

**ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN *ZERO FORCING*  
*LINEAR PRECODING* PADA *MASSIVE MIMO* TERHADAP  
PERFORMANSI SISTEM KOMUNIKASI RADIO FREKUENSI**

**SKRIPSI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan  
gelar Sarjana Teknik di Program Studi Sistem Telekomunikasi



Oleh

Adisty Nurrahmah Laili

1904347

**PROGRAM STUDI SISTEM TELEKOMUNIKASI**

**KAMPUS UPI DI PURWAKARTA**

**UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA**

**2023**

**ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN *ZERO FORCING LINEAR  
PRECODING* PADA *MASSIVE MIMO* TERHADAP PERFORMANSI  
SISTEM KOMUNIKASI RADIO FREKUENSI**

Oleh

**Adisty Nurrahmah Laili**

Sebuah skripsi yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Sarjana Teknik pada Program Studi Sistem Telekomunikasi

© Adisty Nurrahmah Laili 2023

Universitas Pendidikan Indonesia

Agustus 2023

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

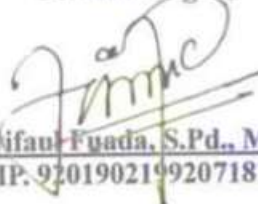
Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian,  
dengan dicetak ulang, difoto kopi, atau cara lainnya tanpa ijin dari penulis.

**LEMBAR PENGESAHAN****Adisty Nurrahmah Laili****1904347**

**ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN *MASSIVE* MIMO DENGAN *ZERO FORCING LINEAR PRECODING* TERHADAP PERFORMANSI SISTEM KOMUNIKASI RF**

**Disetujui dan Disahkan Oleh Pembimbing,****Pembimbing I,**

**Endah Setvowati, S.T., M.T.**  
**NIP. 920190219920908201**

**Pembimbing II,**

**Svifaul Fuada, S.Pd., M.T.**  
**NIP. 920190219920718101**

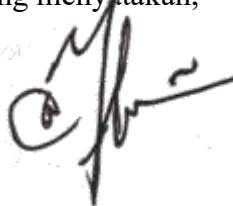
**Mengetahui,****Ketua Program Studi  
Sistem Telekomunikasi**

**Galura Muhammad Suranegara, S.Pd., M.T.**  
**NIP. 920190219920111101**

## SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul "*Analisis Pengaruh Penggunaan Zero Forcing Linear Precoding Pada Massive MIMO Terhadap Performansi Sistem Komunikasi Radio Frekuensi*" ini beserta seluruh isinya adalah benar-benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung risiko/sanksi apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya saya ini.

Yang menyatakan,



Adisty Nurrahmah Laili

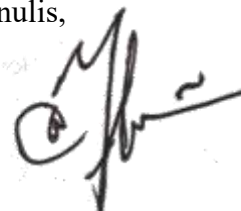
## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT. yang telah memberikan nikmat iman dan nikmat islam atas rahmat dan hidayah-Nya penulis masih diberikan kesempatan untuk bisa mengerjakan dan menyelesaikan penelitian skripsi. Shalawat dan juga salam penulis sampaikan kepada nabi Muhammad SAW selaku umat dan pengikutnya semoga syafaatnya tercurahkan kepada kita semua.

Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Sistem Telekomunikasi, Universitas Pendidikan Indonesia di Purwakarta yang berjudul: “Analisis Pengaruh Penggunaan *Zero Forcing Linear Precoding* Pada *Massive* MIMO Terhadap Performansi Sistem Komunikasi Radio Frekuensi” Peneliti menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna, hal ini dikarenakan keterbatasan pengetahuan dan kemampuan peneliti, dalam hal ini peneliti meminta saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini. Dalam penyusunan skripsi ini tentu saja peneliti tidak dapat menyelesaikannya sendiri tanpa adanya bantuan dari pihak lain mulai dari persiapan, penelitian serta dalam penyusunan baik berupa dorongan materil maupun moril. Sebelum itu penulis juga memohon maaf apabila ditemukan beberapa kesalahan dalam penulisan skripsi ini. Karena itu, saran atau masukan sangat diharapkan untuk perbaikan dimasa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca.

