

ANALISIS KINERJA OFDM DAN UFMC DENGAN MODULASI 64-QAM DAN 256-QAM PADA SISTEM KOMUNIKASI 5G

PERFORMANCE ANALYSIS OFDM AND UFMC WITH 64-QAM AND 256-QAM MODULATION IN 5G COMMUNICATION SYSTEM

Winda Pratiwi¹, Endah Setyowati², Hafiyyan Putra Pratama³

^{1,2,3}Program Studi S1 Sistem Telekomunikasi, Universitas Pendidikan Indonesia
¹windapratiwi@upi.edu, ²endahsetyowati@upi.edu, ³hafiyyan@upi.edu

Abstrak

Dengan adanya teknologi 5G, memungkinkan pula adanya evolusi teknik transmisi data yang baru. OFDM merupakan skema modulasi *multicarrier* pertama yang telah digunakan pada sistem komunikasi digital. Adapun sistem UFMC yang menjadi salah satu rekomendasi sebagai skema modulasi *multicarrier* baru untuk sistem komunikasi 5G yang menerapkan pemfilteran per *sub-band* alih-alih menggunakan *cyclic prefix*. Untuk itu penelitian ini akan melakukan analisis kinerja OFDM dan UFMC menggunakan modulasi 64-QAM dan 256-QAM untuk mengetahui performansi terbaik pada sistem komunikasi 5G dengan parameter umum sesuai dengan *Key Performance Indicators* (KPI) untuk *physical layer* (PHY) 5G, yaitu BER dengan target 10^{-4} terhadap SNR. Hasilnya menunjukkan sistem komunikasi dengan OFDM lebih baik dibandingkan dengan UFMC menggunakan modulasi 64-QAM dengan nilai SNR sebesar 22,14 dB.

Katakunci: OFDM, UFMC, M-QAM, BER, Sistem Komunikasi

Abstract

With the existence of 5G technology, it is also possible for the evolution of new data transmission techniques. OFDM is the first multicarrier modulation scheme that has been used in digital communication systems. The UFMC system is one of the recommendations as a new multicarrier modulation scheme for 5G communication systems that applies filtering per sub-band instead of using cyclic prefixes. For this reason, this study will analyze the performance of OFDM and UFMC using 64-QAM and 256-QAM modulation to find out the best performance on a 5G communication system with general parameters according to the Key Performance Indicators (KPI) for the 5G physical layer (PHY) is BER to SNR with target 10^{-4} . The results show that the communication system with OFDM is better than UFMC using 64-QAM modulation with an SNR value of 22.14 dB.

Keywords: OFDM, UFMC, M-QAM, BER, Communication System

1. PENDAHULUAN

Telekomunikasi telah berkembang dari kebutuhan komunikasi suara, menjadi komunikasi multimedia, kemudian membentuk menjadi teknologi yang tidak hanya menghubungkan manusia, tetapi juga mesin dan sensor [1]. Aplikasi *Machine-To-Machine* (M2M) di banyak industri mempercepat pertumbuhan *Internet of Things* (IoT) sehingga berbagai hal terhubung ke Internet dan satu sama lain. Secara global, koneksi M2M akan tumbuh 2,4 kali lipat, dari 6,1 miliar pada tahun 2018 menjadi 14,7 miliar pada tahun 2023. Akan ada 1,8 koneksi M2M untuk setiap anggota populasi global pada tahun 2023 [2].

Untuk memenuhi kebutuhan dari perkembangan teknologi telekomunikasi tersebut, hadirilah teknologi jaringan seluler generasi kelima (5G). Pada tahun 2020, jaringan 5G mulai digelar secara global. Hal ini menciptakan berbagai tantangan baru, seperti: diperlukan kecepatan data yang lebih tinggi dan *bandwidth* yang besar tetapi memberikan peningkatan kapasitas, latensi rendah, dan spektral tinggi efisiensi [3].

