

PERBANDINGAN ESTIMASI KANAL DENGAN PENDEKATAN LINIER PIECEWISE DAN POLINOMIAL PADA SISTEM OFDM

Mulyono

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Suska Riau
email: mul.te.08@gmail.com

ABSTRAK

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) merupakan suatu teknik yang memungkinkan antar *subcarrier* saling *overlap*, sehingga membuat OFDM memiliki efisiensi *bandwidth* yang tinggi. Dalam sistem OFDM juga menggunakan *bandwidth* yang sempit untuk setiap *subcarrier*-nya sehingga lebih tahan terhadap frekuensi selektif yang dapat timbul dari *delay spread multipath*. Namun, OFDM memiliki kelemahan yaitu sensitif terhadap frekuensi *offset* yang disebabkan oleh pergerakan *Doppler* pada kanal *mobile-to-mobile* dan kanal *mobile-to-fix*. Untuk itu diperlukan suatu teknik estimasi yang mampu mengatasi ICI yang disebabkan oleh frekuensi *offset*. Pada tulisan ini menggunakan estimasi kanal dengan pendekatan linier *piecewise* dan polinomial. Interpolasi polinomial yang digunakan yaitu *piecewise cubic hermite* dan *spline cubic*. Sedangkan untuk mengurangi ICI digunakan *zero forcing equalizer*. Pada estimasi kanal *mobile-to-mobile* dengan pendekatan linier *piecewise* didapat BER sebesar 10^{-3} dengan Eb/No sekitar 35 dB untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0,1 dan BER sebesar 10^{-2} dengan Eb/No sekitar 22 dB untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0,3 untuk interpolasi dengan pendekatan *spline cubic*. Sedangkan pada estimasi kanal *mobile-to-fix* yang menggunakan interpolasi dengan pendekatan linier *piecewise* didapat BER sebesar 10^{-3} dengan Eb/No sekitar 28 dB untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0,1 dan BER sebesar 10^{-2} dengan Eb/No sekitar 23 dB untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0,3 untuk interpolasi dengan pendekatan .

Kata Kunci: Efek *Doppler*, Estimasi Kanal, *Equalizer*, ICI, Interpolasi

ABSTRACT

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is a technique that allows the inter-subcarrier to overlap that makes OFDM having high bandwidth efficiency. OFDM system also uses a narrow bandwidth for each subcarrier making it more resistant to frequency selective which may arise from multipath delay spread. However, OFDM has the disadvantage that is its sensitiveness to frequency offset caused by Doppler shift on the mobile-to-mobile and the mobile-to-fix channel. This requires an estimation technique that is able to overcome the ICI caused by frequency offset. In this paper a channel estimation is performed using piecewise linear and polynomial approach. Polynomial interpolation used is piecewise cubic hermite interpolation and spline cubic interpolation. To reduce ICI used the zero forcing equalizer. On mobile-to-mobile channel estimation with a piecewise linear approach, BER of 10^{-3} is obtained with Eb/No about 35 dB for normalized Doppler frequency of 0,1 and BER of 10^{-2} is achieved with Eb/No around 22 dB for normalized Doppler frequency of 0,3 for spline cubic interpolation. While for the mobile-to-fix channel estimation with a piecewise linear approach, BER of 10^{-3} is obtained with Eb/No about 28 dB for normalized Doppler frequency of 0,1 and BER of 10^{-2} is achieved with Eb/No around 23 dB for normalized Doppler frequency of 0,3 for spline cubic interpolation.

