

ANALISIS KINERJA *WAVELET DOMAIN COMMUNICATION SYSTEM* (WDCS) UNTUK *COGNITIVE RADIO*

Rahmawati Amalia Kartini¹, A. Ali Muayyadi², Achmad Rizal³

^{1,2}Fakultas Pascasarjana, Institut Teknologi Telkom

^{2,3}Fakultas Elektro dan Komunikasi, Institut Teknologi Telkom

¹amalia.kartini.28@yahoo.com, ²alv@ittelkom.ac.id, ³arl@ittelkom.ac.id

Abstrak

Cognitive radio merupakan suatu sistem cerdas yang dapat menyadari kondisi lingkungan sekitarnya. Ide dasar *cognitive radio* yaitu untuk memanfaatkan spektrum secara efisien dalam lingkungan yang selalu berubah secara dinamis. *Wavelet Domain Communication System* (WDCS) yaitu, suatu sistem komunikasi nirkabel yang digunakan dalam *cognitive radio* yang menggunakan *wavelet* sebagai alat untuk melakukan estimasi spektrum dari lingkungan radio. WDCS melakukan estimasi spektrum dari kanal, dengan cara membagi kanal menjadi beberapa subkanal dan melakukan proses pengecekan kehadiran interferensi pada setiap subkanal. Pada penelitian ini, simulasi WDCS dilakukan beberapa kali dengan menggunakan variasi parameter yang berbeda, seperti jenis modulasi, jenis dekomposisi *wavelet*, serta jenis dan orde *wavelet* yang berbeda. Hasilnya dibandingkan dengan tujuan untuk mencari komponen-komponen sistem yang mempengaruhi performansi sistem. Selain itu, pada penelitian ini juga dibandingkan performansi antara sistem WDCS dengan sistem *Time Domain Communication System* (TDCS) pada kondisi dan parameter lingkungan yang sama. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa modulasi yang lebih baik digunakan adalah modulasi 4-CSK dibandingkan dengan modulasi BCSK, dengan perbedaan Eb/No sebesar 2 dB pada BER = 10⁻³. Untuk jenis dekomposisi, dekomposisi paket *wavelet* memberikan perbedaan performansi yang jauh lebih baik dibandingkan dengan dekomposisi *wavelet* biasa. Sedangkan jika dibandingkan dengan sistem TDCS, WDCS mampu melakukan perbaikan sebesar 9 dB.

Kata Kunci: WDCS, TDCS, *Cognitive Radio*, Transformasi *Wavelet*

Abstract

Cognitive radio is an intelligent wireless communication system that is aware of its surrounding environment. The basic idea of *cognitive radio* is efficient radio spectrum utilization in the environment that is changed dynamically. *Wavelet Domain Communication System* (WDCS) is one of wireless communication used in *cognitive radio* using *wavelet* transform as a tool to estimate the radio spectrum. WDCS estimates radio channel spectrum by splitting the channel into several sub-channels and checking the presence of interference on each sub-channels. In this study, WDCS model and simulations were performed several times using different parameters, such as: different types of modulation, different types of *wavelet* decomposition, and different types and order of *wavelet* families. The simulation results were compared to discover what components that affected system performance. Also, the performance of WDCS was compared with TDCS performance in the same parameters. The results of this research showed that selection of modulation could influence the performance of WDCS. Compared with WDCS-BCSK, WDCS with 4-CSK gave better results of 2 dB for 10⁻³ BER. From the simulation results, WDCS using Daubechies8 gave the best performance at 3 dB improvement compared with WDCS using Haar. And for the type of decomposition technique, WDCS by using packet *wavelet* decomposition gave much better performance than basic *wavelet* decomposition technique. At the same time, compared with TDCS, WDCS allowed improvement up to 9 dB.

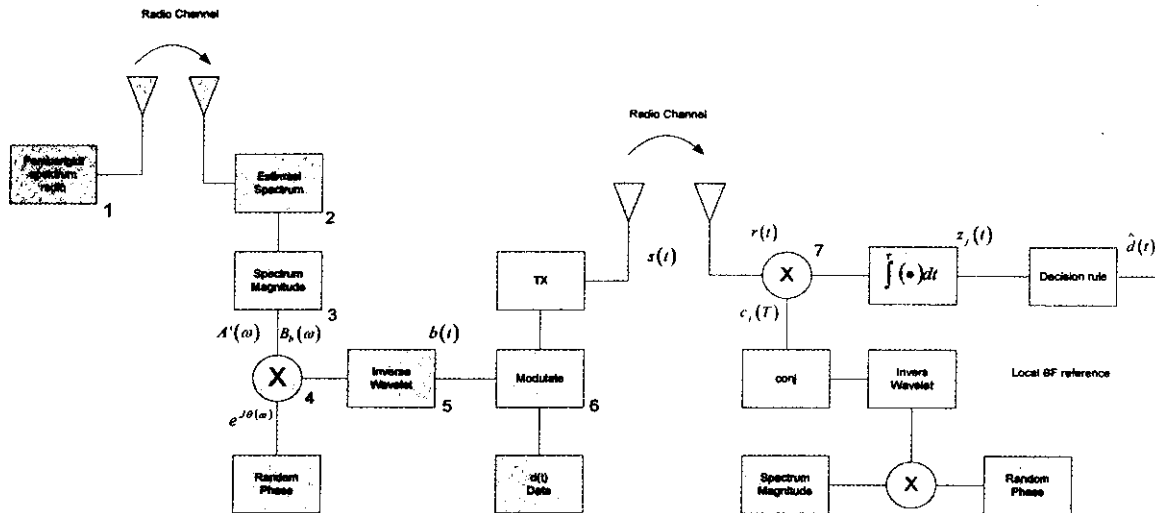
Keywords: WDCS, TDCS, *Cognitive Radio*, *Wavelet* Transform

