

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Penelitian yang dilakukan oleh Satwinder Kaur, Lavish Kansal dkk yang berjudul “*Survey of Filter Bank Multicarrier (FBMC) as an efficient waveform for 5G*”. Penelitian ini bersifat survei atau peninjauan terkait metode baru pada sistem multicarrier yang akan digunakan sebagai pengembangan metode OFDM dan akan diterapkan pada jaringan 5G. Di dalam survei ini, berisikan proses yang terjadi pada FBMC baik dari sisi pengirim maupun penerima. Hasil dari survei ini adalah FBMC merupakan modifikasi dari OFDM. Dalam OFDM *cyclic prefix (CP)* digunakan sebagai ketahanan sinyal. CP adalah teknik modulasi untuk mengatasi Inter Symbol Interference (ISI) dan Inter Carrier Interference (ICI). Gangguan inter simbol merupakan tantangan besar dalam sistem jaringan. Kinerja teknik modulasi tergantung pada strategi yang digunakan untuk modulasi sinyal dan mengurangi tingkat kesalahan bit, interferensi antar simbol. Berbagai skema modulasi digunakan untuk FBMC. Di antara ini, beberapa pendekatan dapat diandalkan dan memberikan sinyal keluaran yang lebih baik. Diamati bahwa semua teknik berbeda dalam strategi yang digunakan untuk penyaringan dan modulasi.

Pada penelitian Feris Hapi Ramadiansyah pada tahun 2017 yang berjudul “*Perbaikan Kinerja Sistem Generalized Frequency Division Multiplexing Dengan Menggunakan Offset Quadrature Amplitude Modulation*”. Penelitian ini membahas mengenai perbandingan unjukkerja modulasi QAM dan modulasi OQAM dengan menggunakan teknik *Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM)* pada kasus kanal AWGN dan Fading. Untuk dapat menganalisa unjukkerja mana yang paling baik dari kedua modulasi tersebut, digunakanlah parameter *Bit Error Rate (BER)* untuk mengujinya. Dari hasil penelitian tersebut, dapat diketahui bahwa sistem GFDM/OQAM memiliki kinerja lebih baik dibandingkan GFDM/QAM. Hal ini 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.

Penelitian yang dilakukan oleh Refinda Dwi Cahyani pada tahun 2013, yang berjudul “*Analisis Unjukkerja Multiple Input Multiple Output 2x2 dengan Zero Forcing*”. Penelitian ini membahas tentang perbandingan unjukkerja pada sistem komunikasi MIMO dan SISO, dengan adanya penambahan algoritma deteksi simbol Zero Forcing di sisi penerima. Teknik MIMO yang digunakan adalah MIMO Space Time Block Code (STBC). BER digunakan sebagai parameter penelitian ini untuk mengetahui kualitas kinerja sistem tersebut. Hasil dari penelitian ini adalah nilai BER yang dihasilkan dari sistem SISO lebih baik dari BER MIMO. Hal ini dibuktikan ketika SNR 20 dB BER yang dihasilkan dari sistem SISO sebesar 8×10^{-2} sedangkan BER yang dihasilkan dari sistem MIMO bernilai $1,1 \times 10^{-1}$.

2.2 DASAR TEORI

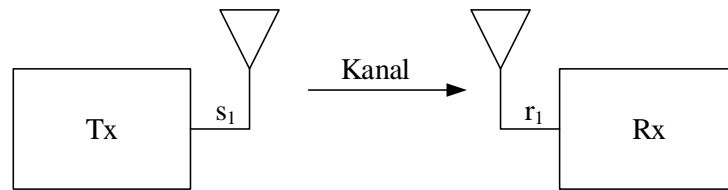
2.2.1 Jenis Komunikasi Nirkabel

Komunikasi Nirkabel merupakan komunikasi yang menggunakan media tanpa kabel sebagai pengiriman datanya. Namun istilah ini lebih dikenal secara khusus dalam pengertian komunikasi melalui gelombang elektromagnetik. Jenis informasi ini diubah menggunakan alat pengubah dan selanjutnya ditumpangkan pada gelombang elektromagnetik untuk dikirim ke penerima. Di sisi penerima, sinyal-sinyal gelombang elektromagnetik diubah menjadi kembali seperti sumber informasi asal. Adapun jenis-jenis komunikasi nirkabel terdiri dari komunikasi *Single Input Single Output (SISO)*, *Single Input Multiple Output (SIMO)*, *Multiple Input Single Output (MISO)*, dan *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*.

2.2.1.1 Single Input Single Output (SISO)

Single Input Single Output (SISO) merupakan sebuah sistem yang menggunakan sebuah antena tunggal pada sisi pengirim dan sebuah antena tunggal pada sisi penerima. Semua data masukan akan dikirim secara bersamaan, pada antena yang sama melalui satu kanal transmisi. SISO juga merupakan sistem yang mudah rentan terhadap gangguan yang disebabkan karena adanya derau. Sehingga akibatnya dapat terjadi penurunan kecepatan pengiriman data dan meningkatkan

kesalahan atau galat dalam pengiriman data [6]. Adapun model kanal SISO seperti ditunjukkan oleh gambar 2.1 berikut ini:

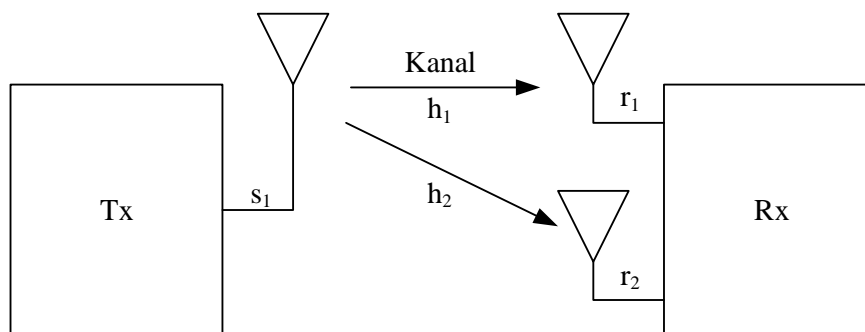


Gambar 2. 1 Model kanal SISO[7]

Berdasarkan Gambar 2.1, Tx merupakan antenna pengirim (*Transmitter*), Rx merupakan antenna penerima (*Receiver*), s_1 merupakan data masukan yang akan dikirim melalui antenna pengirim dan r_1 merupakan data masukan yang diterima melalui antenna penerima.

