

Estimasi *Doppler Spread* pada Sistem *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dengan Metode *Phase Difference*

Walid Maulana H, 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

Abstrak— *Doppler spread* akan menyebabkan terjadinya pelebaran spektral sinyal informasi sehingga mengganggu orthogonalitas antar *subcarrier* atau biasa disebut *Inter Carrier Interference* (ICI) pada sistem OFDM. Pengestimasian *doppler spread* akan berguna untuk mengetahui besarnya efek *doppler spread* pada sistem dan membantu untuk meningkatkan optimasi pentransmisi sinyal informasi serta membantu untuk mengembangkan algoritma yang mampu meminimalkan efek ICI. Pada penelitian ini, estimasi *doppler spread* dengan metode *Phase Difference* menggunakan pola tipe-*comb* dalam penyisipan pilotnya. Selanjutnya estimasi kanal yang digunakan adalah *Piece-wise Linear*. Estimasi kanal bertujuan untuk mencari 1 kanal yang dominan di antara kanal-kanal yang ada. Kanal diasumsikan menggunakan model kanal rekomendasi ITU Vehicular dan model *mobile-to-fix Clarke*. Pada kanal ITU Vehicular, terdapat 6 *tap* yang memiliki *delay time* dan *average power* yang berbeda-beda. Setelah melakukan simulasi, dapat disimpulkan bahwa semakin besar *doppler spread*, semakin kecil jumlah simbol pilot yang dibutuhkan untuk membentuk satu lingkaran pada diagram konstelasi, dan sebaliknya. Rentang nilai *doppler spread* yang bisa diestimasi adalah 0.0117-0.2997. Untuk rentang SNR 10-30 dB, besarnya *error* adalah $\pm 64.72\%$, sedangkan untuk rentang SNR 40-80 dB, besarnya *error* adalah $\pm 35.81\%$.

Kata Kunci— *doppler spread*, OFDM, *Phase Difference*, *Piece-wise Linear*, SNR

I. PENDAHULUAN

KOMUNIKASI merupakan salah satu kebutuhan masyarakat yang semakin meningkat pada saat ini. Kebutuhan komunikasi yang semakin tinggi sejalan dengan perkembangan teknologi yang begitu pesat. Perangkat-perangkat komunikasi yang menggunakan media nirkabel lebih disukai masyarakat daripada media kabel. Hal ini dikarenakan media nirkabel memiliki beberapa keunggulan, seperti praktis dan mempunyai mobilitas yang tinggi. Tetapi dalam implementasi sistem komunikasi nirkabel banyak tantangan yang harus dihadapi. Misalnya, pada media nirkabel sinyal yang dikirimkan tidak terlindungi di dalam suatu *waveguide*, sehingga sinyal yang dikirimkan akan mengalami banyak gangguan yang dapat menurunkan kinerja sistem. Kondisi kanal akan menurun sehingga mengakibatkan kapasitas kanal dan *reliability* dari data yang dikirimkan juga menurun.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) merupakan salah satu aplikasi sistem komunikasi nirkabel. OFDM adalah suatu teknik yang menarik untuk transmisi data kecepatan tinggi dalam sistem komunikasi bergerak dengan memanfaatkan beberapa *subcarrier* yang saling tegak lurus. Dalam sistem OFDM, setiap *subcarrier* memiliki *bandwidth* yang sempit, yang membuat sinyal tahan terhadap frekuensi selektif yang dapat timbul dari *delay spread* [1]. Salah satu kelemahan dari sistem OFDM adalah sensitif terhadap kesalahan frekuensi *offset* karena pergeseran *doppler* pada kanal *mobile*. Hal ini akan menyebabkan *doppler spread*. *Doppler spread* merupakan parameter yang merepresentasikan ukuran pelebaran spektrum karena adanya pergerakan relatif kanal antara pemancar dan penerima. *Doppler Spread* akan menyebabkan terjadinya pelebaran spektral sinyal informasi sehingga mengganggu orthogonalitas antar *subcarrier* atau biasa disebut *Inter Carrier Interference* (ICI) [2]. Metode estimasi *doppler spread* yang ada pada umumnya dikategorikan menjadi 2 kelas yaitu *Level Crossing Rate* dan *Covariance*, tetapi algoritma ini secara spesifik tidak didesain untuk sistem OFDM [2]. Pengestimasian *doppler spread* akan berguna untuk mengetahui besarnya efek *doppler spread* pada sistem dan membantu untuk meningkatkan optimasi pentransmisi sinyal informasi serta membantu untuk mengembangkan algoritma yang mampu menghilangkan efek ICI [3]. Metode estimasi yang digunakan adalah *Phase Difference*. Metode ini mampu memilih kanal propagasi dominan di antara kanal-kanal yang ada, kemudian mengikuti perubahan fase pilot pada kanal tersebut (*path tracing*) hingga mencapai 2. Waktu tersingkat untuk mencapai 2 berarti memiliki nilai *doppler spread* terbesar.

