

# Teknik Mitigasi ICI Menggunakan FIR-MMSE FEQ Pada Sistem OFDM Bergerak

Harinto Mukti Legowo, Gamantyo Hendrantoro, dan Titiek Suryani  
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111  
E-mail: [gamantyo@ee.its.ac.id](mailto:gamantyo@ee.its.ac.id)

**Abstrak**—Efek Doppler yang ditimbulkan pada komunikasi bergerak (*mobile communications*) menyebabkan terjadinya ICI yang dapat menurunkan kinerja sistem OFDM. Pengaruh ICI dapat dimitigasi dengan menggunakan *frequency-domain equalizer* (FEQ) dimana koefisien-koefisien *tap filter* tersebut didapatkan dari hasil perhitungan *invers* matrik kanal domain frekuensi (matrik  $\mathbf{G}$ ) berukuran  $N \times N$ . Namun semakin besar ukuran  $N$ , perhitungan *invers* matrik  $\mathbf{G}$  akan semakin rumit. Sifat *banded* dapat dimanfaatkan untuk menyederhanakan perhitungan *invers* matrik  $\mathbf{G}$ . Dengan mengasumsikan sifat *banded* pada matrik  $\mathbf{G}$ , maka hanya  $Q$  ( $Q \ll N$ ) diagonal pada matrik  $\mathbf{G}$  yang digunakan pada perhitungan *invers* matrik  $\mathbf{G}$ . Berdasarkan sifat *banded* tersebut, teknik mitigasi ICI yang bernama *finite impulse response* (FIR) MMSE FEQ dengan koefisien *tap* sebanyak  $Q$  dapat didesain. Pada makalah ini, investigasi mengenai pengaruh penerapan sifat *banded* pada matrik  $\mathbf{G}$  terhadap sistem *mobile* OFDM dilakukan. Investigasi dilakukan pada kondisi Doppler bernilai 0,1 dan 0,2. Dari hasil yang didapatkan, ditunjukkan bahwa secara umum kinerja dari sistem yang menggunakan matrik  $\mathbf{G}$  *banded* lebih buruk dibanding sistem yang menggunakan matrik  $\mathbf{G}$  lengkap (*non-banded*) pada  $E_b/N_0$  yang relatif besar dimana perbedaan kinerja terlihat signifikan pada  $E_b/N_0$  25 dB pada Doppler bernilai 0,1 dan  $E_b/N_0$  20 dB pada Doppler bernilai 0,2.

**Kata Kunci**—OFDM, *mobile communication*, matrik *banded*, FIR-MMSE FEQ

## I. PENDAHULUAN

Sistem OFDM adalah sistem modulasi *multicarrier* yang bertujuan untuk menekan pengaruh dari kanal *multipath* [1]. Sistem OFDM dapat diimplementasikan pada aplikasi *wireless* seperti *digital audio broadcasting* (DAB) dan *digital video broadcasting* (DVB). Pada sistem OFDM, alokasi *bandwidth* kanal dibagi menjadi  $N$  subkanal yang orthogonal. Deretan informasi serial berkecepatan tinggi dikonversikan menjadi  $N$  bagian berkecepatan rendah dan selanjutnya dimodulasi pada  $N$  *subcarrier* atau  $N$  subkanal. Untuk menekan pengaruh ISI yang ditimbulkan oleh kanal *multipath*, *Cyclic Prefix* (CP) kemudian disisipkan diantara simbol-simbol OFDM. Namun, OFDM sensitif dan rentan terhadap ICI [2] dimana sifat-sifat orthogonal pada OFDM menjadi rusak. ICI dapat disebabkan oleh efek Doppler yang muncul akibat adanya pergerakan pada pemancar dan atau penerima [3]. Efek Doppler menyebabkan frekuensi setiap sinyal informasi mengalami dispersi sehingga ICI terjadi dan mengakibatkan kinerja sistem OFDM menurun.

Pengaruh ICI dapat ditekan dengan menggunakan FEQ dimana koefisien *tap filter* tersebut ditentukan berdasarkan hasil *invers* matrik kanal domain frekuensi [4] (dinotasikan sebagai matrik  $\mathbf{G}$ ). Matrik  $\mathbf{G}$  adalah matrik bujur sangkar

berukuran  $N \times N$  dimana  $N$  merupakan jumlah *subcarrier*. Semakin besar ukuran dari  $N$ , perhitungan *invers* matrik  $\mathbf{G}$  akan menjadi semakin rumit [5]. Pada kanal *time-variant*, *fast fading* menyebabkan energi tiap-tiap *subcarrier* pada matrik  $\mathbf{G}$  menyebar pada beberapa *subcarrier* terdekat sehingga ICI pada tiap-tiap *subcarrier* berasal dari beberapa *subcarrier* terdekat [6].

