



**Telkom**  
University

# Pengantar Teknik Telekomunikasi (PTT)

Pertemuan 11 : Pengantar Modulasi  
Analog

Oleh : Team Dosen PTT S1-TT

Versi : Maret 2020

# Tujuan yang ingin dicapai pada pertemuan ini

- 1 Mahasiswa mengetahui tujuan dan motivasi dari penggunaan modulasi analog
- 2 Mahasiswa mengetahui macam-macam modulasi analog dan parameter-parameternya

**Disclaimer:** Gambar-gambar foto dalam slide ini diperoleh dari Internet, dan **copyright** pada **pemiliknya masing-masing**.  
Pemakaian pada slide ini hanya untuk keperluan ilustrasi.

# Daftar Isi

## 1 Pendahuluan



# Pendahuluan

- Pada slide 3 telah dibahas tentang perkembangan teknik transmisi **wireless**
- Teknik transmisi Wireless diawali dengan perumusan Persamaan Maxwell (1860-an). Maxwell kemudian memprediksi adanya perambatan gelombang Elektromagnetik (propagasi tanpa kabel)
- Heinrich Hertz pada **1877** menunjukkan bahwa gelombang EM dapat dikirim dari suatu titik dan diterima di titik lain secara wireless
- Tonton ilustrasi percobaan Hertz dan prinsip kerja Antenna di Link berikut:  
[https://www.youtube.com/watch?v=FWCN\\_u15ygY](https://www.youtube.com/watch?v=FWCN_u15ygY)
- Tahun-tahun berikut setelah percobaan Hertz adalah upaya membuat transmisi wireless menjadi lebih efektif dan efisien (daya yang rendah namun dapat menjangkau jarak yang jauh)

## Efektifitas Transmisi

- Pada percobaannya, Hertz menggunakan **coil induksi** dibantu dengan **transformator** untuk meningkatkan tegangan di ujung pemancar menjadi **beberapa ribu volt**.
- Tegangan beberapa ribu volt menimbulkan loncatan listrik pada gap pemancar
- Loncatan listrik ini menimbulkan propagasi gelombang yang sampai di penerima.
- Untuk percobaannya, Hertz menggunakan daya pancar beberapa ribu volt, dan penerima yang jaraknya **beberapa meter**.
- Untuk keperluan praktis, tentu saja sistem Hertz ini tidak memadai, karena boros daya, dan jarak jangkauan kurang jauh.
- Dengan kata lain, sistem awal yang dibangun oleh Hertz kurang **efektif** dan kurang **efisien**.

## Efektif dan Efisien dalam Transmisi

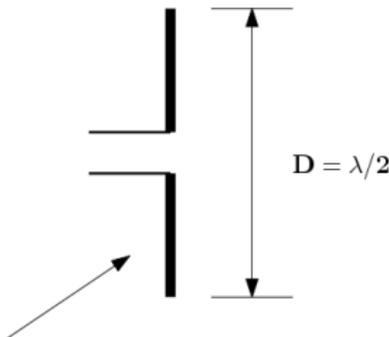
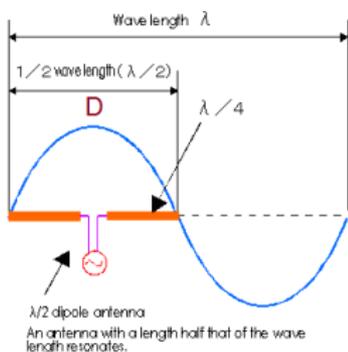
- Efektif dalam transmisi wireless berarti sistem yang didesain bekerja sesuai ekspektasi
- Efisien dalam transmisi berarti dengan daya yang minimal dan dimensi yang secukupnya dapat menjangkau jarak yang dikehendaki.
- Sistem Hertz meski efektif namun kurang efisien, karena perlu daya besar dan jarak tempuh yang terbatas
- Untuk meningkatkan efisiensi transmisi wireless, maka terdapat dua aspek yang dapat dimainkan dan saling berhubungan: Antena dan **Frekuensi**.