Pengujian metode *Phase Difference* dilakukan dengan menggunakan nilai *doppler spread* dan SNR yang berbeda-beda. Kemudian hasil estimasinya dibandingkan dengan nilai *doppler spread* sebenarnya. Penjelasan mengenai pemodelan sistem akan dibahas pada bagian II. Pada bagian III berisi tentang hasil simulasi dan analisa. Sedangkan kesimpulan dibahas di bagian IV.

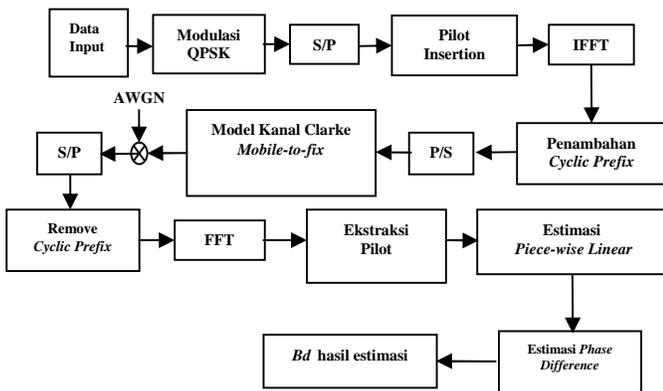
II. PEMODELAN SISTEM

A. Model Sistem

Pada simulasi, bit informasi akan dibangkitkan secara acak

sebanyak 16.384 bit. Bit informasi tersebut akan dimodulasi menggunakan modulasi QPSK. Selanjutnya pola penyisipan pilot yang digunakan yaitu tipe pola *comb*. Jumlah *subcarrier* sebanyak 256, jumlah titik IFFT sebanyak 1024 titik, *Guard Interval* sebesar 1/4 durasi simbol, kanal propagasi diasumsikan berdistribusi *Rayleigh*, model kanal menggunakan model *Clarke*, kanal diasumsikan dipengaruhi oleh AWGN, pemancar berada dalam keadaan tetap (*fixed*), sedangkan penerima bergerak (*mobile*).

Gambar 1 merupakan blok diagram proses estimasi *Doppler Spread* pada sistem OFDM. Pada awalnya, di pemancar, data input biner dimodulasi QPSK, sehingga 2 bit mewakili 1 simbol pada diagram konstelasi. Ketika masuk ke bagian *serial to parallel*, bit informasi tersebut dijadikan 8 jalur paralel, kemudian disisipkan pilot di setiap jalur paralel. Jadi setiap jalur diawali oleh 1 simbol pilot dan diikuti 8 simbol informasi. Setelah masuk ke IFFT, maka sinyal keluaran dari *transmitter* OFDM akan saling orthogonal satu dengan yang lain. Penambahan *cyclic prefix* (CP) berguna untuk menghindari terjadinya ISI karena CP berperan sebagai ruang penjaga antara dua simbol bersebelahan. Kemudian, data diubah dari paralel ke serial dan dikirim melalui kanal fading *Rayleigh*. Data terkena efek *doppler* dan *noise* AWGN sebelum masuk ke penerima. Sebelum masuk ke *remove cyclic prefix* dan FFT, data diubah dari serial ke paralel. Ekstraksi pilot berguna untuk mengambil pilot untuk dianalisa. Estimasi *Piece-wise Linear* berguna untuk estimasi kanal, sehingga didapatkan satu kanal dominan. Estimasi *Phase Difference* berguna untuk menganalisa pergeseran fase pilot, sehingga nilai *doppler spread* estimasi dapat dihitung.



Gambar 1. Blok diagram proses estimasi *Doppler Spread* pada sistem OFDM

B. Model Kanal

Persamaan *Multipath* kompleks *baseband* dengan panjang *L* dituliskan sebagai berikut :

$$h(n, \tau) = \sum_{l=0}^{L-1} \gamma_l e^{j(\omega_c \tau - \tau_l)} \quad (1)$$

dimana τ_l adalah delay lintasan ke-*l*, yang dinormalisasi dengan periode sampling dan γ_l adalah *power delay profile*

untuk setiap lintasan ke-*l* tipe yang digunakan yaitu *mobile-to-fix* [4].

