

2 Modulasi Amplitudo

Tujuan pengajaran:

Setelah mempelajari modul ini, mahasiswa diharapkan bisa memahami

1. tujuan dari proses modulasi dan manfaatnya
2. karakteristik dari modulasi amplitudo dan jenisnya
3. kelemahan dari jenis modulasi amplitudo

Isi modul:

2.1 Pendahuluan dan motivasi

2.2 Modulasi amplitudo jalur ganda tanpa sinyal pembawa (DSB-SC)

2.3 Modulasi amplitudo jalur ganda dengan sinyal pembawa (DSB with carrier)

2.4 Frequency-Division Multiplexing (FDM)

2.5 Latihan

2.1 Pendahuluan dan Motivasi

Tujuan dari modulasi adalah untuk memindahkan posisi spektrum dari sinyal data, dari pita spektrum yang rendah (base band) ke pita spektrum yang jauh lebih tinggi (band pass). Hal ini dilakukan pada transmisi data tanpa kabel (dengan antena), yang mana dengan membesarnya frekuensi data yang dikirim, maka dimensi antenna yang digunakan akan mengecil.

Contoh: data 1 berfrekuensi $f_1 = 3 \text{ kHz}$ → panjang gelombangnya

$$\lambda_1 = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^3 \text{ 1/s}} = 100 \text{ km}$$

data 2 berfrekuensi $f_2 = 300 \text{ MHz}$ → panjang gelombangnya

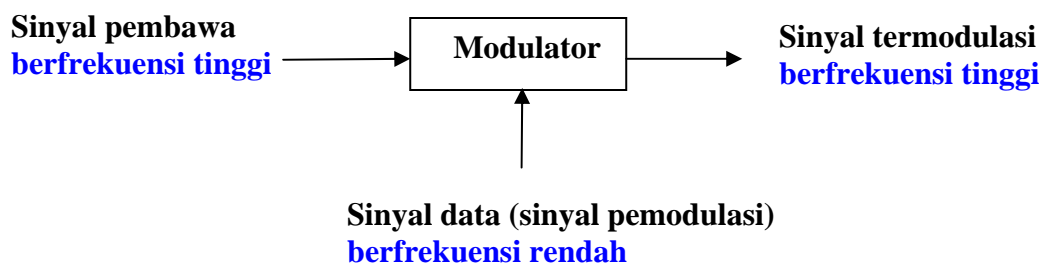
$$\lambda_2 = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ 1/s}} = 1 \text{ m}$$

Radiasi gelombang elektromagnetika akan berlangsung dengan efisien, jika ukuran antenanya sebanding dengan panjang gelombang.

Dengan contoh di atas, transmisi data 1 menjadi problematik, sedangkan data 2 lebih mudah untuk ditransmisikan.

Kegunaan lain dari modulasi adalah, dengannya dimungkinkan proses pengiriman data/informasi melalui suatu media yang sama secara bersamaan.

Proses modulasi terjadi dengan melakukan variasi pada salah satu besaran karakteristik dari sinyal pembawa (yang berfrekuensi tinggi) seiring dengan sinyal data (yang berfrekuensi rendah). Sinyal pembawa yang telah dimodulasikan ini disebut sinyal termodulasi. Sinyal data disebut juga sinyal pemodulasi. Alat, di mana proses modulasi ini terjadi, disebut juga modulator.



Gambar 2.1

Sinyal pembawa bisa didefinisikan dengan rumus

$$x_c(t) = A(t) \cos(\omega_c t + \phi(t)) \quad (2.1)$$

dengan $\omega_c = 2\pi f_c$,

dan sinyal data dinyatakan dengan $m(t)$. Yang mana jika

$$A(t) \propto m(t) \quad \text{modulasi amplitudo}$$

$$\phi(t) \propto m(t) \quad \text{modulasi fasa}$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} \propto m(t) \quad \text{modulasi frekuensi}$$

Modulasi fasa dan modulasi frekuensi disebut juga modulasi sudut.

2.2 Modulasi amplitudo jalur ganda (double side band amplitude modulation DSB-SC)

Bentuk dari sinyal yang termodulasi amplitudo dengan jalur ganda memiliki bentuk sinyal

$$x_{DSB}(t) = a_o m(t) \cos(\omega_c t) \quad (2.2)$$

Jadi modulator DSB-AM berfungsi sebagai pengali sinyal pembawa dengan sinyal data. a_o merupakan konstanta yang muncul dalam proses perkalian.

