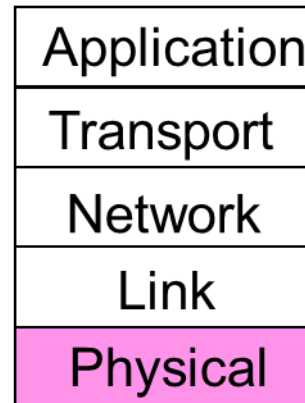


# Capítulo 7

## La Capa Física

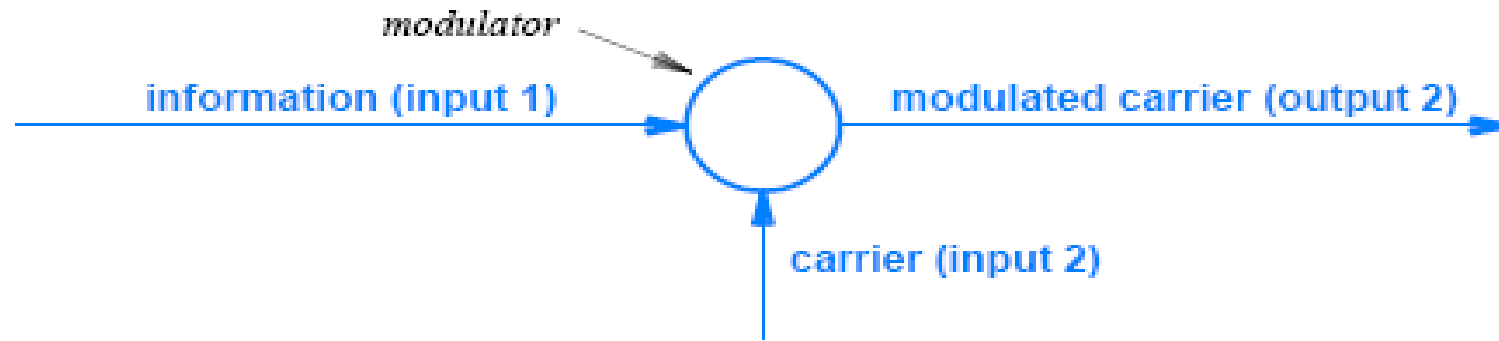
### Modulación y multiplexado



# Modems

- **Situación:** las computadoras trabajan con señales digitales y las redes telefónica, de cable y de fibra óptica usa comunicación analógica.
- **Problema:** ¿Cómo hacer para mandar mensajes de una computadora por una red que usa comunicación analógica?
- **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.

## Funcionamiento de un modulador:

- Se recibe onda de información de input con la señal original que contiene información.
- Se genera una **portadora (carrier)** de onda sinusoidal de alta frecuencia.
  - Se hacen pequeños cambios a la portadora para representar información siendo enviada.
- **Modulación.**
  - El modulador debe cambiar una o más de las características de la onda: amplitud, frecuencia, desplazamiento de fase en función de la señal de entrada (onda de información de input).
  - La señal modulada es enviada al transmisor para su amplificación y transmisión por el medio físico.

# 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.
  - Otra idea es usar  $2^n$  niveles de amplitud para representar símbolos de  $n$  bits. La señal digital se la puede ver como una lista de símbolos de  $n$  bits.
- **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

- **Ejercicio:** representar modulación de amplitud, frecuencia y fase para el mensaje: 0101100100100. Asumir dos niveles de voltaje.
- La Filmina siguiente contiene una solución a este problema. Hay más de una solución.

