

# Capítulo 7

## La Capa Física

Application
Transport
Network
Link
Physical

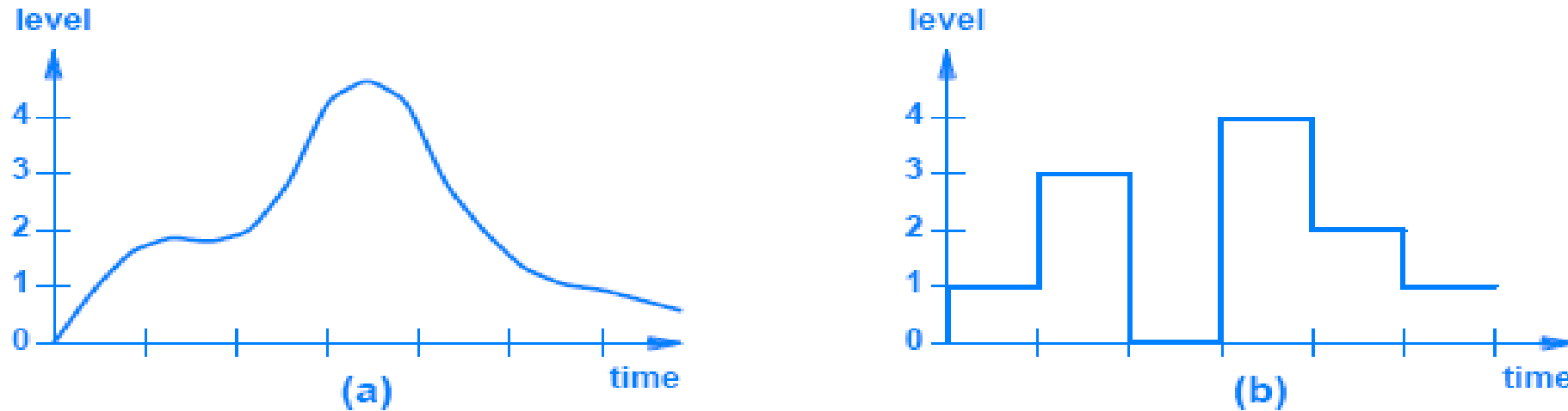
# La Capa Física

- **Repaso:**
  - ¿Cuál es el propósito de la capa física (CF)?
  - Dar ejemplos de medios físicos.
- En los medios físicos viajan señales.
- **Dispositivos a nivel de capa física:** modems, códecs, multiplexores, demultiplexores, etc.

# La Capa Física

- Para comprender las señales, el funcionamiento de los dispositivos a nivel de capa física y propiedades de medios físicos es necesario estudiar la **teoría de señales**.
- Después de estudiar la teoría de señales se pueden abordar **distintos tipos de redes**: redes telefónicas, redes de celulares, redes de cable, redes de fibra a la casa, etc.
- Orden que seguimos al estudiar la capa física.

# Clasificaciones de las señales



**Figure 6.1** Illustration of (a) an analog signal, and (b) a digital signal.

- Representación de señales como una **funciones del tiempo**.
- **Tipos de información** de la comunicación de datos en la CF:
  - **señales analógicas**
  - **señales digitales.**

# Clasificaciones de las señales

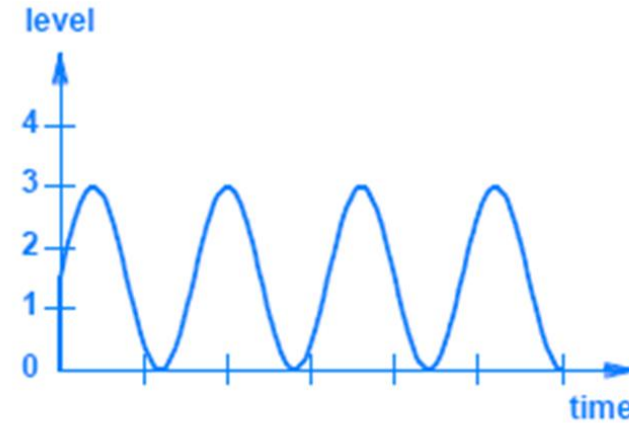
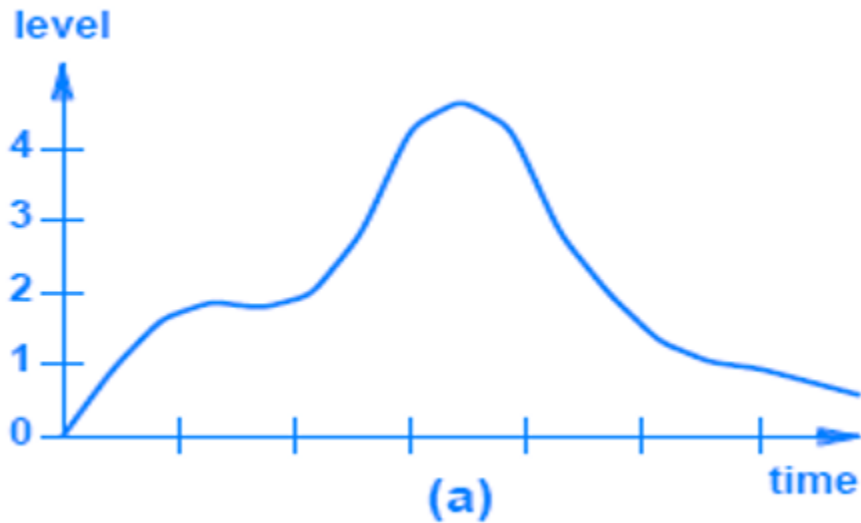


Figure 6.2 A periodic signal repeats.

- Otra clasificación de las señales:
  - **periódicas**
    - $s(t+T) = s(t)$  para todo  $-\infty < t < \infty$ .
  - **aperiódicas** (también **no periódicas**)

# Ondas sinusoidales

- Importancia de las ondas sinusoidales
- Representación como función del tiempo de onda sinusoidal:
- $s(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi)$ ,  $t$  número real.
- **Propiedades de las ondas sinusoidales:** frecuencia, amplitud y fase.

