang sama. Dan untuk dua simbol berikutnya juga dipetakan pada domain waktu yang berbeda dan pada *subcarrier* yang sama tetapi *subcarrier* tersebut berbeda dengan *subcarrier* dua simbol yang pertama. Pada skema STF elemen-elemen matriks ortogonal dipetakan pada

domain waktu dan frekuensi yang berbeda pada saat yang bersamaan sehingga pada skema ini kondisi kanal yang konstan hanya dibutuhkan sepanjang 2 simbol OFDM pada domain waktu dan 2 *subcarrier* pada domain frekuensi, jika dibandingkan dengan 4 simbol OFDM pada STBC dan 4 *subcarrier* pada SFBC [1].

C. DAST (Diagonal Algebraic Space Time Block Code)

Diagonal algebraic space-time block codes (DAST) adalah salah satu keluarga dari *linear space-time codes* yang dibentuk dengan menggunakan *rotated constellations* dan *hadamard transform* [2]. Kata '*algebraic*' pada kode DAST berasal dari fakta bahwa matriks rotasi yang digunakan pada kode DAST dibentuk menggunakan teori *number field* aljabar. Kata '*diagonal*' mengacu pada struktur matriks kode, yang mana simbol informasi yang telah dirotasi diperluas menggunakan matriks diagonal persegi. Kode DAST dapat diperoleh dengan persamaan [2]:

$$\mathbf{E}_n \triangleq \mathbf{H}_n \text{diag}(x_1, \dots, x_n) \tag{1}$$

dengan $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T = \mathbf{M}_n \mathbf{a}$ dan $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n)^T$ merupakan vektor simbol informasi.

Dari persamaan (1), dapat dipahami bahwa untuk mendapatkan kode DAST, mula-mula dua simbol keluaran *mapper* yang berurutan, diambil, ditranspose-kan kemudian dikalikan dengan matriks rotasi M . Setelah dikali dengan matriks rotasi M didapat hasil x , dimana didalam simbol x merupakan simbol hasil perputaran konstelasi yang mengandung informasi dari dua simbol *mapper* yang berurutan. Simbol x ini kemudian diperluas dengan matriks diagonal, sehingga membentuk sebuah matriks diagonal x . Setelah itu, diagonal matriks dari x dikalikan dengan matriks hadamard sehingga didapat replika dari simbol x . Hasil dari seluruh rangkaian proses inilah yang dinamakan kode DAST. Matriks rotasi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah matriks M berdimensi dua. Matriks rotasi menyatakan konstanta besarnya rotasi yang dilakukan pada diagram konstelasi, sebesar sudut tertentu. Matriks M yang digunakan mengacu pada [2], yang merupakan matriks M dengan sudut putar paling optimal [2].

$$M_{d,2} = \begin{bmatrix} M_1 & -M_2 \\ M_2 & M_1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$M_{d,2} = \begin{bmatrix} 0,5257 & 0,8507 \\ -0,8507 & 0,5257 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Sebagai contoh, simbol keluaran *mapper* didapat $[s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4 \ \dots]$. Setiap dua simbol *mapper* yang berurutan diambil dan ditranspose-kan, kemudian dikalikan dengan matriks M sehingga didapat matriks x [2].

$$\mathbf{x} = M_{d,2} \times [s_1 \ s_2]^T \tag{4}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} M_1 & -M_2 \\ M_2 & M_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} M_1 s_1 - M_2 s_2 \\ M_2 s_1 + M_1 s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Langkah selanjutnya mengalikan matriks hadamard dengan matriks diagonal dari matriks x . Untuk mendapatkan matriks diagonal dari matriks x , dilakukan perluasan dengan bantuan matriks diagonal. Keseluruhan prosesnya dapat dilihat pada penjelasan berikut sesuai dengan persamaan (1), didapat [2]:

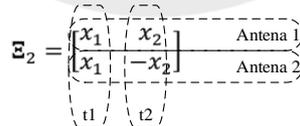
$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{H}_2 \times \text{matriks diagonal} \times \text{matriks } \mathbf{x} \tag{7}$$

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 & 0 \\ 0 & x_2 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ x_1 & -x_2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

Kode DAST berdimensi dua ini, ditransmisikan baris pertama ke antena pertama, baris kedua ke antena kedua, dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 3. Ilustrasi Pengiriman Simbol DAST

3. Model Sistem DASTFBC pada MIMO-OFDM dan Simulasi

A. Parameter Kanal

Adapun parameter kanal yang digunakan pada tugas akhir ini merujuk pada ketentuan model kanal rekomendasi dari ITU-R M.1225 sebagai berikut [5].

