

# Capítulo 7

## La Capa Física

### Fundamentos de la teoría de señales

Application
Transport
Network
Link
Physical

# La Capa Física

- **Propósito de la capa física (CF):**
  - Transportar un stream de datos de una máquina a otra usando medios físicos.
- **Medios físicos:** p.ej. cable trenzado de cobre, fibra óptica, ondas de radio, ondas microondas, etc.
- En los medios físicos viajan señales.
- Para comprender y evaluar los distintos medios físicos es necesario entender los conceptos fundamentales de la **teoría de señales**.

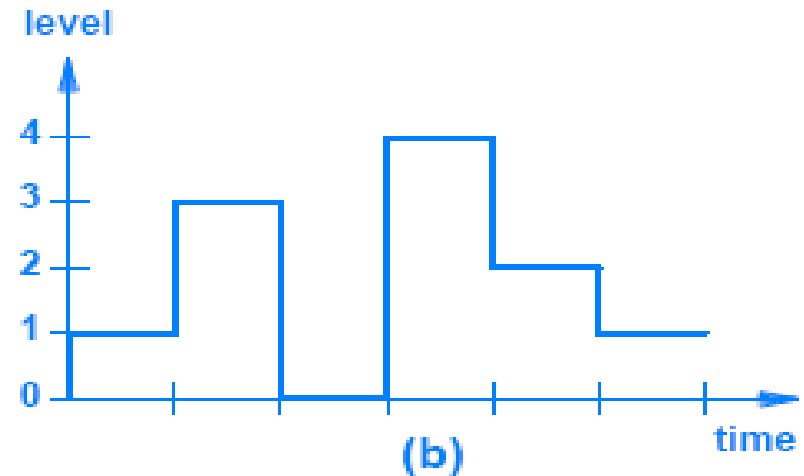
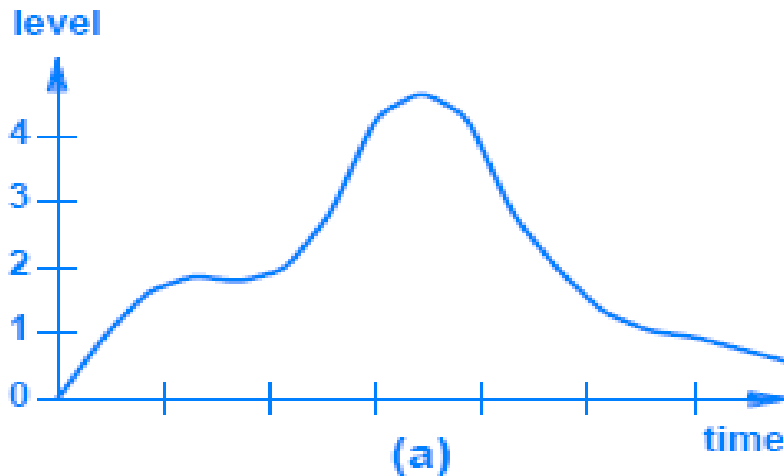
# La Capa Física

- La CF no consiste solo de medios físicos:
  - Los medios físicos **se conectan entre sí** usando dispositivos como codecs, modems, multiplexores, demultiplexores, conmutadores, puentes, enrutadores, puertas de enlace, etc.
  - formándose así **redes complejas de distintos tipos**.
- Para comprender varios de estos dispositivos hay que entender un poco de **teoría de señales**.
- Una vez que comprendamos las propiedades de los distintos medios físicos vamos a estudiar **distintos tipos de redes**:
  - Redes de telefonía pública conmutada, redes de telefonía celular, redes que usan cables de la TV por cable, redes de fibra a la casa.

# Capa física

- **Aprenderemos:**
  - **Clasificación de señales**
  - Ondas sinusoidales
  - Señales compuestas
  - Representación gráfica de señales
  - Señales digitales
  - Baudios y bits por segundo
  - Tasa de datos máxima de un canal

# Señales digitales y analógicas



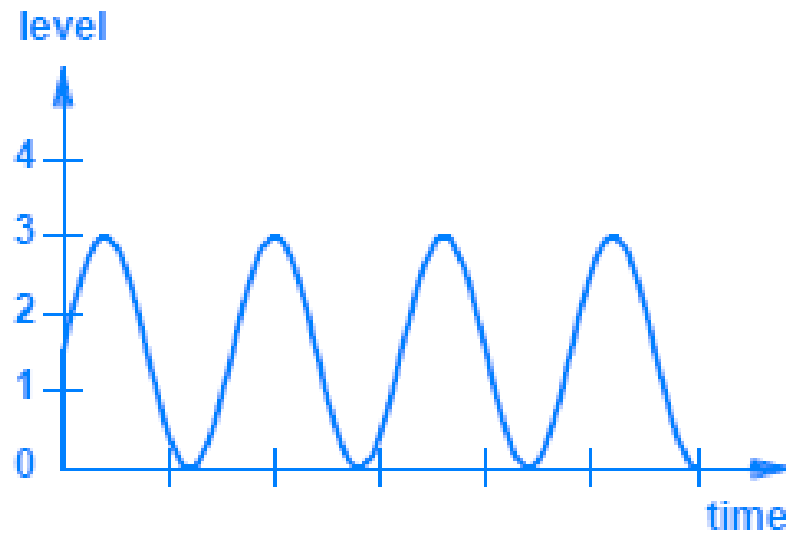
**Figure 6.1** Illustration of (a) an analog signal, and (b) a digital signal.

- **Tipos de información** de la comunicación de datos en la CF:
  - **señales analógicas**
    - Caracterizadas por función matemática continua.
  - **señales digitales**
    - Con conjunto fijo de niveles válidos.
- Representación de señales como una funciones del tiempo.