Key words: Channel Estimation, Doppler Effect, Equalizer, ICI, Interpolation

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang semakin pesat khususnya dibidang komunikasi *mobile broadband* mendorong para peneliti dan produsen dibidang jasa telekomunikasi untuk terus meningkatkan layanan baik itu dari sisi efisiensi *bandwidth* maupun kehandalan dari sistem. Salah satu sistem yang memiliki

efisiensi *bandwidth* yang tinggi adalah *orthogonal frequency division multiplexing* atau yang sering disebut dengan OFDM. Pada sistem OFDM memungkinkan setiap *subcarrier*-nya untuk saling *overlap*, sehingga membuat OFDM memiliki efisiensi *bandwidth* yang tinggi. Dalam sistem OFDM juga menggunakan *bandwidth* yang sempit untuk setiap *subcarrier*-nya, sehingga lebih tahan

terhadap frekuensi selektif yang dapat timbul dari *delay spread multipath*. Namun, OFDM memiliki kelemahan yaitu sensitif terhadap frekuensi *offset* yang disebabkan oleh pergerakan *Doppler* pada kanal *mobile* (Hao, 2007). Frekuensi *offset* akan menyebabkan terjadinya *intercarrier interference* (ICI) dan menurunkan kinerja dari sistem.

Pada sistem komunikasi *mobile*, baik itu *mobile-to-mobile* maupun *mobile-to-fix* akan terjadi pergeseran *Doppler* yang mengakibatkan performansi dari sistem mengalami penurunan. Oleh sebab itu, diperlukan suatu sistem yang dapat melakukan estimasi terhadap perubahan kanal yang disebabkan oleh pergerakan *Doppler*.

Ada beberapa metode yang digunakan untuk melakukan estimasi kanal diantaranya adalah dengan memperkirakan dan mengoreksi *carrier frequency offset* (CFO) sebelum didemodulasi. Moose mengusulkan suatu skema yang akan digunakan untuk memperkirakan CFO yaitu dengan cara mengulangi simbol data dan membandingkan fase setiap *subcarrier* (Moose, 1994). Namun, metode ini mengurangi efisiensi dari *bandwidth* karena pengulangan yang dilakukan pada simbol OFDM.

Yang mengusulkan estimasi *blind carrier frequency offset* (CFO) yang menggunakan varian keluaran minimum untuk mengestimasi CFO. Teknik ini memiliki resolusi tinggi dan efisiensi *bandwidth* yang tinggi untuk sistem OFDM. Namun, teknik ini lebih rumit dibanding dengan teknik yang menggunakan *bit training* (pilot) (Yang, 2004).

Coleri menggunakan estimasi berbasis pilot tipe blok untuk model kanal *slow fading* dan estimasi berbasis pilot tipe *comb* untuk model kanal *fast fading* (Coleri, 2002). Pada tulisan ini basis tipe *comb* untuk mengestimasi kanal *mobile-to-mobile* dan kanal *mobile-to-fix*.

Pada tulisan ini menggunakan model kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*. Kanal diestimasi menggunakan pilot tipe *comb* yang didasarkan pada algoritma *least square* dan diinterpolasi dengan pendekatan linier

piecewise dan polinomial orde tiga. Interpolasi polinomial yang digunakan adalah *piecewise cubic hermite* dan *spline cubic* tipe *not-a-knot*. Hasil dari estimasi selanjutnya digunakan sebagai koefisien untuk *zero forcing equalizer*.

BAHAN DAN METODE

Pada tulisan ini membangun dua model yaitu model untuk sistem OFDM dan model untuk kanal. Kanal yang digunakan yaitu kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* dan kanal *mobile-to-fix rayleigh fading*. Untuk model sistem OFDM mengacu pada (Tsai, 2004). Model kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* mengacu pada (Patel, 2006). Sedangkan untuk kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* mengacu pada (Zeng, 2002).

