

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian yang dilakukan oleh Anggun Fitriani Isnawati dan Jans Hendry yang berjudul “Analisa Perbandingan Kinerja Ekualisasi Zero Forcing (ZF) dan MMSE pada FBMC OQAM”. Penelitian ini membahas tentang simulasi FBMC dengan menggunakan modulasi Offset QAM yang ditambahkan dengan ekualisasi Zero Forcing (ZF) dan MMSE. Parameter penelitian ini menggunakan perbandingan rasio kekuatan sinyal dengan derau (SNR) terhadap laju galat bit (BER), Symbol Error Rate (SER) dan kapasitas saluran. Hasil penelitian ini didapatkan bahwa FBMC OQAM dengan menggunakan ekualisasi MMSE pada SNR 5dB memiliki nilai BER 0,2941, sedangkan BER pada FBMC OQAM menggunakan ZF sebesar 0,2875. Kinerja FBMC OQAM menggunakan MMSE lebih baik jika dibandingkan dengan yang menggunakan ZF dalam kinerja BER dan SNR. Kapasitas kanal yang dihasilkan dengan ekualisasi MMSE juga lebih besar dibandingkan ZF [1].

Penelitian yang dilakukan oleh Satwinder Kaur, Lavish Kansal yang berjudul “Survey of Filter Bank Multicarrier (FBMC) as an efficient waveform for 5G”. Penelitian ini berupa survey dan merupakan metode pengembangan metode yang sudah ada. FBMC (Filter Bank Multicarrier) merupakan pengembangan lebih lanjut dari teknologi OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Pada metode OFDM memiliki kelemahan yaitu Inter Symbol Interference (ISI) dan Inter Carrier Interference (ICI) yang cukup tinggi. Sementara gangguan tentang inter simbol ini menjadi masalah yang cukup sering terjadi dan tantangan terbesar di suatu jaringan. Pada OFDM, CP atau Cycle Prefix merupakan Teknik yang mengatasi masalah inter simbol ini. Sementara pada FBMC merupakan Teknik modulasi baru yang mungkin akan digunakan pada masa yang akan datang [3].

Penelitian yang dilakukan oleh Feris Hepi Ramadiansyah pada tahun 2017 yang berjudul “Perbaikan Kinerja Sistem Generalized Frequency Division Multiplexing Dengan menggunakan Offset Quadrature Amplitude Modulation”. Penelitian ini membahas mengenai perbandingan unjuk kerja modulasi QAM dan OQAM dengan menggunakan teknik GFDM (Generalized Frequency Division

Multiplexing) pada kanal AWGN dan Fading. Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa sistem GFDM/OQAM memiliki kinerja lebih baik dibandingkan GFDM/QAM. Hal itu terlihat pada saat hasil simulasi untuk SNR 25dB mengalami penurunan nilai BER dari modulasi QAM ke modulasi OQAM mencapai 99,56% pada kanal AWGN dan 23,61% pada kanal *Rayleigh Fading* [5].

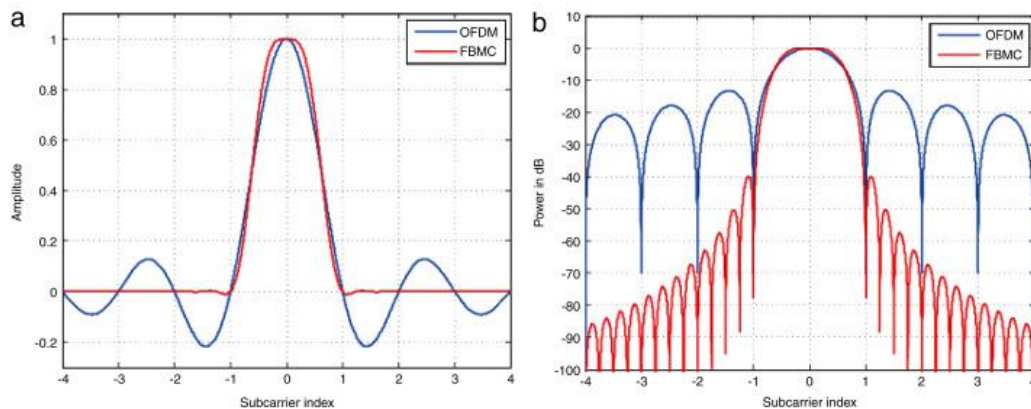
Penelitian yang dilakukan oleh Anggun Fitriani Isnawati, Jans Hendry, dan Viona Octaviani Citra yang berjudul "Performance Analysis of Audio Data Transmission on FBMC - Offset QAM System". Penelitian ini membahas tentang FBMC OQAM dengan ditambahkan ekualisasi *Zero Forcing (ZF)* pada transmisi audio. Hasil penelitian ini menunjukkan FBMC OQAM dengan menggunakan ekualisasi ZF mampu mengurangi BER yang dihasilkan dibandingkan dengan tanpa menggunakan ekualisasi *Zero Forcing*. Seperti ditunjukkan pada SNR 0 dB menghasilkan BER 0,4509 dan BER 0,4445 pada SNR 20 dB. Untuk kapasitas kanal yang dihasilkan meningkat ketika nilai SNR juga meningkat walaupun masih dibawah dari teori Shannon.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Filter Bank Multicarrier

