

SIMULASI SKEMA *UNIVERSAL FILTERED MULTI-CARRIER* (UFMC) PADA SISTEM KOMUNIKASI DIGITAL

Rafi Ardhan Fauzan ^{1*}, Theophilus Wellem ²

^{1*,2} Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Kristen Satya Wacana, Kota Salatiga, Provinsi Jawa Tengah, Indonesia.

Email: 672019025@student.uksw.edu ^{1*}, theophilus.wellem@uksw.edu ²

Histori Artikel:

Dikirim 20 Juni 2023; Diterima dalam bentuk revisi 22 Juli 2023; Diterima 8 Agustus 2023; Diterbitkan 10 September 2023. Semua hak dilindungi oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) STMIK Indonesia Banda Aceh.

Abstrak

Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC) merupakan salah satu skema modulasi multi-carrier yang merupakan alternatif dari skema Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) yang saat ini digunakan pada sistem komunikasi 4G dan wireless local area network (WLAN). Kelemahan OFDM terletak pada nilai peak-to-average power ratio (PAPR) yang tinggi dan out-of-band (OOB) emission yang dapat menyebabkan terjadinya interferensi antar carrier. UFMC adalah salah satu skema yang dipakai untuk mengatasi kelemahan dari OFDM. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari performa UFMC untuk transmisi data pada kanal AWGN dengan modulasi 256-QAM, 1024-QAM, dan 4096-QAM. Selain itu, FFT 256 titik, 512 titik, dan 1024-titik juga digunakan untuk melihat efeknya pada bit error rate (BER) yang dapat dicapai dan nilai PAPR. Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk semua ukuran FFT dan m-QAM yang disimulasikan, 256-QAM menghasilkan nilai BER yang paling rendah. Pada penggunaan FFT 1024 titik, nilai BER 10^{-3} dapat dicapai dengan SNR sebesar 20 dB. Nilai PAPR paling rendah yang diperoleh pada simulasi adalah 7.1891 dB.

Kata Kunci: UFMC; Modulasi; Bit Error Rate; Peak-To-Average Power Ratio.

Abstract

Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC) is a multi-carrier modulation scheme that is an alternative to the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) scheme currently used in 4G communication systems and wireless local area networks (WLAN). The weakness of OFDM lies in the high peak-to-average power ratio (PAPR) value and out-of-band (OOB) emission which can cause interference between carriers. UFMC is one of the schemes used to overcome the weaknesses of OFDM. This research aims to study the performance of UFMC for data transmission on AWGN channel with 256-QAM, 1024-QAM, and 4096-QAM modulation. In addition, 256-point, 512-point, and 1024-point FFTs were also used to see the effect on the achievable bit error rate (BER) and PAPR value. The simulation results show that for all simulated FFT sizes and QAM values, 256-QAM produces the lowest BER value. Using a 1024-point FFT, a BER of 10^{-3} can be achieved with an SNR of 20 dB. The lowest PAPR value obtained in the simulation is 7.1891 dB.

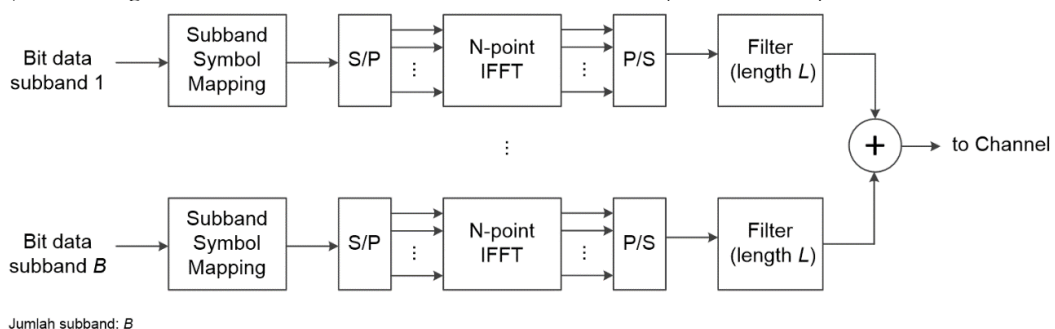
Keyword: UFMC; Modulation; Bit Error Rate; Peak-To-Average Power Ratio.

