

STUDI PENERAPAN SISTEM ADAPTIF OTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING UNTUK APLIKASI MULTIUSER

Bobby Juan Pradana¹, Arfianto Fahmi², Dharu Arseno³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro Sekolah Tinggi Teknologi Telkom, Bandung

E-mail: ¹prodigy_manner@yahoo.co.uk, ²arf@stttelkom.ac.id, ³dha@stttelkom.ac.id

ABSTRAK

Teknik *Othogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* merupakan teknik modulasi *multicarrier*, yang mengizinkan spektrum antar *subcarrier* saling overlap sehingga memiliki efisiensi bandwidth yang tinggi. OFDM memecah data kecepatan tinggi menjadi data kecepatan rendah.

OFDM dengan modulasi adaptif dapat digunakan untuk sistem komunikasi dari base station ke user (downlink) dengan menggunakan bandwidth yang tersedia untuk dibagi-bagi menjadi independent subchannel. Dalam skenario multiple access nantinya tiap user memiliki bit rate yang berbeda-beda.

Sehingga dengan menggunakan Algoritma Alokasi Subcarrier Adaptif untuk Sistem Multiuser OFDM maka hasil yang didapat pada simulasi menunjukkan bahwa kinerja sistem multiuser akan sama dengan single user pada kanal AWGN dan saat keadaan diam. Untuk kanal multipath fading, kinerja multiuser hanya berbeda 1 – 2 dB dibandingkan single user untuk masukan empat user. Sistem multiuser dengan skema Variable Bit Rate (VBR) sesuai untuk aplikasi dengan target bit rate di bawah 20 Mbps, sedangkan skema Constant Bit Rate (CBR) sesuai untuk aplikasi dengan target bit rate di atas 20 Mbps.

Skema CBR digunakan untuk pencapaian bit rate requirement dalam suatu aplikasi dan dapat menggambarkan multiple access arah downlink untuk user pada jarak dan posisi yang berbeda-beda.

Kata kunci: OFDM, multiple access, alokasi subcarrier, VBR, dan CBR.

1. PENDAHULUAN

Teknik modulasi *multicarrier Othogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* merupakan teknik modulasi *multicarrier*, yang mengizinkan spektrum antar *subcarrier* saling overlap sehingga memiliki efisiensi spektrum yang tinggi. OFDM memecah data kecepatan tinggi menjadi data yang kecepatan rendah, sehingga efek *frequency selective* yang dialami sinyal OFDM akan menjadi *flat fading* pada tiap-tiap *subcarrier*. Teknik estimasi kanal akan memberikan peningkatan kinerja sistem OFDM, sehingga efek kanal yang menyebabkan *fading* dapat dikurangi.

Untuk estimasi kanalnya menggunakan *channel estimator* satu dimensi. Mengasumsikan kondisi kanal adalah *multipath fading* yang terdistribusi *Rayleigh* dengan *noise* yang bersifat *Additive White Gaussian Noise (AWGN)*. Sehingga dengan mengetahui kondisi SNR kanal, maka dapat dilakukan pengalokasian *subcarrier* untuk memodulasi data dalam sistem OFDM ini.

Untuk mengoptimalkan kinerja sistem OFDM, pada penelitian ini akan diteliti penerapan modulasi adaptif pada sistem OFDM. Modulasi adaptif tergantung pada kanal, dimana karakteristik kanal menentukan besarnya SNR di penerima. Informasi mengenai SNR digunakan untuk memilih mode *modem*. Analisis dilakukan terhadap unjuk kerja OFDM dengan modulasi adaptif berupa pengukuran *Bit Error Rate (BER)* dan dibandingkan dengan sistem OFDM modulasi tunggal. Algoritma yang digunakan untuk proses adaptasi mode *modem*

berupa algoritma alokasi *subcarrier* atau algoritma *adaptive bit-loading* pada sistem OFDM.

Sistem OFDM ini dicoba diterapkan sebagai teknik *multiple access*. Sistem yang diteliti pada penelitian ini tidak menggunakan OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) secara murni, tetapi penggabungan antara sistem OFDM dengan TDMA.