Tabel 1. Tabel Parameter Kanal

	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5	Tap 6
Pedestrian A						
<i>Delay</i> (us)	0	0,110	0,190	0,410	-	-
<i>Relative path power</i> (dB)	0	-9,7	-19,2	-22,8	-	-
<i>Relative path power</i> (numerik)	0	0,107	0,012	0,005	-	-

Vehicular A						
Delay (us)	0	0,310	0,710	1,090	1,730	2,510
Relative path power (dB)	0	-1	-9	-10	-15	-20
Relative path power (numerik)	0	0,794	0,126	0,1	0,316	0,01

B. Parameter Dasar Sistem

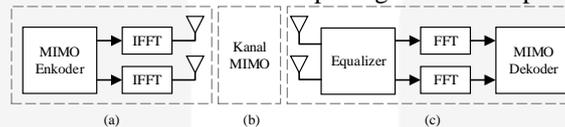
Parameter sistem yang digunakan untuk simulasi pada tugas akhir ini merujuk pada standard IEEE 802.11p untuk aplikasi komunikasi antar kendaraan, sebagai berikut [6].

Tabel 2. Tabel Parameter Dasar Sistem

Parameter	Nilai	Satuan
Jumlah bit	38.400 dan 115.200	Bit
Mapper	16 QAM dan 64 QAM	-
Frekuensi carrier	5,9	GHz
Bandwidth	10	MHz
Jumlah Antena Pengirim	2	Antena
Jumlah Antena Penerima	2	Antena
Jumlah Subcarrier Data	48	Subcarrier
Periode Simbol	8	μs
Kecepatan	3, 30, dan 120	Km/Jam
Pemodelan Kanal	Multipath Rayleigh (ITU-R M.1225 Pedestrian A dan Vehicular A) dan AWGN	
Teknik MIMO	DASTFBC dan STBC	
Equalizer	Metode Eliminasi dan Zero Forcing	

C. Model Sistem MIMO-OFDM

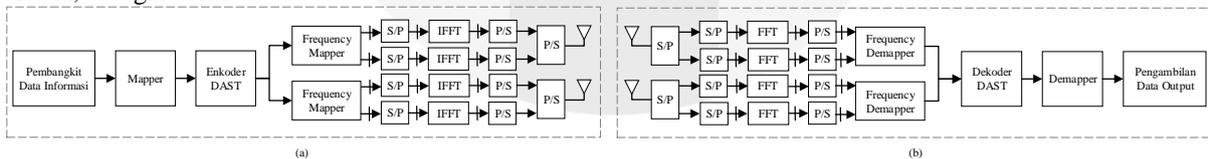
Secara umum, model sistem yang digunakan pada tugas akhir ini terdiri dari tiga bagian, yaitu bagian pengirim, kanal, dan bagian penerima. Model sistem sengaja dibuat sederhana karena ingin melihat kinerja sistem secara utuh. Model sistem MIMO-OFDM secara umum dapat digambarkan seperti pada gambar berikut.



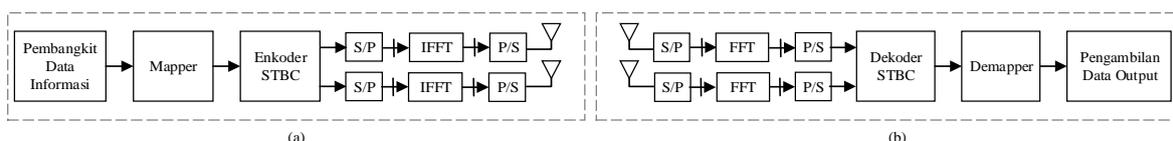
Gambar 4. Model Sistem MIMO-OFDM Secara Umum [7], (a) bagian pengirim, (b) kanal, (c) bagian penerima

Bagian pengirim terdiri dari blok pembangkit data informasi, mapper, MIMO enkoder, dan OFDM modulator. Kanal terdiri dari pembangkit respon kanal *multipath rayleigh fading* dan pembangkit noise AWGN. Bagian penerima merupakan sistem balik dari bagian pengirim, terdiri dari blok equalizer, OFDM demodulator, MIMO dekoder, demapper, dan pengambilan data output.