Aspek mendasar dari sistem komunikasi adalah transmisi data, dengan tiga komponen penting, yaitu: *transmitter*, kanal dan *receiver*. Dengan adanya teknologi 5G ini, memungkinkan adanya evolusi teknik transmisi data yang baru. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM)

sebagai skema modulasi *multicarrier* pertama yang telah digunakan pada sistem komunikasi digital. Adapun skema kandidat alternatif yang telah dipelajari secara intensif, seperti *Universal-Filtered Multicarrier* (UFMC) [4].

UFMC menjadi salah satu skema modulasi *multicarrier* baru untuk sistem komunikasi 5G yang menerapkan pemfilteran per sub-band alih-alih menggunakan *cyclic prefix*, seperti pada OFDM [5]. UFMC dinilai dapat mengurangi masalah emisi OOB dalam domain waktu [6].

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Taher, M. A. (2019) analisis dilakukan untuk mengetahui kinerja CP-OFDM dan UFMC, dengan parameter BER terhadap kecepatan yang bervariasi dari 0 kmph hingga 700 kmph, dan menggunakan modulasi 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa UFMC mengungguli CP-OFDM dalam hal kecepatan sistem [1].

Selain itu, pada penelitian oleh Wei, S., Li, H., Zhang, W., & Cheng, W. (2019) dilakukan evaluasi kinerja sistem UFMC sepenuhnya dalam hal BER, *spectral efficiency* (SE), *peak-to-average power ratio* (PAPR), *carrier frequency offset* (CFO), *multipath fading channels*, *effects of time delay* (TD). Hasilnya mengungkapkan bahwa UFMC memiliki PAPR yang lebih tinggi yang dipengaruhi oleh CFO, tetapi memiliki kelebihan dalam hemat energi [8]. Namun, modulasi yang digunakan hanya 16-QAM, serta tidak dilakukan evaluasi pada sistem OFDM dengan parameter serupa.

Berdasarkan latar belakang di atas, diperlukan penelitian untuk merancang dan menganalisis kinerja UFMC dan OFDM yang berbeda dari penelitian yang sudah ada sebelumnya, yaitu pada penelitian ini menggunakan modulasi 64-QAM dan 256-QAM untuk mengetahui rekomendasi rancangan sistem komunikasi 5G dengan performansi yang terbaik dan menggunakan parameter umum sesuai dengan *Key Performance Indicators* (KPI) dan konfigurasi *physical layer* (PHY) untuk 5G, sehingga dapat memberikan pedoman untuk memilih skema modulasi yang sesuai dengan persyaratan. Parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah *Bit Error Rate* (BER) dengan target 10^{-4} terhadap *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan nilai *Power Spectral Density* (PSD). Rancangan sistem komunikasi juga disesuaikan dengan standar 3GPP TS 38.211 *version* 16.2.0 untuk Sistem Komunikasi 5G.

2. PERANCANGAN SISTEM

2.1 *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDM)

Salah satu jenis transmisi *multicarrier* adalah OFDM, yaitu aliran data serial berkecepatan tinggi dibagi menjadi beberapa *subcarrier orthogonal* yang berkecepatan rendah (Wulansari, 2017). Pengaruh dari *noise* dan interferensi pada sinyal informasi dapat dikurangi oleh *multicarrier* dengan lebih baik daripada menggunakan *single carrier*, sehingga OFDM mampu menanggulangi masalah *delay spread*, *multipath*, *intercarrier interference* (ICI), dan *intersymbol interference* (ISI).

Dalam melakukan proses pengolahan sinyal, OFDM menggunakan Algoritma *Discrete Fourier Transform* (DFT) dan *invers*-nya (IDFT) atau biasa disebut juga dengan *Fast Fourier Transform* (FFT) dan *invers* FFT (IFFT). Algoritma IFFT berfungsi sebagai pembuatan simbol OFDM atau modulator dan FFT berfungsi sebagai pengurai simbol OFDM atau demodulator.