Purwakarta, Agustus 2023

Penulis,



Adisty Nurrahmah Laili

## UCAPAN TERIMA KASIH

*Allhamdulillahirabibil Alaamiin*, puji serta syukur penulis curah limpahkan kepada kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan penulis rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Pengaruh Penggunaan *Zero Forcing Linear Precoding* Pada *Massive MIMO* Terhadap Performansi Sistem Komunikasi Radio Frekuensi”, yang merupakan sebagian syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana (S1) Program Studi Sistem Telekomunikasi Universitas Pendidikan Indonesia.

Penulis menyadari bahwa tersusunnya skripsi ini tidak terlepas dari izin dan ridho Allah SWT, serta bantuan, dukungan, bimbingan dan nasehat dari berbagai pihak selama penyusunan skripsi ini. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT dengan segala rahmat serta karunia-Nya, yang selalu memberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Ibu penulis, Wiwi Mintarsih yang selalu memberikan cinta, kasih sayang, materi dan doa. Tanpa-nya penulis tidak mungkin bisa berada diposisi ini, hingga penulis mampu menyelesaikan program sarjana ini dari awal hingga akhir.
3. Ayah penulis, Jaelani yang selalu memberikan cinta, kasih sayang, motivasi dan doa. Tanpa-nya penulis tidak mungkin bisa berada diposisi ini, hingga penulis mampu menyelesaikan program sarjana ini dengan baik.
4. Adik penulis, Adhiya Yasmina Fajri, Adhifa Fajarunnahla, Muhammad Adhizar Anhar yang selalu memberikan kegembiraan, kasih sayang, dan doa, hingga penulis mampu menyelesaikan program sarjana ini dengan baik.
5. Prof. Turmudi, M.Ed., M.Sc., Ph.D. selaku Direktur Universitas Pendidikan Indonesia Kampus Purwakarta.
6. Dr. Idat Muqodas, M.Pd. selaku Wakil Direktur Universitas Pendidikan Indonesia Kampus Purwakarta.
7. Bapak Galura Muhammad Suranegara, S.Pd., M.T. selaku Ketua Program Studi Sistem Telekomunikasi Universitas Pendidikan Indonesia Kampus Purwakarta.

Adisty Nurrahmah Laili, 2023

**ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN ZERO FORCING LINEAR PRECODING PADA MASSIVE MIMO TERHADAP PERFORMANSI SISTEM KOMUNIKASI RADIO FREKUENSI**

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | Perpustakaan.upi.edu

8. Bapak Ahmad Fauzi, S.Si., M.T. selaku Ketua Program Studi Sistem Telekomunikasi Universitas Pendidikan Indonesia Kampus Purwakarta periode 2019 - 2023.
9. Ibu Endah Setyowati, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang selalu memberikan ilmu, waktu, arahan, motivasi dan pengalaman kepada penulis dengan penuh kesabaran hingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
10. Bapak Syifaul Fuada, S.Pd., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang selalu memberikan ilmu, waktu, arahan, motivasi dan pengalaman kepada penulis dengan penuh kesabaran hingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
11. Seluruh dosen dan tenaga pendidik Program Studi Sistem Telekomunikasi UPI Kampus Purwakarta yang tidak dapat disebutkan satu-persatu, yang telah memberikan ilmu, pengalaman, serta motivasi selama penulis berkuliah.
12. Pemilik NIM 1904347 yang telah berhasil dengan segala usahanya menyelesaikan skripsi serta dapat melewati masalah dalam proses penyusunan skripsi
13. Devi Puspita Dewi, Esa Noer Fadhila, Fauziyah Rhaudhatul Jannah, Sanni Deslia Pasaribu, Zamzam Kholidatuzzahra, Ega Restu Gumelar yang senantiasa kebersamai penulis ketika berjuang bersama-sama dalam menyusun skripsi.
14. Teman-teman Sistem Telekomunikasi Angkatan 2019 yang telah kebersamai dan memberikan penulis pengalaman yang berharga dalam menjalankan masa-masa perkuliahan dan hidup di perantauan.
15. Teman-teman Himpunan Mahasiswa Sistem Telekomunikasi yang telah kebersamai, memberikan pengalaman, dan pembelajaran yang berharga kepada penulis yang luar biasa.
16. Teman-teman Departemen Pengembangan Sumber Daya Organisasi Himpunan Mahasiswa Sistem Telekomunikasi yang senantiasa kebersamai, berjuang, dan memberikan pengalaman berharga kepada penulis selama menjalankan tanggung jawabnya.