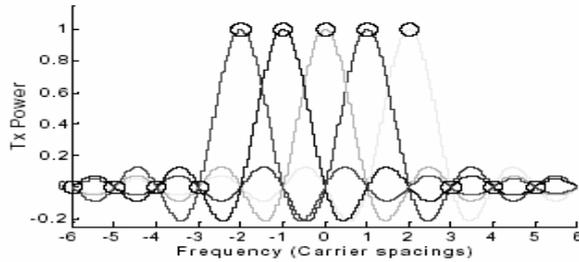
Tujuan Penelitian ini adalah untuk melihat kinerja penerapan sistem modulasi *adaptive* pada sistem *multiuser OFDM* dimana kinerja dilihat pada kanal *multipath fading* yang terdistribusi secara *rayleigh*. Sedangkan metoda yang digunakan adalah simulasi menggunakan perangkat lunak *Matlab 7*. Kelebihan metoda penelitian menggunakan simulasi adalah pendekatan yang dilakukan bisa dilakukan secara ideal menurut teoritis dan kelemahan dari metoda ini adalah lamanya waktu simulasi bergantung pada spesifikasi komputer yang digunakan.

2. SISTEM MULTIUSER OFDM

2.1 Dasar OFDM

Sinyal OFDM merupakan penjumlahan beberapa *subcarrier* yang dimodulasi menggunakan *Phase Shift Keying (PSK)* atau *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)* dimana untuk modulasi *baseband* menggunakan blok IFFT. Sinyal *lowpass* OFDM dapat dituliskan persamaannya dengan beberapa *carrier* termodulasi secara paralel. Persamaannya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^{N-1} X_{n,k} g_k(t - nT_s) \right) \quad (1)$$



Gambar 1. Representasi simbol OFDM

2.2 Teknik Modulasi Sinyal OFDM

Teknik IDFT digunakan sebagai modulasi sinyal OFDM untuk mengurangi kompleksitas sistem yang umumnya menggunakan osilator, serta digunakan algoritma IFFT agar lebih efisien. Selain itu modulasi dan demodulasi sinyal OFDM dengan IFFT adalah ortogonal. Persamaan IDFT untuk N titik adalah sebagai berikut:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{c=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi \frac{cn}{N}} \quad (2)$$

2.3 Algoritma Alokasi Bit dan Daya

Dalam sistem OFDM yang menggunakan teknik modulasi bersifat adaptif, sejumlah bit dan daya dialokasikan ke *subchannel* berdasarkan *Signal to NoiseRatio* (SNR) kanal, kemudian memilih skema modulasi yang dapat memaksimalkan efisiensi spektral dengan menjaga probabilitas *error* yang diinginkan. Algoritma yang digunakan untuk menghitung bit dan daya yang terdapat pada *subchannel* adalah algoritma *adaptive bit loading*. Sistem OFDM dengan modulasi adaptif, bit yang berbeda jumlahnya ditransmisikan ke *subcarrier* yang berbeda juga berdasarkan kondisi kanal. Inilah algoritma alokasi untuk *single carrier* dan diterapkan untuk sistem OFDM yang *multicarrier*.

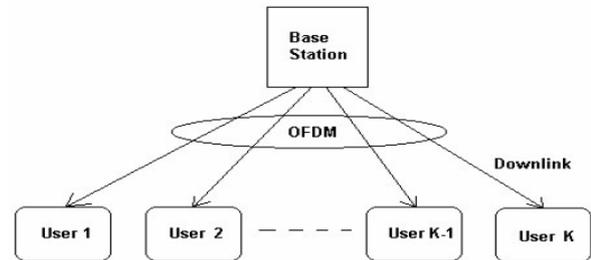
$$b_i = \log_2(1 + SNR_i/\tau) \quad (3)$$

$$SNR_i = \frac{|H|^2 E_i}{2\sigma_i^2} \quad (4)$$

2.4 Teknik Multiple Access

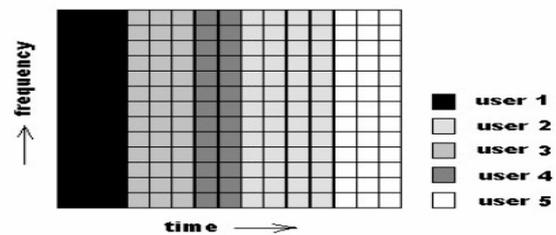
Untuk skema *multiple access* arah *downlink* maka sama jalurnya dengan konsep *broadcast* dimana semua *user* dimultipleksing pada *base station*, sehingga antar *user* akan saling ortogonal. Jika salah satu *mobile station* kehilangan sinkronisasi dengan *base station* pada *downlink*, maka hubungan *user* tersebut akan terputus dan *user* lain tidak terkena efek gagal hubungan itu. Sedangkan pada *uplink*, semua *user* harus

menyinkronkan dengan *base station*. Tentu saja akan membutuhkan sistem yang kompleks pada *mobile station* untuk mengirimkan informasi sinkronisasi.