# Antena dan frekuensi

- 1 Para peneliti menemukan bahwa: **transmisi efisien antena** terjadi jika **dimensi antena** adalah **setengah dari panjang gelombang sinyal** yang akan ditransmisikan.
- 2 Dalam persamaan ( $D$  = dimensi antena,  $\lambda$  = panjang gelombang):

$$D \approx \frac{1}{2}\lambda$$



Antena Dipol

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$c$  : cepat rambat gelombang  
 =  $3 \times 10^8$

$f$  : frekuensi

## Antena dan frekuensi

- 1 Suatu sinyal memiliki frekuensi 3 *kHz*, tentukan dimensi antena dipol yang paling efisien untuk sinyal ini.
- 2 **Jawab** : Frekuensi 3 *kHz* = 3.000 *Hz* =  $3 \times 10^3$  *Hz*
- 3 Panjang Gelombang:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^3} = 10^5 \text{ meter} = 100 \text{ km}$$

- 4 Dimensi Antena *D*:

$$D = \frac{\lambda}{2} = 100/2 \text{ km} = 50 \text{ km}$$

- 5 **Pertanyaan 1** : Berapa dimensi antena jika frekuensi sinyal dinaikkan **30 kHz**? dan berapa dimensi antena jika frekuensi dinaikkan lagi menjadi **300 kHz**?
- 6 **Pertanyaan 2** : Jika dikehendaki dimensi antena sebesar **1 meter**, berapa frekuensi sinyal yang diperlukan?



## Antena dan frekuensi

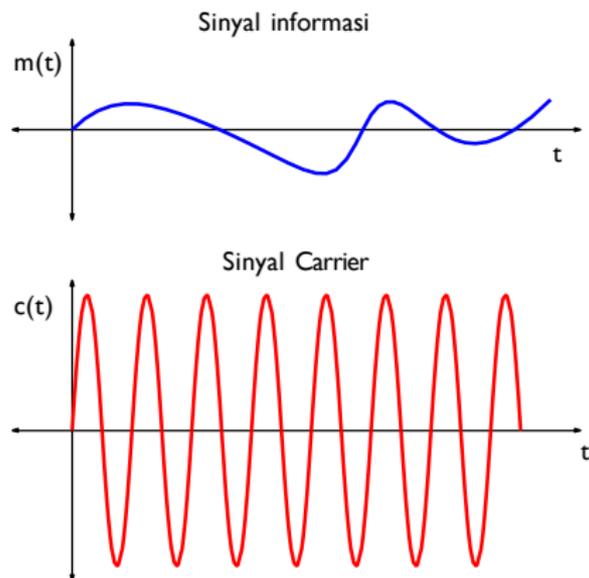
- 1 Pada **pertanyaan 2**, kita peroleh frekuensi sebesar 150 MHz supaya dimensi antena menjadi 1 meter.
- 2 Sinyal suara manusia: 300-3400 Hz atau diambil pembulatannya : 0-4000 Hz.
- 3 Jika berpatokan pada frekuensi tertinggi 4000 Hz ( $\lambda = 75 \text{ km}$ ), jika dikirimkan begitu saja tanpa modulasi, maka diperlukan antena dengan dimensi  
 $D = 37,5 \text{ km} \rightarrow \textit{practically impossible!}$
- 4 Jika sinyal suara manusia manusia ini akan dikirim dengan antena berdimensi 1 meter, maka frekuensi 0-4000 Hz **harus** dibawa naik ke frekuensi 150 MHz.
- 5 Proses membawa naik frekuensi ini disebut **Modulasi**