1. Pendahuluan

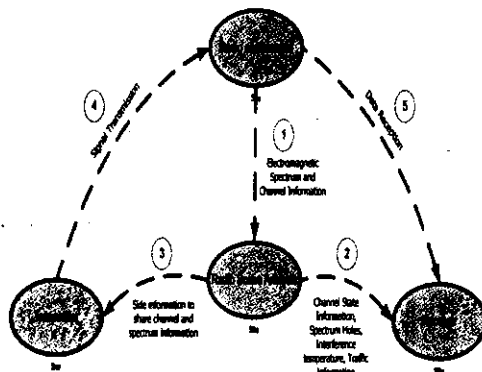
Spektrum frekuensi merupakan salah satu dari sumber daya alam yang terbatas, seperti halnya tanah dan air. Sebagian besar dari spektrum frekuensi sudah berlisensi, sehingga hanya ada sedikit ruang untuk menambahkan aplikasi baru. Namun, berdasarkan penelitian dan pengukuran, menunjukkan bahwa sebagian besar frekuensi

berlisensi tersebut, tidak diduduki secara terus menerus. Ini memperlihatkan bahwa penggunaan frekuensi radio belum optimal. Untuk itu dalam penggunaannya perlu diatur dan dikelola dengan baik guna memperoleh manfaat yang optimal [16].

Menurut I. Budiardjo pada tesisnya yang berjudul "*Adaptive Baseband Processing Techniques for Cognitive Radio Systems*" [2] dikatakan bahwa tiga tugas utama *cognitive radio*



Gambar 1. Diagram Blok Sistem WDCS



Gambar 2. Siklus Sinyal Transmisi pada Cognitive Radio [2]

seperti yang terlihat pada Gambar 2 adalah:

- kemampuan menganalisa kondisi radio,
- estimasi kanal dan prediksi model, serta
- pengontrolan daya pancar dan manajemen spektrum yang dinamis.

Salah satu kandidat dari *cognitive radio* adalah *Wavelet Domain Communication System* (WDCS). WDCS memanfaatkan kelebihan dari transformasi *wavelet* untuk melakukan estimasi spektral. Sistem ini dikembangkan untuk mengatasi kekurangan sistem komunikasi sebelumnya yaitu *Transform Domain Communication System* (TDCS), yang tidak dapat melakukan estimasi spektral pada lingkungan yang mengalami interferensi non-stationer.

Cognitive Radio (CR), merupakan salah satu teknologi yang diusulkan. Sistem komunikasi ini dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi lingkungan yang cepat dan juga dapat meminimalisasi interferensi.

Transformasi atau analisis *wavelet* memberikan solusi atas kelemahan transformasi Fourier tersebut. Persamaan transformasi *wavelet* (kontinu) dituliskan pada persamaan berikut ini [9]:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot g\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

dengan $g(t)$ sebagai sebuah fungsi jendela yang memiliki parameter dilatasi a atau faktor skala dan parameter translasi b atau faktor penggeser.

Penelitian ini membahas tentang sistem WDCS dan membandingkan kinerja BER-nya dengan sistem TDCS kemudian dianalisis untuk berbagai kanal, modulasi, dan keluarga *wavelet*.

2. Pemodelan Sistem

2.1 Pemodelan Sistem WDCS

Secara umum sistem ini dirancang untuk dapat menciptakan suatu sistem komunikasi yang dapat merasakan spektral lingkungan pada *bandwidth* yang *available* dan menggunakan spektrum di mana sistem komunikasi tersebut tidak menginterferensi pengguna yang mempunyai lisensi.

Pada bagian pengirim WDCS seperti yang terlihat pada Gambar 1 terdapat blok RSA yang menggunakan transformasi *wavelet* untuk membagi-bagi spektrum pada *bandwidth* yang *available* menjadi beberapa *subband*, dan melakukan identifikasi kanal yang akan mengidentifikasi kanal berdasarkan level interferensinya. Kanal yang terpilih tersebut akan diberi fasa acak dan dilakukan *inverse wavelet* untuk mendapatkan fungsi basis dalam kawasan waktu $b(t)$ yang kemudian akan dimodulasikan menggunakan *mapper 4-ary CSK*.

Pada bagian penerima akan dibangkitkan lokal FMW untuk mendapatkan informasi tentang fungsi basis yang digunakan untuk memodulasikan sinyal. Tahapan pertama pada sistem penerima WDCS yaitu sinyal $r(t)$ dikorelasikan dengan konjugasi dari 4 simbol referensi yang dibangkitkan secara lokal ($c_s(t)$) secara paralel. Setelah melakukan

korelasi, pada blok *integrator* akan mengintegrasikan sinyal input sepanjang periode simbolnya. Proses terakhir adalah memutuskan antara keluaran bit 00, 01, 11, atau 10 pada blok *decision rule* berdasarkan perbandingan nilai maksimum hasil keluaran blok integrator.