2.2.1.2 Single Input Multiple Output (SIMO)

Single Input Multiple Output (SIMO) merupakan sebuah sistem yang menggunakan sebuah antenna tunggal pada sisi pengirim dan lebih dari satu antenna pada sisi penerima. Penggunaan sistem SIMO diharapkan dapat mengatasi efek fading dan interferensi. SIMO memiliki keunggulan yaitu dapat mengirimkan data lebih cepat dan dapat mengurangi masalah yang diakibatkan karena pengaruh *multipath* [6]. Adapun model kanal SIMO seperti ditunjukkan oleh gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Model kanal SIMO[7]

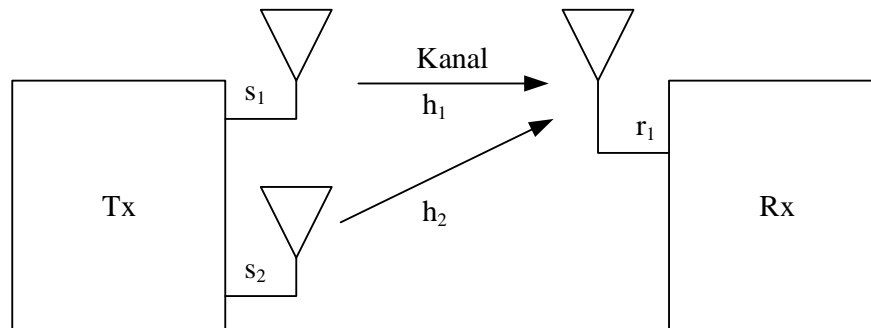
Berdasarkan Gambar 2.2, Tx merupakan antenna pengirim (*Transmitter*), Rx merupakan antenna penerima (*Receiver*), s_1 merupakan data masukan yang akan dikirim melalui antenna pengirim dan r_1 merupakan data masukan yang diterima melalui antenna penerima 1, r_2 merupakan data masukan yang diterima melalui antenna penerima 2. Sedangkan h_1 merupakan kanal yang digunakan untuk

mengirimkan data dari antenna pengirim 1 ke antenna penerima 1 dan h_2 merupakan kanal yang digunakan untuk mengirimkan data dari antenna pengirim 1 ke antenna penerima 2.

2.2.1.3 Multiple Input Single Output (MISO)

Multiple Input Single Output (MISO) merupakan sebuah sistem yang menggunakan dua atau lebih antenna pada sisi pengirim dan satu antenna tunggal pada sisi penerima. Pada sistem MISO terdapat beberapa antenna *transmitter* yang secara simultan digunakan untuk mengirimkan simbol – simbol. Simbol – simbol tersebut kemudian ditransmisikan melalui kanal nirkabel dari antenna pengirim. Apabila letak antenna tersebut cukup jauh, maka dapat mengakibatkan setiap n simbol yang dikirimkan akan mengalami fading yang berbeda yang disebabkan oleh berbedanya lintasan kanal yang dilalui [8].

Model antenna MISO dapat bervariasi, tergantung dari jumlah antenna pengirim. Sebagai contoh model kanal MISO dengan dua buah antenna pengirim dan satu buah antenna penerima, seperti ditunjukkan oleh gambar 2.3.

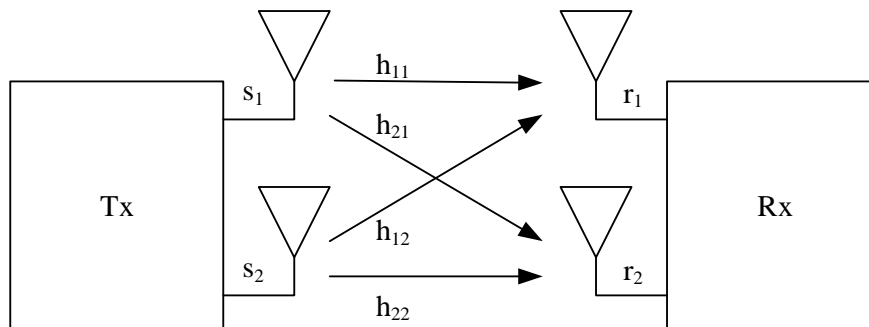


Gambar 2.3 Model kanal MISO[7]

Berdasarkan Gambar 2.3, Tx merupakan antenna pengirim (*Transmitter*). Rx merupakan antenna penerima (*Receiver*). s_1 merupakan data masukan yang akan dikirim melalui antenna pengirim 1. s_2 merupakan data masukan yang akan dikirim melalui antenna pengirim 2 dan r_1 merupakan data masukan yang diterima melalui antenna penerima 1. Sedangkan h_1 merupakan kanal yang digunakan untuk mengirimkan data dari antenna pengirim 1 ke antenna penerima 1 dan h_2 merupakan kanal yang digunakan untuk mengirimkan data dari antenna pengirim 2 ke antenna penerima 1.

2.2.1.4 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

MIMO merupakan sistem yang menggunakan dua atau lebih antena di sisi pengirim dan penerima. Pada sistem MIMO 2x2 dapat diartikan sebagai sistem MIMO dengan konfigurasi dua antena pengirim (Tx) dan dua antena penerima (Rx), seperti ditunjukkan pada gambar 2.4. Pada sistem ini terdapat empat kombinasi kanal yang mungkin untuk dilalui sinyal yang dikirim, yaitu Tx1 dan Tx2 ke Rx1 dan Rx2.