1. Pendahuluan

Multi-carrier modulation scheme atau skema modulasi yang menggunakan lebih dari satu sinyal pembawa (*carrier signal*) merupakan teknik yang saat ini digunakan pada sistem komunikasi *wireless* untuk memperoleh *data rate* yang tinggi. Salah satu skema modulasi *multi-carrier* yang digunakan secara luas pada sistem komunikasi *wireless* adalah *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) [1][2]. Pada skema OFDM, spektrum frekuensi yang tersedia untuk transmisi data dibagi menjadi beberapa *subcarrier* di mana setiap *subcarrier* membawa *data stream* dengan kecepatan (*rate*) yang rendah. *Subcarrier-subcarrier* ini kemudian dimodulasi secara independen untuk mentransmisikan data [2]. Keunggulan OFDM terletak pada kemudahan implementasi skema tersebut menggunakan *inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) dan *Fast Fourier Transform* (FFT) masing-masing pada *transmitter* dan *receiver*, serta ketahanannya terhadap *intersymbol interference* (ISI) dan *multipath fading* [3]. Hal ini membuat OFDM menjadi pilihan untuk digunakan pada standar televisi digital (DVB), komunikasi 4G LTE dan *wireless local area network* (WLAN) atau yang lebih dikenal dengan WiFi. Kelemahan dari skema OFDM adalah mempunyai nilai *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR) yang tinggi dan adanya *Out-of-Band* (OOB) *emission*. Nilai PAPR yang tinggi menyebabkan penggunaan daya yang tidak efisien pada *power amplifier* di bagian *transmitter*, sedangkan OOB *emission* dapat menyebabkan interferensi pada kanal frekuensi yang berdekatan [2][3] atau *intercarrier interference* (ICI).

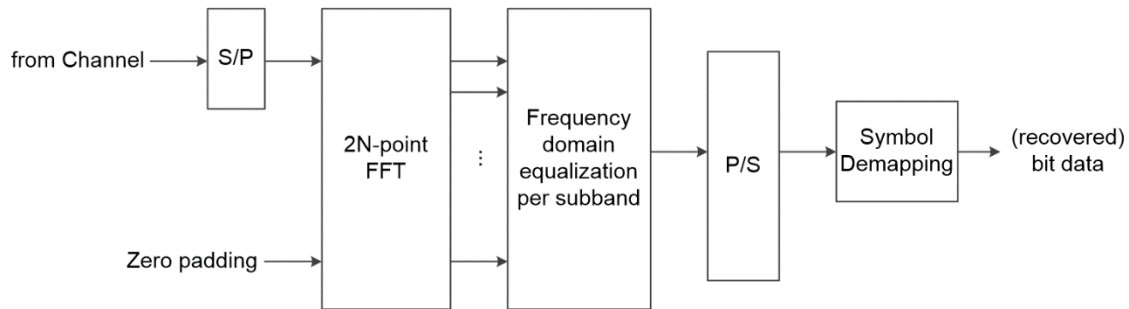
Seiring dengan berkembang standar komunikasi seluler dari 4G ke 5G dan menuju 6G, skema modulasi *multi-carrier* terus dikembangkan untuk mendapatkan skema yang lebih baik maupun skema yang dapat menjadi pengganti atau alternatif dari OFDM [4][5]. Hal ini dilakukan karena target aplikasi dari teknologi 5G tidak hanya untuk komunikasi seluler, tetapi mencakup komunikasi untuk *Internet-of-Things* dan *machine-to-machine communication* (M2M). OFDM dipandang tidak dapat memenuhi kebutuhan ini karena nilai PAPR yang tinggi dan adanya OOB *emission* seperti yang telah disebutkan di atas. Salah satu skema yang berkembang saat ini sebagai alternatif dari OFDM adalah *Universal Filtered Multi-Carrier* (UFMC) [6][7], selain skema lainnya seperti *Filtered Bank Multi-Carrier* (FBMC) [8], FBMC dengan *Offset Quadrature Amplitude Modulation* (FBMC-OQAM), *Windowed OFDM* (W-OFDM), *Generalized Frequency Division Multiplexing* (GFDM), dan *Filtered OFDM* (F-OFDM) [9].