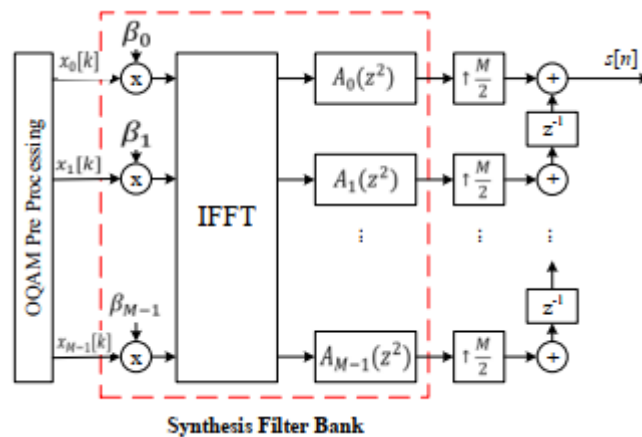
Filter Bank Multicarrier (FBMC) merupakan salah satu calon modulasi *multi-carrier* yang akan digunakan dimasa yang akan datang terutama untuk generasi 5G dari komunikasi bergerak. Pada dasarnya *Filter Bank Multicarrier* ini merupakan pengembangan lebih lanjut dari teknologi modulasi yang sudah ada yaitu *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*. Pada modulasi OFDM ini masih memiliki beberapa kelemahan diantaranya dibutuhkan penggunaan awalan siklik atau *cycle prefix*. Awalan siklik ini sebenarnya merupakan salinan bagian dari simbol itu sendiri yang ditransmisikan dalam OFDM yang kemudian ditambahkan ke bagian awal berikutnya. *Cycle Prefix* ini fungsinya adalah sebagai ketahanan sinyal dari simbol yang ditransmisikan. Kelemahan lain dari sistem OFDM ini adalah lokalisasi *spectral* dari *subcarrier* yang lemah, sehingga dapat menghasilkan kebocoran *spectral* dan masalah interferensi dengan sinyal yang tidak sinkron [1].

Penggunaan *Filter Bank Multicarrier* ini diharapkan menjadi solusi teknik modulasi yang terbaru guna menanggulangi sistem modulasi *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Teknik FBMC mengatasi keterbatasan OFDM dengan menambahkan generalisasi filter pembentuk pulsa yang menghasilkan sub-saluran yang terlokalisasi dengan baik dalam waktu dan waktu domain frekuensi. Akibatnya, sistem FBMC memiliki lebih banyak sinyal penahanan spektral dan menawarkan penggunaan sumber radio yang lebih efektif dimana tidak ada CP wajib.



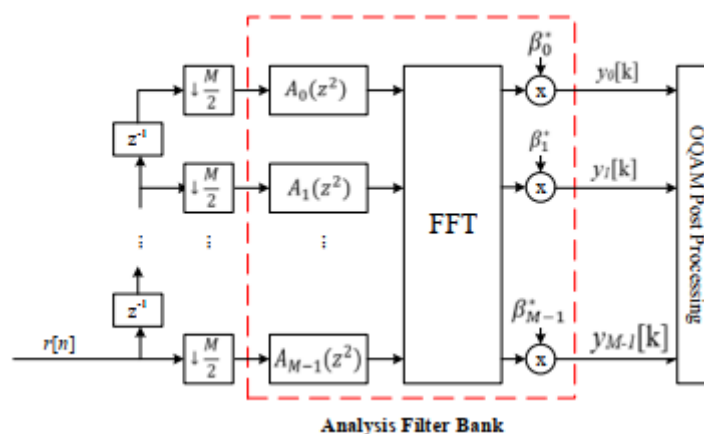
Gambar 2.1 a. Bentuk Gelombang Sub Kanal, b. Spektrum Daya Sinyal Pembawa (Biru:OFDM,Merah:FBMC) [6]

Pada FBMC ini terdapat 2 proses utama didalamnya, proses yang pertama adalah pra pemrosesan dan proses yang kedua adalah pasca pemrosesan. Pra pemrosesan itu sendiri dinamakan dengan sintesis bank filter, posisinya diletakan setelah proses pra pengolahan OQAM. Sementara itu untuk pasca pemrosesan dinamakan dengan analisis bank filter yang posisinya diletakan sebelum proses pasca pengolahan OQAM. Berikut merupakan proses yang terdapat pada FBMC ditujukan pada Gambar 2.2 dan Gambar 2.3 berikut ini [1].