Persamaan $x_{DSB}(t)$ di atas dituliskan dalam bentuk fungsi waktu. Dalam bentuk spektrumnya kita bisa hitung dengan mencari transformasi Fourier dari $x_{DSB}(t)$

$$X_{DSB}(\omega) = \mathcal{F} \{x_{DSB}(t)\} = \mathcal{F} \{a_o m(t) \cos(\omega_c t)\} \quad (2.3)$$

Pasangan ini bisa dituliskan secara simbolis dengan

$$x_{DSB}(t) \text{ --- } \bullet \text{ --- } X_{DSB}(\omega) \quad (2.4)$$

Dengan $\cos(\omega_c t) = \frac{1}{2} e^{j\omega_c t} + \frac{1}{2} e^{-j\omega_c t}$, maka

$$X_{DSB}(\omega) = \mathcal{F} \left\{ \frac{1}{2} a_o m(t) e^{j\omega_c t} \right\} + \mathcal{F} \left\{ \frac{1}{2} a_o m(t) e^{-j\omega_c t} \right\} \quad (2.5)$$

Jika $M(\omega)$ adalah hasil transformasi Fourier dari $m(t)$

$$m(t) \text{ --- } \bullet \text{ --- } M(\omega) \quad (2.6)$$

maka dengan teorema modulasi (pada sifat-sifat transformasi Fourier, bab 1)

$$X_{DSB}(\omega) = \frac{a_o}{2} M(\omega - \omega_c) + \frac{a_o}{2} M(\omega + \omega_c) \quad (2.7)$$

Dari persamaan (2.7) bisa kita interpretasikan:

Term yang pertama menyatakan bahwa $x_{DSB}(t)$ mempunyai spektrum yang sama dengan $m(t)$ tetapi beramplitudo setengahnya dan posisi spektrumnya bergeser ke kanan sejauh frekuensi pembawa ω_c .

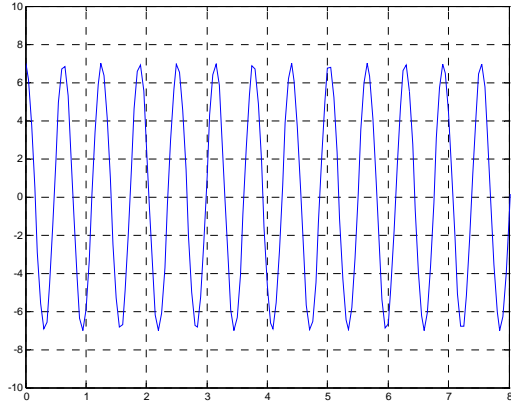
Term kedua menyatakan hal sama sehubungan dengan amplitudonya, tetapi pergeseran spektrumnya sekarang ke kiri.

Berikut ini akan digambarkan bentuk-bentuk sinyal dalam proses modulasi, baik sebagai fungsi waktu ataupun dalam bentuk spektralnya (gambar 2.2-2.4).