Seperti pada skema OFDM, skema UFMC membagi spektrum frekuensi yang tersedia menjadi *subcarrier-subcarrier*. Perbedaannya, pada UFMC sejumlah *subcarrier* yang berdekatan dikelompokkan menjadi suatu *subband* di mana setiap *subband* mempunyai jumlah *subcarrier* yang tetap (*fixed*). Setiap *subband* kemudian diproses secara individual. Pada sisi *transmitter*, bit-bit data (*serial data stream*) yang akan ditransmisikan pada setiap *subband* di-map menjadi simbol (melalui proses modulasi) dan kemudian dibagi menjadi beberapa *stream* (*parallel stream*) oleh *serial-to-parallel converter* (S/P). Selanjutnya, *N-point* IFFT dihitung untuk setiap *subband* di mana nilai *N* tidak boleh lebih besar dari jumlah *subcarrier* dalam satu *subband* dikalikan jumlah *subband*. Hasil dari perhitungan IFFT ini kemudian konversikan lagi menjadi *serial* (P/S) dan diproses menggunakan *filter* dengan yang telah ditetapkan. Jenis *filter* yang umum digunakan misalnya, *Dolph-Chebyshev filter*, *Kaiser filter* [10], dan *Kaiser-Bessel filter* [11]. Setelah proses *filtering* dilakukan untuk setiap *subband*, hasilnya kemudian dijumlahkan untuk menghasilkan sinyal yang akan ditransmisikan melalui kanal (*channel*). Gambar 1 menunjukkan diagram blok dari *transmitter* UFMC secara umum (konvensional).



Gambar 1. Diagram blok UFMC transmitter

Pada sisi *receiver*, sinyal yang diterima dari *channel* diberikan ke *serial-parallel converter* (S/P) dan diproses oleh blok $2N$ -point FFT. Selanjutnya, *output* dari blok $2N$ -FFT diproses oleh *equalizer* dan dikonversi ke *serial* (P/S). Setelah itu dilakukan *demapping* (melalui proses demodulasi) untuk memperoleh kembali bit-bit data yang dikirimkan dari *transmitter*. Gambar 2 menunjukkan diagram blok *receiver* UFMC secara umum (konvensional).



Gambar 2. Diagram blok UFMC *transmitter*

Keunggulan yang dimiliki oleh UFMC salah satunya adalah dapat meminimalkan efek OOB *emission* dengan melakukan penapisan (*filtering*) terhadap sejumlah *subcarrier* yang berurutan (*subcarrier* yang berdekatan) atau dikenal dengan istilah *subband filtering*, sehingga OOB *emission* dapat diminimalkan. Hal ini berbeda dengan FBMC yang melakukan penapisan pada individual *subcarrier* (*subcarrier filtering*) untuk meminimalkan OOB *emission*. Penapisan *subcarrier* ini menyebabkan *subcarrier* pada FBMC tidak orthogonal dan perlu dikombinasikan dengan OQAM. Sebagai konsekuensinya, ukuran *filter* yang digunakan oleh FBMC lebih panjang dibandingkan ukuran *filter* pada UFMC [5].

Penelitian mengenai skema *multicarrier modulation* yang efisien untuk sistem komunikasi digital penting untuk dilakukan terutama dengan perkembangan menuju teknologi komunikasi generasi ke-6 (6G). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi dan evaluasi salah satu skema *multi-carrier modulation*, yaitu UFMC. Simulasi ini mengukur nilai PAPR dan *bit error rate* (BER) dari UFMC pada transmisi data melalui kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). Simulasi skema UFMC dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Pemilihan UFMC pada penelitian ini karena UFMC menggabungkan keunggulan-keunggulan yang dimiliki oleh OFDM dan FBMC. Penelitian-penelitian terdahulu yang membahas tentang skema UFMC digunakan sebagai acuan pada penelitian ini [12]–[17]. Pada penelitian [12], Rani membahas mengenai UFMC sebagai kandidat untuk menggantikan OFDM. Pengukuran PAPR dan BER dari UFMC menggunakan empat teknik *mapping/modulasi* (4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM) dilakukan pada penelitian tersebut.