Untuk keperluan analisis pada tugas akhir ini, sistem MIMO-OFDM dimodelkan dalam beberapa model sistem, sebagai berikut.



Gambar 5. Model Sistem DASTFBC MIMO-OFDM, (a) bagian pengirim, (b) bagian penerima



Gambar 6. Model Sistem STBC MIMO-OFDM, (a) bagian pengirim, (b) bagian penerima

D. Pembentukan Kode DASTFBC

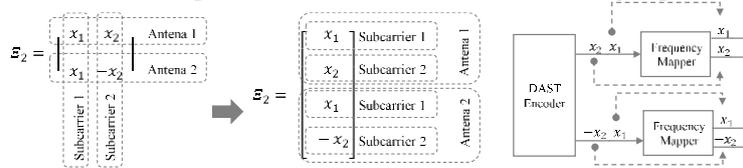
Untuk sistem DASTFBC, pembentukan kode DASTFBC dilakukan dengan dua tahap, melibatkan dua blok sistem yaitu Enkoder DAST dan *Frequency Mapper*. Proses pada masing-masing blok tersebut, dapat dijelaskan sebagai berikut.

1) Enkoder DAST

Metode pengkodean pada enkoder DAST, sama seperti yang dijelaskan pada C Sehingga didapat kode DAST sebagai pada persamaan (10).

2) *Frequency Mapper*

Setelah didapat kode DAST sebagai berikut, selanjutnya dilewatkan pada *Frequency Mapper*. Kode DAST dipetakan pada dua *subcarrier* untuk dapat memenuhi diversitas frekuensi, dengan pemetaan sebagai berikut.

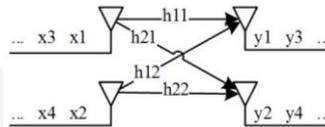


Gambar 7. Pemetaan Kode DAST pada *Frequency Mapper*

E. Kanal

Selanjutnya simbol-simbol ditransmisikan, dilewatkan melalui kanal sesuai dengan skenario simulasi yang dilakukan. Kanal yang digunakan merupakan kanal *multipath rayleigh fading* ditambah dengan *noise* AWGN. Respon kanal dibangkitkan mengikuti model kanal yang merujuk pada rekomendasi ITU-R M.1225, yaitu model kanal *Pedestrian A* dan *Vehicular A*. Kanal *Pedestrian A* memiliki empat *path* (jalur), sedangkan *Vehicular A* memiliki enam *path* (jalur). Model kanal MIMO 2x2 mempunyai empat respon kanal, diantaranya $h_{11}, h_{21}, h_{12}, h_{22}$. Masing-masing merepresentasikan respon kanal sebagai berikut [8].

- h_{11} = respon kanal antara antena pengirim 1 dengan antena penerima 1
- h_{21} = respon kanal antara antena pengirim 1 dengan antena penerima 2
- h_{12} = respon kanal antara antena pengirim 2 dengan antena penerima 1
- h_{22} = respon kanal antara antena pengirim 2 dengan antena penerima 2



Gambar 8. Model Kanal MIMO 2x2 [8]

Kode DASTFBC maupun STBC yang dilewatkan kedalam blok IFFT pada OFDM demodulator, membuat kode tersebut berbeda satu sama lain, sehingga pada tugas akhir ini, dianggap kode tersebut saling tidak berhubungan satu sama lain. Sinyal dikirim melewati kanal *multipath rayleigh fading* kemudian setelah tiba di sisi penerima, ditambahkan *noise* AWGN, sehingga persamaan sinyal terima menjadi seperti berikut [8].