Gambar 2.2 Konfigurasi Pada Sintesis Bank Filter [6]

Gambar 2.2 merupakan gambaran proses dari pra pemrosesan atau yang dinamakan dengan sintesis bank filter. Sebelum sampai pada proses IFFT, keluaran dari proses pra pengolahan OQAM (dari $x_0[k]$ sampai dengan $x_{M-1}[k]$) masing-masing sub saluran (0 sampai M-1, dengan nilai M adalah jumlah sub saluran) akan dinetralkan terlebih dahulu dengan mengkalikan dengan β ($\beta=1$). Sementara pada proses sintesis bank filter ini filter akan disimbolkan dengan $A(z^2)$. Salah satu jenis filter yang paling sederhana adalah dengan menggunakan filter ideal, karena frekuensi yang ada akan langsung diteruskan atau langsung diloloskan tanpa adanya peredaman [6].



Gambar 2.3 Konfigurasi Pada Analisis Filter Bank [6]

Proses selanjutnya adalah proses analisis bank filter. Pada proses ini data masukan $r[n]$ dari proses sintesis bank filter kemudian diubah menjadi bentuk paralel dengan cara diberikan penundaan pengiriman data sebesar 1 kali (z^{-1}) kemudian diturunkan laju pengiriman datanya sebesar faktor 2 kali, kemudian dari sub saluran 0 sampai dengan sub saluran $M-1$ akan dikenakan dengan filter $A(z^2)$. Filter yang digunakan pada proses analisis harus dengan jenis yang sama dengan filter yang digunakan pada proses sintesis. Setelah itu keluaran dari filter yang masih berdomain waktu kemudian diubah menjadi domain frekuensi dengan melalui proses FFT sebelum dinetralkan kembali dengan dikalikan dengan β^* ($\beta^*=1$) sehingga hasil akhir berupa $y_{0[k]}$ sampai dengan $y_{M-1[k]}$. Proses selanjutnya akan diproses pada bagian pasca pengolahan OQAM [1].

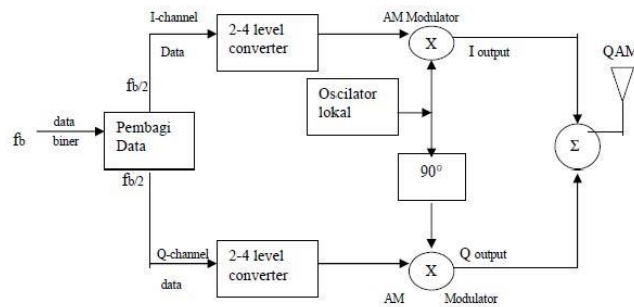
2.2.2 Modulasi Digital

Modulasi digital merupakan proses penumpangan sinyal digital ke dalam sinyal pembawa (*carrier*). Modulasi digital ini juga dapat dikatakan sebagai sebuah proses mengubah-ubah karakteristik dan sifat gelombang pembawa sedemikian rupa sehingga bentuk hasilnya (*modulated carrier*) memiliki ciri-ciri dari bit 0 atau bit 1 yang dikandungnya. Sehingga dengan mengamati *modulated carrier*, dapat mengetahui urutan bitnya disertai *clock (timing, sinkronisasi)*. Melalui proses modulasi digital sinyal-sinyal digital setiap tingkatan dapat dikirim ke penerima dengan baik. Untuk pengiriman ini dapat digunakan media transmisi fisik (logam atau optik) atau non fisik (gelombang-gelombang radio) [5]. Jenis modulasi digital adalah *Amplitude Shift Keying (ASK)* modulasi yang mengubah besar amplitudonya, *Frequency Shift Keying (FSK)* modulasi yang mengubah besar frekuensi pembawanya, *Phase Shift Keying (PSK)* modulasi yang mengubah fase gelombangnya, serta variasi modulasi digital yang lain yaitu *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)* modulasi yang mengubah amplitudo dan fase gelombangnya.

2.2.2.1 Modulasi QAM

Modulasi QAM mengkombinasikan antara ASK dan PSK. Jadi konstelasi sinyalnya berubah sesuai *amplitude* (jarak dari titik asal ke titik konstelasi) juga berdasarkan *phase* (titik konstelasi tersebar di bidang kompleks). *Quadrature Amplitude Modulation* adalah skema modulasi dua sinusoidal *carrier*, tepat 90° dari

fase dengan yang lainnya, digunakan untuk mengirimkan data melalui suatu saluran fisik [5].