## Modulasi : Sinyal Informasi dan Sinyal Carrier

- 1 Pada kasus suara frekuensi 0-4000 Hz dibawa naik ke frekuensi 150 MHz
- 2 Ada carrier (pembawa) yang membawa sinyal suara tersebut
- 3 *Carrier* atau pembawa ini disebut dengan **sinyal pembawa** (**sinyal carrier**).
- 4 **Sinyal yang dibawa** (sinyal suara 0-4000 Hz) tersebut disebut sebagai **sinyal informasi**.
- 5 Sinyal *carrier* yang umumnya dipakai adalah sinyal **sinusoidal tunggal**

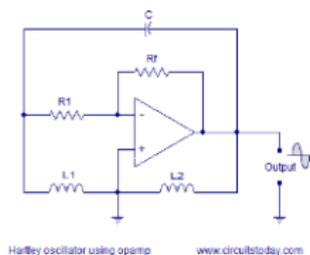
# Modulasi : Sinyal Informasi dan Sinyal Carrier

Contoh Sinyal Informasi dan Sinyal *Carrier*



## Membangkitkan Sinyal Carrier

- Sinyal *Carrier* sinusoidal dibangkitkan oleh Osilator. Contoh Osilator terkenal : **Osilator Hartley** (realisasi dengan *Operational Amplifier* - OpAmp)



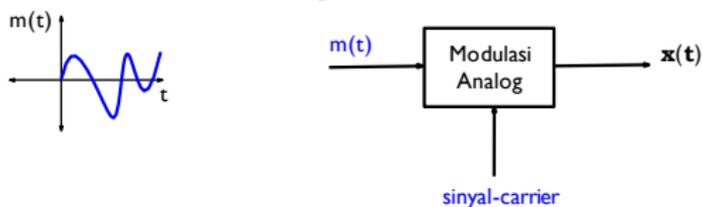
- Oscillator Hartley ditemukan tahun 1915 dan dipatenkan pada 1920. Frekuensi yang dibangkitkan belum mencapai MHz.
- Meski pun terdengar sepele, namun teknologi osilator yang dapat membangkitkan frekuensi tinggi menjadi **bottle neck** efisiensi transmisi *wireless* di masa lalu.



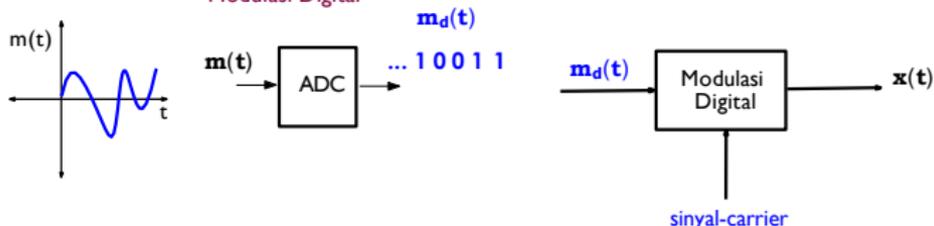
# Modulasi analog dan modulasi digital

- 1 Jika  **sinyal informasi**  yang akan ditransmisikan adalah  **sinyal analog**  (misal sinyal suara), maka modulasi tersebut disebut modulasi analog
- 2 Jika sinyal informasinya adalah  **sinyal digital**  (keluaran dari ADC), maka modulasi tersebut disebut  **modulasi digital**

Modulasi Analog



Modulasi Digital



## Modulasi analog

- 1 Setelah perbedaan modulasi analog dan digital jelas, pertanyaan selanjutnya, pada modulasi analog, bagaimana menumpangkan  **sinyal informasi**  ke  **sinyal carrier** ?
- 2 Terdapat tiga cara umum pada modulasi analog untuk melakukan penumpang:  **Modulasi Amplitudo, Modulasi Frekuensi, Modulasi Fasa**
- 3 Modulasi Amplitudo (*Amplitude Modulation = AM*) adalah modulasi dengan cara  **menumpangkan**  sinyal informasi pada  **amplitudo sinyal carrier** .
- 4 Modulasi Frekuensi (*Frequency Modulation = FM*) adalah modulasi dengan cara  **menumpangkan**  sinyal informasi pada  **frekuensi sinyal carrier** .
- 5 Modulasi Fasa (*Phase Modulation = PM*) adalah modulasi dengan cara  **menumpangkan**  sinyal informasi pada  **fasa sinyal carrier** .