$$y_1 = h_{11}x_1 + h_{12}x_2 + n_1 \tag{11}$$

$$y_2 = h_{21}x_1 + h_{22}x_2 + n_2 \tag{12}$$

$$y_3 = h_{11}x_3 + h_{12}x_4 + n_3 \tag{13}$$

$$y_4 = h_{21}x_3 + h_{22}x_4 + n_4 \tag{14}$$

F. Perombakan Kode DASTFBC

Pada blok sistem ini, sinyal dimurnikan dari berbagai pengaruh kanal. Pada sistem ini, tidak digunakan *ML detector*. Pada sinyal terima dilakukan metode eliminasi dan *zero forcing* untuk mendapatkan sinyal yang diinginkan. Adapun kelemahan dari metode ini, komponen sinyal *noise* AWGN yang bercampur dengan respon kanal masih ikut serta dalam proses-proses selanjutnya, sehingga menimbulkan banyak *error*. Penggunaan blok detektor yang lebih canggih dapat menekan pengaruh ini. Berikut ini penjelasan metode eliminasi dan *zero forcing*. Berikut ini cara untuk mencari nilai x_1 dan x_2 . Dengan cara yang sama, akan dapat dicari x_3, x_4 , dan lainnya. Karena tidak menggunakan *ML detector*, maka pengaruh *noise* AWGN akan tetap ada. Pada perhitungan ini, *noise* AWGN tidak diikutsertakan dalam penghitungan, sehingga persamaan menjadi :

$$y_1 = h_{11}x_1 + h_{12}x_2 \tag{15}$$

$$y_2 = h_{21}x_1 + h_{22}x_2 \tag{16}$$

Untuk mencari x_1 , maka x_2 harus dihilangkan atau dieliminasi dengan cara mengalikan persamaan (15) dengan h_{22} dan persamaan (16) dengan h_{12} , sebagai berikut.

$$\begin{aligned} y_1 &= h_{11}x_1 + h_{12}x_2 \quad \times h_{22} \quad \Big| \quad = h_{22}y_1 = h_{22}h_{11}x_1 + h_{22}h_{12}x_2 \\ y_2 &= h_{21}x_1 + h_{22}x_2 \quad \times h_{12} \quad \Big| \quad = h_{12}y_2 = h_{12}h_{21}x_1 + h_{12}h_{22}x_2 \end{aligned}$$

$$(h_{22}y_1 - h_{12}y_2) = (h_{22}h_{11} - h_{12}h_{21})x_1 \tag{17}$$

$$x_1 = \frac{conj(h_{22}h_{11} - h_{12}h_{21}) \times (h_{22}y_1 - h_{12}y_2)}{conj(h_{22}h_{11} - h_{12}h_{21}) \times (h_{22}h_{11} - h_{12}h_{21})} \tag{18}$$

Dengan bantuan software pengolah matriks, persamaan ini menjadi mudah penghitungannya. Kemudian untuk mencari x_2 , maka x_1 harus dihilangkan atau dieliminasi, dengan cara mengalikan persamaan (15) dengan h_{21} dan persamaan (16) dengan h_{11} , sebagai berikut.

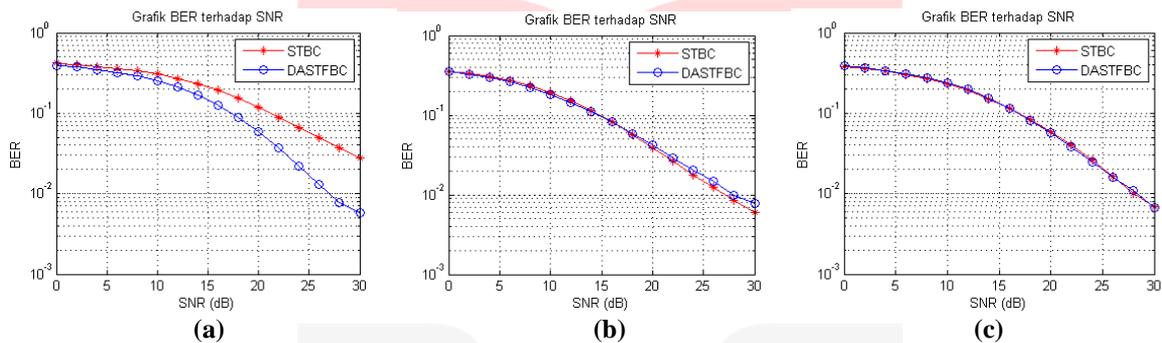
$$\begin{aligned}
 y_1 &= h_{11}x_1 + h_{12}x_2 \quad | \times h_{21} | = h_{21}y_1 = h_{21}h_{11}x_1 + h_{21}h_{12}x_2 \\
 y_2 &= h_{21}x_1 + h_{22}x_2 \quad | \times h_{11} | = h_{11}y_2 = h_{11}h_{21}x_1 + h_{11}h_{22}x_2 \\
 \hline
 (h_{21}y_1 - h_{11}y_2) &= (h_{21}h_{12} - h_{11}h_{22})x_2
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