# Ondas sinusoidales

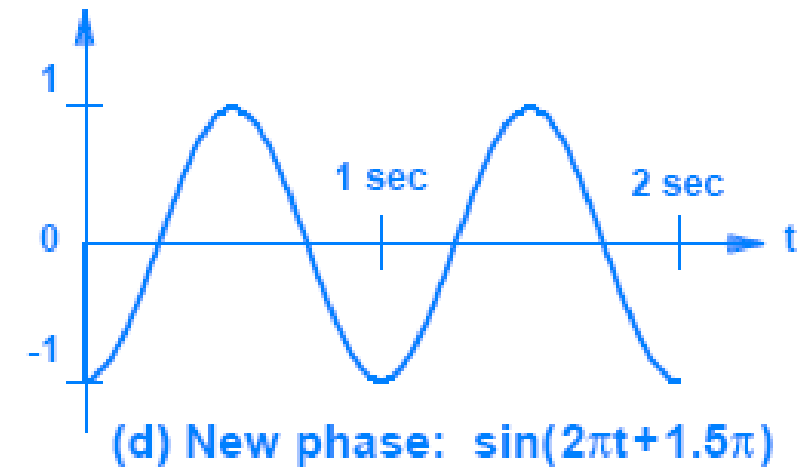
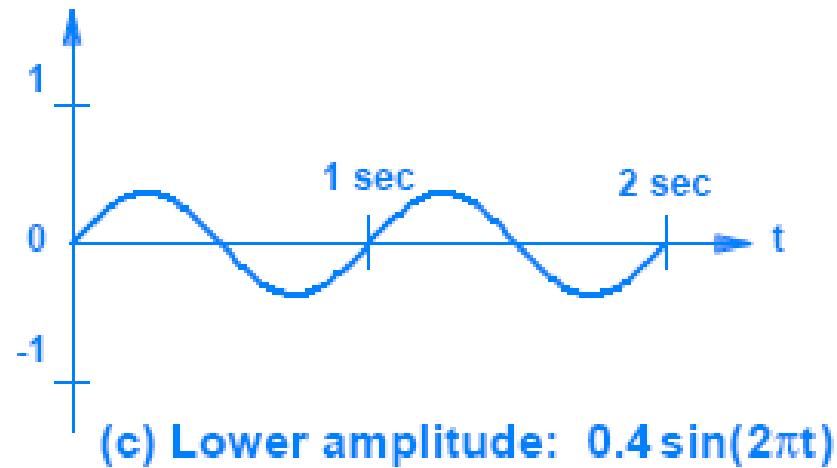
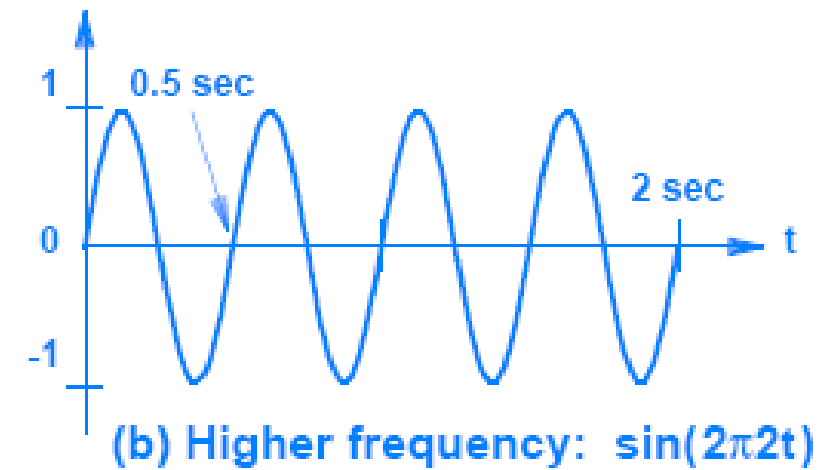
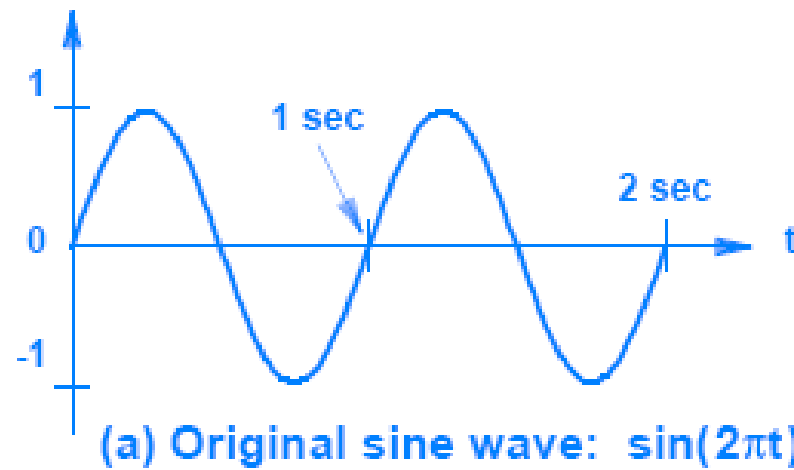
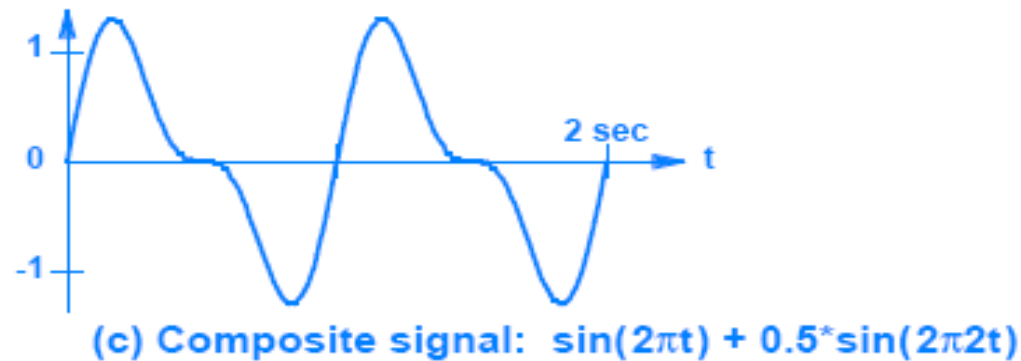
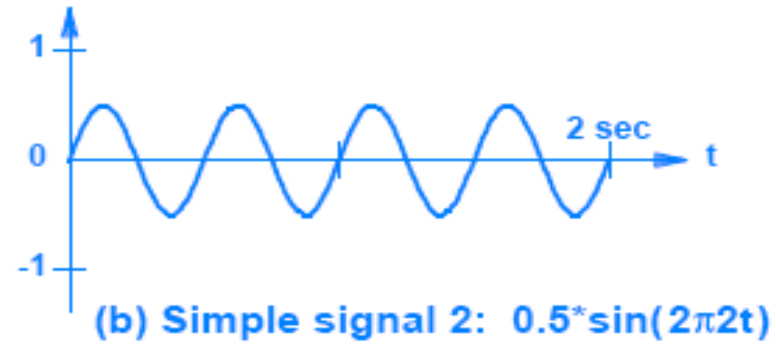
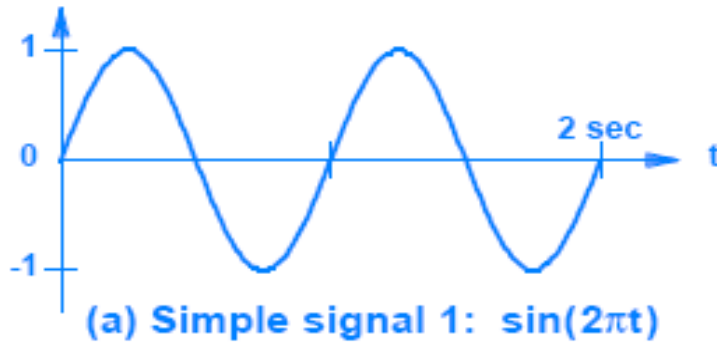


Figure 6.3 Illustration of frequency, amplitude, and phase characteristics.

# Señales compuestas



**Figure 6.5** Illustration of a composite signal formed from two simple signals.

- Señales **simples** (P.ej. Fig. 6.3): una onda sinusoidal.
- Señales **compuestas** (P.ej. Fig. 6.5):
  - puede descomponerse en un conjunto de ondas sinusoidales simples.



# Señales compuestas

- **Descubrimiento de Fourier**

- Toda señal es hecha a partir de un conjunto de funciones sinusoidales (cada una con frecuencia, amplitud y fase).
- Aun las señales digitales pueden aproximarse usando señales sinusoidales.

