

Capítulo 7

La Capa Física: parte 1

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.

Señales digitales y analógicas

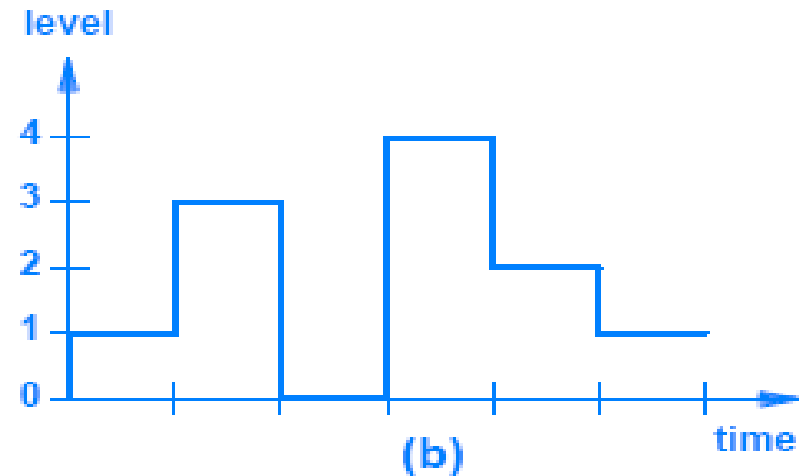
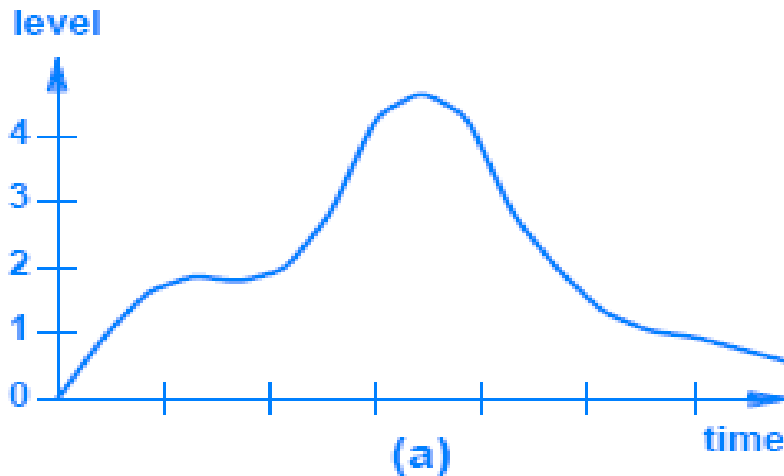


Figure 6.1 Illustration of (a) an analog signal, and (b) a digital signal.

- **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.

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

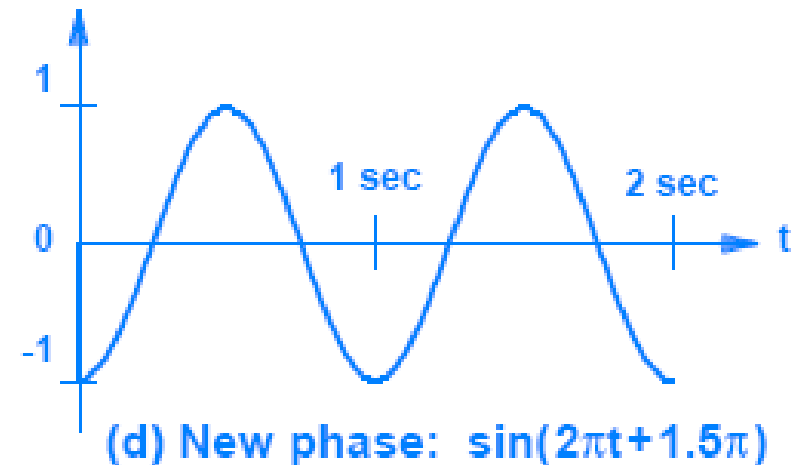
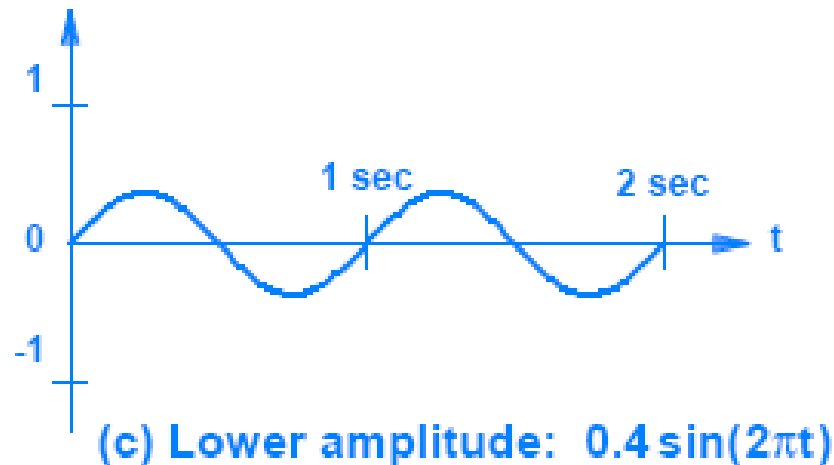
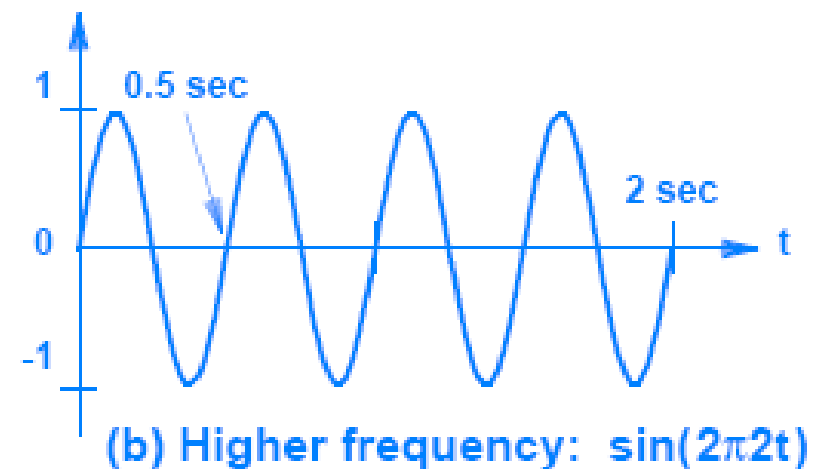
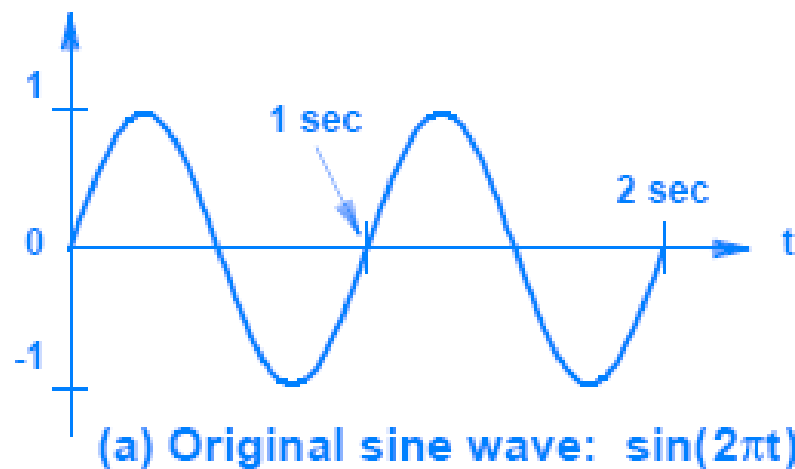


Figure 6.3 Illustration of frequency, amplitude, and phase characteristics.

