

# Implementasi Filter *Pre-Emphasis* untuk Transmisi Sinyal Audio pada Sistem Komunikasi FBMC-OQAM

Anggun Fitriani Isnawati<sup>1</sup>, Jans Hendry<sup>2</sup>

**Abstract**—High speed data transmission demands broader bandwidth. This has an effect towards the limitation of frequencies spectrum allocation as well as interference. To solve this, multi carrier modulation is one of choices. Having better power spectral density compared to OFDM, the FBMC-OQAM has been chosen as the multi carrier modulation. The FBMC is equipped with Poly Phase Network filter, makes it able to achieve better PSD. Frequently used filter, which is pre-emphasis, is popular in speech processing that is possibly able to be extended in use. Pre-emphasis is also accompanied with de-emphasis filter, which is similar to FBMC. Pre-emphasis filter suppresses low frequency magnitudes and emphasizes higher frequency. By assuming that noise presents in higher frequency, an approachment to protect audio signal by itself is proposed. Random noise is broadband signal where frequencies can have ranges from lower to higher with smaller magnitudes compared to signal. By providing slots in audio higher frequency and magnitudes, random noise occupied those slots with relatively weak magnitudes then sent through the air. At the receiver, a de-emphasis filter invert the process to restore signal by de-emphasizing higher frequency and removing noise as well. The result shows better BER with this approachment. For example, when Eb/No was 13 dB, BER with and without pre-emphasis are approximately 0.0184 dB and 0.0187 dB, consecutively. It means there was 250 bits or approximately 32 points has been corrected. It shows that pre-emphasis can work along with PPN FBMC filter to gain better BER values.

**Intisari**—Transmisi data berkecepatan tinggi membutuhkan *bandwidth* yang lebih lebar. Hal ini berdampak pada terbatasnya alokasi spektrum frekuensi dan interferens. Solusinya adalah dengan menggunakan modulasi *multi-carrier*. Modulasi FBMC-OQAM dipilih sebagai modulasi *multi-carrier* yang memiliki *power spectral density* (PSD) lebih baik daripada OFDM. Modulasi ini menggunakan filter *poly phase network* sehingga PSD lebih baik. Filter *pre-emphasis* sering digunakan dalam pengolahan sinyal wicara dan diperluas penggunaannya dalam makalah ini. Filter *pre-emphasis* dilengkapi dengan filter *de-emphasis* yang identik dengan skema FBMC. Filter ini menekan magnitude pada frekuensi rendah dan memperkuat frekuensi tinggi. Dengan asumsi derau berada pada frekuensi tinggi, sebuah pendekatan untuk melindungi sinyal audio oleh dirinya sendiri ditawarkan. Derau acak (*random noise*) adalah sinyal *broadband* yang frekuensinya mulai dari terendah hingga tertinggi, tetapi magnitudenya lebih rendah daripada sinyal audio. Dengan

menyediakan ruang spektrum pada frekuensi tinggi sinyal audio yang memiliki magnitude tinggi setelah proses *pre-emphasis*, derau akan masuk, tetapi magnitudenya rendah, lalu dikirimkan. Pada sisi penerima, filter *de-emphasis* akan mengembalikan sinyal audio dengan menekan frekuensi tinggi, yang berarti juga menekan derau. Hasil simulasi menunjukkan nilai BER yang semakin baik. Sebagai contoh, untuk Eb/No 13 dB, nilai BER dengan dan tanpa *pre-emphasis* adalah 0,0184 dB dan 0,0187 dB. Artinya ada 250 bit atau sekitar 32 titik yang berhasil diperbaiki. Hal ini menguatkan kesimpulan bahwa filter *pre-emphasis* dapat digunakan bersama filter PPN FBMC untuk memperbaiki nilai BER.