## Modulasi AM

- 1 Modulasi AM dilakukan dengan cara mengalikan sinyal informasi ( $\mathbf{m(t)}$ ) dengan sinyal *carrier*  $\mathbf{c(t)}$  untuk memperoleh sinyal hasil modulasi  $\mathbf{x(t)}$ :

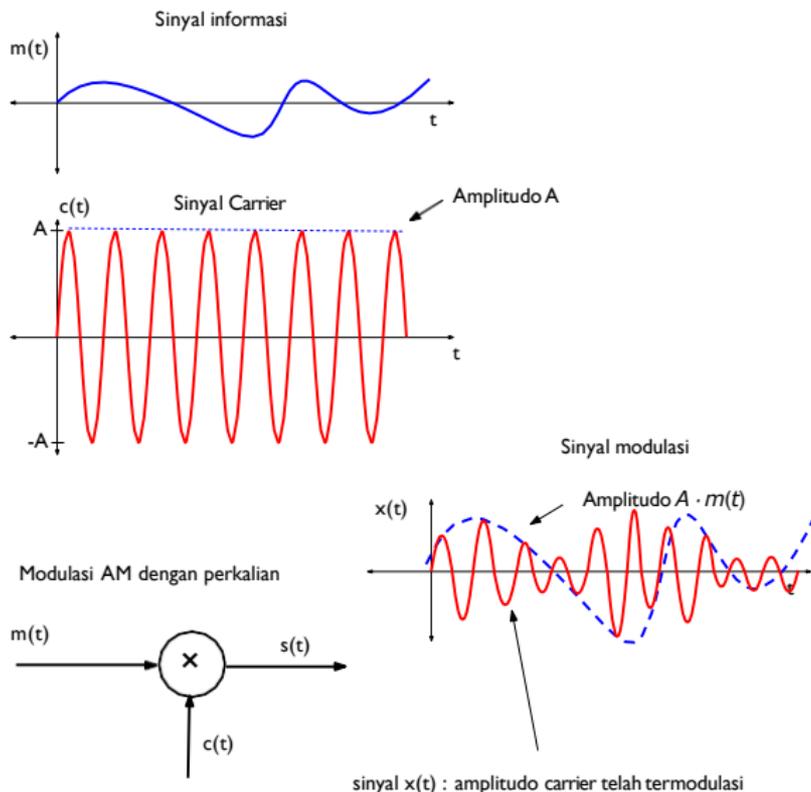
$$x(t) = m(t) \cdot c(t)$$

- 2 Karena *carrier* adalah sinusoidal dengan amplitudo  $A$  dan frekuensi  $f_c$  ( $c(t) = A \cdot \sin 2\pi f_c t$ ), maka persamaan sinyal modulasi  $\mathbf{x(t)}$  adalah:

$$x(t) = m(t) \cdot A \cdot \sin 2\pi f_c t = [m(t) \cdot A] \cdot \sin 2\pi f_c t$$

- 3 Terlihat pada persamaan di atas, amplitudo *carrier*  $\mathbf{c(t)}$  yang mula-mula  $\mathbf{A}$ , setelah ditumpangi oleh  $m(t)$ , menjadi sinyal termodulasi  $\mathbf{x(t)}$  dengan amplitudo  $\mathbf{m(t) \cdot A}$ .