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))

Señales compuestas

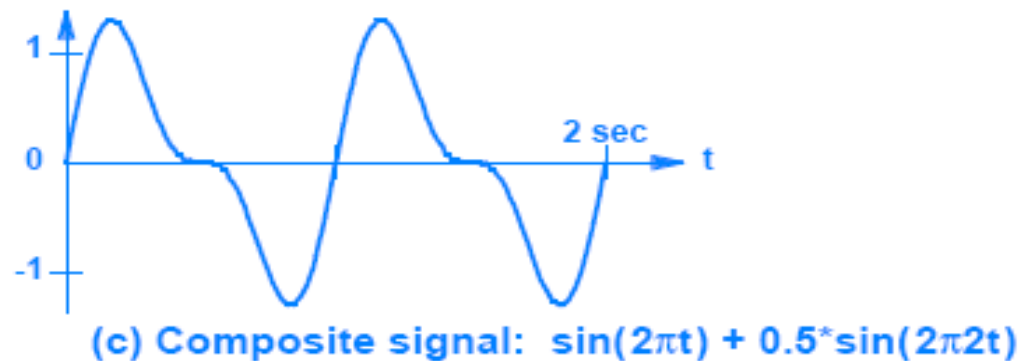
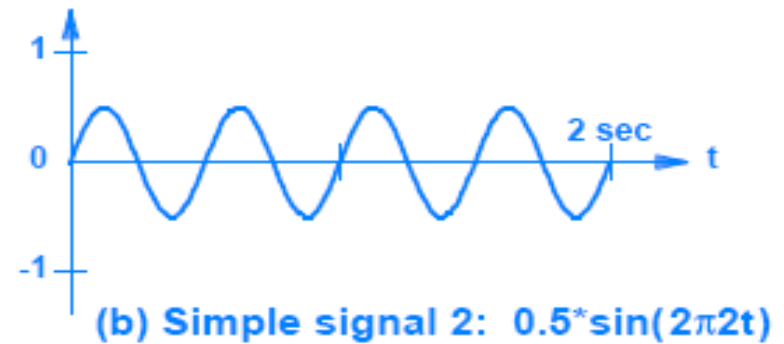
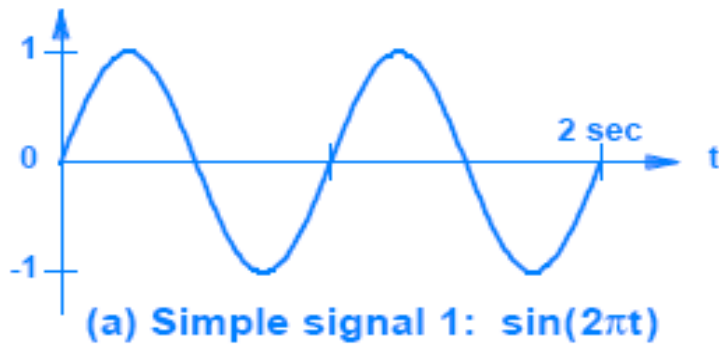


Figure 6.5 Illustration of a composite signal formed from two simple signals.

- 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).

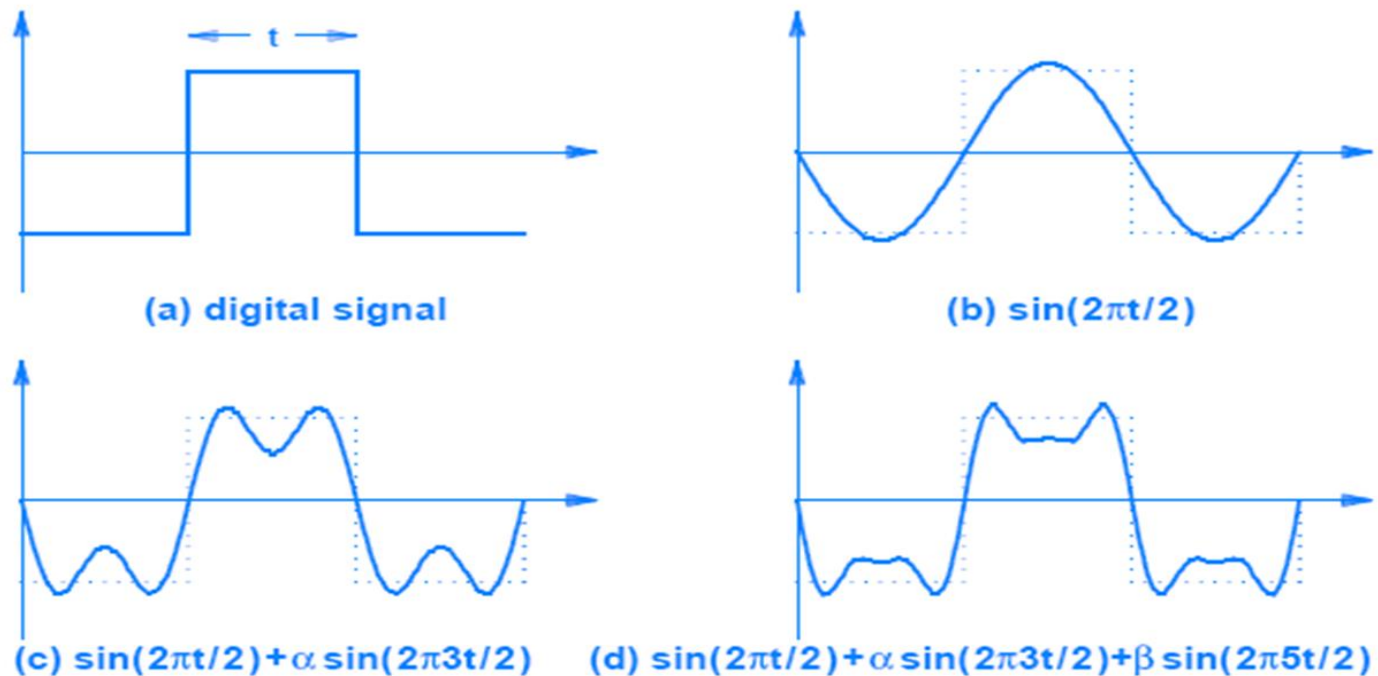


Figure 6.9 Approximation of a digital signal with sine waves.

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

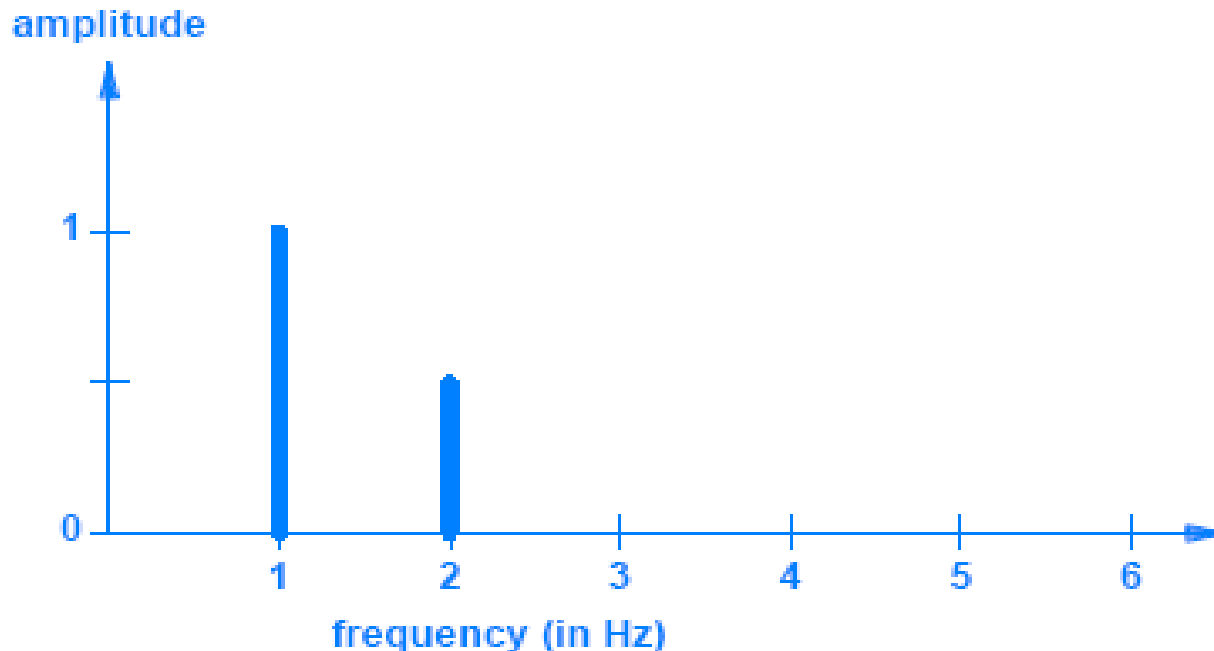


Figure 6.6 Representation of $\sin(2\pi t)$ and $0.5\sin(2\pi 2t)$ in the frequency domain.