# Señales

- Otra clasificación de las señales:
  - **periódicas**
    - $s(t+T) = s(t)$  para todo  $-\infty < t < \infty$ .
  - **aperiódicas** (también **no periódicas**)
- Por ejemplo:
  - Fig. 6.1a de la parte 1 (aperiódica) y Fig. 6.2 filmína siguiente (periódica)

# Ondas sinusoidales



**Figure 6.2** A periodic signal repeats.

# Capa física

- **Aprenderemos:**
  - Clasificación de señales
  - **Ondas sinusoidales**
  - Señales compuestas
  - Representación gráfica de señales
  - Señales digitales
  - Baudios y bits por segundo
  - Tasa de datos máxima de un canal



# Ondas sinusoidales

- Ahora estudiamos las ondas sinusoidales y sus propiedades.
- Funciones trigonométricas **sinusoidales**
  - Especialmente el **seno**
  - **Onda sinusoidal** es  $s(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi)$ ,  $t$  número real.
- **Importancia de las ondas sinusoidales**
  - Son producidas por fenómenos naturales.
  - P. ej: los **tonos audibles** suelen ser ondas sinusoidales.

# Ondas sinusoidales

- **Propiedades de las ondas sinusoidales:**
  - **Frecuencia** = número de oscilaciones por segundo
  - **Amplitud** = diferencia entre las alturas máxima y mínima
  - **Fase** = cuánto es desplazado el comienzo de la onda sinusoidal a partir de un tiempo de referencia
- Expresión matemática de estas características.

# Ondas sinusoidales

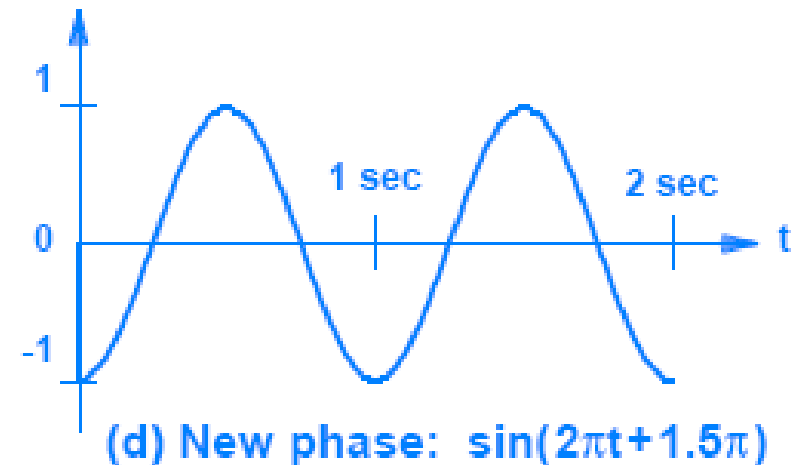
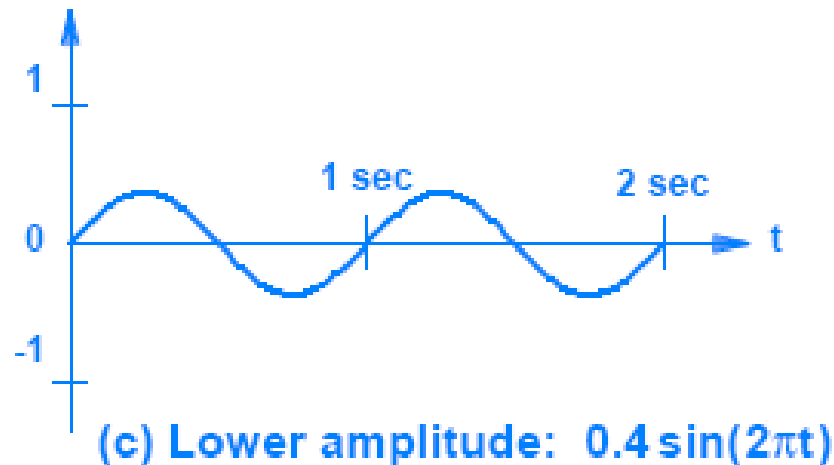
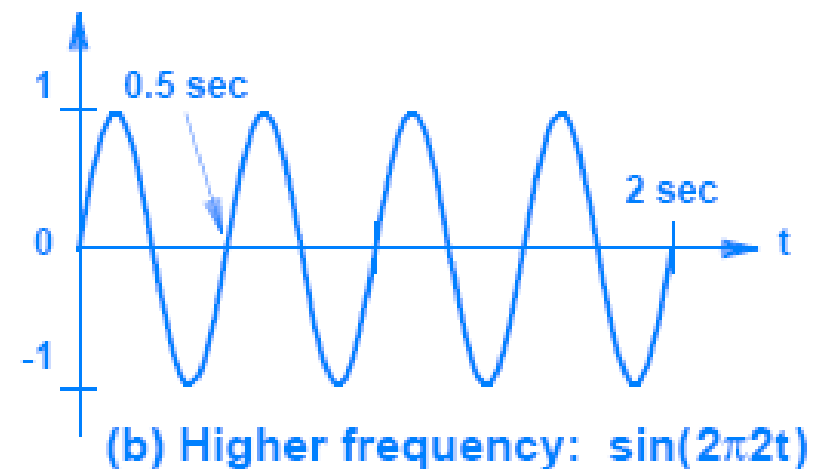
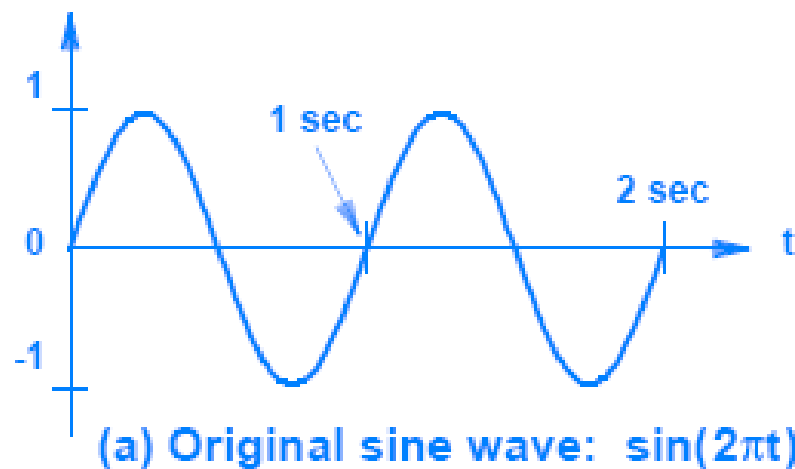


Figure 6.3 Illustration of frequency, amplitude, and phase characteristics.