# Tipos de Modulación

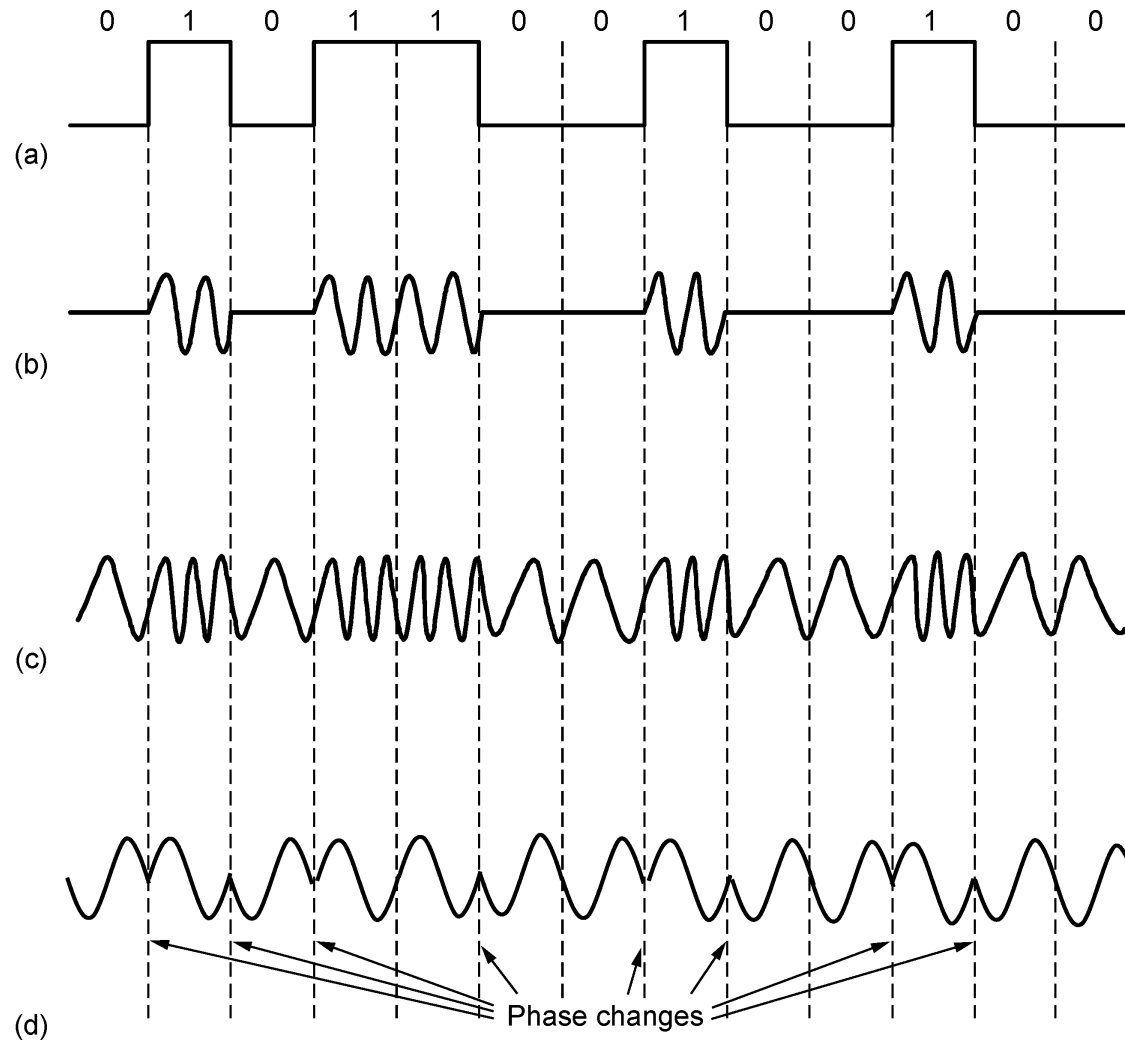


Fig. 24

(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:  
$$(\text{amplitud, desplazamiento de fase}) \in CA \times CDF$$
  - Veremos que las combinaciones pueden ser un subconjunto de  $CA \times CDF$ .
  - Si hay  $2^n$  combinaciones usadas, 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.
  - Las siguientes 4 filminas poseen ejemplos de diagramas de constelación.

# Diagramas de constelación

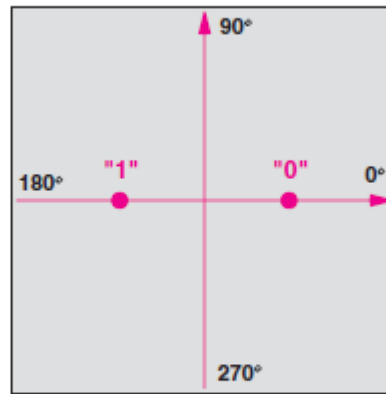


Figure 10.6 A constellation diagram that shows logical 0 as a  $0^\circ$  phase shift and logical 1 as a  $180^\circ$  phase shift.

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

# Diagramas de constelación

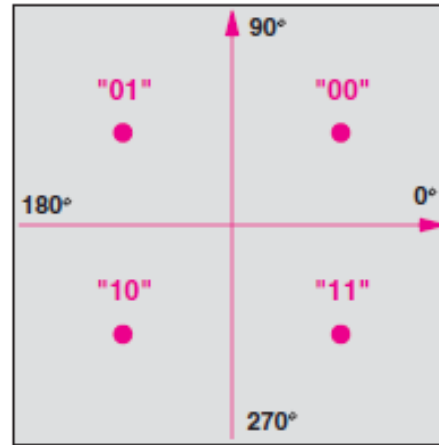
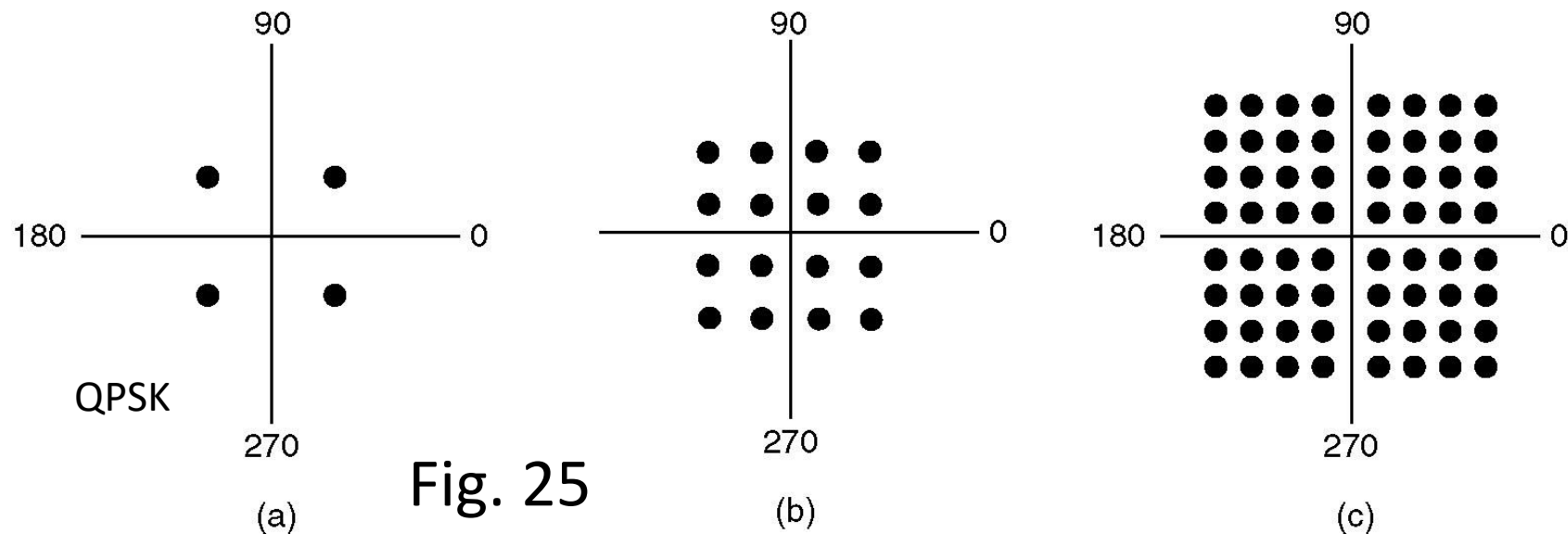