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

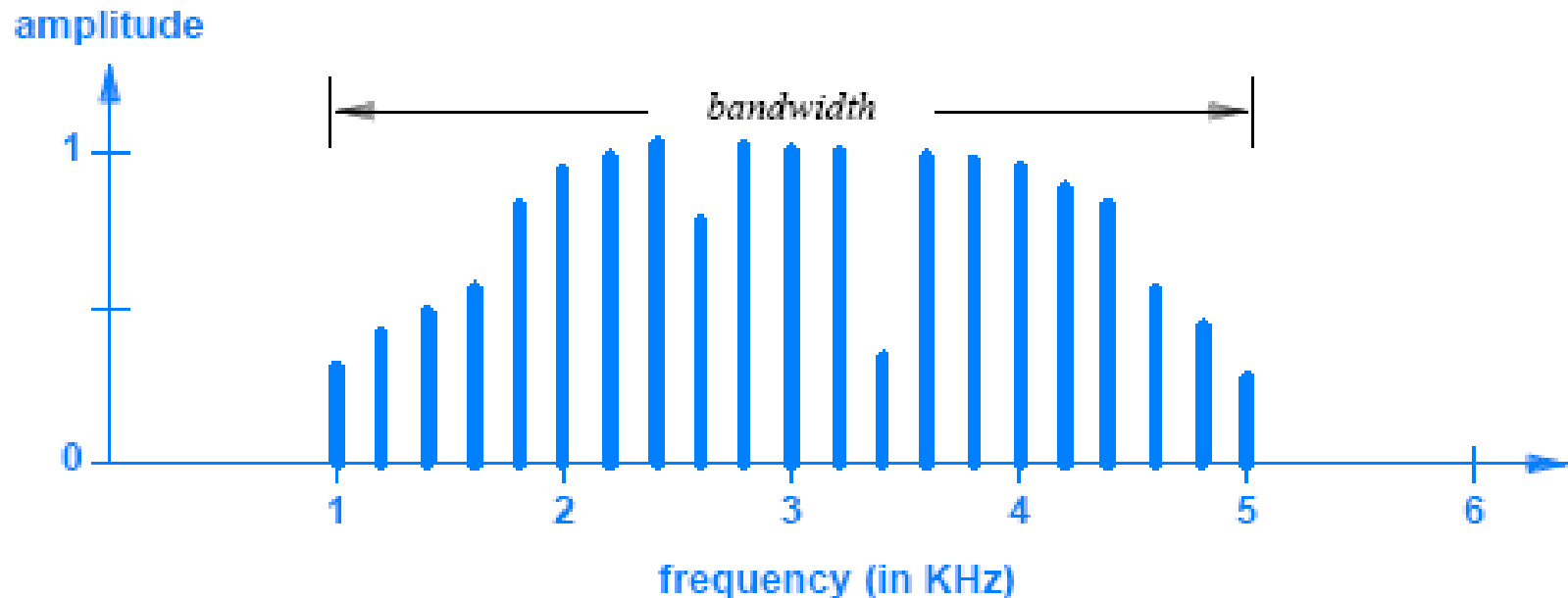


Figure 6.7 A frequency domain plot of an analog signal with a bandwidth of 4 KHz.

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

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

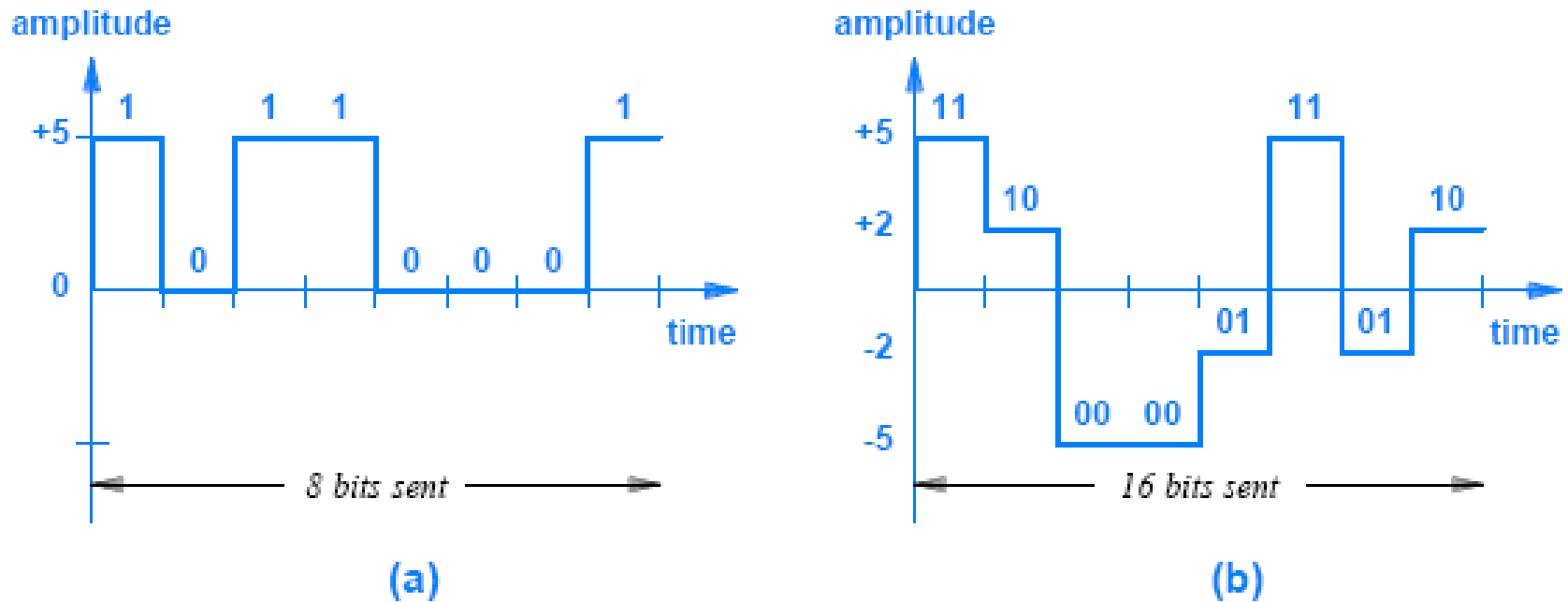


Figure 6.8 (a) A digital signal using two levels, and (b) a digital signal using four levels.

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.

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.

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

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 **decibeles** (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: $V = (1+1001)^{(1/2)} \cong 31$

Modems

- **Situación:** las computadoras trabajan con señales digitales y la red telefónica usa comunicación analógica.
- **Problema:** ¿Cómo hacer para mandar mensajes de una computadora por la red telefónica?
- **Solución:** usar un **Módem**
 - Un módem permite **convertir** señales digitales a analógicas y recíprocamente.
 - Todos los módems modernos transmiten tráfico en ambas direcciones al mismo tiempo (mediante el uso de frecuencias distintas para las diferentes direcciones).
- Ahora estudiamos qué es **modulación** y los **tipos de modulación** existentes.

