**ABSTRAK**

Multi User (MU) Massive MIMO merupakan teknologi terkini yang mendukung perkembangan sistem komunikasi berkecepatan tinggi. Penelitian ini membahas sistem downlink MU-Massive MIMO pada kondisi kanal Rayleigh dan Uniformly Random Line of Sight (UR-LOS). Sistem ini diasumsikan bekerja pada kanal frequency- selective dan menggunakan teknik Orthogonal Frequency Division Muliplexing (OFDM). Kinerja sistem diamati pada kondisi dimana BTS diasumsikan mengetahui informasi kanal (Perfect CSI) dan pada kondisi dimana BTS mengestimasi kanal pada suatu coherence interval tertentu (Imperfect CSI) menggunakan metode Least-Square (LS) Estimation. BTS mengestimasi kanal dari pilot yang dikirimkan oleh user.

Parameter yang diamati dari penelitian ini adalah Bit Error Rate (BER) dan Spectral Efficiency dengan menggunakan teknik precoding Zero Forcing (ZF) dan Minimum Mean Square Error (MMSE). Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa penggunaan jumlah antena array dalam jumlah yang besar dapat meningkatkan Spectral Efficiency. Adanya estimasi kanal juga mempengaruhi kinerja sistem, dimana Spectral Efficiency pada kondisi perfect CSI lebih tinggi daripada kondisi dengan kanal estimasi.

**Kata Kunci :** MU-Massive MIMO, Rayleigh, UR-LOS, Perfect CSI, Imperfect CSI, Least-Square, BER, Spectral Efficiency, ZF, MMSE

**Pendahuluan**

Beberapa tahun terakhir telah dikembangkan teknologi MIMO, yang mana teknologi ini memiliki performa yang lebih baik dari teknologi SISO. Konsep ini menjadi latar belakang dikembangkannya sistem Massive MIMO, yang memungkinkan penggunaan jumlah antena yang lebih banyak sehingga diharapkan dapat menghasilkan performa yang lebih baik. Sistem Massive MIMO merupakan sistem yang menggunakan jumlah antena yang sangat banyak di sisi BTS, antena yang digunakan bisa berjumlah ratusan atau bahkan lebih [4]. Sitem ini memungkinan peningkatan yang siginifikan pada parameter spectral efficiency, energy efficiency, reabilitas dan coverage area dibandingkan degan sistem MIMO skala kecil. Agar dapat melayani beberapa user secara simultan maka digunakan sistem Multi User Massive MIMO (MU-Massive MIMO). Ratusan antena pada satu BTS dapat melayani puluhan user secara bersamaan. Masing-masing user menggunakan antena tunggal. Salah satu hal yang menguntungkan dengan penggunaan antena tunggal pada user adalah harganya yang tidak mahal, simpel dan penggunaan power yang lebih efisien, tetapi masing-masing user masih bisa mendapatkan throuhput yang tinggi.

Desain dan analisis sistem Massive MIMO ini menjadi subjek yang menarik untuk diteliti [a]-[d]. Beberapa keunggulan dari sistem Massive MIMO dibandingkan dengan MIMO konvensional diantaranya adalah, pertama, hanya BTS yang perlu mengestimasi kanal, kedua, jumlah antena BTS jauh lebih banyak daripada jumlah user, dan ketiga, teknik linier precoding yang sederhana bisa diterapkan baik di sisi uplink dan downlink [5]. Untuk menerapkan sistem MU-Massive MIMO yang merepresentasikan kondisi sesungguhnya diperlukan estimasi kanal di sisi BTS dan di sisi user. Akan tetapi, estimasi kanal akan sangat kompleks karena sebanding dengan jumlah antena BTS yang sangat banyak, maka beberapa penelitian sistem Massive MIMO sebelumnya mengasumsikan kondisi perfect CSI di sisi BTS maupun user [6] [7]. Padahal, pada kondisi yang sesungguhnya kanal dapat berubah sewaktu-waktu sesuai dengan kondisi lingkungan propagasi, sehingga perlu dilakukan estimasi kanal. Adanya estimasi kanal di sisi BTS ini dikenal dengan sistilah Imperfect CSI.

Penelitian ini menganalisa sistem komunikasi MU-Massive MIMO sel tunggal skema downlink pada kanal Rayleigh dan kanal Uniformly Random Line of Sight (UR-LOS). Sistem ini diasumsikan bekerja pada kanal frequency- selective dan menggunakan teknik Orthogonal Frequency Division Muliplexing (OFDM). Kinerja sistem diamati pada dua kondisi. Kondisi pertama diasumsian BTS mengetahui informasi kanal (perfect CSI). Kodisi kedua adalah BTS melakukan proses estimasi kanal (Imperfect CSI) dari pilot yang dikirimkan oleh user. Parameter yang diamati adalah Bit Error Rate (BER) dan Spectral Eficiency. Teknik linier precoding yang digunakan adalah Zero Frocing (ZF) dan Minimum Mean Square Error (MMSE).

Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa Semakin banyak jumlah antena array pada BTS maka spectral efficiency akan meningat tanpa batas. Selain itu Spectral Efficiency sistem dengan kondisi perfect CSI lebih tinggi daripada sistem dengan estimasi kanal.

**Model Sistem**

Sistem Multi User Massive MIMO (MU-Massive MIMO) sekma downlink ditunjukkan pada Gambar 1. BTS yang dilengkapi dengan antena sejumlah *M* melayani user sejumlah *K*, masing-masing user menggunakan antena tunggal, dimana *M* jauh lebih besar dari *K*. Sistem ini diasumsikan bekerja pada kanal frequency-selective, sehingga untuk mengatasinya digunakan teknik OFDM.

Vektor sinyal berisi simbol yang telah dimodulasi QAM dan berada pada subcarrrier ke-n, dimana n = 1,2,3,…*N* adalah subcarrier dari OFDM. Pada kondisi perfect CSI, diasumsikan BTS sudah mengetahui informasi kanal. Pada kanal Rayleigh matariks respon kanal dalam domain waktu dengan channel tap sejumlah L adalah , dimana . Matriks kanal ini berisi . Pada Kanal Uniformly Random Line of Sight (UR-LOS), tidak ada penghambur atau penghalang dan semua user berada pada posisi line of sight dengan antena array BTS. Respon kanal dalam domain waktu dirumuskan sebagai berikut:

Dimana adalah koefisien large scale fading, adalah spasi antar elemen antena dan adalah sudut masing-masing user. Posisi user adalah random dan terdistribusi uniform pada interval , karena BTS menggunakan antena Uniform Linier Array (ULA).

Diasumsikan bahwa matriks bernilai konstan pada coherence interval tertentu. Pada kondisi imperfect CSI, BTS perlu mengestimasi kanal. Proses estimasi kanal diperoleh dari pilot yang ditransmisikan oleh user. Pada tiap coherence interval, masing-masing user mentransmisikan orthogonal pilot sejumlah, pilot ini diketahui oleh user maupun BTS. Jumlah pilot yang ditransmisikan harus lebih banyak dari jumlah user (). Sehingga, secara kolektif, semua user mentransmisikan pilot sejumlah . Kemudian BTS akan. Sinyal pilot yang diterima BTS pada subcarrier ke-*n* adalah:

Dimana adalah deretan pilot dan adalah respon kanal pada subcarrier ke -*n.* Sedangkan adalah additive white Gaussian noise (AWGN). Dengan mengunakan metode Least-Square Estimation, maka matriks kanal hasil estimasi pada semua subcarrier adalah:

Error estimasi kanal adalah . Sehingga Mean Square Error (MSE) dari hasil estimasi kanal adalah . Setelah BTS mengetahui informasi kanal, kemudian BTS menggunakan matriks kanal ini untuk membentuk precoding. Teknik Precoding digunakan untuk mengatasi Multi User Interference (MUI). Dua teknik precoding yang digunakan pada penelitian ini adalah ZF dan MMSE, dirumuskan sebagai berikut:

Untuk memenuhi power constraint, maka precoding matriks perlu dikalikan dengan faktor skala

Selanjutnya, simbol pada masing-masing subcarrier dikalikan dengan precoding matriks dan menghasilkan precoded vector . Precoded vector berisi simbol yang akan ditransmisikan pada subcarrier ke-*n* melalui *M* antena BTS. Agar bisa mentransmisikan sejumlah N precoded vector ke sejumlah M antena BTS, maka dilakukan proses reordering dan menghasilkan reodered vector .

Sejumlah M vector merepresentasikan siyal domain frekuensi yang akan ditransmisikan ke sejumlah M antena. Sinyal domain waktu diperoleh dengan menerapkan inverse fast Fourier transform (IFFT) dari . Cyclix prefix ditambahkan ke sinyal domain waktu untuk mengatasi Intersymbol Interference (ISI) karena transmisi pada kanal frequency-selective.

Jika , dan adalah sinyal yang dikrimkan, sinyal yang diterima dan noise AWGN sample ke-*t* dalam domain waktu, maka **,**  dan adalah matriks dalam domain frekuensi. Dimana adalah matriks DFT berukuran . Sehingga matriks kanal berukuran dalam domain waktu adalah .