$$x_2 = \frac{\text{conj}(h_{21}h_{12} - h_{11}h_{22}) \times (h_{21}y_1 - h_{11}y_2)}{\text{conj}(h_{21}h_{12} - h_{11}h_{22}) \times (h_{21}h_{12} - h_{11}h_{22})}
 \tag{20}$$

4. Analisis Pengaruh Penerapan Teknik DASTFBC pada MIMO-OFDM

A. Analisis Kinerja Sistem DASTFBC MIMO-OFDM pada Berbagai Kondisi Kanal

Berikut ini merupakan hasil simulasi untuk skenario variasi kanal yang telah dilakukan. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk grafik BER terhadap SNR. Nilai BER dicari untuk setiap SNR yang diberikan. Untuk memperhalus bentuk grafik, dilakukan pengulangan simulasi sebanyak sepuluh kali kemudian dirata-ratakan.



Gambar 9. Grafik BER terhadap SNR Perbandingan Kinerja DASTFBC MIMO-OFDM vs STBC MIMO-OFDM pada Berbagai Kondisi Kanal : (a) *Pedestrian A*, 3 Km/Jam; (b) *Vehicular A*, 30 Km/Jam; (c) *Vehicular A*, 120 Km/Jam

Tabel 3. Kinerja BER terhadap SNR Perbandingan Kinerja DASTFBC MIMO-OFDM vs STBC MIMO-OFDM pada Berbagai Kondisi Kanal

Model Kanal	Sistem MIMO-OFDM	SNR (dB)			
		0	10	20	30
<i>Pedestrian A</i> 3 Km/Jam	DASTFBC	0,3933	0,2514	0,0587	0,0058
	STBC	0,4187	0,3054	0,1199	0,0281
<i>Vehicular A</i> 30 Km/Jam	DASTFBC	0,3550	0,1835	0,0425	0,0078
	STBC	0,3604	0,1914	0,0386	0,0061
<i>Vehicular A</i> 120 Km/Jam	DASTFBC	0,3847	0,2374	0,0567	0,0066
	STBC	0,3810	0,2318	0,0596	0,0069