Portadora, modulación

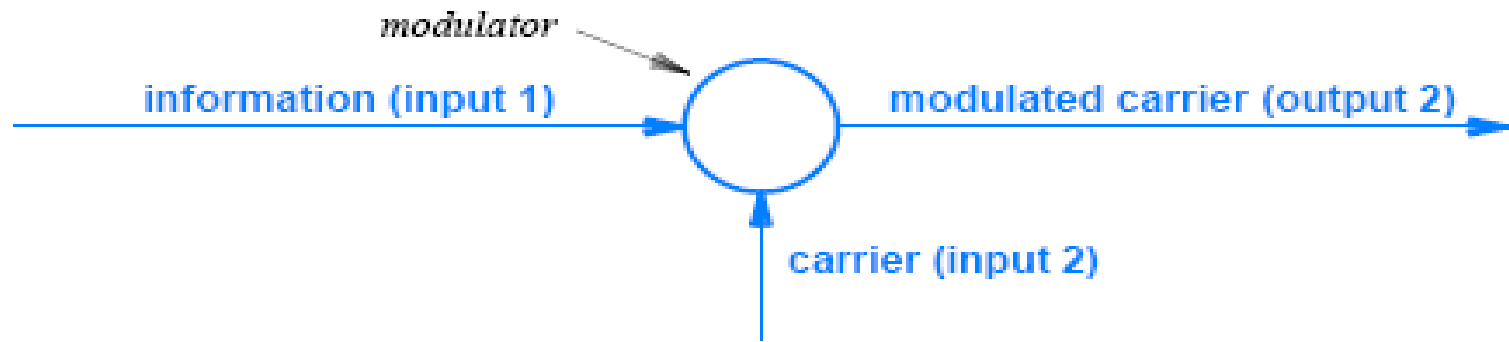


Figure 10.1 The concept of modulation with two inputs.

- Muchos sistemas de comunicación de larga distancia usan una **portadora (carrier)** de onda sinusoidal.
 - Los sistemas hacen pequeños cambios a la portadora para representar información siendo enviada.
- **Modulación.**
 - El emisor debe cambiar una de las características de la onda: amplitud, frecuencia, desplazamiento de fase.

Tipos de Modulación

- **Portadora de onda senoidal** = tono continuo en el rango de 1000 a 2000 Hz
- **Modulación de amplitud.**
 - se usan dos niveles diferentes de amplitud para representar 0 y 1
- **Modulación de frecuencia.**
 - Se usan dos o más tonos diferentes.
 - Si la señal es más fuerte, la frecuencia del carrier aumenta y si la señal es más débil, la frecuencia del carrier disminuye.
 - Es más difícil de visualizar.

Tipos de Modulación

- **Desplazamiento de fase (DF).**

- Es posible usar cambios en la fase para representar una señal.
- ¿Cómo se mide el DF?
- Por el ángulo de cambio.

- **Modulación de fase**

- **Ejemplo:** la onda portadora se desplaza de modo sistemático de 0 a 180 grados a intervalos espaciados de manera uniforme (a esto se le llama BPSK).
- **Ejemplo:** Otro esquema es usar desplazamiento de 45, 135, 225, o 315 grados para transmitir 2b de información por intervalo.
 - Al requerir el DF al final de cada intervalo, se facilita que el receptor reconozca los límites de los intervalos.

Detección de cambio de fase

- Un **receptor** puede medir la cantidad de portadora desplazada durante un DF.
 - Sistema que reconoce un conjunto de DF y usa cada DF para representar valores de datos específicos.
- Usualmente los sistemas están diseñados para usar 2^n DF, así un emisor puede usar bits de datos para elegir entre los DF.

Tipos de Modulación

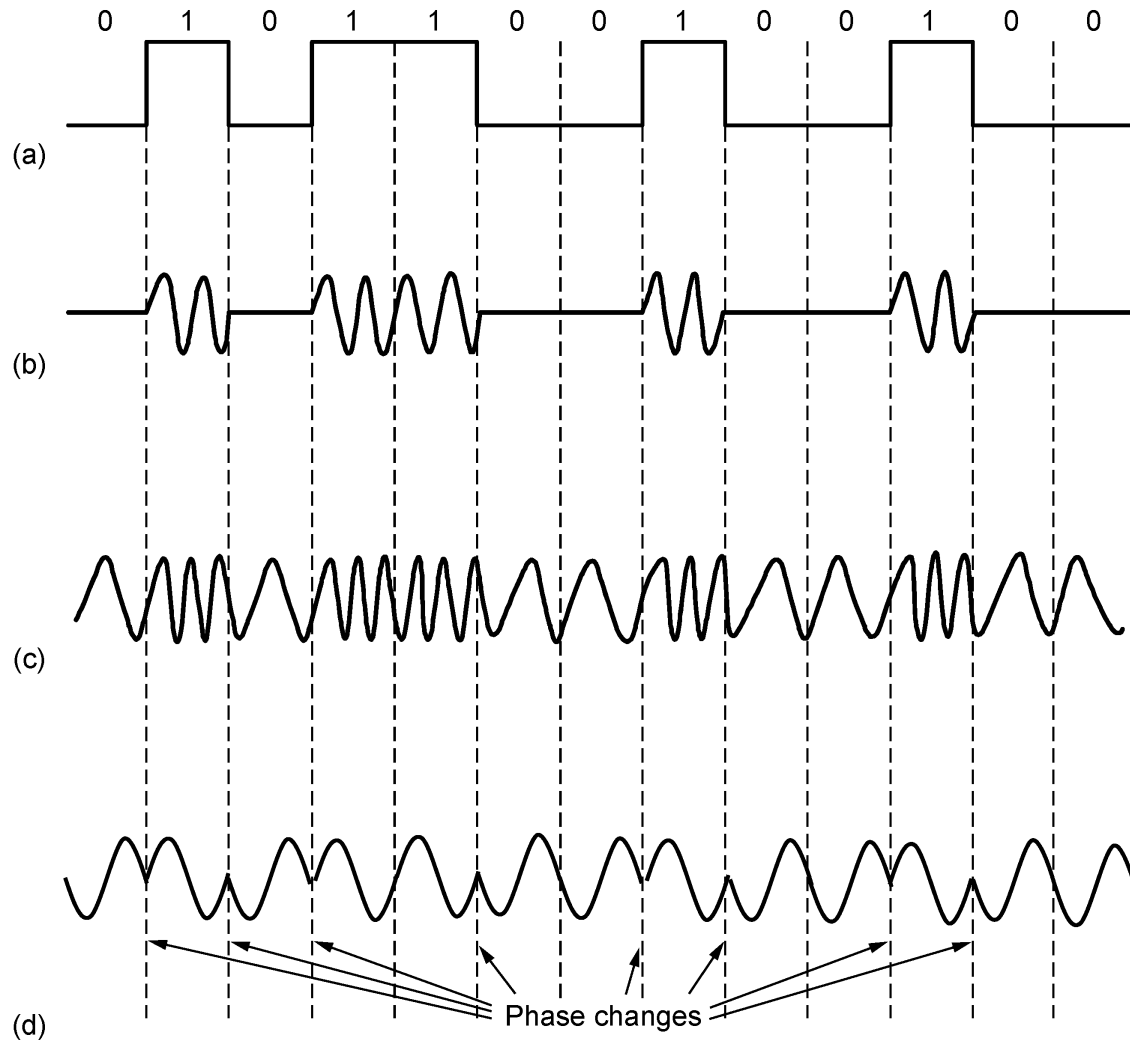


Fig. 24

(a) A binary signal

(b) Amplitude modulation

(c) Frequency modulation

(d) Phase modulation

Diagramas de constelación

- **Situación:** Los módems avanzados usan una combinación de técnicas de modulación para transmitir muchos bits por baudio.
 - Con frecuencia se combinan múltiples amplitudes y varios DF.
 - O sea, se tiene un conjunto de amplitudes CA y un conjunto de desplazamientos de fase CDF.
 - Cada combinación es un par:
$$(\text{amplitud, desplazamiento de fase}) \in CA \times CDF$$
 - Si hay 2^n combinaciones, entonces cada combinación representa un número binario de n bits.
- **Problema:** ¿cómo se pueden **representar gráficamente** las combinaciones de modulación usadas por un modem?