Selanjutnya, penelitian oleh Kamurthi, dkk. [13] membahas mengenai penggunaan spektrum (*spectrum utilization*) dari UFMC. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan spektrum oleh UFMC lebih baik dibandingkan dengan OFDM. Kamurthi, dkk. juga membahas penggunaan *higher-order* QAM (256-QAM dan 1024-QAM) sebagai teknik *mapping* pada UFMC [14]. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa 1024-QAM lebih cocok untuk digunakan sebagai teknik *mapping* pada UFMC dibandingkan 256-QAM. Mohit dan Shah [15] melakukan penelitian mengenai UFMC dan membandingkannya dengan OFDM. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa UFMC mempunyai efisiensi spektral yang lebih baik dan kompleksitas yang lebih rendah dibandingkan OFDM. Penelitian oleh Essiben, dkk. [16] melakukan evaluasi terhadap FBMC, UFMC, dan F-OFDM berdasarkan nilai *power spectral density* (PSD) dan PAPR. Selanjutnya, penelitian oleh Ramadhan [17] melakukan analisis mengenai FBMC dan UFMC. Kinerja kedua skema tersebut dibandingkan dengan OFDM. Hasil penelitian tersebut menunjukkan UFMC lebih unggul dibandingkan dengan FBMC dan OFDM untuk mentransmisikan paket dengan ukuran kecil. Berdasarkan kajian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya yang telah diuraikan di atas, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai UFMC merupakan hal yang penting untuk melakukan evaluasi terhadap performa UFMC pada skenario komunikasi yang menjadi target dari 5G yaitu, eMBB (*enhanced Mobile Broadband*), URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communications*), dan mMTC (*massive Machine Type Communications*).

2. Metode Penelitian

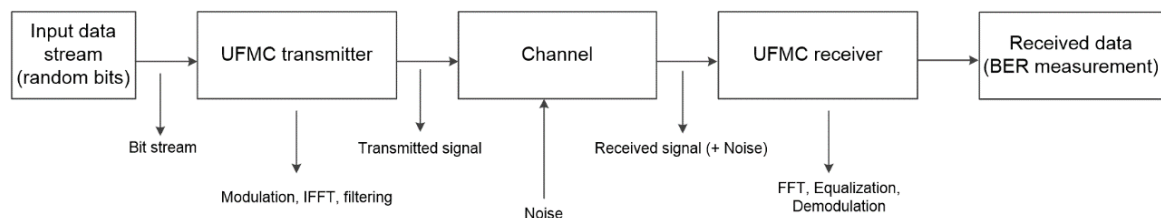
Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode penelitian kuantitatif dengan simulasi. Simulasi skema UFMC dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB versi R2022a. Tahapan dalam melaksanakan penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3 dan dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 3. Tahapan penelitian

- 1) Tahap studi pustaka/literatur.
Pada tahap ini dilakukan studi pustaka mengenai skema modulasi yang saat ini digunakan pada komunikasi 4G yaitu OFDM, dan skema-skema alternatifnya antara lain, UFMC, FBMC, dan F-OFDM. Studi pustaka ini bertujuan untuk mencari topik dan identifikasi masalah yang akan diteliti. Hasil dari studi pustaka ini menunjukkan bahwa UFMC merupakan skema yang paling potensial untuk digunakan pada sistem komunikasi di masa depan, sehingga penelitian ini memilih skema UFMC untuk diteliti.
- 2) Tahap penulisan program/*script* untuk simulasi.
Pada tahap ini ditentukan model simulasi yang akan digunakan misalnya, input data untuk simulasi, parameter yang akan diukur, dan fungsi-fungsi yang digunakan pada simulasi. *Script* untuk simulasi skema UFMC diimplementasikan dengan pemrograman MATLAB dilakukan pada tahap ini. *Script* simulasi UFMC yang disediakan oleh MATLAB dimodifikasi dan dikembangkan untuk simulasi pada penelitian ini.
- 3) Tahap eksekusi simulasi dan pengambilan data hasil simulasi.
Pada tahap ini dilakukan simulasi dan pengambilan data hasil simulasi UFMC untuk kemudian dianalisis dan dipresentasikan.
- 4) Tahap analisis hasil simulasi dan penulisan laporan penelitian.
Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil yang diperoleh dari simulasi. Selanjutnya, penulisan laporan penelitian dilakukan berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian.