Gambar 2. Multiuser OFDM untuk downlink

Pada OFDM-TDMA, tiap *user* akan diberi alokasi *time slot* sendiri-sendiri untuk digunakan oleh semua *subcarrier*-nya.



Gambar 3. Skema TDMA

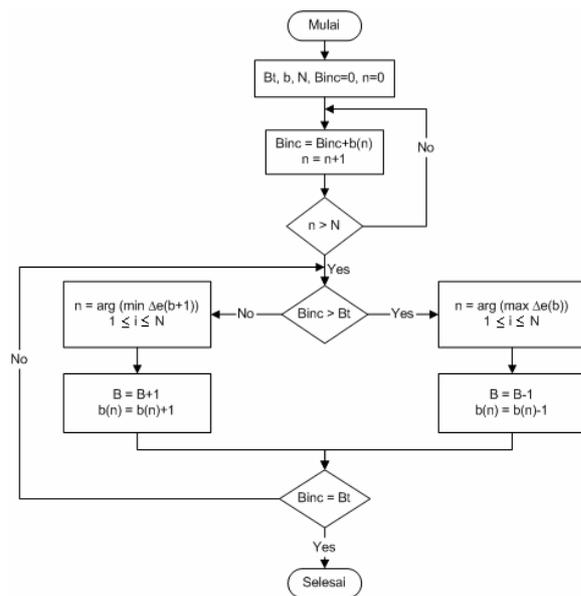
3. DESKRIPSI SISTEM ADAPTIVE OFDM

3.1 Alokasi Subcarrier

Blok ini merupakan gabungan dari blok Adaptif Daya dan Bit dengan blok *adaptive user allocation*. Blok gabungan pada sistem *adaptive OFDM* ini digunakan untuk mengalokasikan sejumlah *subcarrier* dan *bit* yang optimal untuk kondisi kanal saat itu, setelah sebelumnya dikirimkan sinyal pendahulu (*overhead information signal*). Sinyal pendahulu yang diterima pada sisi penerima dijadikan informasi kondisi kanal untuk dikirimkan ke pengirim. Informasi yang dikirimkan ke pengirim dihitung berdasarkan nilai SNR kanal, kemudian dengan rumus *Shannon* akan didapatkan jumlah bit optimum untuk tiap *subcarrier*. Sedangkan jumlah *subcarrier* didapatkan dari *bit rate* tiap *user* yang diinginkan dengan alokasi *bandwidth* tertentu.

Untuk *multiuser OFDM*, maka blok alokasi bit dan daya ini ditempatkan setelah blok *serial to parallel converter* tiap *user* di sisi pengirim. Informasi kanal sebagai masukan blok algoritma alokasi didapat dari blok estimasi *power*, *bit*, dan *subcarrier* yang ditempatkan setelah kanal dan sebelum blok IFFT pada sisi penerima.

