

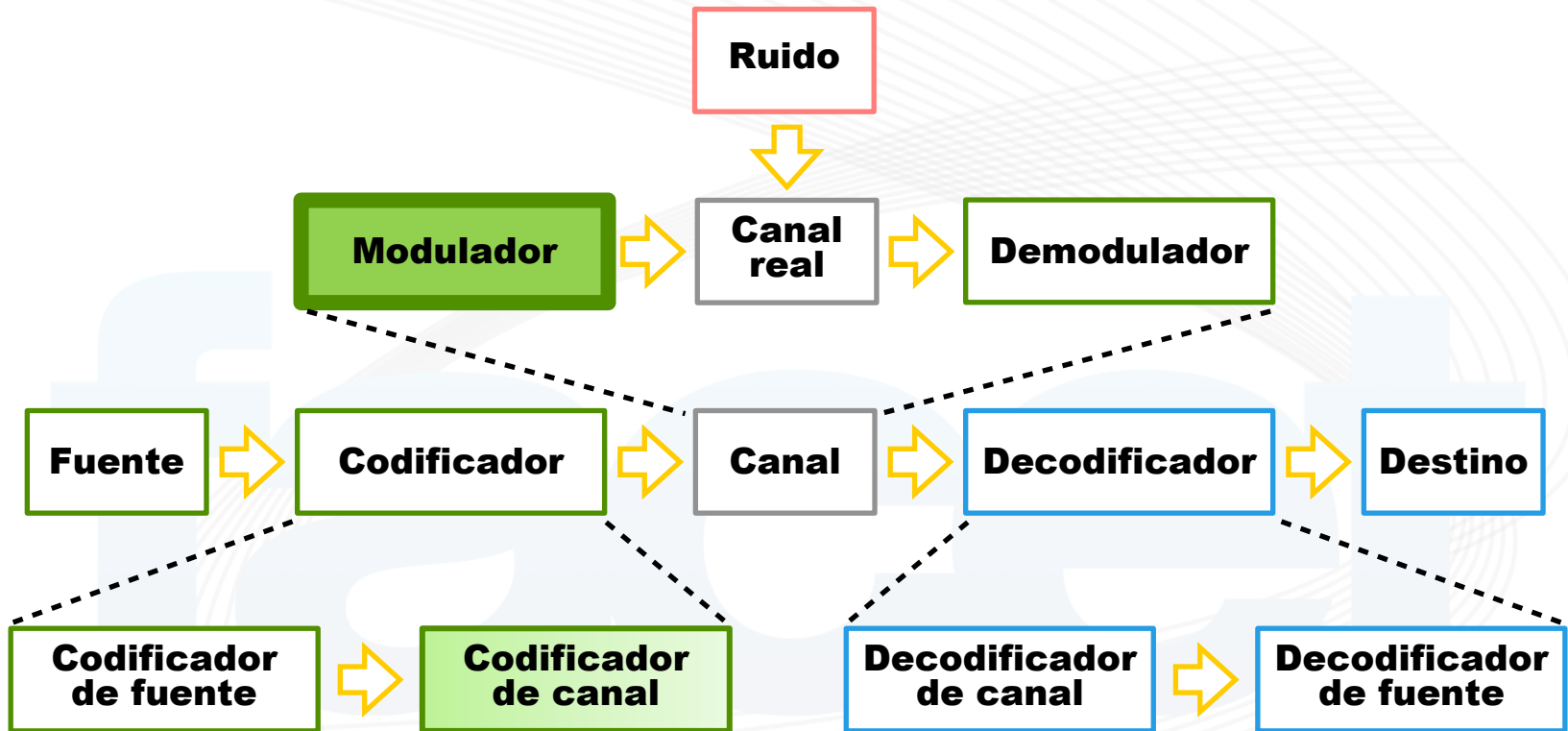
Modulaciones

Transmisión de Datos

Ing. Luis Di Pinto (ldipinto@herrera.unt.edu.ar)

<http://www.microprocesadores.unt.edu.ar/transmision/>

Repaso Esquema general



- ▶ Asumiendo que ya tenemos una señal digital codificada lista para transmitir, continuamos con su modulación.

Codificación del Canal

- ▶ Para un mejor abordaje, la dividiremos en tres partes:
 - ▶ Codificaciones de línea
 - ▶ Características vinculadas a capa física y modulación en banda base.
 - ▶ **Características vinculadas a las modulaciones de portadora.**
 - ▶ Características vinculadas a la generación de tramas.
 - ▶ Detección y corrección de errores.