Gambar 4 menunjukkan diagram blok dari simulasi UFMC yang diimplementasikan menggunakan MATLAB. Input data dibangkitkan menggunakan fungsi *randi()* yang menghasilkan *random integer* bernilai 0 atau 1. Data tersebut kemudian diberikan kepada UFMC *transmitter* (Gambar 1) untuk ditransmisikan melalui kanal AWGN. Setelah melalui kanal, sinyal diterima oleh UFMC *receiver* (Gambar 2) dan dilakukan pengukuran BER. Parameter yang digunakan untuk simulasi ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai yang ditunjukkan pada Tabel 1 merupakan nilai *default* pada awal simulasi. Modulasi (*mapping*) dan *signal-to-noise ratio* (SNR) yang digunakan kemudian dibuat bervariasi untuk pengukuran BER. Selain itu, nilai PAPR dari sinyal yang ditransmisikan juga dihitung (pada sisi *transmitter*).



Gambar 4. Diagram blok simulasi UFMC

Tabel 1. Parameter simulasi (nilai awal)

Parameter	Nilai
Ukuran FFT	512
Jumlah <i>subband</i>	10
Jumlah <i>subcarrier</i> per <i>subband</i>	20
<i>Filter length</i>	43
<i>Side lobe attenuation</i>	40 dB
Modulasi (<i>mapping</i>)	4-QAM (2 bit per <i>subcarrier</i>)
SNR	15 dB

3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 2 menunjukkan nilai PAPR dari sinyal UPMC dengan teknik modulasi (*mapping*) yang berbeda (nilai parameter lainnya seperti pada Tabel 1). Berdasarkan nilai pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa dalam simulasi yang dilakukan, modulasi 1024-QAM memberikan nilai PAPR yang paling rendah dan nilai PAPR tertinggi diperoleh jika modulasi yang digunakan adalah 4-QAM (ukuran FFT 512 titik). Selanjutnya, ukuran FFT diubah menjadi 256 titik dan 1024 titik (dengan nilai parameter lain tetap seperti pada Tabel 1) untuk melihat pengaruh ukuran FFT terhadap nilai PAPR. Hasil simulasi untuk nilai PAPR tersebut masing-masing ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4. Untuk FFT 256 titik, penggunaan modulasi 16-QAM menghasilkan nilai PAPR paling rendah dan untuk FFT 1024 titik, nilai PAPR paling rendah diperoleh jika modulasi yang digunakan adalah 256-QAM.

Tabel 2. Nilai PAPR UPMC dengan modulasi yang berbeda, ukuran FFT 512 titik

Modulasi	Jumlah bit per <i>subcarrier</i>	Nilai PAPR (dB)
4-QAM	2	9.04
16-QAM	4	8.2379
64-QAM	6	8.6229
256-QAM	8	8.0416
1024-QAM	10	7.1891
4096-QAM	12	8.867

Tabel 3. Nilai PAPR UPMC dengan modulasi yang berbeda, ukuran FFT 256 titik

Modulasi	Jumlah bit per <i>subcarrier</i>	Nilai PAPR (dB)
4-QAM	2	8.5239
16-QAM	4	7.5897
64-QAM	6	8.6799
256-QAM	8	9.3439
1024-QAM	10	8.0456
4096-QAM	12	10.471