Masing-masing *subcarrier* termodulasi pada OFDM ini dapat direpresentasikan seperti pada persamaan (1):

$$S_c(t) = A_c(t)e^{j(\omega ct + \theta(t))} \quad (1)$$

di mana :

$S_c(t)$ = nilai *subcarrier* termodulasi

$A_c(t)$ = amplitudo pada *subcarrier*

ω_c = frekuensi sudut *subcarrier*

$\theta(t)$ = modulasi fase pada *subcarrier*

Algoritma IFFT sebagai modulator bekerja dengan mengubah simbol dari domain frekuensi menjadi domain waktu, memiliki persamaan (2):

$$s(t) = \sum_{k=0}^{K-1} s(k) \sin\left(\frac{\pi t k}{2K}\right) - j \sum_{k=0}^{K-1} s(k) \cos\left(\frac{\pi t k}{2K}\right) \quad (2)$$

Sementara, pada algoritma FFT sebagai demodulator dengan mengubah simbol dari domain waktu menjadi domain frekuensi, memiliki persamaan (3):

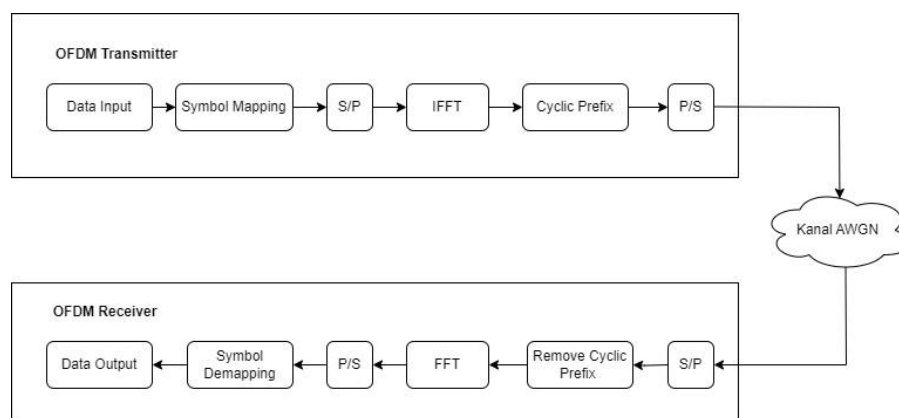
$$s(k) = \sum_{t=0}^{K-1} s(t) \sin\left(\frac{2\pi t k}{K}\right) - j \sum_{t=0}^{K-1} s(t) \cos\left(\frac{2\pi t k}{K}\right) \quad (3)$$

di mana :

K = Jumlah point *subcarrier* total (IFFT)

$s(t)$ = nilai sinyal pada domain waktu

$s(k)$ = nilai dari spektrum ke-k (domain frekuensi)



Gambar 1. Blok Konfigurasi Sistem dengan OFDM

2.2 Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC)

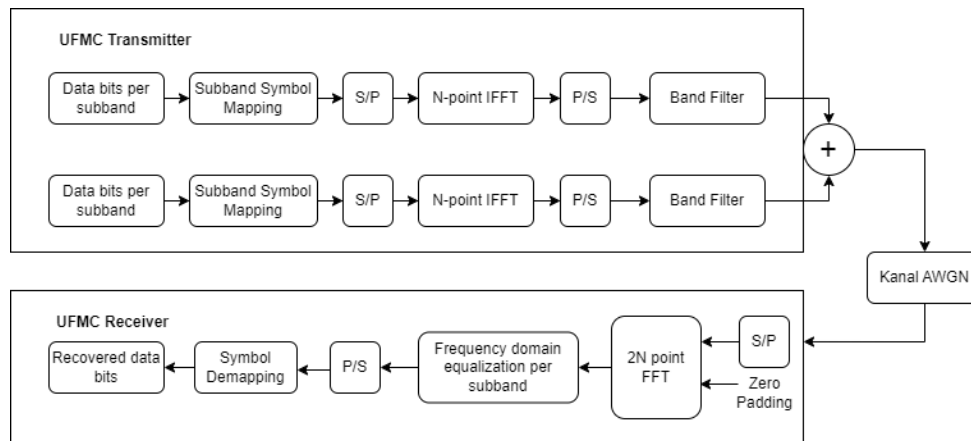
Berdasarkan aturan *International Telecommunication Union* (ITU), persyaratan sistem 5G adalah diantaranya, membutuhkan: penggunaan spektrum yang lebih efisien, kecepatan data yang lebih tinggi, dan latensi yang lebih rendah. Sistem UFMC menjadi salah satu yang dipertimbangkan untuk sistem komunikasi 5G oleh para akademisi. Penggunaan UFMC mengatasi masalah *Inter-carrier Interference* (ICI) pada sistem OFDM (Sakkas, 2021).