# Ondas sinusoidales

- El **período** ( $T$ ): tiempo requerido por un ciclo.
- Frecuencia  $f = 1/T$ .
  - O sea, cantidad de ciclos por segundo.
- **Bajas frecuencias**
  - Fig. 6.3a:  $T = 1$  segs y una frecuencia de  $1/T$  o 1 Hertz.
  - Fig. 6.3b:  $T = 0,5$  segs y una frecuencia es de 2 Hertz.
- Los sistemas de comunicación usan **altas frecuencias** (expresadas en millones de ciclos por segundo - **megahertz** (MHz))

# Capa física

- **Aprenderemos:**
  - Clasificación de señales
  - Ondas sinusoidales
  - **Señales compuestas**
  - Representación gráfica de señales
  - Señales digitales
  - Baudios y bits por segundo
  - Tasa de datos máxima de un canal

# Señales compuestas

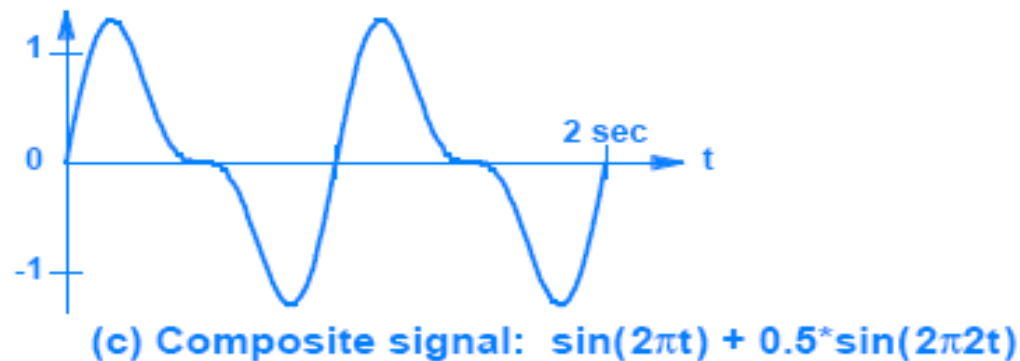
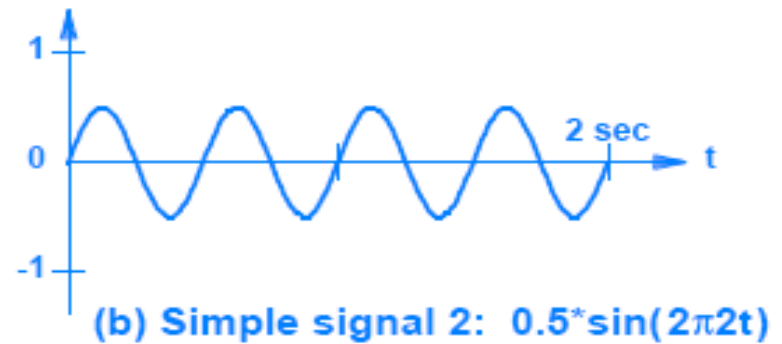
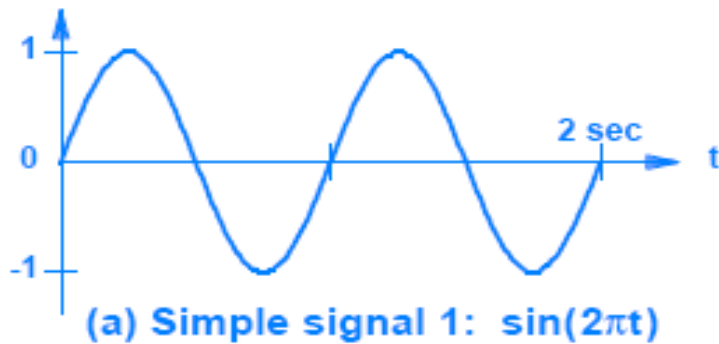


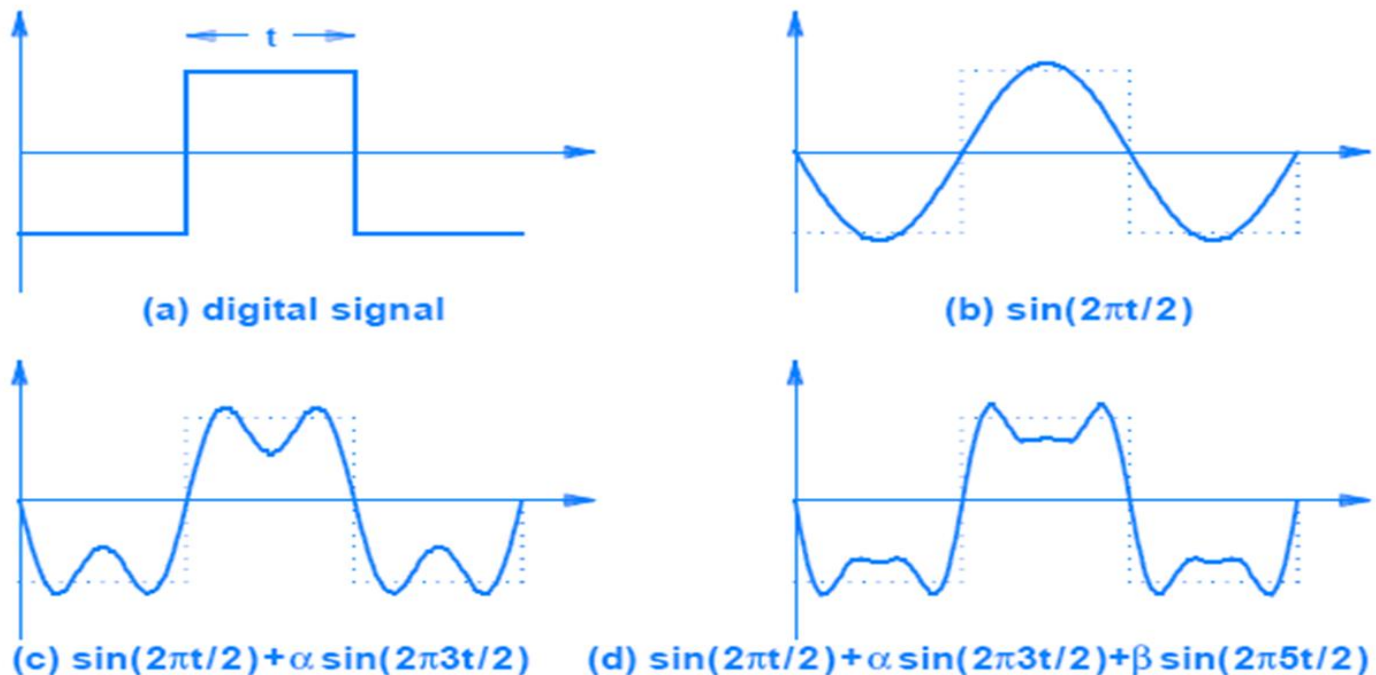
Figure 6.5 Illustration of a composite signal formed from two simple signals.