**Kata Kunci**— Filter *Pre-emphasis*, FBMC-OQAM, *Bit Error Rate* (BER), OFDM.

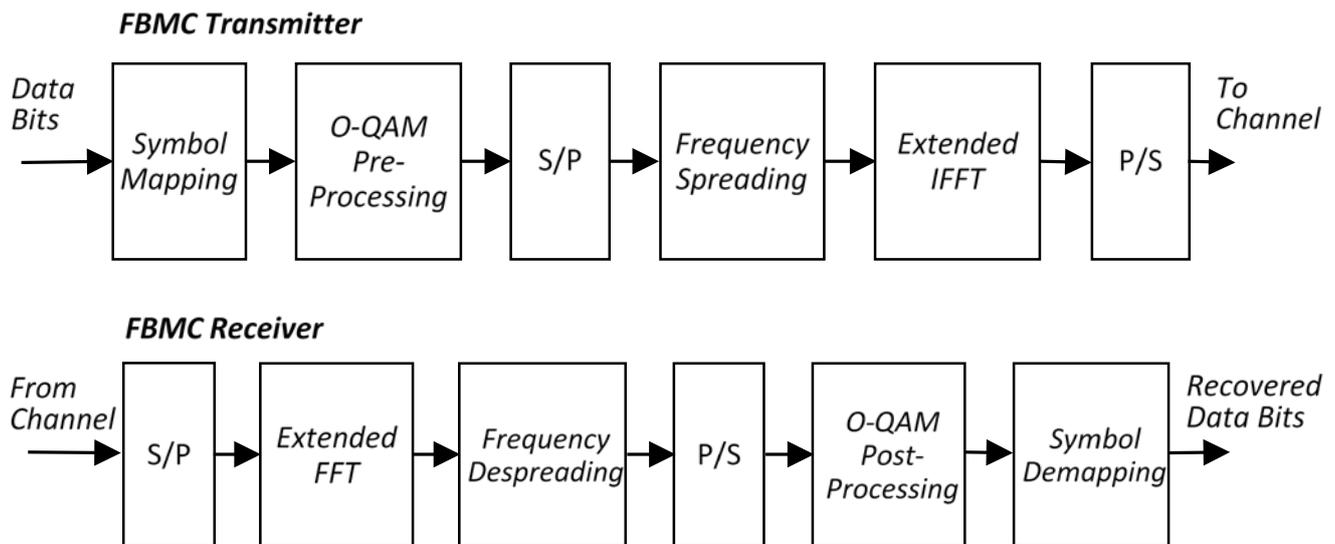
## I. PENDAHULUAN

Perkembangan komunikasi nirkabel menuntut pengiriman data dengan kecepatan tinggi, *bandwidth* yang lebar, dan dapat mendukung layanan dengan *Quality of Service* (QoS) yang berbeda-beda pada kondisi pengguna (*user*) dengan mobilitas tinggi. Sebagaimana diketahui, *bandwidth* berbeda dengan kecepatan, tetapi saling berkaitan dengan besaran yang sebanding. Semakin lebar *bandwidth*, maka kecepatan data semakin meningkat. *Bandwidth* merupakan sumber daya terbatas sehingga efisiensi spektral terkait penggunaan *bandwidth* sangat dibutuhkan. Penggunaan spektrum frekuensi secara maksimal seringkali berpengaruh terhadap interferens antar *user*, sehingga diperlukan suatu teknologi yang dapat menyediakan laju bit yang tinggi, yakni modulasi pembawa jamak (*Multi Carrier Modulation*, MCM). Prinsip MCM adalah membagi *bandwidth* kanal menjadi beberapa subkanal. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) merupakan salah satu bentuk MCM yang memberikan kelebihan berupa efisiensi spektrum *bandwidth* yang tinggi karena penggunaan simbol-simbol ortogonal, ketahanan terhadap *Inter Symbol Interference* (ISI) karena penggunaan awalan siklus (*Cyclic Prefix*, CP) yang cukup, dan kemudahan untuk memulihkan data melalui metode estimasi kanal [1].

Namun, OFDM memiliki beberapa kelemahan, yaitu sensitif terhadap *offset* frekuensi pembawa, mudah terganggu oleh distorsi linier, dan kompleksitas yang dimilikinya untuk implementasi *Fast Fourier Transform* (FFT) di sisi penerima. Karena itu, metode baru untuk meningkatkan kinerja OFDM telah dikembangkan, yaitu *Filter Bank Multi Carrier - Offset Quadrature Amplitude Modulation* (FBMC-OQAM), yang juga dapat menghemat *bandwidth* komunikasi [2]. Oleh karena itu, FBMC direkomendasikan sebagai skema modulasi yang paling menjanjikan untuk sistem komunikasi seluler 5G karena tidak menggunakan CP, sehingga hemat *bandwidth* dan efisiensi yang cukup tinggi dibandingkan OFDM. Dalam

<sup>1</sup> Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi, Institut Teknologi Telkom Purwokerto, Jl. D.I Panjaitan No.128 Purwokerto 53147, INDONESIA (tlp: 0281-641629; fax: 0281-641630; e-mail: anggun@ittelkom-pwt.ac.id)

<sup>2</sup> Program Studi S1 Teknik Elektro, Institut Teknologi Telkom Purwokerto, Jl. D.I Panjaitan No.128 Purwokerto 53147, INDONESIA (tlp: 0281-641629; fax: 0281-641630; e-mail: jans@ittelkom-pwt.ac.id)



Gbr. 1 Pemodelan sistem FBMC-OQAM.

makalah ini, filter prototipe untuk FBMC dan OFDM dirancang dan hasilnya menunjukkan bahwa FBMC mengungguli OFDM, sehingga direkomendasikan pada komunikasi 5G [3], [4].

Penggunaan modulasi QAM pada beberapa implementasi digantikan dengan modulasi OQAM karena kinerjanya mampu melampaui QAM konvensional dalam beberapa aspek, seperti dispersi, meningkatkan proses pengambilan keputusan, dan memiliki *bit rate* yang lebih tinggi. Makalah ini menunjukkan bahwa implementasi OFDM-OQAM mempunyai kinerja lebih baik dibanding OFDM-QAM dalam penggunaan spektrum dan *Bit Error Rate* (BER) [5]. Penggunaan OQAM pada teknik FBMC memberikan pengurangan yang tinggi pada *Inter Carrier Interference* (ICI) dan *Inter Symbol Interference* (ISI) serta menjamin peningkatan SINR. Meskipun keunggulan FBMC-OQAM dalam hal SINR dan lokalisasi bentuk gelombang pada kerapatan kritis, tetapi kompleksitas implementasi FBMC-OQAM semakin tinggi ketika menggunakan sistem MIMO [6].

Penelitian tentang desain *filter bank* yang efisien telah banyak ditingkatkan dan berdampak signifikan pada berbagai bidang, seperti pemrosesan sinyal, pengodean ucapan, pengacakan, pemrosesan gambar, *telemedicine*, dan transmisi beberapa sinyal melalui saluran yang sama. Desain *filter bank* dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yakni *Perfect Reconstruction* (PR) dan *Near Perfect Reconstruction* (NPR) [7]. Penggunaan filter yang direkomendasikan pada sistem FBMC-OQAM adalah jenis filter *polyphase* yang mempunyai pendekatan NPR. Beberapa jenis filter *polyphase* yang mempunyai karakteristik pendekatan NPR yakni filter *Poly Phase Network* (PPN) [8].

Penggunaan filter *pre-emphasis* selama ini masih terbatas pada proses pengolahan sinyal wicara (*speech*). Tujuan dari pemfilteran *pre-emphasis* ini adalah untuk mendapatkan bentuk spektrum frekuensi sinyal wicara yang lebih halus, dengan bentuk spektrum relatif bernilai tinggi untuk daerah frekuensi rendah dan cenderung turun secara tajam untuk daerah frekuensi di atas 2.000 Hz. Untuk mengurangi BER,

*pre-emphasis* di sisi pemancar, ekualisasi di sisi penerima, atau kombinasi keduanya umumnya digunakan untuk mengompensasi *channel* [9].