Model kanal *Clarke* digunakan untuk keadaan kanal *mobile-to-fix*. Model *Clarke* merupakan sebuah model statistik yang berguna untuk mensimulasikan kanal *Rayleigh Fading* [5]. Adapun persamaan statistiknya sebagai berikut :

$$g(t) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=1}^N e^{j\omega_d t} \{ \cos(\alpha_n) + \varphi_n \} \quad (2)$$

dimana $\alpha_n \sim U[-\pi, \pi]$ dan $\varphi_n \sim U[-\pi, \pi]$ untuk semua nilai *n*, dan saling bebas satu dengan yang lainnya. *N* menyatakan jumlah jalur propagasi. α_n adalah sudut acak pada pemancar saat sinyal menuju penerima atau biasa disebut dengan *AOD* (*random angle of departure*), φ merupakan pergeseran fase acak ke-*n*, dan ω_d merupakan frekuensi *doppler*. Nilai pergeseran frekuensi *doppler* normalisasi dimasukkan pada persamaan (2). Sedangkan untuk menghitung nilai *doppler spread* pada kanal *mobile-to-fix* dapat menggunakan persamaan berikut [6]:

$$B_d = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L \tau_l^2}{2}} \quad (3)$$

Tabel 1. Parameter Kanal Model ITU Vehicular

Tap	Kanal	
	Relative Delay (ns)	Average Power (dB)
1	0	0.0
2	310	-1.0
3	710	-9.0
4	1 090	-10.0
5	1 730	-15.0
6	2 510	-20.0

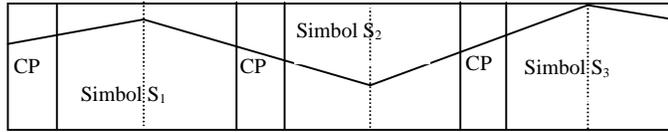
Selanjutnya model kanal divariasikan berdasarkan model kanal *ITU Vehicular* [7] yang terdiri dari 6 tap yang memiliki *delay* dan *average power* yang berbeda untuk tiap tap.

C. Estimasi Kanal

Estimasi kanal merupakan suatu proses untuk mengetahui karakteristik kanal berdasarkan urutan data training yang dikirimkan oleh pemancar. Estimasi kanal diperlukan karena sinyal yang sampai di penerima adalah sinyal terima, yang merupakan perkalian sinyal input dengan respon impuls ditambah *noise*, *delay*, dan *fading*. Untuk mengestimasi *doppler spread* diperlukan parameter respon impuls, sehingga harus dilakukan estimasi kanal terlebih dahulu. Kanal harus diestimasi dari data training atau karakteristik statistik kanal. Pada sistem OFDM yang dipelajari dan dianalisa adalah teknik estimasi kanal berdasarkan susunan pilot. Algoritma

$$f_k(t_i) = 2 \sin(\theta_{i+1} - \theta_i) \cos(\theta_{i+1} + \theta_i) \quad (6)$$

yang digunakan untuk estimasi kanal adalah *Piece-wise Linear* dengan model 2 slope [8]. Bentuk estimasi ini dapat dilihat pada Gambar 2. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa dalam 1 simbol OFDM terdapat 2 garis (slope). Pada algoritma ini, respon impuls dianggap mampu dimodelkan berupa garis-garis dengan konstanta slope yang konstan sepanjang respon impuls kanal pada bagian tengah kanal (*h middle*).



Gambar 2. *Piece-wise Linear* dengan 2 slope

$$h_i(k) = h_{(N/2-1)(k)} + (i+1 - N/2) \cdot \frac{f_k \cdot T_s}{N} \quad (4)$$

Berikut adalah persamaan estimasi kanal *Piece-wise Linear* dengan 2 slope :

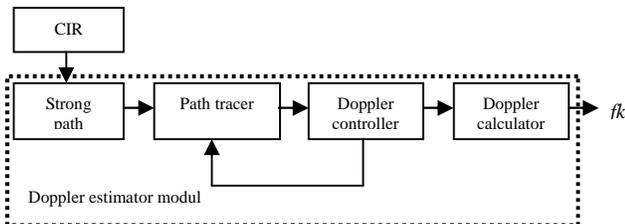
dimana $h_i(k)$ menyatakan respon impuls kanal estimasi, T_s menyatakan durasi simbol *subcarrier*, l_k menyatakan konstanta slope, $h_{(N/2-1)(k)}$ menyatakan *h middle*, dan i menyatakan waktu sampel satu simbol OFDM.