- 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.
  - Una **señal electromagnética** va a ser compuesta; además va a ser hecha de varias frecuencias.

# Señales compuestas

- **Descubrimiento de Fourier**

- Toda señal es hecha a partir de un conjunto de funciones sinusoidales (cada una con frecuencia, amplitud y fase).



**Figure 6.9** Approximation of a digital signal with sine waves.

# Señales compuestas

- Si una señal compuesta es periódica, entonces las partes constitutivas son también periódicas
  - La mayoría de los sistemas usan señales compuestas para transportar información.
  - Una señal compuesta es creada en uno de los extremos y el receptor descompone la señal en sus componentes simples.



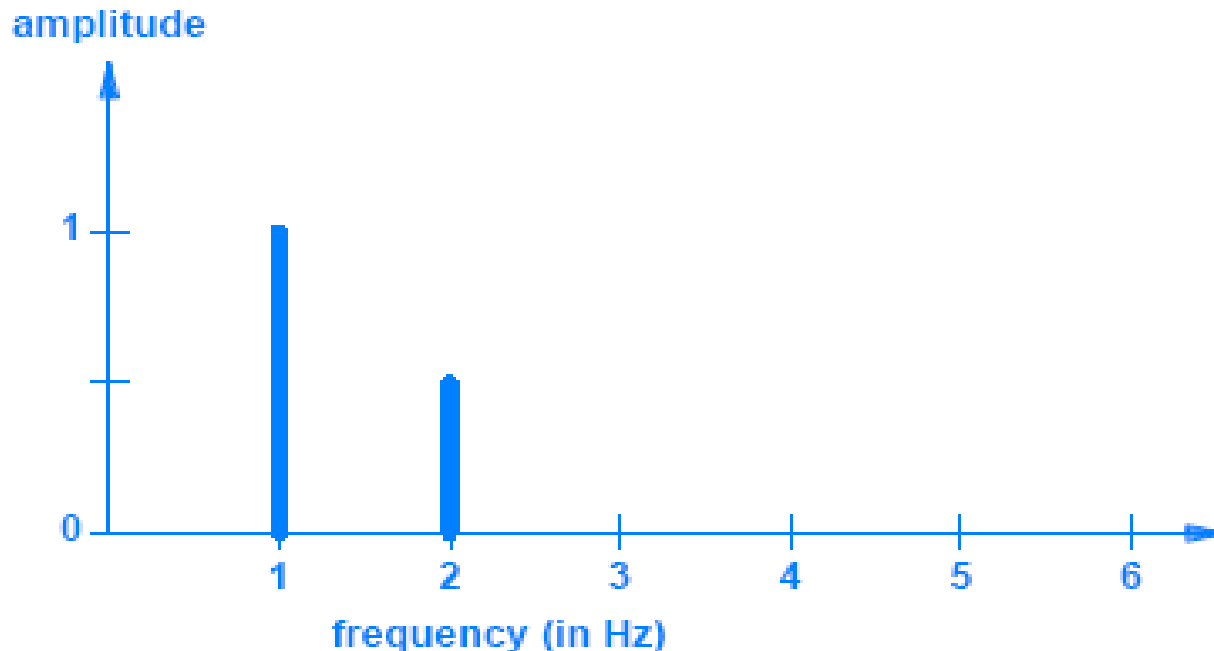
# Capa física

- **Aprenderemos:**
  - Clasificación de señales
  - Ondas sinusoidales
  - Señales compuestas
  - **Representación gráfica de señales**
  - Señales digitales
  - Baudios y bits por segundo
  - Tasa de datos máxima de un canal

# Representaciones gráficas de las señales

- Hay distintas maneras de representar gráficamente las señales.
- **Representación de dominio de tiempo (ya visto)**
  - Grafo de una señal como función del tiempo.
- **Representación de dominio de frecuencia.**
  - **Grafo de domino de frecuencia**
    - Muestra conjunto de ondas sinusoidales simples 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 de dominio de frecuencias