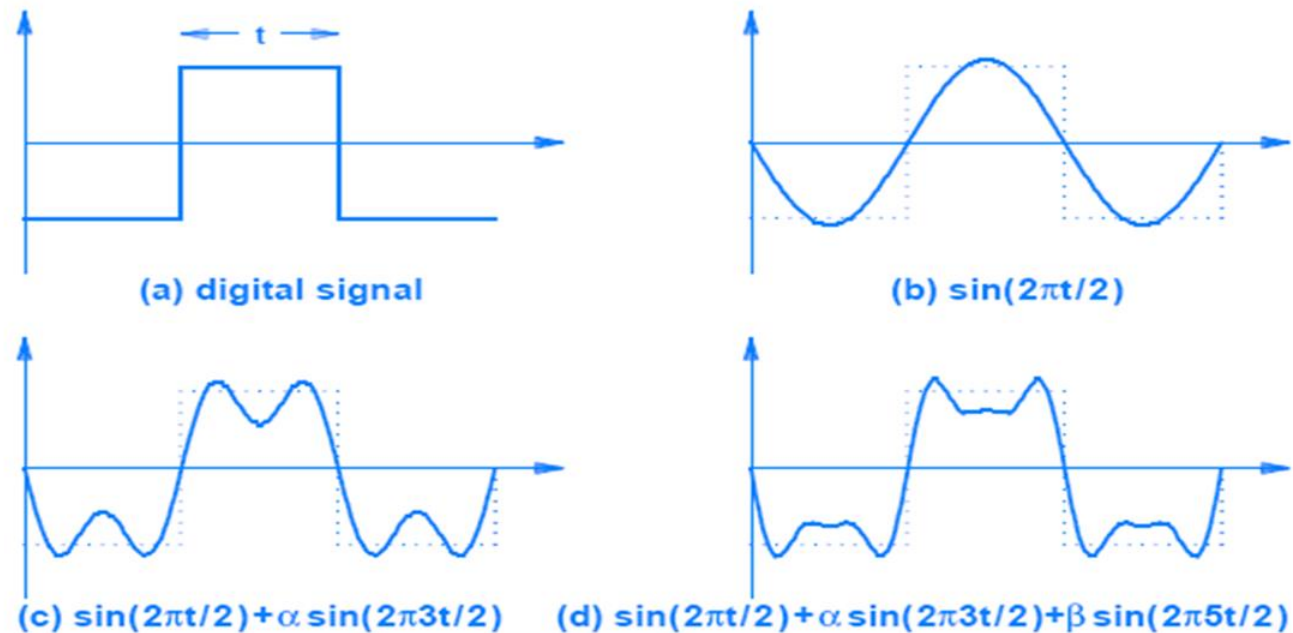
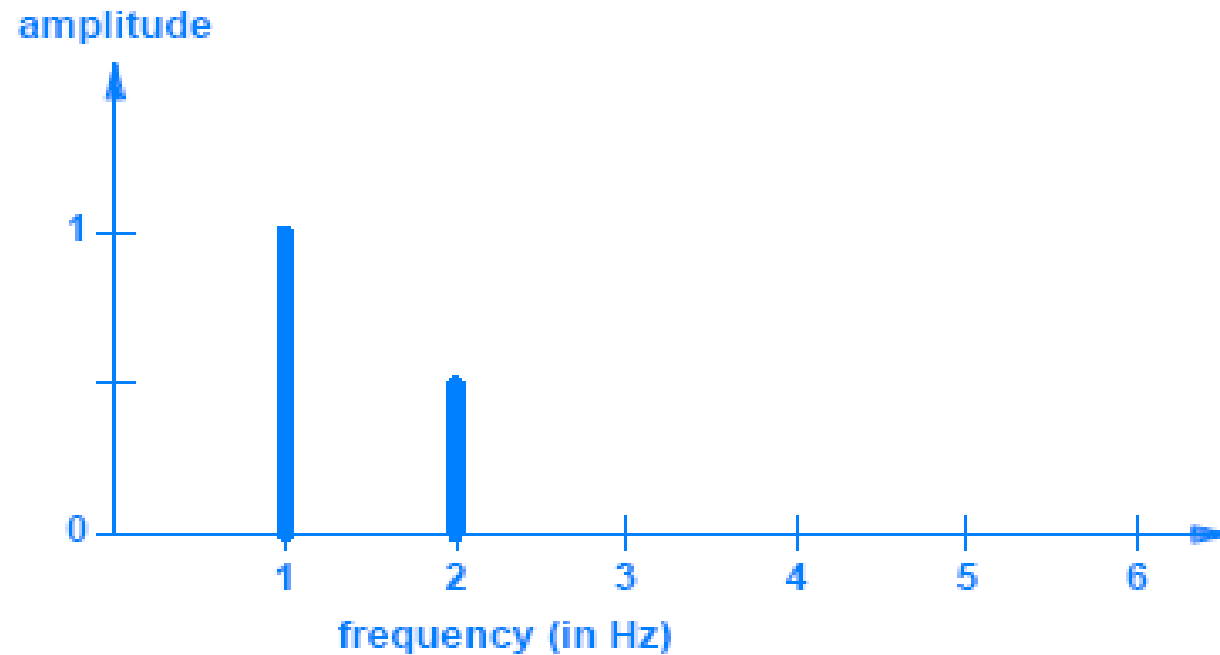


Figure 6.9 Approximation of a digital signal with sine waves.

# Representación gráfica de las señales

- La mayoría de los sistemas usan señales compuestas para transportar información.
- Como toda señal es compuesta, se puede representar una señal usando un **grafo de dominio de frecuencia**.
  - Muestra conjunto de ondas sinusoidales que constituyen la función compuesta.
  - $A \sin(2\pi ft)$  es representada por una línea simple de altura  $A$  que se posiciona en  $x = f$ .

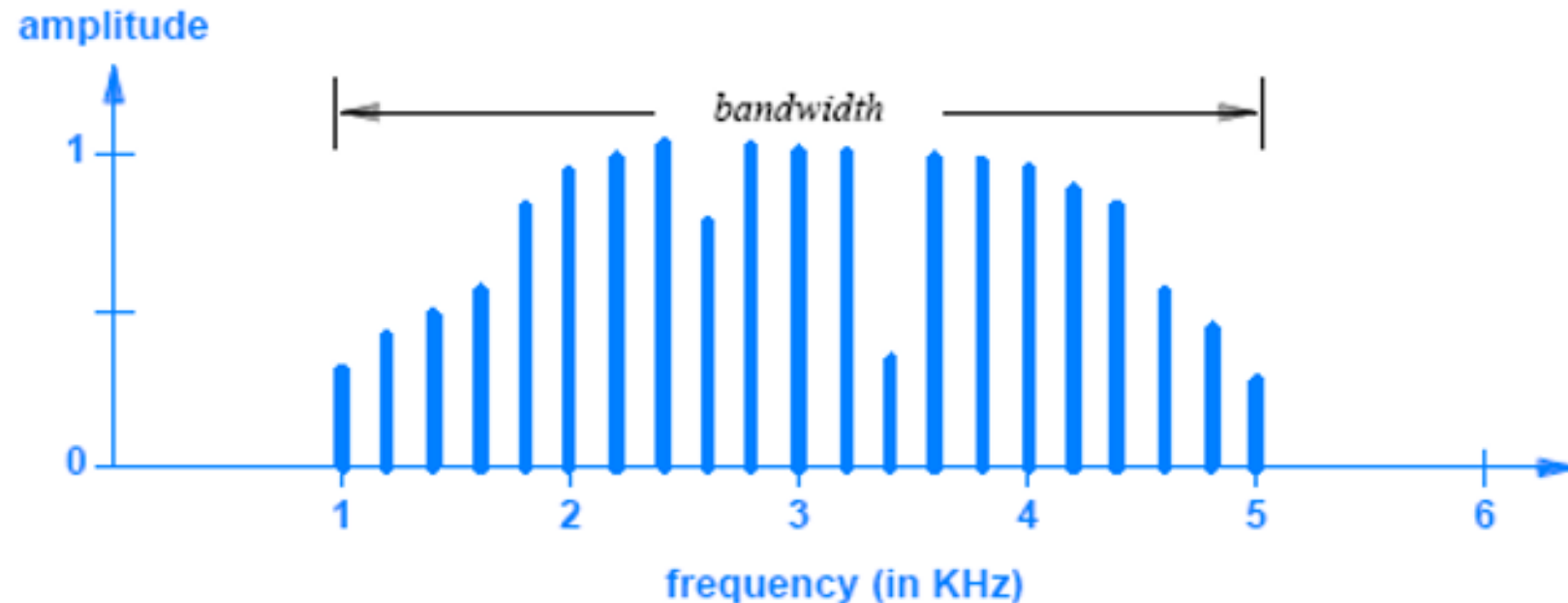
# Representación gráfica de las señales



**Figure 6.6** Representation of  $\sin(2\pi t)$  and  $0.5\sin(2\pi 2t)$  in the frequency domain.

# Representación gráfica de las señales

- Ventaja de la representación de dominio de frecuencia.
- El **espectro** de una señal.
- El **ancho de banda analógica** = ancho del espectro
- Dar valores de espectro y ancho de banda analógico para la señal de abajo.



# Representación gráfica de las señales

- **Ejercicio:** sea la señal compuesta:

$$\sin(\pi t) + 2 \sin(3\pi t) + 6 \sin(5\pi t + \pi)$$

- Representar con dominio de frecuencias esta señal
- ¿Cuál es el espectro de esta señal?
- ¿Cuál es el ancho de banda analógico de esta señal?

# Señales digitales

- ¿Qué son las señales digitales?
- Representación de un número de  $n$  bits.