Gambar 2.4 Blok Diagram QAM [8]

Proses modulasi secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.4 Pada umumnya sistem ini dibagi menjadi dua yaitu modulator yang berfungsi sebagai *transmitter* dan *demodulator* sebagai *receiver*. Sinyal informasi yang akan dikirim (*baseband*) dibagi menjadi dua komponen, *Inphase* merupakan bagian *real* dan *Quadrature* merupakan bagian imajiner dari sinyal modulasi yang berbeda 90° . Data yang akan dikirim dibagi menurut jumlah bit kemudian dikonversi menjadi suatu simbol. Sinyal QAM yang sudah ditransmisikan harus didemodulasikan agar didapatkan sinyal informasi sesuai yang dikirimkan pemancar. Penerima hanya melakukan proses kebalikan dari pemancar. Dengan melewati sinyal pada penerima *matched filter*, sinyal yang berfrekuensi tinggi akan dihilangkan sehingga diperoleh sinyal *Inphase*. Begitu pula pada komponen *Quadrature*, untuk mendapatkan nilainya didapatkan dengan cara mengalikan sinyal hasil modulasi dengan gelombang sinus. Kedua sinyal tersebut kemudian digabungkan kembali sama seperti bentuk sinyal informasinya.

Dalam pentransmisian data, kedua bagian tersebut digabungkan menjadi persamaan berikut:

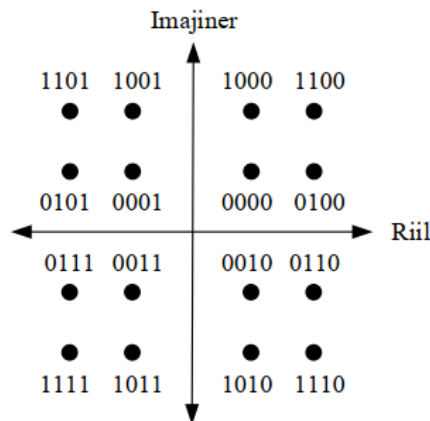
$$S(t) = I(t)\cos(2\pi f_0 t) - Q(t)\sin(2\pi f_0 t) \quad (2.1)$$

Modulasi QAM mempunyai beberapa jenis modulasi, yaitu 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM dan 256-QAM. Dalam modulasi 16-QAM setiap simbol tersusun atas empat bit untuk merepresentasikan satu buah simbol 16-QAM diperlukan empat bit sinyal digital yaitu 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 0111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111. Modulasi digital 16 QAM

digambarkan dalam sebuah diagram konstelasi seperti Gambar 2.5. Pada diagram konstelasi 16 QAM, masing-masing titik mewakili 4 bit simbol yang dibentuk melalui sinyal I dan Q dengan cara pemetaan (*mapping*). Untuk dapat melakukan pemetaan 16 QAM dapat menggunakan persamaan 2.2 berikut ini:

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{10}} \{ (1 - 2b(i)) [2 - (1 - 2b(i + 2))] + j(1 - 2b(i + 1)) [2 - (1 - 2b(i + 3))] \} \quad (2.2)$$

Pada saat sampai di antenna penerima, sinyal yang diterima sudah terganggu dengan derau. Maka titik-titik sinyal terima bila digambarkan pada diagram konstelasi akan berbeda atau bergeser dari sinyal yang dikirim. Besarnya pergeseran ini tergantung pada besarnya derau yang terjadi didalam kanal. Jika pergeseran semakin besar dapat mengakibatkan kesalahan dalam pengembalian pada proses pengawa petaan (*demapping*). Adapun standar 3GPP untuk proses pemetaan 16 QAM dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut [1]:

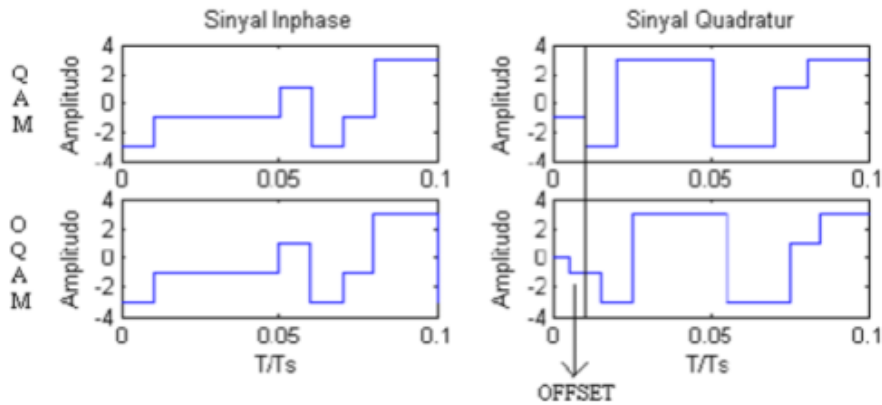


Gambar 2.5 Diagram Konstelasi 16 QAM [1]

Jika dibandingkan dengan modulasi yang lainnya, modulasi QAM memiliki keuntungan yaitu dari segi kecepatan dalam transmisi data, peluang kesalahan simbol lebih kecil, dan efisien dalam penggunaan *bandwidth*. Hal ini dikarenakan banyaknya jumlah bit informasi yang diwakilkan oleh satu simbol. Makin tinggi orde modulasinya, makin cepat transmisi data namun justru makin *sensitive* terhadap derau[13].

