

TEKNIK MODULASI QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION

Sigit Kusmaryanto

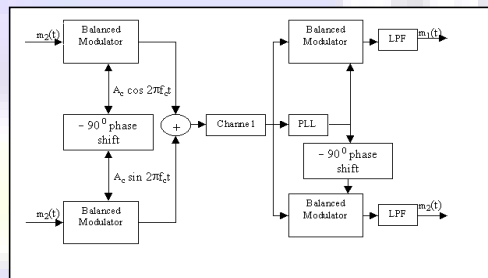
<http://sigitkus.lecture.ub.ac.id>

A. PENGERTIAN QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION

Quadrature Amplitudo Modulation atau QAM adalah suatu cara pentransmision pada laju bit-bit yang lebih tinggi pada saluran/kanal dengan lebar pita yang terbatas. Sebagai contoh penggunaan kumpulan sinyal QAM 16 titik memungkinkan 9600 bit/detik ditransmisikan pada saluran telepon dengan lebar pita 2700 Hz. Dalam kasus tersebut empat digit biner yang berurutan harus disimpan dan dikodekan kembali sebagai salah satu dari 16 bentuk sinyal yang ditransmisikan. Sinyal-sinyal yang dihasilkan dinamakan sinyal modulasi amplitudo kuadratur (QAM). Sinyal ini dapat ditafsirkan sebagai modulasi amplitudo multitingkat yang diterapkan secara bebas pada setiap dua pembawa kuadratur.

B. PENTRANSMISIAN QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION

Sinyal Quadratur Amplitudo (QAM) mempergunakan dua pembawa kuadratur $\cos 2\pi f_c t$ dan $\sin 2\pi f_c t$, masing-masing dimodulasikan oleh bit informasi. Metode dari transmisi sinyal memakai Quadrature Carrier Multiplexing



Gambar 2.1 Metode Transmisi QAM

Sinyal ditransmisikan pada frekuensi carrier yang sama dengan memakai dua pembawa kuadratur $A_c \cos 2\pi f_c t$ dan $A_c \sin 2\pi f_c t$. Untuk mengerjakannya, diandaikan $m_1(t)$ dan $m_2(t)$ adalah dua sinyal informasi terpisah yang ditransmisikan melalui kanal. Amplitudo sinyal $m_1(t)$ memodulasi pembawa $A_c \cos 2\pi f_c t$ dan amplitudo sinyal $m_2(t)$ memodulasi pembawa kuadratur $A_c \sin 2\pi f_c t$. Dua sinyal dijumlahkan dan ditransmisikan melalui kanal. Sehingga sinyal yang ditransmisikan adalah

$$u(t) = A_c m_1(t) \cos 2\pi f_c t + A_c m_2(t) \sin 2\pi f_c t \quad (2.1)$$

atau

$$u_m(t) = A_{mc} gT(t) \cos 2\pi f_c t + A_{ms} gT(t) \sin 2\pi f_c t$$

$m = 1, 2, \dots, M$

Dimana A_{mc} dan A_{ms} adalah posisi dari level amplitudo yang diperoleh dari penempatan k-bit sequence ke dalam amplitudo sinyal. Umumnya, QAM dapat di lihat sebagai bentuk gabungan dari modulasi amplitudo digital dan modulasi fasa digital. Jadi bentuk gelombang sinyal QAM yang ditransmisikan dapat dinyatakan

$$u_{mn}(t) = A_m gT(t) \cos (2\pi f_c t + \theta_n) \quad (2.2)$$

$m = 1, 2, 3, \dots, M1$

$n = 1, 2, 3, \dots, M2$

Diagram blok fungsional dari modulator QAM untuk mendapat sinyal QAM yang akan ditransmisikan adalah :

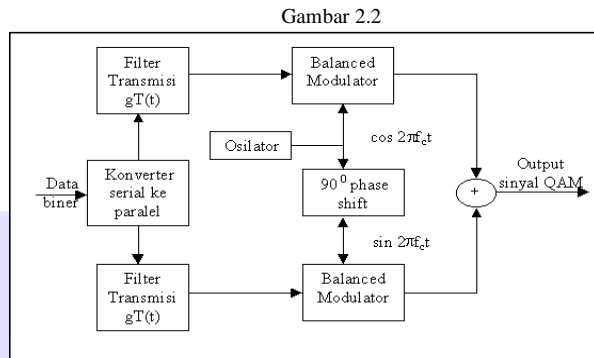


Diagram blok fungsional QAM

Representasi sinyal geometris dari sinyal yang di berikan modulator QAM dalam bentuk vektor sinyal 2 dimensi bisa dituliskan :

$$S_m = (\sqrt{E_s} A_{me}, \sqrt{E_s} A_{ms}) \quad m = 1, 2, 3, \dots, M \quad (2.3)$$

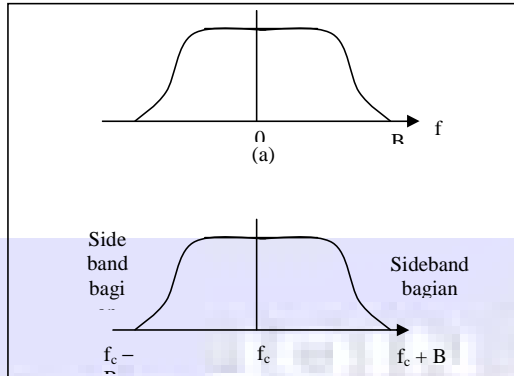
Suatu sinyal yang ditransmisikan dalam sembarang selang t detik tertentu, akan memiliki persamaan sbb :

$$S(t) = \sum_n [a_n h(t - \frac{n}{t}) \cos \omega_c t + b_n h(t - \frac{n}{t}) \sin \omega_c t] \quad (2.4)$$

- $h(t)$: tanggapan impuls filter pembentukan
- $n = 0$: sesuai dengan selang t detik pada saat ini
- n positif : sesuai dengan selang t detik pada saat sesudahnya
- n negatif : sesuai dengan selang t detik pada saat sebelumnya
- (a_n, b_n) : salah satu dari harga-harga pasangan yang mungkin ditransmisikan dalam selang tersebut.

Dari persamaan (2.4) ini terlihat bahwa sinyal QAM secara umum harus mempunyai spektrum yang berpusat disekitar frekuensi pembawa $f_c = \omega_c / 2\pi$. Dalam spektrum terdapat sideband bagian atas dan bagian bawah yang membentang dengan *bandwidth* masing-masing sebesar B hz. Pembentukan sideband bergantung pada filter pembentukan

$h(t)$. Gambar spektrum QAM dapat dilihat pada gambar (2.1).