D. Metode Phase Difference

Dari Gambar 3, dapat dijelaskan bahwa input modul adalah CIR (*Channel Impulse Response*) dan outputnya adalah nilai *doppler spread* estimasi.

Fungsi masing-masing bagian tersebut antara lain :

- Strong Path Selector* : memilih path yang dominan.
- Path Tracer* : mengikuti perubahan fase pilot dari path yang sudah dipilih.
- Doppler controller* : mengontrol apakah pergeseran fasenya $\theta_{i+1} - \theta_i \approx 2\pi$ atau belum. Jika belum, maka kembali ke *Path Tracer*. Jika sudah, maka masuk ke bagian *Doppler Calculator*.
- Doppler Calculator* : menghitung besarnya *doppler spread*.



Gambar 3. Blok diagram estimator *Phase Difference* [9]

Ketika difokuskan pada satu path yang dominan, fase

$$f_k(t_i) = 2 \sin(\theta_{i+1} - \theta_i) \cos(\theta_{i+1} + \theta_i) \quad (5)$$

pertama pilot dari path tersebut adalah sebagai berikut :

dimana t_i adalah indeks waktu, k adalah path ke- k , f_k adalah *doppler spread*, dan ϕ_0 adalah fase awal (*initial phase*). Untuk

indeks waktu berikutnya, fase pilot dari path tersebut adalah sebagai berikut:

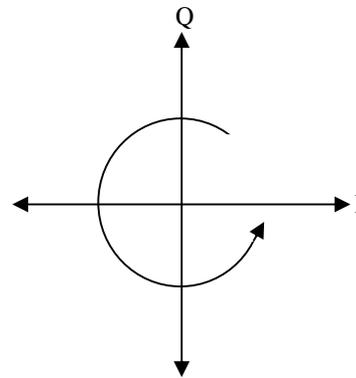
Diasumsikan bahwa $f_k(t_i) = f_k(t_{i+1})$. Artinya besarnya *doppler spread* tidak berubah selama pergeseran fase pilot. Maka persamaan *doppler spread* estimasi menjadi:

$$f_k(t_i) = \frac{2 \sin(\theta_{i+1} - \theta_i) \cos(\theta_{i+1} + \theta_i)}{2\pi(t_{i+1} - t_i)} \quad (7)$$

Untuk mengestimasi frekuensi *doppler*, dibutuhkan *path tracing* dan menentukan waktu yang dibutuhkan oleh pilot untuk membentuk satu lingkaran (bergeser sejauh 2π) terhadap koordinat axis. Dengan kata lain $\theta_{i+1} - \theta_i \approx 2\pi$. Sehingga persamaan *doppler spread* menjadi:

$$f_k(t_i) = \frac{2\pi}{2\pi(t_{i+1} - t_i)} = \frac{1}{\Delta t \cdot \text{Jumlah simbol pilot}} \quad (8)$$

Pergeseran fase pilot dapat diilustrasikan pada Gambar 4. Path dengan waktu yang tersingkat untuk membentuk satu lingkaran menunjukkan bahwa path tersebut mengandung *doppler spread* terbesar.



Gambar 4. Pergeseran Fase Simbol Pilot

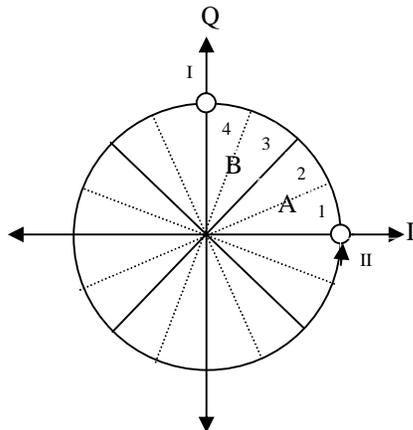
Semisal titik pertama pilot tersebut adalah titik I dan titik terakhir adalah titik II. Maka besarnya error sebesar 1/4. Untuk mengurangi error, maka dibuat suatu teknik seperti tampak pada Gambar 5. Semakin jauh titik akhir dengan titik awal, maka errornya semakin besar, dan sebaliknya. Lingkaran tersebut dibagi menjadi 16 bagian, di mana range A dan range B masing-masing memiliki porsi 1/8. Pada teknik ini, selama berada di range A atau B, besarnya error dianggap tetap. Nilai *error factor* A sebesar $1-0.0625=0.9375$ dan nilai *error factor* B sebesar $1-3 \times 0.0625=0.8125$. Nilai *error factor* tersebut dikalikan terhadap frekuensi *doppler* estimasi yang diperoleh, sehingga didapatkan nilai *doppler spread* estimasi hasil modifikasi.