Gambar 2. 4 Model kanal MIMO 2x2[7]

Berdasarkan Gambar 2.4, Tx merupakan antena pengirim (*Transmitter*). Rx merupakan antena penerima (*Receiver*). s_1 merupakan data masukan yang akan dikirim melalui antena pengirim 1. s_2 merupakan data masukan yang akan dikirim melalui antena pengirim 2, r_1 merupakan data masukan yang diterima melalui antena penerima 1 dan r_2 merupakan data masukan yang diterima melalui antena penerima 2. Sedangkan h_{11} merupakan kanal yang digunakan untuk mengirimkan data dari antena pengirim 1 ke antena penerima 1, h_{21} merupakan kanal yang digunakan untuk mengirimkan data dari antena pengirim 1 ke antena penerima 2, h_{12} merupakan kanal yang digunakan untuk mengirimkan data dari antena pengirim 2 ke antena penerima 1, h_{22} merupakan kanal yang digunakan untuk mengirimkan data dari antena pengirim 2 ke antena penerima 2.

2.2.2 Modulasi Digital

Modulasi digital yaitu proses penumpangan sinyal informasi yang berupa sinyal digital kepada suatu sinyal pembawa yang berupa sinyal sinusoida atau dengan kata lain modulasi digital merupakan suatu proses dimana simbol – simbol digital akan dirubah menjadi bentuk gelombang sesuai dengan karakteristik kanal

yang akan dilewati baik berupa amplitudo, frekuensi maupun *phase*. Pada sistem komunikasi, modulasi yang digunakan adalah modulasi digital karena modulasi digital lebih kebal terhadap *noise*, mudah dimultipleks menjadi berbagai bentuk (*voice*, *video*, gambar). Selain itu sistem yang menggunakan modulasi digital juga mudah dalam pengolahan data informasinya baik untuk enkripsi, kompresi, maupun penyandian. Selain keuntungan yang didapat, modulasi digital juga memiliki beberapa kelemahan antara lain adanya interferensi antar kanal (*Interchannel Interference*, ICI) dan adanya interferensi antar simbol (*Intersymbol Interference*, ISI) [8].

Jenis modulasi digital antara lain *Amplitudo Shift Keying* (ASK) yaitu mengubah besar amplitudo gelombang pembawa, *Frequency Shift Keying* (FSK) yaitu mengubah frekuensi gelombang pembawa, dan *Phase Shift Keying* (PSK) yaitu mengubah fase gelombang pembawa. Adapun bentuk variasi modulasi digital lainnya adalah *Quadrature Amplitudo Modulation* (QAM) yaitu bentuk modulasi yang mengubah amplitudo dan fase gelombang pembawa.

2.2.2.1 Modulasi QAM

Pada modulasi *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), pesan bit yang lebih tinggi dapat diperoleh pada sebuah kanal dengan memodulasikan level amplitudo pada isyarat pembawa sebagai ganti fase. Modulasi ini dikenal dengan nama *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM). Pada QAM, informasi yang akan dikirim diubah terlebih dahulu menjadi simbol QAM yang dapat direpresentasikan sebagai isyarat analog pemodulasi. Isyarat pemodulasi ini mengubah amplitudo dan phase isyarat pembawa. Setiap perubahan fase dan amplitudo isyarat pembawa merepresentasikan satu buah simbol QAM yang terdiri dari sejumlah bit informasi. Orde(M) pada M-QAM menunjukkan jumlah simbol yang dapat dihasilkan dalam satu skema modulasi, dimana $M=2^{2N}$, dengan 2N adalah jumlah bit penyusunan 1 simbol. Langkah awal modulasi pada pengirim QAM adalah dengan mengubah bit informasi menjadi simbol-simbol QAM tersebut. Perubahan tersebut dilakukan dengan memisahkan bit informasi menjadi simbol-simbol yang terdiri dari sejumlah bit tertentu. Dalam M-QAM ($M=2^{2N}$) setiap 2N bit dipetakan menjadi sebuah simbol. Satu simbol QAM merupakan suatu bilangan kompleks yang terdiri dari

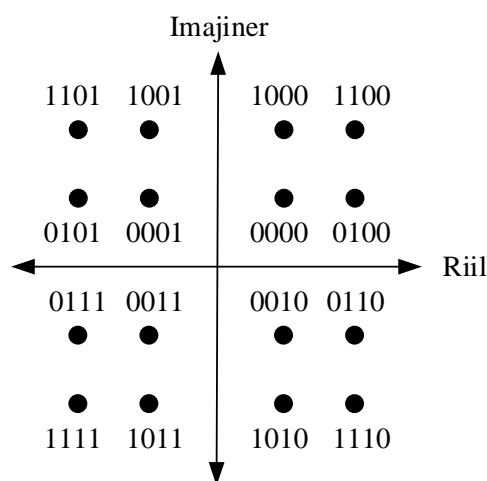
komponen riil dan imajiner. Komponen riil disebut komponen I (*inphase*), sedangkan komponen imajiner disebut komponen Q (*quadrature*).

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 2.1. Pada saat sampai di antena 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 di dalam kanal. Jika pergeseran semakin besar dapat mengakibatkan kesalahan dalam pengembalian pada proses pengawa petaan (*demapping*). Adapun standar 3GPP untuk proses pemetaan 16 QAM sebagai berikut [9]:

$$x = \frac{1}{\sqrt{10}} \{ (1 - 2b(i)) [2 - (1 - 2b(i+2))] + j(1 - 2b(i+1)) [2 - (1 - 2b(i+3))] \} \quad (2.1)$$

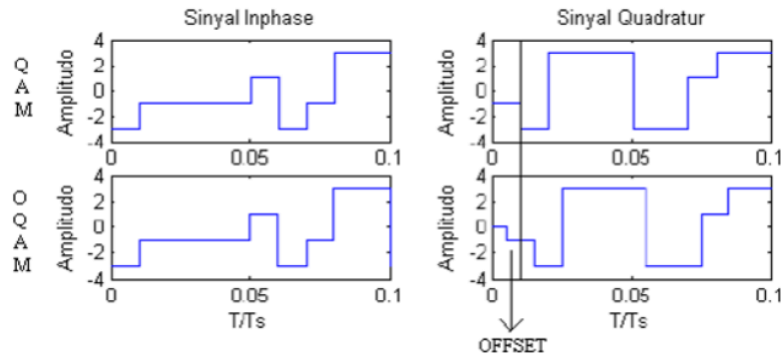
Dengan $b(i)$ = bit pertama, $b(i+1)$ = bit kedua, $b(i+2)$ = bit ketiga, $b(i+3)$ = bit keempat.