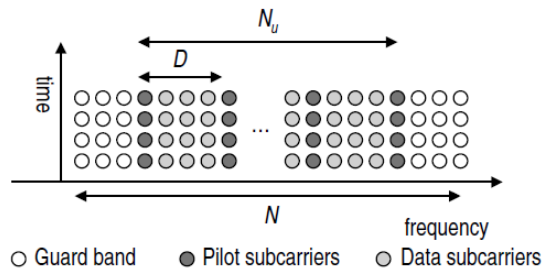
A. Sistem OFDM

Diagram blok sistem OFDM terlihat seperti pada gambar 2. Sinyal informasi yang berupa data biner akan dilakukan proses *mapping* terlebih dahulu yang selanjutnya dikonversi kedalam bentuk paralel oleh S/P. Selanjutnya dilakukan proses penyisipan pilot menggunakan susunan pilot tipe *comb*. Pilot ini digunakan untuk mengestimasi kanal. Penempatan pilot tipe *comb* ditunjukkan seperti gambar 1. Diasumsikan bahwa M pilot adalah terdistribusi *uniform* sebanyak N *subcarrier*. Spasi antar pilot adalah $D=N/M$, dengan D adalah sebuah integer. Perlu diketahui bahwa selain N_u *subcarrier* yang ditransmisi, juga terdapat cadangan *subcarrier* yang digunakan sebagai *guard band* pada kedua ujung spektrum. Diantara N_u *subcarrier* yang ditransmisi, juga terdapat M_p pilot yang digunakan untuk estimasi kanal (Tsai, 2004).

Blok IFFT mengubah data dalam domain frekuensi X_k pada *subcarrier* k th kedalam sampel domain waktu x_n sebagai (Tsai, 2004)

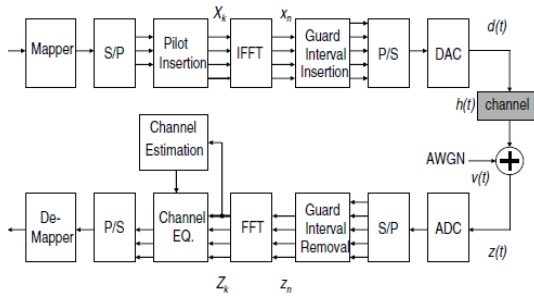
$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2+1}^{N/2} X_k e^{j2\pi kn/N},$$

$$n = -N_g, \dots, N-1 \quad (1)$$



Gambar 1 Penempatan pilot subcarrier (Tsai, 2004).

dimana N merupakan jumlah total subcarrier. Untuk menghindari terjadinya intersymbol interference (ISI), ditambahkan cyclic prefix sebanyak N_g sampel yang disisipkan dibagian awal setiap simbol. Cyclic prefix merupakan salinan data akhir dari setiap simbol.



Gambar 2 Diagram blok baseband pada sistem OFDM berbasis pilot-aided (Tsai, 2004).

Pada penerima, sinyal baseband pertama kali disampel untuk mendapatkan z_n . Dengan menghilangkan cyclic prefix yang terdapat diawal setiap simbol, selanjutnya z_n dikirim ke blok FFT untuk ditransformasi kedalam domain frekuensi (Tsai, 2004).

$$Z_k = \sum_{n=0}^{N-1} z_n e^{-j2\pi nk/N}$$

$$k = -N/2 + 1, \dots, N/2 \tag{2}$$

diasumsikan bahwa durasi pada cyclic prefix cukup panjang sehingga tidak terdapat ISI. Kemudian data baseband yang diterima dalam domain frekuensi menjadi

$$Z_k = X_k H_k + V_k \tag{3}$$

dengan H_k adalah respon impuls kanal dan V_k adalah noise AWGN.

B. Kanal Wireless

Kanal merupakan suatu media yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal dari pengirim ke penerima. Saat sinyal ditransmisi akan mengalami perubahan diantaranya adalah perubahan fase, polarisasi dan level dari suatu sinyal terhadap waktu yang disebabkan oleh fenomena alam seperti refraksi, refleksi, difraksi, hamburan serta redaman dari gelombang radio. Fenomena ini disebut juga sebagai fading.

Kanal fading pada umumnya dikategorikan menjadi dua bagian yaitu fading skala besar dan fading skala kecil yang sering terjadi secara bersamaan. Fading skala besar biasanya dihasilkan oleh wilayah bukit, hutan, bangunan dan sifatnya relatif terhadap jarak antara pemancar dan penerima. Fading skala kecil juga dikenal sebagai rayleigh fading dan tidak ditentukan oleh jarak dalam komunikasi (Xiao, 2003).

Pada komunikasi mobile, distribusi rayleigh biasa digunakan untuk menjelaskan perubahan waktu dari selubung sinyal fading datar (flat fading) yang diterima, atau selubung dari satu komponen multipath (Sklar, 1997).

