

## KINERJA EKUALISER KALMAN DALAM SISTEM GSM

Oleh :  
F. Agus Priambodo<sup>1</sup>

**Abstrak** : Dewasa ini, sistem GSM banyak beroperasi dalam daerah terdistorsi, sehingga kebutuhan akan ekualiser menjadi mutlak. Jenis ekualiser *Zero Forcing* yang dikendalikan oleh estimator kanal berbasis data adalah jenis ekualiser yang banyak digunakan. Ekualiser Kalman dicoba diterapkan untuk memperbaiki kinerja ekualiser *Zero Forcing*, dalam hal Mean Squared Error (MSE).

Kanal dimodelkan sebagai kanal *multipath fading* menurut model kanal Jake, disusun dalam bentuk *tapped delay line* berdasarkan *power delay profile* hasil pengukuran. Model estimator kanal berbasis data menggunakan urutan training yang dikirimkan pada setiap frame, dengan struktur frame GSM. Ekualiser dimodelkan sebagai ekualiser *zero-forcing* yang dikendalikan oleh estimator kanal dan ekualiser Kalman bentuk langsung.

Ekualiser *zero forcing* yang menggunakan estimator kanal berbasis data sebagai pengatur tap (ZF+DBCE) dan ekualiser Kalman memiliki kinerja yang hampir berimbang dalam model kanal *flat fading* yang terdistorsi ringan, dengan perbaikan MSE sekitar 18 dB. Ekualiser Kalman bentuk langsung memiliki kinerja lebih baik dalam model kanal yang terdistorsi sedang sampai berat, seperti dalam kanal *frequency selective fading*, dengan perbaikan MSE sekitar 34 dB. Secara umum, ekualiser Kalman memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan ekualiser ZF+DBCE. Dalam kanal yang terdistorsi sangat parah, kedua macam ekualiser tidak dapat memperbaiki sinyal yang rusak akibat distorsi.

**Kata Kunci** : Ekualiser, Kalman, Kanal Multipath Fading, Sistem GSM.

### PENDAHULUAN

Sistem GSM (Global System for Mobile Telecommunication) dirancang untuk beroperasi di daerah perkotaan. Sinyal akan banyak mengalami perubahan dan gangguan dalam hal amplitudo, fase atau

---

<sup>1</sup>Dosen tetap Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang.

frekuensinya yang disebut sebagai *fading*<sup>[1]</sup>. Kanal radio di daerah perkotaan seperti di atas, dimodelkan sebagai kanal *multipath*, di mana sinyal yang dikirimkan akan diterima oleh penerima melalui beberapa jalur propagasi dengan fase dan amplitudo yang bervariasi. Kejadian inilah yang mengakibatkan gangguan dalam hal amplitudo, fase atau frekuensi dan disebut dengan *multipath fading*, atau disebut juga dengan distorsi.

Agar komunikasi dapat berjalan dengan baik, distorsi mutlak harus ditekan. Distorsi yang terlalu besar mengakibatkan komunikasi digital menjadi tidak memenuhi syarat, karena akan terjadi banyak sekali kesalahan bit. Sesuai dengan karakteristik modulasi dan sinyal GSM, ekualiser menjadi pilihan yang paling masuk akal. Sistem GSM menyediakan urutan-urutan bit training yang dikirimkan secara rutin. Bit training ini diletakkan di tengah setiap timeslot.

Fungsi utama dari bit training adalah untuk melakukan estimasi kanal, yang merupakan suatu proses untuk mengetahui karakteristik kanal berdasarkan data masukan tertentu. Karakteristik kanal yang diberikan adalah bentuk matematis dari proses yang sebenarnya terjadi dalam komunikasi *wireless*. Salah satu metode estimasi kanal adalah estimasi kanal berbasis data (*Data Based Channel Estimation* atau disingkat dengan *DBCE*)<sup>[2]</sup>. Model kanal ini kemudian digunakan untuk mengatur tap ekualiser. Skema ekualiser Zero Forcing yang diatur oleh estimator kanal merupakan skema ekualiser yang umum digunakan karena mudah dan relatif sederhana.

Masalah yang muncul adalah bagaimana menjaga akurasi estimasi kanal berbasis data tanpa harus menambah panjang urutan training yang dikirimkan. Algoritma Kalman, dicoba untuk diadaptasi menjadi ekualiser Kalman, yang diaplikasikan dalam sistem GSM.

Permasalahan yang dirumuskan adalah membuat suatu model ekualiser dalam kanal radio bergerak, berupa kanal *Rayleigh Fading* skala kecil yang mengalami *Doppler Spread*. Parameter model kanal dan estimator kanal menggunakan standar yang digunakan dalam sistem GSM. Selanjutnya dilakukan simulasi untuk membandingkan unjuk kerja model tersebut dengan unjuk kerja *equalizer zero forcing* dalam hal *Mean Squared Error* (MSE).