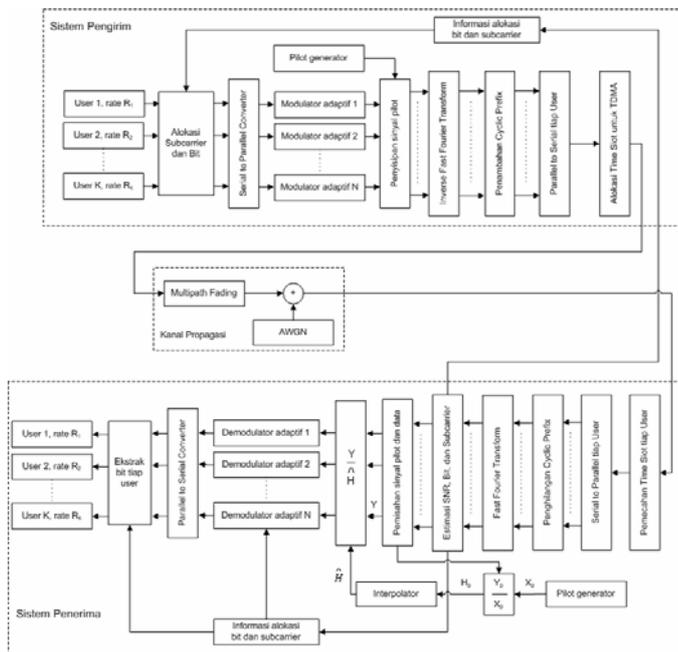
Agar mendapatkan *bit rate* yang tetap dengan efisiensi spektral yang berubah-ubah, tetapi alokasi *bandwidth* juga tetap maka harus digunakan optimalisasi alokasi bit dan daya pada tiap *user*. Diagram alir optimalisasinya dapat digambarkan sebagai berikut ini.



Gambar 4. Diagram optimalisasi alokasi bit & daya

3.2 Sistem Adaptive OFDM untuk Multiuser

Pemodelan untuk sistem multicarrier dengan skema multiple access TDMA dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 5. Skema ADAPTIVE OFDM-TDMA

3.3 Parameter Sistem

Sistem OFDM didesain berdasar parameter-parameter sebagai berikut:

- Frekuensi operasi (f_{op}) = 2 GHz
- Bandwidth satu simbol (B) = 4 MHz
- Delay spread kanal (t_d) = 2 μ s
- Guard time (T_g) = 4 μ s
- Periode simbol OFDM (T_{os}) = 32 μ s

- Periode sinyal OFDM (T_s) = 36 μ s
- Subcarrier spacing (f_c) = 31,25 KHz
- Jumlah subcarrier (N) = 128
- Ukuran IFFT dan FFT ($2N$) = 256
- Frekuensi sampling (f_s) = 8 MHz
- Panjang cyclic prefix (L) = 32

4. ANALISIS SISTEM

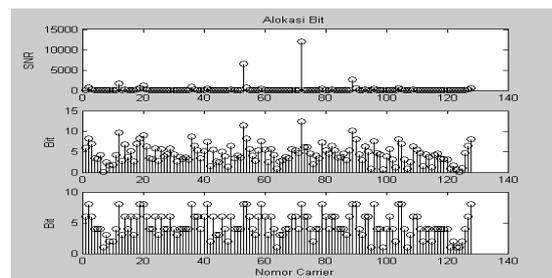
Analisis yang dilakukan pada sistem ini pada dasarnya yaitu membandingkan antara sistem yang *single user* dan *multiuser*. Jika didapat hasil BER keduanya mendekati sama berarti sistem *multiuser* OFDM dapat digunakan sebagai teknik *multiple access*. Analisis hasil simulasi yang akan dibahas, mencakup hal-hal sebagai berikut:

1. Pengaruh perubahan modulasi terhadap *bit rate*.
2. Kinerja modulasi BPSK, 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, dan modulasi adaptif pada tipe kanal AWGN dan *multipath fading*.
3. Perbandingan kinerja sistem *Adaptive* OFDM dengan sistem OFDM untuk skema *bandwidth* tetap tetapi *bit rate* berubah-ubah.
4. Pengalokasian *subcarrier* tiap *user* berdasar SNR kanal masing-masing *user*.
5. Pengaruh penggunaan *guard time* terhadap kinerja sistem.
6. Pengaruh penggunaan estimasi kanal satu dimensi terhadap kinerja sistem *Adaptive* OFDM.
7. Perbandingan kinerja sistem *Adaptive* OFDM antara skema *bandwidth* tetap tetapi *bit rate* berubah-ubah dan skema *bandwidth* tetap tetapi *bit rate* konstan.

4.1 Skema Alokasi Subcarrier tiap User

Pengalokasian jumlah bit dalam tiap *subcarrier* berdasar SNR kanal tiap *subcarrier* ditunjukkan pada Gambar 6.

Nilai SNR kanal yang didapat dari satu kali pengiriman sinyal OFDM tergantung pada *noise* yang dibangkitkan. Terdapat *subcarrier* dengan nilai SNR yang tinggi sekali dan dialokasikan berdasar rumus *Shannon* hingga mencapai 4096-QAM. Tetapi karena keterbatasan sistem, maka bit yang dialokasikan maksimal hingga 256-QAM.