Gambar 2.3. Spektrum QAM (a)Spektrum baseband. (b) spektrum QAM

Misalkan sideband transmisi adalah B_T Hz. Maka laju simbol yang dapat ditransmisikan melalui suatu saluran dengan lebar *baseband* B Hz adalah $2B / (1 + r)$ dengan faktor r berubah-ubah dari suatu harga ideal nol (filter *low pass* ideal) hingga 1. Laju simbol yang diperbolehkan melalui saluran transmisi adalah yang ekuivalen dengan *bandwidth* B_T Hz, dengan demikian adalah $B_T / (1 + r)$ simbol perdetik. Untuk sinyal QAM dengan $M = 2^n$ simbol, laju bit yang diperbolehkan adalah $nB_T / (1 + r)$ bit/detik atau *bandwidth* transmisi $n / (1 + r)$ bit/detik/Hz. Beberapa contoh laju bit yang diperbolehkan per Hz nampak pada tabel 2.1.

Tabel 2.1

Laju-laju bit yang diperbolehkan pada transmisi QAM

M (banyak keadaan)	Faktor r			
	0.1	0.25	0.5	1
2	0.9	0.8	0.67	0.5
4	1.8	1.6	1.33	1.0
8	2.7	2.4	2.0	1.5
16	3.6	3.2	2.67	2.6

C. LAJU PENGIRIMAN SINYAL

Untuk suatu bentuk gelombang biner, laju bit adalah sama dengan laju pengiriman sinyal dan dinyatakan dalam bit/detik. Misalkan Γ adalah waktu yang diperlukan untuk memancarkan 1 bit, maka laju pengiriman sinyal adalah :

$$r = 1 / \Gamma \quad (2.5)$$

Bila sinyal dipancarkan melalui sebuah saluran jalur dasar (*baseband channel*), lebar jalur saluran menentukan batas atau limit dari laju pengiriman sinyal. Limit ini tercapai untuk sinyal dengan jumlah perubahan per detik yang terbesar, yakni suatu gelombang persegi yang mempresentasikan suatu sinyal digital. Periode gelombang persegi ini adalah 2Γ dengan komponen frekuensi dasar adalah $f_0 = 1/2\Gamma = r/2$.

Saluran baseband berperilaku sebagai sebuah filter *low pass* yang melewatkan semua frekuensi dari 0 sampai suatu nilai *cut off*. Dengan memisalkan bahwa respon frekuensi adalah nol diatas suatu limit frekuensi B , maka agar komponen dasar dari gelombang persegi dapat dipancarkan, f_0 tidak boleh lebih besar dari B , jadi :

$$B \geq f_0 \text{ atau } B \geq r/2 \quad (2.6)$$

Persamaan (2.6) di atas disebut *Kriteria Nyquist* yang menyatakan bahwa untuk suatu laju pengiriman sinyal r , lebar jalur tersempit yang dapat digunakan adalah :

$$B = r/2 \quad (2.7)$$

Berdasarkan rumusan di atas dapat diketahui bahwa laju pengiriman sinyal (r) pada saluran telepon dengan bandwidth 300-3400 Hz adalah ≤ 6200 bit/detik. Sehingga untuk meningkatkan laju pengiriman sinyal menjadi 9600 bit/detik dibutuhkan bandwidth ≥ 4800 Hz. Hal ini dapat dipenuhi dengan bantuan 16 QAM.

D. JUMLAH KANAL YANG TERSEDIA DALAM SISTEM

Kapasitas kanal yang tersedia dalam sistem didapat dari lebar bidang yang tersedia dibagi dengan spasi kanal atau lebar bidang tiap kanal. Jika diketahui bandwidth sistem sebesar B_c dan spasi tiap kanal atau lebar bidang kanal adalah B_c , maka jumlah kanal yang tersedia dalam sistem sebesar :

$$N = B_c/B_c \quad (2.8)$$

Dengan mengetahui jumlah sel dalam kelompok sel didapat jumlah kanal tiap sel. Misal jumlah sel dalam sekelompok sel adalah K , maka jumlah kanal setiap sel (m) adalah :

$$M = N/K \quad (2.9)$$

E. EFISIENSI LEBAR BIDANG SISTEM MODULASI M-ARY QAM

Efisiensi lebar bidang merupakan perbandingan antara kecepatan transmisi data dengan lebar bidang frekuensi. Dengan demikian terlihat bahwa efisiensi lebar bidang berhubungan dengan kecepatan transmisi data.

Efisiensi lebar bidang berhubungan dengan kecepatan transmisi, oleh karena itu efisiensi lebar bidang juga berhubungan dengan kapasitas kanal yang tersedia dari suatu sistem komunikasi.

Kecepatan transmisi sinyal adalah hal penting dalam pentransmisi sinyal digital. Pada bentuk gelombang biner laju bit adalah sama dengan laju pengiriman sinyal dan diukur dalam bit per detik. Misalkan τ adalah waktu yang diperlukan untuk memancarkan satu bit, maka laju pengiriman sinyal (r) adalah sama dengan $1/\tau$ bit per detik.

Pada sinyal yang dipancarkan lewat saluran pita dasar (*baseband channel*), lebar saluran menentukan batas laju pengiriman sinyal, Untuk sinyal biner gelombang persegi periode sinyal adalah 2τ , maka frekuensi dasar gelombang persegi adalah $f_0 = 1/2\tau = r/2$. Misalkan lebar saluran pita dasarnya adalah sebuah filter lolos rendah (LPF) yang melewatkan frekuensi dari nol hingga suatu nilai frekuensi *cut off* B Hz. Agar komponen dasar gelombang persegi dapat dipancarkan dengan baik maka menurut kriteria *Nyquist* yang menyatakan bahwa untuk satu laju pengiriman sinyal r bit/detik, lebar pita tersempit yang dapat digunakan adalah :

$$\begin{aligned} B &\geq f_0 \\ B &\geq r/2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Perkembangan teknologi menuntut untuk dapat mentransmisikan data dengan laju bit yang makin tinggi pada lebar pita yang sesempit mungkin. Untuk itu peningkatan kapasitas kanal sangat diperlukan, dengan kata lain efisiensi maka diperlukan efisiensi lebar bidang sebesar mungkin. Hal ini bertujuan untuk memperkecil lebar bidang frekuensi yang diperlukan untuk pentransmisi, dan mengurangi besar kerapatan daya *noise* yang timbul. Tetapi dengan memperbesar efisiensi lebar bidang, akan mengakibatkan adanya interferensi antar simbol (*interference inter symbol, ISI*).