## ABSTRAK

Teknologi *Massive MIMO* adalah perkembangan dari sistem MIMO yang memiliki kapasitas besar guna meningkatkan *throughput* dan efisiensi spektrum untuk melayani beberapa pelanggan dalam waktu yang bersamaan. Sementara itu, *Zero Forcing* merupakan salah satu teknik *precoding* linier yang dapat diterapkan pada sistem *Massive MIMO*. Teknik *precoding* linier ini dapat digunakan untuk mengurangi terjadinya interferensi pada saat proses pengiriman data dari sisi pengirim dan sisi penerima. *ZF Linear Precoding* merupakan metode yang meningkatkan kinerja transmisi dengan mengukur parameter BER dan SNR dari estimasi gelombang sinyal di tujuan. Penelitian ini melibatkan desain dan analisis menggunakan MatLab R2020a untuk mengamati nilai BER terhadap SNR. Desain yang dibuat pada penelitian ini menggunakan kanal AWGN serta untuk teknik modulasi yang digunakan yaitu modulasi QPSK. Selanjutnya, hasil yang diperoleh akan dianalisis lebih lanjut serta akan direpresentasikan dalam bentuk grafik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis perubahan nilai BER pada performansi *Massive MIMO* dan juga efek penambahan jumlah antenna terhadap performansi *Massive MIMO* dengan menggunakan  $32 \times 32$  dan  $64 \times 64$  antenna. Hasil dari pengujian *Massive MIMO* dengan *ZF Linear Precoding* atau tanpa *ZF Linear Precoding* menunjukkan perbedaan *coding gain* sebesar 15,5 dB pada antenna  $64 \times 64$  dan 19,2 dB pada antenna  $32 \times 32$ . Hal tersebut membuktikan bahwa penggunaan metode *ZF Linear Precoding* dapat mengurangi interferensi.

**Kata kunci:** *Massive MIMO*, *ZF Linear Precoding*, Antena, BER



## **ABSTRACT**

*Massive MIMO technology is an advancement of the MIMO system that aims to increase throughput and spectrum efficiency to serve multiple customers simultaneously. Meanwhile, Zero Forcing is one of the linear precoding techniques that can be applied to the Massive MIMO system. This linear precoding technique can be used to reduce interference during the data transmission process from the transmitter to the receiver side. ZF Linear Precoding is a method that enhances transmission performance by measuring Bit Error Rate (BER) and Signal-to-Noise Ratio (SNR) parameters from signal wave estimations at the destination. This research involves design and analysis using MatLab R2020a to observe BER values against SNR. The design in this study employs AWGN channels, and the modulation technique used is QPSK modulation. Furthermore, the obtained results will be further analyzed and presented in graphical form. The aim of this research is to analyze the changes in BER values in Massive MIMO performance and the effect of adding the number of antennas to Massive MIMO performance using 32x32 and 64x64 antennas. The results of testing Massive MIMO with or without ZF Linear Precoding show a coding gain difference of 15.5 dB for the 64x64 antenna and 19.2 dB for the 32x32 antenna. This demonstrates that the use of ZF Linear Precoding method can reduce interference.*