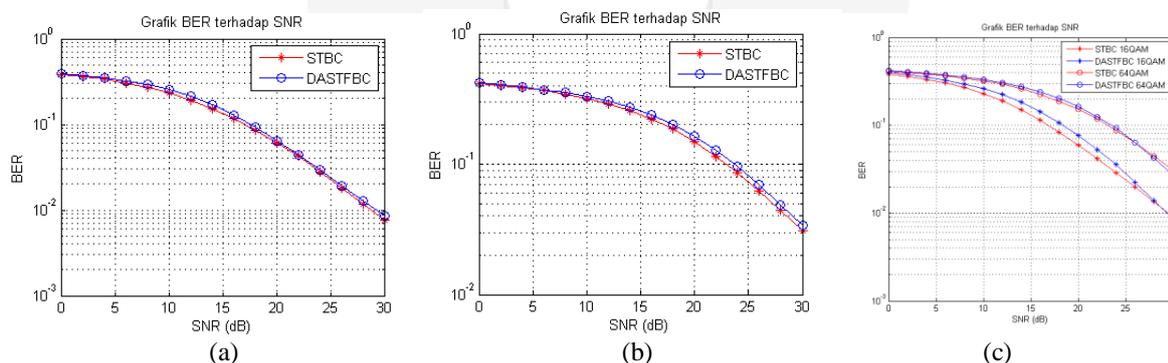
Dari **Gambar 9 (a)** dilihat bahwa pada model kanal *Pedestrian A* dengan kecepatan 3 Km/Jam, kinerja DASTFBC MIMO-OFDM lebih baik dibanding STBC MIMO-OFDM. Ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER DASTFBC sebesar $5,8 \times 10^{-3}$, sedangkan STBC sebesar $2,8 \times 10^{-2}$. Semakin kecil BER menunjukkan semakin sedikit *error* yang terjadi, maka semakin baik kinerja sistem. Hal ini menunjukkan bahwa sistem DASTFBC dapat bekerja dengan baik pada kecepatan rendah, melampaui kinerja STBC. Hal ini disebabkan oleh adanya pemetaan simbol pada *subcarrier* yang berbeda oleh blok *frequency mapper*, yang menyebabkan adanya diversitas frekuensi. Selain itu, dengan dilakukan rotasi pada *mapper*, simbol menjadi lebih tahan terhadap *noise*. Namun ketika kanal berubah ke model kanal *Vehicular A* dengan kecepatan 30 Km/Jam, seperti pada **Gambar 9 (b)** ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER untuk DASTFBC sebesar $7,8 \times 10^{-3}$ sedangkan pada STBC diperoleh BER sebesar $6,1 \times 10^{-3}$. Ini menandakan adanya penurunan performa dari DASTFBC pada kanal *vehicular* kecepatan sedang. Walaupun begitu, kinerja sistem DASTFBC masih dapat dikatakan baik, karena grafik BER yang dihasilkan berimpit dengan grafik BER STBC. Seperti pada [1], terdapat *gap* yang cukup luas antara performa STBC dan STFBC. Pada tugas akhir ini, *gap* yang terjadi antara STBC dan DASTFBC tergolong kecil. Dengan begitu dapat disimpulkan bahwa penambahan teknik *Diagonal Algebraic* pada sistem STFBC dapat meningkatkan kinerja STFBC. Sayangnya pada tugas akhir ini tidak dilakukan simulasi terhadap sistem STFBC itu sendiri karena keterbatasan waktu, sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut agar lebih akurat. Kemudian ketika kecepatan ditingkatkan menjadi 120 Km/Jam, didapat grafik yang semakin berimpit seperti pada **Gambar 9 (c)** dan kecenderungan yang timbul adalah

grafik BER DASTFBC berada di bawah grafik BER STBC. Ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER untuk DASTFBC sebesar $6,6 \times 10^{-3}$ sedangkan pada STBC diperoleh BER sebesar $6,9 \times 10^{-3}$. Penurunan grafik BER pada DASTFBC ini menandakan bahwa DASTFBC lebih tahan terhadap banyaknya pantulan (propagasi *multipath*) dan tahan pada kecepatan tinggi. Disaat kecenderungan nilai BER STBC meningkat, BER DASTFBC justru cenderung menurun. Penurunan BER ini menandakan respon sistem yang baik, semakin kecil BER, semakin sedikit *error*, semakin baik kinerja sistem. Dan ini juga sekaligus menandakan bahwa STBC tidak tahan terhadap propagasi *multipath* dan tidak tahan pada kecepatan tinggi. Hal ini terjadi karena STBC hanya mengandalkan dua mode diversitas (antena dan waktu), sedangkan DASTFBC mengandalkan tiga mode diversitas (antena, waktu, dan frekuensi), ditambah dengan penggunaan teknik *Diagonal Algebraic* yang didalamnya terdapat matriks rotasi, yang dapat memutar konstelasi berdasarkan sudut tertentu, sehingga membuat simbol lebih tahan terhadap *noise*. Walaupun DASTFBC belum mampu melampaui kinerja STBC secara signifikan, namun hasil yang didapat ini merupakan kecenderungan yang baik. Teorinya, semakin tinggi kecepatan, kemungkinan adanya *Doppler Shift* semakin besar. Selain itu, perubahan kanal dari *Pedestrian A* yang hanya empat pantulan ke kanal *Vehicular A* yang terdiri dari enam pantulan, dapat memberi gambaran sejauh mana sistem dapat bertahan dari pengaruh propagasi *multipath*. Sistem MIMO-OFDM konvensional berbasis STBC (*Alamouti*), mulai menunjukkan ketidaktahanannya terhadap pergerakan, dalam hal ini ditandai dari menurunnya kinerja STBC seiring dengan peningkatan kecepatan. Lain halnya dengan DASTFBC, walaupun tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan, sistem DASTFBC mampu bertahan dan membaik kinerjanya di kecepatan tinggi. Hal ini disebabkan oleh adanya pemetaan simbol selain pada domain ruang (*space*), waktu (*time*), namun juga frekuensi (*frequency*) sekaligus pada DASTFBC. Sistem DASTFBC terbukti mampu menangkal pengaruh propagasi *multipath*, karena ketika di kanal *Pedestrian A* yang pantulannya hanya empat, performanya tidak begitu baik. Namun, ketika pindah ke kanal *Vehicular A* yang mengandung lebih banyak pantulan, kinerjanya cenderung membaik. Hal ini membuktikan pula bahwa sistem DASTFBC memanfaatkan pantulan dari propagasi *multipath* untuk meningkatkan kinerja sistem. Selain itu, jika diamati sekilas, dari model sistem DASTFBC, dimana didalamnya terdapat *frequency mapper* yang memetakan simbol dalam domain frekuensi, membuat sistem ini mempunyai kapasitas yang lebih besar. Sayangnya pada penelitian ini, tidak dilakukan penelitian lebih lanjut untuk analisis kapasitas sistem karena keterbatasan waktu dan ilmu.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa sistem DASTFBC ini cocok untuk komunikasi *low mobility* (kecepatan pergerakan *user* yang rendah). Namun tidak menutup kemungkinan bahwa sistem DASTFBC ini dapat digunakan pula pada kecepatan tinggi dan kanal yang mengandung banyak pantulan (propagasi *multipath*).