Untuk meminimalisasi interferensi ini pada lebar pita tertentu secara teoretis dapat digunakan filter lolos rendah (LPF) ideal yang memenuhi kriteria *Nyquist*. Teorema *Nyquist* menyatakan bahwa untuk mentransmisikan suatu data biner tanpa terjadi interferensi antar simbol atau keadaan *zero ISI*, maka respon frekuensi sinyal keluaran pada sistem harus sesuai dengan kriteria berikut :

1. Respon frekuensi sinyal keluaran LPF pada sisi pemancar dan penerima mempunyai respon nol untuk

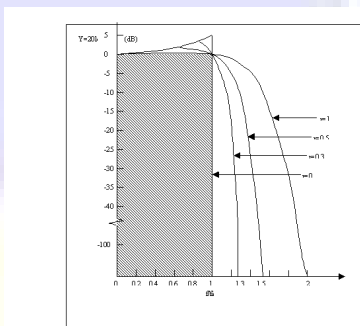
$$f > R_s/2 + R_s/2$$

2. Respon frekuensi sinyal keluaran BPF pada sisi pemancar dan penerima mempunyai respon nol untuk

$$f < f_c - (R/2)(1+\alpha) \text{ dan } f < f_c + (R/2)(1+\alpha)$$

Agar kriteria di atas terpenuhi maka perlu dirancang suatu filter yang secara teoritis banyak digunakan dalam praktek sebagai model, yaitu filter *Nyquist* atau dikenal dengan filter *raised cosine*, yang mempunyai karakteristik α (faktor *roll off*) sedemikian rupa, sehingga dapat memenuhi kriteria *Nyquist*.

Faktor *roll off* adalah perbandingan bagian kelebihan lebar pita filter terhadap pita *Nyquist*. Secara teoritis sebuah filter *raised cosine* dari sitem dirancang dengan faktor *roll off* = 0, tetapi untuk merancang filter dengan faktor *roll off* = 0 sampai sekarang belum ditemukan. Secara praktis besar faktor *roll off* suatu filter dalam sistem berkisar antara 0,2 - 1.



Gambar 2.4 Kurva Karakteristik Spektrum Frekuensi Keluaran Sinyal Dari Filter *Raised Cosine* Untuk Berbagai Nilai Faktor *Roll Off*.

Kurva karakteristik spektrum frekuensi keluaran sinyal dari filter *raised cosine* ditunjukkan pada gambar 2.4. Jika filter *raised cosine* dipergunakan untuk transmisi sinyal NRZ polar, maka harus ditambahkan *equalizer* agar permukaan spektrum frekuensi keluaran filter *raised cosine* menjadi rata.

Secara matematis hubungan antara lebar bidang frekuensi, kecepatan transmisi data dan faktor *roll off* dari suatu filter adalah :

$$\frac{R_b}{B} = \frac{\log_2 M}{1 + \alpha} \quad (2.11)$$

dengan :

B = lebar bidang frekuensi (Hz)

R_b = kecepatan transmisi data (bps)

α = faktor *roll off* filter

R_b/B = efisiensi lebar bidang (bit/s Hetz)

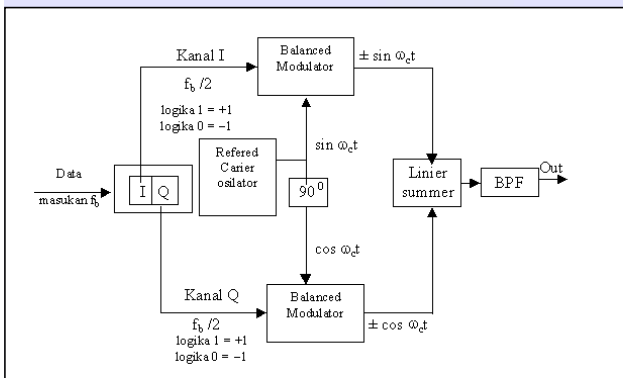
Dari persamaan (2.11) dapat disimpulkan bahwa besar lebar bidang frekuensi adalah :

$$B = \frac{R_b(1 + \alpha)}{\log_2 M} \quad \text{atau}$$

$$B = R_s(1 + \alpha)$$

F. QAM 4 KEADAAN

QAM 4 keadaan merupakan teknik encoding M-er dengan M=4, dimana ada empat keluaran QAM yang mungkin terjadi untuk sebuah frekuensi pembawa. Karena ada 4 keluaran yang berbeda, maka harus ada 4 kondisi masukan yang berbeda. Karena masukan sinyal digital ke QAM modulator adalah sinyal biner, maka untuk memperoleh 4 kondisi masukan yang berbeda diperlukan lebih dari satu bit masukan. Dengan memakai 2 bit masukan, maka diperoleh 4 (2²) kondisi yang mungkin : 00, 01, 10, 11 data masukan biner digabung menjadi kelompok dua bit. Masing masing kode bit menghasilkan salah satu dari 4 keluaran yang mungkin.



Gambar 2.5
Diagram blok pemancar QAM 4

Dua bit dimasukkan secara seri kemudian dikeluarkan secara paralel satu bit ke kanal I dan bit lainnya serentak menuju ke kanal Q. Bit di kanal I dimodulasikan dengan pembawa (sin ω_ct) dan bit di kanal Q dimodulasikan dengan pembawa (cos ω_ct). Untuk logika 1 = +1 volt dan logika 0 = -1 volt, sehingga ada 2 fasa yang mungkin pada keluaran modulator kanal I yaitu +sin ω_ct dan -sin ω_ct. Dan ada 2 fasa yang mungkin pada keluaran modulator kanal Q yaitu +cos ω_ct dan -cos ω_ct. Penjumlahan linier menghasilkan 4 fasa resultan yang mungkin yaitu : +sin ω_ct +cos ω_ct, +sin ω_ct -cos ω_ct, dan -sin ω_ct + cos ω_ct, dan -sin ω_ct -cos ω_ct. Jika masukan biner dari Q = 0 dan I = 0 maka dua masukan modulator kanal I adalah -1 dan (sin ω_ct). Sedangkan dua masukan modulator kanal Q adalah -1 dan cos ω_ct.