Gambar 2. 5 Diagram Konstelasi 16 QAM

2.2.2.2 Modulasi Offset QAM

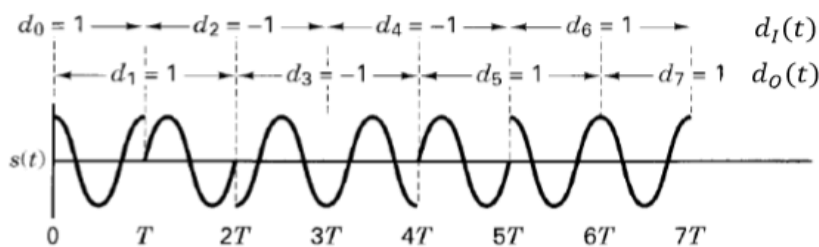
Modulasi yang sering digunakan pada proses transmisi yaitu modulasi QAM dengan *guard interval* dan Offset QAM. Gambar 2.6 menunjukkan adanya perbedaan antara modulasi QAM dan OQAM, bit-bit pada posisi inphase tetap pada posisi semula sedangkan terjadi *offset* atau pergeseran bit pada sisi *quadrature*.



Gambar 2. 6 Sinyal Modulasi pada QAM dan OQAM[10]

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* [10]. *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° .

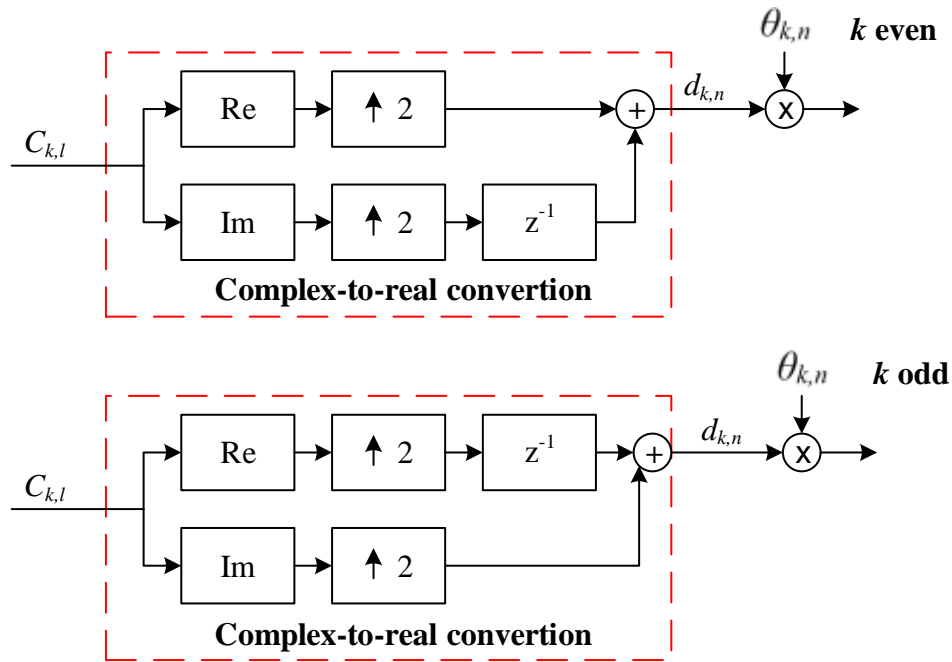


Gambar 2. 7 Bentuk gelombang sinyal Offset QAM [10]

Pada proses OQAM terdiri dari dua tahap yaitu pra pengolahan OQAM dan Pasca Pengolahan OQAM.

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 sub-saluran bernomor genap dan ganjil. Operasi kedua adalah penggandaan demi urutan seperti pada gambar 2.8 berikut ini:



Gambar 2. 8 Pra Pengolahan OQAM untuk saluran ganjil dan genap [11]

Berdasarkan Gambar 2.8, data masukan pra pengolahan OQAM berupa bilangan kompleks ($C_{k,l}$) yang terdiri dari bilangan riil (Re) dan imajiner (Im), dimana masing-masing bilangan riil dan imajiner dikenakan peningkatan sebesar faktor 2 kali ($\uparrow 2$ atau *upsampling* 2). Kemudian keluaran dari hasil peningkatan untuk urutan simbol (k) genap bagian imajiner akan mengalami penundaan 1 simbol (z^{-1}), sedangkan untuk urutan simbol (k) ganjil bagian riilnya akan mengalami penundaan 1 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 2.2 [11]

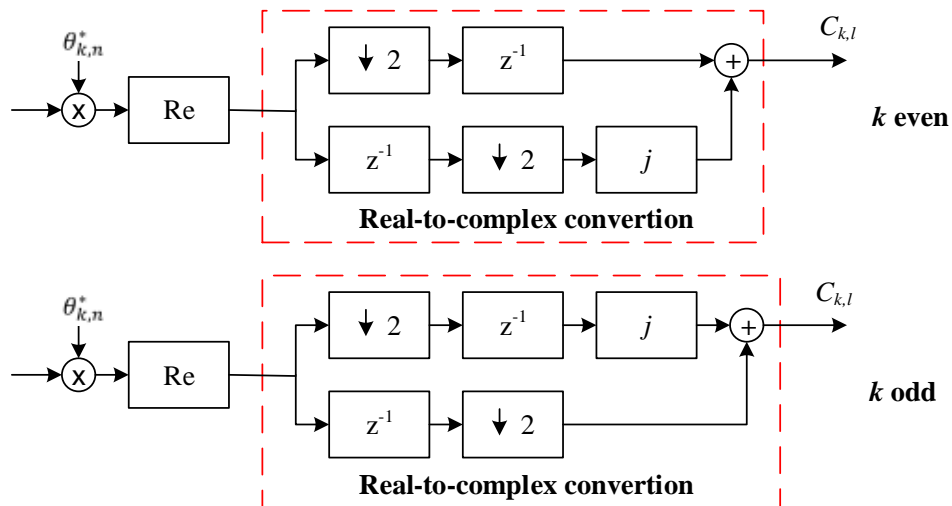
$$\theta_{k,n} = j^{(k+n)} \quad (2.2)$$