Maka nilai *doppler spread* estimasi modifikasi dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$f_k(\text{modifikasi}) = f_k \times 0.9375 \quad (9)$$

$$f_k(\text{modifikasi}) = f_k \times 0.8125 \quad (10)$$

Persamaan (9) digunakan jika titik pertama simbol pilot tersebut berada di range A, dan persamaan (10) digunakan jika titik pertama simbol pilot tersebut berada di titik B.



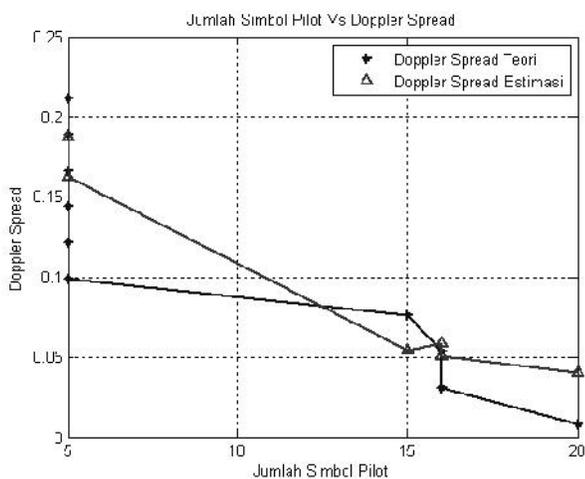
Gambar 5. Penggunaan *error_factor*

III. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Dari proses simulasi yang dilakukan dengan parameter-parameter yang telah ditentukan di atas, didapatkan data-data simulasi yang kemudian dilakukan proses analisis.

A. Perbandingan Nilai *Bd* Sebenarnya dengan *Bd* Estimasi Modifikasi

Gambar 6 menunjukkan grafik antara jumlah simbol pilot dengan *Bd* estimasi. Dari grafik tersebut, diperoleh data-data untuk mengisi Tabel 2. Tabel ini merupakan hasil simulasi untuk SNR 20 dB dengan parameter *Doppler Spread* sebanyak 10 nilai berbeda, yaitu f_d normalisasi = 0.0117-0.2997.



Gambar 6. Grafik Jumlah Simbol Pilot dan *Bd* estimasi, dengan f_d normalisasi = 0.0117-0.2997 SNR = 20 dB

Pada tabel di atas, diambil sampel 10 nilai f_d normalisasi yang berbeda yaitu $f_d T_s = 0.0117, 0.0437, 0.0757, 0.1077, 0.1397, 0.1717, 0.2037, 0.2357, 0.2677, \text{ dan } 0.2997$. Setelah masing-masing f_d dikalikan dengan $T_s = 0.0001024$, didapatkan nilai f_d seperti pada tabel. Nilai *Bd* dan *Bd*

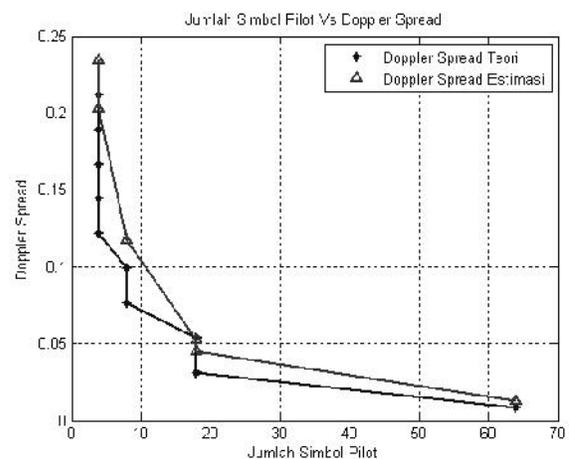
normalisasi, diperoleh dari persamaan (3). Dari tabel tersebut, terlihat bahwa semakin besar nilai *Bd*, maka jumlah simbol pilot semakin kecil.