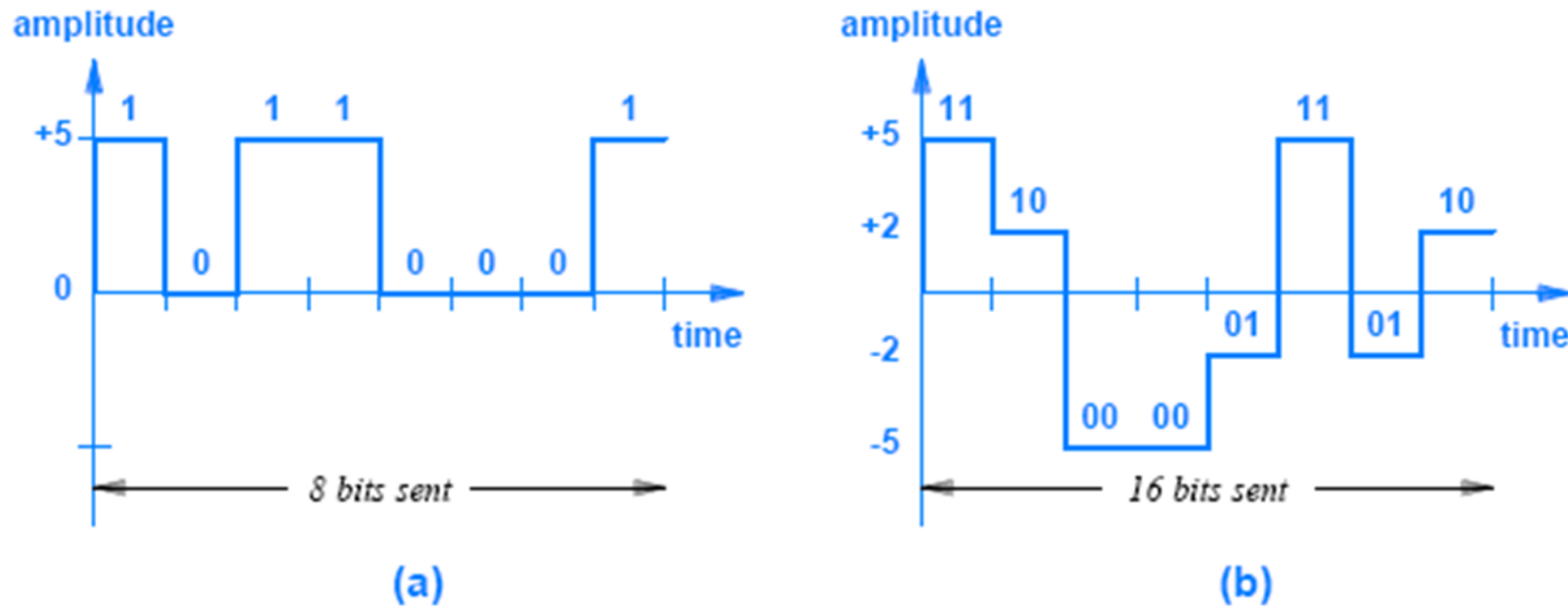
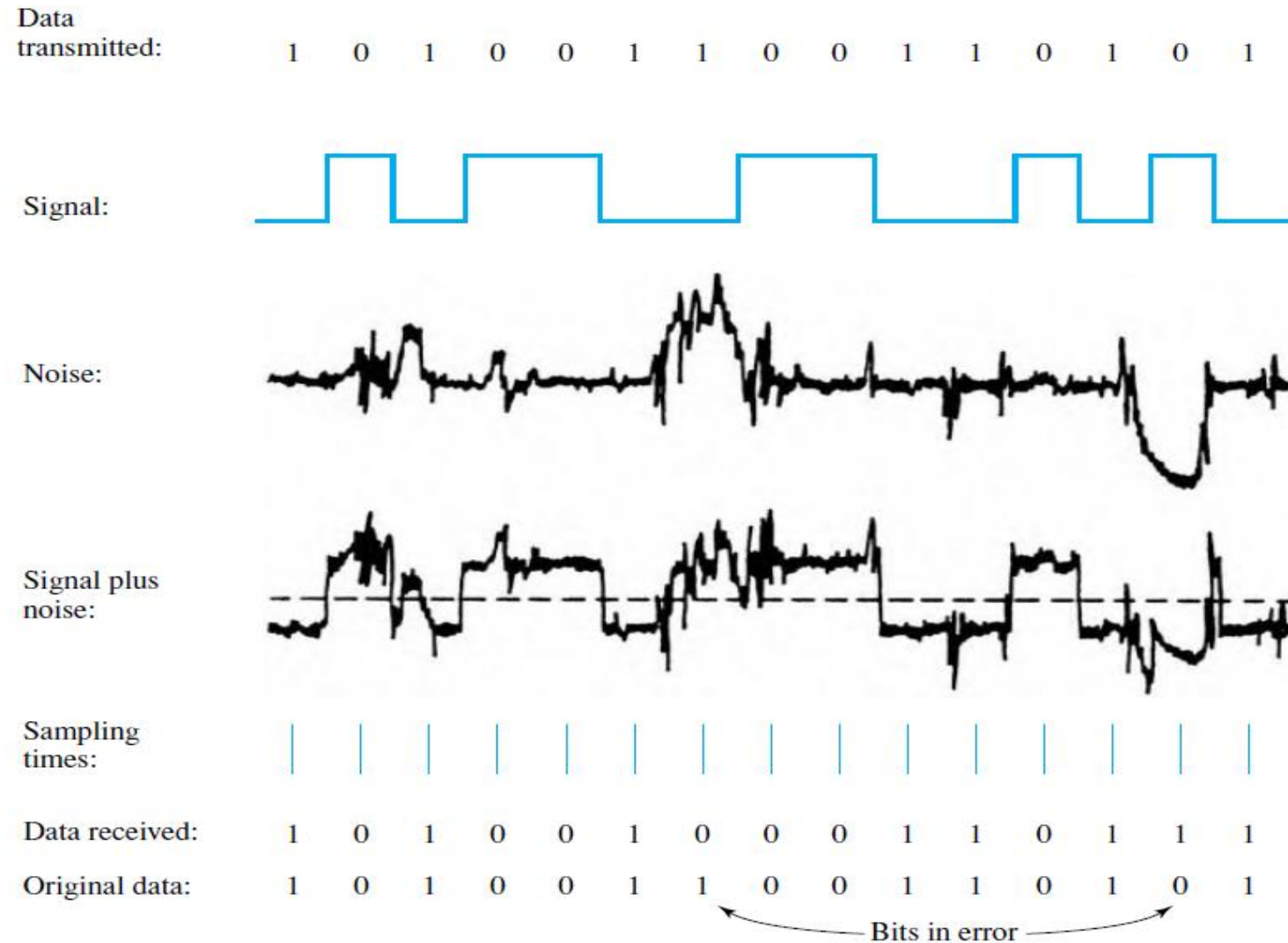


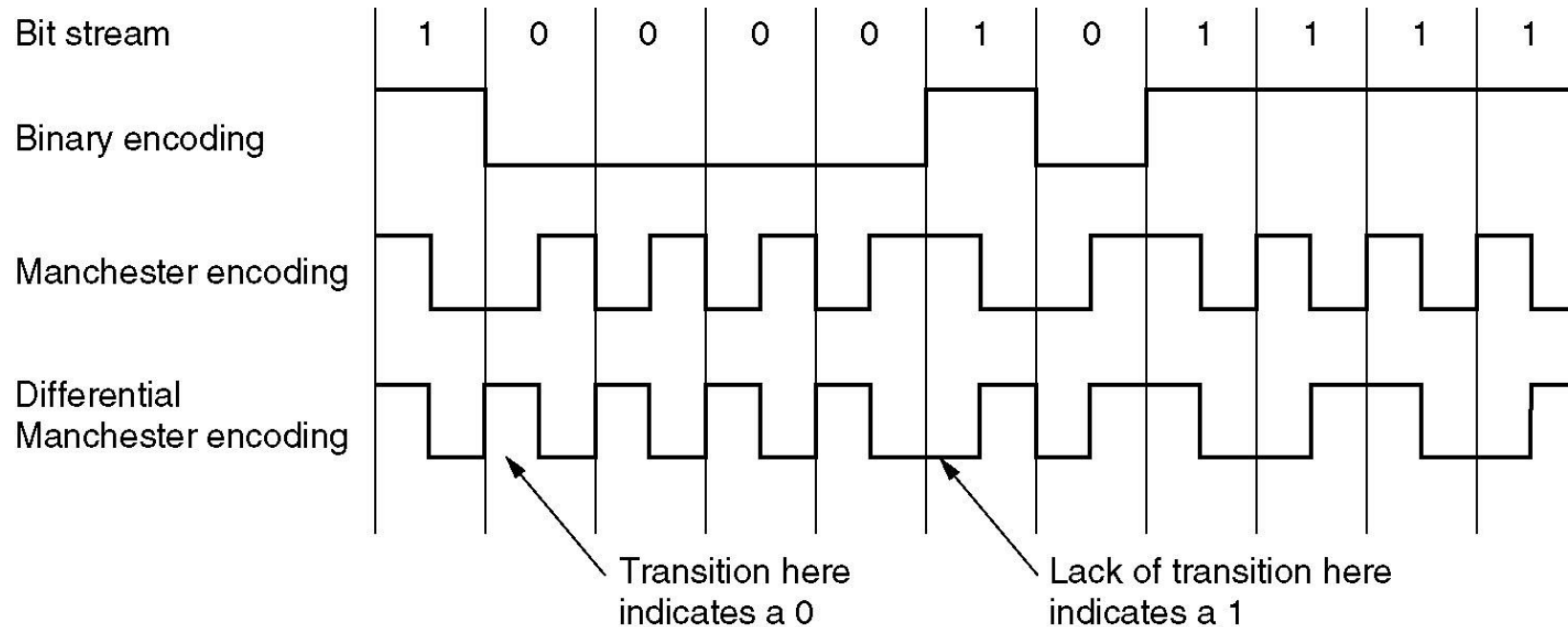
Figure 6.8 (a) A digital signal using two levels, and (b) a digital signal using four levels.