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 2.2 di atas. Sebagai contoh, urutan alternatifnya dapat berubah menjadi [11]

$$\theta_{k,n} = \begin{cases} 1, j, 1, j \dots & \text{untuk } k \text{ genap} \\ j, 1, j, 1 \dots & \text{untuk } k \text{ ganjil} \end{cases} \quad (2.3)$$

2. Pasca Pengolahan OQAM

Blok pasca pengolahan OQAM merupakan kebalikan dari blok pra pengolahan OQAM. Pasca pengolahan OQAM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9, memiliki dua struktur yang sedikit berbeda tergantung pada nomor sub-kanal seperti dibawah ini



Gambar 2.9 Pasca Pengolahan OQAM Untuk Saluran Ganjil dan Genap [11]

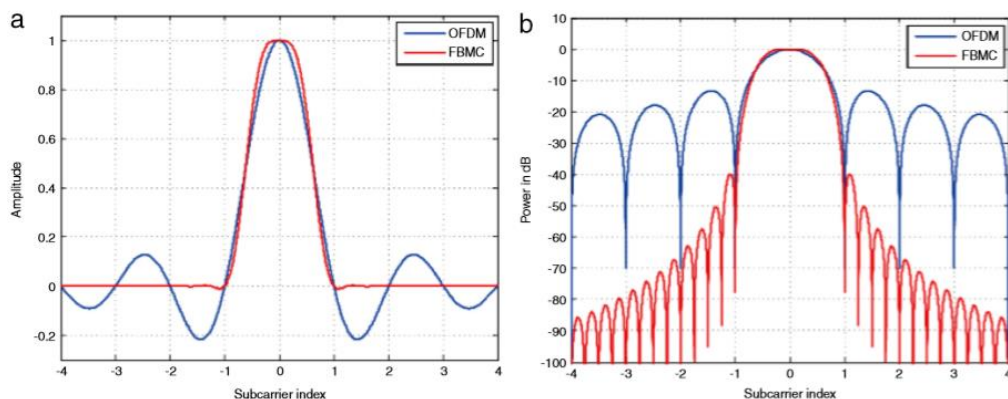
Operasi pertama adalah perkalian dengan *conjugate* atau kebalikan dari $\theta_{k,n}$ urutan yang diikuti oleh operasi mengambil bagian yang sebenarnya. Operasi kedua adalah konversi bilangan riil menjadi bilangan kompleks, di mana dua simbol bernilai riil berturut-turut akan mengalami proses menurunkan laju sampel sebesar faktor 2 pengkali ($\downarrow 2$ atau *downsampling* 2) lalu menalami proses mengalami

penundaan 1 simbol (z^{-1}). Untuk membentuk menjadi bilangan kompleks salah satu dari bilangan riil dan imajiner harus ada yang dikalikan dengan simbol j (operasi ini juga disebut sebagai *de-staggering*). Untuk proses penundaan, *downsampling*, dan perkalian dengan simbol j dilakukan sesuai dengan aturan pada Gambar 2.10. Kemudian hasil dari keluaran tersebut dijadikan satu untuk membentuk sebuah simbol bilangan kompleks baru ($C_{k,l}$).

2.2.3 Filter Bank Multi Carrier (FBMC)

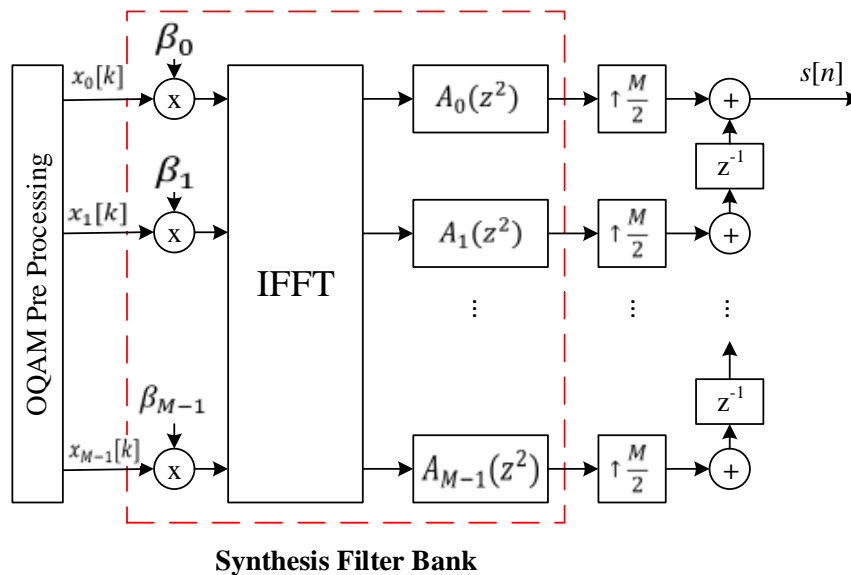
Filter Bank Multi Carrier (FBMC) adalah bentuk modulasi multi-carrier yang memiliki asal dari OFDM. FBMC memiliki penggunaan kapasitas saluran yang tersedia yang jauh lebih baik dan mampu menawarkan kecepatan data yang lebih tinggi dalam spektrum *bandwidth* radio tertentu, contohnya FBMC memiliki tingkat efisiensi spektrum yang lebih tinggi. FBMC termasuk kedalam salah satu pengembangan dari OFDM yang bertujuan untuk mengatasi beberapa masalah atau kekurangan yang dimiliki oleh OFDM, meskipun membutuhkan biaya pemrosesan sinyal yang meningkat.