B. Analisis Kinerja Sistem DASTFBC MIMO-OFDM pada Berbagai Kondisi Modulasi

Berikut ini merupakan hasil simulasi untuk skenario variasi modulasi yang telah dilakukan. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk grafik BER terhadap SNR. Nilai BER dicari untuk setiap SNR yang diberikan. Untuk memperhalus bentuk grafik, dilakukan pengulangan simulasi sebanyak sepuluh kali kemudian dirata-ratakan.



Gambar 10. Grafik BER terhadap SNR Perbandingan Kinerja DASTFBC MIMO-OFDM vs STBC MIMO-OFDM pada Berbagai Modulasi : (a) 16 QAM; (b) 64 QAM; (c) 16QAM dan 64 QAM

Tabel 4. Kinerja BER terhadap SNR Perbandingan Kinerja DASTFBC MIMO-OFDM vs STBC MIMO-OFDM pada Berbagai Modulasi

Modulasi	Sistem MIMO-OFDM	SNR (dB)			
		0	10	20	30
16 QAM	DASTFBC	0,3925	0,2536	0,0649	0,0084
	STBC	0,3819	0,2329	0,0607	0,0076
64 QAM	DASTFBC	0,4205	0,3310	0,1641	0,0336
	STBC	0,4144	0,3201	0,1486	0,0312

Dari **Gambar 10** dilihat bahwa pada modulasi 16 QAM, secara umum kinerja sistem STBC lebih baik daripada DASTFBC. Terlihat dari posisi grafik BER STBC berada di bawah grafik BER DASTFBC. Ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER untuk DASTFBC sebesar $8,4 \times 10^{-3}$ sedangkan pada STBC diperoleh BER sebesar $7,6 \times 10^{-3}$. Ketika modulasi ditingkatkan ke modulasi 64 QAM, DASTFBC memiliki kecenderungan yang baik, grafik BER DASTFBC semakin berimpit dengan STBC. Ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER untuk DASTFBC sebesar $33,6 \times 10^{-3}$ sedangkan pada STBC diperoleh BER sebesar $31,2 \times 10^{-3}$. Teorinya, semakin tinggi orde modulasi QAM, semakin banyak bit dalam satu simbol QAM. Ketika simbol tersebut *error*, maka bit yang terdampak pun semakin banyak. Terlihat pada **Gambar 10 (c)**, sistem dengan modulasi 16 QAM memiliki kinerja yang lebih baik dari sistem dengan modulasi 64 QAM.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa sistem DASTFBC dengan modulasi 64 QAM lebih baik daripada sistem STBC pada modulasi yang sama, untuk diterapkan pada kondisi kanal *Vehicular A* dengan kecepatan 120 Km/Jam. Karena dengan modulasi yang tinggi pun, kinerja DASTFBC bisa semakin berimpit ke STBC. Selain itu, penggunaan modulasi 64 QAM mendukung komunikasi *high data rate*, sesuai dengan tuntutan pada komunikasi nirkabel saat ini.

5. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian tugas akhir mengenai pengaruh teknik DASTFBC pada MIMO-OFDM ini, maka dapat disimpulkan bahwa secara keseluruhan sistem DASTFBC ini cocok untuk komunikasi *low mobility* (kecepatan pergerakan *user* yang rendah). Namun tidak menutup kemungkinan bahwa sistem DASTFBC ini dapat digunakan pula pada kecepatan tinggi dan kanal yang mengandung banyak pantulan (propagasi *multipath*). Untuk mengoptimalkan sistem DASTFBC dapat digunakan modulasi 64 QAM. Karena dengan modulasi yang tinggi pun, kinerja DASTFBC bisa semakin berimpit ke STBC. Selain itu, penggunaan modulasi 64 QAM mendukung komunikasi *high data rate*, sesuai dengan tuntutan pada komunikasi nirkabel saat ini. Terbukti dari hasil simulasi, pada model kanal *Pedestrian A* dengan kecepatan 3 Km/Jam, kinerja DASTFBC MIMO-OFDM lebih baik dibanding STBC MIMO-OFDM. Ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER untuk DASTFBC sebesar $5,8 \times 10^{-3}$, sedangkan STBC sebesar $2,8 \times 10^{-2}$. Pada model kanal *Vehicular A* dengan kecepatan 30 Km/Jam, kecenderungan DASTFBC mendekati STBC. Ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER untuk DASTFBC sebesar $7,8 \times 10^{-3}$ sedangkan pada STBC diperoleh BER sebesar $6,1 \times 10^{-3}$. Pada model kanal *Vehicular A* dengan kecepatan 120 Km/Jam, didapat grafik yang semakin berimpit. Ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER untuk DASTFBC sebesar $6,6 \times 10^{-3}$ sedangkan pada STBC diperoleh BER sebesar $6,9 \times 10^{-3}$. Pada modulasi 16 QAM, secara umum kinerja sistem STBC lebih baik daripada DASTFBC. Terlihat dari posisi grafik BER STBC berada di bawah grafik BER DASTFBC. Ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER untuk DASTFBC sebesar $8,4 \times 10^{-3}$ sedangkan pada STBC diperoleh BER sebesar $7,6 \times 10^{-3}$. Pada modulasi 64 QAM, DASTFBC memiliki kecenderungan yang baik, grafik BER DASTFBC semakin berimpit dengan STBC. Ditinjau pada SNR 30 dB, diperoleh BER untuk DASTFBC sebesar $33,6 \times 10^{-3}$ sedangkan pada STBC diperoleh BER sebesar $31,2 \times 10^{-3}$.

Daftar Pustaka

- [1] G. Bauch, "Space-Time Block Codes Versus Space-Frequency Block Codes," *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, vol. I, pp. 567 - 571, 2003.
- [2] M. O. Damen, K. Abed-Meraim dan J.-C. Belfiore, "Diagonal Algebraic Space-Time Block Codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. XXXVIII, no. 3, pp. 628 - 636, 2002.
- [3] O. A. Susanti, R. P. Astuti dan H. Vidyantingtyas, Analisis Implementasi CRM pada LTE dengan SFBC MIMO OFDM Arah Downlink untuk High Mobility, Bandung: Tugas Akhir Institut Teknologi Telkom, 2013.
- [4] A. Prasetyo, Analisis Kapasitas Kanal pada Sistem Space-Time-Frequency Block Code MIMO OFDM, Bandung: Tugas Akhir Universitas Telkom, 2008.
- [5] I. T. Union, "RECOMMENDATION ITU-R M.1225," 1997. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1225-0-199702-I!!PDF-E.pdf. [Diakses Juli 2015].
- [6] A. M. Salih, Abdelgader dan W. Lenan, "The Physical Layer of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard: The Specifications and Challenges," dalam *Proceeding of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol II*, San Francisco, 2014.
- [7] Y. A. Tufen, B. Prasetya dan R. P. Astuti, Analisis Perbandingan Performansi MIMO OFDM 2x2 Metoda STBC dan STTC dengan Estimasi Kanal Inserting Pilot, Bandung: Tugas Akhir Universitas Telkom, 2008.
- [8] S. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451 - 1458, 1998.