UFMC merupakan kombinasi dari fitur OFDM dan FBMC. Hal ini didasarkan pada pembagian frekuensi *multiplexing* FDM, di mana aliran data yang masuk dibagi menjadi sub-aliran yang berbeda. Adapun keuntungan dari UFMC adalah pengurangan OOB dan sinkronisasi frekuensi waktu yang lebih baik [10].

Mekanisme UFMC adalah total *bandwidth* dibagi menjadi beberapa *sub-band* B . Setiap *subband* dapat dibagi lagi menjadi beberapa *sub-carrier*. Adapun total N *sub-carrier*. Transformasi IFFT titik- N diambil untuk mengubah dari frekuensi ke domain waktu. Sinyal keluaran kemudian difilter menggunakan filter FIR dengan panjang L . Sinyal keluaran dapat direpresentasikan dengan menggunakan persamaan (4):

$$y_i(k) = x_i \times f_i = \sum_{l=0}^{L-1} f_i(l)x_i(k-l); k = 0, \dots, N+L-1 \quad (4)$$

Karena konvolusi linier dari x_i dan f_i , panjang simbol yang dihasilkan menjadi $N+L-1$. Filter FIR yang digunakan di sini adalah filter *Dolph-Chebyshev*. Filter tersebut digunakan untuk memfilter setiap sub-band adalah karena filter ini mengurangi radiasi OOB. Berbeda dengan filter *rectangular* yang digunakan dalam OFDM, di mana fungsi *sinc* yang berasal dari transformasi *Fourier* bentuk simbol *rectangular* menyebabkan tingginya tingkat *side lobe spektral*. Karena tingkat *side lobe spektral* yang tinggi ini, membuat radiasi OOB ke *sub-band* tetangga meningkat secara signifikan [10]. Gambar 3 menunjukkan blok konfigurasi sistem dengan UPMC.



Gambar 3. Blok Konfigurasi Sistem dengan UPMC

2.3 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Quadrature Amplitude Modulation (QAM), yang merupakan bentuk dari modulasi digital, dimana sinyal informasi digital diubah amplitudo dan fasenya ke dalam fungsi gelombang pembawa (*carrier*). Modulasi M -QAM merupakan teknik pengkodean M -ary QAM dengan kemungkinan kombinasi sebanyak M kombinasi berbeda yang terdiri dari n bit data [9]. Sinyal QAM menggunakan dua *carrier* kuadratur dan masing-masing dimodulasi oleh bit informasi. Untuk sinyal M -ary square QAM, persamaan sinyal dapat dinyatakan dengan persamaan (5):

$$s_i(t) = \sqrt{2E_i} a_i \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_i}{T}} b_i \sin(2\pi f_c t) \quad (5)$$

dengan $0 \leq t \leq T, i = 1, 2, \dots, M$ di mana:

E_i = energi sinyal dengan amplitudo terendah

(a_i, b_i) = sepasang bilangan bulat yang menunjukkan titik sinyal pada konstelasi

f_c = frekuensi *carrier*

Data biner yang telah dipetakan menjadi *mapper M-QAM*, selanjutnya dipecah dalam bentuk serial paralel dan dimodulasi oleh sinyal *subcarrier* dengan frekuensi tertentu, sehingga menghasilkan sinyal yang saling orthogonal. Semua sinyal ini ditambahkan hingga menghasilkan simbol modulasi *multicarrier*, seperti OFDM dan UPMC.