Sehingga, keluarannya adalah :

$$\text{Modulator kanal I} = (-1) (\sin \omega_c t) = -1 \sin \omega_c t$$

$$\text{Modulator kanal Q} = (-1) (\cos \omega_c t) = -1 \cos \omega_c t$$

Dan keluaran dari penjumlah linier adalah

$$-1 \sin \omega_c t - 1 \cos \omega_c t = \sqrt{(-1)^2 + (-1)^2} \cos(\omega_c t - \text{tg}^{-1} 1)$$

$$= 1,414 \cos(\omega_c t - 45^\circ)$$

$$= 1,414 \sin(\omega_c t - 135^\circ)$$

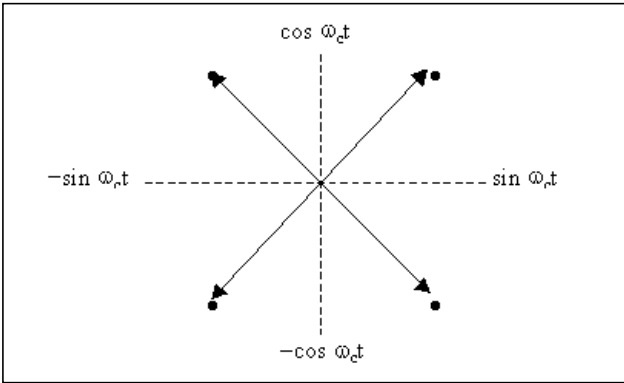
Comment [M1]:

Comment [M2]:

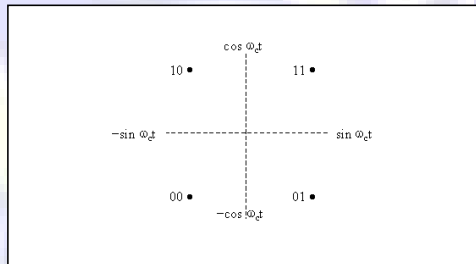
Maka diperoleh tabel kebenaran:

Masukan biner		Keluaran 4 QAM	
Q	I	Amplitudo	fasa
0	0	1,414	- 135 ⁰

0	1	1,414	-45°
1	0	1,414	135°
1	1	1,414	45°

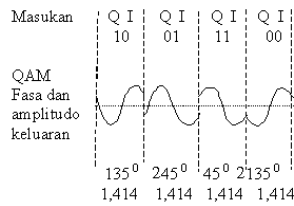


Gambar 2.6 Diagram Fasor 4 QAM



Gambar 2.7
Diagram susunan bit 4 QAM

Grafik hubungan fasa keluaran terhadap waktu



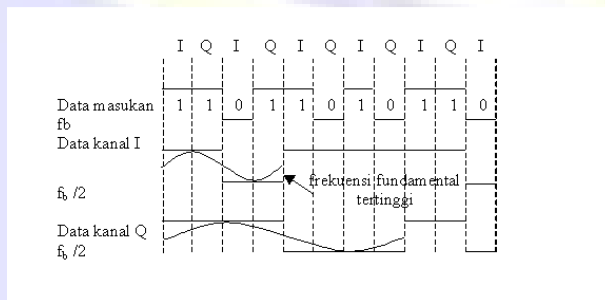
G. BANDWIDTH QAM 4 KEADAAN

Data masukan pada QAM 4 keadaan di bagi menjadi 2 kanal. Laju pada kanal I sama dengan kanal Q yaitu setengah dari laju data masukan ($f_b/2$). Frekuensi fundamental tertinggi ada pada data masukan ke modulator kanal I atau kanal Q, yaitu seperempat laju data masukan ($f_b/4$). Keluaran modulator kanal I dan kanal Q memerlukan bandwidth Nyquist minimum sebesar setengah dari laju data masukan

$$(f_b/4 \times 2 = f_b/2)$$

Jadi dengan QAM 4 keadaan, penekanan bandwidth terpenuhi (bandwidth minimum lebih kecil dari laju data masukan)

Sejak sinyal keluaran tidak berubah fasa sampai dua bit (dibit) terkunci laju pembelahan bit, laju perubahan keluaran (baud) tercepat juga sama dengan setengah laju data masukan. Bandwidth minimum dan baud adalah sama.



Keluaran dari modulator dapat dinyatakan :

$$\text{Output} = (\sin \omega_a t) (\sin \omega_c t)$$

Dimana $\omega_a t = 2 \pi f_b / 4 t$ (fasa modulasi)

$$\omega_c t = 2 \pi f_c t$$
 (fasa pembawa tak termodulasi)

Sehingga,

$$\text{Output} = (\sin 2 \pi f_b / 4 t) (\sin 2 \pi f_c t)$$

$$= 1/2 \cos 2 \pi (f_c - f_b / 4) t - 1/2 \cos 2 \pi (f_c + f_b / 4) t$$

spektrum frekuensi keluaran adalah dari $f_c + f_b / 4$ sampai $f_c - f_b / 4$

dan bandwidth minimum (f_N) adalah:

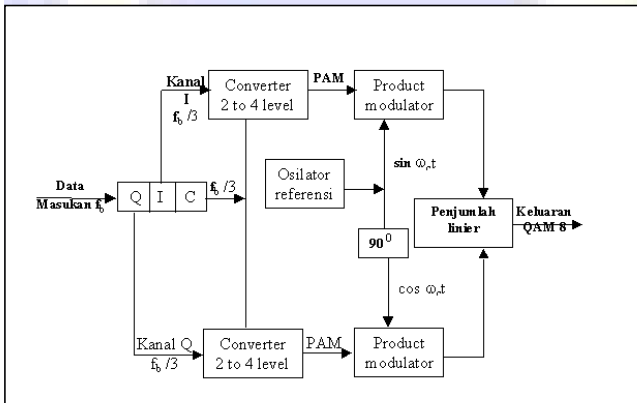
$$(f_c + f_b / 4) - (f_c - f_b / 4) = 2 f_b / 4 = f_b / 2$$

H. QAM 8 KEADAAN

QAM 8 keadaan adalah teknik encoding M-er dengan M=8. Dengan QAM 8 keadaan keluaran yang mungkin untuk satu frekuensi pembawa. Untuk memperoleh 8 kondisi masukan yang berbeda maka data masukan biner digabung menjadi tiga kelompok bit yang disebut TRIBIT ($2^3 = 8$). Masing –masing kode tribit menghasilkan salah satu keluaran yang mungkin .