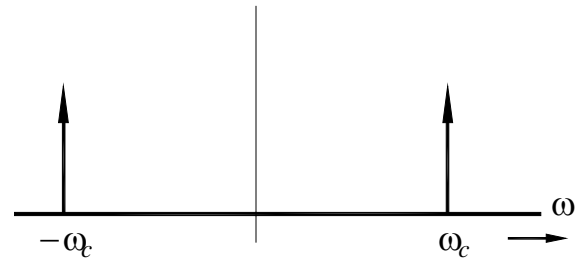
Fungsi waktu

bentuk spektral

Sinyal pembawa

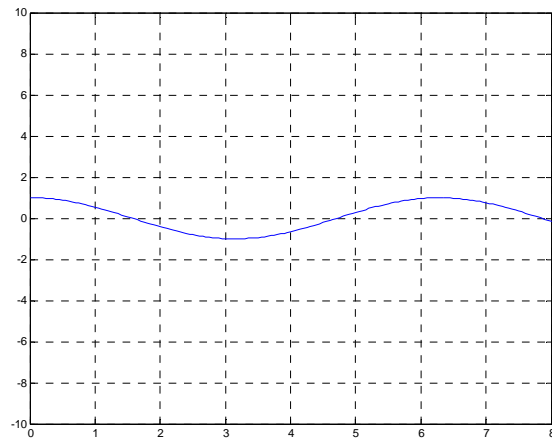


Gambar 2.2a

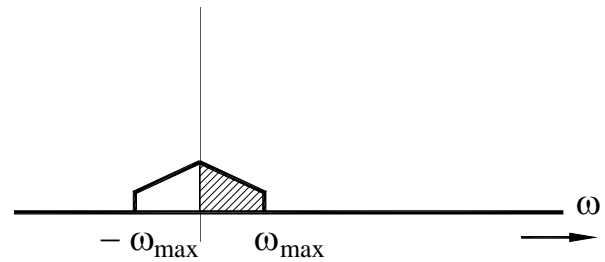


Gambar 2.2b

Sinyal data (pemodulasi)

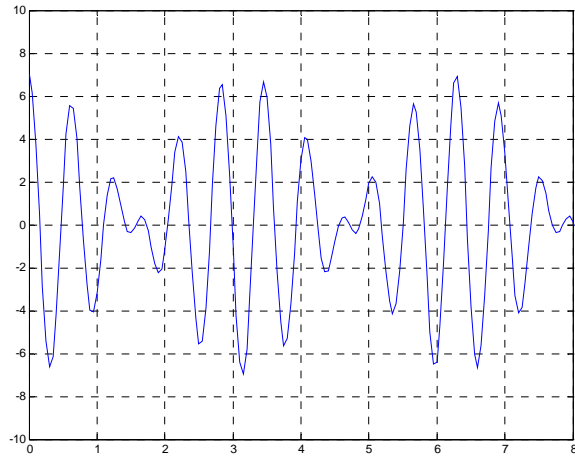


Gambar 2.3a

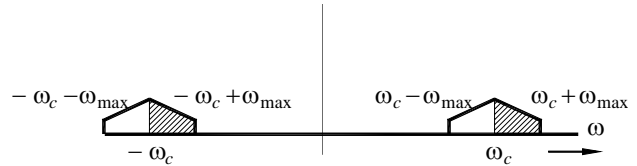


Gambar 2.3b

Sinyal termodulasi



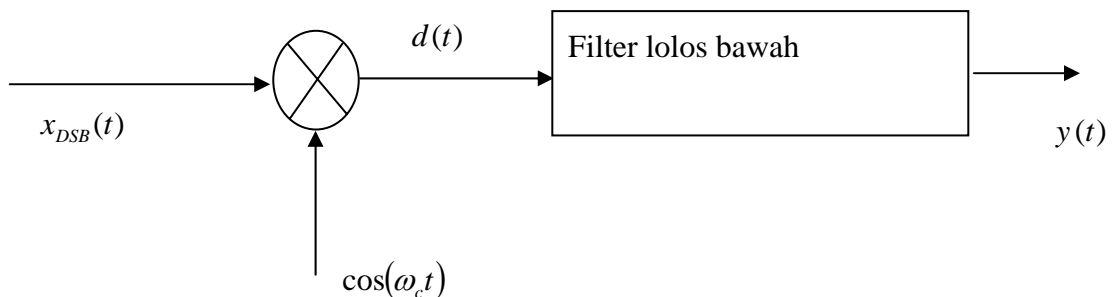
Gambar 2.4a



Gambar 2.4b

Demodulasi sinyal DSB-AM

Sinyal DSB-AM $x_{DSB}(t)$ dikalikan dengan sinyal pembawanya secara koheren $\cos(\omega_c t)$, berarti, sinyal pengalih di *demodulator* ini tak mempunyai beda fasa dengan sinyal pembawa yang kita gunakan di modulator. Kemudian disaring spektrum yang rendahnya dengan filter lolos bawah (*low-pass filter*).



Gambar 2.5

$$d(t) = x_{DSB}(t) \cos(\omega_c t)$$

$d(t) = a_o m(t) \cos(\omega_c t) \cos(\omega_c t)$, dan dengan bantuan $\cos^2 x = \frac{1}{2} \cos 2x + \frac{1}{2}$

$$d(t) = \frac{1}{2} a_o m(t) (1 + \cos(2\omega_c t)) \quad (2.8)$$

Sinyal $d(t)$ terdiri dari dua bagian, $\frac{a_o}{2} m(t)$ merupakan sinyal yang dicari, yang berfrekuensi rendah, dan sinyal $\frac{a_o}{2} m(t) \cos(2\omega_c t)$ sinyal yang berfrekuensi tinggi. Jadi untuk mendapatkan sinyal yang pertama di atas, sinyal $d(t)$ dikirimkan ke sebuah filter lolos bawah, untuk mendapatkan $y(t)$