2.4 Kanal AWGN

Kanal AWGN ini memiliki sifat *additive* dengan artian *noise* dijumlahkan dengan sinyal, dan sifat *white* pada *noise* yang tidak tergantung pada frekuensi operasi sistem dan memiliki rapat daya yang konstan, serta *Gaussian* memiliki arti besarnya tegangan *noise* memiliki besar peluang yang terdistribusi secara *Gaussian*. Intinya, kanal AWGN memiliki karakteristik *bandwidth* yang tidak terbatas dengan respon frekuensi yang tetap untuk semua frekuensi (Wulansari, 2017), sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan (6)

$$y(t) = s(t) + n(t) \quad (6)$$

di mana :

$y(t)$ = sinyal yang diterima
 $s(t)$ = sinyal yang dikirim
 $n(t)$ = *noise* AWGN

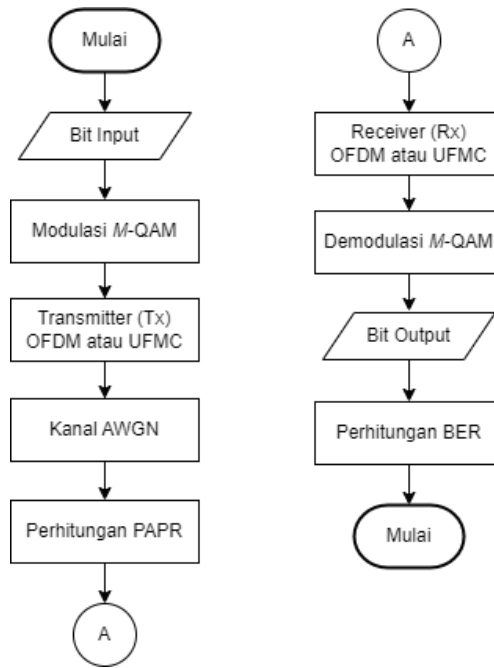
2.5 Proses Pengujian

Beberapa instrumen penunjang yang dibutuhkan untuk melakukan penelitian ini, yaitu *software* MATLAB R2023a *Licensed* dan sebuah perangkat keras dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Processor : AMD Athlon Silver 3050U with Radeon Graphics (2.3 GHz – 3.2 GHz, 1 MB L2 cache, 2 cores)
- RAM : 4 GB DDR4
- HDD : 512 SSD
- OS Windows 10

Instrumen tersebut digunakan sebagai media untuk menjalankan simulasi sistem komunikasi 5G dengan modulasi 64-QAM dan 256-QAM pada sistem transmisi UFMC dan OFDM melalui kanal AWGN

Pengujian dilakukan melalui perancangan sistem yang terdiri dari *generate random bits* sebagai masukan, modulasi dan demodulasi pada sistem OFDM dan UFMC melalui kanal AWGN, dan perhitungan BER terhadap SNR. Perancangan sistem ini dilakukan sesuai prosedur yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Flowchart Penelitian

Parameter rancangan sistem OFDM dan UFMC pada penelitian ini berdasarkan standar 3GPP TS 38.211 *version* 16.2.0 untuk Sistem Komunikasi 5G dapat dilihat pada Tabel 1.

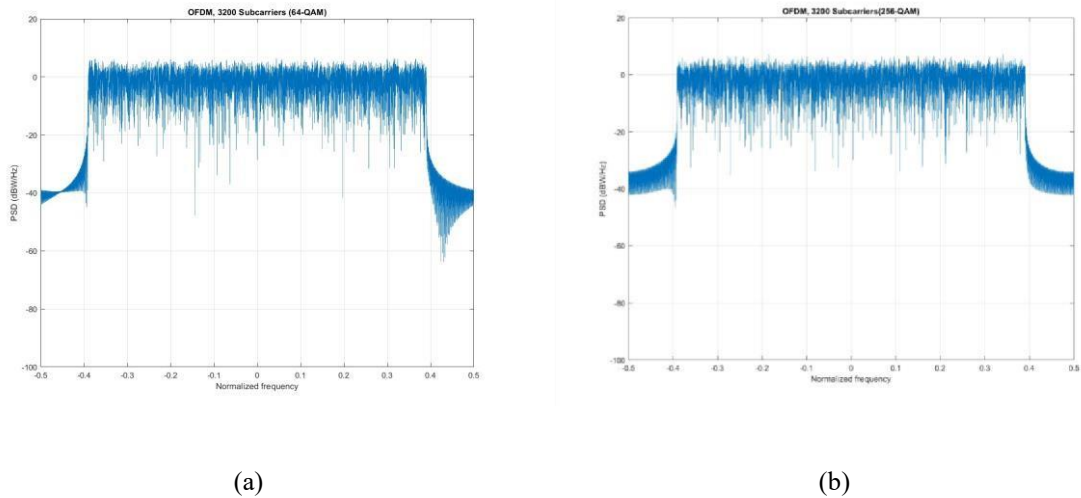
Tabel 1. Parameter Rancangan Sistem Komunikasi pada OFDM dan UFMC