Ketika mobile station melakukan komunikasi mobile, frekuensi sinyal yang diterima akan berubah. Dalam kondisi multipath, setiap sinyal multipath memiliki frekuensi pergeseran yang disebut sebagai Doppler spread. Pergeseran dari frekuensi sinyal dipenerima mobile disebabkan oleh gerakan yang disebut Doppler frequency shift, dan itu sebanding dengan kecepatan dari mobile user (Wang, 2011).

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{v}{\lambda} \cos \theta_i \\ &= f_c \frac{v}{c} \cos \theta_i \\ &= f_m \cos \theta_i \end{aligned} \tag{4}$$

Dengan v adalah kecepatan dari mobile station, λ adalah panjang gelombang radio, f_c adalah frekuensi carrier dari pengirim, c adalah kecepatan cahaya, θ_i adalah sudut

antara radio dan *mobile station*, f_d adalah *Doppler frequency shift* maksimum.

Untuk kanal *mobile-to-mobile rayleigh fading* (H_k) dapat direpresentasikan sebagai (Patel, 2006).

$$H_k = \sqrt{\frac{2}{NM}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \exp\{j\{2\pi f_1 \cos(\alpha_n)t + 2\pi f_2 \cos(\beta_m)t + \theta_{nm}\}\} \quad (5)$$

$$\alpha_n = \frac{2\pi n - \pi + \theta}{4N} \quad (6)$$

$$\beta_m = 2\left(\frac{2\pi m - \pi + \psi}{4M}\right) \quad (7)$$

dengan $\theta_{n,m}$, θ dan ψ adalah saling bebas dan didistribusikan secara *uniform* pada untuk semua $[-\pi, \pi)$. Kanal diasumsikan *non line-of-sight propagation* (NLOS).

Sedangkan untuk kanal *mobile-to-fix rayleigh fading* dapat direpresentasikan sebagai (Zeng, 2002).

$$H_k = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=1}^N \exp[j(\omega_d t \cos \alpha_n + \phi_n)] \quad (8)$$

$$\alpha_n = \frac{2\pi n - \pi + \theta}{4N}, \text{ dengan } n=1,2,3,\dots,N \quad (9)$$

dengan α_n dan ϕ_n adalah saling bebas dan didistribusikan secara *uniform* pada $[-\pi, \pi)$ untuk semua n .

ESTIMASI DAN INTERPOLASI

Estimasi dilakukan untuk mendapatkan karakteristik dari kanal berdasarkan pilot. Estimasi kanal berdasarkan pilot terbagi menjadi dua bagian yaitu estimasi kanal berdasarkan susunan pilot tipe blok dan estimasi kanal berdasarkan susunan pilot tipe *comb*. Pada tulisan ini digunakan estimasi kanal berdasarkan susunan pilot tipe *comb*. Susunan pilot tipe *comb* dapat dilihat seperti

gambar 1. Pilot dimasukkan kedalam data simbol $X(k)$ berdasarkan (Coleri, 2002).

$$X(k) = X(mL + l) \quad (10)$$

$$X(k) = \begin{cases} M_p(m) & l=0 \\ \text{data} & l=1,\dots,D \end{cases}$$

Estimasi kanal berdasarkan susunan pilot tipe *comb* yang didasarkan pada algoritma *least square* adalah sebagai berikut (Coleri, 2002).

$$h_{ep}(k) = \frac{y_p(k)}{x_p(k)} \quad (11)$$

dengan x_p merupakan pilot yang disisipkan sebelum proses IFFT dan y_p merupakan pilot keluaran dari FFT. h_{ep} merupakan respon *impuls* dari kanal.

Selanjutnya h_{ep} yang berada dalam domain frekuensi dikonversi ke dalam domain waktu untuk diinterpolasi. Interpolasi dilakukan untuk mendapatkan nilai dari karakteristik kanal yang telah diestimasi. Nilai dari karakteristik kanal ini nantinya akan digunakan sebagai referensi untuk koefisien *equalizer*.