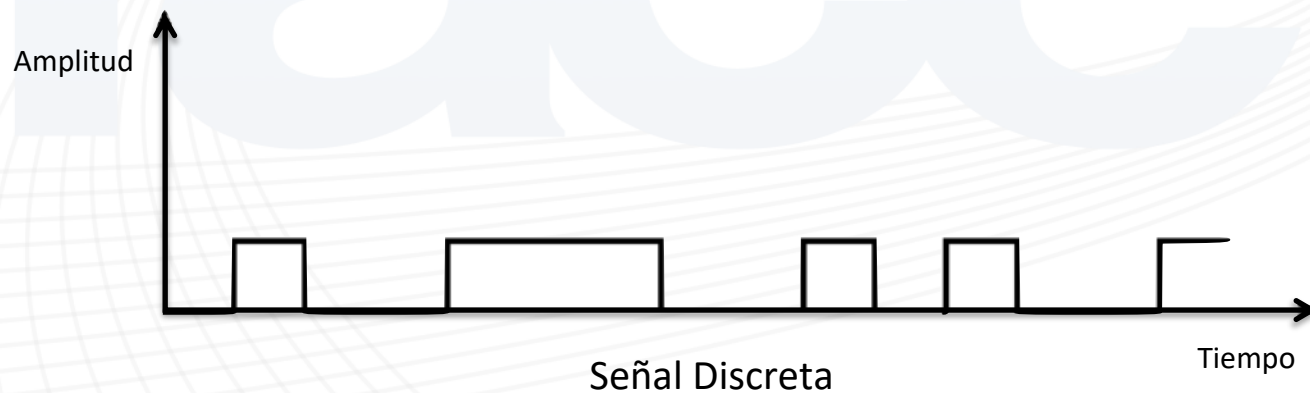
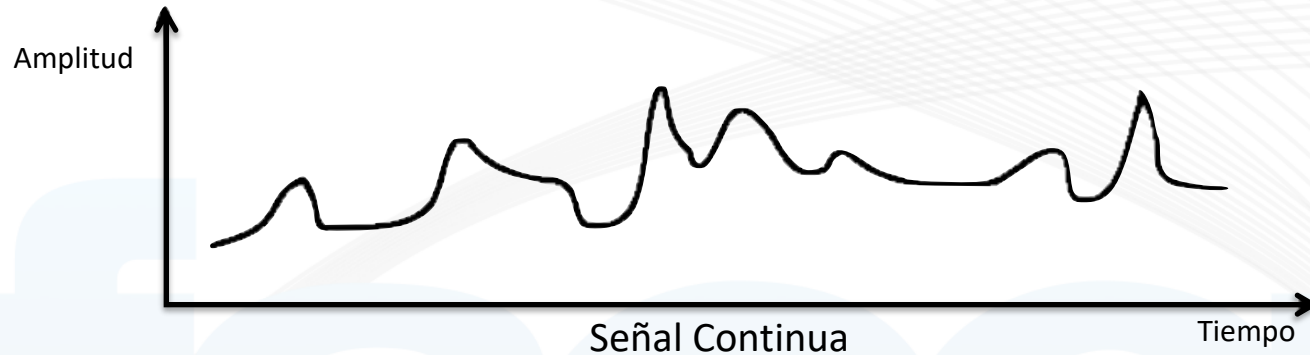
Temas que veremos

- ▶ Definiciones y terminología.
- ▶ Modulaciones ASK y OOK.
- ▶ Modulación FSK.
- ▶ Modulaciones PSK, BPSK, QPSK y DPSK.
- ▶ Modulaciones QAM.
- ▶ Otras modulaciones:
 - ▶ FDM y OFDM.

Características temporales

- ▶ Señal Continua (Analógica): Varía suavemente en el tiempo.
- ▶ Señal Discreta (Digital): se mantiene constante en un intervalo de tiempo y cambia abruptamente a otro valor constante.
- ▶ Señal Periódica: repite un patrón a lo largo del tiempo.
- ▶ Señal no Periódica: no repite un patrón a lo largo del tiempo.