Figure 10.7 A constellation diagram for a system that uses four possible phase shifts that each represent two data bits.

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

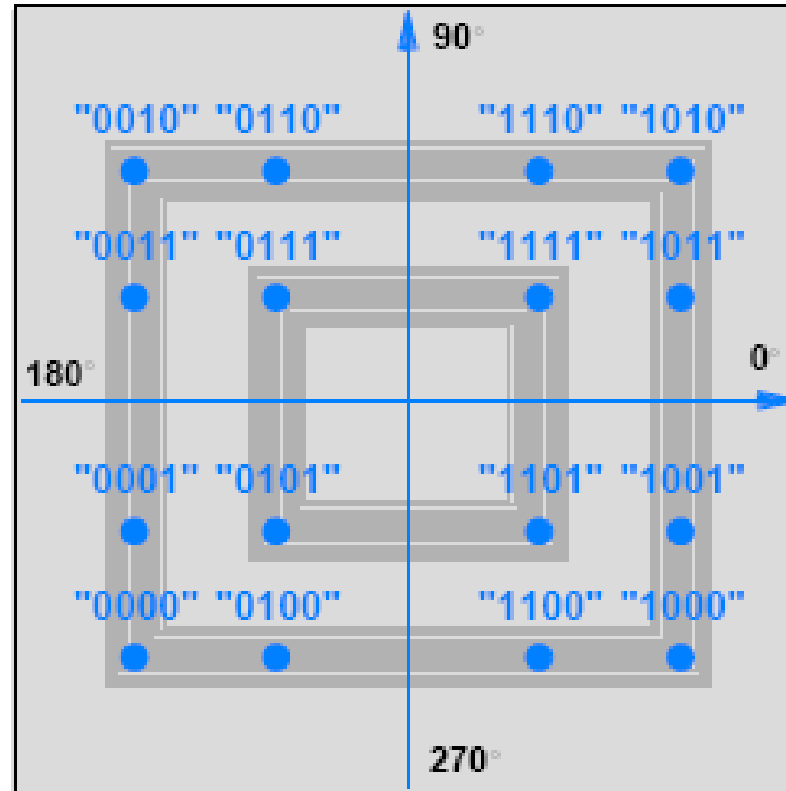
- La fase de un punto la indica el ángulo que se forma con el eje de las x al trazar una línea desde el punto hacia el origen.
- Hay 4 combinaciones válidas y se puede usar para transmitir 2 bits por símbolo.

# Diagramas de constelación



- 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

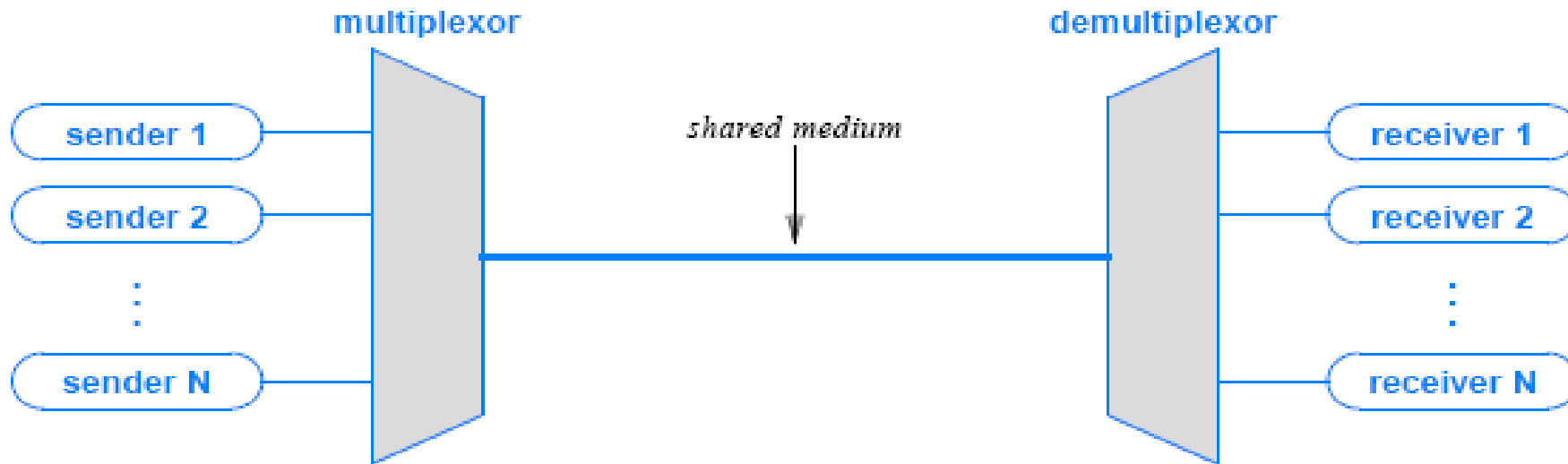


Figure 11.1 The concept of multiplexing in which independent pairs of senders and receivers share a transmission medium.