**Keywords:** *Massive MIMO, ZF Linear Precoding, Antenna, BER*

## DAFTAR ISI

LEMBAR HAK CIPTA .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
SURAT PERNYATAAN .....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK .....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR ISTILAH .....	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Skripsi .....	4
<b>BAB II KAJIAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1 <i>Massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)</i> .....	6
2.2 <i>Zero Forcing Linear Precoding</i> .....	7
2.3 Jenis Kanal .....	10
2.4 Modulasi.....	10
2.5 <i>Bit Error Rate (BER)</i> .....	12
2.6 <i>Signal to Noise Ratio (SNR)</i> .....	12
2.7 Arsitektur Sistem Komunikasi RF .....	12
2.8 <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)</i> .....	13
2.9 Diagram Konstelasi .....	14
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	<b>15</b>
3.1 Alat dan Bahan .....	15
3.2 Jenis Penelitian .....	15
3.3 Alur Penelitian.....	15
3.4 Gambaran Sistem Komunikasi.....	17
3.4.1 Sisi Pengirim.....	18

3.4.2	Sisi Penerima .....	21
3.5	Skenario Penelitian.....	25
3.6	Jadwal Penelitian.....	26
BAB IV TEMUAN DAN PEMBAHASAN.....		27
4.1.	Penjelasan dan Hasil Uji Coba Simulasi Program .....	28
4.1.1.	Pembuatan Data Masukan	28
4.1.2	Modulasi	29
4.1.3	Proses Transmisi Data	30
4.1.4	Proses <i>Zero Forcing Linear Precoding</i>	30
4.1.5	Kanal Transmisi	31
4.1.6	Demodulasi	31
4.1.7	Perhitungan BER	32
4.2.	Perbandingan Grafik Massive MIMO 32×32 dan 64×64 Antena .....	32
4.2.1	Massive MIMO Dalam Kondisi Ideal	32
4.2.2	Hasil Simulasi Massive MIMO Menggunakan 32×32 Antena	33
4.2.3	Hasil Simulasi <i>Massive MIMO</i> Menggunakan 64×64 Antena	36
4.2.4	Hasil Perbandingan Simulasi <i>Massive MIMO</i>	38
BAB V PENUTUP.....		42
5.1	Kesimpulan.....	42
5.2	Saran.....	42
DAFTAR PUSTAKA.....		43
LAMPIRAN.....		47

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Arsitektur MIMO .....	7
Gambar 2. 2	Ilustrasi Zero Forcing Linear Precoding .....	8
Gambar 2. 3	Simulasi Sistem Komunikasi .....	13
Gambar 2. 4	Diagram Konstelasi Sinyal QPSK .....	14
Gambar 3. 1	Flowchart Alur Penelitian .....	17
Gambar 3. 2	Blok Diagram Sistem Komunikasi RF .....	17
Gambar 3. 3	Blok Diagram Sisi Pengirim .....	18
Gambar 3. 4	Flowchart Input Data .....	19
Gambar 3. 5	Ilustrasi Proses Modulasi .....	19
Gambar 3. 6	Blok Diagram Sisi Penerima .....	21
Gambar 3. 7	Ilustrasi Proses Demodulasi .....	23
Gambar 3. 8	Ilustrasi Penelitian Skenario 1 .....	25
Gambar 3. 9	Ilustrasi Penelitian Skenario 2 .....	25
Gambar 3. 10	Ilustrasi Penelitian Skenario 3 .....	25
Gambar 4. 1	Syntax Input Data .....	28
Gambar 4. 2	Hasil Proses Modulasi .....	29
Gambar 4. 3	Syntax Proses Modulasi .....	29
Gambar 4. 4	Sampel Hasil Simulasi Sinyal OFDM .....	30
Gambar 4. 5	Sampel Hasil Proses ZF Linear Precoding .....	30
Gambar 4. 6	Ilustrasi Sinyal Melewati Kanal Transmisi .....	31
Gambar 4. 7	Syntax Program Kanal AWGN .....	31
Gambar 4. 8	Hasil Program Demodulasi QPSK .....	32
Gambar 4. 9	Syntax Program Demodulasi .....	32
Gambar 4. 10	Syntax Program Perhitungan BER .....	32
Gambar 4. 11	Massive MIMO Dalam Kondisi Ideal .....	32
Gambar 4. 12	Hasil Simulasi Program .....	33
Gambar 4. 13	BER vs SNR Massive MIMO 32×32 Antena .....	33
Gambar 4. 14	Diagram Konstelasi Massive MIMO 32×32 Antena .....	35
Gambar 4. 15	BER vs SNR Massive MIMO 64×64 Antena .....	36