Pada tulisan ini menggunakan interpolasi dengan pendekatan linier *piecewise* dan polinomial orde tiga. Interpolasi linier *piecewise* merupakan suatu cara yang digunakan untuk mendapatkan nilai diantara dua pilot (Moler, 2004).

$$P(n) = a_p + s\delta_p \quad (12)$$

$$\delta_p = \frac{a_{p+1} - a_p}{b_{p+1} - b_p} \quad (13)$$

Interpolasi polinomial orde tiga mengacu pada (Moler, 2004). Interpolasi polinomial yang digunakan pada tulisan ini yaitu *piecewise cubic hermite* dan *spline cubic* tipe *not-to-knot*. Yang membedakan antara kedua interpolasi ini ialah pada bagian pembentukan *slope*. Untuk interpolasi yang menggunakan pendekatan *piecewise cubic hermite* diperoleh berdasarkan persamaan berikut

$$P(n) = \frac{3hs^2 - 2s^3}{h^3} y_{k+1} + \frac{h^3 - 3hs^2 + 2s^3}{h^3} y_k + \frac{s^2(s-h)}{h^2} d_{k+1} + \frac{s(s-h)^2}{h^2} d_k \quad (14)$$

Sedangkan interpolasi yang menggunakan pendekatan *spline cubic* tipe *not-to-knot* diperoleh dari persamaan berikut

$$P(n) = a_p + sd_p + s^2g_p + s^3z_p \quad (15)$$

$$g_p = \frac{3\delta_p - 2d_p - d_{p+1}}{h} \quad (16)$$

$$z_p = \frac{d_p - 2\delta_p + d_{p+1}}{h^2} \quad (17)$$

Untuk melihat ukuran kebaikan dari estimasi kanal yang telah dilakukan digunakan *Sum of Square Error* (SSE). Kinerja dari estimasi kanal selanjutnya dilihat berdasarkan perbandingan antara frekuensi *Doppler* ternormalisasi terhadap *sum of square error*. *Sum of square error* diperoleh berdasarkan persamaan berikut

$$SSE = \sum_{n=1}^N |P(n) - h(n)|^2 \quad (18)$$

Untuk meminimalisasi *error* yang terjadi digunakan *zero forcing equalizer*. Kinerja dari *equalizer* dilihat berdasarkan perbandingan antara BER terhadap Eb/No. *Zero forcing equalizer* diperoleh berdasarkan persamaan berikut

$$Y_k = Z_k Q_k \quad (19)$$

$$Q_k = \frac{1}{H_k} \quad (20)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi dilakukan dengan bahasa pemrograman Matlab dan dilakukan sebanyak 10 kali iterasi. Pada simulasi ini menggunakan frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0,04 hingga 0,4

Dari hasil simulasi yang dilakukan diperoleh tabel perbandingan antara frekuensi

Doppler ternormalisasi (f_d) terhadap *Sum of Square Error* (SSE) di kanal *mobile-to-mobile* seperti pada tabel 1. Dari tabel 1 terlihat bahwa untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0,04 hingga 0,08 interpolasi dengan pendekatan linier *piecewise* memiliki kinerja yang lebih baik dengan nilai *sum of square error* sebesar 0,54 dibanding interpolasi dengan pendekatan *piecewise cubic hermite* dengan nilai *sum of square error* sebesar 0,74 dan *spline cubic* dengan nilai *sum of square error* sebesar 0,63.

Interpolasi dengan pendekatan linier *piecewise* memiliki kinerja yang lebih baik pada saat frekuensi *Doppler* ternormalisasi lebih kecil dari 0,12 karena proses osilasi yang terjadi pada kanal *mobile-to-mobile* sangat kecil sehingga jumlah lengkungan pada kanal *mobile-to-mobile* sedikit dan lebih cenderung mendekati garis lurus.