Setelah menghilangkan komponen cyclic prefix, maka sinyal yang diterima dalam domain frekuensi pada subcarrier ke-*n* dirumuskan menjadi :

Kemudian sinyal yang diterima masuk ke proses detection menggunakan teknik demodulasi QAM. Signal to Interference Noise Ratio (SINR) dari user ke-*k* pada subcarrier ke-*n*  didefinisikan sebagai:

Pembilang pada persamaan di atas adalah sinyal yang diinginkan untuk user ke-*k*, berupa matriks persegi dengan ukuran . Sedangkan penyebut merupakan jumlahan dari sinyal inteference user lain dalam satu sel yang sama ditambah dengan noise. Maka spectral efficiency daapat didapatkan dari pendekatan berikut:

**Numerical Result**

1. Sel Tunggal Sistem MU-Massive MIMO

Simulasi dilakukan pada sel tunggal yang bekerja pada frekuensi 3.4 GHz dengan asumsi interferensi hanya berasa dari dalam cel (inter-user interference) dan tidak ada interferensi dari sel lain. BTS menggunakan antena Uniform Linier Array (ULA) dengan spasi antar elemen . Transmisi data menggunakan skema modulasi OFDM dengan parameter yang mengacu pada OFDM numerology yang ditunjukkan pada Tabel 1.

|  |  |
| --- | --- |
| **OFDM parameters** | **Up to 6 Ghz** |
| Number of subcarriers | 512 |
| Number of used subcarriers | 300 |
| Subcarrier spacing | 15kHz |
| OFDM symbol duration | 66.77µs |
| Cyclic perfix duration | 4.69 µs |

Pada kondisi kanal frequency-selective Rayleigh fading, delay tap *L =* 8 dan memiliki power delay profile yang sama. Lintasan antara user dan BTS diasumsikan mengalami large-scale fading yang sama dengan nilai . Independent Rayleihh fading selanjutnya dapat dirujuk sebagai i.i.d. Rayleigh fading.

1. Bit Error Rate

BTS dilengkapi dengan antena (*M*) sejumlah 100 dan melayani user (*K*) sebanyak 10 secara simultan. Agar dapat bekerja dengan baik, maka jumlah antena BTS minimal empat kali jumlah user. Semua user diasumsikan berada pada posisi random dan terdistribusi uniform.



Bit Error Rate (BER) diamati pada rentang SNR 0 dB sampai 15 dB. BER pada kanal Rayleigh ditunjukkan pada Gambar 1. Precoding ZF dapat bekerja lebih baik daripada MMSE baik pada kanal Rayleigh maupun UR-LOS dengan ditandai dengan BER yang lebih kecil pada nilai SNR yang sama.

Pada kondisi Imperfect CSI, BTS mengestimasi kanal dari sinyal pilot yang ditransmisikan user. Masing-masing user mentransmisikan pilot , yaitu sejumlah 20. Ini adalah jumlah pilot minimal yang harus dapat ditransmisikan. Mean-Square Error (MSE) dari estimasi kanal ditunjukkan pada Gambar 2.



Semakin tinggi SNR maka noise akan semakin kecil sehingga MSE juga akan semakin kecil. BER dengan kanal hasil estimasi ditunjukkan pada Gambar 3.



Pada nilai SNR yang sama BER sistem dengan estimasi kanal (Imperfect CSI) dan perfect CSI tidak jauh berbeda. Akan tetapi karena adanya pengaruh noise, maka BER dengan estimasi kanal sedikit lebih tinggi daripada BER pada kondisi perfect CSI

1. Spectral Efficiency (SE)

Spectral efficiency adalah angka deterministic yang dapat dikukur pada bit per satuan waktu per bandwidh (bit/s/Hz). Dimana sum SE diperoleh dari jumlahan SE semua user dalam satu cell. Nilai SE yang besar menjadi kunci utama dalam mendesain sistem komunikasi. Salah satu cara untuk meningkatkan SE adalah dengan menambah jumlah antena pada BTS. Perubahan SE diamati dengan cara menambah jumlah antena BTS dengan user yang dilayani tetap dan pada SNR yang tetap yaitu 10dB. Nilai SNR ini dpilih karena pada SNR tersebut BER sistem bernilai kecil, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2, BER pada SNR 10dB adalah 10-3.

Grafik SE vs jumlah antena BTS pada kondisi perfect CSI ditunjukkan pada Gambar 4. Pada kanal Rayleigh, teknik precoding ZF mampu menghasilkan SE yang lebih tinggi daripada MMSE. Akan tetapi pada kondisi LOS, semakin banyak antena BTS, maka precoding MMSE bekerja sama baiknya dengan precoding ZF. Hal ini bisa dilihat ketika jumlah antena di bawah 100, ZF masih lebih baik daripada MSSE, tetapi pada penggunaan jumlah antena di atas 100 kinerja MMSE hampir sama dengan ZF.

Sedangkan grafik SE pada kondisi imperfect CSI ditunjukkan pada Gambar 5.