Salah satu kekurangan utama dari OFDM yaitu dibutuhkannya penggunaan awalan siklik atau *cyclic prefix*. Awalan siklik pada dasarnya adalah salinan bagian dari simbol yang ditransmisikan dalam OFDM yang ditambahkan pada awal berikutnya. Kelemahan lebih lanjut dari OFDM adalah bahwa lokalisasi spektral dari *subcarrier* lemah dan ini dapat menghasilkan kebocoran spektral dan masalah interferensi dengan sinyal yang tidak sinkron. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 berikut ini merupakan perbandingan bentuk gelombang sub kanal dan spektrum daya dari OFDM dan FBMC.



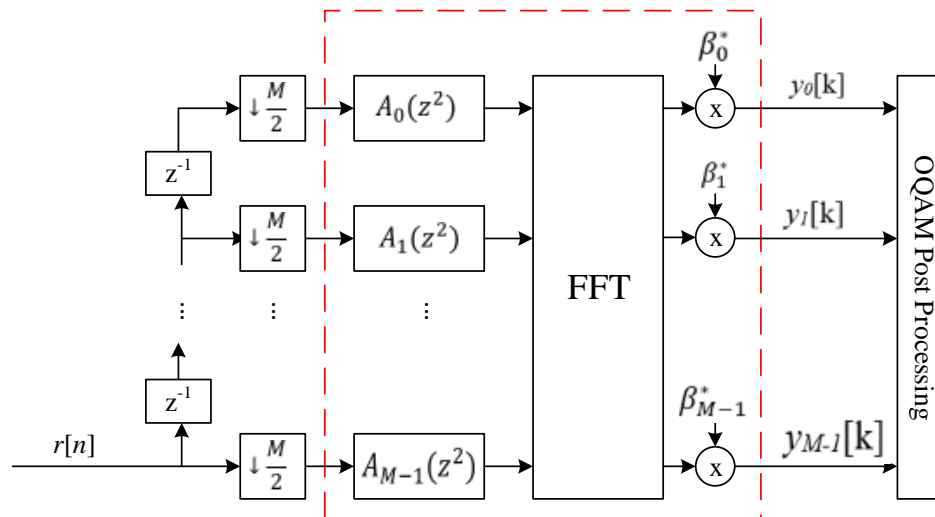
Gambar 2. 10 a. Bentuk Gelombang Sub Kanal, b. Spektrum Daya Sinyal Pembawa (Biru : OFDM, Merah : FBMC) [12]

FBMC terdiri dari 2 proses di dalamnya yaitu pra pemrosesan dan pasca pemrosesan. Proses pada pra pemrosesan di FBMC bernama sintesis bank filter. Sedangkan pada pasca pemrosesan disebut sebagai analisis bank filter. Sintesis bank filter diletakkan pada proses pengiriman data tepatnya sesudah proses pra pengolahan OQAM. Sedangkan di sisi penerima proses analisis berada sebelum proses pasca pengolahan OQAM. Adapun proses di dalam filter bank ditunjukkan pada Gambar 2.11 dan 2.12 berikut ini.



Gambar 2. 11 Konfigurasi pada Sintesis Bank Filter [9]

Berdasarkan Gambar 2.11 sintesis bank filter terdiri dari 2 proses yaitu proses IFFT dan proses filter. Sebelum masuk ke proses IFFT keluaran dari proses pra pengolahan OQAM ($x_{0[k]}$ sampai dengan $x_{M-1[k]}$) masing-masing sub saluran (0 sampai M-1, dengan nilai M merupakan jumlah sub saluran) akan dinetralkan terlebih dahulu dengan dikalikan dengan β ($\beta=1$). Filter pada sintesis bank filter yang disimbolkan dengan $A(z^2)$, digunakan untuk memisahkan sinyal berdasarkan frekuensinya. Jenis filter yang digunakan pada sintesis bank filter dapat menggunakan berbagai jenis filter. Jenis filter yang paling mudah adalah filter ideal. Konsep pada filter ideal adalah frekuensi yang ada akan langsung diteruskan atau diloloskan tanpa adanya peredaman. Keluaran dari sintesis bank filter masing-masing akan dikalikan dengan peningkatan laju sebesar M/2 kali (*upsampling* M/2) dan diberi penundaan masing-masing 1 kali yang disimbollkan dengan z^{-1} agar mendapatkan proses perubahan dari semula bentuk parallel menjadi bentuk seri dengan keluaran $s[n]$.



Analysis Filter Bank

Gambar 2. 12 Konfigurasi pada Sintesis Bank Filter [9]

Berdasarkan Gambar 2.12 analisis bank filter terdiri dari 2 proses yaitu proses FFT dan proses filter. Sebelum masuk ke proses FFT data masukan $r[n]$ yang berbentuk data seri akan diubah menjadi bentuk paralel dengan cara pemberian penundaan pengiriman data sebesar 1 kali (z^{-1}), kemudian diturunkan laju pengiriman datanya sebesar faktor 2 kali ($\downarrow 2$ atau *downsampling 2*). Keluaran dari proses sebelumnya lalu masing-masing sub saluran dari sub saluran 0 sampai sub saluran $M-1$, dikenakan dengan filter $A(z^2)$. Filter pada analisis bank filter digunakan untuk menggabungkan sinyal berdasarkan frekuensinya. Jenis filter yang digunakan pada analisis bank filter harus sesuai dengan jenis filter yang digunakan pada proses sintesis bank filter. Setelah dikenakan filter selanjutnya data keluaran filter yang masing berbentuk sinyal berdomain waktu diubah kembali menjadi domain frekuensi dengan melalui proses FFT, yang selanjutnya masing-masing sub saluran keluaran FFT dinetralkan dengan dikalikan β^* ($\beta^*=1$) sehingga menghasilkan keluaran $y_0[k]$ sampai $y_{M-1}[k]$ yang selanjutnya diproses ke dalam pasca pengolahan OQAM atau *OQAM Post Processing*.