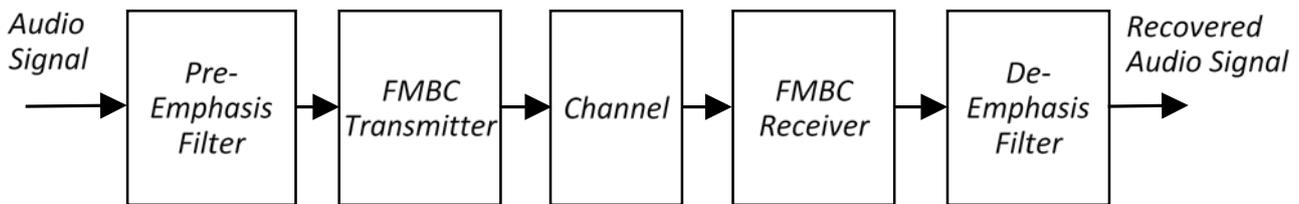
Makalah ini melakukan implementasi kedua filter tersebut, yakni filter *pre-emphasis* dan filter PPN pada sistem FBMC-OQAM. Hasilnya dianalisis untuk kemudian dilakukan perbandingan kinerja antara penggunaan gabungan kedua filter PPN dan *pre-emphasis* atau yang hanya menggunakan filter *polyphase* saja. Hal ini dimaksudkan untuk melihat pengaruh penggunaan filter *pre-emphasis* pada sistem komunikasi FBMC-OQAM.

## II. PEMODELAN SISTEM

Sebagai tahap awal adalah perancangan pemodelan sistem FBMC-OQAM secara umum, sebagaimana ditunjukkan pada Gbr. 1. Pemodelan sistem FBMC-OQAM pada Gbr. 1 mengacu pada *project PHYDYAS* [10]. Pada pemodelan ini digunakan *filter bank* PPN pada proses *extended IFFT* (blok *Synthesis Filter Bank*, SFB) di sisi pengirim FBMC dan pada proses *extended FFT* (blok *Analysis Filter Bank*, AFB) di sisi penerima FBMC.

Makalah ini juga menggunakan pemodelan sistem *pre-emphasis* FBMC-OQAM sebagaimana yang ditunjukkan pada Gbr. 2. Pemodelan ini dilakukan dengan menambahkan filter *pre-emphasis* di sisi pengirim, yang merupakan proses sebelum pengirim FBMC, dan penambahan filter *de-emphasis* di sisi penerima setelah proses penerima FBMC. Sinyal masukan yang diujikan dalam makalah ini adalah sinyal audio. Sinyal audio digunakan karena merupakan contoh sinyal dengan frekuensi rendah yang sering digunakan sebagai masukan dari filter *pre-emphasis*.

Parameter-parameter kinerja simulasi ditentukan berdasarkan implementasi sistem seperti jenis masukan yang diberikan, penggunaan jenis *mapper*, penggunaan *channel*, dan derau yang diberikan. Proses pengujian simulasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi untuk setiap jenis filter yang digunakan, baik PPN maupun gabungan antara

Gbr. 2. Pemodelan sistem *pre-emphasis* FBMC-OQAM.

penggunaan filter *pre-emphasis* dengan filter PPN pada sistem komunikasi FBMC-OQAM. Parameter hasil simulasi yang diuji adalah rekonstruksi sinyal audio dan BER.

### III. METODE

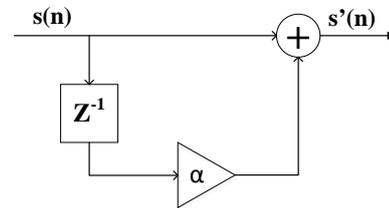
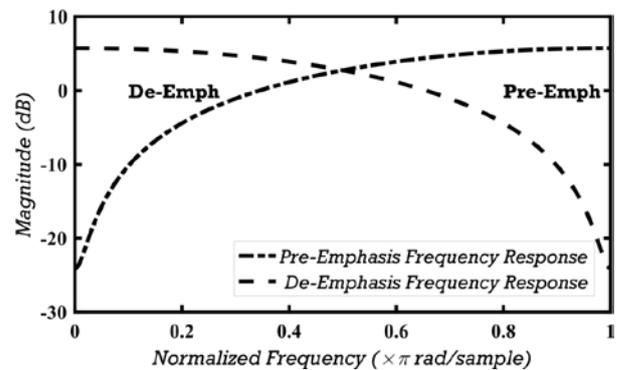
#### A. Filter *Pre-Emphasis* dan *De-Emphasis*

*Bank filter* pada metode FBMC terdiri atas *analysis filter* dan *synthesis filter* yang bekerja saling berkebalikan. Demikian juga dengan filter *pre-emphasis* yang memiliki pasangan kebalikan dan disebut dengan filter *de-emphasis*. Sama halnya dengan filter pada FBMC, filter *pre-emphasis* dan *de-emphasis* memiliki koefisien filter yang sama.

Filter *pre-emphasis* dan *de-emphasis* umumnya digunakan dalam pengolahan sinyal wicara. Ketika sebuah sinyal wicara akan diolah menggunakan metode *Linear Predictive Coding* (LPC), hanya bagian sinyal pada frekuensi rendah saja yang dapat diolah dengan baik, sementara kualitas hasil olah pada frekuensi tinggi sangat rendah. Untuk itu, perlu dilakukan penguatan pada frekuensi tinggi agar LPC dapat mengekstrak informasi pada bagian tersebut. Filter *pre-emphasis* merupakan filter *Finite Impulse Response* (FIR) orde satu (*single tap*) pelolos frekuensi tinggi (*High Pass Filter*, HPF). Dengan menggunakan filter ini, fluktuasi spektrum frekuensi rendah dan tinggi menjadi lebih halus dibandingkan sebelumnya [11].