Dikarenakan ada intensitas energi yang sebagian besar terkonsentrasi pada beberapa diagonal yang berada disekitar diagonal utama matrik  $\mathbf{G}$ , sifat *banded* [7] dapat digunakan untuk menyederhanakan *invers* matrik  $\mathbf{G}$  dimana hanya  $Q$  ( $Q \ll N$ ) diagonal pada matrik  $\mathbf{G}$  yang digunakan pada perhitungan *invers* matrik. Berdasarkan dari sifat *banded* tersebut, teknik mitigasi ICI yang bernama FIR-MMSE FEQ [8] dengan koefisien *tap* sebanyak  $Q$  dapat didesain.

Pada makalah ini, terdapat beberapa macam notasi yang digunakan seperti:  $(\cdot)^T$  merupakan notasi untuk operasi *transpose*,  $(\cdot)^H$  merupakan notasi untuk operasi *complex-conjugate transpose*,  $G_{a,b}$  menjelaskan elemen pada baris ke- $a$  dan kolom ke- $b$  dari matrik  $\mathbf{G}$  dimana indeks baris dan kolom dimulai dari nol,  $\hat{X}$  merupakan notasi estimasi pada variabel acak  $X$ .  $\mathbf{G}^{-1}$  merupakan notasi untuk operasi *invers* pada variabel  $\mathbf{G}$ .  $\mathbf{I}_N$  adalah notasi matrik identitas berukuran  $N \times N$ ,  $(\cdot)_N$  adalah notasi untuk operasi modulo- $N$ ,  $\mathbf{G}(:,j)$  adalah elemen pada kolom ke- $j$  matrik  $\mathbf{G}$ .

## II. METODE PENELITIAN

### A. Model Sistem OFDM Bergerak (*Mobile OFDM*)

Sebuah sistem OFDM dengan  $N$  *subcarrier* dimana setiap simbolnya dinotasikan dengan  $\mathbf{X} = [X_0 \dots X_{N-1}]^T$  dan kemudian dikonversi menjadi sampel-sampel domain waktu  $\mathbf{x} = [x_0 \dots x_{N-1}]^T$  dengan menggunakan operasi *N-point Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) [8].

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}^H \mathbf{X} \quad (1)$$

dimana  $\mathbf{F}^H$  adalah *N-point* matrik IFFT. Elemen  $(m,d)$  matrik  $\mathbf{F}$  didefinisikan [9].

$$F_{m,d} = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j2\pi md/N} \quad m,d = 0,1,\dots,N-1 \quad (2)$$

Untuk menekan pengaruh *multipath*, diasumsikan *Cyclic Prefix* (CP) dengan panjang lebih besar dari *delay* kanal propagasi ditambahkan. Penambahan menyebabkan durasi dari simbol OFDM menjadi semakin panjang. Model kanal yang digunakan adalah model kanal *Mobile to Fixed* (M to F) dimana penerima diasumsikan mengalami pergerakan. Pembangkitan kanal dilakukan menggunakan model yang diusulkan oleh Zheng dan Xiao [10]. Estimasi kanal berbasis

*pilot-aided* dilakukan dengan menggunakan algoritma yang diusulkan oleh Mostofi dan Cox [11]. Sinyal *pilot* disisipkan sebelum operasi IFFT menggunakan tipe penyisipan *comb* [12].

Di penerima setelah CP dihapus, setiap simbol-simbol OFDM (dinotasikan sebagai  $y = [y_0 \dots y_{N-1}]^T$ ) memiliki persamaan matematis berikut [8].

$$y = \mathbf{H}x + v \tag{3}$$

dimana  $\mathbf{H}$  adalah matrik kanal domain waktu berukuran  $N \times N$  dengan elemen  $h_{n,k} = h_{n,(n-k)_N}$  dimana  $h_{n,k}$  adalah respon kanal pada lintasan ke- $k$  untuk  $0 < k < N-1$  dan waktu ke- $n$  untuk  $0 \leq n < N-1$  sementara  $v$  adalah *complex AWGN vector* domain waktu.

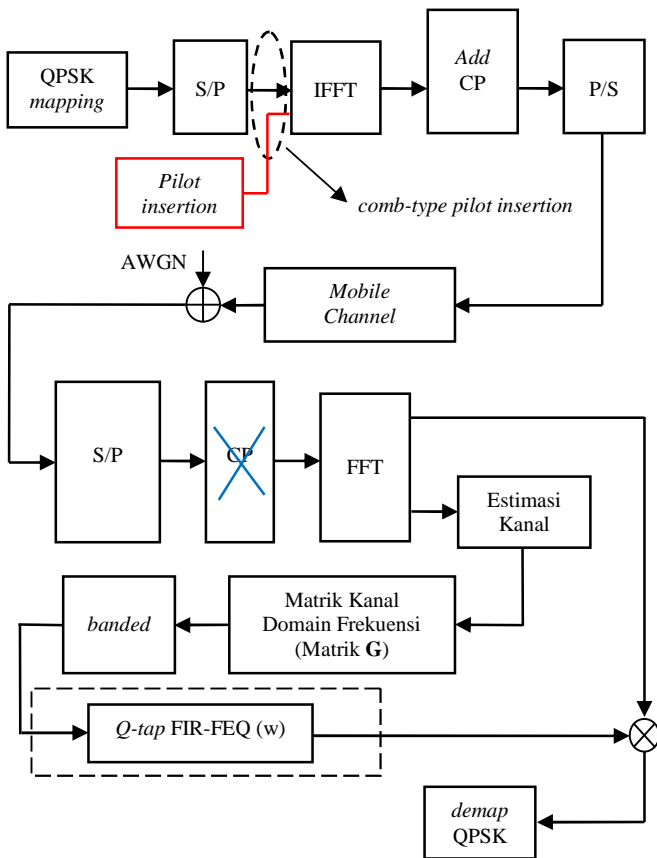
$$\begin{bmatrix} h_{0(0)} & 0 & & h_{0(L)} & h_{0(L)} \\ h_1(1) & h_1(0) & \dots & h_1(3) & h_1(2) \\ h_2(2) & h_2(1) & & h_2(4) & h_2(3) \\ & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & & h_{N-2}(0) & 0 \\ 0 & 0 & & h_{N-1}(1) & h_{N-1}(0) \end{bmatrix} \tag{4}$$