# Ilustrasi Modulasi AM

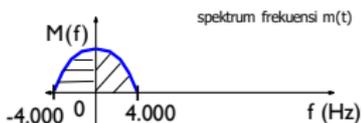
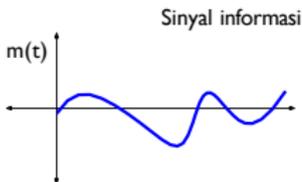


## Modulasi AM

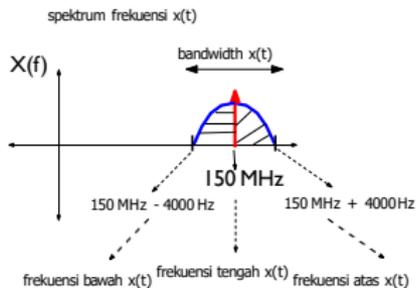
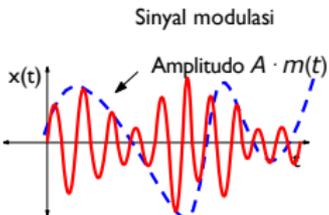
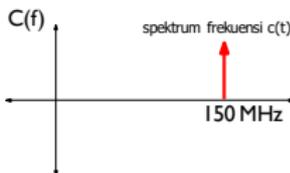
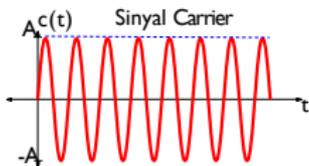
- 1 Sinyal  $x(t)$  adalah sinyal  $c(t)$  yang telah termodulasi amplitudonya dengan  $m(t)$
- 2 Sinyal  $x(t)$  ini yang kemudian dikirim ke antena pemancar
- 3 Pada contoh sebelumnya, jika sinyal  $m(t)$  adalah sinyal suara (**0-4.000 Hz**), dan sinyal *carrier*  $c(t)$  adalah sinusoidal dengan frekuensi **150 MHz**, ...
- 4 Maka frekuensi dari sinyal  $x(t)$  adalah merentang dari **150 MHz - 4.000 Hz** sampai **150 MHz + 4000 Hz**
- 5 Alias : **149.996.000 Hz** sampai **150.004.000 Hz**
- 6 *Bandwidth* dari  $x(t)$  dengan demikian adalah **8.000 Hz**
- 7 Dengan kata lain, bandwidth dari  $x(t)$  adalah dua kali *bandwidth* dari  $m(t)$
- 8 Untuk mengirim sinyal  $x(t)$  maka dimensi antena dihitung dengan menggunakan frekuensi tengah  $x(t)$  yaitu **150 MHz**. Dimensi antena dipol optimal adalah **1 meter**.



# Ilustrasi Spektrum Frekuensi modulasi AM



frekuensi suara menduduki 0-4000 Hz  
 Tepatnya: dari -4000 Hz sampai 4000 Hz  
 namun frekuensi negatif tidak dapat  
 ditampilkan oleh alat / spectrum analyzer



## Modulasi FM

- 1 Modulasi FM dilakukan dengan cara mengubah **frekuensi** dari sinyal *carrier*  $\mathbf{c(t)}$  dengan  $\mathbf{m(t)}$
- 2 Perubahan frekuensi *carrier* ini dilakukan dengan menggeser frekuensi *carrier*  $\mathbf{f_c}$  bertambah atau berkurang sesuai dengan amplitudo dari sinyal informasi  $\mathbf{m(t)}$ .
- 3 Jika sinyal  $\mathbf{c(t)}$  adalah sinyal *carrier* (frekuensi  $\mathbf{f_c}$  dan amplitudo  $\mathbf{A}$ ),  $\mathbf{m(t)}$  adalah sinyal informasi, maka sinyal *carrier* termodulasi  $\mathbf{x(t)}$ :

$$x_{FM}(t) = A \sin [2\pi(f_c + D_f(t))]$$

- 4 Frekuensi carrier **bertambah** (atau **berkurang**) sesuai dengan nilai  $D_f(t)$
- 5 Nilai  $D_f(t)$  adalah fungsi dari sinyal informasi:

$$D_f(t) = \mathbf{b} \cdot m(t)$$

dengan  $\mathbf{b}$  suatu konstanta.