## TINJAUAN PUSTAKA

### Model Kanal *Multipath Fading*

Dalam sistem komunikasi radio, banyak lintasan yang mungkin dilewati sinyal dari pemancar ke penerima. Komponen-komponen sinyal

<sup>[1]</sup> Rappaport, Theodore S. (1996) *Wireless Communications, Principles & Practice*. Hal. 139

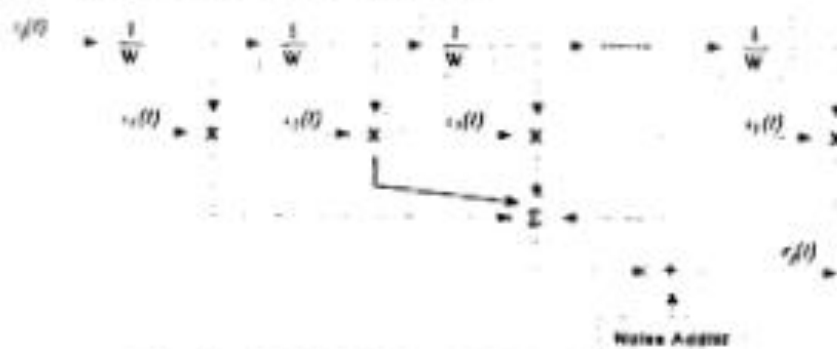
<sup>[2]</sup> *Ibid.* Hal 2786

dipantulkan oleh tanah atau obyek lain di antara pemancar dan penerima, melalui lintasan yang berbeda dan bergabung di penerima. Masing-masing lintasan memiliki panjang yang berbeda, yang mengakibatkan *delay* transmisi yang berbeda pula. Kondisi kanal akan berubah dari waktu ke waktu, dan mengakibatkan perubahan sinyal, disebut sebagai *multipath fading*.

Respons impuls kanal multipath fading yang berubah terhadap waktu adalah

$$\tilde{h}(\tau; t) = \sum_n a_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} \delta(t - \tau_n(t)) \quad (1)$$

di mana  $\tilde{h}(\tau; t)$  menunjukkan respons kanal pada waktu  $t$  terhadap sebuah impuls yang diberikan pada waktu  $t - \tau$ . Jika jumlah lintasan propagasi sinyal sangat banyak,  $\tilde{h}(\tau; t)$  dapat dimodelkan sebagai proses Gaussian kompleks, dengan envelop  $|\tilde{h}(\tau; t)|$  yang terdistribusi Rayleigh, sehingga disebut sebagai kanal Rayleigh *Fading*. Respons kanal dapat dimodelkan sebagai *tapped delay line* seperti dalam Gambar 1.



Gambar 1. Model Kanal *Multipath Fading*

#### Model Kanal Radio Bergerak Jake

Model kanal Jake menggambarkan karakteristik statistik medan elektromagnetik sinyal yang diterima oleh pengguna bergerak dalam area skala kecil. Dengan asumsi antenna polarisasi vertikal, *omnidirectional*, medan datang pada antenna *mobile* terdiri dari sembarang fase dan sudut datang, tetapi memiliki amplitudo rata-rata yang sama. Untuk lintasan ke  $n$  pergeseran Doppler  $f_d$  didefinisikan sebagai

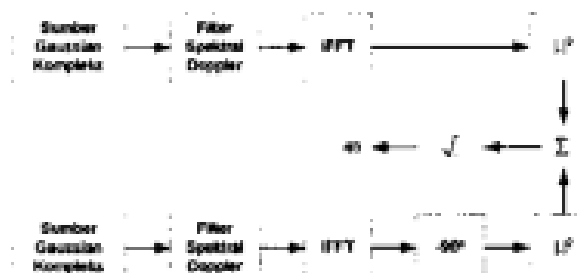
$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos(\alpha_n) \quad (2)$$

kecepatan kendaraan  $v$ , panjang gelombang pembawa  $\lambda$  dengan sudut kedatangan  $\alpha$ . Dengan asumsi bahwa medan listrik yang diterima merupakan penjumlahan gelombang datang dengan sudut kedatangan yang terdistribusi uniform antara  $(0, \pi)$ , gain antenna adalah  $G(\alpha)$ , daya sinyal pada sudut antara

$\alpha$  dan  $\alpha+d\alpha$  dinotasikan sebagai  $p(\alpha)d\alpha$ , dan adalah daya rata-rata yang diterima (kasus antena isotropik), maka spektrum daya model kanal Jake  $S(f)$  dapat dituliskan sebagai :

$$S(f) = \frac{A(G(\alpha)p(\alpha) + G(-\alpha)p(-\alpha))}{f_m \sqrt{1 - \left(\frac{f - f_c}{f_m}\right)^2}} \quad (3)$$

Persamaan 5 digunakan sebagai filter spektral, yang menghasilkan sinyal dengan spektrum Jake dalam domain frekuensi. Blok diagram simulasi ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 2. Simulator Kanal Jake pada *Baseband*