Operasi FFT yang dilakukan pada persamaan (3) akan menghasilkan persamaan matematis [8].

$$Y = \mathbf{G}X + V \tag{5}$$

dimana  $\mathbf{G} \triangleq \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{F}^H$  adalah matrik kanal domain frekuensi dan  $V$  adalah *complex AWGN vector* domain frekuensi.

Pemodelan sistem secara keseluruhan digambarkan pada gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi pemodelan sistem yang digunakan.

Pemodelan dimaksudkan untuk memudahkan penyusunan simulator dan memberikan alur berfikir sistematis sehingga apabila terjadi suatu kesalahan maka hal-hal yang menjadi kesalahan tersebut dapat diketahui dan dikoreksi.

Pada kanal statis (*time-invariant*) dimana tidak terdapat pergerakan dari pemancar ( $T_x$ ) dan penerima ( $R_x$ ), matrik  $\mathbf{H}$  merupakan matrik *circulant* dengan elemen *multipath* pada setiap diagonal bernilai konstan dan matrik  $\mathbf{G}$  adalah matrik diagonal dimana diagonal utama matrik  $\mathbf{G}$  tersebut berisi informasi mengenai respon kanal domain frekuensi.

Pada kasus ini, hubungan I/O untuk *subcarrier* ke- $m$  dapat dituliskan mengikuti persamaan [8].

$$Y_m = G_{m,m} X_m + V_m \quad m = 0, 1, \dots, N-1 \tag{6}$$

Merujuk ke (6) dapat disimpulkan bahwa matrik  $\mathbf{G}$  pada kanal *time-invariant* merupakan matrik diagonal sehingga perhitungan *invers* matrik mudah untuk dilakukan dan hanya membutuhkan satu koefisien *tap* FEQ untuk mendapatkan estimasi data  $\hat{X}_m$  untuk setiap  $m$  [8].

$$\hat{X}_m = G_{m,m}^{-1} Y_m \tag{7}$$

Dengan demikian, implementasi FEQ memiliki desain yang sederhana.

Pada kanal *mobile (time-variant)*, frekuensi Doppler hasil dari pergerakan pemancar dan atau penerima menyebabkan matrik  $\mathbf{H}$  menjadi matrik *non-circulant* dimana elemen dari setiap diagonal matrik memiliki nilai yang bervariasi. Proses konversi matrik  $\mathbf{H}$  menjadi matrik  $\mathbf{G}$  menghasilkan matrik non-diagonal.

Pada kasus ini, hubungan I/O untuk *subcarrier* ke- $m$  dapat dituliskan melalui persamaan berikut [8].

$$Y_m = G_{m,m} X_m + \sum_{n \neq m} G_{m,n} X_n + V_m \tag{8}$$

ICI term

Merujuk ke (8) dapat dilihat bahwa matrik  $\mathbf{G}$  pada kanal *time-variant* adalah matrik non-diagonal dengan elemen-elemen pada diagonal selain diagonal utama merupakan elemen ICI yang bernilai tidak nol. Dengan merujuk ke (8), jika perhitungan *invers* matrik dilakukan menggunakan (7) maka perhitungan *invers* matrik menjadi lebih rumit dan memerlukan  $N$ -tap FEQ untuk mendapatkan estimasi data  $\hat{X}_m$  untuk setiap  $m$ .

**B. FIR-MMSE FEQ Sebagai Teknik Mitigasi ICI**

Pengaruh ICI menyebabkan ada intensitas sebaran energi yang sebagian besar terkonsentrasi pada beberapa diagonal yang berada disekitar diagonal utama matrik  $\mathbf{G}$  dan diagonal selain itu memiliki intensitas sebaran energi yang mendekati nol. Semakin besar nilai Doppler yang dihasilkan, semakin kuat intensitas sebaran energi pada diagonal yang berada disekitar diagonal utama. Hal ini memungkinkan matrik  $\mathbf{G}$  diasumsikan sebagai matrik *banded* [7] dimana matrik ini memiliki elemen tidak nol hanya pada beberapa diagonal yang berada disekitar diagonal utama dan elemen pada diagonal selain itu bernilai nol. Dengan memanfaatkan sifat *banded*, maka hanya  $Q$  diagonal pada matrik  $\mathbf{G}$  saja yang digunakan pada perhitungan *invers* matrik. Berdasarkan sifat *banded* tersebut, teknik mitigasi ICI bernama FIR-MMSE (*Minimum Mean Square Error*) FEQ [8] dengan koefisien *tap* sebanyak  $Q$  ( $Q \ll N$ ) dapat didesain.