| Skema Multicarrier | OFDM | UFMC |
|---------------------------|------|---|
| <i>FFT size</i> | 4096 | 4096 |
| <i>Subband size</i> | 3200 | 128 |
| <i>Number of Subbands</i> | 1 | 25 |
| <i>CP-length</i> | 288 | - |
| <i>Subband Offset</i> | 32 | 32 |
| <i>FIR filter type</i> | - | <i>Chebyshev dengan 40 dB side lobe attenuation</i> |
| <i>Filter-length</i> | - | 128 |

3.HASIL DAN PENGUJIAN SISTEM

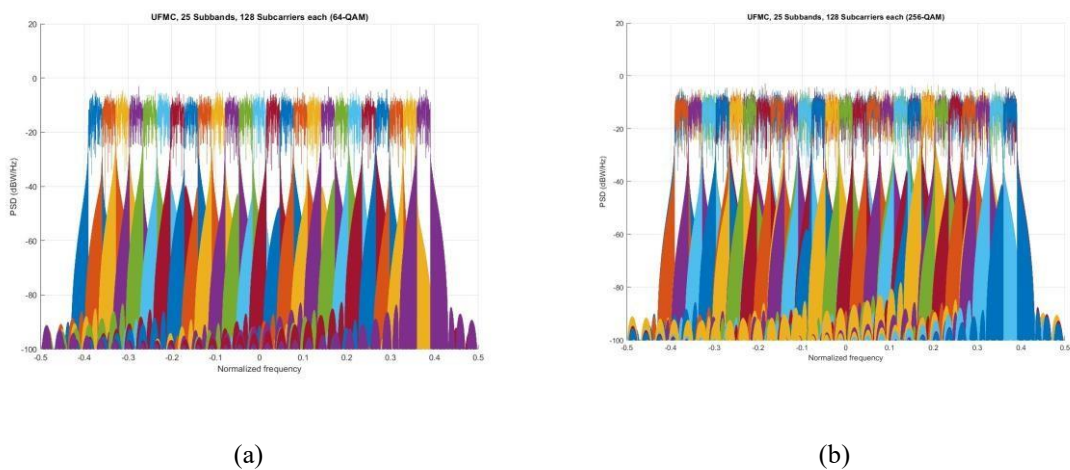
Total spektrum OFDM adalah jumlah dari semua spektrum pada setiap *subcarrier*. Pada penelitian ini, spektrum OFDM terdiri dari 3200 *subcarrier*, sehingga memiliki nilai *Power Spectral Density* (PSD) yang ditunjukkan pada Gambar 6. Sementara, pada sistem UFMC, spektrum UFMC terdiri dari 3200 *subcarrier* dengan seluruh *band* dibagi menjadi 25 *sub-band* dengan masing-masing *sub-band* memiliki 128 *subcarrier* dan memfilternya secara terpisah, sehingga spektrum UFMC seperti ditunjukkan pada Gambar 7.

3.1 Analisis Gelombang Spektrum pada sistem OFDM dan UPMC



Gambar 6 PSD bentuk gelombang OFDM dengan 3200 *subcarrier* (a) dengan modulasi 64-QAM, dan (b) dengan modulasi 256-QAM

Gambar 6(a) menunjukkan spektrum OFDM dengan 64-QAM yang memiliki kerapatan spektral daya dengan spektrum konstan -10 dBW/Hz dalam rentang -0,4 hingga 0,4. Antara 0,4 dan 0,5 dapat terlihat emisi OOB sebesar -40 dBW/Hz. Sementara, pada Gambar 6(b) menunjukkan spektrum OFDM dengan 256-QAM yang memiliki kerapatan spektral daya dengan spektrum konstan -10 dBW/Hz dalam rentang -0,4 hingga 0,4. Antara 0,4 dan 0,5 dapat terlihat emisi OOB lebih besar dibandingkan dengan penggunaan modulasi 64-QAM, yaitu sebesar -35 dBW/Hz.