**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

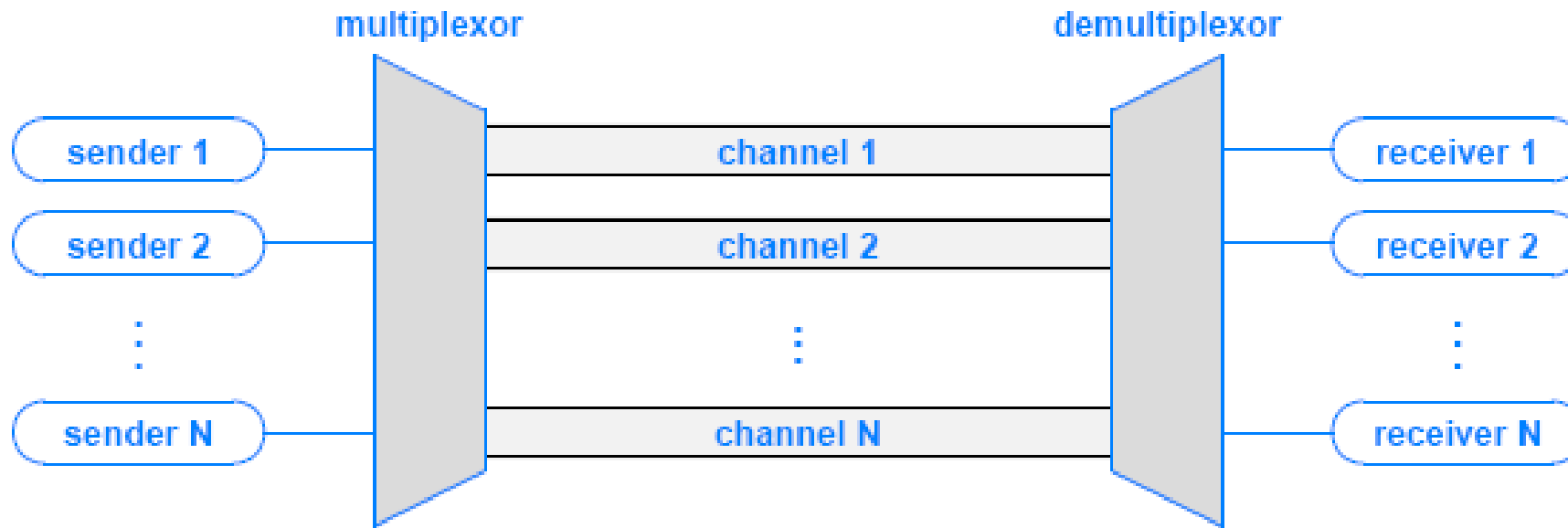


Figure 11.3 The conceptual view of Frequency Division Multiplexing (FDM) as providing a set of independent channels.

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

- En FDM el espectro de frecuencias (del canal donde se ponen todas las señales) se divide en bandas de frecuencia y cada usuario posee exclusivamente alguna banda.