$Q$ -tap FIR-MMSE FEQ membutuhkan perhitungan *invers* matrik yang berukuran  $Q \times Q$  dan  $Q$  perkalian matrik untuk mendapatkan estimasi informasi pada tiap-tiap *subcarrier* sehingga apabila  $Q$  bernilai 5 maka 5-tap FIR-MMSE FEQ membutuhkan *invers* matrik berukuran  $5 \times 5$  dan 5 perkalian matrik. Semakin kecil ukuran parameter  $Q$  maka desain dan

perhitungan pada  $Q$ -tap FIR-MMSE FEQ menjadi semakin sederhana. Koefisien  $Q$ -tap berjumlah ganjil dengan bobot nilai (*weight*) dari sejumlah koefisien  $Q$ -tap dihitung melalui persamaan matematis berikut [8].

$$W_m = g_m^T (G_m G_m^H + \sigma^2 I_Q)^{-1} \quad (9)$$

dengan,

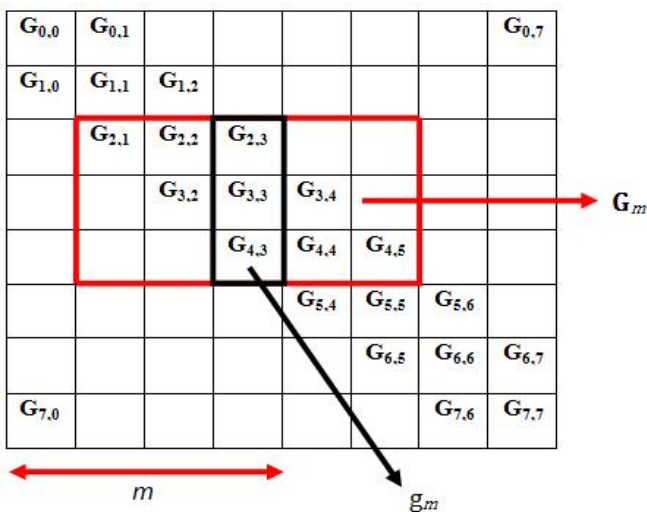
- $W_m$  : Vektor koefisien *tap* pada *subcarrier* ke- $m$
- $g_m$  : Kolom tengah matrik  $G_m$  ( $g_m = G_m(:, Q)$ )
- $G_m$  : Submatrik  $G$
- $\sigma^2$  : Matrik *noise variance* berukuran  $(Q \times Q)$
- $Q$  : Jumlah koefisien *tap*

merujuk ke (9), perhitungan *invers* matrik  $G$  berukuran  $N \times N$  pada (7) dapat digantikan dengan matrik berukuran  $Q \times Q$  hasil dari operasi perhitungan  $(G_m G_m^H + \sigma^2 I_Q)^{-1}$  pada (9) dimana  $G_m$  merupakan submatrik dari matrik  $G$  untuk setiap nilai  $m$  dengan ukuran mengikuti persamaan berikut [8].

$$(2D+1) \times (4D+1) \quad (10)$$

dimana  $D$  merupakan parameter untuk menentukan jumlah dari koefisien  $Q$  tap FIR-MMSE FEQ ( $Q = 2D+1$ ). Elemen-elemen penyusun submatrik  $G_m$  ditentukan mengikuti aturan sebagai berikut [8].

$$\begin{pmatrix} G_{m, (m-2D)N} & \dots & G_{m, (m-2D)N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{m, (m-2D)N} & \dots & G_{m, (m-2D)N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{m, (m+2D)N} & \dots & G_{m, (m+2D)N} \end{pmatrix} \quad (11)$$



Gambar 2. Submatrik  $G_m$  dan  $g_m$  yang digunakan pada proses perhitungan koefisien-koefisien  $w$  dengan memanfaatkan asumsi *banded* pada matrik  $G$  ( $N=8, D=1, Q=3$ ).

Sehingga perhitungan estimasi  $\hat{X}_m$  untuk *subcarrier* ke- $m$  dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan [8].

$$x_m = W_m Y_m \quad (12)$$

dimana,  $Y_m = [Y_{(m-2D)N} \dots Y_{(m+2D)N}]^T$

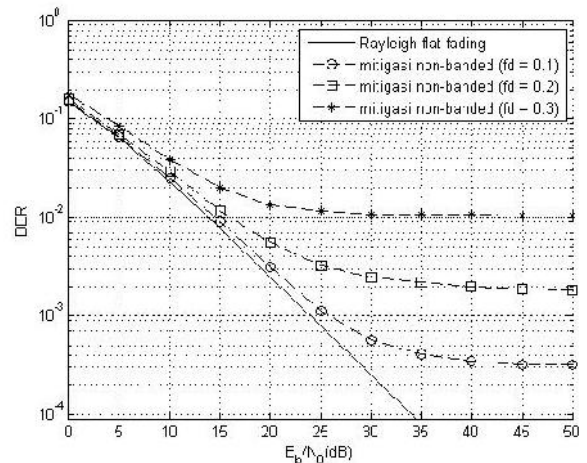
dengan merujuk (12), untuk mendapatkan estimasi informasi  $\hat{X}_m$  untuk setiap  $m$  hanya memerlukan  $Q$ -tap FEQ ( $Q \ll N$ ).