Gambar 6. Skema alokasi subcarrier

4.2 Pengaruh Modulasi Adaptif pada Bit Rate

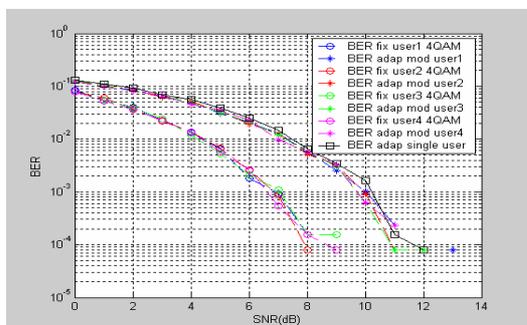
Modulasi yang diterapkan pada sistem ADAPTIVE OFDM yaitu modulasi adaptif yang akan memberikan perubahan bit tiap *subcarrier* dan *bit rate* sesuai dengan nilai SNR kanal.

Tabel 1. Perubahan *bit rate* (dalam bps) tiap *user*

SNR input	0	1	2
Bit Rate User 1	3885000	4329000	4467750
Bit Rate User 2	4218000	4051500	4329000
Bit Rate User 3	4162500	4273500	4384500
Bit Rate User 4	4218000	4051500	4329000

4.3 Sistem Adaptive OFDM Bit Rate Berubah-ubah

1) Kinerja Sistem Adaptive OFDM pada Kanal AWGN

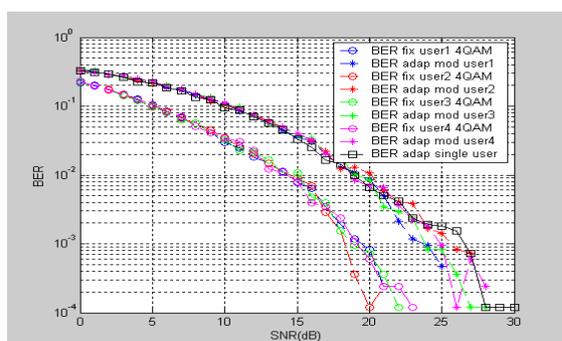


Gambar 7. Kinerja ADAPTIVE OFDM pada kanal AWGN

Sesuai gambar 7 maka kinerja Adaptive OFDM masih relatif sama dibandingkan dengan OFDM *single user*. Karena dikirim pada kanal yang sama dan dengan pergerakan *user* yang sama maka kinerja sistem untuk keempat *user* tersebut relatif sama. Keseluruhan *user* yang menggunakan Adaptive OFDM akan mencapai BER = 10^{-4} pada nilai SNR = 12 dB.

Pada sistem Adaptive OFDM ini *bit rate* yang dihasilkan mencapai 14,70 Mbps. *Bit rate* yang dihasilkan ini lebih tinggi dari 16-QAM yang hanya menghasilkan 14,2 Mbps.

2) Kinerja Sistem Adaptive OFDM pada Kanal Multipath Fading ($f_d = 0$ Hz)

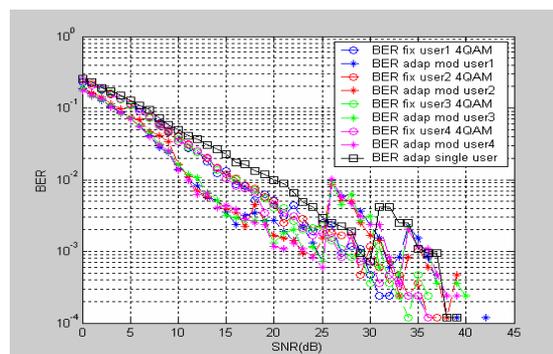


Gambar 8. Kinerja sistem Adaptive OFDM pada kanal multipath fading frekuensi Doppler 0 Hz

Kinerja Adaptive OFDM pada *Doppler* 0 Hz yang ditunjukkan pada gambar 10 ternyata masih relatif sama dengan sistem OFDM *single user*. Sistem ADAPTIVE OFDM untuk mencapai BER = 10^{-4} pada tiap *user* maka dibutuhkan SNR dari 27 – 30 dB, sedangkan pada *single user* dicapai pada SNR = 28 dB. *Bit rate* yang dicapai untuk frekuensi *Doppler* ini yaitu 16,26 Mbps. Untuk OFDM dengan modulasi 4-QAM juga dapat mencapai kinerja yang sama dengan sistem OFDM *single user*.