# Multiplexado por división de frecuencia

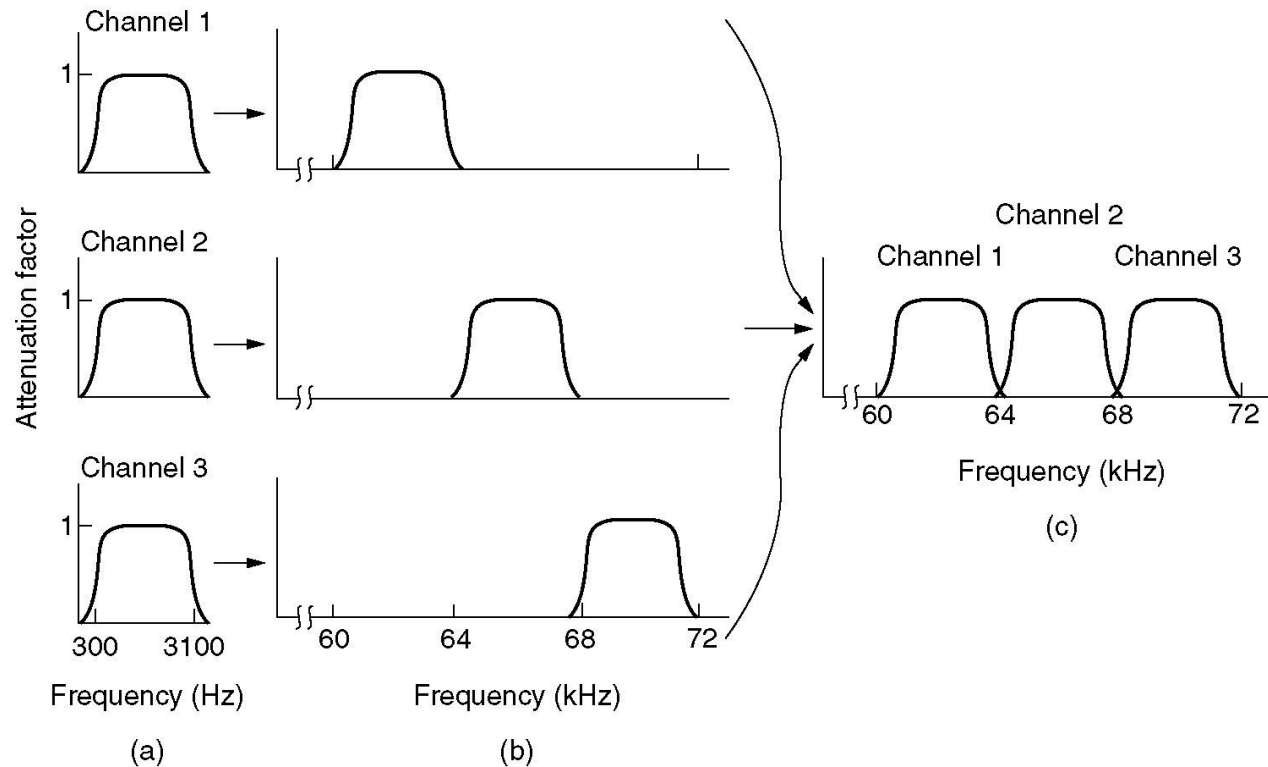


Fig. 31

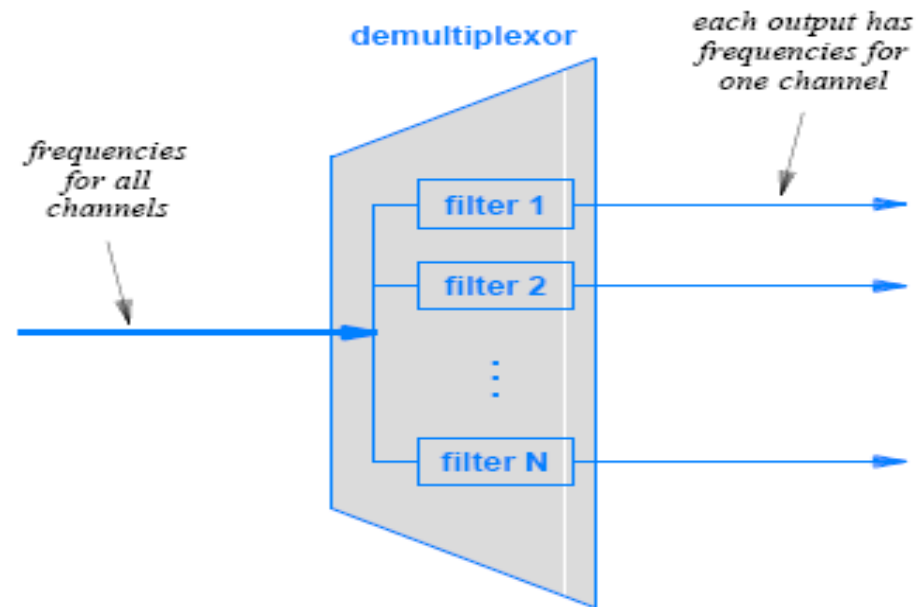
- (a) Los anchos de banda originales.
- (b) Los anchos de banda aumentados en frecuencias.
- (c) El canal multiplexado.

- **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.

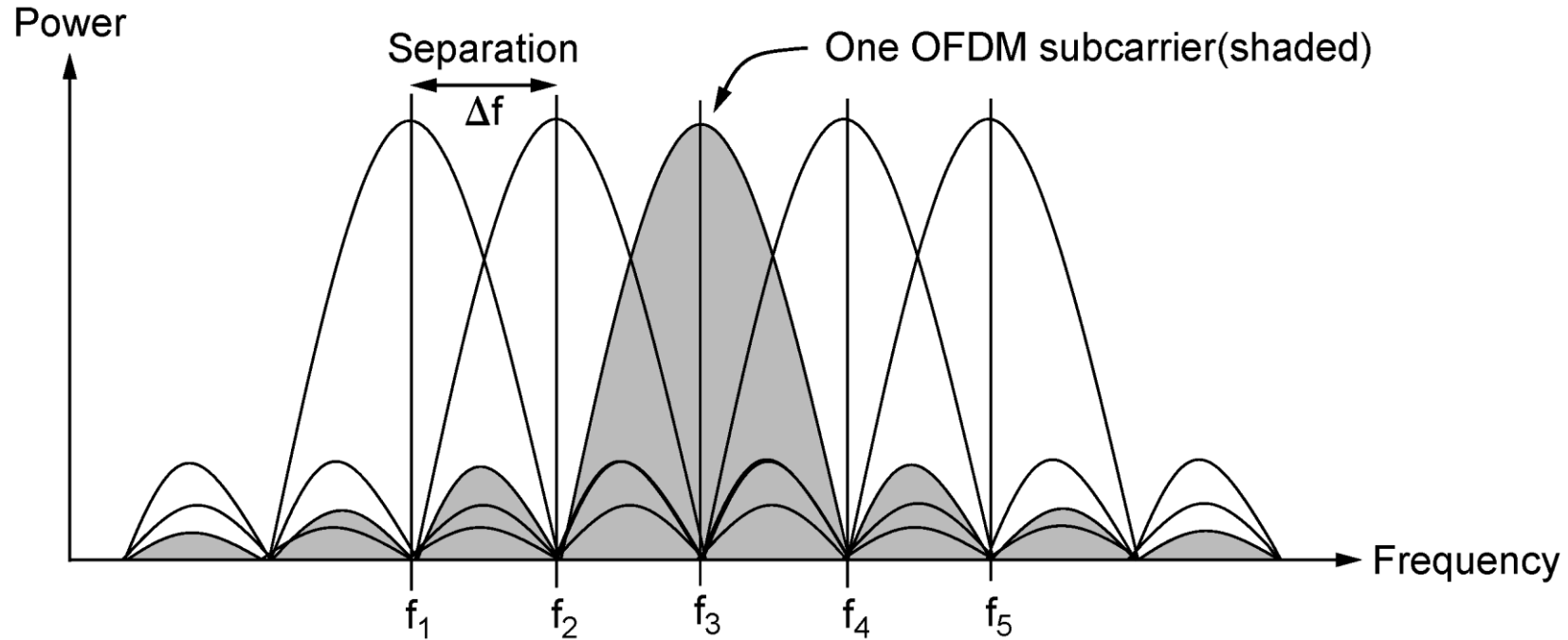
**Funcionamiento de un demultiplexor:** se usan **filtros** para recuperar las señales originales.