Diagramas de constelación

- **Solución:** usar **Diagramas de constelación**.
 - Distancia del origen refleja amplitud
 - Ángulo refleja DF
 - Cada estándar de módem tiene su propio diagrama de constelación y se puede comunicar solamente con otros módems que utilicen el mismo modelo.
 - La mayoría de los módems puede emular a todos los modelos más lentos.

Diagramas de constelación

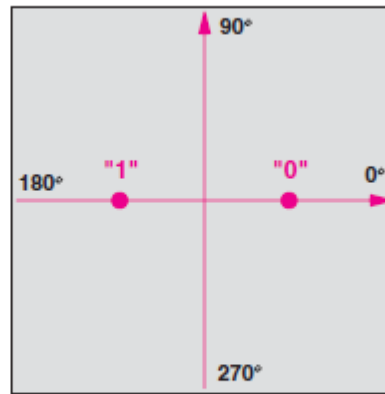


Figure 10.6 A constellation diagram that shows logical 0 as a 0° phase shift and logical 1 as a 180° phase shift.

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

Diagramas de constelación

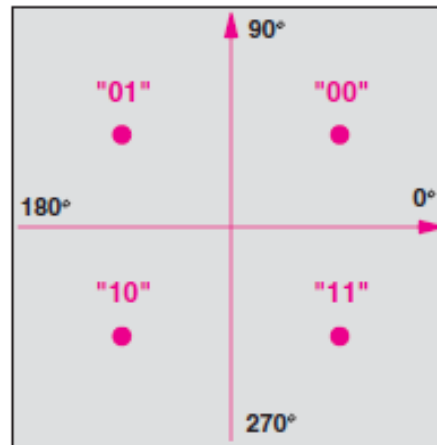
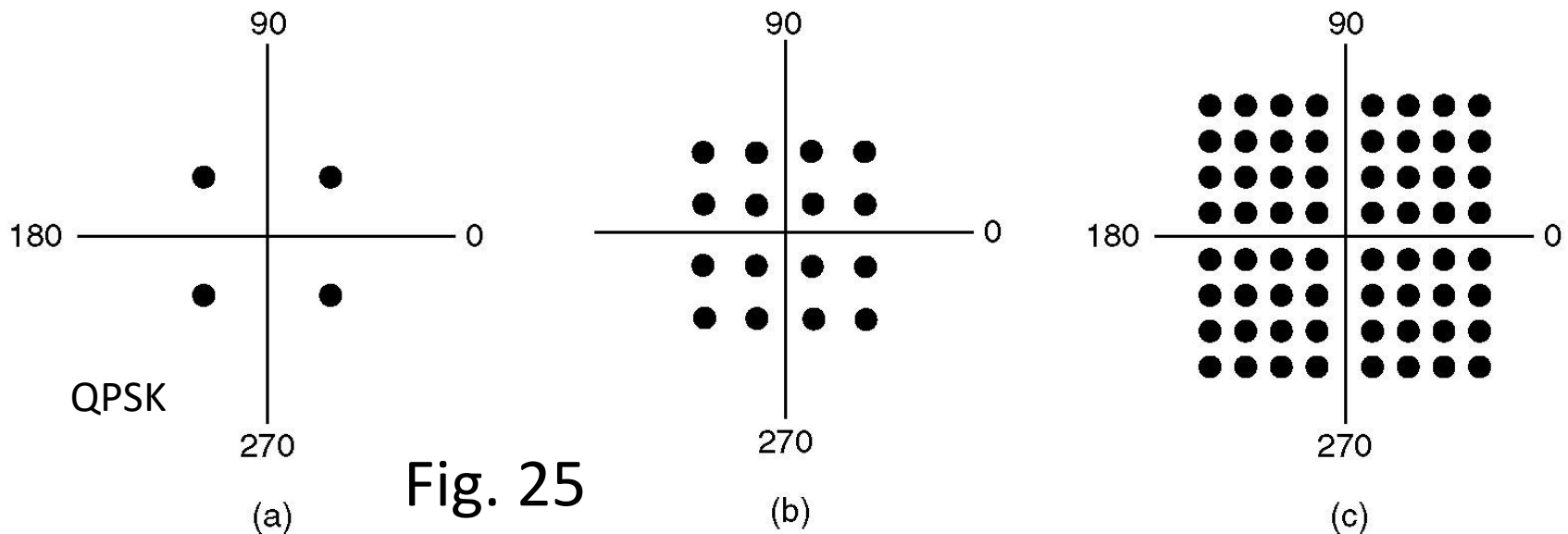


Figure 10.7 A constellation diagram for a system that uses four possible phase shifts that each represent two data bits.

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



- Fig. 25 b) esquema **QAM-16**: permiten un total de 16 combinaciones diferentes.
 - Se puede usar para enviar 4 bits por símbolo.
 - QAM-16 se puede usar para transmitir 9600 bps sobre una línea de 2400 baudios.
- Fig. 25 c) esquema **QAM-64**: se pueden conseguir 64 combinaciones diferentes, por lo cual es posible transmitir 6 bits por símbolo.

Diagramas de constelación

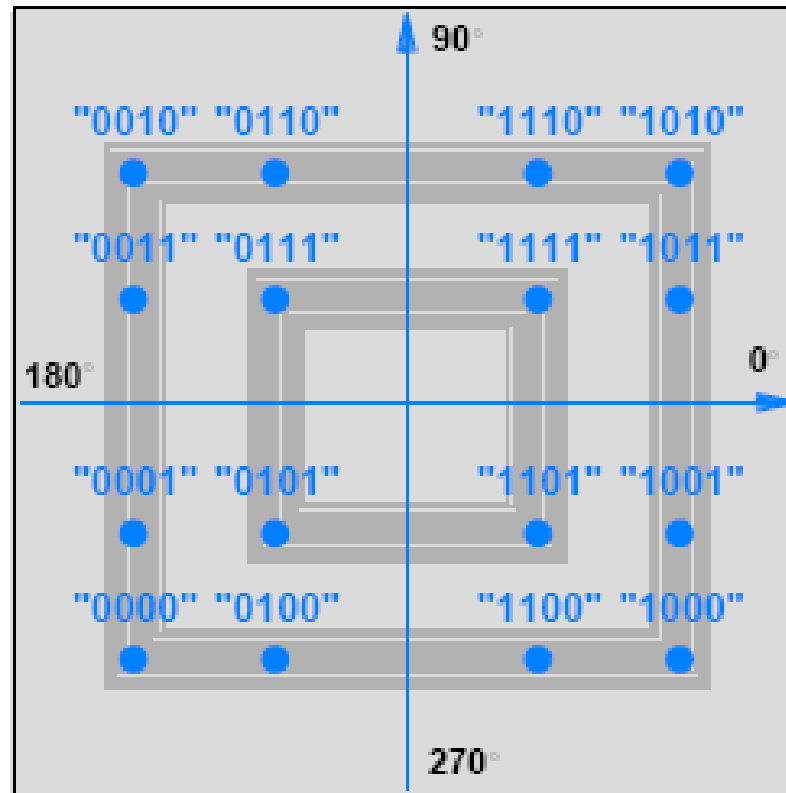


Figure 10.8 A constellation diagram for 16QAM in which distance from the origin reflects amplitude.

