**ABSTRAK**

Multi User Massive MIMO (MU-MIMO) is a form of multi-user MIMO technology in which unprecedented numbers of antennas serve a significantly smaller number of autonomous terminals. 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 BS diasumsikan mengetahui informasi kanal (Perfect CSI) dan pada kondisi dimana BS mengestimasi kanal pada suatu coherence interval tertentu (Imperfect CSI). Teknik estimasi kanal menggunakan metode Least-Square (LS) Estimation. BS 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 secara signifikan. Selain itu spectral efficiency skema downlink sangat bergantung pada precoding yang digunakan. Pada penggunaan elemen antena yang sangat banyak, ZF dan MMSE sama-sama bekerja dengan baik dalam menekan MUI.

**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 BS, 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 BS dapat melayani puluhan user secara bersamaan, dimana tiap 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.

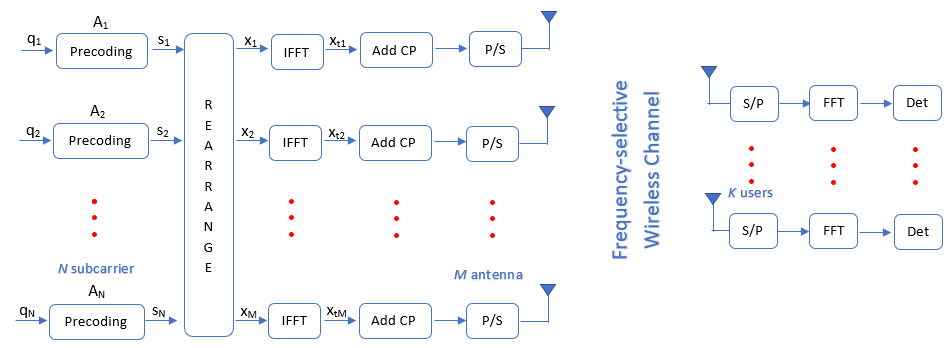
Desain dan analisis sistem Massive MIMO ini menjadi subjek yang menarik untuk diteliti [a]-[d]. Beberapa keunggulan dari sistem Massive MIMO dibandingkan dengan MIMO konvensional diantaranya adalah, pertama, hanya BS yang perlu mengestimasi kanal, kedua, jumlah antena BS jauh lebih banyak daripada jumlah 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 BS dan di sisi user. Akan tetapi, estimasi kanal akan sangat kompleks karena sebanding dengan jumlah antena BS yang sangat banyak, maka beberapa penelitian sistem Massive MIMO sebelumnya mengasumsikan kondisi perfect CSI di sisi BS maupun user [6] [7]. Padahal, pada kondisi yang sesungguhnya kanal dapat berubah sewaktu-waktu sesuai dengan kondisi lingkungan propagasi, sehingga perlu dilakukan estimasi kanal. This is because CSI is not only useful for obtaining a high SNR for the user but also reducing interference . Adanya estimasi kanal di sisi BS ini dikenal dengan istilah 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 BS mengetahui informasi kanal (perfect CSI). Kodisi kedua adalah BS 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 BS maka spectral efficiency akan meningat tanpa batas. Sehingga penggunaan jumlah elemen Massive elemen antena dengan jumlah user yang dilayani tetap akan secara siginifikan meningkatkan spectral efficiency. Selain itu downlink SE untuk user ke-*k* di dalam suatu cell sangat bergantung pada precoding yang digunakan. Karena semakin baik kemampuan precoding dalam menekan MUI, maka SE yang dihasilkan juga akan semakin tinggi.

**Model Sistem**



Sistem Multi User Massive MIMO (MU-Massive MIMO) sekma downlink ditunjukkan pada Gambar 1. BS 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 BS 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), diasumsikan tidak ada penghambur atau penghalang, dan semua user berada pada posisi line of sight dengan antena array BS. 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 BS menggunakan antena Uniform Linier Array (ULA). Dimana ULA hanya dapat mendeteksi posisi user secara unik pada interval .