$$y(t) = \frac{1}{2} a_o m(t) \quad (2.9)$$

Dalam bentuk spektralnya, prosedur di atas menjadi

$$D(\omega) = \mathcal{F} \{d(t)\} = \frac{1}{2} \mathcal{F} \{a_o m(t)\} + \frac{1}{2} \mathcal{F} \{a_o m(t) \cos(2\omega_c t)\}$$

$$D(\omega) = \frac{1}{2} a_o M(\omega) + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} \mathcal{F} \{a_o m(t) e^{j2\omega_c t}\} + \frac{1}{2} \mathcal{F} \{a_o m(t) e^{-j2\omega_c t}\} \right\}$$

$$D(\omega) = \frac{1}{2} a_o M(\omega) + \frac{1}{4} a_o M(\omega - 2\omega_c) + \frac{1}{4} a_o M(\omega + 2\omega_c) \quad (2.9)$$

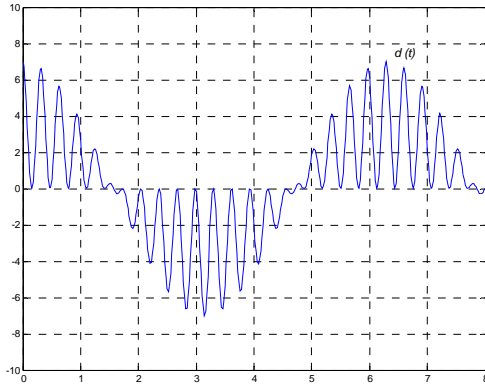
$$Y(\omega) = \mathcal{F} \{y(t)\} = \frac{1}{2} a_o M(\omega) \quad (2.10)$$

Gambar 2.6-2.8 menunjukkan proses demodulasi ini secara grafis. Gambar 2.7 menunjukkan proses penyaringan sinyal $d(t)$ dengan filter lolos bawah. Proses penyaringan bisa digambarkan dalam bentuk spektralnya sebagai perkalian dari fungsi yang akan disaring $d(t)$ dengan fungsi penyaringnya, dalam hal ini filter lolos bawah, yang bentuk idealnya adalah sebuah fungsi segiempat yang terkonsentrasi di frekuensi 0, dan mempunyai frekuensi batas ω_{LP} .