2.2 Radio Scene Analysis dan Identifikasi Kanal

2.2.1 Radio Scene Analysis (RSA) [5]

RSA adalah kemampuan sistem untuk menganalisa kondisi lingkungan radionya. Ruang lingkup *Radio Scene Analysis* meliputi:

- mendeteksi kondisi spektrum yang kosong atau kondisi spektrum yang terpakai oleh pengguna lain, dan
- mengestimasi kondisi interferensi dari lingkungan radionya.

Estimasi spektrum digunakan untuk menunjukkan daerah frekuensi mana yang mengandung interferensi atau frekuensi yang bebas interferensi. Estimasi spektral dalam WDCS dilakukan dengan melalui proses *filtering and decimating* sampel lingkungan elektromagnetik, atau disebut juga sebagai proses dekomposisi sinyal [2].

Pada penelitian ini akan dibandingkan penggunaan *wavelet* waktu diskrit dengan jenis dekomposisi yang berbeda, yaitu dekomposisi *wavelet* biasa dan dekomposisi paket *wavelet*. Seperti yang terlihat pada Gambar 3 pada dekomposisi *wavelet* biasa, suatu sinyal akan dipecah menjadi bagian aproksimasi dan detail, kemudian bagian aproksimasi ini dibagi lagi menjadi tingkat kedua aproksimasi dan detail yang akan diproses berulang dengan cara yang sama, namun menggunakan jendela filter yang lebih sempit. Maka dalam analisis paket *wavelet*, selain aproksimasi yang didekomposisi, bagian detail juga ikut didekomposisi lebih lanjut.

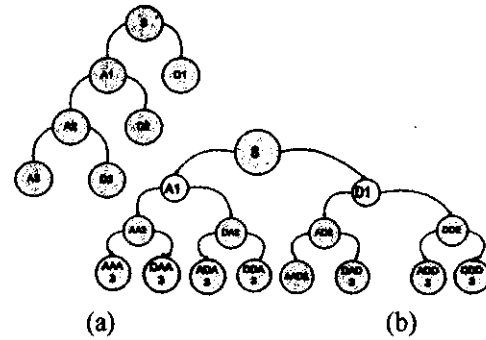
a. Metode Paket Wavelet

Gambar 3 (b) menunjukkan pohon dekomposisi penuh 3 tingkat, masing-masing simpul menyatakan suatu jangkauan frekuensi tertentu berdasarkan persamaan 2 [14].

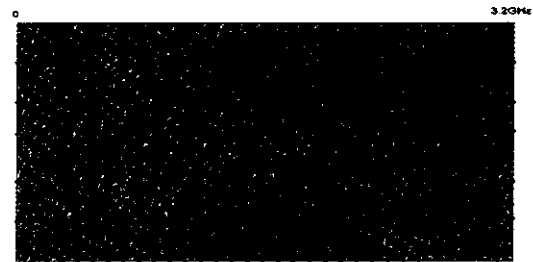
$$\text{simpul}(m, n) = \left[\frac{f_N}{2^m}, n \right] s.d. \left[\frac{f_N}{2^m}, (n+1) \right] \quad (2)$$

dengan m adalah jumlah tingkat dekomposisi, n adalah simpul ke- n dan f_N adalah frekuensi *Nyquist* atau frekuensi yang dialokasikan f_c . Sehingga, banyaknya jangkauan frekuensi yang dihasilkan tergantung jumlah tingkat dekomposisi, yaitu 2^m seperti pada Gambar 4.

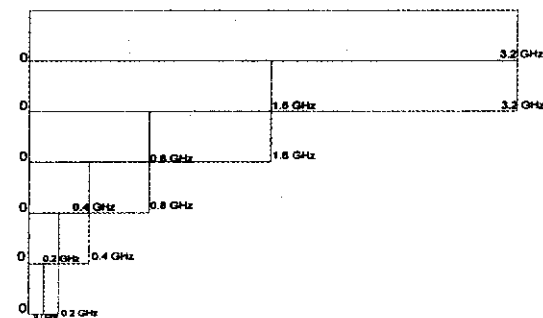
Adapun besarnya daya dari tiap *subband* dapat dihitung dengan persamaan berikut [14]:



Gambar 3. Dekomposisi *Wavelet* (a), dan Dekomposisi Paket *Wavelet* (b)



Gambar 4. Jangkauan Frekuensi yang Dihasilkan



Gambar 5. Jangkauan Frekuensi yang Dihasilkan oleh Metode *Wavelet* Biasa

$$P_{ch}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i)^2 \quad (3)$$

dengan $P_{ch}(n)$ adalah daya tiap *subband*, N adalah jumlah sampel (banyak koefisien) dan C_i menyatakan nilai dari tiap koefisien.

b. Metode *Wavelet* Biasa

Jika pada metode paket *wavelet* terdapat 32 *subband* untuk dekomposisi dengan lima tingkat, maka pada metode *wavelet* biasa dengan jumlah tingkat dekomposisi yang sama, jumlah *subband* yang terbentuk adalah 6 *subband*, jangkauan frekuensi yang dihasilkan seperti pada Gambar 5.