Di dalam makalah ini, filter *pre-emphasis* digunakan untuk tujuan berbeda, yakni dalam implementasi transmisi sinyal audio. Derau alami (*random noise*) pada sistem transmisi kerap kali mengganggu sinyal yang ditransmisikan. Derau ini umumnya berada pada frekuensi tinggi dengan magnitude yang kecil. Oleh karena itu, sinyal perlu dilindungi sebelum ditransmisikan. Metode yang diusulkan adalah dengan memperkuat spektrum frekuensi tinggi dari sinyal, sehingga energi spektral frekuensi tinggi sinyal lebih besar dibandingkan derau. Ini adalah metode untuk melindungi sinyal dari gangguan derau menggunakan sinyal itu sendiri.

Jika sinyal audio disimbolkan dengan  $s(n)$  dan hasil *pre-emphasis* disimbolkan dengan  $s'(n)$ , maka struktur filter ini dapat ditunjukkan pada Gbr. 3. Filter ini memiliki karakteristik sebagai *all-zero filter*. Filter *pre-emphasis* merupakan jenis HPF, sehingga ketika diimplementasikan terhadap sinyal audio, bunyi yang diperdengarkan berbeda dengan sinyal asli, bahkan cenderung sangat berbeda [11]. Hal ini dikarenakan amplitudo sinyal pada spektrum frekuensi tinggi menjadi semakin besar. Untuk itu, dibutuhkan filter kebalikannya, yang disebut dengan filter *de-emphasis*, untuk mengembalikan sinyal hasil filter pada kondisi mendekati semula. Filter tersebut merupakan filter pelolos frekuensi rendah (*Low Pass Filter*, LPF). Di dalam konstelasi transmisi sinyal ini, filter *pre-emphasis* diletakkan

Gbr. 3. Struktur filter *pre-emphasis*.Gbr. 4. Tanggapan frekuensi filter *pre-emphasis* dan *de-emphasis*.

pada sisi pengirim sedangkan filter *de-emphasis* diletakkan pada sisi penerima.

Berdasarkan Gbr. 3, filter *pre-emphasis* diekspresikan sebagai (1) dengan nilai  $\alpha$  yang umum dipakai adalah  $15/16 = 0,9375$  [11].

$$s'(n) = s(n) - \alpha \times s(n-1) \quad (1)$$

Tanggapan frekuensi dari filter *pre-emphasis* dan filter *de-emphasis* ditunjukkan pada Gbr. 4. Implementasi kedua filter tersebut pada makalah ini bertujuan untuk mengurangi galat bit (*bit error*) BER terhadap  $E_b/N_0$  karena gangguan pada frekuensi tinggi sudah diminimalkan.

#### B. Sinyal Audio

Sinyal audio biasanya memiliki amplitudo pada *range* tegangan -1 V hingga +1 V. Sementara itu, sinyal yang ditransmisikan dalam komunikasi ini berbentuk biner. Sinyal yang diubah ke biner adalah sinyal hasil filter *pre-emphasis*. Pengubahan sinyal tersebut ke dalam bentuk yang sesuai menggunakan *pseudocode* berikut:

Input:

$s'(n)$  : sinyal audio dalam range -1 v : +1 v  
 $nbit$  : level kuantisasi audio

Output:

$b(n)$  : hasil konversi sinyal dalam bit

Proses:

$$s'(n) \leftarrow s'(n) + 1$$

$$s'(n) \leftarrow s'(n) * 2^{nbit-1}$$

$$b(n) \leftarrow \text{binary}(s'(n))$$

$$\text{return } b(n)$$

Sinyal audio yang diterima masih berbentuk biner setelah melalui proses *demapping*. Untuk itu, sinyal perlu diubah ke dalam bentuk aslinya yang berada pada tegangan -1 V hingga +1 V. Langkah-langkah yang dilakukan mengikuti *pseudocode* berikut:

Input:

$b'(n)$  : sinyal audio yang diterima dalam bentuk biner  
 $nbit$  : level kuantisasi audio

Output:

$\hat{s}(n)$  : hasil konversi ke dalam range -1 v hingga +1 v

Proses:

$$\hat{s}(n) \leftarrow \text{decimal}(b'(n))$$

$$\hat{s}(n) \leftarrow \hat{s}(n) / 2^{nbit-1}$$

$$\hat{s}(n) \leftarrow \hat{s}(n) - 1$$

$$\text{return } \hat{s}(n)$$

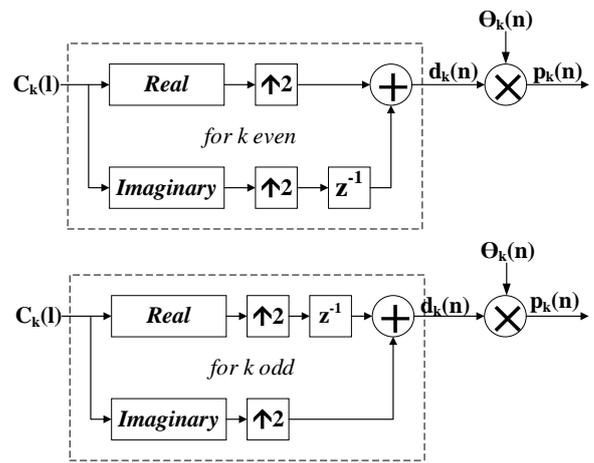
C. FBMC-OQAM

Berlawanan dengan OFDM, yang harus dipastikan ortogonal untuk semua operator, FBMC membutuhkan ortogonalitas untuk *sub-channel* tetangga saja. Bahkan, OFDM mengeksplorasi *bandwidth* frekuensi yang diberikan oleh sejumlah operator, sementara FBMC membagi *channel* transmisi yang terkait dengan *bandwidth* yang diberikan ke sejumlah *sub-channel*. Untuk sepenuhnya memanfaatkan *bandwidth channel*, modulasi dalam *sub-channel* harus beradaptasi dengan kendala ortogonalitas *channel* tetangga dan menggunakan OQAM. Kombinasi *filter bank* dengan modulasi OQAM mengarah pada laju bit maksimum, tanpa perlu adanya *guard time* atau CP seperti pada OFDM [10].