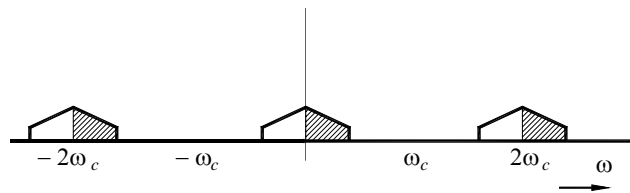
Fungsi waktu

bentuk spectral

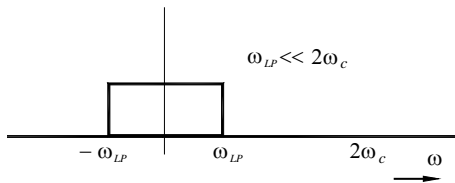
$d(t)$



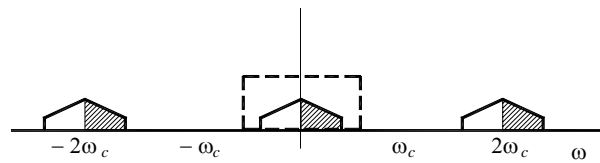
Gambar 2.6a



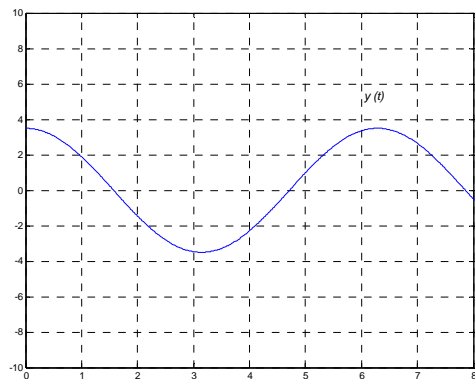
Gambar 2.6b



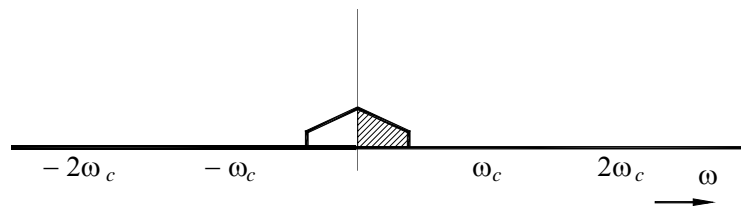
Gambar 2.7a



Gambar 2.7b



Gambar 2.8a



Gambar 2.8b

Proses demodulasi sinyal DSB-AM ini, sinyal pembawa harus di'regenerasikan' oleh pesawat penerima untuk bisa kemudian digunakan sebagai fungsi pengali (gambar 2.5). Proses ini biasanya dilakukan oleh suatu rangkaian yang dinamakan "phase-locked loop". Dalam proses modulasi ini, sinyal pembawa tak secara eksplisit diketahui, modulasi amplitudo ini dinamakan juga DSB-SC (double side band – suppressed carrier).

Dalam proses demodulasinya kita dihadapi oleh suatu hal yang sensitif, karena sinyal pembawa yang harus diregenerasikan haruslah koheren dengan sinyal pembawa yang ada di pesawat pemancar (dalam proses modulasi).

Berikut ini kita akan melihat pengaruh dari sinyal pembawa terregenerasi yang tidak koheren, yang disebabkan oleh **kesalahan pada fasa** dan **kesalahan pada frekuensi** pada sinyal tersebut.

Kesalahan fasa:

$$\begin{aligned} d(t) &= a_o m(t) \cos(\omega_c t) \cos(\omega_c t + \Delta \varphi) \\ &= \frac{a_o}{2} m(t) \cos(\Delta \varphi) + \frac{a_o}{2} m(t) \cos(2\omega_c t + \Delta \varphi) \end{aligned}$$

setelah melalui filter lolos bawah

$$y(t) = \frac{a_o}{2} m(t) \cos(\Delta \varphi) \quad (2.11)$$

Dari persamaan (2.11) bisa kita melakukan interpretasi:

- Jika $\Delta \varphi = \pm\pi/2$: $y(t) = 0$ tak ada sinyal yang diterima di receiver
- Jika $\Delta \varphi = \text{konst} \neq \pm\pi/2$: sinyal yang diterima terredam dengan faktor tertentu, karena $\cos(\Delta \varphi) \leq 1$
- Jika $\Delta \varphi = f(t)$ fungsi dari waktu (bersifat random), maka sinyal $y(t)$ adalah hasil kali (modulasi) sinyal $m(t)$ dengan sinyal random tersebut. Dan sinyal informasi yang ingin kita dapatkan terganggu oleh sinyal ini.

Kesalahan frekuensi:

$$\begin{aligned}
 d(t) &= a_o m(t) \cos(\omega_c t) \cos((\omega_c + \Delta \omega) t) \\
 &= \frac{a_o}{2} m(t) \cos(\Delta \omega t) + \frac{a_o}{2} m(t) \cos(2\omega_c t + \Delta \omega t)
 \end{aligned}$$

setelah melalui filter lolos bawah, didapati

$$y(t) = \frac{a_o}{2} m(t) \cos(\Delta \omega t) \quad (2.12)$$

Keluaran yang semestinya sinyal informasi yang murni ini, ternyata dikalikan dengan sinyal harmonis, dengan frekuensi yang tak diketahui. Perkalian ini menyebabkan apa yang dinamakan proses ‘beating’, yang merupakan distorsi pada sinyal yang kita miliki.

Kesimpulan:

Modulasi amplitudo jalur ganda paling tidak mempunyai dua kekurangan, yang pertama membutuhkan demodulasi yang koheren, yang kedua, informasi yang hanya membutuhkan spektrum ω_{\max} dikirimkan dengan mengkonsumsi spektrum yang besarnya dua kalinya (sebab itu nama jalur ganda).