2.2.2 Identifikasi Kanal [5]

Channel Identification adalah kemampuan sistem mengidentifikasi kanal yang tersedia kemudian mengklasifikasikannya menjadi beberapa kategori, yaitu kanal yang layak atau kanal yang tidak layak untuk pengiriman sinyal. Pengecekan dilakukan dengan perbandingan antara daya

interferensi tiap kanal dengan *threshold* yang sudah ditentukan. Nilai *threshold* itu sendiri dihitung dengan menggunakan sistem daya *noise* sebelum munculnya interferensi. Saat daya kanal lebih besar 20 % dari daya *noise*, maka kanal dianggap memiliki interferensi. Jika tidak melebihi *threshold*, maka kanal dianggap *idle*. [12]

$$\begin{aligned} \gamma_{idle} &\leq \text{level noise} + (20\% \times \text{level noise}) \\ I_{TH} &\leq N + (20\% \times N) \\ \left(\frac{I}{N}\right)_{TH, idle} &\leq 10 \log(1.2) \text{dB} \\ \left(\frac{I}{N}\right)_{TH, idle} &\leq 0.8 \text{ dB} \end{aligned} \quad (4)$$

Setelah itu dilakukan proses *notching*, dimana daerah *spectral* melebihi dari *threshold* akan diset menjadi nol, dan daerah yang kurang dari *threshold* akan diset menjadi satu.

$$A'(\omega) = \begin{cases} 1, & A(\omega) \leq \text{threshold} \\ 0, & A(\omega) > \text{threshold} \end{cases} \quad (5)$$

2.3 Fasa Acak

Pada blok ini berbagai macam nilai kompleks yang mengandung informasi fasa dari *pseudorandom* (PR) dihasilkan dari perkalian elemen per elemen dari $A'(\omega)$ yang merupakan *output* dari *spectrum magnitude* dengan $e^{j\theta(\omega)}$ yang merupakan *random phase* sehingga menghasilkan $B_b(\omega)$ yang merupakan input dari skala magnitudo [12].

$$B_b(\omega) = A'(\omega) \cdot e^{j\theta(\omega)} \quad (6)$$

Untuk melakukan proses *phase mapper* pada WDCS diperlukan *Linear Feedback Shift Register* (LFSR). Perancangan sistem WDCS ini menggunakan LFSR dengan spesifikasi:

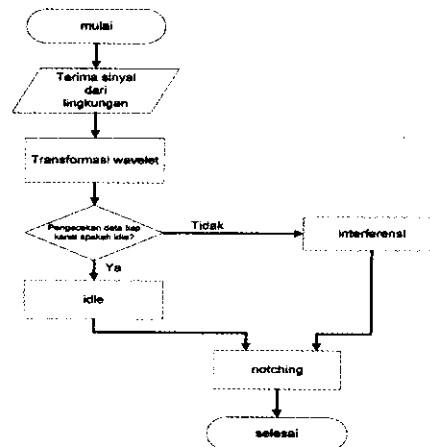
- a. $n = 6$ dengan *feedback tap* [6, 5, 2, 1]
- b. $r = 4$ dengan *mapper tap* [3, 4, 5, 6]

Feedback tap dipilih agar LFSR dapat disebut dengan *maximal-length sequence*, yaitu *feedback tap* yang memiliki sifat *primitive*.

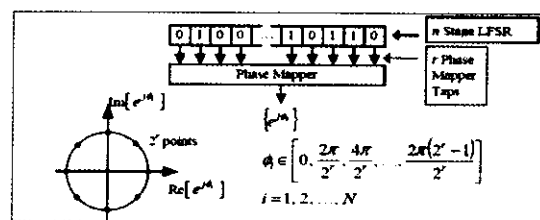
Pada penelitian ini digunakan LFSR dengan panjang *shift register* (n) = 6, berarti setiap kode *m-sequence* akan memiliki periode sepanjang $2^n - 1 = 63$, dan deretan keluaran LFSR akan berulang setiap $2^n - 1$ putaran waktu, [12]. Sedangkan *mapper tap* memiliki panjang 4 *register*, sehingga akan ada 16 kemungkinan fasa yang dipetakan dalam bidang kompleks.

2.4 Inverse Wavelet

Inverse wavelet merupakan kebalikan dari *forward wavelet*. Pada tahap ini dilakukan proses rekonstruksi yaitu dengan proses *upsampling* dan *filtering* [10].