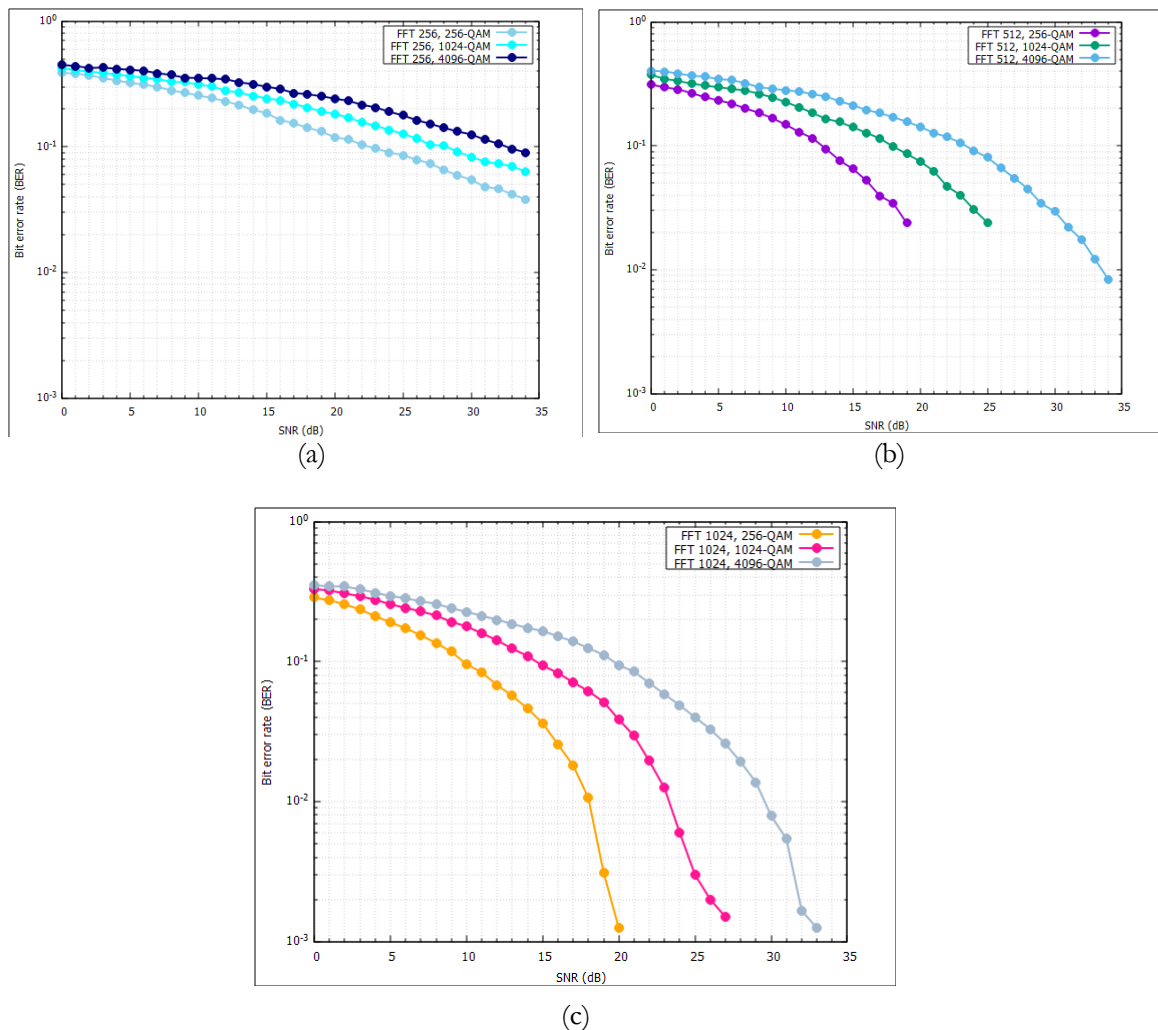
Tabel 4. Nilai PAPR UPMC dengan modulasi yang berbeda, ukuran FFT 1024 titik

Modulasi	Jumlah bit per <i>subcarrier</i>	Nilai PAPR (dB)
4-QAM	2	7.7732
16-QAM	4	8.2967
64-QAM	6	9.6202
256-QAM	8	7.5373
1024-QAM	10	7.6766
4096-QAM	12	9.2016

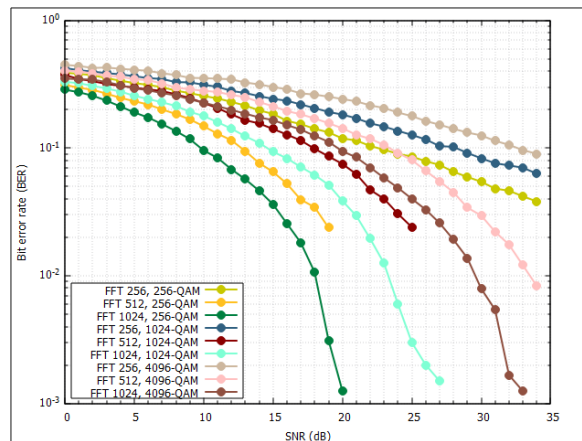
Selain PAPR, performa transmisi data menggunakan UPMC diukur dengan BER yang diperoleh. Simulasi dilakukan untuk tiga modulasi yang berbeda yaitu, 256-QAM, 1024-QAM, dan 4096-QAM