## Modulasi FM

- 1 Dengan kata lain, ketika nilai  $m(t)$  membesar, maka  $D_f(t)$  membesar, dan frekuensi carrier bertambah
- 2 di sisi lain, jika **amplitudo**  $m(t)$  mengecil atau negatif, maka frekuensi sinyal carrier mengecil atau berkurang.
- 3 dengan demikian, naik turunnya sinyal  $m(t)$  membawa efek langsung pada naik turunnya frekuensi dari sinyal *carrier*.
- 4 Frekuensi simpangan terjauh disebut dengan  $D_{FM}$
- 5 Indeks modulasi ( $\beta$ ) didefinisikan sebagai perbandingan antara frekuensi simpangan terjauh terhadap frekuensi tertinggi sinyal informasi:

$$\beta = \frac{D_{FM}}{f_m}$$

Dengan  $\beta$  adalah indeks modulasi FM,  $D_{FM}$  besar simpangan terjauh dari frekuensi tengah,  $f_m$  adalah frekuensi tertinggi sinyal informasi.

## Modulasi FM

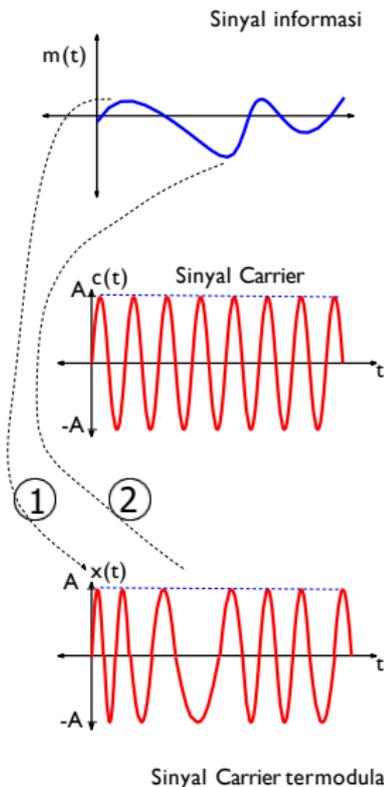
### Contoh:

- 1 Sinyal suara (0-4000 Hz) akan dimodulasi menggunakan modulasi FM dengan frekuensi carrier 150 MHz.
- 2 Setelah dimodulasi, diperoleh bahwa frekuensi simpangan tertinggi adalah 100 kHz.
- 3 Tentukan indeks modulasi dari modulasi FM ini.
- 4 **Jawab:**  $\beta = \frac{D_{FM}}{f_m}$ . Dalam hal ini:  $D_{FM} = 100.000\text{Hz}$  adalah  $f_m = 4.000\text{Hz}$ . Dengan demikian:

$$\beta = \frac{D_{FM}}{f_m} = \frac{100.000}{4.000} = 25$$

- 5 Dengan kata lain, **indeks modulasi 25** memiliki arti bahwa modulasi FM yang digunakan akan mengubah frekuensi carrier dalam **rentang  $25 \times f_m$**  ke atas / kebawah.

# Ilustrasi Modulasi FM



- ① Sinyal informasi bernilai tinggi, frekuensi carrier bertambah
- ② Sinyal informasi bernilai rendah/negatif, frekuensi carrier berkurang

## Bandwidth Modulasi FM

- 1 Analisis *bandwidth* dari modulasi frekuensi lebih rumit dibandingkan dengan modulasi amplitudo karena melibatkan fungsi Bessel
- 2 Namun, **Carlson** membuat aturan sederhana terkait dengan bandwidth modulasi FM, yang disebut dengan **aturan Carlson**, yaitu:

$$BW = 2 \cdot (D_{FM} + f_m)$$

$BW$  = *Bandwidth* sinyal modulasi FM ( $x(t)$ )