**DAFTAR TABEL**

Tabel 2. 1 Sinyal Input Modulasi QPSK.....	11
Tabel 3. 1 Parameter ZF Linear Precoding .....	21
Tabel 3. 2 Parameter Kanal AWGN .....	22
Tabel 3. 3 Plotting hasil BER vs SNR .....	24
Tabel 3. 4 Jadwal Kegiatan Penelitian .....	26
Tabel 4. 1 Spesifikasi Laptop.....	27
Tabel 4. 2 Sistem Parameter.....	28
Tabel 4. 3 Nilai SNR Untuk Mencapai BER $10^{-4}$ Antena $32 \times 32$ .....	34
Tabel 4. 4 Nilai SNR Untuk Mencapai BER $10^{-4}$ Antena $64 \times 64$ .....	37
Tabel 4. 5 Nilai SNR Untuk Mencapai BER $10^{-4}$ .....	39

**DAFTAR ISTILAH**

ASK	=	<i>Amplitude Shift Keying</i>
AWGN	=	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	=	<i>Bit-Error Rate</i>
FFT	=	<i>Fast Fourier Transform</i>
FSK	=	<i>Frequency Shift Keying</i>
IFFT	=	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
ISI	=	<i>Inter Symbol Interference</i>
MIMO	=	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
OFDM	=	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
P/S	=	<i>Parallel-to-Serial</i>
PSK	=	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	=	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	=	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RF	=	<i>Radio Frequency</i>
S/P	=	<i>Serial-to-Paralel</i>
SNR	=	<i>Signal to Noise Ratio</i>
ZF	=	<i>Zero Forcing</i>

## DAFTAR PUSTAKA

- Adiono, T., Pradana, A., Fuada, S., & Aska, Y. (2018). Desain dan Implementasi Real-Time Visible Light Communication Systems Berbasis BPSK. *ELINVO (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, 3(2), 5. <https://doi.org/10.21831/elinvo.v3i2.21283>
- Ahmed, A. H., Thair Al-Heety, A., Al-Khateeb, B., & Mohammed, A. H. (2020). Energy Efficiency in 5G Massive MIMO for Mobile Wireless Network. *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/HORA49412.2020.9152847>
- Albreem, M. A., Juntti, M., & Shahabuddin, S. (2019). Massive MIMO Detection Techniques: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3109–3132. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2935810>
- Ali, F., Ngu, H., Muralindran, M., & Manas, H. (2018). BER Comparison of OFDM with M-QAM Modulation Scheme of AWGN and Rayleigh Fading Channels. *IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, 1*, 57–58. <https://doi.org/10.1109/ICSGRC.2018.8657503>
- Arumsidi, S. F., Isnawati, A. F., & Wahyudin, A. (2019). Analisis Unjuk kerja Jaringan Microcell LTE Berdasarkan Variasi Level Modulasi. *AITI: Jurnal Teknologi Informasi*, 16(2), 90–114.
- Aryanta, D., & Londong Allo, R. P. (2019). Dynamic Spatial Diversity Combiner pada Kanal Fading. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 7(3), 466. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v7i3.466>

Adisty Nurrahmah Laili, 2023

**ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN ZERO FORCING LINEAR PRECODING PADA MASSIVE MIMO TERHADAP PERFORMANSI SISTEM KOMUNIKASI RADIO FREKUENSI**

Universitas Pendidikan Indonesia | [repository.upi.edu](https://repository.upi.edu) | [Perpustakaan.upi.edu](https://perpustakaan.upi.edu)