### Estimator Kanal Berbasis Data

Estimator berbasis data menggunakan urutan *training* yang dikirimkan melalui kanal untuk melakukan estimasi terhadap respons impuls dari kanal. Algoritma estimasi kanal berbasis data diturunkan berdasarkan kriteria optimisasi *Linear Minimum Mean Squared Error* (LMMSE). Diasumsikan saat pengiriman urutan *training* kanal tidak mengalami perubahan. Dalam bentuk vektor, urutan *training* sepanjang  $M$  yang dikirimkan dan respons kanal masing-masing adalah:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= [x_0, x_1, x_2, \dots, x_{M-1}] \rightarrow \\ \bar{h} &= [\tilde{h}_0, \tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_{L-1}] \end{aligned} \quad (4)$$

di mana  $L$  menunjukkan panjang dari respons impuls kanal (jumlah proses yang diamati). Sinyal yang diterima sekarang merupakan penjumlahan konvolusi dari sinyal yang dikirim dan respons impuls saat diterima, ditambah dengan *noise* kanal, dengan persamaan

$$\bar{Y} = \bar{X}\bar{h} + \bar{n}_c \quad (5)$$

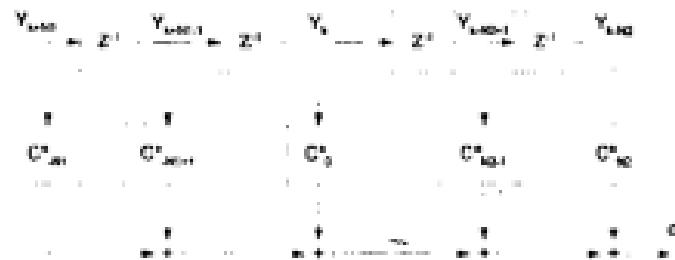
Penyelesaian regresi linear berganda untuk mencari nilai  $\bar{h}$  mendapatkan :

$$\hat{\bar{h}} = (\bar{X}^T \bar{X})^{-1} (\bar{X}^T \bar{Y}) \quad (6)$$

di mana  $\hat{\bar{h}}$  menunjukkan estimasi respons impuls kanal.

**Ekuwaliser transversal linear (LTE)**

Struktur LTE secara umum LTE merupakan filter FIR dalam bentuk *tapped delay line* terbobot dengan masing-masing *tap* dipisahkan sejauh satu periode simbol  $T_s$ , ditunjukkan dalam Gambar 4.



Gambar 3. Struktur Ekuwaliser LTE

Keluaran filter dituliskan sebagai

$$\bar{d}_k = \sum_{n=-N_1}^{N_2} (C_n^*) y_{k-n} \tag{7}$$

Dengan  $\bar{d}_k$  sebagai output ke-k,  $C_n$  sebagai pembobot *tap* atau koefisien filter dengan masukan  $y$ .

**Ekuwaliser Zero Forcing**

Distorsi puncak didefinisikan sebagai ISI terburuk yang muncul pada keluaran filter. ISI dapat dihilangkan secara lengkap apabila fungsi transfer ekuwaliser merupakan kebalikan dari fungsi transfer kanal. Ekuwaliser jenis ini disebut sebagai ekuwaliser *zero forcing*. Respons impuls kanal hasil estimasi dapat digunakan untuk membentuk ekuwaliser *zero forcing*

**Ekuwaliser Kalman**

Algoritma rekursif diterapkan dalam proses ekuwalisasi, dalam bentuk ekuwaliser Kalman yang berbasis pada kriteria optimisasi *Least Square*. Keluaran ekuwaliser LTE dalam Gambar 3 dapat dituliskan sebagai :

$$y_N(t) = \sum_{j=0}^{N-1} c_j(t-1)y(t-j) = C_N^T(t-1)Y_N(t) \tag{8}$$

di mana :

- $C_N(t-1)$  adalah vektor kolom koefisien *tap*
- $Y_N(t)$  mewakili vektor kolom dari masukan ekuwaliser

Kriteria optimisasi *Least Square* yang digunakan :

$$\xi_N^{LS} = \sum_{n=0}^L w^{-n} |e_N(n,t)|^2 \tag{9}$$

di mana  $w$  menunjukkan faktor pembobot, bernilai  $0 < w < 1$ , dan kesalahan  $e_N(n,t)$  didefinisikan sebagai

$$e_N(n,t) = I(n) - C_N^T Y_N(n) \quad (10)$$

di mana  $I(n)$  menunjukkan sinyal yang diinginkan. Solusi untuk meminimalkan kesalahan *Least Square*  $\xi_N^{LS}$  dengan memperhatikan vektor koefisien *tap*  $C_N(t)$  menghasilkan persamaan linear:

$$R_N(t) C_N(t) = D_N(t) \quad (11)$$

di mana  $R_N(t)$  merupakan matriks korelasi sinyal masukan ekualiser dan  $D_N(t)$  merupakan vektor korelasi silang antara masukan ekualiser dengan sinyal yang diinginkan.  $C_N(t)$  merupakan koefisien *tap* optimal.

### Algoritma Kalman

Matriks korelasi sinyal dapat dituliskan sebagai

$$R_N(t) = w R_N(t-1) + Y_N^T(t) Y_N(t) \quad (11)$$

di mana  $w$  menunjukkan faktor pembobot. Persamaan 25 merupakan persamaan *time-update*.