2.2.4 Derau AWGN

Additive White Gaussian Noise (AWGN) dalam proses pengiriman data seringkali terjadi adanya gangguan yang mengakibatkan berkurangnya kualitas pengiriman data. Kemungkinan gangguan tersebut yaitu adanya perbedaan antara sinyal yang dikirim dengan sinyal yang diterima selama proses transmisi, baik

gangguan berupa adanya redaman, derau, kerusakan, dan waktu tunda. Pada sinyal analog, gangguan ini dapat mempengaruhi kualitas sinyal sedangkan pada sinyal digital, gangguan akan mengakibatkan kesalahan pada bit yang diterima.

Salah satu gangguan pada kanal transmisi adalah derau. Derau merupakan adanya sinyal-sinyal yang tidak diinginkan dalam proses pengiriman data dari sisi pengirim menuju penerima yang menyebabkan terjadinya kerusakan pada sinyal informasi, sehingga mengakibatkan berkurangnya kualitas pentransmisian data. Pada jaringan komunikasi nirkabel, AWGN atau yang disebut dengan derau AWGN merupakan derau yang tidak dapat dihindarkan. AWGN adalah proses acak yang memiliki rapat spektrum daya (*power spectral density*)[13]

$$\varphi(f) = \frac{1}{2} N_0 \text{ (W/Hz)} \quad (2.4)$$

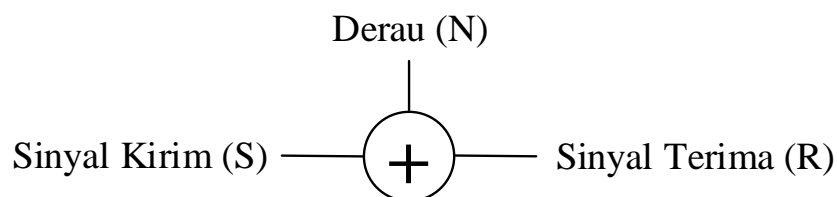
Dengan N_0 adalah konstan dan disebut sebagai rapat daya derau (*noise power density*).

Derau ini didasarkan pada derau suhu (*thermal noise*) yang disebabkan oleh arus-arus dari perangkat elektronik. Arus ini merupakan penjumlahan banyak electron yang bergerak secara bebas, sehingga derau suhu ini dapat diasumsikan sebagai fungsi yang mempunyai kerapatan probabilitas gaussian.

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.

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (2.5)$$

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 2.13 [14]:



Gambar 2. 13 Sifat *additive* derau pada kanal komunikasi [1]

2.2.5 Algoritma Deteksi Simbol

Zero Forcing (ZF) adalah merupakan jenis *equalizer* atau algoritma deteksi simbol yang paling sederhana. Penggunaan algoritma ini cukup mudah yaitu dengan H adalah suatu matriks kanal dan W adalah matriks yang merepresentasikan proses linier pada penerima, sehingga pada ZF harus memenuhi syarat [1].

$$WH = 1 \quad (2.6)$$

Agar setiap elemen yang diinginkan dari simbol data dapat dideteksi, maka diperlukan adanya pemaksaan penginterferens bernilai nol. Matriks W merupakan matriks kebalikan atau kebalikan semu (*pseudo invers*, PI) dari matriks kanal H , seperti ditunjukkan pada persamaan berikut [1].

$$W_{ZF} = H^{-1} \text{ untuk } N_{Tx} = N_{Rx} \quad (2.7)$$

$$W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H \text{ untuk } N_{Tx} \neq N_{Rx} \quad (2.8)$$

Dengan H^H merupakan konjugat transpos matriks 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.

2.2.6 Parameter Pengujian Sistem

Parameter yang menjadi unjuk kerja pengujian sistem FBMC OQAM antara lain: *Bit Error Rate* (BER), *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan Kapasitas Kanal.

2.2.6.1 Bit Error Rate (BER)

Pesat galat bit atau *Bit Error Rate* (BER) merupakan salah satu parameter dasar dan umum digunakan untuk menunjukkan unjukkerja suatu sistem transmisi. Perhitungan BER digunakan untuk mengukur kualitas sinyal dengan cara membandingkan jumlah bit yang salah terhadap jumlah bit yang dikirim, seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut [1].

$$BER = \frac{\text{jumlah bit salah}}{\text{jumlah bit kirim}} \quad (2.9)$$

Unjukkerja sistem komunikasi dikatakan baik jika pesat galat bit atau BER yang dihasilkan adalah kecil dengan kata lain jumlah bit salah yang terjadi semakin sedikit.

Berdasarkan penjelasan mengenai pesat galat bit atau BER dengan simbol yang terdiri dari beberapa bit (tergantung level modulasinya), maka dapat dilakukan pendekatan mengenai hubungan antar keduanya seperti ditunjukkan pada persamaan berikut [1].

$$\frac{1}{k} \leq \frac{P_B}{P_S} \leq \frac{2^{k-1}}{2^k - 1} = \frac{M/2}{M - 1} \quad (2.10)$$

Dengan P_B adalah probabilitas galat bit (BER), dan P_S adalah probabilitas galat simbol, $M=2k$ adalah *level* modulasi pada sistem M-ary dan k adalah orde modulasi. Jadi, 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 [13]:

$$BER_{AWGN}(E_b/N_o) = \frac{3}{8} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{2}{5} E_b/N_o} \right) - \frac{9}{64} \operatorname{erfc}^2 \left(\sqrt{\frac{2}{5} E_b/N_o} \right) \quad (2.11)$$

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.

2.2.6.2 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.

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{S}{N} \times \frac{W}{R} \quad (2.12)$$

Dengan E_b/N_o merupakan energi bit (E_b) per energi derau (N_o) dengan desibel (dB) sebagai satuan E_b/N_o . E_b/N_o 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.