Tabel 2. Hasil untuk f_d normalisasi = 0.0117-0.2997 SNR = 20 dB

f_d Normalisasi	f_d (Hz)	B_d (Hz)	B_d Normalisasi	Jumlah Simbol Pilot	B_d Estimasi
0.0117	114.2578125	80.79247402	0.008273149	20	0.0406
0.0437	426.7578125	301.7633431	0.030900566	16	0.0508
0.0757	739.2578125	522.7342123	0.053527983	16	0.0586
0.1077	1051.757813	743.7050814	0.0761554	15	0.0542
0.1397	1364.257813	964.6759505	0.098782817	5	0.1625
0.1717	1676.757813	1185.64682	0.121410234	5	0.1625
0.2037	1989.257813	1406.617689	0.144037651	5	0.1875
0.2357	2301.757813	1627.588558	0.166665068	5	0.1875
0.2677	2614.257813	1848.559427	0.189292485	5	0.1875
0.2997	2926.757813	2069.530296	0.211919902	5	0.1875

Dari tabel di atas, terdapat jumlah simbol yang sama, yaitu 16 dan 5. Saat jumlah simbolnya 16, *Bd* estimasi = 0.0508 dan 0.0586. Hasil 0.0508 didapat dari $(1/16) \times 0.8125$. Sedangkan hasil 0.0586 didapat $(1/16) \times 0.9375$. Jadi saat nilainya 0.0508, simbol pilot pertamanya berada di range B. Saat nilainya 0.0586, simbol pilot pertamanya berada di range A. Saat jumlah simbolnya 5, *Bd* estimasi = $(1/5) \times 0.9375 = 0.1875$. Artinya, simbol pilot pertama berada di range A. Selain itu, *Bd* estimasi = $(1/5) \times 0.8125 = 0.1625$. Artinya, simbol pilot pertamanya berada di range B. Hasil tersebut terjadi saat f_d 0.1397 sampai 0.2997.

Untuk menganalisis jumlah simbol pilot dengan SNR=50 dB, maka dibuat Gambar 7, di mana data-datanya dimasukkan ke Tabel 3. Simulasi ini dilakukan dengan perubahan $f_d T_s$ yang kecil, yaitu 0.032.



Gambar 7. Grafik Jumlah Simbol Pilot dan *Bd* estimasi, dengan f_d normalisasi = 0.0117-0.2997 SNR = 50 dB

Dari tabel tersebut, karena perubahan $f_d T_s$ yang kecil (yaitu 0.032), terdapat jumlah simbol yang sama, yaitu 18, 8, dan 4. Saat jumlah simbolnya 18, *Bd* estimasi = 0.0451. Hasil 0.0451 didapat dari $(1/18) \times 0.8125$. Jadi saat nilainya 0.0451, simbol

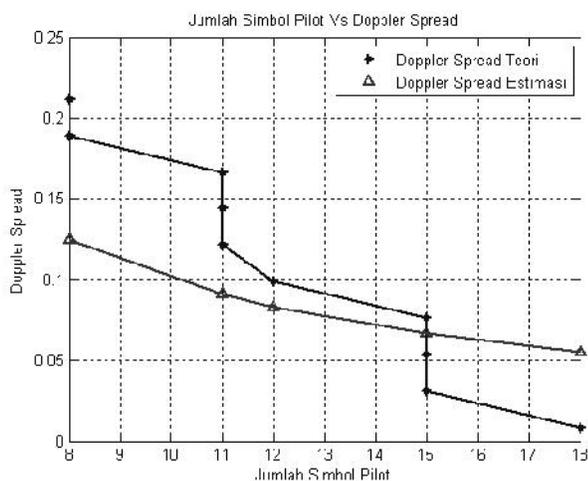
pilot pertamanya berada di range B. Hasil 0.0451 terjadi saat $f_d T_s = 0.0437$ dan 0.0757 . Saat $f_d T_s = 0.1077$ dan 0.1397 , menghasilkan $f_d T_s$ estimasi yang sama, yaitu 0.1172 dengan jumlah simbol pilot sama dengan 8. Sama halnya saat $f_d T_s = 0.1717$ sampai 0.2997 , menghasilkan $f_d T_s$ estimasi yang sama, yaitu 0.2031 dan 0.2334 , dengan jumlah simbol pilot 4. Hasil 0.2031 diperoleh dari $(1/4) \times 0.812$. Jadi simbol pilot pertamanya berada di range B. Hasil 0.2334 diperoleh dari $(1/4) \times 0.9375$. jadi simbol pilot pertamanya berada di range A. Hasil ini terjadi saat f_d normalisasi $0.2357, 0.2677, \text{ dan } 0.2997$.