3) Kinerja Sistem Adaptive OFDM pada Kanal Multipath Fading ($f_d = 9$ Hz)

Kinerja Adaptive OFDM pada kanal *multipath fading* dengan frekuensi *Doppler* 9 Hz efisiensi spektrum sinyal awalnya pada SNR = 0 – 17 dB yaitu 140 b/s/Hz. Kemudian bertambah tinggi *bit rate*-nya tetapi ada titik dimana tidak bertambah terus tetapi akan konstan karena kinerja sistem akan semakin memburuk.



Gambar 9. Kinerja sistem Adaptive OFDM pada kanal multipath fading frekuensi Doppler 9 Hz.

Dari hasil simulasi dan analisis ini, dapat diambil simpulan bahwa:

- Setelah diuji coba berulang kali pada kanal *multipath* bahwa untuk:
 - $0 < f_d < 80$ Hz, teknik estimasi kanal dapat meningkatkan kinerja sistem.
 - $81 < f_d < 150$ Hz, teknik estimasi kanal hanya dapat mempertahankan kinerja, malah dapat menurunkan kinerja sistem.
- Pengalokasian *subcarrier* tidak bisa ditingkatkan terus menerus untuk kanal *multipath* dengan frekuensi *Doppler* di atas 80 Hz karena kinerjanya akan menurun.
- Untuk f_d kurang dari 80 Hz, *bit rate* yang diinginkan juga jangan lebih dari 20 Mbps karena akan menurunkan kinerja sistem. Cara agar bisa mencapai *bit rate* di atas 20 Mbps yaitu dengan memperlebar *bandwidth* sistem.
- Lonjakan BER yang tidak tepat pada titik perubahan modulasi disebabkan karena saat pengiriman *overhead information signal* yang dikirimkan berulang-ulang hasil lonjakan juga bervariasi.

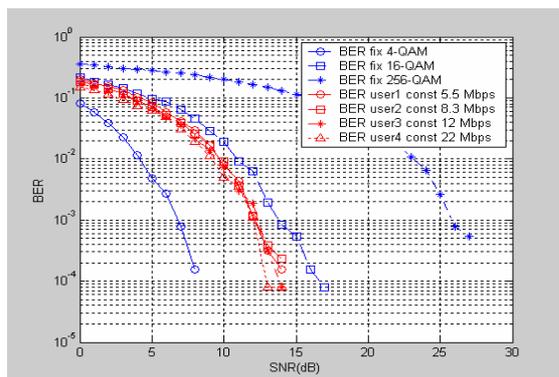
4.4 Sistem Adaptive OFDM Bit Rate Konstan

Sistem A OFDM dengan *bit rate* konstan akan dibandingkan dengan sistem OFDM *single user* dengan modulasi 4-QAM (7,104 Mbps), 16-QAM (14,2 Mbps), dan 256-QAM (28,41 Mbps). Dikarenakan sistem ADAPTIVE OFDM ini memiliki *requirement*:

- *User 1* dengan efisiensi spektral target ± 200 b/s/Hz, dicapai *bit rate* $\pm 5,55$ Mbps.
- *User 2* dengan efisiensi spektral target ± 300 b/s/Hz, dicapai *bit rate* $\pm 8,325$ Mbps.
- *User 3* dengan efisiensi spektral target ± 450 b/s/Hz, dicapai *bit rate* $\pm 12,48$ Mbps.
- *User 4* dengan efisiensi spektral target ± 800 b/s/Hz, dicapai *bit rate* $\pm 22,20$ Mbps.