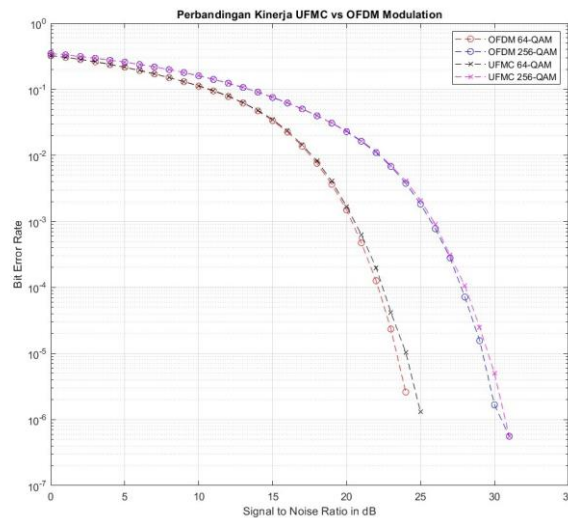


Gambar 7 PSD bentuk gelombang UPMC dengan 25 *sub-band* (a) dengan modulasi 64-QAM, dan (b) dengan modulasi 256-QAM

Gambar 7 menunjukkan kerapatan spektral daya UPMC dengan modulasi 64-QAM dan 256QAM memiliki dengan OOB emisi sebesar -80 dBW/Hz dan rentang konstan -10 dBW/Hz. OOB skema UPMC jauh lebih kecil dibandingkan OOB skema OFDM, karena penggunaan filter. PSD sinyal OOB berkurang dengan cepat hingga -80dB pada skema UPMC, sedangkan pada skema OFDM, PSD sinyal OOB hanya berkurang menjadi -40dB ketika menggunakan modulasi 64-QAM dan -35dB dengan modulasi 256-QAM. Hal ini menjadi keunggulan untuk skema UPMC.

3.2 Analisis Hasil Pengujian Berdasarkan Nilai BER

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil pengukuran BER terhadap SNR seperti yang ditunjukkan Gambar 8.



Gambar 8. Grafik hasil pengukuran BER terhadap SNR pada OFDM dan UPMC

Dari Gambar 8 dapat diketahui bahwa sistem OFDM dan UPMC dengan modulasi 64-QAM dan 256-QAM pada kanal AWGN mampu mencapai BER 10^{-4} , ketika nilai SNR yang dibutuhkan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai BER terhadap SNR pada sistem OFDM dan UPMC

| <i>M</i> -QAM | OFDM | UPMC |
|---------------|----------|----------|
| | SNR | SNR |
| 64-QAM | 22,14 dB | 22,44 dB |
| 256-QAM | 27,76 dB | 28,04 dB |

Dari Tabel 3 dapat kita ketahui bahwa hasil performansi yang paling baik adalah ketika menggunakan OFDM dengan modulasi 64-QAM dengan nilai SNR sebesar 22,14 dB untuk mencapai BER 10^{-4} . Sementara itu, pada UPMC dengan menggunakan modulasi 64-QAM nilai SNR yang diperlukan untuk mencapai BER 10^{-4} memiliki nilai selisih lebih besar, yaitu 0,3 dB dibandingkan dengan OFDM. Hasil yang sama juga ditunjukkan, ketika modulasi yang digunakan adalah 256-QAM, nilai SNR yang diperoleh OFDM lebih baik dibandingkan pada UPMC, yaitu 27,76 dB dan 28,04 dB.