Gambar 6. Diagram Alir dari RSA dan Identifikasi Kanal



Gambar 7. Proses Mapping Fasa

2.5 Modulasi

WDCS bekerja dengan menggunakan suatu modulasi yaitu sebuah bentuk modulasi *orthogonal* yang dinamakan *Cyclic Shift Keying* (CSK). Pada dasarnya, modulasi WDCS CSK menggunakan pergeseran sirkular dari sinyal *Fundamental Modulation Waveform* (FMW) untuk mempresentasikan simbol yang berbeda. Pergeseran sirkular pada domain waktu menyebabkan pergeseran fasa *linier* pada domain frekuensi tanpa mempengaruhi magnitudonya [8]. Simbol matematis untuk menggambarkan modulasi BCSK adalah:

$$s_1(t) = \text{Basis Function} \quad (7)$$

$$s_2(t) = s_1\left(\left(t - \frac{T}{2}\right)\right)_T \quad (8)$$

Secara matematis simbol dalam modulasi 4-CSK dapat direpresentasikan sebagai berikut [14]:

$$s_1(t) = \text{Basis Function} \quad (9)$$

$$s_2(t) = s_1\left(\left(t - \frac{T}{4}\right)\right)_T$$

$$s_3(t) = s_1\left(\left(t - \frac{T}{2}\right)\right)_T \quad (10)$$

$$s_4(t) = s_1\left(\left(t - \frac{3T}{4}\right)\right)_T \quad (11)$$

2.6 Perancangan WDCS Bagian Penerima

Terdapat 3 blok utama yang akan dipaparkan dalam perancangan WDCS bagian penerima, yaitu:

- a. pembangkitan *local FMW* (*Fundamental Modulation Waveform*),
- b. *integrator* dan *dump*, dan
- c. *decision maker*.

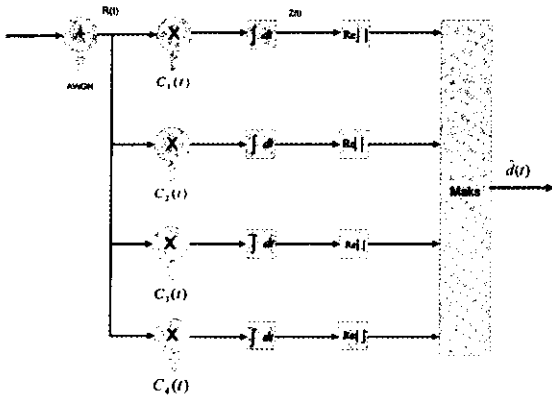
2.6.1 Pembangkitan Local FMW

Karena sistem dianggap sempurna dalam akuisisi, deteksi, dan sinkronisasi maka sinyal hasil blok *local FMW* akan sama dengan fungsi basis yang digunakan dalam pengiriman.

2.6.2 Integrator dan Dump

Pada bagian ini sinyal terima dikorelasikan dengan simbol-simbol referensi yang telah dibangkitkan oleh *local FMW*. Jika menggunakan modulasi *M-ary CSK*, maka secara matematis dapat ditulis dalam persamaan:

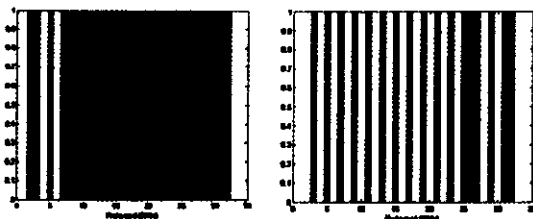
$$z_j(T) = \int_0^T r(t) \cdot c_j(T) \quad (12)$$



Gambar 8. Diagram Blok Sistem Penerima WDCS

Tabel 1. Parameter Simulasi Sistem

Parameter	
Frekuensi Carrier	0-3.2 GHz
Family orthogonal wavelet	Coiflet, Daubechies, Symlet,
Tipe Wavelet	Packet Wavelet, Wavelet biasa
Tingkat Dekomposisi	5 Tingkat
Modulasi	BCSK, 4-ary CSK
Model Kanal	Rayleigh
Noise	AWGN
Jumlah bit yang ditransmisikan	1000 bit
Jumlah iterasi	1000



Gambar 9. Hasil Radio Scene Analysis dan Notching

2.6.3 Decision Maker

Karena datanya adalah sampel digital, maka diperlukan *decision rule* untuk memutuskan antara keluaran bit 1 ataukah bit 0. Sehingga persamaan akhir dari *decision rule* nya adalah :

$$d_i(t) = \begin{cases} 0 & 0, \text{ bila } z_1(t) = \text{maks} \\ 0 & 1, \text{ bila } z_2(t) = \text{maks} \\ 1 & 1, \text{ bila } z_3(t) = \text{maks} \\ 1 & 0, \text{ bila } z_4(t) = \text{maks} \end{cases} \quad (13)$$

2.7 Kanal Transmisi [6]

2.7.1 Additive White Gaussian Noise (AWGN)

Fungsi *pdf* dari AWGN dinyatakan sebagai berikut:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

di mana m_x merupakan *mean* atau rata-rata dan σ^2 merupakan variansi variabel acak.

2.7.2 Kanal Rayleigh [15]

Pada kanal komunikasi bergerak, distribusi Rayleigh biasa digunakan untuk menjelaskan perubahan waktu dari selubung sinyal *fading* yang diterima, atau selubung dari satu komponen *multipath*. Distribusi Rayleigh mempunyai fungsi kerapatan probabilitas (*probability density function*) atau *pdf* diberikan oleh:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & (0 \leq r \leq \infty) \\ 0 & (r < 0) \end{cases} \quad (15)$$

2.8 Perancangan Simulasi

Pada penelitian ini, simulasi sistem dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB R2010. Tabel 1 menunjukkan parameter yang dipilih untuk mensimulasikan sistem WDCS.