1) Kinerja Sistem Adaptive OFDM pada Kanal AWGN

Kinerja sistem Adaptive OFDM pada kanal AWGN jika dibandingkan dengan sistem OFDM dengan modulasi tetap, maka hasilnya dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Perbandingan kinerja Adaptive OFDM pada kanal AWGN

Ternyata kinerja Adaptive OFDM dengan *user* yang berbeda target *bit rate*-nya menghasilkan BER yang hampir sama pada tiap titik SNR. Ini membuktikan bahwa sistem Adaptive OFDM dengan teknik *multiple access* TDMA akan mempengaruhi kinerja:

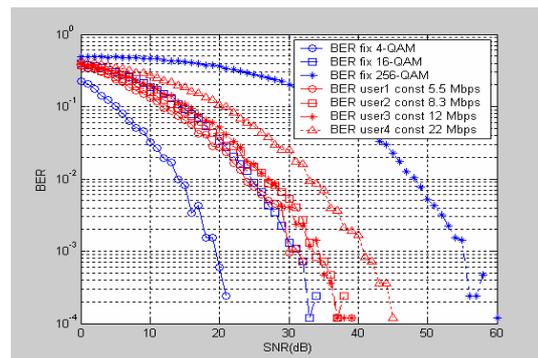
- *User 1* dengan *bit rate* yang lebih rendah dibandingkan 4-QAM ternyata kinerjanya lebih buruk kinerjanya. Karena untuk mencapai BER = 10^{-4} , Adaptive OFDM membutuhkan 7 dB lebih besar dari pada 4-QAM.
- Untuk *user* dengan *bit rate* lebih tinggi dari 7,104 Mbps ternyata menghasilkan kinerja yang lebih bagus dari pada 16-QAM. Dengan *bit rate* yang mencapai 22 Mbps (setara dengan 64-QAM) ternyata kinerjanya lebih baik 3 dB dibandingkan 16-QAM.

Jadi dapat diambil simpulan bahwa untuk kondisi kanal AWGN dimana tidak terjadi *delay spread* dan *multipath*, sistem *multiuser* dengan TDMA akan lebih menguntungkan jika menggunakan efisiensi spektral > 300 b/s/Hz.

2) Kinerja Sistem Adaptive OFDM pada Kanal Multipath Fading ($f_d = 0$ Hz)

Sistem Adaptive OFDM dengan kondisi kanal *multipath* menghasilkan kinerja yang berbeda-beda untuk tiap *user*. Untuk target *bit rate* 5,5 Mbps ternyata kinerjanya sangat buruk karena membutuhkan 10 dB lebih besar dibandingkan 4-QAM (7,104 Mbps) untuk mencapai BER yang sama pada 10^{-4} .

Begitu pula dengan *user 2* dan 3, kinerja yang dicapai oleh sistem akan lebih buruk dari 16-QAM, padahal target *bit rate*-nya lebih rendah. Tetapi untuk target *bit rate* *user 4* yang lebih besar dari 20 Mbps ternyata sistem Adaptive OFDM ini dapat menghasilkan kinerja yang lebih baik 2 – 4 dB dari pada 64-QAM dan 8 – 10 dB untuk 256-QAM. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 11.

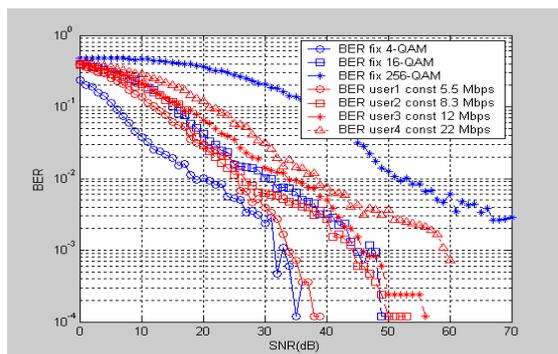


Gambar 11. Perbandingan kinerja Adaptive OFDM pada multipath fading frekuensi Doppler 0 Hz.

3) Kinerja Sistem Adaptive OFDM pada Kanal Multipath Fading ($f_d = 9$ Hz)

Pada frekuensi *Doppler* 9 Hz, kinerja *user 1* hampir sama dengan 4-QAM ketika nilai SNR mencapai 30 dB. Tetapi jika dilihat dari *bit rate* yang dicapai maka masih lebih baik menggunakan 4-QAM. Sedangkan untuk *user 2*, kinerjanya lebih baik dari 8-QAM karena *bit rate* yang dicapai lebih rendah 2,3 Mbps.