4.KESIMPULAN

Dari hasil perbandingan kinerja antara sistem OFDM dan UPMC dengan modulasi 64-QAM dan 256-QAM, dapat diketahui bahwa, penggunaan modulasi yang berbeda, memiliki pengaruh terhadap sistem komunikasi pada OFDM ataupun UPMC. Semakin banyak bit yang disimbolkan atau semakin besar nilai *M*-QAM, maka probabilitas banyak bit yang *error* dari simbol yang membawanya akan semakin besar. Sehingga, performansi terbaik untuk sistem komunikasi 5G adalah ketika menggunakan modulasi 64-QAM. Kinerja OFDM dengan modulasi 64-QAM memiliki nilai SNR paling rendah untuk mencapai target BER 10^{-4} , yaitu sebesar 22,14 dB. Sehingga, OFDM dengan modulasi 64-QAM memiliki performansi sistem komunikasi 5G paling baik. Sementara,

untuk sistem komunikasi dengan UFMC, hanya unggul dalam mengurangi emisi OOB dalam domain frekuensi pada PSD, yaitu dengan nilai -80 dBW/Hz, sementara pada OFDM mencapai emisi OOB -35 dBW/Hz ketika menggunakan modulasi 256-QAM. Hal ini, karena dipengaruhi penggunaan filter Dolph-Chebyshev window dan pembagian subcarrier kedalam 25 subband. Namun, pengurangan emisi OOB pada UFMC, belum bisa mengungguli performansi sistem komunikasi 5G dibandingkan dengan OFDM, ditandai dengan nilai BER yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Taher, M. A. (2019). Enhanced 5G Throughput using UFMC Multiplexing. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54(5), 1–11. <https://doi.org/10.35741/issn.02582724.54.5.25>
- [2] Cisco. (2020). Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. *Cisco: San Jose, CA, USA*, 10(1), 1-35.
- [3] Esenogho, E., Djouani, K., & Kurien, A. M. (2022). Integrating Artificial Intelligence Internet of Things and 5G for Next-Generation Smartgrid: A Survey of Trends Challenges and Prospect. *IEEE Access*, 10, 4794–4831. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140595>
- [4] Shalaby, E. M., Hussin, S. I., & Dessoky, M. I. (2021). Performance Evaluation of 5G Modulation Techniques. *Wireless Personal Communications*, 121(4), 2461–2476. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08831-3>
- [5] Cai, Y., Qin, Z., Cui, F., Li, G. Y., & McCann, J. A. (2018). Modulation and Multiple Access for 5G Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), 629–646. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2766698>
- [6] Sakkas, L., Stergiou, E., Tsoumanis, G., & Angelis, C. T. (2021). 5G UFMC Scheme Performance with Different Numerologies. *Electronics*, 10(16), 1–9. <https://doi.org/10.3390/electronics10161915>
- [7] Ni'amah, K., Praja, M. P. K., & Marimbun, Y. D. (2022). Analisis Perbandingan Modulasi 16-QAM Dan 64-QAM Pada Kanal Additive White Gaussian Noise Dan Rayleigh Fading. *CESS (Journal of Computer Engineering, System and Science)*, 7(1), 90–98.
- [8] Wei, S., Li, H., Zhang, W., & Cheng, W. (2019). A Comprehensive Performance Evaluation of Universal Filtered Multi-Carrier Technique. *IEEE Access*, 7, 81429–81440. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923774>
- [9] Wulansari, E. (2017). *Analisis Kinerja Teknik Linear Precoding Block Diagonalization Pada Sistem Multi User Mimo-Gfdm Menggunakan Detektor Mmse*. Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [10] Carrubba, G. L. (2018). Test of 5G multicarrier schemes using Software Defined Radio. *Thesis, Politecnico Di Torino*.
- [11] Pfau, T., Hoffmann, S., & Noe, R. (2009). Hardware-Efficient Coherent Digital Receiver Concept With Feedforward Carrier Recovery for M-QAM Constellations. *Journal of Lightwave Technology*, 27(8), 989–999. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2010511>
- [12] Ilmiawan, S. (2011). Perbandingan Kinerja LDPC pada Kanal AWGN dengan Modulasi QPSK dan BPSK. *EEPIS-ITS Institut, Teknologi Sepuluh Nopember*, 1–6.