# Ruido



**Figure 3.16** Effect of Noise on a Digital Signal

# Codificación de bits en Ethernet



(a) Binary encoding, (b) Manchester encoding,  
(c) Differential Manchester encoding.

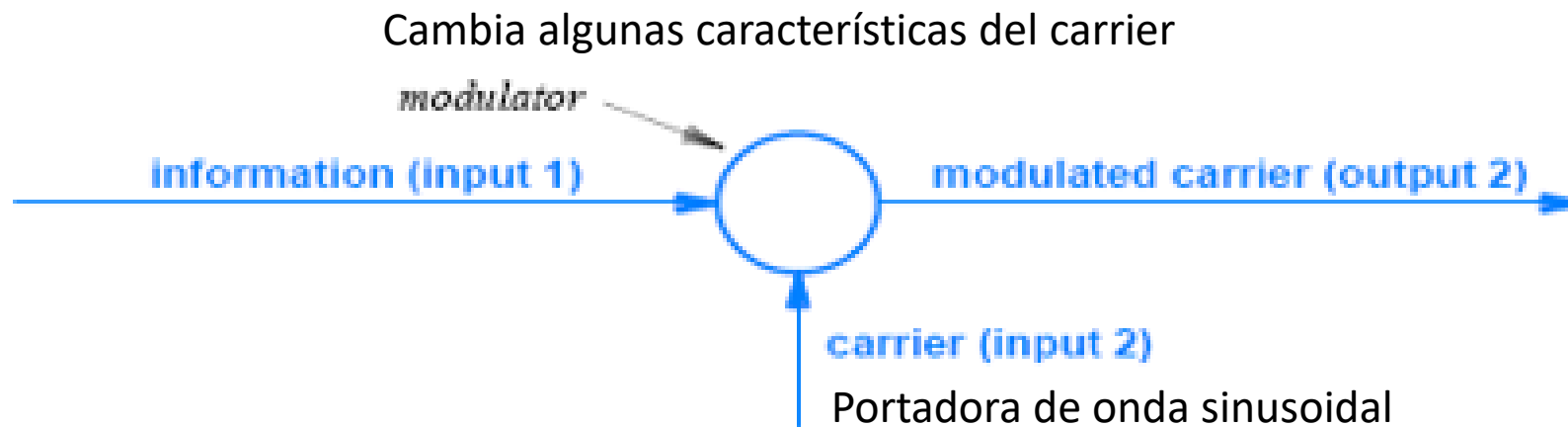


# Baudios y Bits por Segundo

- La cantidad de veces que una señal puede cambiar por segundo se mide en **baudios**.
- **Ejemplo**: Si se requiere que la señal permanezca en un nivel por 0,001 seg, decimos que el sistema opera a 1000 baud.
- Tasa de bits de una señal =  $N^{\circ} \text{ baudios} \times \lfloor \log_2(\text{niveles}) \rfloor$
- **Ejercicio**: ¿cuál es la tasa de bits en los siguientes casos?
  - Si se tiene 2 niveles de señal y opera a 1000 baud.
  - Si se tiene 4 niveles de señal y la señal permanece en un nivel por 0,0001 seg.

# Modulación

- Necesidad de convertir señales digitales a analógicas
- Para hacerlo se usa **modulación**
- **Módems** son dispositivos que trabajan con modulación



# Modulación

- **Tipos de modulación**
  - **De amplitud**
    - P.ej. dos niveles de amplitud distintos para reflejar 0 y 1.
  - **De frecuencia**
    - P.ej. una frecuencia menor para 0 y una frecuencia mayor para 1.
  - **De fase**
    - P.ej. desplazamiento de fase de  $180^\circ$  para 0 y desplazamiento de fase de  $0^\circ$  para 1.
- **Ejercicio:** representar modulación de amplitud, frecuencia y fase para el mensaje: 0101100100100. Asumir dos niveles de voltaje

# Modulación

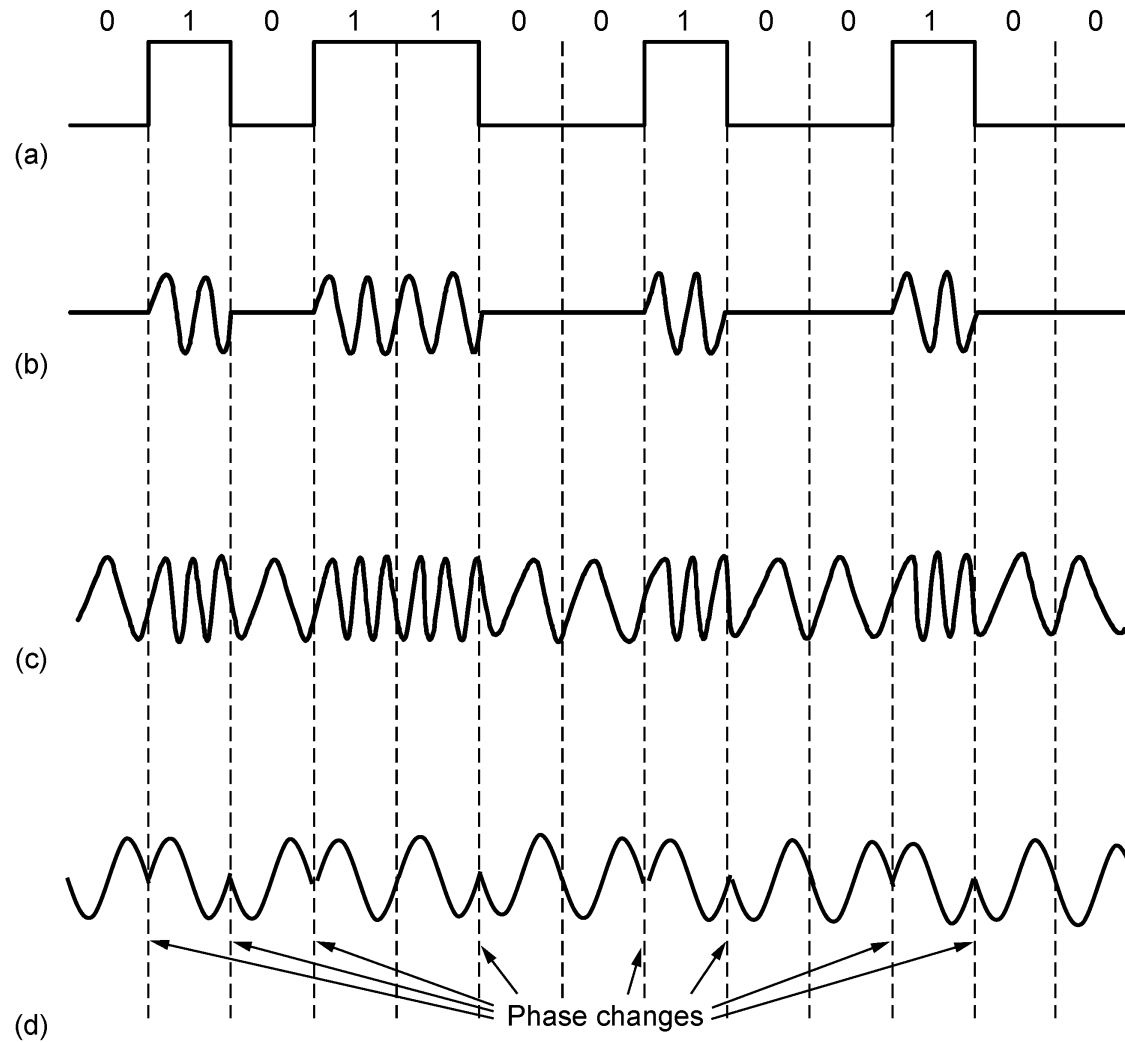


Fig. 24

(a) A binary signal

(b) Amplitude modulation

(c) Frequency modulation

(d) Phase modulation

# Diagramas de constelación

- Los modem avanzados usan varias **combinaciones de modulaciones** (cada una con su amplitud y desplazamientos de fase) para transmitir varios bits por baudio.
- Cada **combinación de modulación** se lo puede pensar como un par:  
(amplitud, desplazamiento de fase)
- Se usan  $2^n$  combinaciones para representar números de  $n$  bits.
- **Representación gráfica de combinaciones de modulación** usadas por un modem por medio de **diagrama de constelación**:
  - Distancia al origen representa amplitud
  - Ángulo representa desplazamiento de fase

# Diagramas de constelación

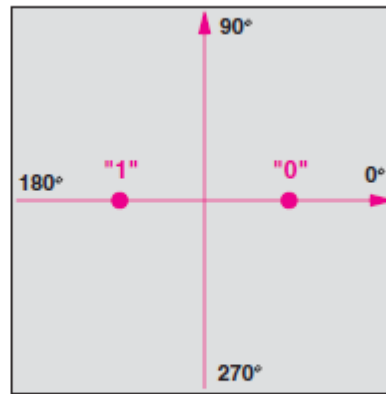


Figure 10.6 A constellation diagram that shows logical 0 as a  $0^\circ$  phase shift and logical 1 as a  $180^\circ$  phase shift.