Kebalikan matriks  $R_N(t)$  dapat dituliskan sebagai :

$$R_N^{-1}(t) = \frac{1}{w} \left[ R_N^{-1}(t-1) - \frac{R_N^{-1}(t-1) Y_N^T(t) Y_N(t) R_N^{-1}(t-1)}{w + Y_N^T(t) R_N^{-1}(t-1) Y_N(t)} \right] \quad (12)$$

Dengan mendefinisikan  $P_N(t) = R_N^{-1}(t)$  didapatkan persamaan *Kalman Gain*

$$K_N(t) = \frac{1}{w + \mu_N(t)} P_N(t-1) Y_N^T(t) \quad (13)$$

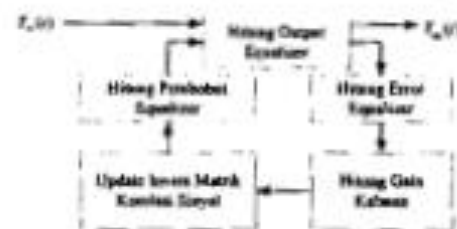
di mana  $\mu_N(t)$  adalah :

$$\mu_N(t) = Y_N^T(t) P_N(t-1) Y_N(t) \quad (14)$$

persamaan update koefisien *tap* ekualiser adalah

$$C_N(t) = C_N(t-1) + K_N(t) e_N(t) \quad (15)$$

di mana  $e_N(t) = I(n) - y_{eq}(t)$  merupakan kesalahan yang muncul pada waktu  $t$ . Algoritma ekualiser Kalman secara garis besar ditunjukkan dalam Gambar 7.



Gambar 4. Algoritma Ekualiser Kalman

### MODEL SIMULASI SISTEM

Blok diagram simulasi sistem yang dilakukan ditunjukkan dalam Gambar 5.



Gambar 5. Blok Diagram Simulasi Sistem

### Pemodelan Pembangkitan Sinyal

Data biner disimulasikan dalam bentuk *frame*, yang terdiri dari bit-bit training dan bit-bit data, dengan parameter-parameter :

1. Panjang *frame* adalah 156 bit, terdiri dari 26 bit training dan 130 bit data (diadopsi dari bentuk *frame* pada sistem GSM).<sup>[19]</sup>
2. Jumlah sampling simulasi adalah 8 sampling untuk setiap bit
3. Modulasi digital yang dipakai adalah BPSK pada baseband.
4. Filter pembentuk pulsa yang dipakai adalah filter *Raised Cosine*,

### Pemodelan Kanal

Dibangkitkan 2 macam kanal, yaitu Jake satu lintasan dan *multipath fading*. Dalam kanal Jake satu lintasan, digunakan asumsi-asumsi untuk model kanal yang mengalami pergeseran Doppler dengan frekuensi tertentu, sehingga respons kanal adalah berubah terhadap waktu (*time variant*). Efek Rayleigh *fading* terhadap sinyal masukan diperoleh dari hasil perkalian antara sinyal masukan dan keluaran simulator Rayleigh *fading*.

Model kanal *multipath fading* disusun dalam bentuk *Tapped Delay Line* (TDL), dengan jumlah dan spasi *tap* diambil dari sampel PDP, dan keluaran simulator Rayleigh *Fading* sebagai pengatur koefisien *tap*. Dalam simulasi, sampel pengukuran PDP yang dipakai adalah dalam bentuk *bin*, di mana spasi bin langsung digunakan sebagai spasi antar *tap* dalam model TDL untuk kanal *multipath fading*.

<sup>[19]</sup> Rappaport, Theodore S. (1996). *Wireless Communications Principles & Practice*. Hal. 514

### Pemodelan Estimator Kanal

Model estimator kanal berbasis data menggunakan sinyal yang telah melewati kanal secara langsung untuk melakukan estimasi, diasumsikan hanya bekerja pada saat bit-bit urutan *training* dikirimkan.

Ekuwaliser Kalman diasumsikan bekerja pada saat mode *training* maupun pada mode tracking, dan tidak ada waktu tunda yang terjadi saat estimator kanal mengubah koefisien *tap* ekuwaliser yang digunakan. Sinyal yang diterima dicuplik dengan laju sama dengan laju simbol, pada waktu sampling yang optimum.

### Pemodelan Ekuwaliser

Model ekuwaliser *zero forcing* dibuat dengan koefisien *tap* diambilkan langsung dari respons impuls kanal. Spasi antar *tap* dibuat sebesar interval simbol  $T_s$  (*symbol-spaced equalizer*), panjang *tap* sama dengan panjang respons impuls kanal hasil estimasi, menghasilkan koefisien pembobot *tap* ekuwaliser. Model ekuwaliser Kalman dibuat dalam bentuk filter FIR dengan koefisien *tap* yang dapat diatur. Spasi antar *tap* dibuat sebesar interval simbol  $T$

### Simulasi Estimator Kanal

Simulasi dilakukan menggunakan software Matlab versi 6 beserta *toolbox comm*. Asumsi yang digunakan dalam simulasi adalah :

1. Hubungan radio point-to-point.
2. Urutan *training* dikirimkan dalam setiap *frame* untuk menghasilkan estimasi berbasis data
3. *Noise* yang muncul berdistribusi Gaussian