2.2.6.3 Kapasitas Kanal

Kapasitas kanal dapat diartikan sebagai pesat galat bit maksimum yang dapat dialirkan agar di penerima masih dapat dipulihkan tanpa adanya galat. Penyaluran informasi dalam komunikasi digital pada dasarnya adalah penyaluran rentetan bit, baik secara bit-demi-bit, atau dua-bit-demi-dua-bit dan seterusnya. Secara umum, penyaluran dapat dilakukan b-bit demi b-bit, dan berdasarkan teori Nuquist tentang pesat pengisyaratkan (*signaling rate*) dengan lebar bidang B Hz, maka pesat Nyquist [1].

$$R = 2bB \text{ bps} \quad (2.13)$$

Dalam praktiknya, akibat adanya berbagai kendala selama proses transmisi, penentuan batas pesat bit (lantasan) berkaitan dengan pengganggunya berupa AWGN. Sehingga berdasarkan teori Shannon, untuk menghitung kapasitas kanal pada sistem antena tunggal 1x1 (SISO) adalah [1]

$$C = \log_2(1 + SNR) \text{ bps/Hz} \quad (2.14)$$

Dimana, C merupakan kapasitas kanal SISO dan SNR adalah perbandingan sinyal terhadap derau (dalam bentuk perbandingan linear). Jika antena penerima lebih dari satu elemen, dalam hal ini untuk sistem 1xN_R (SIMO) maka kapasitas kanalnya adalah [1]

$$C = \log_2(1 + N_R(SNR)) \text{ bps/Hz} \quad (2.15)$$

Dimana C merupakan kapasitas kanal SIMO, N_R merupakan jumlah antena penerima dan SNR adalah perbandingan sinyal terhadap derau. Dengan bertambahnya nilai N_R, maka kapasitas kanal akan bertambah secara logaritmik. Untuk kasus peragaman pemancar yang memiliki N_T antena pengirim dengan satu antena penerima (MISO), kapasitas kanalnya menjadi [1]

$$C = N_T \log_2 \left(1 + \frac{1}{N_T} SNR \right) \text{ bps/Hz} \quad (2.16)$$

Dimana C merupakan kapasitas kanal MISO, N_T merupakan jumlah antena pengirim dan SNR adalah perbandingan sinyal terhadap derau. Jika dibandingkan dengan sistem antena tunggal, kapasitas kanal pada sistem antena jamak dengan antena pengirim (N_T) dan antena penerima (N_R) dapat dinaikkan sebesar faktor min (N_T, N_R) tanpa adanya penambahan daya antena atau lebar bidang.

Pada sistem MIMO $N_T \times N_R$, setiap antenna pengirim (N_T) membawa sinyal yang berisi bit-bit yang berbeda, sehingga kapasitas total MIMO berdasarkan teori Shannon adalah [1]

$$C = N_T \log_2 \left(1 + \frac{N_R}{N_T} SNR \right) \text{ bps/Hz} \quad (2.17)$$

Dimana C merupakan kapasitas kanal MIMO, N_T merupakan jumlah antenna pengirim, N_R merupakan jumlah antenna penerima dan SNR adalah perbandingan sinyal terhadap derau. Sehingga, untuk sistem MIMO dengan jumlah pengirim sama dengan jumlah penerima, maka persamaan 2.18 dapat disederhanakan menjadi [1]:

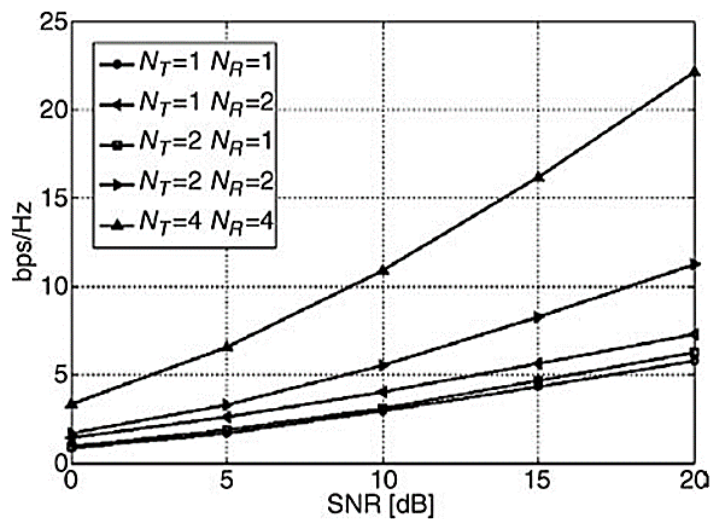
$$C = N_T \log_2(1 + SNR) \text{ bps/Hz} \quad (2.18)$$

Dimana C merupakan kapasitas kanal MISO, N_T merupakan jumlah antenna pengirim dan SNR adalah perbandingan sinyal terhadap derau. Sedangkan, kapasitas kanal pada sistem MIMO $N_T \times N_R$ dengan kanal diketahui di sisi penerima, berdasarkan teori Gans dan Foschini adalah [1]:

$$C = \log_2 \left(\det \left(I_{N_R} + \frac{SNR}{N_T} H H^H \right) \right) \quad (2.19)$$

Dengan I_{N_R} adalah matriks identitas dengan ukuran sesuai jumlah antenna penerima, H adalah matriks kanal dengan ukuran matriks $H \in C^{N_T \times N_R}$ dan H^H adalah konjugat transpos.

Secara teoritis, kapasitas kanal untuk beberapa jenis komunikasi seperti SISO, SIMO, MISO, dan MIMO ditunjukkan pada gambar 2.14



Gambar 2. 14 Kapasitas kanal teoritis[15]

2.2.6.4 *Signal to Noise Ratio* (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) merupakan perbandingan (ratio) antara kekuatan sinyal terhadap kekuatan derau, yang muncul pada titik – titik tertentu pada saat transmisi. Hubungan daya sinyal dengan noise tampak pada persamaan berikut [16].

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \quad (2. 20)$$

Dengan S adalah daya sinyal rata – rata (Watt) dan N adalah daya derau atau *noise* (Watt). *Noise* yang bernilai besar akan menyebabkan nilai SNR yang semakin kecil. Semakin dekat jarak transmisi, maka akan semakin besar pula kekuatan SNR begitu pula sebaliknya.