Multiplexado

- **Situación:** Desde el punto de vista económico, es mucho más conveniente usar un solo cable para transportar varias señales que instalar un cable para cada señal.
- **Requisito:** Queremos que los canales de comunicación puedan ser compartidos por múltiples señales.
- **Problema:** ¿Cómo hacer para poner muchas señales en un mismo canal?
- **Solución:** Usar **multiplexores** y **demultiplexores**.

Multiplexado

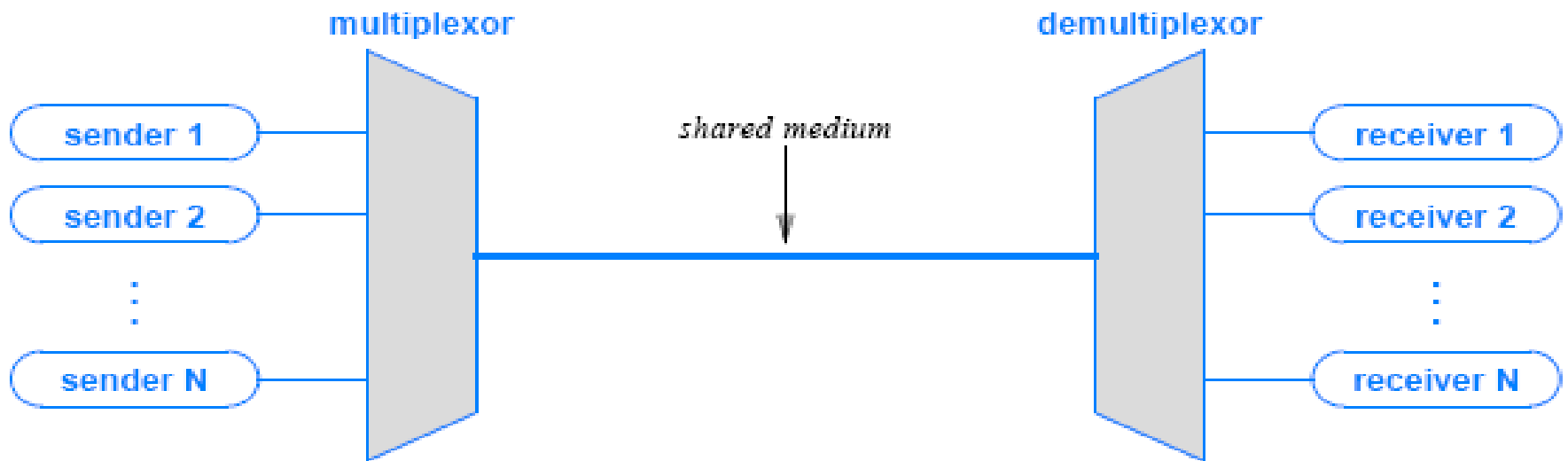


Figure 11.1 The concept of multiplexing in which independent pairs of senders and receivers share a transmission medium.

Multiplexado: Un canal transporta varias señales.

Multiplexor: mecanismo que implementa el concepto anterior.

Demultiplexado: separar la combinación de señales en las señales constitutivas.

Demultiplexor: mecanismo que implementa el concepto anterior.

Multiplexado

- Estos esquemas de multiplexado se pueden dividir en: **FDM** (multiplexado por división de frecuencia), **TDM** (multiplexado por división de tiempo) y **CDM** (multiplexado por división de código).
- **Situación:** Tenemos varios circuitos analógicos, cada uno con su señal analógica.
 - Queremos colocar todas esas señales analógicas en un mismo canal.
- **Problema:** ¿Cómo hacer para multiplexar y demultiplexar un conjunto de señales analógicas?

Multiplexado por división de frecuencia

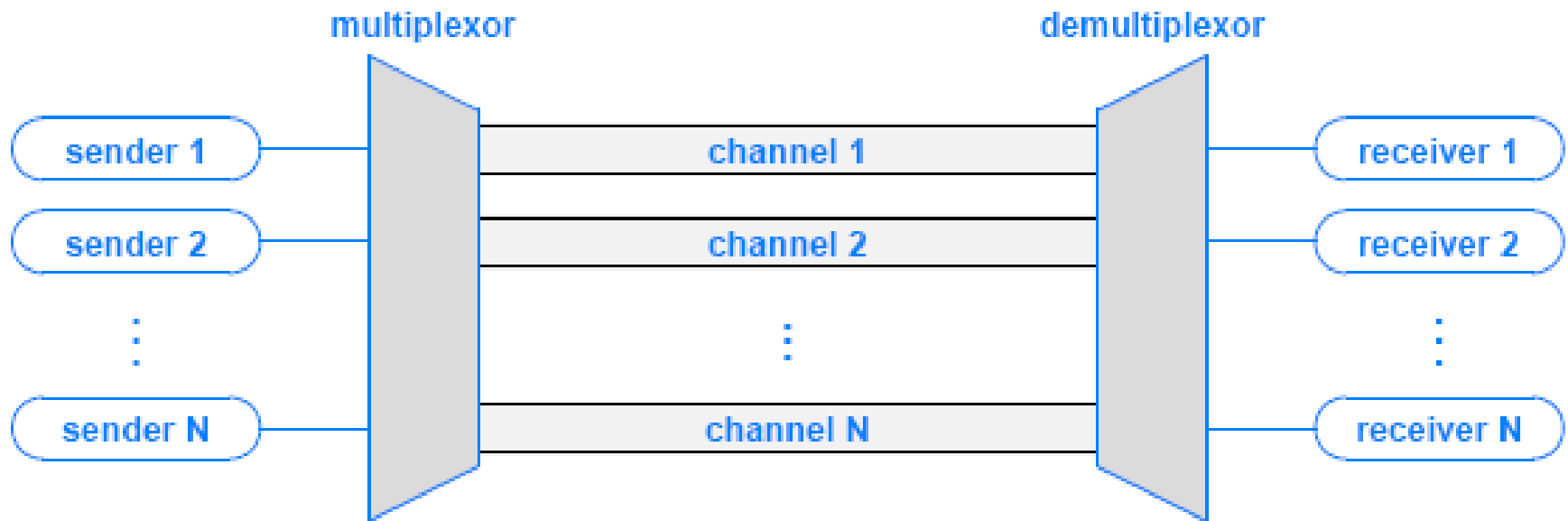


Figure 11.3 The conceptual view of Frequency Division Multiplexing (FDM) as providing a set of independent channels.

Solución: usar **multiplexado por división de frecuencia (FDM)**.

- En FDM el espectro de frecuencias se divide en bandas de frecuencia y cada usuario posee exclusivamente alguna banda.