2.3 Modulasi amplitudo jalur ganda dengan sinyal pembawa (DSB with Carrier)

Modulasi amplitudo jalur ganda dengan sinyal pembawa, atau yang lebih dikenal dengan nama modulasi amplitudo biasa (AM), diperkenalkan untuk menghindari problem pertama yang dihadapi oleh DSB-SC. Yaitu dengan cara menambahkan suatu konstanta ke sinyal informasi, sebelum dikirimkan ke modulator

$$\begin{aligned}
 x_{AM}(t) &= a_o (1 + m(t)) \cos(\omega_c t) \\
 &= a_o \cos(\omega_c t) + a_o m(t) \cos(\omega_c t)
 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Secara spektral, kita dapati, analog dengan perhitungan pada DSB-SC

$$X_{AM}(\omega) = a_o F\{\cos(\omega_c t)\} + \underbrace{a_o F\{m(t) \cos(\omega_c t)\}}$$

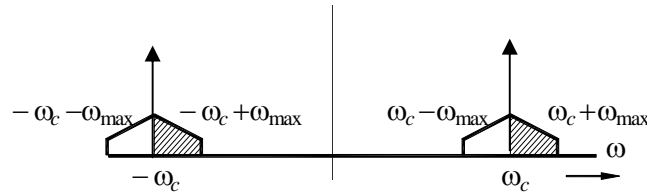
seperti pada DSB-SC persamaan (2.7)

$$= \frac{a_o}{2} F\{e^{j\omega t}\} + \frac{a_o}{2} F\{e^{-j\omega t}\} + \frac{a_o}{2} M(\omega - \omega_c) + \frac{a_o}{2} M(\omega + \omega_c)$$

dengan

$$F\{e^{j\omega t}\} = 2\pi\delta(\omega - \omega_c) \text{ dan } F\{e^{-j\omega t}\} = 2\pi\delta(\omega + \omega_c)$$

$$X_{AM}(\omega) = \pi a_o \delta(\omega - \omega_c) + \pi a_o \delta(\omega + \omega_c) + \frac{a_o}{2} M(\omega - \omega_c) + \frac{a_o}{2} M(\omega + \omega_c) \quad (2.14)$$

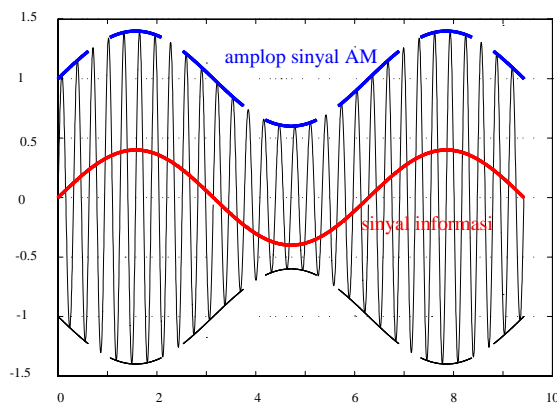


Gambar 2.9

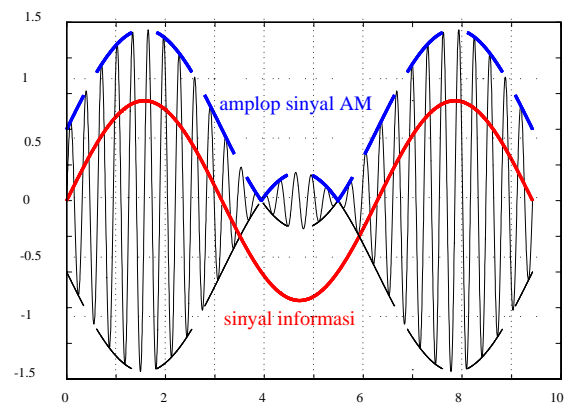
Proses demodulasi sinyal AM dilakukan dengan cara yang berbeda dari demodulasi terhadap DSB-SC. Yaitu dengan menggunakan detektor amplop (envelope detector), tetapi rangkaian ini hanya akan bekerja dengan benar, yaitu menghasilkan sinyal informasi yang diinginkan, jika

$$1 + m(t) \geq 0 \quad (2.15)$$

Seperti yang diperlihatkan oleh gambar 2.10a dan 2.10b. Jika syarat di persamaan (2.15) terpenuhi, maka amplop (pembungkus) dari sinyal termodulasi sama dengan sinyal informasi yang ingin kita dapatkan.



Gambar 2.10a



Gambar 2.10b

Sinyal termulasi pada gambar 2.10a terbentuk dengan

$$(1 + m(t))_{\min} = 0,6 > 0$$

sedang sinyal termulasi pada gambar 2.10b terbentuk dengan

$$(1 + m(t))_{\min} = -0,2 < 0$$

Jadi kasus pada gambar 2.10b tak memenuhi syarat pada persamaan (2.15). Dalam proses demodulasi dengan menggunakan detector amplop, maka sinyal yang dihasilkan adalah kurva yang digambar dengan garis terpotong-potong di atas.