Masukan bit serial mengalir ke pembelah bit dimana mengubah ke bit paralel, menjadi keluaran tiga kanal (kanal I atau kanal ‘in-phase’, kanal Q atau ‘in quadrature’, dan kanal C atau ‘kontrol’). Sehingga laju bit pada masing –masing kanal menjadi sepertiga laju data masukan ($f_b / 3$).

Bit kanal I dan C menuju konverter kanal I dan bit di kanal Q dan C menuju converter kanal Q. Converter ‘2 to 4 level’ adalah DAC (digital to analog converter) engan masukan paralel masukan 2 bit, ada 4 tegangan keluaran yang mungkin. Bit kanal I atau Q menentukan dari polaritas dari keluaran, sinyal analog PAM (logika 1 = +V dan logika 0 = –V). Sedangkan bit kanal C menentukan besarnya (logika 1= 1,307 V dan logika 0 = 0,541 V), karena bit kanal C sama sebagai masukan converter kanal I dan Q, maka besar sinyal kanal I dan Q selalu sama.



Gambar 2.8 Diagram Pemancar 8 QAM

Untuk masukan tribit Q = 0, I = 0, C = 0 (000), maka masukan converter kanal I adalah I = 0 dan C = 0, dari tabel kebenaran di peroleh keluaran –0,541 volt. Dan masukan converter kanal Q adalah Q = 0 dan C = 0, dari tabel kebenaran di peroleh keluaran –0,541. Lalu dua masukan modulator kanal I adalah –0,541 dan sin dan keluarannya adalah :

$$I = -(0,541)(\sin \omega_c t)$$

$$= -0,541 \sin \omega_c t$$

Dan dua masukan modulator kanal Q adalah –0,541 dan $\cos \omega_c t$ laju keluarannya adalah :

$$Q = (-0,541)(\cos \omega_c t)$$

$$= -0,541 \cos \omega_c t$$

Kemudian keluaran dari modulator kanal I dan Q di jumlah pada penjumlahan linier dan keluarannya adalah :

$$= -0,541 \sin \omega_c t - 0,541 \cos \omega_c t$$

$$= 0,765 \sin \omega_c t - 135^0$$

Tabel 2.2

Tabel Kebenaran converter

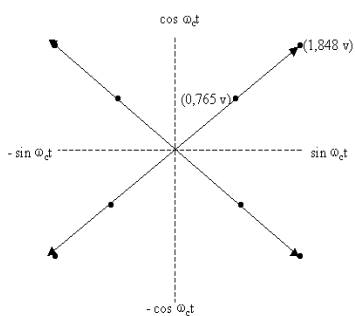
I / Q	C	Output
0	0	- 0,541
0	1	- 0,307
1	0	+ 0,541
1	1	+ 1,307



Tabel 2.3

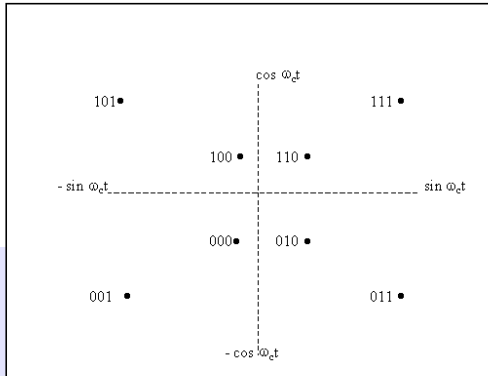
Tabel Kebenaran Kode Tribit

Tribit			Keluaran QAM 8	
Q	I	C	Amplitudo	Fasa
0	0	0	0,765	-135°
0	0	1	1,848	-135°
0	1	0	0,765	-45°
0	1	1	1,848	-45°
1	0	0	0,765	135°
1	0	1	1,848	135°
1	1	0	0,765	45°
1	1	1	1,848	45°



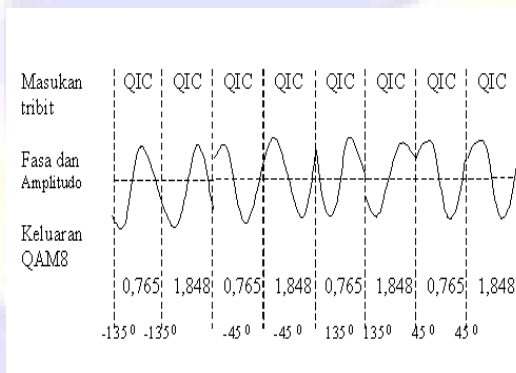
Gambar 2.9

Diagram fasor 8 QAM



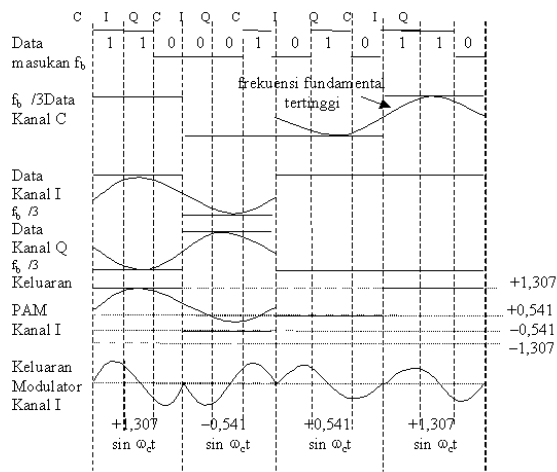
Gambar 2.10
Diagram susunan 8 QAM

Grafik hubungan fasa dan amplitudo keluaran QAM 8 terhadap waktu



I. BANDWIDTH QAM 8 KEADAAN

Sejak data dibagi menjadi tiga kanal, laju data pada kanal I, kanal Q, dan kanal C. Adalah sebesar sepertiga dari laju data masukan ($f_b / 3$). Karena bit di kanal I, Q, C dikeluarkan secara serentak dan paralel, converter juga mengalami perubahan pada masukan keluaran pada laju yang sama yaitu $f_b / 3$.