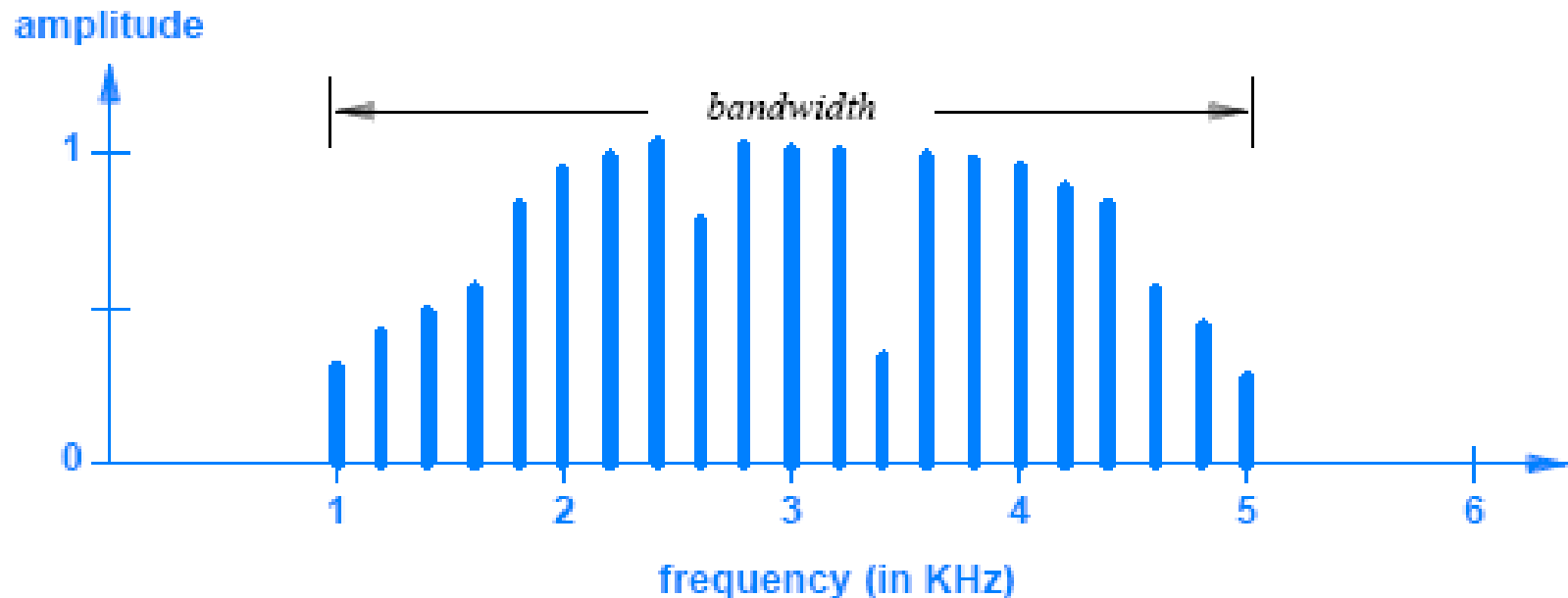
**Figure 6.6** Representation of  $\sin(2\pi t)$  and  $0.5\sin(2\pi 2t)$  in the frequency domain.

**Ejemplo:** El grafo de dominio de frecuencia de la Fig. 6.6 representa una composición de Fig. 6.5c

# Representación de dominio de frecuencias

- Ventajas de la representación de dominio de frecuencia: es muy compacta.
- El **espectro** de una señal = rango de frecuencias que contiene
  - Es el intervalo desde la frecuencia más chica a la frecuencia más grande.
- El **ancho de banda analógica** = ancho del espectro
  - Diferencia entre las frecuencias más alta y la más baja.

# Representación de dominio de frecuencias



**Figure 6.7** A frequency domain plot of an analog signal with a bandwidth of 4 KHz.

- **Ejemplo:** Fig. 6.7
  - Frecuencias en el rango audible por el oído humano.
  - El **ancho de banda** es  $5 \text{ KHz} - 1 \text{ KHz} = 4 \text{ KHz}$ .

# Capa física

- **Aprenderemos:**
  - Clasificación de señales
  - Ondas sinusoidales
  - Señales compuestas
  - Representación gráfica de señales
  - **Señales digitales**
  - Baudios y bits por segundo
  - Tasa de datos máxima de un canal

# Señales digitales

- Las señales digitales usan **voltajes** para representar **valores digitales**
  - Mecanismos de transmisión físicos usan dos o más niveles de voltaje para enviar señales digitales.
    - Cada nivel representa un número binario.
  - Usar  **$2^n$**  niveles para representar número de  **$n$**  bits.

# Señales digitales

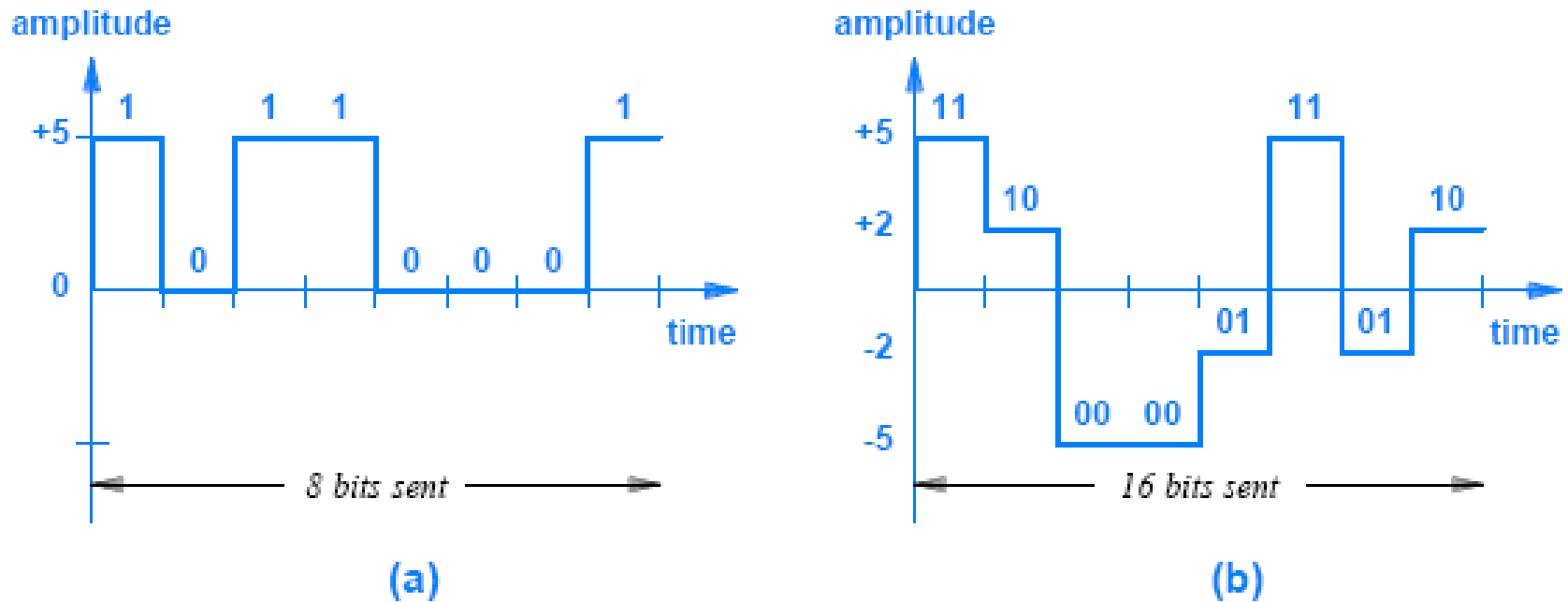


Figure 6.8 (a) A digital signal using two levels, and (b) a digital signal using four levels.