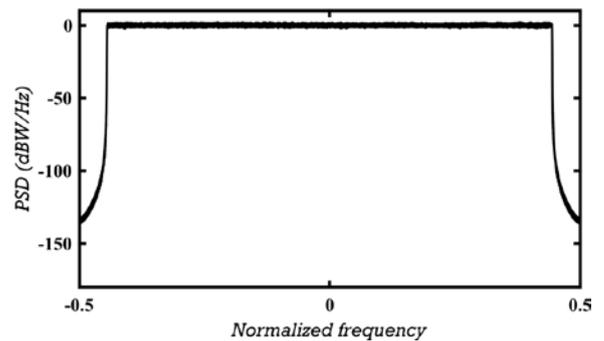
Seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 1, modulasi FBMC berbeda dari OFDM dalam tiga tahap. Pertama, dengan menggunakan *mapper* OQAM dengan filter yang tepat ICI dan ISI dapat dikurangi [12]. Kedua, FBMC menggunakan PPN sebagai filter setelah tahap IFFT (*extended IFFT*). Filter ini memberikan lokalisasi yang baik dalam domain waktu (mengurangi ISI) dan domain frekuensi (mengurangi ICI) [12]. Untuk lokalisasi yang optimal, baik dalam domain waktu maupun frekuensi, digunakan koefisien filter dari prototipe PHYDYAS [10]. Ketiga, kombinasi dari prototipe PHYDYAS dan proses modulasi OQAM memperkenalkan ortogonalitas tanpa menggunakan CP, sehingga dapat meningkatkan efisiensi spektral dan kapasitas saluran [12].

Dalam makalah ini, runtun biner  $b(n)$  mengalami proses modulasi 16-QAM sehingga berbentuk bilangan kompleks. Proses ini disebut juga dengan proses *mapping*. Hasil dari proses ini disimbolkan dengan  $C_k(l)$  yang berisi runtun simbol berupa bilangan kompleks hasil modulasi. Variabel ini dijadikan sebagai masukan proses *OQAM pre-processing* prosesnya berbeda untuk indeks runtun genap dan ganjil [13], sebagaimana yang ditunjukkan pada Gbr. 5.

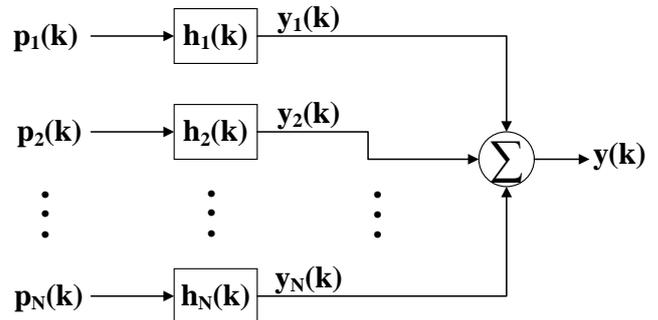
Hasil dari proses ini disimbolkan dengan  $d_k(n)$  yang dikalikan dengan runtun pengubah bilangan kompleks ke real ( $\Theta_k(n)$ ) dari runtun sebelumnya. Hasil dari proses *OQAM pre-*



Gbr. 5 Diagram blok OQAM pre-processing.



Gbr. 6 PSD dari tanggapan filter PPN.

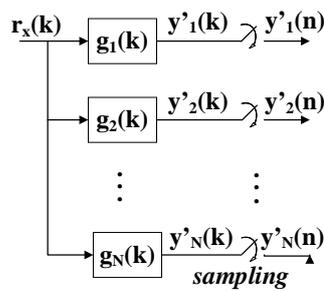
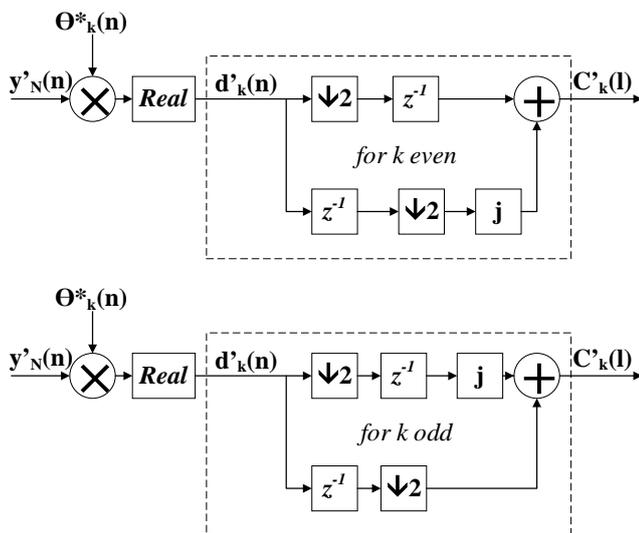


Gbr. 7 Diagram blok proses synthesis filter bank.

*processing* yang disimbolkan dengan  $p_k(n)$  dikenai filter SFB PPN yang juga merupakan jenis filter NPR. Filter yang digunakan merupakan filter simetris dengan panjang koefisien filter  $L = 7$ , dengan tanggapan filter dalam bentuk *Power Spectral Density* (PSD) ditunjukkan pada Gbr. 6. Sementara itu, proses pemfilteran menggunakan SFB [14] digambarkan oleh Gbr. 7.