Dari perhitungan bandwidth di atas, frekuensi fundamental tertinggi pada kanal I, Q atau C adalah seperenam dari laju bit masukan (satu siklus pada I, Q atau C sama waktunya dengan 6 bit masukan). Demikian juga frekuensi fundamental tertinggi pada sinyal PAM sebesar seperenam laju bit biner ($f_b/6$). Dengan QAM 8 keadaan terdapat satu perubahan fasa atau amplitudo untuk tiap tiga bit data masukan. Akibatnya baud untuk QAM 8 adalah ($f_b/3$) sama dengan bandwidth minimum. Prinsip kerja 'Balanced modulator' sama dengan 'produk modulator' yaitu keluarannya adalah hasil dari pembawaan dan sinyal PAM. Secara matematis, keluaran dari modulator adalah :

$$\text{Output} = (x \sin \omega_a t) (\sin \omega_c t)$$

Dimana $\omega_a t = 2 \pi f_b / 6 t$ (fasa pemodulasi)

$$\omega_c t = 2 \pi f_c t \text{ (sinyal pembawa)}$$

Sehingga,

$$\text{Output} = (x \sin 2 \pi f_b / 6 t) (\sin 2 \pi f_c t)$$

$$= x/2 \cos 2 \pi (f_c - f_b / 6) t - x/2 \cos 2 \pi (f_c + f_b / 6) t$$

spektrum frekuensi keluaran adalah dari $f_c - f_b / 6$ sampai $f_c + f_b / 6$ dan bandwidth minimum (f_N) adalah:

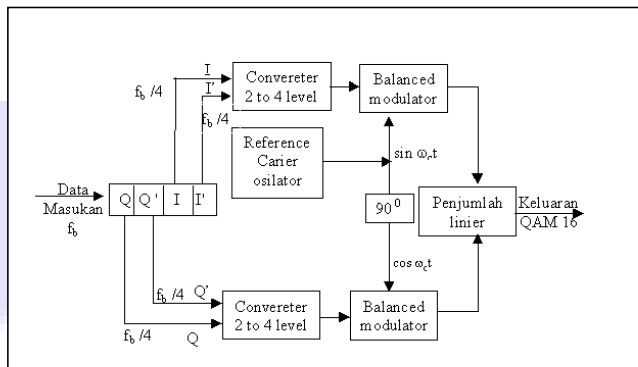
$$(f_c + f_b / 6) - (f_c - f_b / 6) = 2 f_b / 6 = f_b / 3$$

J. QAM 16 KEADAAN

QAM 16 keadaan adalah teknik encoding M-er dengan $M = 16$ dimana ada 16 keluaran yang mungkin dengan amplitudo dan fasa yang berbeda. Data masukan di bagi menjadi 4 bit ($2^4 = 16$) /yang disebut QUADBIT. Data masukan biner di bagi menjadi 4 kanal yaitu : I, I', Q, dan Q' laju bit pada masing-masing kanal sebesar 1/4 dari laju bit masukan ($f_b / 4$). Empat bit masukan secara serial sampai pembelahan bit, dan dikeluarkan secara serentak dan paralel pada kanal I, I', Q, dan Q'. Bit pada kanal I dan Q menyatakan polaritas dari converter. (logika 1 = +V, logika 0 = -V), bit pada kanal I' dan Q' menyatakan besar keluaran (logika 1 = 0,821 V dan logika 0 = 0,22 V).

Akibatnya converter menghasilkan 4 tingkatan sinyal PAM. Dua polaritas dan dua besaran yang mungkin pada keluaran converter yaitu $\pm 0,22$ V dan 0,821 V, sinyal PAM dimodulasi dengan membawa 'In phase' dan 'Quadrature' di modulator dan masing-masing modulator mempunyai 4 keluaran yang mungkin.

Keluaran modulator kanal I adalah $+0,821 \sin \omega_c t$, $-0,821 \sin \omega_c t$, $+0,22 \sin \omega_c t$ dan $-0,22 \sin \omega_c t$. Keluaran modulator kanal Q adalah $+0,821 \cos \omega_c t$, $+0,22 \cos \omega_c t$, $-0,821 \cos \omega_c t$, dan $-0,22 \cos \omega_c t$. Penjumlahan linier menggabungkan keluaran modulator, dan menghasilkan 16 kondisi keluaran QAM 16 keadaan.



Gambar 2.10
Diagram blok pemancar QAM 16

Tabel kebenaran converter

kanal I			kanal Q		
I	I'	Output	Q	Q'	Output
0	0	-0,22	0	0	-0,22
0	1	-0,821	0	1	-0,821
1	0	+0,22	1	0	+0,22
1	1	-0,821	1	1	+0,821

Untuk masukan Quadbit I = 0, I' = 0, Q = 0, Q' = 0 (000), masukan ke converter kanal I = 0 dan I' = 0. Dari tabel kebenaran diperoleh keluaran adalah $-0,22$ V. Sedangkan masukan ke converter kanal Q adalah Q = 0 dan Q' = 0, dari tabel diperoleh keluaran adalah $-0,22$. Jadi dua masukan modulator kanal I adalah $-0,22$ V dan $\cos \omega_c t$ dan keluarannya :

$$I = (-0,22)(\sin \omega_c t) = -0,22 \sin \omega_c t$$

Dua masukan modulator kanal Q adalah $-0,22$ V dan $\cos \omega_c t$ dan keluarannya :

$$Q = (-0,22)(\cos \omega_c t) = -0,22 \cos \omega_c t$$

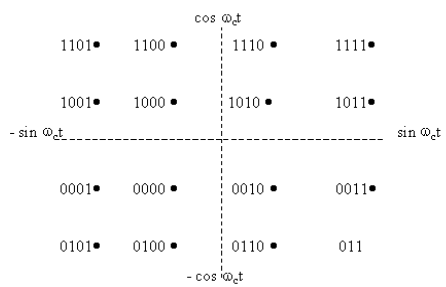
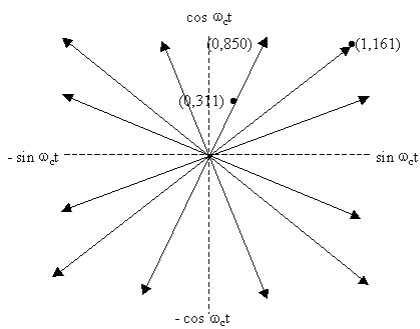
Keluaran dari modulator digabungkan pada penjumlah linier dan menghasilkan keluaran termodulasi yaitu :

$$\begin{aligned} \text{Keluaran penjumlah} &= -0,22 \sin \omega_c t - 0,22 \cos \omega_c t \\ &= 0,311 (\sin \omega_c t - 135^\circ) \end{aligned}$$