Tabel 1 Perbandingan f_d terhadap SSE di kanal *mobile-to-mobile*

f_d	SSE Linier Piecewise	SSE Piecewise Cubic Hermite	SSE Spline Cubic
0.04	0,54	0,74	0,63
0.08	1,77	2,56	1,90
0.12	7,51	7,26	5,32
0.16	13,06	13,71	9,71
0.20	21,93	18,58	11,35
0.24	54,10	35,63	22,83

Sedangkan interpolasi dengan pendekatan *piecewise cubic hermite* dan *spline cubic* memiliki kinerja yang lebih baik pada saat frekuensi *Doppler* ternormalisasi lebih besar atau sama dengan 0,12 karena osilasi yang terjadi pada kanal *mobile-to-mobile* lebih besar. Semakin besar frekuensi *Doppler* yang terdapat pada kanal *mobile-to-mobile* maka jumlah osilasi yang terjadi juga semakin besar sehingga jumlah lengkungan pada kanal *mobile-to-mobile* semakin banyak. Frekuensi *Doppler* juga sangat mempengaruhi posisi dari pilot yang digunakan sebagai titik interpolasi.

Semakin besar frekuensi *Doppler* maka pergeseran pilot juga semakin besar sehingga menyebabkan *error* yang semakin besar pada saat melakukan interpolasi.

Dari ketiga interpolasi yang digunakan, yang memiliki kinerja terbaik untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi besar atau sama dengan 0,12 di kanal *mobile-to-mobile* adalah interpolasi dengan pendekatan *spline cubic* dengan nilai *sum of square error* sebesar 5,32 dan diikuti oleh interpolasi dengan pendekatan *piecewise cubic hermite* dengan nilai *sum of square error* sebesar 7,26.

Meskipun interpolasi dengan pendekatan *piecewise cubic hermite* dan *spline cubic* sama-sama interpolasi polinomial orde tiga. Namun, Interpolasi dengan pendekatan *spline cubic* memiliki kinerja yang lebih baik dibanding interpolasi dengan pendekatan *piecewise cubic hermite* karena proses pembentukan *slope* pada *spline cubic* lebih mampu mengikuti bentuk lengkungan pada kanal dibanding dengan proses pembentukan *slope* pada *piecewise cubic hermite*.

Berdasarkan tabel 2 perbandingan antara frekuensi *Doppler* ternormalisasi (f_d) terhadap *Sum of Square Error* (SSE) di kanal *mobile-to-fix* terlihat bahwa untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0,04 hingga 0,08 interpolasi dengan pendekatan linier *piecewise* memiliki kinerja yang lebih baik dengan nilai *sum of square error* sebesar 0,74 dibanding interpolasi dengan pendekatan *piecewise cubic hermite* dengan nilai *sum of square error* sebesar 0,84 dan *spline cubic* dengan nilai *sum of square error* sebesar 0,82.

Interpolasi dengan pendekatan linier *piecewise* memiliki kinerja yang lebih baik pada saat frekuensi *Doppler* ternormalisasi lebih kecil dari 0,12 karena proses osilasi yang terjadi pada kanal *mobile-to-fix* sangat kecil sehingga jumlah lengkungan pada kanal *mobile-to-fix* sedikit dan lebih cenderung mendekati garis lurus.

Sedangkan interpolasi dengan pendekatan *piecewise cubic hermite* dan *spline cubic* memiliki kinerja yang lebih baik pada saat frekuensi *Doppler* ternormalisasi lebih besar atau sama dengan 0,12 karena osilasi yang terjadi pada kanal *mobile-to-fix* lebih besar. Semakin besar frekuensi *Doppler* yang terdapat pada kanal *mobile-to-fix* maka jumlah osilasi yang terjadi juga semakin besar

sehingga jumlah lengkungan pada kanal *mobile-to-fix* semakin banyak. Frekuensi *Doppler* juga sangat mempengaruhi posisi dari pilot yang digunakan sebagai titik interpolasi. Semakin besar frekuensi *Doppler*, maka pergeseran pilot juga semakin besar sehingga menyebabkan *error* yang semakin besar pada saat melakukan interpolasi.