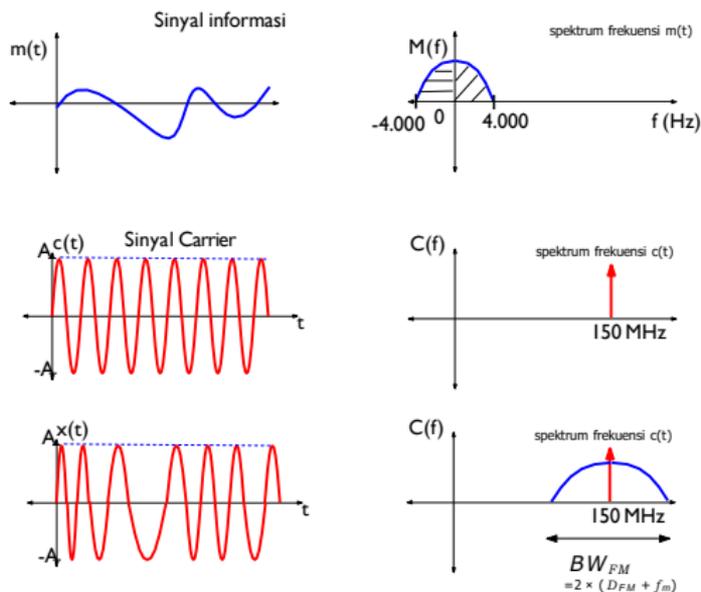
$D_{FM}$  = Frekuensi simpangan terjauh modulasi FM

$f_m$  = frekuensi tertinggi sinyal informasi

- 3 **Contoh:** Sinyal suara (0-4000 Hz) dimodulasi FM dengan frekuensi carrier 150 MHz. Jika hasil modulasi FM memberi simpangan frekuensi terjauh sebesar **10 KHz**, tentukan *bandwidth* sinyal hasil modulasi  **$x(t)$** !

# Jawab:

- Diketahui:  $f_m = 4000 \text{ Hz}$  dan  $D_{FM} = 10 \text{ kHz} = 10.000 \text{ Hz}$
- Dengan demikian  $BW_{FM} = 2 \times (f_m + D_{FM}) = 2(4.000 + 10.000) = 28.000 \text{ Hz} = 28 \text{ kHz}$



## Perbandingan Modulasi AM dan FM

- Modulasi AM sinyal informasi mengubah amplitudo *carrier*
- Modulasi FM sinyal informasi mengubah frekuensi *carrier*
- *Bandwidth* AM =  $2 \times f_m$
- *Bandwidth* FM =  $2 \times (f_m + D_{FM})$
- *Bandwidth* sinyal **FM lebih lebar** dari pada **bandwith sinyal AM** yang berarti bahwa modulasi FM lebih boros *bandwidth* dibanding AM
- Namun dapat dilihat pada MK lebih lanjut (Sistem Komunikasi), bahwa sinyal FM memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap derau dibandingkan dengan modulasi AM.

## Modulasi Fasa

- Modulasi Fasa (*Phase Modulation* = PM) adalah proses penumpangan sinyal informasi pada fasa dari sinyal carrier.
- Jika  $c(t) = A \sin(2\pi f_c t)$  adalah sinyal carrier, dan  $m(t)$  adalah sinyal informasi, maka sinyal hasil modulasi  $x(t)$  adalah

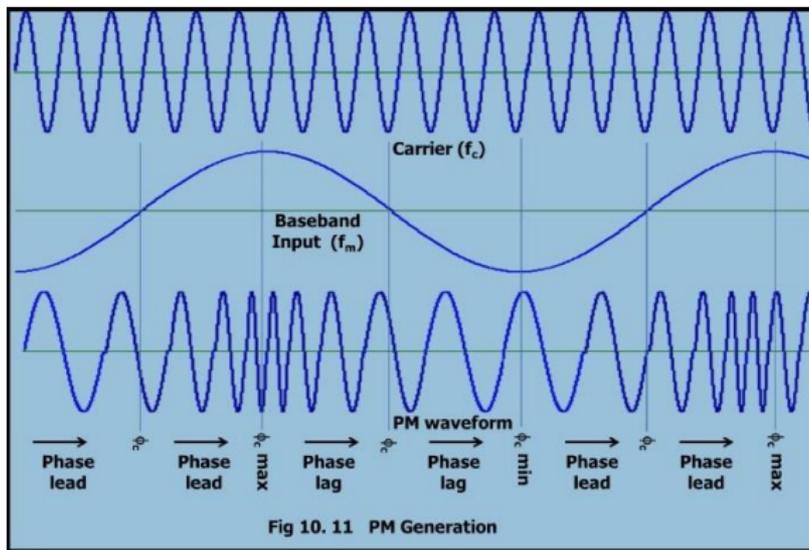
$$x(t) = A \sin(2\pi f_c t + k \cdot m(t))$$