Tabel kebenaran

Masukan		Keluaran	
Q	Q' I I'	QAM 16	
0	0 0 0	0,311	-135°
0	0 0 1	0,850	-165°
0	0 1 0	0,311	-45°
0	0 1 1	0,850	-15°
0	1 0 0	0,850	-105°
0	1 0 1	1,161	-135°
0	1 1 0	0,850	-75°
0	1 1 1	1,161	-45°

Masukan		Keluaran	
Q	Q' I I'	QAM 16	
1	0 0 0	0,311	135°
1	0 0 1	0,850	175°
1	0 1 0	0,311	45°
1	0 1 1	0,850	15°
1	1 0 0	0,850	105°
1	1 0 1	1,161	135°
1	1 1 0	0,850	75°
1	1 1 1	1,161	45°

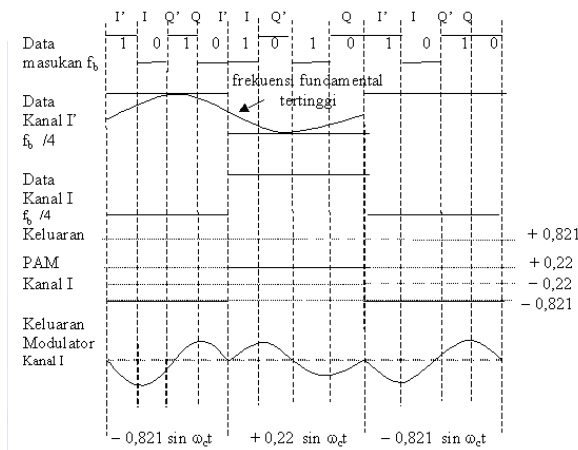


Gambar 2.11
Diagram fasor 16 QAM

Gambar 2.12
Diagram susunan bit 16 QAM

K. BANDWIDTH 16 QAM

Sejak data masukan dibagi menjadi 4 kanal, laju bit pada kanal I, I', Q, dan Q' dikeluarkan secara serentak dan paralel, converter mengalami perubahan pada masukan dan keluaran pada laju data seperempat data masukan ($f_b/4$)



Dari gambar di atas terlihat, frekuensi fundamental tertinggi pada kanal I, I', Q, atau Q' adalah seperdelapan dari laju bit data masukan biner (1 siklus di kanal I, I', Q, atau Q' sama dengan 8 masukan). Begitu juga untuk frekuensi fundamental tertinggi untuk sinyal PAM sebesar $f_b/8$.

Dengan QAM 16 keadaan, terdapat satu perubahan amplitudo atau pun sinyal output untuk setiap 4 bit data masukan. Akibatnya baud di dapat sebesar $f_b/4$ sama dengan bandwidth minimum.

Keluaran dari modulator adalah :

$$\text{Output} = (x \sin \omega_c t)(\sin \omega_c t)$$

Dimana $\omega_m t = 2 \pi f_b/8 t$ (fasa pemodulasi)

$$\omega_c t = 2 \pi f_c t \text{ (fasa sinyal pembawa)}$$

$$x = \pm 0,22 \text{ atau } \pm 0,821$$

Jadi,

$$\begin{aligned} \text{output} &= (x \sin 2 \pi f_b/8 t)(\sin 2 \pi f_c t) \\ &= x/2 \cos 2 \pi (f_c - f_b/8) t \cos 2 \pi (f_c + f_b/8) t. \end{aligned}$$

Spektrum frekuensi keluaran membentang dari $f_c + f_b/8$ sampai $f_c - f_b/8 t$ dan bandwidth minimum (f_N) :

$$(f_c + f_b/8) - (f_c - f_b/8) = 2 (f_b/8) = f_b/4$$

L. PROBABILITAS ERROR QAM

Probabilitas Error adalah fungsi dari 'Carrier to Noise power ratio' atau lebih spesifik 'energi per bit to noise power density ratio' dan kondisi encoding yang mungkin digunakan (M-er). Carrier to Noise power ratio adalah rasio dari daya carrier rata-rata dengan daya noise termal.

Noise termal :

$$N = K T B \text{ (watt)}$$

dengan N = daya termal noise (W)

K = konstanta Boltzman

T = suhu

B = bandwidth

Energi per bit adalah energi dari satu bit informasi

$$E_b = C T_b \quad (\text{J/bit})$$

dengan E_b = energi dari satu bit (J/bit)

C = daya carrier (W)

T_b = waktu dari bit tunggal(s)

atau $E_b = C / f_b \quad (\text{J/bit})$

dengan $T_b = 1 / f_b$, f_b adalah laju bit (bit per detik)

Rapat daya Noise adalah daya noise termal untuk bandwidth 1 Hz

$$N_o = N/B \quad (\text{W/Hz})$$

dengan N_o = rapat daya noise (W/Hz)

N = daya noise termal (W)

B = bandwidth (Hz)

energi per bit to noise power density ratio digunakan untuk membandingkan bermacam sistim modulasi yang digunakan, laju transmisi (bit rate, noise modulasi dan teknik encoding (M-er) yang berbeda.

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{C / f_b}{N / B} = \frac{CB}{Nf_b}$$

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{C}{N} \times \frac{B}{f_b}$$

Dimana

E_b / N_o = energi per bit to noise power density ratio

C/N = carrier to noise power ratio

B/ f_b = noise bandwidth to bit rate ratio

Jika bandwidth sama dengan laju bit, maka $E_b / N_o = C/N$

Untuk transmisi M-er 2^n ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$), energi per bit adalah

$$E_b = E_s/n$$

M. BIT ERROR RATE

Kesalahan terjadi jika noise pada sinyal yang diterima melebihi batas daerah keputusan

$$P_e = \frac{1}{2} \text{Prob} \left(\left| \mathcal{X} \right| > D_m \right)$$
$$= \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{d_m}{\sqrt{2\pi}} \right)$$

dimana x adalah level noise, $2 d_m$ adalah jarak sinyal antara dua sinyal dan σ^2 adalah daya noise rata-rata.

dan $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$

$$= \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt$$

$Q(x)$ digunakan untuk menggantikan $\text{erfc}(x)$

$$Q(x) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{\pi}} \right)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt$$

besar dari d_m^2 adalah signal to noise power ratio [S/N]

$$P_e = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{1}{2} \left[\frac{S}{N} \right]} \right)$$