Tabel 3.
Hasil untuk f_d normalisasi = 0.0117-0.2997 SNR = 50 dB

f_d Normalisasi	f_d (Hz)	Bd (Hz)	Bd Normalisasi	Jumlah Simbol Pilot	Bd Estimasi
0.0117	114.2578125	80.79247402	0.008273149	64	0.0127
0.0437	426.7578125	301.7633431	0.030900566	18	0.0451
0.0757	739.2578125	522.7342123	0.053527983	18	0.0521
0.1077	1051.757813	743.7050814	0.0761554	8	0.1172
0.1397	1364.257813	964.6759505	0.098782817	8	0.1172
0.1717	1676.757813	1185.64682	0.121410234	4	0.2031
0.2037	1989.257813	1406.617689	0.144037651	4	0.2031
0.2357	2301.757813	1627.588558	0.166665068	4	0.2334
0.2677	2614.257813	1848.559427	0.189292485	4	0.2334
0.2997	2926.757813	2069.530296	0.211919902	4	0.2334

B. Perbandingan Nilai Bd Sebenarnya dengan Bd Estimasi tanpa Modifikasi

Estimasi tanpa modifikasi merupakan estimasi tanpa memandang range A dan range B. Jadi tidak ada pengalihan hasil estimasi dengan $error_factor$. Gambar 8 di bawah ini menunjukkan grafik antara jumlah simbol pilot dan Bd estimasi, dengan $f_d T_s = 0.0117-0.2997$ dan SNR 20 dB, di mana data-data yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 8. Grafik Jumlah Simbol Pilot dan Bd estimasi, dengan f_d normalisasi = 0.0117-0.2997 SNR = 20 dB

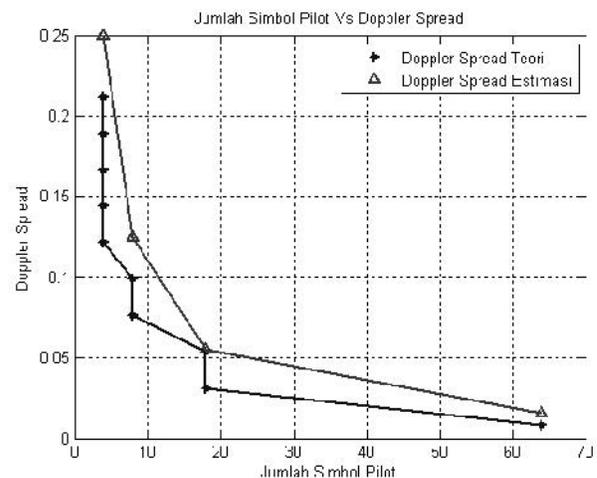
Dari gambar tersebut, tampak bahwa garis biru hampir selalu berada di atas garis merah. Hal tersebut menunjukkan bahwa Bd teori hampir selalu lebih besar daripada Bd estimasi, kecuali saat Bd teori $0.083, 0.0309, \text{ dan } 0.0535$. Selain itu, error yang terjadi lebih besar daripada estimasi modifikasi seperti pada Gambar 6. Ini dibuktikan dengan selisih antara $f_d T_s$ estimasi dan $f_d T_s$ sebenarnya yang jauh.

Dari tabel tersebut, dapat dianalisis bahwa terdapat jumlah simbol pilot yang sama, yaitu 15, 11, dan 8. Jumlah simbol = 15 menghasilkan Bd estimasi 0.0667 . Jumlah simbol = 11 menghasilkan Bd estimasi 0.0909 . Hasil ini terjadi saat f_d normalisasi $0.1717, 0.2357, \text{ dan } 0.2357$. Jumlah simbol pilot = 8 menghasilkan Bd estimasi 0.125 . Hasil ini diperoleh dari $1/8$. Semakin besar frekuensi Doppler, maka jumlah simbol pilotnya semakin sedikit, dan sebaliknya.

Tabel 4.
Hasil untuk f_d normalisasi = 0.0117-0.2997 SNR = 20 dB

f_d Normalisasi	f_d (Hz)	Bd (Hz)	Bd Normalisasi	Jumlah Simbol Pilot	Bd Estimasi
0.0117	114.2578125	80.79247402	0.008273149	18	0.0556
0.0437	426.7578125	301.7633431	0.030900566	15	0.0667
0.0757	739.2578125	522.7342123	0.053527983	15	0.0667
0.1077	1051.757813	743.7050814	0.0761554	15	0.0667
0.1397	1364.257813	964.6759505	0.098782817	12	0.0833
0.1717	1676.757813	1185.64682	0.121410234	11	0.0909
0.2037	1989.257813	1406.617689	0.144037651	11	0.0909
0.2357	2301.757813	1627.588558	0.166665068	11	0.0909
0.2677	2614.257813	1848.559427	0.189292485	8	0.125
0.2997	2926.757813	2069.530296	0.211919902	8	0.125

Gambar 9 di bawah ini menunjukkan grafik antara jumlah simbol pilot dan Bd, dengan range f_d normalisasi $0.0117-0.2997$ dan SNR = 50 dB. Dari gambar tersebut, diperoleh data-data yang dimasukkan pada Tabel 5.