serta tiga ukuran FFT yang berbeda, 256 titik, 512 titik, dan 1024 titik. Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi tersebut. Untuk FFT 256 titik, *symbol mapping* dengan 256-QAM memberikan hasil terbaik. Untuk mencapai nilai BER 10^{-1} dibutuhkan nilai SNR sebesar 23 dB. Demikian juga halnya pada simulasi dengan FFT 512 titik dan FFT 1024 titik, 256-QAM memberikan hasil dengan BER yang paling rendah. Pada penggunaan FFT 1024 titik, BER 10^{-3} dapat dicapai dengan SNR sebesar 20 dB. Hasil simulasi BER untuk semua kombinasi ukuran FFT dan QAM ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa kombinasi yang memberikan nilai BER paling rendah adalah FFT 1024 titik dengan 256-QAM. Nilai PAPR untuk kombinasi ini adalah 7.5373 dB.

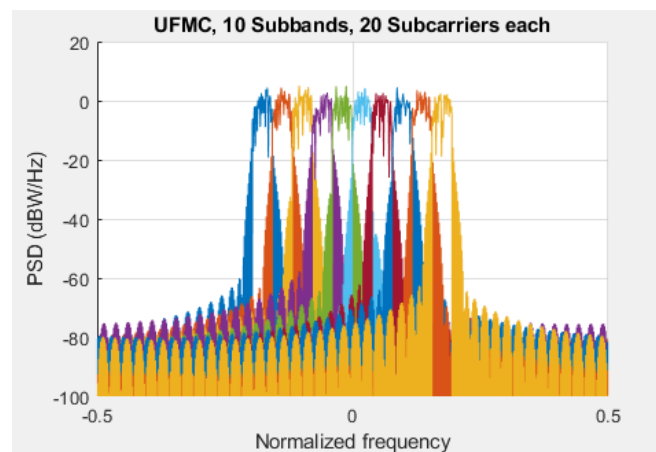
Seperti yang telah diutarakan sebelumnya, UFMC mempunyai spektral efisiensi yang lebih baik dari OFDM. *Power spectral density* (PSD) menggambarkan distribusi daya (*power*) pada komponen-komponen frekuensi dari suatu sinyal (watt per hertz). Gambar 7 menunjukkan PSD dari *subband* yang disimulasikan. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa *side lobes* pada UFMC sangat kecil, sehingga dari sisi penggunaan spektrum pada UFMC lebih efisien dibandingkan OFDM. PSD dari *side lobe* yang ditunjukkan pada gambar tersebut adalah sekitar -60 dBW per hertz (setara dengan 10^{-6} watt/hertz) yang merupakan nilai yang sangat kecil, sehingga *side lobe* ini tidak akan mengganggu atau menyebabkan interferensi jika frekuensi pada lokasi tersebut digunakan oleh sinyal atau *user* yang lain (karena dayanya sangat rendah).



Gambar 5. BER dengan tiga ukuran FFT



Gambar 6. BER dengan variasi ukuran FFT dan QAM



Gambar 7. PSD dengan 10 subband (total 200 subcarrier)

4. Kesimpulan

Penelitian ini melakukan simulasi skema UFMC yang merupakan salah satu kandidat skema alternatif dari OFDM untuk digunakan pada sistem komunikasi 5G. Simulasi skema UFMC untuk transmisi data melalui kanal AWGN ini diimplementasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB, untuk mengobservasi performa dari UFMC menggunakan ukuran FFT dan teknik *mapping* (modulasi) yang berbeda. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ukuran FFT dan modulasi yang digunakan mempengaruhi nilai BER yang dapat diperoleh. Untuk semua ukuran FFT (256 titik, 512 titik, dan 1024 titik) dan modulasi (256-QAM, 1024-QAM, 4096) yang disimulasikan, 256-QAM menghasilkan nilai BER yang paling rendah. Pada penggunaan FFT 1024 titik, nilai BER 10^{-3} dapat dicapai dengan SNR sebesar 20 dB. Nilai PAPR paling rendah yang diperoleh pada simulasi adalah 7.1891 dB dengan FFT 512 titik dan *mapping* 1024-QAM. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan, misalnya, mengubah jumlah *subband* dan jumlah *subcarrier per subband*, mengubah jenis dan panjang *filter* yang digunakan pada UFMC *transmitter* untuk melihat pengaruhnya pada nilai BER dan PAPR. Penelitian juga dapat dilakukan untuk lebih menurunkan lagi nilai PAPR. Selain itu, perbandingan dengan skema lain seperti FBMC-OQAM dan F-OFDM dapat dieksplorasi untuk mengetahui keunggulan UFMC dibandingkan skema-skema tersebut.