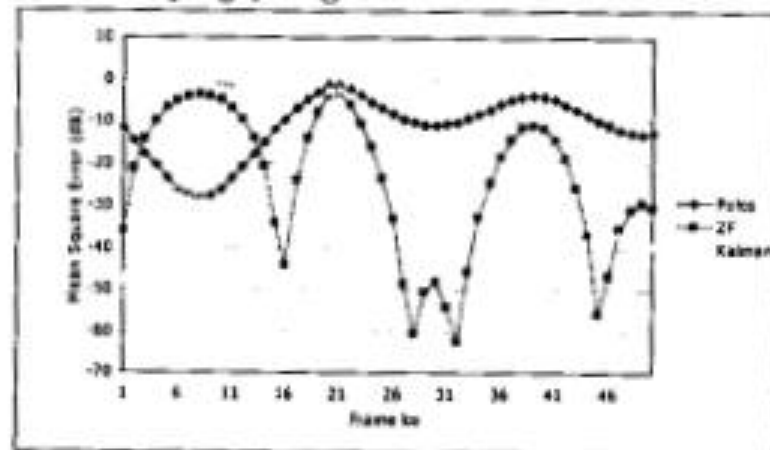
Simulasi dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja estimator kanal berbasis data dalam hal ketepatan estimasi. Dalam simulasi ini digunakan sampel respons impuls kanal  $h(n)$  yang sudah ditentukan sebelumnya (mengambil contoh respons kanal *Raised Cosine*). Berdasarkan 10000 kali simulasi estimasi pada  $E_b/N_0$  sebesar 15 db didapatkan nilai MSE estimasi kanal berbasis data sebesar -56,3292 dB, suatu nilai yang sangat kecil dan memenuhi syarat.

### Simulasi Untuk Kanal Rayleigh *Fading* Satu Lintasan

Simulasi dalam model kanal Rayleigh *fading* satu lintasan dilakukan untuk menguji model sistem yang dibuat, sebelum diimplementasikan ke dalam model kanal yang lebih kompleks (kanal *multipath fading*). Dalam kasus ini estimasi kanal diimplementasikan dalam sistem yang berubah terhadap waktu (*time variant*).



Dalam model kanal Rayleigh *fading* satu lintasan, sumber gangguan terhadap sinyal adalah munculnya noise additif dalam kanal dan perubahan penguatan sinyal oleh kanal akibat efek *fading* Rayleigh. Berdasarkan pengamatan terhadap *snapshot* sinyal yang dikirimkan dan keluaran ekuwaliser, dapat disimpulkan bahwa estimator kanal dapat melakukan *tracking* terhadap sinyal yang dikirimkan. Ekuwaliser Kalman juga dapat melakukan ekualisasi, di mana untuk kondisi tanpa distorsi, ekuwaliser Kalman bentuk langsung bekerja untuk mengurangi pengaruh perubahan penguatan sinyal akibat efek Rayleigh *fading*.



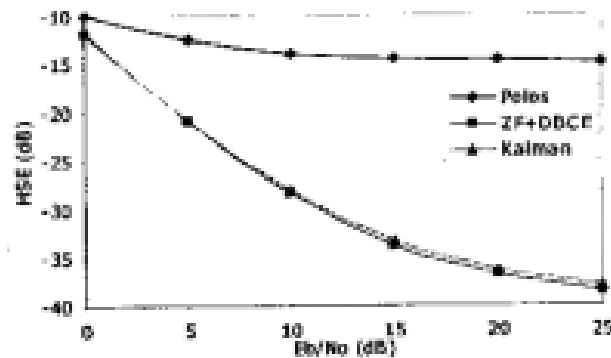
Gambar 6. Pengamatan MSE untuk Kanal Jake *Single Ray*

Berdasarkan pengamatan MSE yang terjadi untuk 1 juta frame bangkitan pada nilai  $E_b/N_0$  sebesar 25 dB, didapatkan nilai MSE rata-rata untuk sinyal tanpa ekualisasi sebesar -20.8850 dB. Proses ekualisasi menggunakan ekuwaliser ZF menunjukkan MSE rata-rata sebesar -35.6182 dB. Proses ekualisasi menggunakan ekuwaliser Kalman menunjukkan MSE rata-rata sebesar -35.7551 dB. Proses ekualisasi dapat memberikan perbaikan MSE sebesar 15,5 dB sampai 21,4 dB terhadap sinyal tanpa proses ekualisasi.

#### Simulasi Untuk Model Kanal Dalam Ruang (*INDOOR*)

Simulasi dalam model kanal *indoor* dilakukan menggunakan contoh hasil pengukuran *power delay profile* di dalam sebuah gedung, untuk sistem wireless LAN.

Perbandingan antara *rms delay spread* dan periode simbol adalah sebesar 0,315. Dapat ditunjukkan bahwa dalam model kanal *indoor*, sinyal mengalami *flat fading*, karena *rms delay spread* lebih kecil dibandingkan dengan periode simbol.