2.2.2.2 Modulasi Offset-QAM

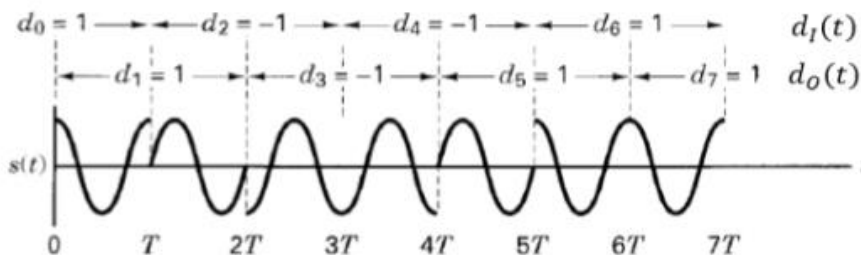
Modulasi yang sering digunakan pada proses transmisi yaitu modulasi QAM dengan *guard interval* dan *Offset QAM*. Gambar 2.6 menunjukkan adanya perbedaan antara modulasi QAM dan OQAM, bit-bit pada posisi *inphase* tetap pada posisi semula sedangkan terjadi *offset* atau pergeseran bit pada sisi *quadrature*.



Gambar 2.6 Sinyal Modulasi QAM dan OQAM [13].

Dengan skema OQAM, spektrum kanal yang berdekatan terjadi *overlap* tanpa mengakibatkan *crosstalk* antar *subcarrier* yang dikarenakan penundaan setengah simbol waktu antara komponen *inphase* dan *quadrature* sinyal pada setiap *subcarrier* [13]. *Crosstalk* dipindahkan atau digeser ke sampel genap pada saat simbol kompleks ditransmisikan dari sampel ganjil. Hal ini akan mengurangi efek dari ICI (*Intercarrier Interference*) karena terjadi pengurangan jarak kanal yang berdekatan pada *subcarrier*.

Pada modulasi *Offset QAM*, terjadi pergeseran fasa dibatasi hingga 0° dan $\pm 90^\circ$ setiap T detik, tidak seperti pada QAM yang terjadi lompatan fasa hingga 180° . Berbeda dengan modulasi QAM, kanal *Inphase* dan *Quadrature* OQAM tidak mengalami transisi pada waktu yang sama seperti yang tampak pada Gambar 2.7 berikut ini. Hal ini menunjukkan bahwa transisi tidak pernah melebihi dari 90° [13].

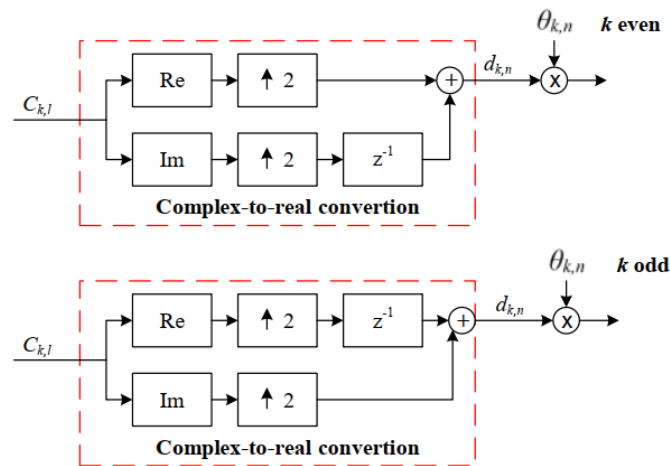


Gambar 2.7 Bentuk Gelombang Sinyal *Offset QAM* [13].

Pada proses OQAM ini terdiri dari dua tahap yaitu pra pengolahan dan pasca pengolahan.