Gambar 9. Grafik Jumlah Simbol Pilot dan Bd estimasi, dengan f_d normalisasi = 0.0117-0.2997 SNR = 50 dB

Dari tabel tersebut, dapat dianalisis bahwa terdapat beberapa iterasi yang menghasilkan jumlah simbol pilot yang sama, yaitu jumlah simbol pilot = 18, 8, dan 4. Saat jumlah simbol pilot 18, menghasilkan B_d estimasi = $1/18 = 0.0556$. Hasil ini terjadi saat f_d normalisasi 0.0437 dan 0.0757. Jumlah simbol pilot 8, menghasilkan B_d estimasi 0.125. Hasil ini terjadi saat f_d normalisasi 0.1077 dan 0.1397. Jumlah simbol pilot 4 terjadi saat f_d normalisasi 0.1717, 0.2037, 0.2357, 0.2667, dan 0.2997.

[7] Recommendation ITU-R M.1225, "Guidelines for evaluation of radio transmission technology for IMT-2000," Ch.1, 1997
 [8] K , Xu, "Project Report: Piece-wise Linear Models for ICI Reduction in OFDM Chnannel Estimation". 2003
 [9] G. Yuan, C. Wei, X. Tao, and L. Biqi, "Doppler Spread Estimation for NonRayleigh Fading Channel". IEEE "ICIEA", pp. 1106-1109, 2009

Tabel 5.
 Hasil untuk f_d normalisasi = 0.0117-0.2997 SNR = 50 dB

f_d Normalisasi	f_d (Hz)	B_d (Hz)	B_d Normalisasi	Jumlah Simbol Pilot	B_d Estimasi
0.0117	114.2578125	80.79247402	0.008273149	64	0.0156
0.0437	426.7578125	301.7633431	0.030900566	18	0.0556
0.0757	739.2578125	522.7342123	0.053527983	18	0.0556
0.1077	1051.757813	743.7050814	0.0761554	8	0.125
0.1397	1364.257813	964.6759505	0.098782817	8	0.125
0.1717	1676.757813	1185.64682	0.121410234	4	0.25
0.2037	1989.257813	1406.617689	0.144037651	4	0.25
0.2357	2301.757813	1627.588558	0.166665068	4	0.25
0.2677	2614.257813	1848.559427	0.189292485	4	0.25
0.2997	2926.757813	2069.530296	0.211919902	4	0.25

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi dan analisis, dapat diambil beberapa kesimpulan bahwa semakin besar *doppler spread*, semakin kecil jumlah simbol pilot yang dibutuhkan untuk membentuk satu lingkaran pada diagram konstelasi, dan sebaliknya. Rentang nilai *doppler spread* yang bisa diestimasi adalah 0.0117-0.2997. Untuk rentang SNR 10-30 dB, besarnya *error* adalah $\pm 64.72\%$, sedangkan untuk rentang SNR 40-80 dB, besarnya *error* adalah $\pm 35.81\%$. Jadi untuk *error* yang sama, tampak bahwa rentang nilai *Doppler Spread* pada SNR 10-30 dB lebih rendah daripada pada SNR 40-80 dB. Selain itu, Pada estimasi modifikasi, pembagian wilayah (range) yang semakin kecil akan menghasilkan tingkat akurasi estimasi yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] R. Prasad, "OFDM for Wireless Communication Systems". Artech House, 2004
 [2] X. Xiao, T. Peng, and M. Yang, "Doppler Spread Estimation by Subspace Tracking for OFDM Systems " IEEE GLOBECOM. Consum. Electron., vol. 48, pp. 4432-4436, August 2008.
 [3] B . Sklar, "Digital Communications : Fundamentals and Aplications. 2nd Edition". Prentice Hall International Inc, 2001
 [4] T. Yucek, R. Tannious, and H. Arslan, "Doppler Spread Estimation for Wireless OFDM Systems," in IEEE/Sarnoff Symposium on Advances in Wired and Wireless Communication, 2005, pp. 233-236
 [5] K. G. Vijay, "Wireless and Personal Communication Systems".Prentice-Hall, 1996
 [6] C. S. Patel, "Wireless Channel Modelling simulation and Estimation", A Thesis , Ch.2 . 2006