**BPSK:** 2 puntos con amplitud constante a los 0 y 180 grados

# Diagramas de constelación

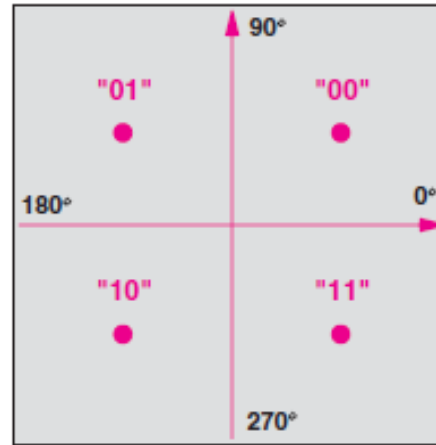


Figure 10.7 A constellation diagram for a system that uses four possible phase shifts that each represent two data bits.

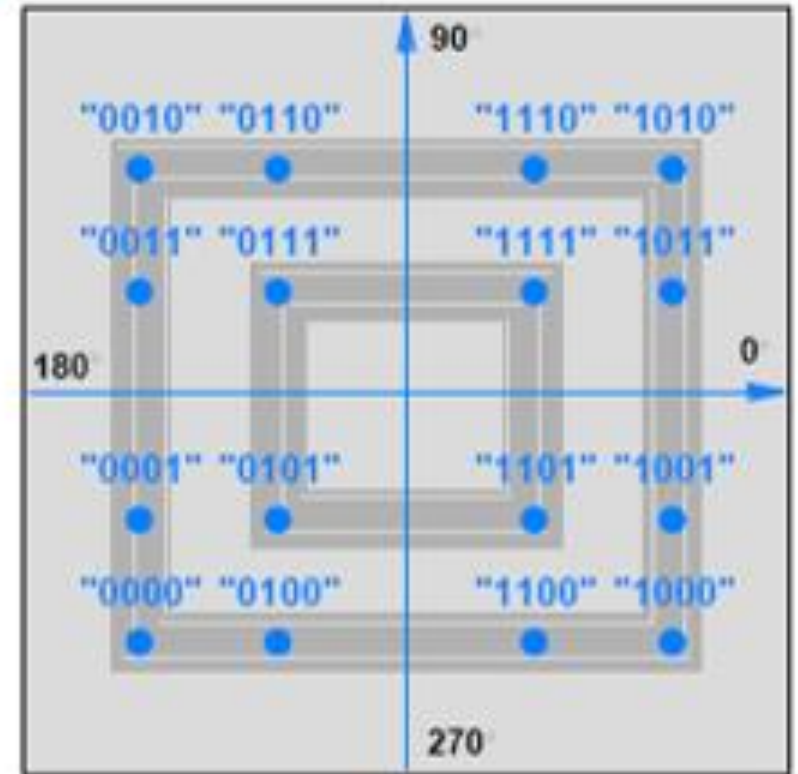
Fig. 10.7 **QPSK**: puntos con amplitud constante a los 45, 135, 225 y 315 grados.

- La fase de un punto la indica el ángulo que se forma con el eje de las x al trazar una línea desde el punto hacia el origen.
- Hay 4 combinaciones válidas y se puede usar para transmitir 2 bits por símbolo.

# Diagramas de constelación

## QAM-16:

- ¿Cuántas combinaciones de modulación?
- ¿Cuántas amplitudes hay?
- ¿Cuántos desplazamientos de fase hay?



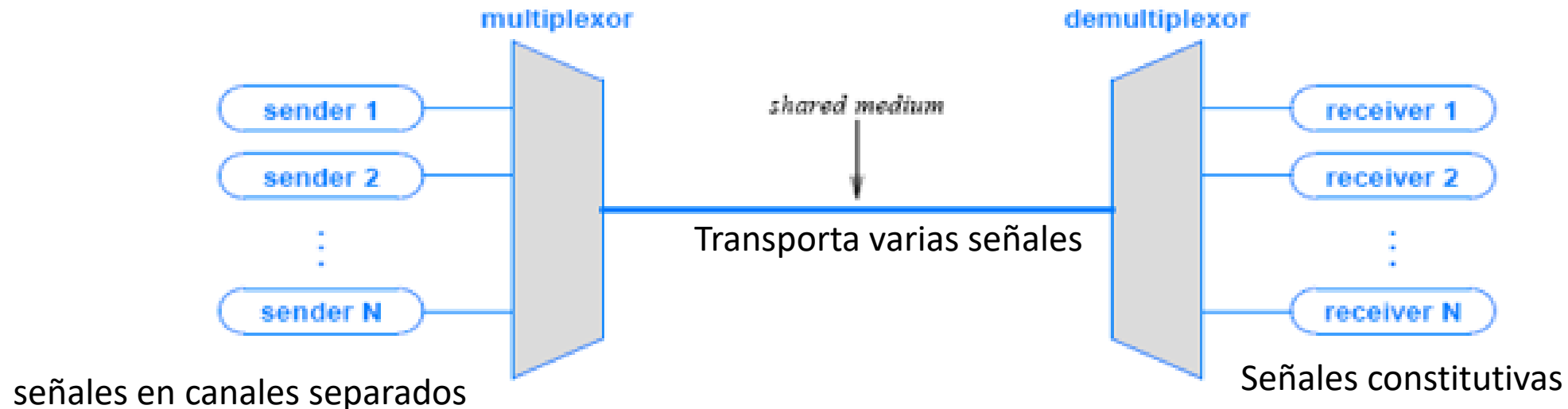


# Modulación

- **Ejercicio:** Si en un diagrama de constelación todos los puntos están en un círculo centrado en el origen. ¿Qué tipo de modulación está siendo usada?
- **Ejercicio:** El diagrama de constelación de un modem tiene puntos de datos en las siguientes coordenadas:  $(1,1)$ ,  $(1, -1)$ ,  $(-1, 1)$  y  $(-1, -1)$ . ¿Cuántos bps un modem con esos parámetros alcanzar a 1200 símbolos por segundo?

# Multiplexado

- Varias señales que tienen que recorrer distancia larga: conviene ponerlas en un mismo cable.
- Originalmente pueden estar en cables diferentes que recorren una distancia chica.



# Multiplexado por división de frecuencia

- **Problema:** ¿Para multiplexar varias señales analógicas como hacemos?
- **Solución:** Multiplexado por división de frecuencia (FDM).
- Usado en cables y canales de microondas

El espectro de frecuencias se divide en bandas de frecuencia.  
Para cada señal se usa una banda.