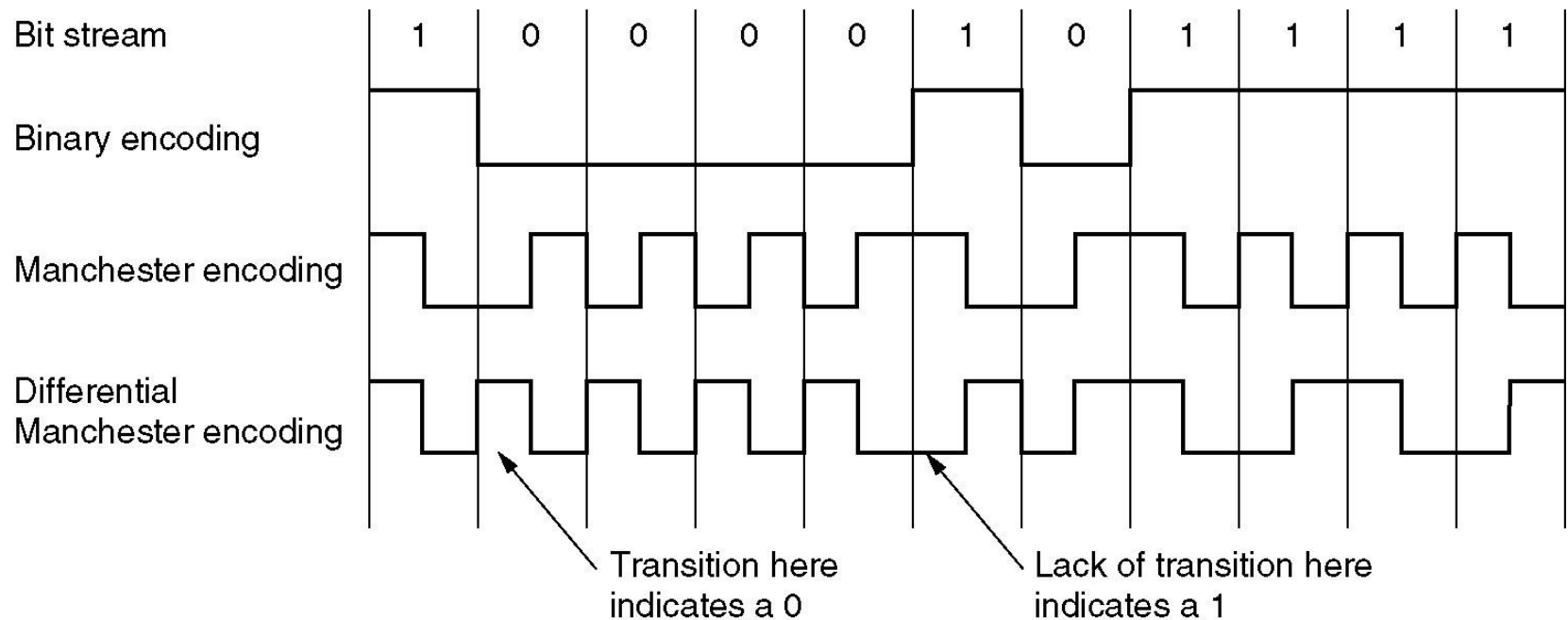
**Ejemplo:** (a) un voltaje positivo corresponde al **uno lógico** y un voltaje cero corresponde al **cero lógico**. (b) 4 niveles de voltaje: 5 V, -2 V, +2 V, +5 V.



# Codificación de Bits en Ethernet

- **Propósito:** Comprender **cómo se trabaja con señales digitales en Ethernet y en Fast Ethernet.**
- **Solución 1: Codificación Manchester**
  - ☐ Cada período de bit se divide en dos intervalos iguales.
  - ☐ Un bit 1 se envía teniendo un voltaje alto en el primer intervalo y bajo durante el segundo.
  - ☐ Un 0 binario es justo lo inverso: primero bajo y después alto.
- **Solución 2: Codificación Manchester Diferencial**
  - ☐ un bit 1 se indica mediante la ausencia de una transición al inicio del intervalo.
  - ☐ Un bit 0 se indica mediante la presencia de una transición al inicio del intervalo.
  - ☐ En ambos casos, también hay una transición a la mitad.
- **Evaluación:** El esquema diferencial requiere equipo más complejo, pero ofrece mejor inmunidad al ruido.

# Codificación Manchester



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

# Codificación de Bits en Ethernet

- Todos los sistemas Ethernet usan codificaciones Manchester.
  - ❑ La señal alta es de 0,85 voltios y la baja de  $-0,85$  voltios.
- **100BASE-FX (fast ethernet)**
  - ❑ 2 líneas de fibra óptica : una para recepción (RX) y la otra para transmitir (TX).
  - ❑ La distancia entre una estación y el conmutador es de hasta 2 km.
  - ❑ Los cables 100BaseFX deben conectarse a conmutadores.
    - Los concentradores no están permitidos con 100Base-FX

# Codificación de Bits en 100BASE-FX

- **100BASE-FX (cont):**

- ☐ La codificación es mediante el esquema 4B/5B NRZI.
- ☐ Cada 4 bits de datos son codificados en un símbolo con 5 bits de código, tal que cada bit de código contiene un simple elemento de señal. El bloque de código de 5 bits se llama **grupo de código**.
- ☐ Para asegurar sincronización cada bit de código del stream de 4B/5B es tratado como un valor binario y codificado así: un bit 1 se representa con una transición al comienzo del intervalo de bit y un 0 se representa con ninguna transición al comienzo del intervalo de bit.
- ☐ Cada grupo de 5 períodos de reloj da 32 combinaciones, Las 16 primeros se usan para transmitir números entre 0 y 15. Algunos de los 16 valores restantes se usan para control, como el marcado de límites de tramas.
- ☐ Una transición está presente al menos 2 veces para cada 5-code. No más de 3 ceros son permitidos en un 5-code.