- Asdira, I. F. (2019). Analisa Performansi Multiuser MIMO OFDM Zero Forcing Beamforming. Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh November
- Badan Pusat Statistik, I. (2021). *Statistik Telekomunikasi Indonesia 2021.pdf*. Badan Pusat Statistik. Publication Number: 06300.2212
- Chataut, R., & Akl, R. (2020). Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction. *Sensors*, *20*(10), 2753. <https://doi.org/10.3390/s20102753>
- Du, L., Li, L., Ngo, H. Q., Mai, T. C., & Matthaiou, M. (2021). Cell-Free Massive MIMO: Joint Maximum-Ratio and Zero-Forcing Precoder With Power Control. *IEEE Transactions on Communications*, *69*(6), 3741–3756. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3059300>
- Jans, H., & Isnawati, A. F. (2019). Analisis Perbandingan Kinerja Ekualisasi Zero Forcing dan MMSE pada FBMC-OQAM. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, *7*(3), 600–612. <http://dx.doi.org/10.26760/elkomika.v7i3.600>
- Jaradat, A., Hamamreh, J., & Arslan, H. (2019). Modulation Options for OFDM-Based Waveforms: Classification, Comparison, and Future Directions. *IEEE*, *7*, 17263–17278. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2895958>
- Ketseoglou, T., & Ayanoglu, E. (2019). Zero-Forcing Per-Group Precoding for Robust Optimized Downlink Massive MIMO Performance. *IEEE Transactions on Communications*, *67*(10), 6816–6828. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2927205>



- Khwandah, S. A., Cosmas, J. P., Lazaridis, P. I., Zaharis, Z. D., & Chochliouros, I. P. (2021). Massive MIMO Systems for 5G Communications. *Wireless Personal Communications*, *120*(3), 2101–2115. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08550-9>
- Kibona, L., Jian, L., & Yingzhuang, L. (2020). BER analysis using zero-forcing linear precoding scheme for massive MIMO under imperfect channel state information. *International Journal of Electronics*, *107*(6), 951–965. <https://doi.org/10.1080/00207217.2019.1692248>
- Mayzar, D. K., Dwiyantri, D., & Ananda, F. E. (2020). Rancang Bangun Simulasi Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) Berbasis Graphical User Interface (GUI). *Spektral*, *1*(1), 24–29. <https://doi.org/10.32722/spektral.v1i1.3433>
- Prayitno, R. A., Wirastuti, N. M. A. E. D., & Hartawan, I. G. A. K. D. D. (2018). Analisis Unjuk Kerja Zero Forcing Equalizer Pada Sistem OFDM MIMO. *Jurnal SPEKTRUM*, *5*(1), 68. <https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2018.v05.i01.p10>
- Purnamasari, D. N., Laksono, D. T., Saputro, A. K., & Hardiwansyah, M. (2022). Analisa Kinerja Metode Deteksi pada Sistem Komunikasi MIMO. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer Triac*, *9*(1). <https://journal.trunojoyo.ac.id/triac>
- Ren, Z., Zhao, A., & Wu, S. (2019). MIMO Antenna With Compact Decoupled Antenna Pairs for 5G Mobile Terminals. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, *18*(7). <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2916738>

- Sadinov, S. (2017). Simulation study of M-ARY QAM modulation techniques using Matlab/Simulink. *MIPRO*, 704–711. <https://doi.org/DOI:10.23919/MIPRO.2017.7973486>
- Thurpati, S., Mudavath, M., & Muthuchidambaranathan, P. (2021). Performance Analysis of Linear Precoding in Downlink Based on Polynomial Expansion on Massive MIMO Systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 2062(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2062/1/012006>
- Waluyo, C. B. (2018). BER Performance Analysis on AWGN Channel and Fading Channel by Using Diversity Method. *Conference SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta*, 4. <https://doi.org/10.28989/senatik.v4i0.213>
- Zhang, J., Dai, L., Li, X., Liu, Y., & Hanzo, L. (2018). On Low-Resolution ADCs in Practical 5G Millimeter-Wave Massive MIMO Systems. *IEEE Communications Magazine*, 56(7), 205–211. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1600731>
- Zuo, P., Sun, Z., & Huang, R. (2023). Extremely-Fast, Energy-Efficient Massive MIMO Precoding with Analog RRAM Matrix Computing. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2023.3244779>