Tabel 2 Perbandingan f_d terhadap SSE di kanal *mobile-to-fix*

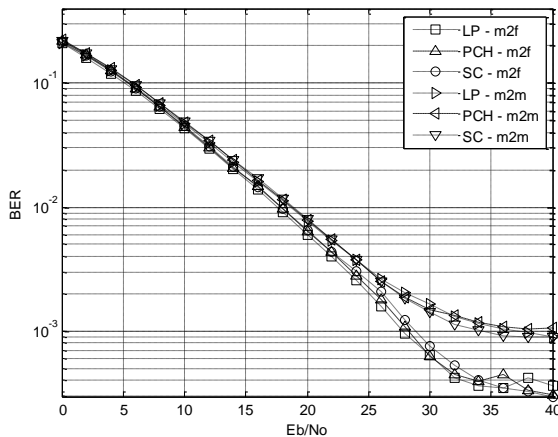
f_d	SSE Linier <i>Piecewise</i>	SSE <i>Piecewise Cubic Hermite</i>	SSE <i>Spline Cubic</i>
0.04	0,74	0,84	0,82
0.08	4,48	5,24	4,89
0.12	17,19	13,65	11,65
0.16	42,86	32,24	22,37
0.20	79,48	47,19	34,96
0.24	117,27	62,42	43,59

Dari ketiga interpolasi yang digunakan, yang memiliki kinerja terbaik untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi besar atau sama dengan 0,12 di kanal *mobile-to-mobile* adalah interpolasi dengan pendekatan *spline cubic* dengan nilai *sum of square error* sebesar 11,65 dan diikuti oleh interpolasi dengan pendekatan *piecewise cubic hermite* dengan nilai *sum of square error* sebesar 13,65.

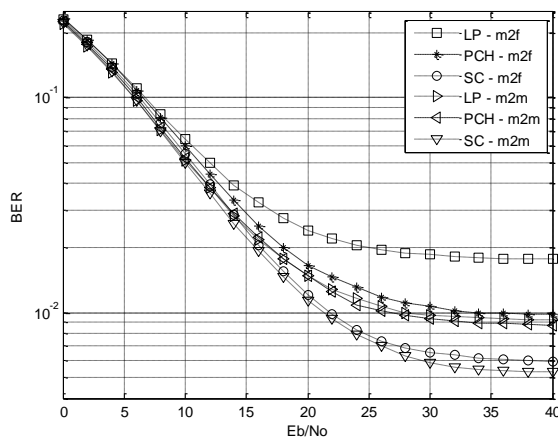
Gambar 3 menunjukkan perbandingan antara BER dan Eb/No untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0,1 pada kanal *mobile-to-mobile* dan kanal *mobile-to-fix*. Dari gambar 3 terlihat bahwa interpolasi dengan pendekatan linier *piecewise* memiliki kinerja terbaik untuk kanal *mobile-to-fix* dengan nilai BER 10^{-3} dibutuhkan Eb/No sekitar 28 dB. Sedangkan pada kanal *mobile-to-mobile* untuk mendapatkan nilai BER 10^{-3} dibutuhkan Eb/No sekitar 35 dB untuk interpolasi dengan pendekatan linier *piecewise* dan *spline cubic*.

Gambar 4 menunjukkan perbandingan antara BER vs Eb/No untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0,3 pada kanal *mobile-to-mobile*

dan kanal *mobile-to-fix*. Dari gambar 4 terlihat bahwa interpolasi dengan pendekatan *spline cubic* memiliki kinerja terbaik untuk kanal *mobile-to-mobile* dengan nilai BER 10^{-2} dibutuhkan Eb/No sekitar 22 dB. Sedangkan pada kanal *mobile-to-fix* untuk mendapatkan nilai BER 10^{-2} dibutuhkan Eb/No sekitar 23 dB untuk interpolasi dengan pendekatan *spline cubic*.



Gambar 3 Grafik BER vs Eb/No untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0,1



Gambar 4 Grafik BER vs Eb/No untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi 0,3

Berdasarkan gambar 3 dan 4 dapat diketahui bahwa *zero forcing equalizer* akan memiliki kinerja terbaik di kanal *mobile-to-mobile* bila menggunakan referensi yang berasal dari interpolasi dengan pendekatan *spline cubic* dengan nilai frekuensi *Doppler* ternormalisasi lebih besar dari 0,1 dan akan memiliki kinerja terbaik di kanal *mobile-to-fix* bila menggunakan referensi yang berasal dari

interpolasi dengan pendekatan *spline cubic*. Sedangkan untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi lebih kecil atau sama dengan 0,1 di kanal *mobile-to-fix*, *zero forcing equalizer* akan memiliki kinerja terbaik bila mendapat referensi yang berasal dari interpolasi dengan pendekatan linier *piecewise*.