Pada kasus di gambar 2.10a kita dapati sinyal informasi, sedang pada kasus di gambar 2.10b tidak.

Untuk keperluan di atas didefinisikan besaran indeks modulasi μ , yang mana

$$\mu = |m(t)|_{\min} \quad (2.16)$$

Jika sinyal informasi berupa sinyal sinus, maka indeks modulasi sama dengan amplitudo dari sinyal itu. Untuk gambar 2.10a $\mu = 0,4$ dan gambar 2.10b $\mu = 0,8/0,6 = 1,33$.

Sekarang kita akan menghitung daya dari sinyal termulasi AM, dengan menggunakan sinyal informasi berupa fungsi sinus (modulasi single-tone)

$$\begin{aligned} x_{AM}(t) &= a_o (1 + m(t)) \cos(\omega_c t) \\ &= a_o \cos(\omega_c t) + a_o \mu \cos(\omega_m t) \cos(\omega_c t) \\ &= a_o \cos(\omega_c t) + \frac{a_o \mu}{2} [\cos(\omega_c t + \omega_m t) + \cos(\omega_c t - \omega_m t)] \end{aligned}$$

Dari sinyal di atas bisa dihitung

$$\text{Daya sinyal pembawa} \quad P_c = \frac{1}{2} a_o^2 \quad (2.17)$$

Daya sinyal berita pada sinyal termulasi

$$P_s = \frac{1}{2} \left(\frac{a_o \mu}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{a_o \mu}{2} \right)^2 = \frac{1}{4} a_o^2 \mu^2 \quad (2.18)$$

Efisiensi dari modulasi amplitudo AM didefinisikan dengan:

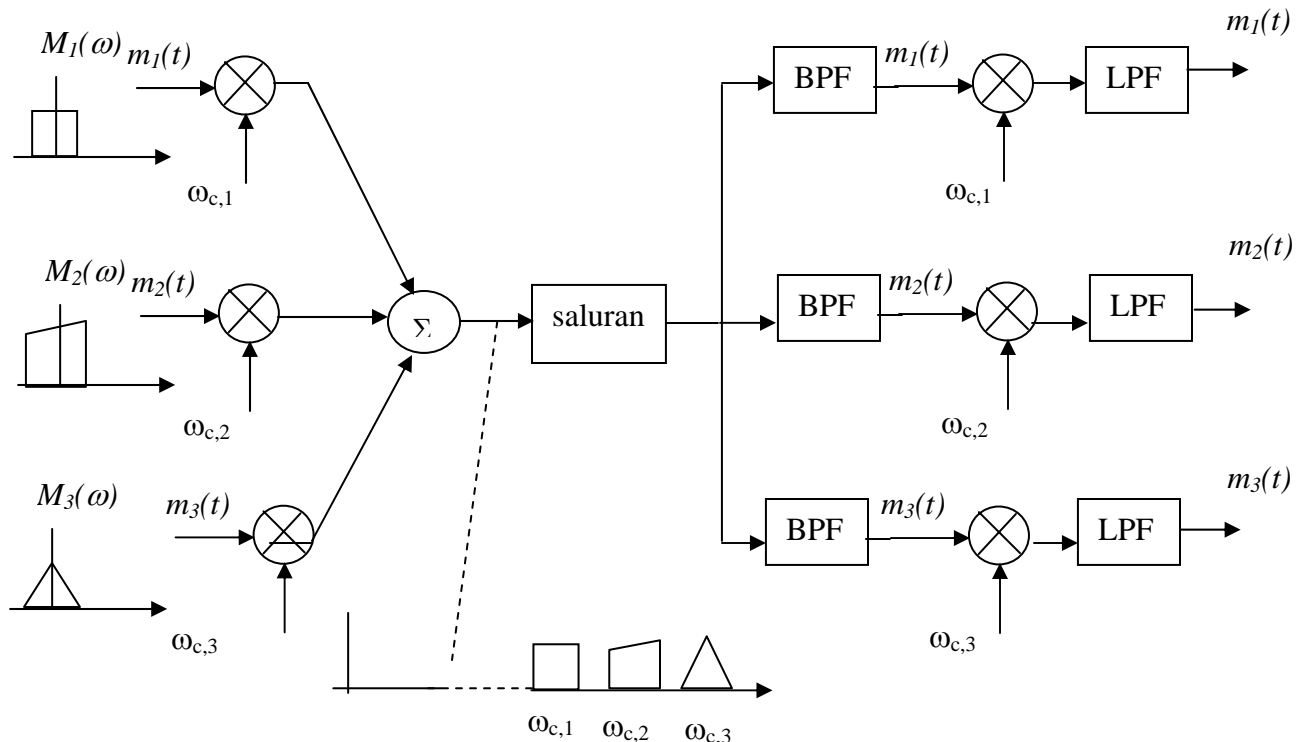
$$\eta = \frac{P_s}{P_t} \times 100\% \quad (2.19)$$