Simbol  $h_N(k)$  menunjukkan koefisien filter PPN. Proses yang mengikuti setelah itu adalah alih ragam balik Fourier terhadap runtun  $y(k)$ , kemudian sinyal tersebut ditransmisikan. Model *channel* komunikasi yang digunakan adalah *Additive White Gaussian Noise* (AWGN).

Sinyal yang diterima akan dikenai alihragam Fourier dan disimbolkan dengan  $r_x(k)$ . Kemudian, sinyal tersebut difilter menggunakan filter *poly phase* yang sama yang disebut sebagai

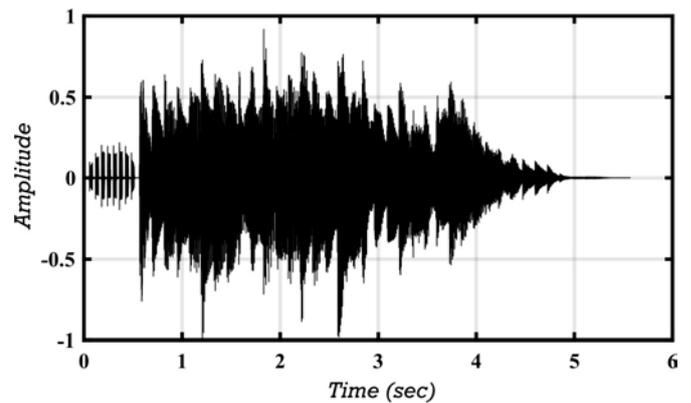
Gbr. 8 Blok diagram proses *analysis filter bank*.Gbr. 9 Blok diagram OQAM *post-processing*.

*Analysis Filter Bank* (AFB) PPN [14]. Diagram blok dari proses ini digambarkan oleh Gbr. 8. Koefisien filter PPN pada AFB disimbolkan dengan  $g_N(k)$  dan hasil dari proses ini adalah  $y'_N(n)$ .

Kemudian, runtun tersebut diikuti oleh proses *OQAM post-processing* yang mengubah bilangan real menjadi bilangan kompleks [13]. Proses ini ditunjukkan oleh diagram blok pada Gbr. 9. Jika dicermati dengan seksama, tampak bahwa seluruh proses pada sisi penerima merupakan kebalikan dari seluruh proses pada sisi pengirim. Filter *pre-emphasis* pada sisi pengirim juga memiliki proses kebalikan pada sisi penerima, yakni filter *de-emphasis*.

Sinyal hasil *OQAM post-processing* ( $C'_k(l)$ ) mengalami proses pembalikan simbol atau *demapper* sehingga didapatkan kembali runtun sinyal dalam bentuk biner ( $b'(n)$ ). Runtun biner tersebut kemudian diubah menjadi sinyal audio hasil rekonstruksi yang dilambangkan dengan  $\hat{s}(n)$ . Pendekatan FBMC memiliki kelebihan sebagai berikut.

- Tidak memerlukan *guard time* atau CP.
- Kapasitas penuh dari *bandwidth* transmisi akan tercapai jika menggunakan OQAM.
- Kendala frekuensi untuk sinyal yang ditransmisikan mudah dipenuhi.
- *Sub-channel* dapat dikelompokkan ke dalam blok independen, yang sangat penting untuk skalabilitas dan akses dinamis.



Gbr. 10 Sinyal asli yang ditransmisikan.

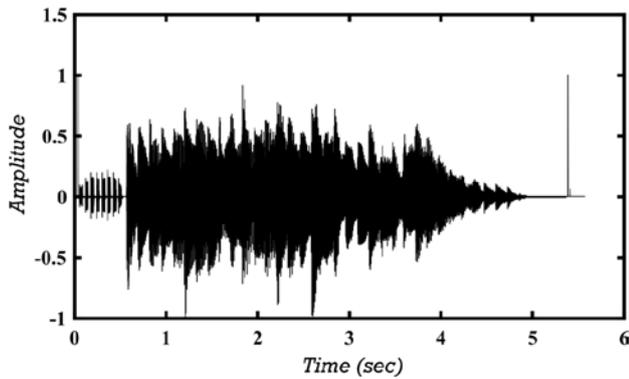
- Tidak adanya kebocoran dalam domain frekuensi sehingga analisis spektral dengan resolusi tinggi dapat tercapai.

#### IV. HASIL DAN ANALISIS

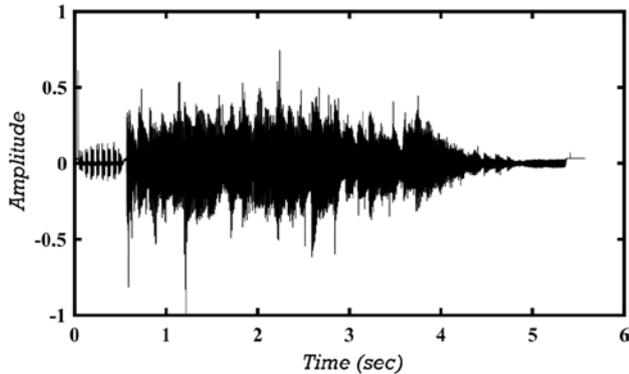
Simulasi dalam makalah ini dilakukan menggunakan MATLAB. Sinyal audio yang digunakan memiliki frekuensi cuplik sebesar 22.050 Hz dengan durasi selama kira-kira 5,6 detik. Maka, panjang sinyal adalah sekitar 122.868 titik. Tiap titik merupakan bilangan desimal, sehingga dikuantisasi ulang dalam rentang 0–255. Dengan demikian, tiap titik dapat diubah menjadi runtun 8 bit. Jika tiap titik dikalikan dengan 8 bit, maka terdapat 982.944 bit yang akan diolah pada skema komunikasi ini. Oleh karena itu, panjang sinyal yang akan dikirim dibagi ke dalam 480 *frame*, dengan setiap *frame* berisi 256 titik. Dengan demikian, sinyal audio dapat dikirimkan seluruhnya ke penerima dan konsumsi waktu komputasi menjadi lebih singkat dan sama untuk setiap *frame* dibandingkan jika sinyal audio dikirimkan sekaligus. Dalam makalah ini dilakukan analisis perbandingan hasil penerimaan transmisi sinyal audio dari sistem komunikasi FBMC-OQAM dengan dan tanpa filter *pre-emphasis*.