dengan  $k$  adalah suatu konstanta.

- Sinyal hasil modulasi PM adalah mirip dengan sinyal hasil modulasi FM : amplitudo tidak berubah hanya frekuensi menjadi berubah.

# Modulasi Fasa

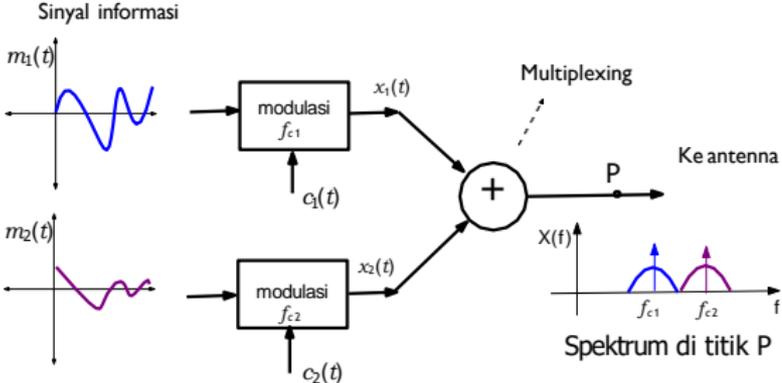
Contoh ilustrasi modulasi fasa.



Teknik modulasi Fasa disamping digunakan pada modulasi analog, juga umum digunakan pada modulasi digital sebagaimana yang akan dijabarkan pada slide 12.

# Multiplexing

Di samping untuk menaikkan frekuensi untuk keperluan transmisi yang efisien, modulasi juga digunakan untuk menggabungkan beberapa sinyal informasi ( $m_1(t)$ ,  $m_2(t)$ ,  $\dots$ ) agar dapat disalurkan dalam satu sistem transmisi. Perhatikan ilustrasi berikut:



- Sinyal hasil modulasi  $x_1(t)$  dan  $x_2(t)$  yang berasal dari  $m_1(t)$  dan  $m_2(t)$  yang dimodulasi dengan frekuensi carrier yang berbeda  $f_{c1}$  dan  $f_{c2}$  dapat digabung dengan penjumlahan (Multiplexing) dan kedua sinyal tidak saling ganggu.
- Spektrum sinyal di titik P tidak saling beririsan.
- Proses penggabungan  $x_1(t)$  dan  $x_2(t)$  disebut dengan multiplexing
- Masing-masing sinyal  $x_1(t)$  dan  $x_2(t)$  akan dipisahkan lagi di sisi penerima dengan teknik **filtering**.
- Tentu saja **3 atau lebih** sinyal informasi dapat di-***multiplexing*** asalkan mereka dimodulasi dengan **frekuensi carrier yang berbeda** dengan jarak antar frekuensi *carrier* cukup besar sehingga spektrum dari masing-masing sinyal setelah di-***multiplexing*** tidak saling ***overlapping***.

# Rekapitulasi Materi

Pada slide 11 ini dibahas tentang:

- Keperluan melakukan modulasi
- Hubungan antara dimensi antena dengan frekuensi
- Tiga macam modulasi analog: AM, FM, dan PM
- *Bandwidth* dari modulasi AM dan FM
- Multiplexing