**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.

# Multiplexado por división de frecuencia

- En **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)**,
  - el ancho de banda del canal es dividido en varias portadoras que independientemente envían datos (e.g., con QAM).
  - Estas portadoras son empaquetadas juntas en el dominio de frecuencias, de modo que las señales de cada portadora se extienden a las adyacentes.
  - Sin embargo, como se ve en la Fig. 2-26, la respuesta de cada portadora es diseñada de modo que es cero en el centro de las portadoras adyacentes.

# Multiplexado por división de frecuencia



Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM).

# Multiplexado por división de frecuencia

- Las portadoras pueden ser muestreadas en sus frecuencias del centro sin interferencia de sus vecinos.
  - Para hacer este trabajo, un **tiempo guarda** es necesitado para repetir una porción de los símbolos de señales en el tiempo de modo que tienen la respuesta de frecuencia deseada.
  - Sin embargo, esta sobrecarga es mucho menos que la necesitada para varias bandas guarda.
- La idea de OFDM ha estado disponible por mucho tiempo, pero solo en la última década ha sido adoptada ampliamente.

# Multiplexado por división de frecuencia

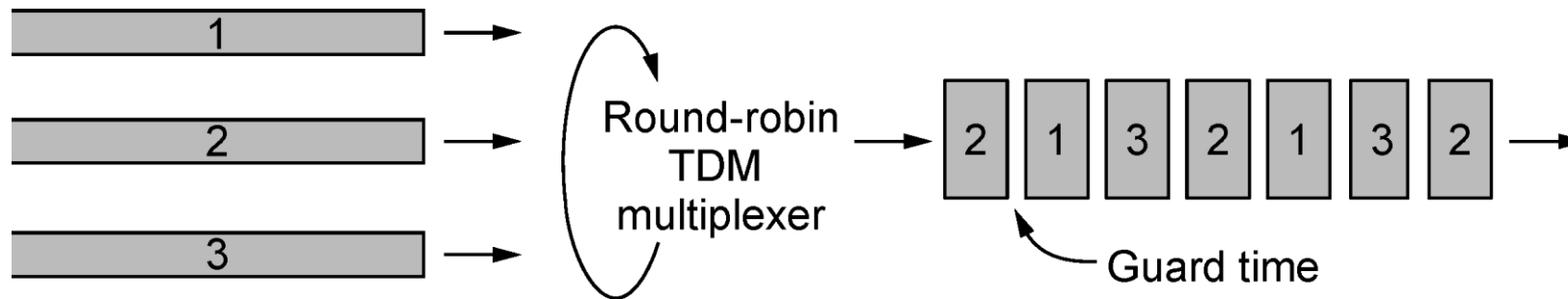
- OFDM es usada en 802.11 y redes de cable.
- Usualmente un stream a tasa alta de información digital es dividido en varios streams de tasa baja que son transmitidos en las portadoras en paralelo.
  - Esta división es útil porque es más fácil tratar al nivel de la portadora con degradaciones del canal;
  - algunas portadoras pueden ser degradadas mucho y excluidas en favor de las portadoras que son recibidas bien.



# Multiplexión por división de frecuencia

- **Utilidad de FDM:**
  - FDM aún 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.

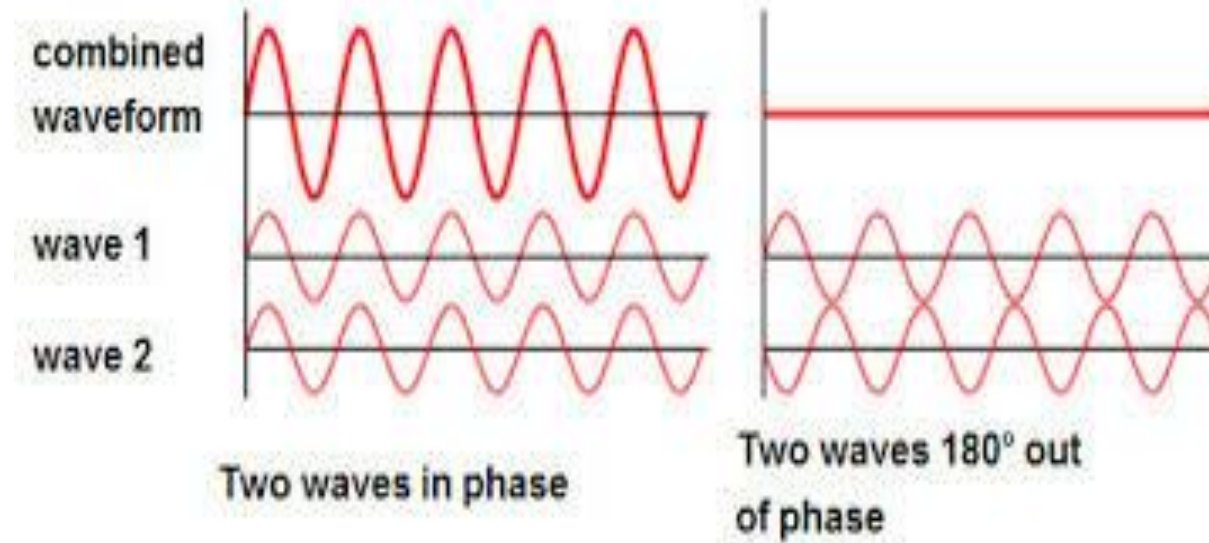
# Multiplexado por división de tiempo

- 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)