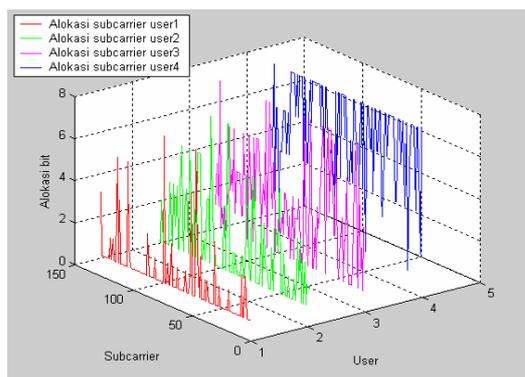
Kinerja *user 3* lebih buruk 1 dB dibanding dengan 16-QAM serta *bit rate* yang dicapai juga lebih rendah 1,4 Mbps. Tetapi lain halnya dengan target *bit rate* yang lebih tinggi dari 20 Mbps, seperti pada *user 4* maka sistem ADAPTIVE OFDM akan lebih baik dibandingkan 64-QAM.



Gambar 12. Perbandingan kinerja Adaptive OFDM pada multipath fading frekuensi Doppler 9 Hz.

4.5 Optimalisasi Alokasi Subcarrier

Proses optimalisasi bit dan daya yaitu proses untuk mengalokasikan jumlah bit tiap *subcarrier* berdasar daya yang diterima oleh tiap *user* untuk mencapai *bit rate requirement* tiap *user*. Contoh hasil optimalisasi daya tiap *user* ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Skema optimalisasi alokasi subcarrier untuk tiap user.

Nilai BER dan hasil konstelasi sinyal serta tampilan lainnya untuk sistem diatas adalah perbandingan antara cara:

- *Bandwidth* tetap, efisiensi spektral berubah-ubah, dan *bit rate* berubah-ubah. Ini hampir mirip dengan sistem yang *multi rate* untuk satu *user*. Pemodelan ini memiliki konsekuensi bahwa tiap *user* pada jarak, arah, pergerakan yang sama.
- *Bandwidth* tetap, efisiensi spektral berubah-ubah, dan *bit rate* konstan. Ini digunakan untuk memodelkan *user* yang berbeda jarak dan arah serta aplikasi yang digunakan, tetapi pergerakan tiap *user* dibuat sama.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Sistem Adaptive OFDM lebih baik 2 – 4 dB dari pada sistem dengan *single carrier*.
2. Sistem Adaptive OFDM skema *bit rate* berubah-ubah dengan SNR input yang semakin

tinggi maka kinerjanya akan sama dengan OFDM modulasi tetap (pada skema modulasi yang setara), tetapi *bit rate* yang dicapai lebih tinggi.

3. Pengalokasian *subcarrier* tiap *user* dengan teknik optimalisasi bit dan daya digunakan untuk mencapai target *bit rate* yang diinginkan secara konstan.
4. Adaptive OFDM skema *bit rate* berubah-ubah cocok diterapkan untuk *user* dengan *bit rate* kurang dari 20 Mbps. Sedangkan untuk di atas 20 Mbps lebih tepat diterapkan sistem Adaptive OFDM skema *bit rate* konstan karena kinerjanya akan lebih baik.

5.2 Saran

1. Untuk lebih mengefisienkan *bandwidth* maka perlu diteliti sistem ADAPTIVE OFDM dengan teknik *bandwidth* berubah-ubah.
2. Penggunaan teknik MIMO dengan beberapa antena pada sistem ADAPTIVE OFDM dan sistem *multiuser* OFDM biasa.
3. Peningkatan kinerja ADAPTIVE OFDM menggunakan *channel coding* dan teknik estimasi yang lebih baik

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Karthikeyan, S dan R. Venkatesh, *Energy Allocation And Multiple Access For Multicarrier Communicatio*, School Of Electronics And Communication Engineering Anna University Chennai, 2001.
- [2] Lawrey, Eric, *Adaptive Techniques for Multiuser OFDM*,. Disertasi Doktor pada Philosophy in Electrical and Computer Engineering School of Engineering James Cook University. Australia, Desember 2001.
- [3] Prasad, Ramjee dan Richard van Nee, *OFDM for Wireless Multimedia Communicatio*,. Boston. Artech House, 2000.
- [4] Rajendran, Venkatesh *et. Al*, *Downlink Performance Of An OFDM Based Multiple Access System For Indoor Wireless Communications*, AU-KBC Research Center Anna University Chennai, 2001.