Sinyal asli yang ditransmisikan ditunjukkan oleh Gbr. 10. Hasil rekonstruksi dari sinyal yang diterima jika tidak menggunakan filter *pre-emphasis* ditunjukkan oleh Gbr. 11. Pada Gbr. 11, sinyal hasil rekonstruksi memiliki nilai amplitudo sesungguhnya hampir sama dengan sinyal audio yang dikirimkan. Hasil rekonstruksi menampilkan sinyal yang kongruen, baik bentuk dalam kawasan waktu maupun fasenya, tetapi terdapat galat berupa *overshoot* di akhir sinyal.

Sementara itu, hasil dari rekonstruksi sinyal yang menggunakan filter *pre-emphasis* ditunjukkan pada Gbr. 12. Sama halnya dengan hasil pada Gbr. 11, hasil rekonstruksi sinyal dengan filter *pre-emphasis* menunjukkan kekongruenan antara bentuk dan fase kedua. Namun, amplitudo sepanjang waktunya lebih kecil dibandingkan yang tanpa menggunakan filter *pre-emphasis* sinyal dan galat *overshoot* telah tereduksi. Hal ini menandakan bahwa filter *pre-emphasis* sebagai HPF bekerja dengan semestinya, tetapi kandungan spektrum frekuensi rendah pada sinyal audio ini sangat dominan terhadap frekuensi tinggi, sehingga hampir seluruh bagian sinyal mengalami pelemahan (*attenuation*).



Gbr. 11 Hasil rekonstruksi sinyal tanpa filter *pre-emphasis*.

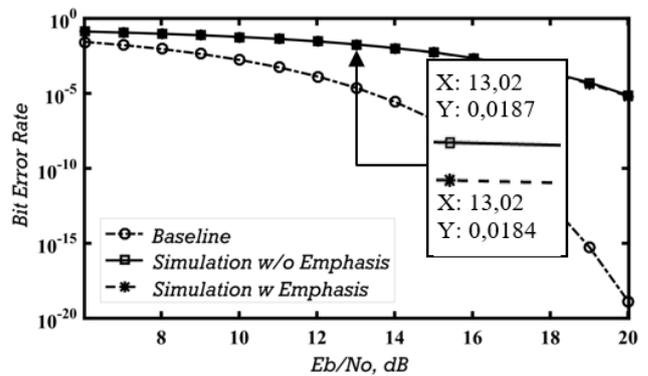


Gbr. 12 Hasil rekonstruksi sinyal dengan filter *pre-emphasis*.

Namun, fakta ini belum dapat menyimpulkan bahwa hasil pada Gbr. 11 lebih baik dibandingkan hasil pada Gbr. 12. Alat ukur kinerja yang biasa digunakan dalam mengukur kualitas transmisi data juga digunakan, yaitu perbandingan BER terhadap Eb/No. Perbandingan nilai BER untuk sinyal yang diterima tanpa dan dengan filter *pre-emphasis* ditampilkan dalam nilai logaritmik pada Gbr. 13.

Pada Gbr. 13, nilai BER dari yang dibandingkan ditunjukkan oleh warna biru dan merah. Warna biru merupakan nilai BER tiap *frame* tanpa menggunakan filter *pre-emphasis*, sedangkan warna merah menandakan nilai BER tiap *frame* dengan menggunakan filter *pre-emphasis*. Nilai BER keduanya hampir sama karena mempunyai selisih BER yang relatif kecil, terlebih jika nilai Eb/No semakin besar. Sebagai contoh, pada Gbr. 13, saat Eb/No bernilai 13 dB, nilai BER untuk simulasi tanpa *pre-emphasis* sebesar 0,0187 dB, sedangkan dengan *pre-emphasis* sebesar 0,0184 dB. Ini menunjukkan bahwa kinerja sistem relatif lebih baik jika menggunakan filter *pre-emphasis*. Untuk memperjelas perbedaan keduanya, maka jumlah galat bit untuk tiap nilai Eb/No dipaparkan dalam Tabel I.

Derau pada sistem merupakan runtun bilangan acak yang terdistribusi Gaussian. Derau ini memiliki sifat *broadband* sehingga rentang frekuensinya sangat lebar, mulai dari yang terendah hingga yang tertinggi. Runtun derau akan berbeda untuk setiap nilai Eb/No. Semakin besar nilai Eb/No, semakin rendah kandungan derau acak. Pada Tabel I, tampak bahwa jumlah galat bit pada sistem yang dilengkapi filter *pre-emphasis* dan *de-emphasis* relatif lebih rendah dibandingkan sistem tanpa filter tersebut (hanya bergantung pada filter FBMC).



Gbr. 13 BER vs Eb/No tanpa dan dengan filter *pre-emphasis*.