P_t adalah daya total yang tersimpan di sinyal termulasi amplitudo, maka

$$\eta = \frac{P_s}{P_t} \times 100\% = \frac{\frac{1}{4} a_o^2 \mu^2}{\frac{1}{2} a_o^2 + \frac{1}{4} a_o^2 \mu^2} \times 100\% = \frac{\mu^2}{2 + \mu^2} \times 100\%$$

2.4 Frequency-Division Multiplexing (FDM)

Proses modulasi memberikan kemungkinan untuk melakukan multiplexing. Multiplexing adalah suatu teknik yang mana dimungkinkannya pengiriman beberapa sinyal secara bersamaan melalui saluran yang sama. Untuk menghindari interferensi, maka sinyal-sinyal tadi harus dimodulasikan sedemikian rupa, sehingga antara sinyal-sinyal itu secara spectral tidak terjadi saling tindih (bentuk spektrumnya harus terpisah satu sama lain). Gambar 2.11 menunjukkan, bagaimana tiga sinyal yang mengalami proses multiplexing, yang kemudian dikirimkan melalui saluran yang sama.

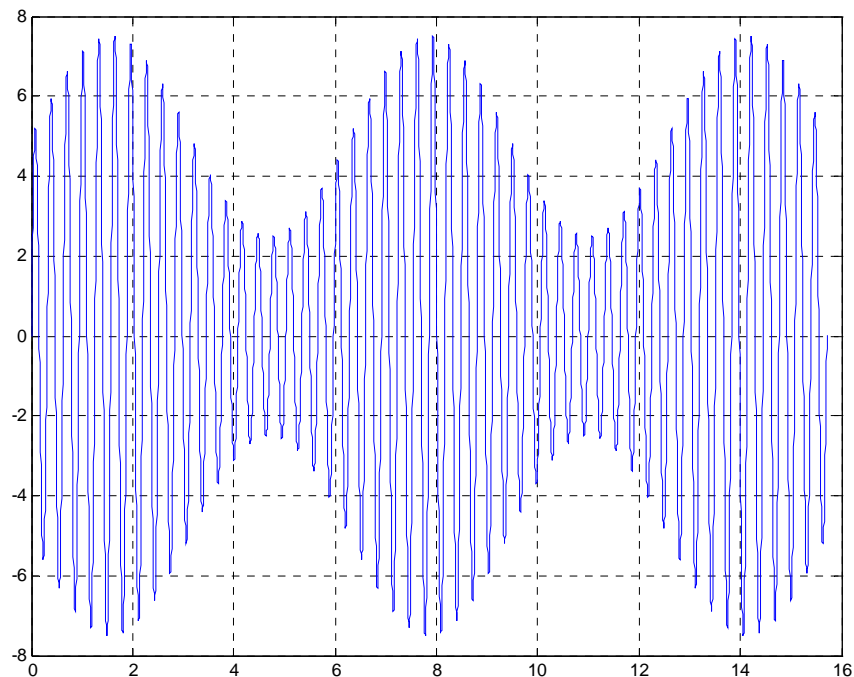


Gambar 2.11

Sinyal yang diterima akan disaring dengan filter lolos tengah sesuai dengan posisi spektralnya masing-masing, dan setelah didemodulasikan, maka disaring lagi dengan filter lolos bawah untuk menghilangkan sinyal-sinyal berfrekuensi tinggi.

2.5 Latihan

Sebuah sinyal termodulasi amplitudo AM diberikan di bawah ini



Hitunglah:

- Indeks modulasi
- Efisiensi dari modulasi amplitudo
- Berapa amplitudo sinyal pembawa, sehingga indeks modulasinya menjadi 0,1.