Untuk M sinyal berkemungkinan sama di transmisi, energi rata-rata diberikan :

$$\bar{S} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s_i$$

dengan s_i adalah energi sinyal m_i

Energi sinyal dari simbol m_4 adalah

$$s_4 = (3d/2)^2 + (3d/2)^2 = 9d^2/2$$

Energi sinyal dari simbol m_3 dan m_5 adalah

$$s_3 = s_5 = (d/2)^2 + (3d/2)^2 = 5d^2/2$$

Energi sinyal dari simbol m_6 adalah

$$s_6 = (d/2)^2 + (d/2)^2 = d^2/2$$

jadi, energi rata-rata \bar{S} menjadi

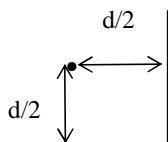
$$\bar{S} = \frac{1}{4} (s_3 + s_4 + s_5 + s_6) = 5d^2/2$$

Untuk menghitung probabilitas error, maka dihitung dahulu probabilitas penerimaan betul (P_c). Kemudian probabilitas error diketahui dari $P_e = 1 - P_c$ kemungkinana penerimaan benar simbol m_1 , m_4 , m_{13} , dan m_{16} :

$$P(c?m_1) = \text{Prob} (n_1 > -d/2) \text{prob} (n_2 > -d/2)$$

$$= \left(1 - Q \left(\frac{d/2}{\sigma_n} \right) \right)^2$$

dengan, σ^2 adalah energi bising pada keluaran ffilter daerah keputusan untuk m_1 , m_4 , m_{13} , dan m_{16} adalah



dengan asumsi

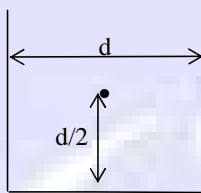
$$P = 1 - Q \left[\frac{d/2}{\sigma_n} \right] \text{ maka}$$

$$P(c/m_2) = P^2$$

kemungkinan penerimaan betul simbol $m_2, m_3, m_5, m_8, m_9, m_{12}, m_{14},$ dan m_{15} :

$$P(c/m_2) = P(2P - 1)^2$$

dengan daerah keputusan



kemungkinan penerimaan betul simbol $m_6, m_7, m_{10},$ dan m_{11} :

$$P(c/m_6) = (2P - 1)^2$$

kemungkinan penerimaan betul suatu kelompok sinyal seluruhnya diperoleh dengan :

$$P(c) = 1/M \sum_{i=1}^M P(c?m_i)$$

$$P(c) = 1/16 \sum_{i=1}^{16} P(c?m_i) = ((3P - 1)/2)^2$$

sehingga probabilitas kesalahan simbol adalah :

$$P_{es} = 1 - P(c) = 9/4 (P + 1/3) (1 - P)$$

untuk $p \approx 1$, adan $(1 - P) = Q (d/2\sigma_n)$

$$P_{es} \approx 3(1 - P) = 3Q (d/2\sigma_n)$$

dengan $d^2 = 2 \bar{S} / 5$ dan $N = 2\sigma_n^2$

$$P_{es} \approx 3 \bar{S} Q \left(\sqrt{\frac{S}{5N}} \right)$$

selanjutnya \bar{S}/N rata-rata dinyatakan dengan energi persimbol sinyal input dan rapat spektral noise (bising) sinyal dapat dinyatakan :

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n h(t - nT) \cos \omega_c t + \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n h(t - nT) \sin \omega_c t$$

dimana a_n dan b_n bernilai dari $\pm A$ atau $\pm 3A$

dan sinyal in-phase dan quadrature pada demodulasi :

$$s_{dx}(t) = a_n h(t - nT)$$

$$s_{dx}(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} b_n h(t - nT)$$

sinyal tersebut menuju matched filter, dan dapat level sinyal yaitu

$$A \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt = d/2$$

Energi simbol rata-rata E_s adalah

$$E_s = \frac{1}{4} [A^2 + (-A^2) + (3A^2) + (-3A^2)^2] \times \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt$$

$$= 5 A^2 \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt$$



$$\frac{\bar{S}}{N} = \frac{5/2 \left[2A \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt \right]^2}{2N_0 \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt} = \frac{5A^2}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt = \frac{E_s}{N_0}$$

sehingga, _____

$$S/N = E_s/N_0 = 4E_b/N_0$$

dimana

$$E_b = E_s/4$$

jadi probabilitas error QAM 16 :

$$P_{es} = 3 Q \left(\sqrt{\frac{E_s}{5 N_0}} \right)$$

$$P_{eb} = 3 Q \left(\sqrt{\frac{4 E_b}{5 N_0}} \right)$$

N. Rangkuman

- Bandwidth QAM adalah :

$$B = \frac{R_b(1+a)}{\log_2 M}$$

atau

$$B = R_s(1+a)$$

- bandwidth minimum (f_N) QAM 4:
 $(f_c + f_b/4) - (f_c - f_b/4) = 2 f_b/4 = f_b/2$
- Bandwidth minimum (f_N) QAM 8:
 $(f_c + f_b/6) - (f_c - f_b/6) = 2 f_b/6 = f_b/3$
- Bandwidth minimum (f_N) QAM 16 :
 $(f_c + f_b/8) - (f_c - f_b/8) = 2 (f_b/8) = f_b/4$
- Energi per bit to noise power density ratio digunakan untuk membandingkan bermacam sistim modulasi yang digunakan, laju transmisi (bit rate, noise modulasi dan teknik encoding (M-er) yang berbeda.

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{C / f_b}{N / B} = \frac{CB}{Nf_b}$$

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{C}{N} \times \frac{B}{f_b}$$

- Signal to noise power ratio [S/N] QAM

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{1}{2} \left[\frac{S}{N} \right]} \right)$$

Untuk M sinyal berkemungkinan sama di transmisi, energi rata-rata diberikan :

$$\bar{S} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s_i$$

DAFTAR PUSTAKA

- Feher, Kamilo .1987. *Advanced Digital Communication* . USA : prentice-Hall
- Haykin, Simon . 1989. *An Introduction to Analog and Digital Communications* . Singapore : John Willey
- Lathi , B . P . 1983 .*Modern Digital and Analog Communication System* . USA : Holt – Saunders.
- Schwartz , Mischa . 1986 . *Transmisi , Informasi , Modulasi dan Bising* . Terjemahan Srijatno W., Ph.D. Jakarta : Erlangga.
- Smith , David R . 1985 . *Digital Transmission Systems* . New york :Van Nostrand Reinhold Company .
- Stallings , William .1991 . *Data and Computer Communications*. Singapore : Maxwell Macmilan International Edition.
- Roddy , Denis and John Coolen . 1985 . *Electronic Communication* . New Delhi : Prentice-Hall.