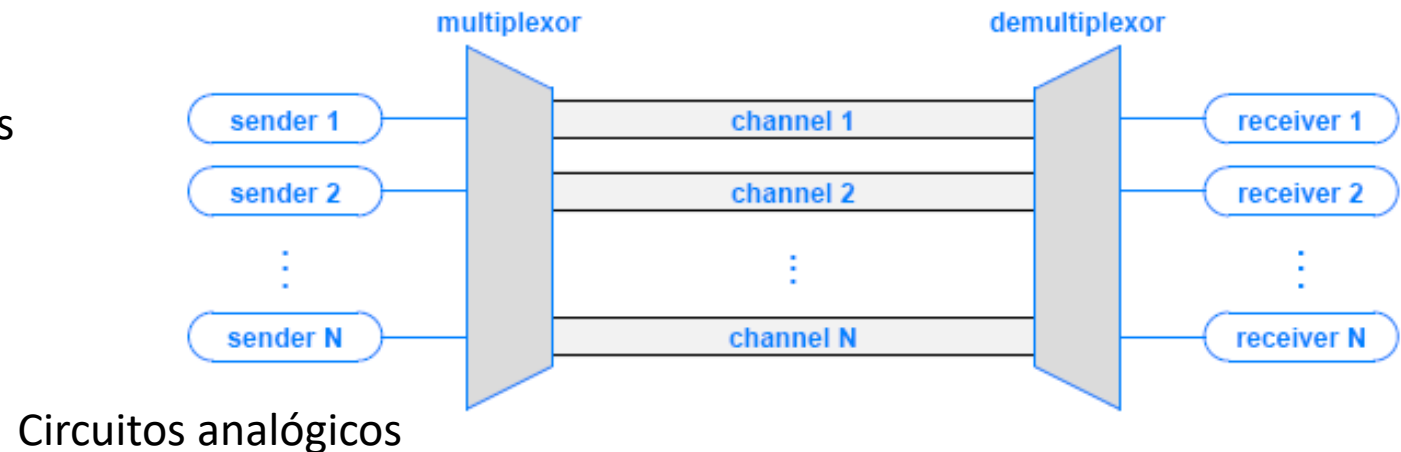
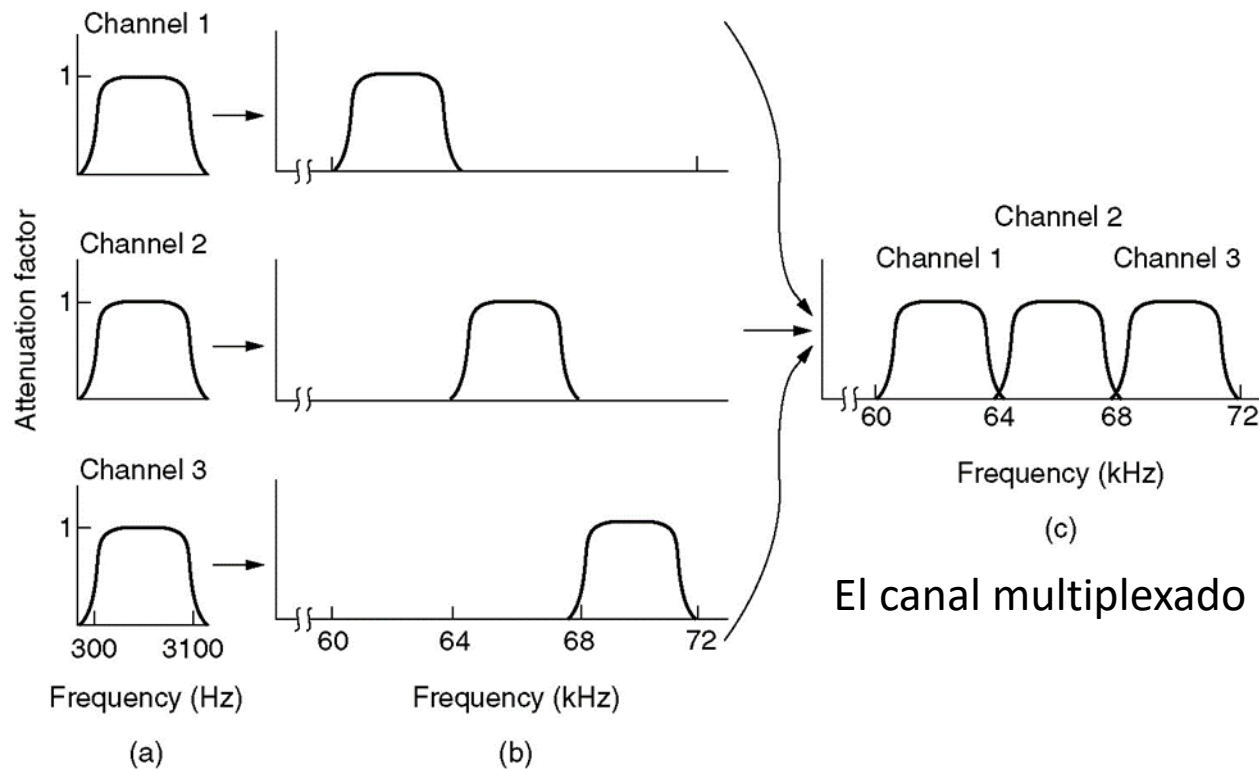


Figure 11.3 The conceptual view of Frequency Division Multiplexing (FDM) as providing a set of independent channels.

# Multiplexado por división de frecuencia

## Funcionamiento de un multiplexor en FDM



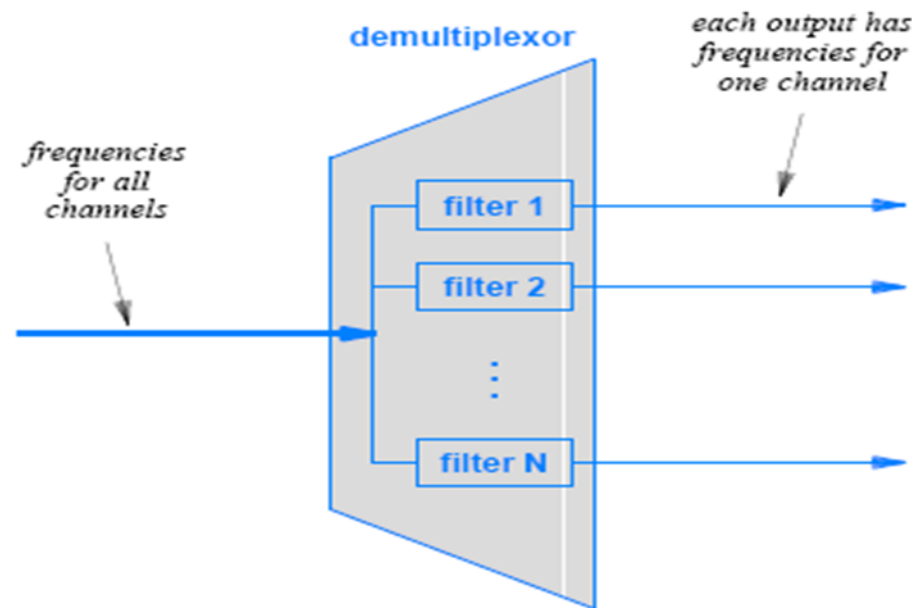
El canal multiplexado

Anchos de banda originales

Anchos de banda  
aumentados en frecuencia

# Multiplexado por división de frecuencia

## Funcionamiento de un demultiplexor en FDM



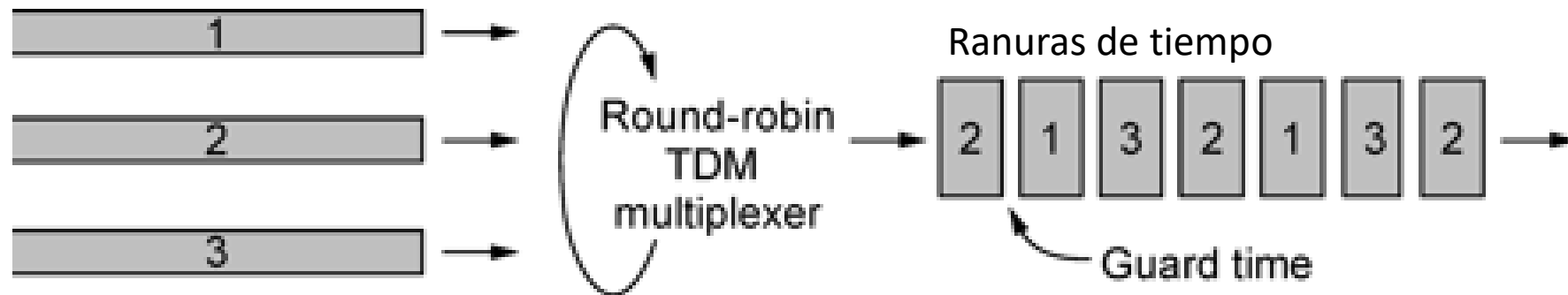
**Figure 11.2** Illustration of the basic FDM demultiplexing where a set of filters each selects the frequencies for one channel and suppresses other frequencies.

# Multiplexado por división de frecuencia

- **Ejercicio:** Diez señales, cada una requiere 4000 Hz, son multiplexadas en un canal único usando FDM. ¿Cuál es el mínimo ancho de banda requerido para el canal multiplexado? Asumir que las bandas de guarda son de 400 Hz de ancho.