TABEL I  
PERBANDINGAN JUMLAH GALAT BIT SISTEM TERHADAP Eb/No

Eb/No (dB)	Tanpa <i>Pre-emphasis</i> (bit)	Dengan <i>Pre-emphasis</i> (bit)	Selisih (Tanpa – Dengan) (bit)
6,0206	130.699	130.299	+ 400
7,0206	111.023	110.587	+ 436
8,0206	92.211	91.718	+ 493
9,0206	73.832	73.450	+ 382
10,0206	56.745	56.631	+ 114
11,0206	41.948	41.429	+ 519
12,0206	28.624	28.426	+ 198
13,0206	18.033	17.783	+ 250
14,0206	10.194	10.047	+ 147
15,0206	5.306	5.120	+ 186
16,0206	2.205	2.159	+ 46
17,0206	783	739	+ 44
18,0206	234	208	+ 26
19,0206	50	42	+ 8
20,0206	7	6	+ 1

Nilai galat saat Eb/No rendah menghasilkan selisih yang signifikan antara sistem dengan dan tanpa filter *pre-emphasis*. Untuk nilai Eb/No sekitar 13 dB, nilai selisihnya adalah 250 bit. Artinya, ada sekitar 250 bit/8 bit = 32 titik (pembulatan ke atas) pada sinyal audio yang ditransmisikan telah mengalami koreksi (diselamatkan) pada sisi penerima jika menggunakan filter *pre-emphasis*. Hal ini merupakan indikasi bahwa derau berada pada rentang *band* (frekuensi) yang luas, termasuk pada frekuensi tinggi. Karena filter *pre-emphasis* telah memperkuat sinyal audio pada rentang frekuensi ini, maka sinyal telah terlindungi oleh dirinya sendiri. Oleh karena itu, ketika melewati sistem telekomunikasi dan difilter balik menggunakan filter *de-emphasis*, maka sinyal pada rentang frekuensi tinggi didominasi oleh sinyal itu sendiri. Begitu juga dengan nilai-nilai jumlah galat bit terhadap Eb/No lainnya.

V. KESIMPULAN

Melalui makalah ini, dapat disimpulkan bahwa implementasi filter *pre-emphasis* dan *de-emphasis* sebagai pelengkap filter *polyphase* pada FBMC dapat meningkatkan kinerja sistem yang diukur melalui BER terhadap Eb/No. Hal ini dapat dilihat pada grafik dan selisih jumlah galat bit yang dipaparkan pada bagian IV. Demikian pula rekonstruksi sinyal

yang diterima setelah ditambahkan dengan filter ini tidak mengubah fase sinyal yang diterima, hanya memperkecil amplitude sinyal. Ini berarti filter *pre-emphasis* mampu meredam kesalahan pengenalan bit yang diterima sekaligus mempertahankan kualitas audionya. Untuk penelitian berikutnya, beberapa jenis filter *polyphase* akan diuji dengan cara serupa, seperti filter *polyphase* QMFB dan CMFB.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Institut Teknologi Telkom Purwokerto atas dukungannya dalam publikasi karya tulis ilmiah ini.

#### REFERENSI

- [1] W. Zhou dan W.H. Lam, "A Fast LMMSE Channel Estimation Method for OFDM Systems," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, Vol. 2009, hal. 1–13, 2009.
- [2] S. Kaur, L. Kansal, G.S. Gaba, dan N. Safarov, "Survey of Filter Bank Multicarrier (FBMC) as an Efficient Waveform for 5G," *Int. J. Pure Appl. Math.*, Vol. 118, No. 7, hal. 45–49, 2018.
- [3] T.D. Ebinowen, Y.K. Abdulrazak, dan B.O. Tijani, "Optimization of MIMO System Using SIC-MMSE in AWGN Rayleigh Fading Channels," *Int. J. Eng. Sci. Res. Technol.*, Vol. 7, No. 9, hal. 146–153, Sep. 2018.
- [4] R. Hidayat, A.F. Isnawati, dan B. Setiyanto, "Channel Estimation in MIMO-OFDM Spatial Multiplexing Using Least Square Method," *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS)*, 2011, pp. 1–5.
- [5] S. Nedic dan R. Vallet, "Power and Spectral Efficiency Advantages of OFDM/OQAM Over OFDM/QAM for PHY in Wireless and Cognitive Radio Networks," *18<sup>th</sup> TELFOR 2010*, 2010, hal. 380-383.
- [6] W. Khrouf, M. Siala, dan F. Abdelkefi, "How Much FBMC/OQAM is Better than FBMC/QAM? A Tentative Response Using the POPS Paradigm," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, Vol. 2018, hal. 1-14, 2018.
- [7] S.C. Prema dan K.S. Dasgupta, "An Iterative Design with Variable Step Prototype Filter for Cosine Modulated Filter Bank," *Radioengineering*, Vol. 25, No. 1, hal. 156–160, Apr. 2016.
- [8] J. Nadal, C.A. Nour, dan A. Baghdadi, "Design and Evaluation of a Novel Short Prototype Filter for FBMC/OQAM Modulation," *IEEE Access*, Vol. 6, hal. 19610–19625, 2018.
- [9] E.W. Lee, "High-Speed Serial Data Link Design and Simulation," Master Tesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA, 2009.
- [10] M. Bellanger, "FBMC Physical Layer: A Primer," ICT-PHYDYAS Project, hal. 1-31, 2010.
- [11] I. McLoughlin, *Applied Speech and Audio Processing with MATLAB Examples*, New York, USA: Cambridge University Press, 2009.
- [12] J. Nadal, C.A. Nour, A. Baghdadi, dan H. Lin, "Hardware Prototyping of FBMC/OQAM Baseband for 5G Mobile Communication," *IEEE Int. Symp. on Rapid System Prototyping*, 2014, hal. 135 - 141.
- [13] P. Kansal dan A. K. Shankwar, "FBMC vs OFDM Waveform Contenders for 5G Wireless Communication System," *Wirel. Eng. Technol.*, Vol. 8, No. 4, hal. 59–70, 2017.
- [14] A.J. Ramadhan, "Implementation of 5G FBMC PHYDYAS Prototype Filter," *Int. J. of Applied Engineering Research*, Vol. 12, No. 23, hal. 13476-13481, 2017.