**TABLE 13.8** 4B/5B code groups.

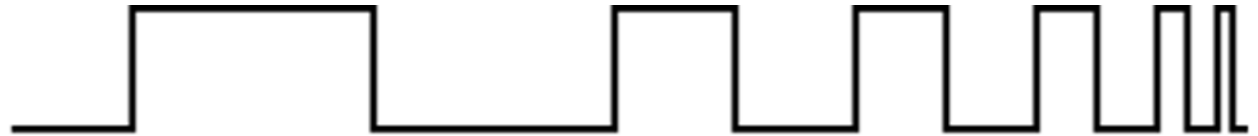
Data input (4 bits)	Code group (5 bits)	NRZI pattern	Interpretation
0000	11110		Data 0
0001	01001		Data 1
0010	10100		Data 2
0011	10101		Data 3
0100	01010		Data 4
0101	01011		Data 5
0110	01110		Data 6
0111	01111		Data 7
1000	10010		Data 8
1001	10011		Data 9
1010	10110		Data A
1011	10111		Data B
1100	11010		Data C
1101	11011		Data D
1110	11100		Data E
1111	11101		Data F
	11111		Idle
	11000		Start of stream delimiter, part 1
	10001		Start of stream delimiter, part 2
	01101		End of stream delimiter, part 1
	00111		End of stream delimiter, part 2
	00100		Transmit error
	other		Invalid codes

# Señales digitales vs señales analógicas

- Las señales digitales generalmente son más baratas que las señales analógicas y son menos susceptibles a interferencias de ruidos.
- Las señales digitales sufren más de **atenuación** (reducción de fuerza de la señal) que las señales analógicas.
  - A frecuencias mayores los pulsos se tornan más redondeados y pequeños.
  - Esta atenuación puede llevar rápidamente a la pérdida de información contenida en la señal.

# Atenuación de señales digitales

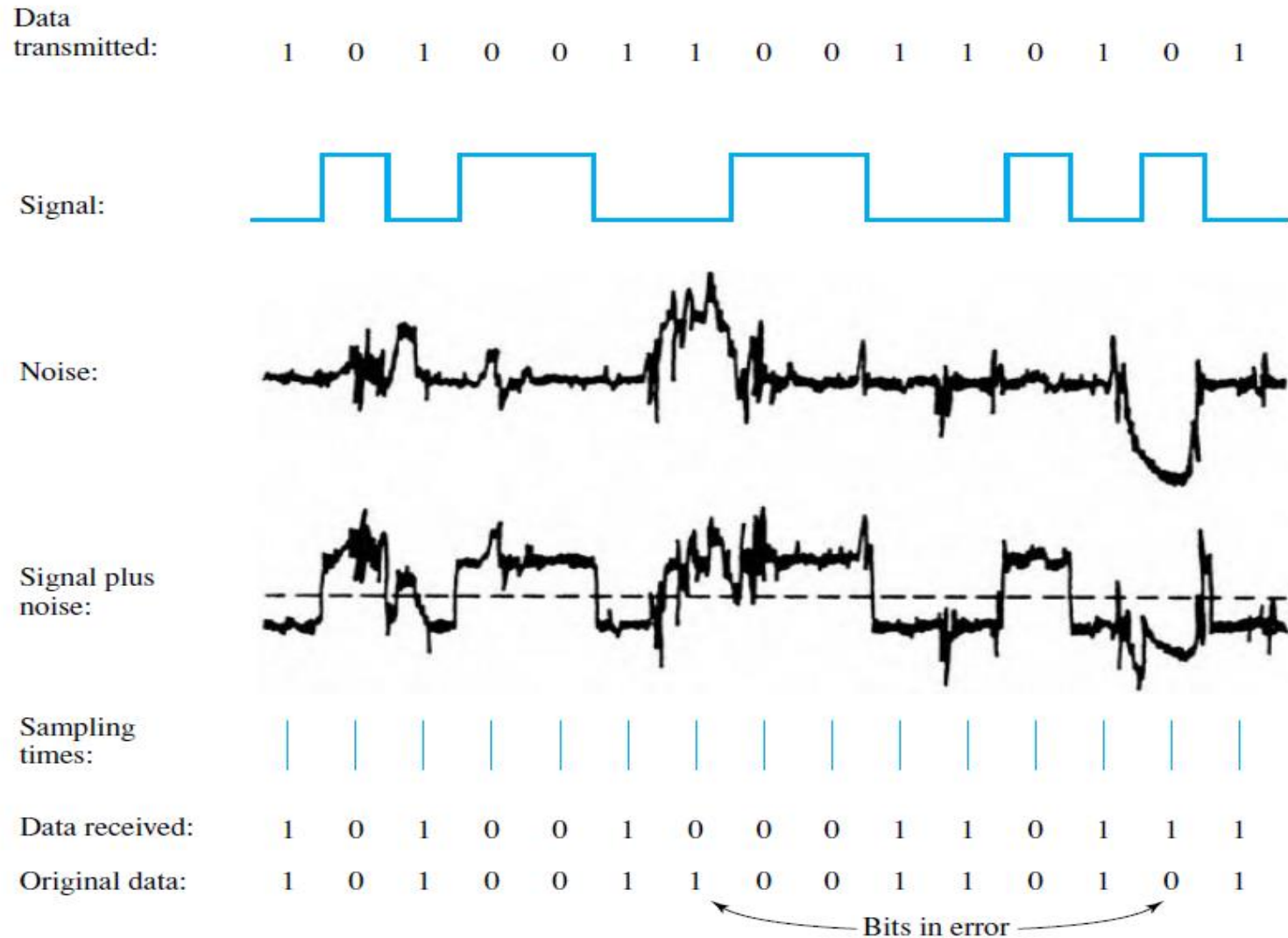
Voltage at  
transmitting end



Voltage at  
receiving end



# Ruido



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



# Capa física

- **Aprenderemos:**
  - Clasificación de señales
  - Ondas sinusoidales
  - Señales compuestas
  - Representación gráfica de señales
  - Señales digitales
  - **Baudios y bits por segundo**
  - Tasa de datos máxima de un canal

# Baudios y Bits por Segundo

- Ahora estudiamos cómo se determina la cantidad de bits por segundo de una señal digital.
- **La respuesta depende de los siguientes factores:**
  - Del número de niveles de señal
  - De la cantidad de tiempo que el sistema permanece en un nivel dado antes de moverse al siguiente.
- **Ejemplo:** (Fig. 6.8a) Se envía un bit durante cada uno de los 8 segmentos.