# Multiplexado por división de tiempo

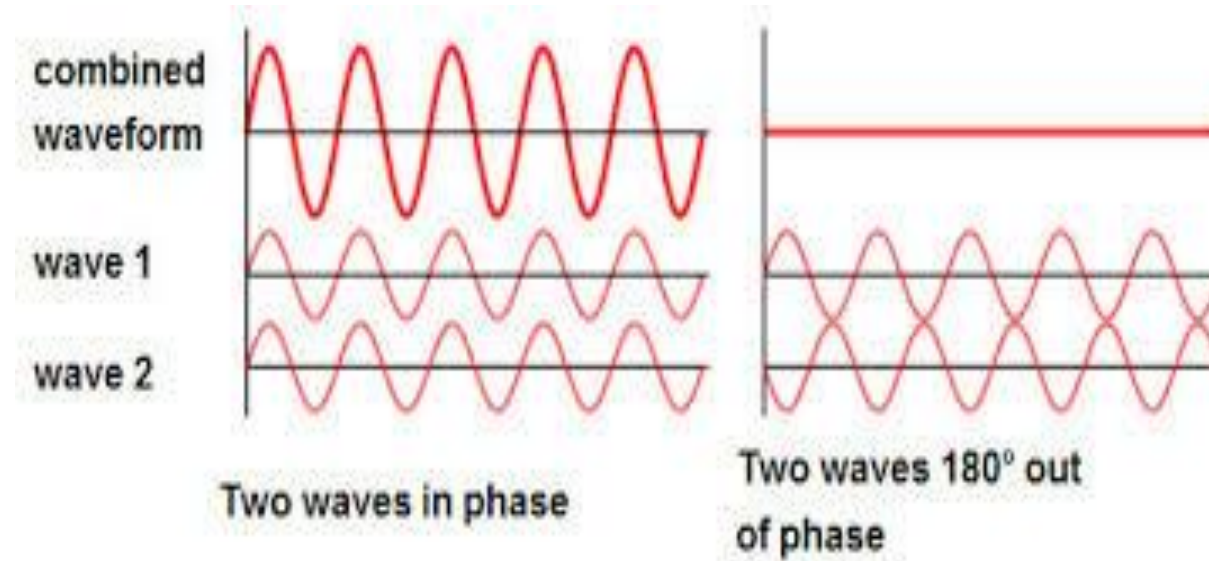
- **Problema:** queremos mandar varias señales digitales por un mismo canal.
- **Solución:** Multiplexado por división de tiempo.
- Usado en redes telefónicas y de celulares



# Principio de Superposición de Ondas

**Propiedades físicas de la interferencia:** si dos señales en un punto están en fase se agregan para sumar sus amplitudes, pero si están fuera de fase, se restan para dar una señal que es la diferencia de las amplitudes.

Ejemplo:





# Multiplexado por división de código

- **Multiplexado por división de código (CDMA)** es otra manera de multiplexar varias señales analógicas.
  - Varias señales distintas comparten la misma banda de frecuencias.
  - Se agregan múltiples señales en forma lineal explotando el principio de superposición de ondas.
  - Usado por redes de celulares, redes satelitales y redes de cable.
  - Cada máquina que transmite tiene asignada un número de M bits llamado **secuencia de chips**.
  - **Ejemplo:** la estación A tiene secuencia de chips 00011011.
  - Expresamos la secuencia de chips usando **notación bipolar**.
  - Ejemplo: para el ejemplo anterior la notación bipolar es:  $(-1-1-1+1+1-1+1+1)$ .

# Multiplexado por división de código

- **Multiplexado por división de código (CDMA) – continuación:**
  - Una estación se comporta de la siguiente manera:
    - transmite un 1 enviando su secuencia de chips en bipolar,
    - transmitir un 0 enviando su negativo de su secuencia de chips,
    - puede quedarse en silencio y no transmitir nada.
  - **Requisito:** todas las estaciones mandan un bit al mismo tiempo.
  - Cuando dos o mas estaciones transmiten de manera simultánea un bit, sus señales bipolares se agregan linealmente.

# Ejemplo

- Tenemos 4 estaciones con secuencias de chip:

A: 0 0 0 1 1 0 1 1  
 B: 0 0 1 0 1 1 1 0  
 C: 0 1 0 1 1 1 0 0  
 D: 0 1 0 0 0 0 1 0

(a)

A: (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)  
 B: (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)  
 C: (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)  
 D: (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)

(b)

Six examples:

- - 1 -	<b>C</b>	$S_1 = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$
- 1 1 -	<b>B + <math>\overline{C}</math></b>	$S_2 = (-2 \ 0 \ 0 \ 0 +2 +2 \ 0 -2)$
1 0 - -	<b>A + <math>\overline{B}</math></b>	$S_3 = ( \ 0 \ 0 -2 +2 \ 0 -2 \ 0 +2)$
1 0 1 -	<b>A + B + C</b>	$S_4 = (-1 +1 -3 +3 +1 -1 -1 +1)$
1 1 1 1	<b>A + B + C + D</b>	$S_5 = (-4 \ 0 -2 \ 0 +2 \ 0 +2 -2)$
1 1 0 1	<b>A + B + <math>\overline{C}</math> + D</b>	$S_6 = (-2 -2 \ 0 -2 \ 0 -2 +4 \ 0)$

(c)

# Multiplexado por división de código

- **Multiplexado por división de código (CDMA) – continuación:**

- Dos secuencias de chip S y T son ortogonales sii:

$$\mathbf{S} \bullet \mathbf{T} \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0$$

- Para que un receptor pueda recuperar la señal enviada todas las secuencias de chip deben ser ortogonales dos a dos.
- Para **recuperar el flujo de bits** de una estación, el receptor calcula el producto interno normalizado de la secuencia de chips recibida y la secuencia de chips de la estación cuyo flujo de bits se está tratando de recuperar.

# Ejemplo

- Tenemos 4 estaciones con secuencias de chip:

A: 0 0 0 1 1 0 1 1  
 B: 0 0 1 0 1 1 1 0  
 C: 0 1 0 1 1 1 0 0  
 D: 0 1 0 0 0 0 1 0

(a)

A: (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)  
 B: (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)  
 C: (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)  
 D: (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)

(b)

Six examples:

-- 1 --	<b>C</b>	$S_1 = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$
- 1 1 --	<b>B + <math>\bar{C}</math></b>	$S_2 = (-2 \ 0 \ 0 \ 0 +2 +2 \ 0 -2)$
1 0 --	<b>A + <math>\bar{B}</math></b>	$S_3 = (0 \ 0 -2 +2 \ 0 -2 \ 0 +2)$
1 0 1 --	<b>A + B + C</b>	$S_4 = (-1 +1 -3 +3 +1 -1 -1 +1)$
1 1 1 1	<b>A + B + C + D</b>	$S_5 = (-4 \ 0 -2 \ 0 +2 \ 0 +2 -2)$
1 1 0 1	<b>A + B + <math>\bar{C}</math> + D</b>	$S_6 = (-2 -2 \ 0 -2 \ 0 -2 +4 \ 0)$

(c)

Podemos extraer lo que transmitió C dado Si:

$S_1 \bullet C = (1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1)/8 = 1$   
 $S_2 \bullet C = (2 +0 +0 +0 +2 +2 +0 +2)/8 = 1$   
 $S_3 \bullet C = (0 +0 +2 +2 +0 -2 +0 -2)/8 = 0$   
 $S_4 \bullet C = (1 +1 +3 +3 +1 -1 +1 -1)/8 = 1$   
 $S_5 \bullet C = (4 +0 +2 +0 +2 +0 -2 +2)/8 = 1$   
 $S_6 \bullet C = (2 -2 +0 -2 +0 -2 -4 +0)/8 = -1$

(d)

Para S4:

$$S \bullet C = (A + \bar{B} + C) \bullet C = A \bullet C + \bar{B} \bullet C + C \bullet C = 0 + 0 + 1 = 1$$

# Multiplexado por División de Código

A: 0 0 0 1 1 0 1 1

B: 0 0 1 0 1 1 1 0

C: 0 1 0 1 1 1 0 0

D: 0 1 0 0 0 0 1 0

- **Ejercicio:** Un receptor CDMA obtiene los siguientes chips : (-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1). Asumir las secuencias de chips definidas arriba. ¿Cuáles estaciones transmitieron y qué bits envió cada una?

# Multiplexado por división de código

- Para producir un conjunto de secuencias de chip ortogonales se usan las **matrices de Hadamard**:

- $W_1 = \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 1 \\ \hline 1 & -1 \\ \hline \end{array}$
- $W_2$

$$W_{2n} = \begin{array}{cc} W_n & W_n \\ W_n & \overline{W_n} \end{array}$$