**Gambar 7. Pengamatan MSE untuk Kanal Indoor.**

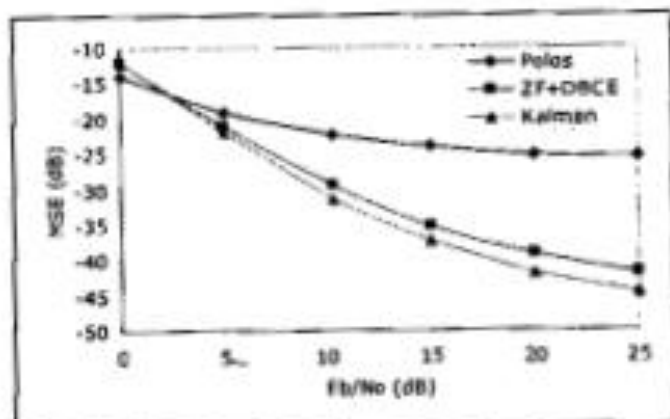
Berdasarkan pengamatan terhadap *snapshot* sinyal yang dikirimkan dan keluaran ekualiser, dapat disimpulkan bahwa estimator kanal dapat melakukan *tracking* terhadap sinyal yang dikirimkan. Demikian halnya dengan filter Kalman sebagai filter untuk meminimalkan noise dapat bekerja dengan baik. Ekualiser Kalman bentuk langsung juga dapat melakukan ekualisasi. Gambar 4.6. menunjukkan pengamatan MSE untuk kanal Indoor. Berdasarkan pengamatan MSE yang terjadi untuk 10000 frame pada nilai Eb/No sebesar 25 dB, didapatkan nilai MSE rata-rata untuk sinyal tanpa ekualisasi sebesar -15.0964 dB. Proses ekualisasi menggunakan respons impuls kanal hasil estimasi kanal berbasis data menunjukkan kinerja yang lebih baik dengan MSE rata-rata sebesar -38.4488 dB dibandingkan dengan proses ekualisasi menggunakan ekualiser Kalman bentuk langsung dengan MSE rata-rata sebesar -38.0385 dB. Proses ekualisasi dapat memberikan perbaikan MSE sebesar sekitar 23 dB.

#### Simulasi Untuk Model Kanal Luar Kota (*RURAL*)

Simulasi dalam model kanal *rural* dilakukan menggunakan hasil pengukuran *power delay profile* sistem GSM untuk daerah pedesaan. Dalam model kanal *rural*, sumber gangguan terhadap sinyal adalah munculnya noise additif dalam kanal dan distorsi akibat *multipath fading*. Nilai *rms delay spread* didapatkan sebesar 124,355 ns dan periode simbol sebesar 4  $\mu$ s. Perbandingan antara *rms delay spread* dan periode simbol adalah sebesar 0,031. Dapat disimpulkan bahwa dalam model kanal *rural*, sinyal mengalami *flat fading*, karena *rms delay spread* lebih kecil dibandingkan dengan periode simbol.

Berdasarkan pengamatan terhadap *snapshot* sinyal yang dikirimkan dan keluaran ekualiser, dapat disimpulkan bahwa estimator kanal dapat melakukan *tracking* terhadap sinyal yang dikirimkan. Demikian halnya dengan filter Kalman sebagai filter untuk meminimalkan noise dapat bekerja

dengan baik. Ekuwaliser Kalman bentuk langsung juga dapat melakukan ekualisasi.



Gambar 8. Pengamatan MSE untuk Kanal Rural.

Berdasarkan pengamatan MSE yang terjadi untuk 10000 frame pada nilai  $E_b/N_0$  sebesar 25 dB, yang ditunjukkan dalam Gambar 4.8. didapatkan nilai MSE rata-rata untuk sinyal tanpa ekualisasi sebesar -25.7575 dB. Proses ekualisasi menggunakan respons impuls kanal hasil estimasi kanal berbasis data menunjukkan MSE rata-rata sebesar -43.4284 dB. Proses ekualisasi menggunakan ekualiser Kalman bentuk langsung menunjukkan MSE rata-rata yang lebih baik, yaitu sebesar -46.0118 dB. Proses ekualisasi menggunakan respons impuls kanal hasil estimasi kanal berbasis data yang sebelumnya disaring dengan filter Kalman skalar tidak menunjukkan perbaikan kinerja yang berarti jika dibandingkan dengan tanpa menggunakan filter Kalman, dengan MSE rata-rata sebesar -43.3869 dB.

#### Simulasi Untuk Model Kanal Perkotaan (URBAN)

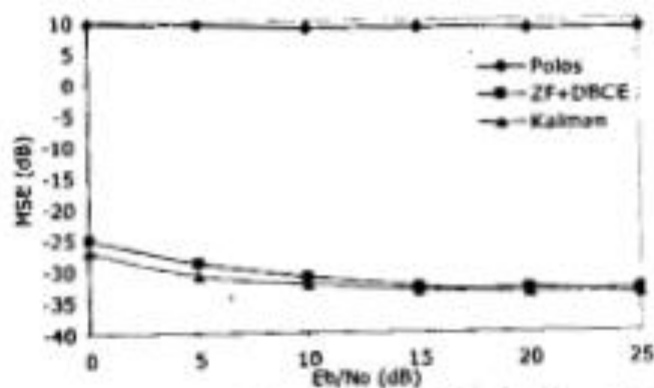
Simulasi dalam model kanal *Urban* dilakukan menggunakan hasil pengukuran *power delay profile* sistem GSM untuk daerah perkotaan secara tipikal. Dalam model kanal *urban*, sumber gangguan terhadap sinyal adalah munculnya noise additif dalam kanal dan distorsi akibat *multipath fading*.