Diasumsikan bahwa matriks bernilai konstan pada coherence interval tertentu. Pada kondisi imperfect CSI, BS 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 BS. Jumlah pilot yang ditransmisikan harus lebih banyak dari jumlah user (). Sehingga, secara kolektif, semua user mentransmisikan pilot sejumlah . Kemudian BS akan. Sinyal pilot yang diterima BS 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 BS mengetahui informasi kanal, kemudian BS 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:

Dimana merupakan SNR downlink. 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 BS. Agar bisa mentransmisikan sejumlah N precoded vector ke sejumlah M antena BS, 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:

Dimana . 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 dapat diperoleh dari pendekatan berikut:

Formula SE dapat dihitung secara numerical untuk tipe kanal dan skema precoding yang berbeda-beda. Downlink SE untuk user ke-*k* di dalam suatu cell sangat bergantung pada precoding yang digunakan. Karena semakin baik kemampuan precoding dalam menekan MUI, maka SE yang dihasilkan juga akan semakin tinggi.

**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. BS 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 BS 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

BS dilengkapi dengan antena (*M*) sejumlah 100 dan melayani user (*K*) sebanyak 10 secara simultan. Agar dapat bekerja dengan baik, maka jumlah antena BS 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 kondisi perfect CSI 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, BS mengestimasi kanal dari sinyal pilot yang ditransmisikan user. Masing-masing user mentransmisikan pilot , yaitu sejumlah 20. Ini adalah jumlah pilot minimal yang dapat ditransmisikan oleh user. 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 tinggi menjadi kunci utama dalam mendesain sistem komunikasi. Salah satu cara untuk meningkatkan SE adalah dengan menambah jumlah antena pada BS. Perubahan SE diamati dengan cara menambah jumlah antena BS 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 BS 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 BS, maka precoding MMSE bekerja sama baiknya dengan precoding ZF. Hal ini bisa dilihat ketika jumlah antena di bawah 150, ZF masih lebih baik daripada MSSE, tetapi pada penggunaan jumlah antena di atas 150 kinerja MMSE hampir sama dengan ZF. Sedangkan grafik SE pada kondisi imperfect CSI ditunjukkan pada Gambar 5. Baik pada kondisi perfect CSI maupun imperfect CSI, spectral efficiency total akan terus naik selama jumlah antena transmitter naik.





Grafik spectral efficiency sebagai fungsi jumlah user ditunjukkan pada Gambar 6. Terlihat bahwa sum SE juga akan naik apabila jumlah user bertambah dengan syarat jumlah user masih lebih kecil daripada jumlah antena antena BS  Kenaikan SE secara signifikan terjadi saat jumlah user 20 sampai 80. Akan tetapi ketika jumlah user di atas 80, grafik SE mulai agak landai. Karena jumlah user maksimal yang dapat dilayani saat antena BS berjumlah 100 adalah 80 user.



Selanjutnya dilakukan pengamatan dengan variasi jumlah user dan jumlah antena BS seperti yang ditunjukkan pada Gamar 7. Saat antena BS berjumlah 100 melayani user dengan jumlah yang masih di bawah jumlah antena, maka SE masih naik secara signifikan. Berbeda halnya saat antena BS berjumlah 30 dan melayani lebih dari 30 user, maka SE mengalami penurunan. Hal ini terjadi karena Multi User Interference (MUI) besar dan precoding tidak mampu mengatasinya.



**Conclusion**

Pada penelitian ini kami menganalisa kinerja sistem MU-Massive MIMO skema downlink pada kondisi perfect CSI dan imperfect CSI dengan menggunakan dua teknik precoding yang berbeda, yaitu ZF dan MMSE. Baik ZF maupun MMSE merupakan teknik precoding yang cocok untuk diterapkan pada sistem MU-Massive MIMO, dimana MMSE bekerja secara optimal pada penggunaan antena yang lebih banyak. Pada kondisi imperfect CSI, spectral efficiency sedikit mengalami penurunan karena adanya noise dari kanal transmisi.

Spectral Efficiency dapat ditingkatkan dengan cara menambah elemen antena pada BS. Sistem MU-Massive MIMO menawarkan kemungkinan untuk meningkatkan SE secara sigifikan dengan teknik linier precoding yang sederhana. Semakin banyak jumlah elemen antena yang digunakan maka SE akan semakin meningkat tanpa batas.