5. Daftar Pustaka

- [1] Prasad, R. (2004). *OFDM for wireless communications systems*. Artech House.
- [2] Hussain, G. A., & Audah, L. (2020). UFMC system performance improvement using RS codes for 5G communication system. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 18(4), 1843-1848. DOI: <http://doi.org/10.12928/telkomnika.v18i4.15703>.
- [3] Arslan, H., & Başar, E. (Eds.). (2020). *Flexible and cognitive radio access technologies for 5G and beyond*. Institution of Engineering and Technology.
- [4] Demir, A. F., Elkourdi, M., Ibrahim, M., & Arslan, H. (2019). Waveform design for 5G and beyond. *arXiv preprint arXiv:1902.05999*.
- [5] Vakilian, V., Wild, T., Schaich, F., ten Brink, S., & Frigon, J. F. (2013, December). Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond LTE. In *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)* (pp. 223-228). IEEE. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2013.6824990.
- [6] Molla, A. A., Ahammed, M. F., & Kadir, M. I. (2021, September). Evaluation of UFMC as a Potential Waveform Contender of OFDM for Next-Generation Wireless. In *2021 International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (ICECIT)* (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/ICECIT54077.2021.9641387.
- [7] Schaich, F., & Wild, T. (2014, May). Waveform contenders for 5G—OFDM vs. FBMC vs. UFMC. In *2014 6th international symposium on communications, control and signal processing (ISCCSP)* (pp. 457-460). IEEE. DOI: 10.1109/ISCCSP.2014.6877912.
- [8] Khan, B., & Velez, F. J. (2020, July). Multicarrier waveform candidates for beyond 5G. In *2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)* (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/CSNDSP49049.2020.9249568.
- [9] Tuli, E. A., Kim, D. S., & Lee, J. M. (2021, October). Performance enhancement of ufmc systems using kaiser window filter. In *2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)* (pp. 386-388). IEEE. DOI: 10.1109/ICTC52510.2021.9620960.
- [10] Yarrabothu, R. S., & Nelakuditi, U. R. (2019). Optimization of out-of-band emission using kaiser-bessel filter for UFMC in 5G cellular communications. *China Communications*, 16(8), 15-23. DOI: 10.23919/JCC.2019.08.002.
- [11] Rani, P. N., & Rani, C. S. (2016, December). UFMC: The 5G modulation technique. In *2016 IEEE international conference on computational intelligence and computing research (ICCIC)* (pp. 1-3). IEEE. DOI: 10.1109/ICCIC.2016.7919714.
- [12] Kamurthi, R. T. (2018, April). Review of UFMC Technique in 5G. In *2018 International Conference on Intelligent Circuits and Systems (ICICS)* (pp. 115-120). IEEE. DOI: 10.1109/ICICS.2018.00034.
- [13] Kamurthi, R. T., Chopra, S. R., & Gupta, A. (2020, March). Higher order QAM schemes in 5G UFMC system. In *2020 international conference on emerging smart computing and informatics (ESCI)* (pp. 198-202). IEEE. DOI: 10.1109/ESCI48226.2020.9167619.



- [14] Essiben, J. F. D., Belinga, J. A., Ihonock, L. E., & Joe, Y. S. (2021). Performance Evaluation of FBMC, UFMC, and F-OFDM Modulation for 5G Mobile Communications. *no. August*, 20-24.

- [15] Ramadhan, A. J. (2019). Overview and implementation of the two most important candidate 5G waveforms. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 97(9), 2551-2560.