Nilai *rms delay spread* didapatkan sebesar 1,246  $\mu\text{s}$  dan periode simbol sebesar 4  $\mu\text{s}$ . Perbandingan antara *rms delay spread* dan periode simbol adalah sebesar 0,3115. Dapat disimpulkan bahwa dalam model kanal *urban*, sinyal mengalami *flat fading*, karena *rms delay spread* lebih kecil dibandingkan dengan periode simbol.

Berdasarkan pengamatan terhadap *snapshot* sinyal yang dikirimkan dan keluaran ekualiser, dapat disimpulkan bahwa estimator kanal dapat melakukan *tracking* terhadap sinyal yang dikirimkan. Demikian halnya dengan filter Kalman sebagai filter untuk meminimalkan noise dapat bekerja

dengan baik. Ekuwaliser Kalman bentuk langsung juga dapat melakukan ekuwalisasi.

Berdasarkan pengamatan MSE yang terjadi untuk 10000 frame yang ditunjukkan dalam Gambar 4.10, pada nilai  $E_b/N_0$  sebesar 25 dB, didapatkan nilai MSE rata-rata untuk sinyal tanpa ekuwalisasi sebesar 9.0186 dB. Proses ekuwalisasi menggunakan respons impuls kanal hasil estimasi kanal berbasis data menunjukkan kinerja yang lebih buruk, dengan MSE rata-rata sebesar -33.2152 dB jika dibandingkan dengan proses ekuwalisasi menggunakan ekuwaliser Kalman bentuk langsung dengan MSE rata-rata sebesar -33.8862 dB. Proses ekuwalisasi menggunakan respons impuls kanal hasil estimasi kanal berbasis data yang sebelumnya disaring dengan filter Kalman skalar menunjukkan perbaikan kinerja jika dibandingkan dengan tanpa menggunakan filter Kalman, dengan MSE rata-rata sebesar -33.5269 dB.



Gambar 9. Pengamatan MSE untuk Kanal Urban Tipikal.

#### Simulasi Untuk Model Kanal Perkotaan (Kasus Terburuk)

Simulasi dalam model kanal *urban worst case* dilakukan menggunakan hasil pengukuran *power delay profile* sistem GSM untuk daerah perkotaan pada suatu kasus yang terburuk. Dalam model kanal *urban* untuk kasus *fading* terburuk, sumber gangguan terhadap sinyal adalah munculnya noise additif dalam kanal dan distorsi akibat *multipath fading*.

Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai *rms delay spread* sebesar 16,33  $\mu$ s dan periode simbol sebesar 4  $\mu$ s. Perbandingan antara *rms delay spread* dan periode simbol adalah sebesar 4,085. Dapat disimpulkan bahwa dalam model kanal *urban* untuk kondisi terburuk, sinyal mengalami *frequency-selective fading*, karena *rms delay spread* lebih besar dibandingkan dengan periode simbol. Berdasarkan pengamatan terhadap *snapshot* sinyal yang dikirimkan dan sinyal keluaran ekuwaliser, dengan laju bit sebesar 250 kbps, distorsi yang dialami oleh sinyal akibat pengaruh kanal terlalu parah

untuk dapat dianalisis. Simulasi dilanjutkan dengan mengubah laju bit menjadi 50 kbps (kasus 1).

Berdasarkan pengamatan *snapshot* sinyal yang dikirimkan, dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan unjuk kerja estimator kanal dalam melakukan estimasi dibandingkan dengan hasil simulasi untuk model kanal sebelumnya. Penggunaan filter Kalman sebagai filter peminimal noise juga tidak memberikan perbaikan kinerja. Ekuwaliser Kalman bentuk langsung dapat melakukan proses ekualisasi, meskipun banyak muncul kesalahan dalam proses ekualisasinya.

Berdasarkan pengamatan MSE untuk 10000 frame pada nilai Eb/No sebesar 12 dB, didapatkan nilai MSE rata-rata untuk sinyal tanpa ekualisasi sebesar 16,505 dB. Proses ekualisasi menggunakan respons impuls kanal hasil estimasi kanal berbasis data menunjukkan kinerja yang jauh lebih buruk (MSE rata-rata sebesar 214,9233 dB) dibandingkan dengan proses ekualisasi menggunakan ekuwaliser Kalman bentuk langsung (MSE rata-rata sebesar -17,9845 dB).

Berdasarkan pengamatan MSE yang terjadi untuk 10000 frame pada nilai Eb/No sebesar 12 dB, didapatkan nilai MSE rata-rata untuk sinyal tanpa ekualisasi sebesar 16,505 dB. Proses ekualisasi menggunakan respons impuls kanal hasil estimasi kanal berbasis data menunjukkan kinerja yang jauh lebih buruk (MSE rata-rata sebesar 11,6330 dB) dibandingkan dengan proses ekualisasi menggunakan ekuwaliser Kalman bentuk langsung (MSE rata-rata sebesar -18,3968 dB).

## ANALISIS

Secara umum ekuwaliser yang digunakan dalam simulasi di atas, yaitu ekuwaliser ZF+DBCE dan ekuwaliser Kalman, dapat mengeliminir beberapa akibat buruk dari distorsi sinyal. Meskipun demikian, untuk kondisi kanal berubah terhadap waktu, ketika pada suatu saat distorsi menghilang, penggunaan ekuwaliser justru dapat mengurangi mutu sinyal (muncul error pada sinyal hasil replikasi).