Six examples:

(c) Seis ejemplos de transmisiones

-- 1 --	<b>C</b>	$S_1 = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$
- 1 1 -	<b>B + C</b>	$S_2 = (-2 \ 0 \ 0 \ 0 +2 +2 \ 0 -2)$
1 0 --	<b>A + B</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 + C + D</b>	$S_6 = (-2 -2 \ 0 -2 \ 0 -2 +4 \ 0)$

(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)

(d) Recuperación de la señal de la estación C

- 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) 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)

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)

(c) Seis ejemplos de transmisiones

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

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

$$\begin{aligned} S_1 \bullet C &= (1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1)/8 = 1 \\ S_2 \bullet C &= (2 +0 +0 +0 +2 +2 +0 +2)/8 = 1 \\ S_3 \bullet C &= (0 +0 +2 +2 +0 -2 +0 -2)/8 = 0 \\ S_4 \bullet C &= (1 +1 +3 +3 +1 -1 +1 -1)/8 = 1 \\ S_5 \bullet C &= (4 +0 +2 +0 +2 +0 -2 +2)/8 = 1 \\ S_6 \bullet C &= (2 -2 +0 -2 +0 -2 -4 +0)/8 = -1 \end{aligned}$$

(d)

Para **recuperar el flujo de bits** de una estación, el receptor.

- calcula el producto interno normalizado (i.e. dividido por m) 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

- **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.
- Además  $\mathbf{S} \bullet \underline{\mathbf{S}} = -1$ .

$$\mathbf{S} \bullet \mathbf{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1$$

# 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**:
- $W_1 = (1)$

- $W_2 =$ 

1	1
1	-1

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

# 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.
- **Aplicación de CDM:**
  - Además de en las redes de celulares, CDMA es usado por redes satelitales y de cable.

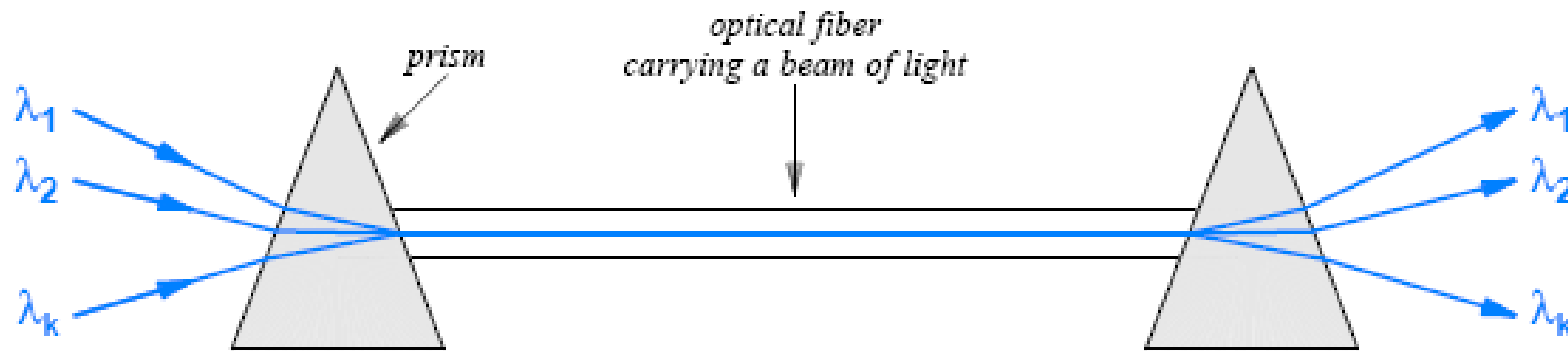
# Multiplexado por división de longitud de onda

- **WDM (multiplexión por división de longitud de onda)** se refiere a la aplicación de FDM a la fibra óptica.
  - Algunas fuentes usan el término **WDM denso** (DWDM) para enfatizar que muchas longitudes de onda de luz pueden ser usadas.
- Las entradas y salidas de WDM son **longitudes de onda de luz**.
  - denotadas por la letra griega  $\lambda$ , e informalmente llamados colores.
- Cuando la luz pasa a través de un **prisma**
  - los colores del espectro son separados.
- Si el conjunto de rayos de colores son dirigidos a un prisma en el ángulo correcto,
  - el prisma va a **combinar los rayos** para formar un rayo único de luz blanca.



# Multiplexado por división de longitud de onda

- Prismas forman la base del multiplexado y demultiplexado óptico.
  - Un multiplexor acepta rayos de luz en varias longitudes de onda y usa un prisma para combinarlos en un rayo único.
  - Un demultiplexor usa un prisma para separar las longitudes de onda..



**Figure 11.7** Illustration of prisms used to combine and separate wavelengths of light in wavelength division multiplexing technologies.