1. Pra pengolahan OQAM

Blok pra pengolahan, yang memanfaatkan perubahan antara simbol QAM dan OQAM. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Operasi pertama adalah pengubahan dari bilangan kompleks menjadi bilangan riil, di mana bagian riil dan imajiner dari simbol bernilai kompleks, dipisahkan lagi untuk membentuk dua simbol baru (operasi ini dapat disebut sebagai *staggering*). Urutan simbol-simbol baru ini tergantung pada nomor sub saluran. Contoh, konversi berbeda untuk subsaluran bernomor genap dan ganjil. seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut ini [6]:



Gambar 2.8 Pra Pengolahan QAM untuk saluran ganjil dan genap [6]

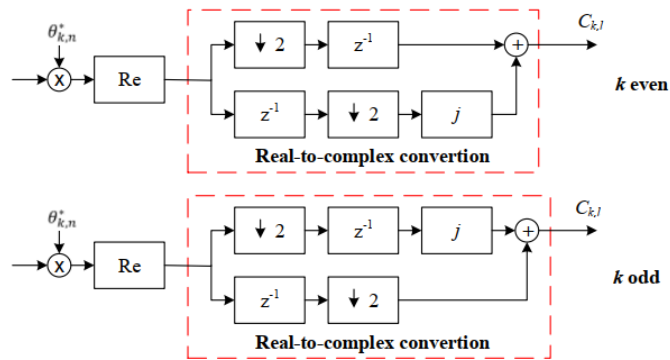
Pada Gambar 2.8 dapat dijelaskan bahwa masukan dari pra pengolahan OQAM berupa bilangan kompleks ($C_{k,l}$) yang terdiri dari bilangan riil (Re) dan bilangan imajiner (Im) dimana masing-masing akan di kenakan kenaikan sebesar faktor 2 kali. Lalu pada keluaran atau hasil peningkatan urutan simbol (k) genap, bagian imajiner akan dikenakan dengan penundaan simbol (z^{-1}). Sedangkan pada keluaran atau hasil peningkatan urutan simbol (k) ganjil, bagian riil akan dikenakan dengan penundaan simbol (z^{-1}). Hasil dari masing-masing penundaan tersebut ditambahkan dengan masing-masing nilai riil dan imajinernya sesuai dengan ketentuan urutan simbol (k) yang fungsinya untuk mendapatkan simbol baru ($d_{k,n}$). Setelah melalui tahap pengubahan bilangan kompleks ke riil, selanjutnya dikalikan dengan persamaan 2.3[6].

$$\theta = j^{(k+n)} \quad (2.3)$$

Dengan j merupakan simbol imajiner, k adalah urutan simbol dan n adalah jumlah simbol. Namun, perlu diketahui bahwa tanda-tanda urutan dapat dipilih secara bebas, tetapi pola bilangan riil dan imajiner harus mengikuti persamaan diatas.

2. Pasca Pengolahan OQAM

Pada proses pasca pengolahan ini merupakan kebalikan dari proses pra pengolahan. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9 berikut ini [6]:



Gambar 2.9 Pasca Pengolahan OQAM untuk saluran ganjil dan genap [6]

Dimana langkah pertama adalah perkalian dengan *conjugate* atau kebalikannya dari $\theta_{k,n}$, selanjutnya dua simbol bernilai riil akan mengalami proses penurunan faktor 2 kali serta penundaan simbol (z^{-1}). Lalu proses selanjutnya untuk membentuk lagi bilangan kompleks salah satu (riil atau imajiner) dikalikan dengan simbol j .

2.2.3 Algoritma Deteksi Simbol

Zero Forcing merupakan salah satu jenis ekualisasi yang cukup sederhana dan mudah dimana \mathbf{H} adalah suatu matriks kanal dan \mathbf{W} adalah matriks yang merepresentasikan proses linear pada penerima, sehingga persamaan ZF memenuhi syarat sebagai berikut[1]:

$$\mathbf{W}\mathbf{H} = 1 \quad (2.4)$$

Agar setiap elemen yang dihasilkan dari simbol dapat terdeteksi maka diperlukan adanya proses “memaksa” interferensi menjadi nol. Matriks \mathbf{W} adalah

matriks kebalikan dari matriks kanal \mathbf{H} . Seperti ditunjukkan pada Persamaan berikut[1]:

$$W_{ZF} = H^{-1} \text{ untuk } N_{TX} = N_{RX} \quad (2.5)$$

$$W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H \text{ untuk } N_{TX} \neq N_{RX} \quad (2.6)$$

Dengan H^H merupakan konjugat transpos matriks \mathbf{H} . *Pseudo Invers (PI)* ada apabila jumlah antena pengirim N_{TX} lebih kecil atau sama dengan jumlah antena penerima (N_{RX}), sedangkan untuk N_{TX} yang lebih besar dari N_{RX} , maka $H^H H$ bernilai *singular* sehingga kebalikannya tidak terdefinisi.