# Baudios y Bits por Segundo

- El hardware coloca **límites** en cuán corto el tiempo en un nivel debe ser.
  - Si la señal no permanece en un nivel por suficiente tiempo, el **hardware receptor (p.ej. tarjeta controladora)** va a fallar en detectarlo.
  - 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.
- baud y número de niveles de señal controlan la **tasa de bits**.

# Baudios y Bits por Segundo

- Si se tiene 2 niveles de señal y opera a 1000 baud
  - El sistema puede transferir exactamente 1000 bps.
- Si se tiene 1000 baud y 4 niveles de señal
  - El sistema puede transferir 2000 bps.
- Relación entre baudios, niveles de señal y tasa de bits.

$$\text{bits por segundo} = N^{\circ} \text{ baudios} \times \lfloor \log_2(\text{niveles}) \rfloor$$

# Capa física

- **Aprenderemos:**
  - Clasificación de señales
  - Ondas sinusoidales
  - Señales compuestas
  - Representación gráfica de señales
  - Señales digitales
  - Baudios y bits por segundo
  - **Tasa de datos máxima de un canal**

# La tasa de datos máxima de un canal

- En algunos casos se introduce un **filtro** en el circuito para *limitar la cantidad de ancho de banda disponible para cada cliente*.
  - **Ejemplo**: un cable de teléfono puede tener un ancho de banda de 1 MHz para distancias cortas, pero las compañías telefónicas agregan un filtro que restringe a cada cliente a aproximadamente 3100 Hz.

# La tasa de datos máxima de un canal

- Ahora estudiamos algunos métodos para **estimar la tasa de datos máxima de un canal**.
- **Situación:** tenemos un canal de comunicaciones y queremos saber cuál es la tasa máxima de datos que el canal permite.
- **Problema:** ¿cómo determinar la tasa de datos máxima de un canal?
- **Solución 1 (Teorema de Nyquist):** Nyquist probó que si se pasa una señal a través de un filtro pasa-bajas de ancho de banda  $H$ , la señal filtrada se puede reconstruir por completo tomando solo  $2H$  muestras por sec.
  - No tiene sentido muestrear la línea a una rapidez mayor porque las componentes de mayor frecuencia que tal muestreo puede recuperar se han filtrado.

# La tasa de datos máxima de un canal

- Si la señal consiste de  $V$  niveles de voltaje, el **teorema de Nyquist** (1924) establece:

$$\text{Tasa de datos máxima} = 2H \log_2 V \text{ bps}$$

- **Ejercicio:** un canal sin ruido de 3 kHz transmite señales binarias (i.e. de 2 niveles de voltaje) ¿cuál es la tasa de datos máxima?



# La tasa de datos máxima de un canal

- ¿Incrementando  $V$  podemos hacer la tasa tan grande como queramos?
- No porque el ruido térmico siempre está presente debido al movimiento de las moléculas del sistema.
- **Situación:** Va a existir un  $V$  máximo que permite enviar señales y para  $V$  mayores el ruido térmico va a dañar las señales.
- **Consecuencia:** en la fórmula anterior no sabemos cuáles son los valores de los  $V$  permitidos.
- **Problema:** ¿Cómo calcular la tasa de datos máxima de un canal teniendo en cuenta el ruido térmico y cómo calcular el  $V$  máximo permitido?
- **Solución:** usar el **método de Shanon**.
  - Antes de presentarlo vamos a introducir algunos conceptos

# La tasa de datos máxima de un canal

- La **cantidad de ruido térmico** se mide por la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido, llamada **relación señal a ruido**.
- Si indicamos la potencia de una señal con  $S$  y la potencia del ruido con una  $N$ , la **relación señal a ruido** es  $S/N$ .

# La tasa de datos máxima de un canal

- La relación misma no se expresa; en su lugar se da la cantidad  $10 \log_{10} S/N$ .
- Estas unidades se conocen como **decibels** (dB).
  - Para una relación  $S/N$  de 10 tenemos 10 dB, para una relación de 100 tenemos 20 dB, para una de 1000 tenemos 30 dB.

# La tasa de datos máxima de un canal

- **Resultado de Shannon** (1948): la tasa de datos máxima de un canal ruidoso cuyo ancho de banda es  $H$  Hz y cuya relación señal a ruido es  $S/N$ , está dada por:

$$N^{\circ} \text{ máximo de bps} = H \log_2 (1+S/N)$$

- La fórmula solo da un límite superior y los sistemas reales rara vez lo alcanzan.
- **Evaluación:**
  - $S/N$  es constante e independiente de la frecuencia.
    - Esto es poco realista.
  - En la vida real, el ruido es dependiente de la frecuencia:
    - $S/N$  es una función de la frecuencia.

# La tasa de datos máxima de un canal

- **Ejercicio:** ¿Cuál es la tasa de datos máxima de un canal de ancho de banda de 3000 Hz y con una relación señal a ruido térmico de 30 dB?

# La tasa de datos máxima de un canal

- ¿Cómo calcular los niveles distinguibles de voltaje que valen la pena?
  - Suponemos que conocemos la relación señal a ruido  $S/N$ .
  - La cantidad de niveles de voltaje permitidos depende de  $S/N$ .
- Igualando Nyquist y Shannon:
  - $H \log_2 (1+S/N) = 2H \log_2 V \implies$
  - $\log_2 (1+S/N) = 2 \log_2 V \implies$
  - $\log_2 (1+S/N) = \log_2 (V*V) \implies$
  - $(1+S/N) = V * V \implies$
  - $V = (1+S/N)^{(1/2)}$
  - **Ejemplo:** línea telefónica:  $V = (1+1001)^{(1/2)} \cong 31$

# Bibliografía Adicional

- Las filmillas de la 5 a la 21, 24 fueron sacadas del libro:
  - Comer. Computer Networks and Internets. Quinta edición (del 2008).