### III. HASIL DAN ANALISIS

Pada bagian ini dibahas mengenai hasil dari investigasi. Investigasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh *banded Q* diagonal terhadap kinerja sistem OFDM. Salah satu hal yang mempengaruhi kinerja sistem komunikasi adalah jumlah kesalahan bit yang diterima. Untuk mengetahui kinerja dari sistem yang disimulasikan dilakukan perhitungan BER dengan membandingkan *bit-bit* yang dikirim dengan *bit-bit* yang dideteksi penerima. Jumlah *bit-bit* yang berbeda dari hasil perbandingan adalah jumlah *error*. Nilai BER adalah jumlah *error* dibagi dengan jumlah *bit*. Supaya didapat data yang valid, Pengambilan data dilakukan dengan percobaan sebanyak 10 kali dimana rata-rata hasil percobaan sebanyak 10 kali tersebut diolah kedalam bentuk grafik BER terhadap perubahan  $E_b/N_0$ .

#### A. Validasi Kinerja Sistem OFDM Menggunakan Matrik G Lengkap Dengan Doppler Yang Bervariasi

Pada subbab ini dibahas mengenai kinerja sistem OFDM yang menggunakan matrik  $G$  secara lengkap (*non-banded*) pada frekuensi Doppler yang bervariasi. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem yang menggunakan matrik  $G$  secara lengkap pada kanal *mobile* yang digunakan sebagai pembanding sistem yang menggunakan matrik  $G$  *banded*.



Gambar 3. Grafik perbandingan kinerja BER sistem OFDM menggunakan matrik  $G$  secara lengkap (*non-banded*) pada kanal *mobile* dengan Doppler yang bervariasi.

Pada gambar 3 terlihat efek Doppler menyebabkan kinerja sistem mengalami penurunan dibandingkan dengan sistem pada kanal statis. Semakin besar nilai Doppler, grafik BER sistem semakin meningkat. Hal ini dapat disimpulkan bahwa makin besar Doppler, sebaran energi dari setiap *subcarrier* ke beberapa *subcarrier* terdekat semakin besar sehingga pengaruh ICI terhadap kinerja sistem menjadi semakin kuat dimana pengaruh ICI terlihat pada  $E_b/N_0$  yang relatif besar. Pada Doppler = 0,1 dan 0,2, jumlah *error* dapat berkurang dengan menaikkan nilai  $E_b/N_0$  hingga 40 dB, sedangkan pada Doppler = 0,3 pengaruh ICI sangat sulit untuk ditekan dimana peningkatan nilai  $E_b/N_0 > 25$  dB tidak memiliki pengaruh signifikan dalam mengurangi jumlah *error*. Selain

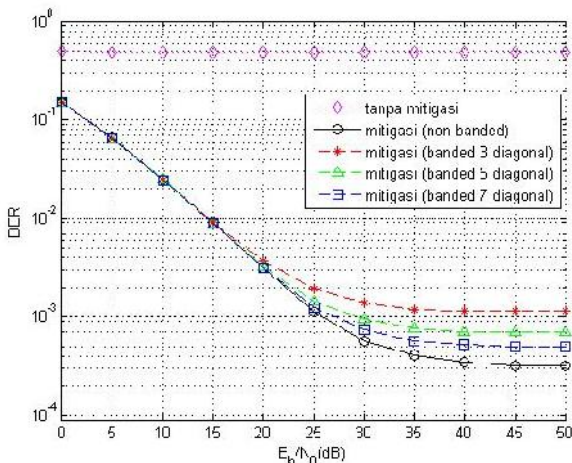


itu, matrik  $\mathbf{G}$  yang tidak diagonal juga menjadi persoalan dalam perhitungan *invers* matrik dimana memerlukan usaha dan waktu yang lebih rumit apabila dibandingkan dengan perhitungan *invers* matrik diagonal pada kanal statis.

**B. Pengaruh Banded  $Q$  Diagonal Pada Matrik  $\mathbf{G}$  Terhadap Kinerja Sistem OFDM**

Matrik  $\mathbf{G}$  yang tidak diagonal menyebabkan perhitungan *invers* matrik untuk desain mitigasi ICI menjadi rumit. Sifat *banded* dapat digunakan untuk penyederhanaan perhitungan *invers* matrik  $\mathbf{G}$  dimana hanya  $Q$  ( $Q \ll N$ ) diagonal pada matrik  $\mathbf{G}$  yang digunakan untuk perhitungan *invers* matrik  $\mathbf{G}$ . Berdasarkan sifat *banded* tersebut, teknik mitigasi ICI bernama FIR-MMSE FEQ dengan koefisien *tap* sebanyak  $Q$  dapat didesain.

Simulasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh *banded  $Q$  diagonal* matrik  $\mathbf{G}$  dengan menggunakan  $Q$ -*tap* FIR-MMSE FEQ terhadap kinerja sistem OFDM. Simulasi dilakukan pada kondisi Doppler bernilai 0,1 hingga 0,2. Gambar 4 adalah grafik perbandingan hasil simulasi sistem OFDM yang menggunakan *banded  $Q$  diagonal* matrik  $\mathbf{G}$  dengan sistem OFDM yang menggunakan matrik  $\mathbf{G}$  secara lengkap pada kondisi Doppler bernilai 0,1.



Gambar 4. Grafik perbandingan kinerja BER sistem OFDM menggunakan matrik  $\mathbf{G}$  secara lengkap (*non-banded*) dengan sistem OFDM menggunakan *banded 3,5,7 diagonal* matrik  $\mathbf{G}$  pada frekuensi Doppler yang bernilai 0,1.

Tabel 1.

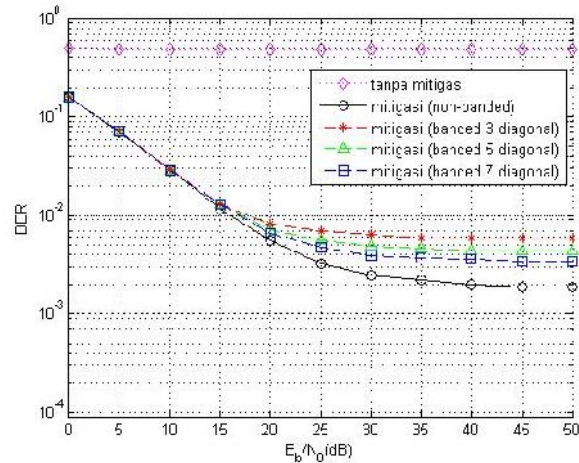
Sampel BER terhadap perubahan Eb/No pada Doppler 0,1

Eb/No(dB)	BER			
	<i>Non-banded</i>	<i>3 banded</i>	<i>5 banded</i>	<i>7 banded</i>
25	$10^{-3}$	$2.10^{-3}$	$1.5.10^{-3}$	$1.3.10^{-3}$
30	$6.5.10^{-4}$	$1.5.10^{-3}$	$10^{-3}$	$7.10^{-4}$
35	$5.10^{-4}$	$1.1.10^{-3}$	$8.10^{-4}$	$5.5.10^{-4}$
40	$3.5.10^{-4}$	$1.1.10^{-3}$	$7.10^{-4}$	$5.10^{-4}$
45	$3.1.10^{-4}$	$1.1.10^{-3}$	$7.10^{-4}$	$5.10^{-4}$
50	$3.1.10^{-4}$	$1.1.10^{-3}$	$7.10^{-4}$	$5.10^{-4}$

Tabel 1 secara jelas menunjukkan kinerja sistem dengan matrik  $\mathbf{G}$  *banded* dan sistem dengan matrik  $\mathbf{G}$  *non-banded*. Sistem *3 banded* secara umum memiliki kinerja lebih buruk dibandingkan sistem *non-banded*, *5 banded* dan *7 banded* sepanjang nilai Eb/No 25 dB. Sedangkan sistem dengan *7 banded* memiliki kinerja lebih baik dibandingkan sistem dengan *3 banded* dan *5 banded* juga sepanjang nilai Eb/No 25 dB. Pada tabel 1, *error floor* pada sistem *non-banded* mulai terjadi pada saat Eb/No bernilai 45 dB dan *error*

*floor* pada sistem *banded* secara umum terjadi pada saat Eb/No bernilai 35 dB.

Pada gambar 4 juga terlihat bahwa makin besar parameter  $Q$ , kinerja sistem *banded  $Q$  diagonal* matrik  $\mathbf{G}$  meningkat. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada frekuensi Doppler bernilai 0,1, diketahui bahwa kinerja sistem yang mereduksi sejumlah elemen dari matrik  $\mathbf{G}$  memanfaatkan sifat *banded* secara umum lebih buruk dibandingkan dengan sistem yang menggunakan seluruh elemen matrik  $\mathbf{G}$  secara lengkap (*non-banded*).



Gambar 5. Grafik perbandingan kinerja BER sistem OFDM menggunakan matrik  $\mathbf{G}$  secara lengkap (*non-banded*) dengan sistem OFDM menggunakan *banded 3,5,7 diagonal* matrik  $\mathbf{G}$  pada frekuensi Doppler yang bernilai 0,2.