Jika dilihat dari kinerjanya, ekuwaliser Kalman lebih baik daripada ekuwaliser adaptif ZF+DBCE. Ekuwaliser Kalman dapat bekerja untuk mengeliminir distorsi pada semua jenis kanal, baik flat fading maupun frequency-selective fading. Ekuwaliser ZF+DBCE hanya mampu menangani distorsi pada kanal flat fading. Meskipun demikian, untuk kanal yang terdistorsi sangat parah, ekuwaliser Kalman juga tidak mampu menangani noise secara sempurna. Sedangkan jika dilihat dari kinerja ekuwaliser dalam kanal flat fading, kedua ekuwaliser memiliki kinerja yang sangat berimbang.

Dilihat dari kerumitan perhitungan, ekuwaliser ZF jauh lebih sederhana dibandingkan dengan ekuwaliser Kalman. Demikian halnya jika dilihat dari

jumlah iterasi untuk tiap frame. Iterasi yang dilakukan dalam ekualiser Kalman jauh lebih banyak. Tetapi dalam implementasinya, ekualiser ZF mengalami keterbatasan, karena di dalamnya terdapat operasi invers matriks berukuran besar untuk dapat menghitung kovarian error. Akibatnya diperlukan buffer yang cukup besar pula untuk dapat menjalankannya. Ekualiser Kalman menggunakan metode rekursif dalam melakukan penghitungan kovarian error, sehingga memerlukan buffer yang lebih sedikit.

Secara keseluruhan, filter Kalman memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan filter ZF+DBCE.

### SIMPULAN

Berdasarkan pemodelan, simulasi dan analisis data hasil simulasi, beberapa kesimpulan yang dapat ditarik adalah bahwa Algoritma estimasi kanal berbasis data dapat diterapkan untuk melakukan estimasi respons impuls kanal dalam beberapa model kanal komunikasi radio bergerak.

Selain itu Ekualiser *Zero Forcing* yang menggunakan estimator kanal berbasis data sebagai pengatur tap dan ekualiser Kalman bentuk langsung dapat digunakan untuk mengurangi pengaruh ISI yang muncul dalam kanal. Jika dibandingkan dalam hal perbaikan MSE, ekualiser Kalman dan ekualiser *Zero Forcing* yang menggunakan estimator kanal berbasis data sebagai pengatur tap (ZF+DBCE) memiliki kinerja yang hampir seimbang dalam kanal *flat fading* yang terdistorsi ringan. Ekualiser Kalman bentuk langsung memiliki kinerja lebih baik dalam kanal dengan tingkat distorsi yang lebih parah, seperti dalam kanal *frequency selective fading*. Tetapi dalam kanal yang terdistorsi sangat parah, ekualiser *Zero Forcing* yang menggunakan estimator kanal berbasis data sebagai pengatur tap (ZF+DBCE) dan ekualiser Kalman bentuk langsung tidak dapat memperbaiki sinyal yang terdistorsi, meskipun daya sinyal diperbesar.

Untuk meningkatkan kualitas penelitian, beberapa hal yang dapat dilakukan antara diantaranya adalah bagaimana agar simulasi dilakukan dengan menggunakan bahasa pemrograman yang mempunyai running-time yang cepat (misalnya bahasa C) sehingga simulasi dapat dilakukan secara *real-time*. Selain itu dicoba digunakan skema modulasi *m-ary* sehingga simulasi lebih mewakili kondisi sistem telekomunikasi yang sebenarnya. Dapat juga dipikirkan penggunaan struktur algoritma Kalman yang lebih kompleks (misalnya *Self Learning Kalman Filter*) untuk mendapatkan hasil estimasi yang lebih presisi.

### DAFTAR PUSTAKA

- Akaiwa, Yoshihiko.(1997). *Introduction to Digital Mobile Communication*. John Wiley & Sons. Toronto

- Iliev, Georgi dan Kasabov, Nikola. *Channel Equalization Using Adaptive Filtering With Averaging*. University of Otago, Dunedin, NZ
- Jeruchim, Michel. Balaban, Philip. Shanmugan, Sam. (1992). *Simulation of Communication System*. Plenum Press. New York. USA
- John G. Proakis. (1995). *Digital Communication*. Third Edition. Mc Graw Hill. Singapore.
- Ramasami, Vijaya. *Fractionally Spaced, Kalman And Lattice Equalizers*. EECS 862 Report.
- Rappaport, Theodore S. (1996). *Wireless Communications Principles & Practice*. Prentice-Hall Inc. New Jersey. USA
- Safaya, Rupul. (2000). *A Multipath Channel Estimation Algorithm using Kalman Filter*. Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Kansas, USA
- Shanmugan, K.S. Breipohl, Arthur.(1988). *Random Signals: Detection, Estimation and Data Analysis*. John Wiley & Sons. New York
- Siemons, J.J.W. (2000). *Measurement Based Indoor Channel Model*. Unclassified Report. © Koninklijke Philips Electronics N.V. Eindhoven