2.2.4 Derau AWGN

Dalam komunikasi, kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) adalah suatu kanal dimana informasi diberi gangguan berupa penambahan *linear* dari *white* derau dengan kerapatan spektrum yang konstan dan distribusi Gaussian dari *sample* derau [14]. Bentuk persamaan dari Gaussian adalah:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(x-m_x)^2/2\sigma^2} \quad (2.9)$$

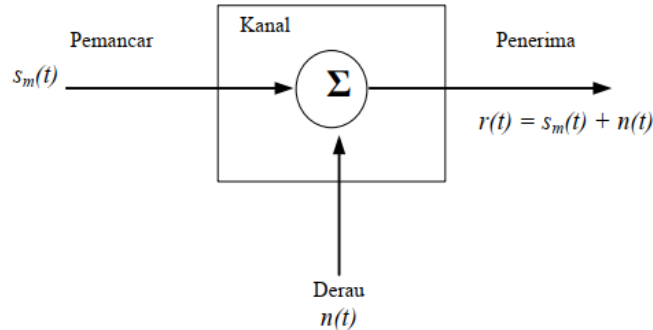
Dimana pada Persamaan 2.9 m_x menggambarkan *mean* atau nilai rata-rata, dan σ^2 menggambarkan dari varian *random*.

Derau merupakan hal yang bersifat khusus dan tidak dapat dieliminir sepenuhnya. Disamping sumber dari resistor, banyak material lain yang merupakan sumber derau yang memiliki karakteristik statistik distribusi Gaussian dan memiliki kerapatan *spectral* yang membentang datar pada hampir keseluruhan spektrum frekuensi. Sehingga derau ini memiliki karakteristik seperti cahaya putih yang dinamakan *white gaussian noise* [15].

Derau AWGN memiliki sifat-sifat sesuai dengan namanya. Sifat *additive* berarti derau ini akan dijumlahkan dengan sinyal informasi, sifat *white* berarti derau ini memiliki rapat daya yang konstan, tidak bergantung pada frekuensi operasi sistem, dan mengandung komponen frekuensi. Sifat Gaussian berarti nilai tegangan derau terdistribusi normal atau gaussian[1].

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (2.10)$$

Sifat *additive* pada AWGN menyebabkan derau ini dijumlahkan pada sinyal transmisi $s(t)$, maka sinyal yang diterima $r(t)$ dan $n(t)$ adalah derau, yang direpresentasikan seperti pada Gambar 2.10 berikut ini[1]:



Gambar 2.10 Pemodelan Kanal AWGN [14].

2.2.5 Parameter Pengujian Sistem

Parameter pengujian sistem dari pengujian FBMC OQAM ini adalah dengan menggunakan parameter *Bit Error Rate* (BER), *Signal to Noise Ratio* (SNR), *Symbol Error Rate* (SER), serta kapasitas kanal.

2.2.5.1 BER (*Bit Error Rate*)

Dalam telekomunikasi, rasio *error* adalah rasio jumlah bit, elemen, karakter, atau blok yang diterima dengan salah dibandingkan jumlah total bit, elemen, karakter, ataupun blok yang dikirim sepanjang *interval* waktu tertentu. Rasio yang paling sering ditemui adalah BER (*Bit Error Rate*). BER adalah jumlah kesalahan bit yang diterima dibagi dengan jumlah total bit yang dikirimkan. Seperti digambarkan pada persamaan berikut ini [1]:

$$BER = \frac{\text{jumlah bit salah}}{\text{jumlah bit yang dikirim}} \quad (2.11)$$

Parameter BER dapat dikatakan baik apabila BER yang dihasilkan adalah kecil atau dalam arti jumlah bit yang salah yang terjadi sedikit. Untuk sistem 16-QAM yang digunakan pada simulasi ini akan mempunyai $M=16$ dan $k=4$. Perhitungan untuk teori BER 16-QAM pada kanal AWGN ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$BER_{AWGN} \left(\frac{E_b}{N_o} \right) = \frac{3}{8} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{2}{5}} E_b N_o \right) - \frac{9}{64} \operatorname{erfc}^2 \left(\sqrt{\frac{2}{5}} E_b N_o \right) \quad (2.12)$$

Dengan E_b merupakan energi bit dari data yang dikirimkan dan N_o merupakan energi dari derau yang terjadi selama proses pengiriman data atau transmisi.