Agar didapatkan hasil yang lebih majemuk, investigasi pengaruh *banded* juga dilakukan pada kondisi Doppler bernilai 0,2 dimana semakin besar Doppler, kinerja sistem semakin jelek. Pada kondisi ini intensitas sebaran energi ke beberapa *subcarrier* terdekat semakin besar sehingga untuk mengetahui pengaruh *banded* pada kondisi Doppler bernilai 0,2 perlu dilakukan simulasi. Gambar 5 merupakan grafik perbandingan kinerja sistem OFDM yang menggunakan *banded  $Q$  diagonal* matrik  $\mathbf{G}$  dengan sistem OFDM yang menggunakan matrik  $\mathbf{G}$  secara lengkap (*non-banded*) pada kondisi Doppler bernilai 0,2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem yang menggunakan matrik  $\mathbf{G}$  *banded* juga memiliki kinerja yang lebih buruk dibandingkan sistem yang menggunakan matrik  $\mathbf{G}$  *non-banded* yang secara umum terlihat signifikan pada Eb/No bernilai 20 dB. Untuk lebih jelasnya, pada tabel 2 disajikan beberapa sampel data nilai BER dari gambar 5.

Tabel 2.

Sampel BER terhadap perubahan Eb/No pada Doppler 0,2

Eb/No(dB)	BER			
	<i>Non-banded</i>	<i>3 banded</i>	<i>5 banded</i>	<i>7 banded</i>
20	$5.5.10^{-3}$	$8.10^{-3}$	$7.10^{-3}$	$6.8.10^{-3}$
25	$3.2.10^{-3}$	$7.10^{-3}$	$5.6.10^{-3}$	$4.7.10^{-3}$
30	$2.6.10^{-3}$	$6.5.10^{-3}$	$5.10^{-3}$	$4.10^{-3}$
35	$2.2.10^{-3}$	$6.10^{-3}$	$4.8.10^{-3}$	$3.8.10^{-3}$
40	$2.10^{-3}$	$6.10^{-3}$	$4.5.10^{-3}$	$3.7.10^{-3}$
45	$1.9.10^{-3}$	$6.10^{-3}$	$4.5.10^{-3}$	$3.5.10^{-3}$
50	$1.9.10^{-3}$	$6.10^{-3}$	$4.5.10^{-3}$	$3.5.10^{-3}$

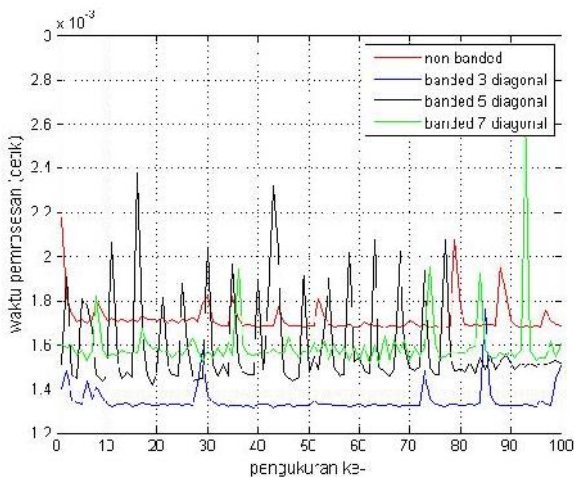
Sama seperti simulasi pada kondisi Doppler bernilai 0,1, hasil yang didapatkan pada kondisi Doppler bernilai 0,2 memperlihatkan bahwa sistem *3 banded* secara umum juga memiliki kinerja yang lebih buruk dibandingkan sistem *non-banded*, *5 banded* dan *7 banded* sepanjang nilai Eb/No 20 dB. Sementara sistem dengan *7 banded* memiliki kinerja

lebih baik dibandingkan sistem dengan 3 *banded* dan 5 *banded* juga sepanjang nilai Eb/No 25 dB. Pada tabel 2, *error floor* pada sistem *non-banded* terjadi pada Eb/No bernilai 40 dB dan *error floor* pada sistem *banded* secara umum terjadi saat Eb/No bernilai 35 dB. Hal ini dapat disimpulkan bahwa metode reduksi sejumlah elemen matrik **G** dengan memanfaatkan sifat *banded* berpengaruh terhadap kinerja sistem dimana kinerja sistem yang menggunakan metode *banded* secara umum lebih buruk dibanding sistem yang menggunakan metode *non-banded*.

**C. Pengaruh Banded Q Diagonal Pada Sebuah Matrik G Terhadap Proses Perhitungan Invers Matrik**

Investigasi juga dilakukan dengan mengukur proses dari perhitungan matrik  $G^{-1}$  pada sebuah simbol/frame OFDM secara langsung antara matrik **G** *non-banded* dan matrik **G** *banded*. Proses perhitungan dilakukan dengan menyisipkan perintah *tic* dan *toc* diantara instruksi perhitungan *invers* matrik **G** baik yang *banded* maupun *non-banded*.

Pengukuran dilakukan sebanyak 100 kali pengukuran secara berurutan dengan hasil pengukuran sebagai data merupakan rata-rata 100 pengukuran tersebut. Gambar 6 adalah hasil pengukuran dari sebuah simbol/frame sebanyak 100 kali. Simbol/frame yang digunakan untuk masing-masing pengukuran adalah simbol/frame yang sama.



Gambar. 6. Grafik pengukuran proses perhitungan *invers* sebuah matrik **G** *non-banded* dan matrik **G** *banded*.