3. Hasil dan Analisis

Gambar 9 menunjukkan hasil simulasi *Radio Scene Analysis* dan identifikasi kanal berupa plot kawasan frekuensi dari sinyal yang diterima dengan jumlah *subband* sebanyak 32 *subband*, kemudian akan dilakukan pengecekan informasi tiap subkanal. Pengecekan dilakukan dengan melakukan perbandingan antara daya *interferensi* tiap kanal dengan *threshold* yang sudah ditentukan. Saat daya kanal lebih besar 20% dari daya *noise*, maka kanal dianggap memiliki *interferensi*.

Selanjutnya, keluaran dari proses identifikasi kanal yang telah melalui proses *thresholding* akan diset menjadi nilai '0' dan '1'. Proses ini dikenal dengan istilah *notching* (lihat Gambar 9). Tujuan dari proses ini adalah untuk mendapatkan kondisi kanal yang bebas *interferensi*.

3.1 Analisis Proses Modulasi BCSK dan 4-ary CSK

Pemilihan modulasi akan mempengaruhi performansi dari sistem WDCS. Sistem WDCS yang menggunakan modulasi 4-CSK memiliki performansi yang lebih baik jika dibandingkan dengan WDCS ketika menggunakan modulasi BCSK. Hal ini dikarenakan simbol-simbol pada modulasi 4-CSK memiliki sifat ortogonalitas yang lebih baik dibandingkan dengan simbol-simbol pada modulasi BCSK.

Modulasi 4-CSK memiliki nilai *crosscorrelation* yang lebih kecil dibandingkan simbol-simbol pada modulasi BCSK. Seperti terlihat dalam persamaan 16, bahwa terdapat hubungan antara peluang *error* dengan nilai *crosscorrelation* dari simbol-simbol.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{N_0}}\right) \quad (16)$$

3.2 Analisis Performansi Sistem WDCS dengan Menggunakan Famili Wavelet yang Berbeda

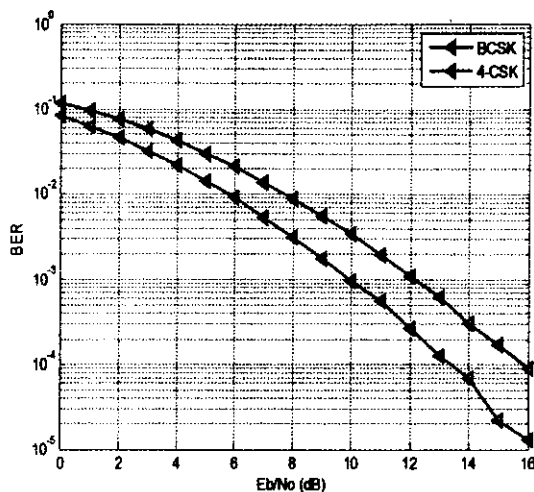
Pada penelitian ini transformasi *wavelet* yang digunakan yaitu kelompok dari *wavelet orthogonal*, dengan jenis dekomposisi paket *Wavelet*. Yang termasuk ke dalam keluarga *wavelet orthogonal* ini, yaitu: *Haar*, *Daubechies*, *Coiflet*, dan *Symlet*. Masing-masing jenis *wavelet* ini akan memberikan performansi yang berbeda terhadap sistem WDCS. Hal ini tergantung pada fungsi skala dan fungsi *wavelet* yang akan membentuk koefisien filter dari masing-masing jenis *wavelet*. Selain itu juga bergantung kepada orde *wavelet*. Gambar 10 diambil ketika sistem menggunakan jenis dekomposisi paket *wavelet*, modulasi 4-ary CSK, Kanal *Jake Rayleigh Fading* dengan kecepatan 30 km/jam.

Dari Gambar 11 dapat dilihat bahwa penggunaan *wavelet* yang berbeda akan memberikan performansi yang berbeda pula.

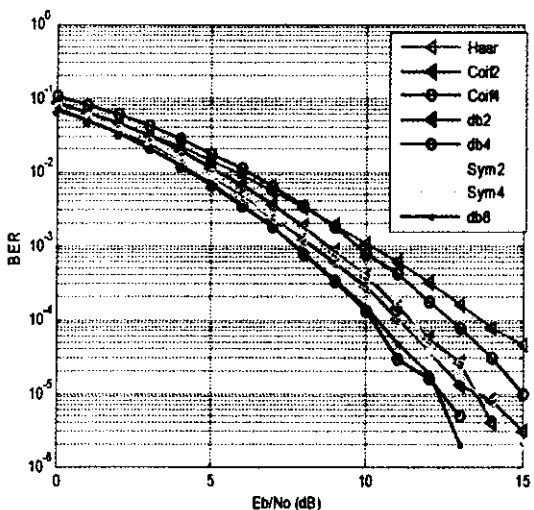
3.3 Analisis Perbandingan Performansi WDCS Pada Kanal Rayleigh dan AWGN