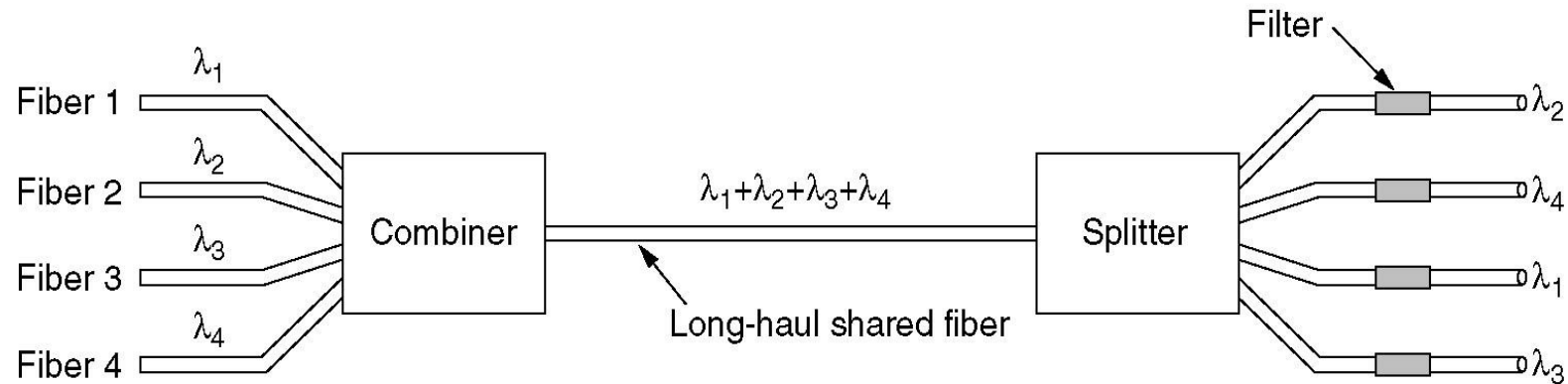
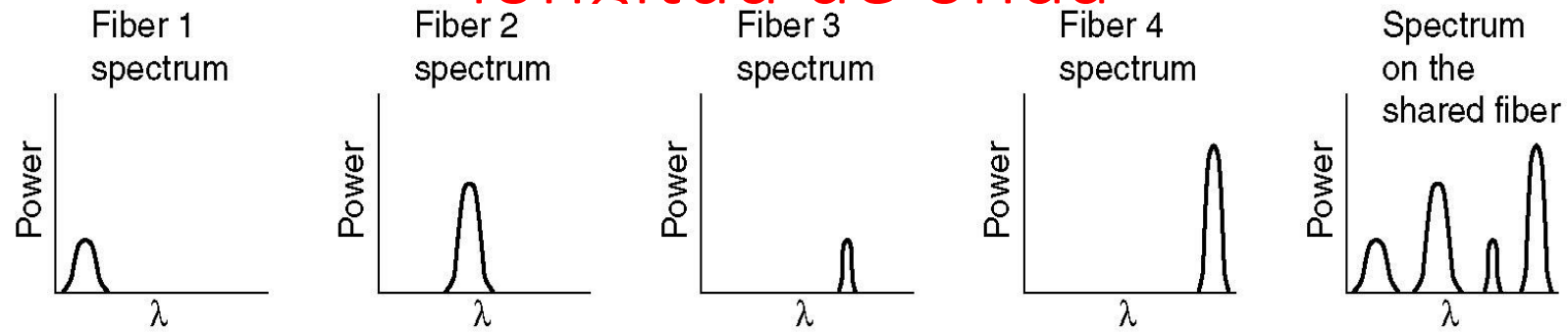
# Multiplexado por división de longitud de onda

- En la Fig. 32 se muestran los principios básicos de la WDM en fibra.
  - Aquí 4 fibras se juntan en un **combinador óptico**, cada una con su energía presente a distintas longitudes de onda.
  - Los 4 haces se combinan en una sola fibra compartida para transmisión a un destino distante.

# Multiplexado por división de longitud de onda

- En el destino distante el haz se divide en tantas fibras como hayan entrado.
- Cada fibra saliente contiene un núcleo corto que filtra todas las longitudes de onda, excepto una.
- Las señales resultantes pueden enrutarse a su destino o recombinarse en diferentes formas para transporte adicional multiplexado.

# Multiplexado por división de longitud de onda



# Multiplexado por división de longitud de onda

- Esto se trata de multiplexado por división de frecuencia a frecuencias muy altas.
  - Siempre y cuando cada canal tenga su propio rango de frecuencia (es decir, longitud de onda), y todos los intervalos estén separados, se pueden multiplexar juntos en la fibra de largo alcance.
  - La única diferencia con respecto a la FDM eléctrica es que un sistema óptico que usa una rejilla de difracción es totalmente pasivo y, por ello muy confiable.

# Multiplexado por división de longitud de onda

- **Un poco de historia:**

- Los primeros sistemas comerciales tenían 8 canales, cada uno de 2,5 Gbps.
- En 1998: sistemas de 40 canales de 2,5 Gbps.
- En 2001: sistemas de 96 canales de 10 Gbps.
- Ya hay sistemas de 200 canales.

# Multiplexado por división de longitud de onda

- La razón por la que WDM es popular es que la energía de una sola fibra por lo general es de unos cuantos gigahertz,
  - debido a que en la actualidad es imposible convertir con mayor rapidez entre los medios óptico y eléctrico.
  - Al ejecutar muchos canales en paralelo sobre diferentes longitudes de onda, el ancho de banda agregado se incrementa de manera lineal de acuerdo con el número de canales.

## Multiplexado por división de longitud de onda

- Puesto que el ancho de banda de una sola banda de fibra es de alrededor de 25000 GHz, teóricamente hay espacio para 2500 canales de 10 Gbps incluso a 1 bit/Hz (también son posibles tasas más altas.)
- Los amplificadores ópticos pueden regenerar toda la señal una vez cada 1000 km.



# Bibliografía Adicional

- Las filminas de la 3, 4, 11, 12, 14, 18, 20 fueron sacadas del libro:
  - Comer. Computer Networks and Internets. Quinta edición (del 2008).