Tabel 3.  
Waktu rata-rata hasil pengukuran

Waktu rata-rata (s)			
<i>non-banded</i>	3 <i>banded</i>	5 <i>banded</i>	7 <i>banded</i>
1,71743*10 <sup>-3</sup>	1,34448*10 <sup>-3</sup>	1,59310*10 <sup>-3</sup>	1,59426*10 <sup>-3</sup>

Dari hasil yang didapatkan, sebuah matrik **G** *non-banded* memerlukan proses perhitungan *invers* matrik yang lebih lama dibandingkan dengan proses perhitungan *invers* matrik sebuah matrik **G** *banded*

Dari tabel 3, dapat dilihat sebuah matrik **G** 3 *banded* memiliki proses perhitungan *invers* matrik yang lebih cepat dibandingkan yang lainnya. Dengan menggunakan matrik **G** 3 *banded*, terdapat penghematan waktu pemrosesan sebuah perhitungan *invers* matrik **G** sebesar 21,72% dibandingkan dengan matrik **G** *non-banded*.

**IV. KESIMPULAN**

ICI menyebabkan matrik **G** menjadi tidak diagonal. Hal ini menyebabkan perhitungan *invers* matrik **G** untuk desain mitigasi ICI menjadi rumit. Penggunaan sifat *banded* pada matrik **G** bertujuan agar perhitungan *invers* matrik menjadi sederhana. Apabila dalam sebuah simbol OFDM memiliki 64 *subcarrier* maka untuk mendapatkan estimasi informasi  $\hat{X}$  pada tiap-tiap *subcarrier*, sebuah teknik mitigasi ICI pada sistem yang menggunakan matrik **G** secara lengkap (*non-banded*) membutuhkan perhitungan *invers* matrik berukuran 64x64 sehingga koefisien *filter* yang diperlukan sebanyak 64 *tap* sementara pada sistem 3 *banded* diperlukan perhitungan *invers* matrik berukuran 3x3 sehingga koefisien *tap filter* yang diperlukan sebanyak 3 *tap*.

Meski perhitungan *invers* matrik menjadi lebih sederhana, namun hasil investigasi menunjukkan bahwa sistem OFDM yang memanfaatkan *banded* pada matrik **G** memiliki kinerja lebih buruk dibandingkan sistem OFDM yang menggunakan matrik **G** *non-banded*. Hal ini disebabkan karena terdapat elemen-elemen matrik **G** yang merupakan bagian penting dari perhitungan *invers* matrik **G**, namun direduksi untuk menyederhanakan perhitungan *invers* matrik **G** itu sendiri. Hal ini menunjukkan bahwa reduksi sejumlah elemen-elemen matrik **G** memanfaatkan *banded* memiliki pengaruh terhadap kinerja sistem.

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1] Y. Li, and G. Stuber, editor, "OFDM for Wireless Communications", Georgia Institute of Technology, Ch. 1, (2006).
- [2] L. Rugini, P. Banelli, and S. Cacopardi, "Probability of Error of OFDM Systems with Carrier Frequency Offset in Frequency-Selective Fading Channels", *IEEE Communication Society*, (2004).
- [3] G. L. Stuber, "Principles of Mobile Communications", Springer 3rd edition, Ch. 2, (2011).
- [4] H. H. Roni, S. W. Wei, Y. H. Jan, T. C. Chen and J. H. Wen, "Low Complexity qSIC Equalizer for OFDM System", *IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE) 13th*, (2009).
- [5] C.Y. Hsu, and W.R. Wu, "A Low-complexity ICI Mitigation Method for High-speed Mobile OFDM Systems", *IEEE ISCAS 16th*, (2006).
- [6] X. Cai, and G.B. Giannakis, "Bounding Performance and Suppressing Inter-carrier Interference in Wireless Mobile OFDM", *IEEE Trans. on communications* vol. 51 no. 12 (2003, Des) 2047-2056.
- [7] L. Rugini, P. Banelli, and G. Leus, "Low-complexity Banded Equalizers for OFDM Systems in Doppler Spread Channels", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, (2007, Jan).
- [8] S. Lu and N. Al-Dhahir, "Coherent and differential ICI Cancellation for Mobile OFDM With Application to DVB-H," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 11, (2008, Nov) 4110-4116.
- [9] T.Y. Al-Naffouri, K.M.Z. Islam, N. Al-Dhahir, dan S. Lu, "A Model Reduction Approach for OFDM Channel Estimation Under High Mobility Conditions", *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 58, no. 4, (2010, April).
- [10] C. Xiao, and Y.R. Zheng, "A Statistical Simulation Model for Mobile Radio fading Channels", *IEEE. Trans. on wireless. Communications*. vol. 50, (2002, Juni) 888-891.
- [11] Y. Mostofi, and D. Cox, "ICI Mitigation for Pilot-Aided OFDM Mobile Systems", *IEEE Trans. on wireless communications*, vol. 4, no. 2, (2005, March).
- [12] Y.S. Cho, J.K. Kim, W.Y. Yang, and C.G. Kang, "MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB", John Wiley and Sons, Ch.6, (2010).