Gambar 12 memperlihatkan perbandingan performansi sistem WDCS pada AWGN dan kanal Rayleigh menggunakan modulasi 4-ary CSK dan keluarga *Wavelet Haar*. Dari gambar tersebut terlihat bahwa performansi dari sistem WDCS pada AWGN memberikan performansi yang lebih baik dibandingkan pada kanal Rayleigh. Hal ini dikarenakan sifat dari AWGN yang hanya merusak atau mengganggu besar amplitudo dari sinyal informasi. Sedangkan kanal Rayleigh merupakan penggambaran dari kanal radio. Sehingga ketika sistem WDCS menggunakan kanal Rayleigh,

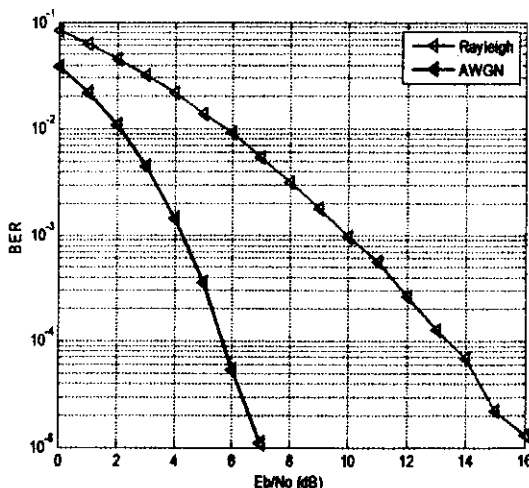
komponen sinyal yang dirusak tidak hanya amplitudo dari sinyal, tetapi juga dapat menggeser fasa dari sinyal informasi yang dikirimkan.



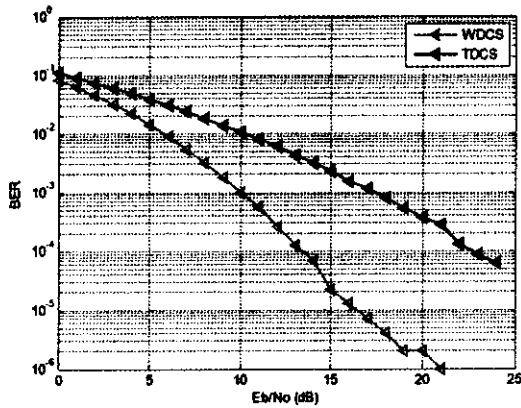
Gambar 10. Grafik Performansi BER versus Eb/No untuk Sistem WDCS dengan Modulasi BCSK dan 4-CSK



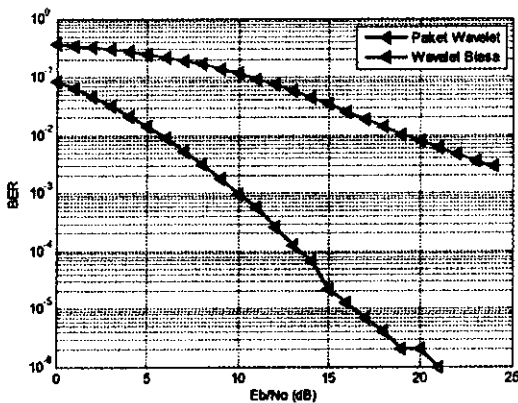
Gambar 11. Grafik Performansi Sistem WDCS dengan Berbagai Keluarga Wavelet



Gambar 12. Grafik Performansi WDCS pada Kanal Rayleigh dan AWGN



Gambar 13. Grafik Performansi WDCS dan TDCS



Gambar 14. Grafik Performansi WDCS Menggunakan Paket *Wavelet* dan WDCS Menggunakan *Wavelet Biasa*

Hal ini menyebabkan di sisi penerima terjadi kesalahan deteksi yang lebih besar. Gambar 13 didapat dari hasil simulasi dengan parameter sistem, yaitu: modulasi 4-CSK, jenis dekomposisi paket *wavelet* dengan menggunakan *Wavelet Haar*.

3.4 Analisis Perbandingan Performansi WDCS dan TDCS

Dari Gambar 13 terlihat bahwa WDCS memiliki performansi BER yang lebih baik dibandingkan TDCS. Hal ini dikarenakan transformasi Fourier tidak mampu dalam menganalisa sinyal yang bersifat *nonstationer*, pada transformasi Fourier terdapat kendala dalam hal pemotongan sinyal. Sedangkan transformasi *wavelet* yang digunakan dalam WDCS memiliki kemampuan menganalisa sinyal yang lebih baik dibandingkan transformasi Fourier. Pada transformasi *wavelet* digunakan jendela termodulasi yang memiliki parameter dilatasi (faktor skala) dan parameter translasi (faktor penggeser) sehingga dapat mengatasi permasalahan pemotongan sinyal, di mana jendela tersebut akan digeser sepanjang sinyal dan setiap posisi dilakukan perhitungan spektrum, yang kemudian proses tersebut akan diulangi berkali-kali menggunakan jendela yang lebih kecil dalam setiap siklus.