2.2.5.2 SER (*Simbol Error Rate*)

Simbol Error Rate (SER) merupakan parameter yang dilakukan dengan cara membandingkan jumlah simbol yang salah terhadap total jumlah simbol yang dikirim. Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai SER adalah sebagai berikut [1]:

$$SER = \frac{\text{Jumlah simbol salah}}{\text{Jumlah simbol kirim}} \quad (2.13)$$

Semakin kecil nilai SER, maka semakin baik unjukkerja sistem komunikasi, begitu juga sebaliknya. Semakin sedikit jumlah simbol yang salah, maka sedikit juga jumlah bit yang salah. Dengan kata lain *Simbol Error Rate* (SER) sebanding dengan *Bit Error Rate* (BER). Pendekatan perbandingan SER dan BER pada modulasi M-Ary QAM ditunjukkan pada persamaan berikut ini[1]:

$$\frac{1}{M} \leq \frac{P_B}{P_S} \leq \frac{M/2}{M-1} \quad (2.14)$$

$$\frac{P_B}{P_S} \leq \frac{16/2}{16-1} \leq \frac{8}{15} \quad (2.15)$$

$$P_S \leq \frac{15}{8} P_B \quad (2.16)$$

2.2.5.3 E_b/N_o

E_b/N_o adalah perbandingan energi bit yang berhasil dideteksi dengan energi derau yang mengikutinya, dan E_b/N_o ini digunakan untuk sinyal digital. Hal yang diukur yaitu masukan sinyal atau informasi dari pengirim ke penerima dan digunakan sebagai ukuran seberapa banyak kuat sinyal yang ditransmisikan[1].

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{S}{N} \times \frac{W}{R} \quad (2.17)$$

Dengan E_b/N_0 merupakan energi bit (E_b) per energi derau (N_0) dengan desibel (dB) sebagai satuan E_b/N_0 . E_b/N_0 senilai dengan S yang merupakan energi sinyal kirim (*Watt*) dibagi dengan derau (N) yang merupakan energi derau (*Watt*), dimana nilai S/N ini disebut sebagai *Signal to Noise Ratio* (SNR) yang dikalikan dengan kecepatan pengiriman data (R) dengan satuan bit/detik dibagi dengan *bandwidth* (W) dengan satuan Hz.

2.2.5.4 SNR (*Signal to Noise Ratio*)

Signal to Noise Ratio merupakan perbandingan daya dalam suatu sinyal terhadap daya yang dikandung oleh derau yang muncul pada titik-titik tertentu pada saat transmisi. Hubungan daya sinyal dan derau tampak pada persamaan berikut ini [1]:

$$SNR = 10 \log_{10}(S/N) \quad (2.18)$$

Dari persamaan tersebut, S menggambarkan daya sinyal rata-rata dalam satuan Watt, N menggambarkan daya derau. Derau yang bernilai besar akan menyebabkan nilai SNR yang semakin kecil. Semakin dekat jarak transmisi, maka akan semakin besar kekuatan SNR, dan begitu juga sebaliknya.

2.2.5.5 Kapasitas Kanal

Kapasitas kanal merupakan pesat bit maksimum yang dapat dialirkan agar penerima masih dapat dipulihkan tanpa ada galat. Penentuan batas pesat bit (lantas) sangat berpengaruh terhadap adanya berbagai kendala selama proses transmisi dan berkaitan dengan AWGN. Sehingga, untuk menghitung kapasitas kanal pada sistem antena SISO menggunakan teori Shannon dengan SNR adalah perbandingan sinyal terhadap derau (dalam bentuk perbandingan linear), maka persamaanya adalah:

$$C = \log_2 [1 + (SNR)] \text{ bps/Hz} \quad (2.20)$$

Sistem antena SIMO digunakan ketika antena penerima lebih dari satu, maka persamaanya adalah

$$C = \log_2 [1 + N_R (SNR)] \text{ bps/Hz} \quad (2.21)$$

Kapasitas kanal meningkat dengan bertambahnya nilai N_R . Variasi pemancar yang memiliki antena pengirim dengan satu antena penerima MISO, maka persamaanya adalah:

$$C = N_T \log_2 \left(1 + \frac{1}{N_T} SNR \right) \text{ bps/Hz} \quad (2.22)$$

Pada sistem MIMO untuk jumlah pengirim dan jumlah penerima sama, maka persamaan menjadi :

$$C = N_T \log_2 (1+SNR) \text{ bps/Hz} \quad (2.24)$$

2.2.6 Citra

Citra adalah representasi dua dimensi untuk bentuk-bentuk fisik nyata tiga dimensi. Citra dalam perwujudan dapat bermacam-macam, mulai dari gambar perwujudan nya dapat bermacam –macam, mulai dari gambar putih pada sebuah foto (yang tidak bergerak) sampai pada gambar warna yang bergerak pada televisi . Citra memiliki citra warna, salah satunya adalah citra warna model RGB, yaitu citra yang memiliki unsur warna merah, warna hijau dan warna biru. Selain itu sebuah citra juga memiliki citra skalakeabuan (*grayscale*) memiliki unsur-unsur yang terdiri dari *entropy*, kontras, energi, *homogenitas*, skala keabuan dan standar deviasi [17].

Data masukan menggunakan data citra *QR code* yang dengan format .png. Data masukan tersebut memiliki dimensi sebesar 80 x 80 dengan *width* dan *height* masing-masing 80 *pixels*.