KESIMPULAN

Kinerja dari *zero forcing equalizer* sangat dipengaruhi oleh pemberian referensi dari interpolasi yang digunakan. Untuk kinerja *zero forcing equalizer* terbaik diperoleh dari referensi yang menggunakan interpolasi linier *piecewise* untuk kanal *mobile-to-fix* dengan frekuensi *Doppler* ternormalisasi lebih kecil atau sama dengan 0,1 dengan BER sebesar 10^{-3} dibutuhkan Eb/No sekitar 23 dB dan referensi yang berasal dari interpolasi dengan pendekatan *spline cubic* untuk kanal *mobile-to-fix* dan kanal *mobile-to-mobile* dengan frekuensi *Doppler* ternormalisasi lebih besar dari 0,1.

Kinerja dari estimasi kanal sangat dipengaruhi oleh besarnya frekuensi *Doppler* yang terdapat pada kanal *mobile-to-mobile* dan kanal *mobile-to-fix*. Namun, masalah ini bisa diatasi dengan pemilihan teknik interpolasi yang tepat. Untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi lebih kecil atau sama dengan 0,1 interpolasi dengan pendekatan linier *piecewise* memiliki kinerja yang lebih baik dibanding interpolasi dengan pendekatan *piecewise cubic hermite* dan *spline cubic*. Sedangkan untuk frekuensi *Doppler* ternormalisasi lebih besar dari 0,1 interpolasi dengan pendekatan *spline cubic* memiliki kinerja yang lebih baik dibanding interpolasi dengan pendekatan *piecewise cubic hermite* dan linier *piecewise*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

Coleri, S., Mustafa E., Anuj P. & Ahmad B., (2002), "A Study of Channel Estimation in

OFDM Systems”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 894-898.

Fan Ng & Xiaohua Li, (2005), “Cooperative STBC-OFDM Transmissions with Imperfect Synchronization in Time and Frequency”, *Signals, Systems and Computers, Conference Record of the Thirty-Ninth Asilomar Conference on*.

Hao Miin-Jong, (2007), “Decision Feedback Frequency Offset Estimation and Tracking for General ICI Self-Cancellation Based OFDM Systems”, *IEEE Trans. On Broadcasting*, Vol. 53, No. 2.

Moler C., (2004), “*Numerical Computing with MATLAB*”, Society for Industrial and Applied Mathematics.

Moose P. H., (1994), “A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction,” *IEEE Trans. Communication*, Vol. 42, pp. 2908–2914.

Patel C. S., Gordon L. S. & Thomas G. P., (2006), “Statistical Properties of Amplify and Forward Relay Fading Channels”, *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, Vol. 55, No. 1.

Patel C. S., (2006), “*Wireless Channel Modeling, Simulation, and Estimation*”, Thesis School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology.

Sklar B., (1997), “Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I: Characterization“, *IEEE Communications Magazine*.

Tsai P. & Chiueh T., (2004), “Frequency-Domain Interpolation-Based Channel Estimation in Pilot-Aided OFDM Systems”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 1, pp. 420-424.

Wang Fei, (2011), “*Pilot-Based Channel Estimation in OFDM System*”, Thesis University of Toledo.

Xiao Yao, (2003), “*Orthogonal frequency division multiplexing modulation and intercarrier interference cancellation*”, Thesis Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.

Yang F., Li H. K. & Teh C. K., (2004), “A Carrier Frequency Offset Estimator With Minimum Output Variance for OFDM Systems”, *IEEE Communications Letters*, Vol. 8, No. 11.

Zeng R. Y. & Xiao C., (2002), “Improved Models for the Generation of Multiple

Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms”, *IEEE Comm. Letters*, Vol. 6, No. 6.