Multiplexado por división de frecuencia

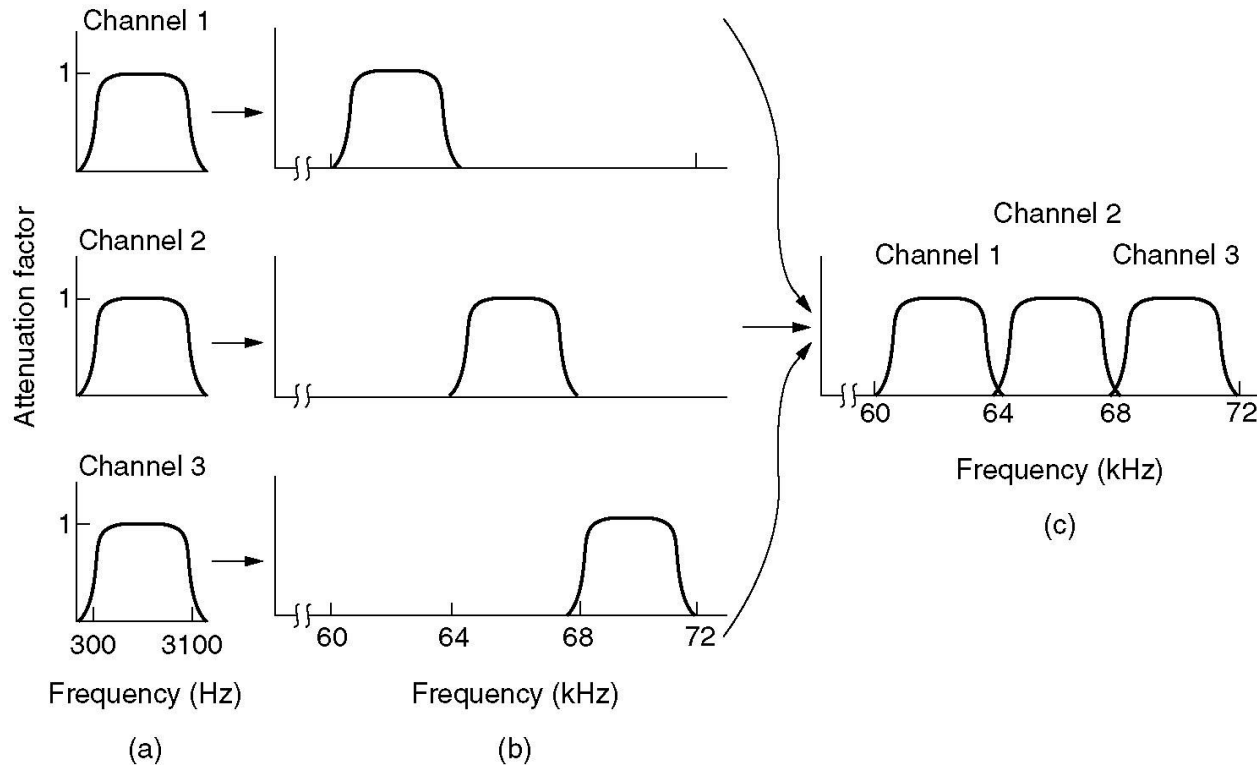


Fig. 31

- (a) Los anchos de banda originales.
- (b) Los anchos de banda aumentados en frecuencias.
- (c) El canal multiplexado.

- **Funcionamiento de un multiplexor en FDM:**

- Primero se eleva la frecuencia de los canales de voz, cada uno en una cantidad diferente,
- después de lo cual se pueden combinar, porque en ese momento no hay dos canales que ocupen la misma porción del espectro.

- Fig. 31 muestra cómo usar FDM para multiplexar 3 canales telefónicos de calidad de VOZ.

Multiplexado por división de frecuencia

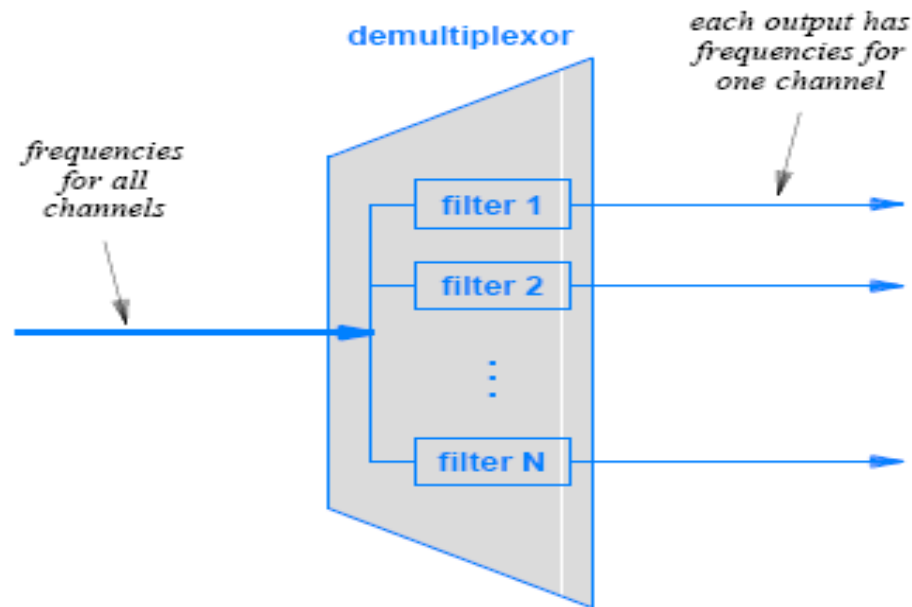


Figure 11.2 Illustration of the basic FDM demultiplexing where a set of filters each selects the frequencies for one channel and suppresses other frequencies.

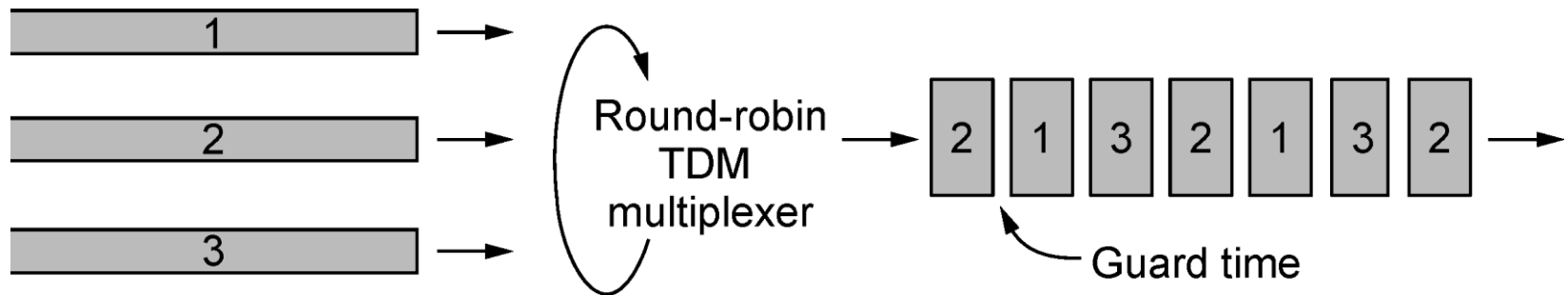
Funcionamiento de un demultiplexor: se usan **filtros** para recuperar las señales originales.

Ejemplo: En el caso de canales telefónicos los filtros limitan el ancho de banda utilizable a cerca de 3000 Hz por canal de calidad de voz. Se asigna 4000 Hz a cada canal para mantenerlos bien separados.

Multiplexión por división de frecuencia

- **Utilidad de FDM:**
 - FDM aun se usa sobre cables o canales de microondas, requiere circuitos analógicos.
- **Situación:** Tenemos un conjunto de señales digitales y queremos enviar todas esas señales por un mismo canal.
- **Problema:** ¿Cómo hacer para multiplexar y demultiplexar un conjunto de señales digitales?

Multiplexado por división de tiempo (TDM)



Solución: usar **multiplexado por división de tiempo (TDM)**

- En **TDM** los usuarios esperan su turno (en round-robin), y cada uno obtiene en forma periódica toda la banda durante un breve lapso de tiempo.
- Los bits de cada una de las señales de entrada son tomados en una **ranura fija de tiempo** y enviados a la señal agregada de salida.