3.5 Analisis Perbandingan Performansi WDCS Menggunakan Dekomposisi Paket *Wavelet* dan WDCS Menggunakan Dekomposisi *Wavelet Biasa*

WDCS dengan menggunakan dekomposisi paket *wavelet*, memiliki kemampuan analisa subkanal yang lebih akurat dibandingkan dengan WDCS dengan menggunakan dekomposisi *wavelet* biasa. Saat menggunakan dekomposisi *wavelet* biasa, ketika interferensi terdeteksi pada kanal dengan frekuensi tinggi, maka jumlah subkanal yang dapat digunakan akan berkurang setengahnya. Berbeda dengan dekomposisi paket *wavelet*, dekomposisi ini menghasilkan pembagian kanal yang lebih seimbang dan lebih akurat sehingga ketika interferensi dinyatakan hadir di salah satu frekuensi tinggi, sistem tidak akan kehilangan subkanal setengahnya. Hal inilah yang menjadi alasan performansi WDCS menggunakan paket *wavelet* lebih baik dibandingkan performansi WDCS menggunakan *wavelet* biasa seperti terlihat pada Gambar 14.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan penelitian mengenai sistem WDCS ini, dapat disimpulkan:

1. WDCS cocok dijadikan sebagai salah satu kandidat sistem untuk *cognitive radio*.
2. Untuk mencapai performansi yang optimal ada beberapa hal yang perlu diperhatikan seperti pemilihan modulasi, pemilihan jenis *wavelet* dan jenis dekomposisi.
3. Modulasi 4-CSK memiliki performansi yang lebih baik sebesar 2 dB dibandingkan dengan modulasi BCSK.
4. Dari hasil penelitian performansi yang paling baik untuk sistem WDCS adalah *wavelet* Daubechies dengan orde 8 (dari orde yang disimulasikan 2, 4, dan 8).
5. Pemilihan jenis dekomposisi *wavelet* memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap performansi WDCS. Untuk mencapai BER 10^{-5} , WDCS dengan paket *wavelet* hanya membutuhkan Eb/No sebesar 14 dB. Sedangkan WDCS dengan *wavelet* biasa untuk mencapai BER yang sama dibutuhkan Eb/No yang besar sekali.
6. Dibandingkan dengan sistem TDCS, sistem WDCS memiliki performansi yang lebih baik sebesar 9 dB.

4.2 Saran

1. Diharapkan adanya penelitian tentang penambahan blok ATPC (*Automatic Transmit Power Control*) dan DSM (*Dynamic Spectrum Management*).

2. Mensimulasikan sistem WDCS dengan menggunakan jenis modulasi lainnya yaitu CCSK.
3. Diharapkan pada penelitian selanjutnya bisa ditambahkan pada kondisi *multiuser environment*.

Daftar Pustaka

- [1] Barford, Lee A., R. Shane Fazio, David R. Smith, "An Introduction to Wavelets", Instruments and Photonics Laboratory, September 1992.
- [2] Budiarjo, Ibrahim, "Adaptive Baseband Processing Techniques for Cognitive Radio Systems", Master of Science in Communications Engineering Technische Universitaet Muenchen, Duitsland, 2009.
- [3] Burrus, C. Sidney, "Introduction to Wavelet and Wavelet Transform A Primer", Electrical and Computer Engineering Department and Computer and Information Technology Institute Rice University Houston, Texas, 1998.
- [4] Farhang, Behrouz, "Signal Processing Techniques for Spectrum Sensing and Communications In Cognitive Radio", Electrical and Computer Engineering Department, University of Utah, SDR Conference, 2008.
- [5] Febrian, Adityas, "Desain dan Simulasi RSA dan Identifikasi Kanal pada TDCS untuk Aplikasi Cognitive Radio", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro STT Telkom, Bandung, 2006.
- [6] Haykin, Simon, "Communication System", 4th Edition, McMaster University, Wiley, 2001.
- [7] Haykin, Simon, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications", IEEE Journal On Selected Areas In Communications, Vol. 23, No. 2, Februari 2005.
- [8] Haykin, Simon, "Fundamental Issues In Cognitive Radio", McMaster University.
- [9] Jamin, Antony, Petri Mahonen, "Wavelet Packet Modulation for Wireless Communication". Published in Wireless communication & Mobile Computing Journal, Vol. 5, Issue 2, March 2005.
- [10] Lee, Daniel T. L., Akio Yamamoto, "Wavelet Analysis: Theory And Applications", Hewlett-Packard Journal, December 1994.
- [11] Ludeman, Lonnie C., "Fundamental of Digital Signal Processing", John Wiley And Sons.
- [12] M. J. Lee, "Wavelet Domain Communication System (WDCS): Packet-Based Wavelet Spectral Estimation and M-ARY Signaling", Masters' thesis, AFIT/GE/ENG/02M-14, Air Force Inst. Tech, 2001.
- [13] Polikar, Robi, "Multiresolusi Analysis: The Discrete Wavelet Transform", The Wavelet Tutorial Part IV, Department of Electrical and Computer Engineering, Rowan University, 2004.
- [14] Putra, Agfianto Eko, "Analisis Sinyal Non-stasioner Menggunakan Wavelet dan Metode Dekorlet", 2006.
- [15] Rappaport, Theodore S., "Wireless Communications Principles And Practice", Second Edition, Amerika, 2002.
- [16] Setiawan, Denny, "Perencanaan dan Kebijakan Spektrum Frekuensi Radio Indonesia", Direktorat Jenderal Pos dan Telekomunikasi, Departemen Komunikasi dan Informatika, Jakarta, Oktober 2007.