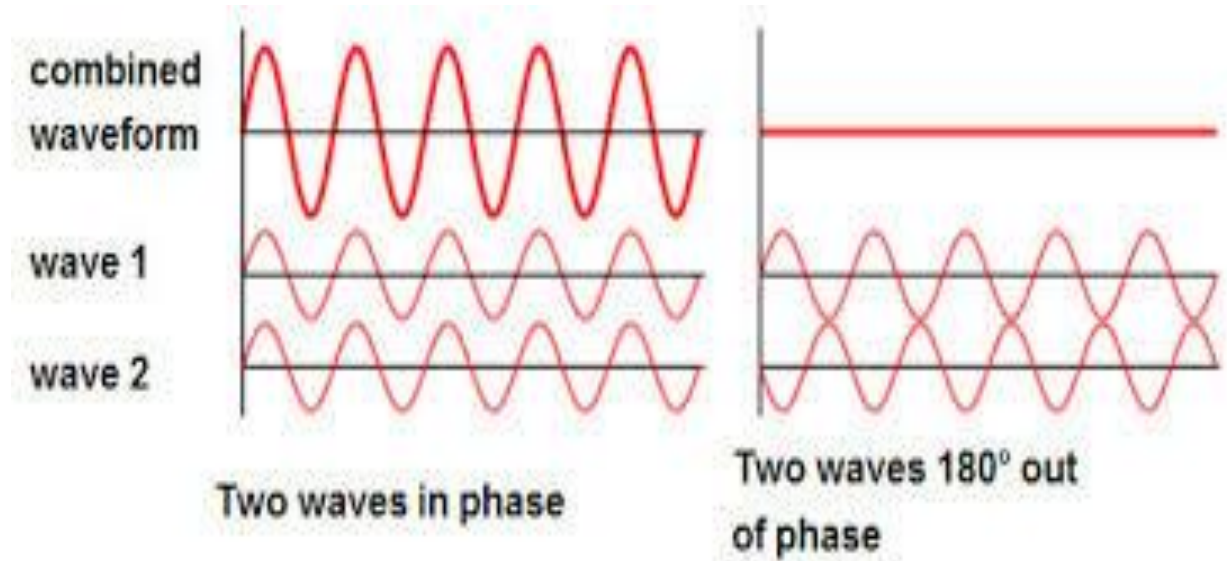
Multiplexado por división de tiempo

- TDM puede manejarse por completo mediante dispositivos digitales y por ello es popular.
- **Aplicación de TDM:**
 - TDM es ampliamente usado como parte de las redes de teléfonos y redes 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

- **Situación:** Tenemos varios circuitos analógicos, cada uno con su señal analógica.
 - Queremos colocar todas esas señales analógicas en un mismo canal.
- **Problema:** ¿Cómo hacer para multiplexar y demultiplexar un conjunto de señales analógicas?
- **Solución:** **CDM (Multiplexado por división de código):** permite varias señales de diferentes usuarios compartir la misma banda de frecuencias.
 - Varios usuarios pueden coexistir y transmitir simultáneamente con interferencia mínima.
 - A CDM a menudo se lo llama **CDMA (Code Division Multiple Access)**.

Multiplexado por división de código

- En CDMA las tramas que colisionan no son distorsionadas; en cambio, *se agregan múltiples señales en forma lineal*.
 - Esto es debido al **principio de superposición de ondas**.
- En CDMA cada tiempo de bit se subdivide en m intervalos cortos llamados **chips**.
 - Hay 64 o 128 chips por bit.
- A cada estación se le asigna un código único de m bits llamado **secuencia de chips**.
 - **Ejemplo:** la estación A tiene secuencia de chips 00011011.

Multiplexado por división de código

- **Notación bipolar:** el 0 binario es -1 y el 1 binario es +1.
- Usamos la notación bipolar para la secuencia de chips y mostraremos la secuencia de chips entre paréntesis.
- **Ejemplo:** A tiene la secuencia: 00011011:
 - Usando la notación bipolar se obtiene: (-1-1-1+1+1-1+1+1).

Multiplexado por división de código

- **Transmisión en un tiempo de bit**
 - una estación puede transmitir un 1 enviando su secuencia de chips en bipolar,
 - puede transmitir un 0 enviando su negativo de su secuencia de chips (i.e. se cambia el signo de cada componente de su secuencia de chips en bipolar), o
 - puede quedarse en silencio y no transmitir nada.
- **Ejemplo:** $m = 8$, estación A con secuencia de chips 00011011,
 - envía un bit 1 mediante el envío de $(-1-1-1+1+1-1+1+1)$ y
 - envía un bit 0 mediante el envío de $(+1+1+1-1-1+1-1-1)$.
- **Requisito:** todas las estaciones están **sincronizadas** (i.e. todas las secuencias de chips comienzan al mismo tiempo).

Multiplexado por División de Código

- (a) Secuencias de chips binarias para 4 estaciones
(b) Secuencias de chip bipolares

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)

- (c) Seis ejemplos de transmisiones

Six examples:

-- 1 --	C	$S_1 = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$
- 1 1 -	B + C	$S_2 = (-2 \ 0 \ 0 \ 0 +2 +2 \ 0 -2)$
1 0 --	A + B	$S_3 = (\ 0 \ 0 -2 +2 \ 0 -2 \ 0 +2)$
1 0 1 -	A + B + C	$S_4 = (-1 +1 -3 +3 +1 -1 -1 +1)$
1 1 1 1	A + B + C + D	$S_5 = (-4 \ 0 -2 \ 0 +2 \ 0 +2 -2)$
1 1 0 1	A + B + C + D	$S_6 = (-2 -2 \ 0 -2 \ 0 -2 +4 \ 0)$

(c)

- (d) Recuperación de la señal de la estación C

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

(d)

- Cuando dos o más estaciones transmiten de manera simultánea, sus señales bipolares se agregan linealmente (ver (c)) debido al **principio de superposición de ondas**.
- **Ejemplo:** si en un período de chips tres estaciones envían +1 y una estación envía -1, el resultado es +2.

Multiplexado por división de código

- **Notación:** El símbolo **S** significa el vector de m chips para la estación S (en notación bipolar) y **S** para su negación (cambiar de signo cada componente de **S**).
- Dos secuencias de chip S y T son **ortogonales** si y solo si cumplen:

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

- O sea, el producto interno normalizado de S y T es 0.
- **Problema:** ¿Cómo hacer para que un receptor pueda recuperar la señal enviada por una estación de manera sencilla?
- **Solución:** Todas las secuencias de chips deben ser **ortogonales dos a dos**.

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

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

(c)

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

(d)

(a) Secuencias de chips binarias para 4 estaciones

(b) Secuencias de chip bipolares

(c) Seis ejemplos de transmisiones

(d) Recuperación de la señal de la estación C

Ejemplo: En la cuarta transmisión el receptor ve la suma: **A + \bar{B} + C** y calcula:

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

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.
- Si la secuencia de chips recibida es **S** y el receptor está tratando de escuchar una estación cuya secuencia de chips es **C**, simplemente calcula **S • C**.

Multiplexado por división de código

- Las secuencias ortogonales de chips para las estaciones se pueden generar utilizando un método conocido como **código de Walsh**.
- **Algunas propiedades:**
 - Si $\mathbf{S} \bullet \mathbf{T} = 0$, entonces $\mathbf{S} \bullet \underline{\mathbf{T}} = 0$.
 - El producto normalizado de cualquier secuencia de chips por si mismo es 1.
$$\mathbf{S} \bullet \mathbf{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1$$
 - Además $\mathbf{S} \bullet \underline{\mathbf{S}} = -1$.

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

- Idealmente, en un sistema CDMA sin ruido, el número de estaciones que envían concurrentemente puede ser hecho arbitrariamente grande usando secuencias de chip más largas.
 - Para 2^n estaciones, códigos de Walsh pueden proveer 2^n secuencias de chip ortogonales de longitud 2^n .
- **Aplicación de CDM:**
 - Además de en las redes de celulares, CDMA es usado por redes satelitales y de cable.

Bibliografía Adicional

- Las filminas de la 4 a la 20, 30, 37, 38, 40, 42, 44 y 46 fueron sacadas del libro:
 - Comer. Computer Networks and Internets. Quinta edición (del 2008).