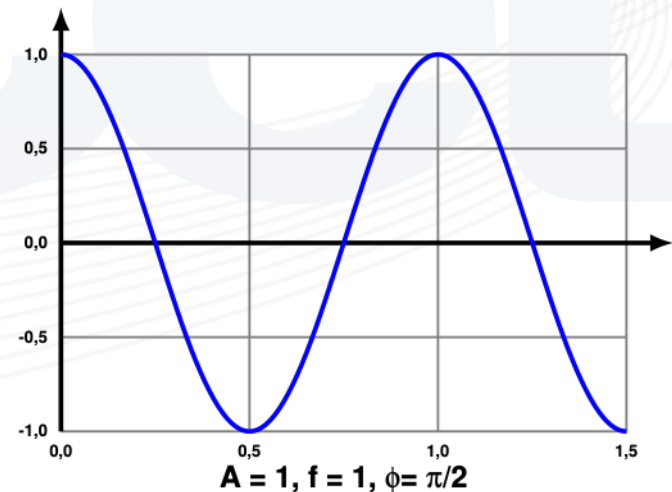
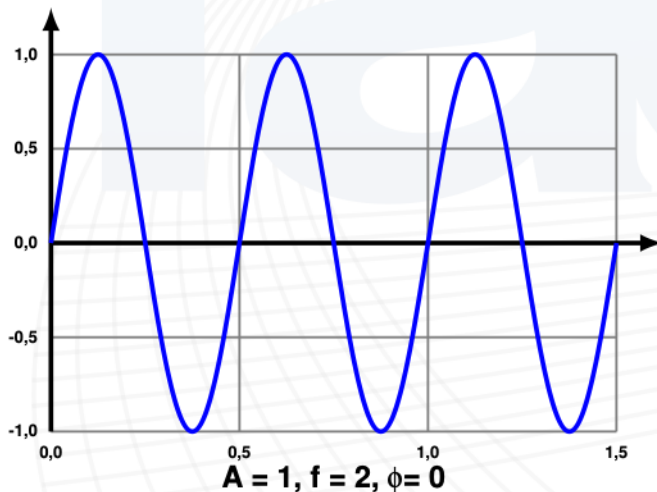
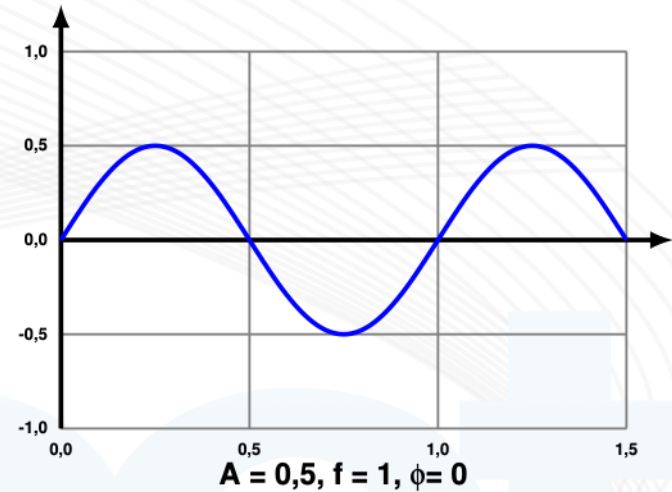
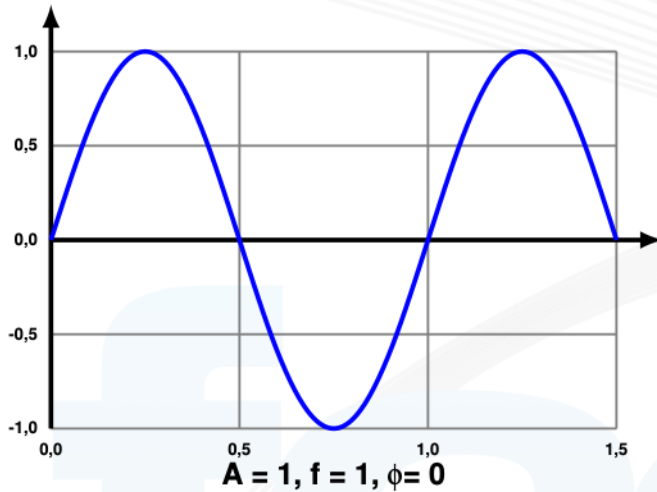
Señales continuas y discretas



Ondas sinusoidales

- ▶ **Amplitud de Pico (A):** Valor máximo de la señal [Volts, V].
- ▶ **Frecuencia (f):** Cantidad de repeticiones del ciclo por segundo [Hertz, Hz].
- ▶ **Período (T):** Tiempo transcurrido entre dos repeticiones [segundos, s].
 - ▶ $T = 1 / f$
- ▶ **Fase:** Posición relativa de la señal dentro de un período.

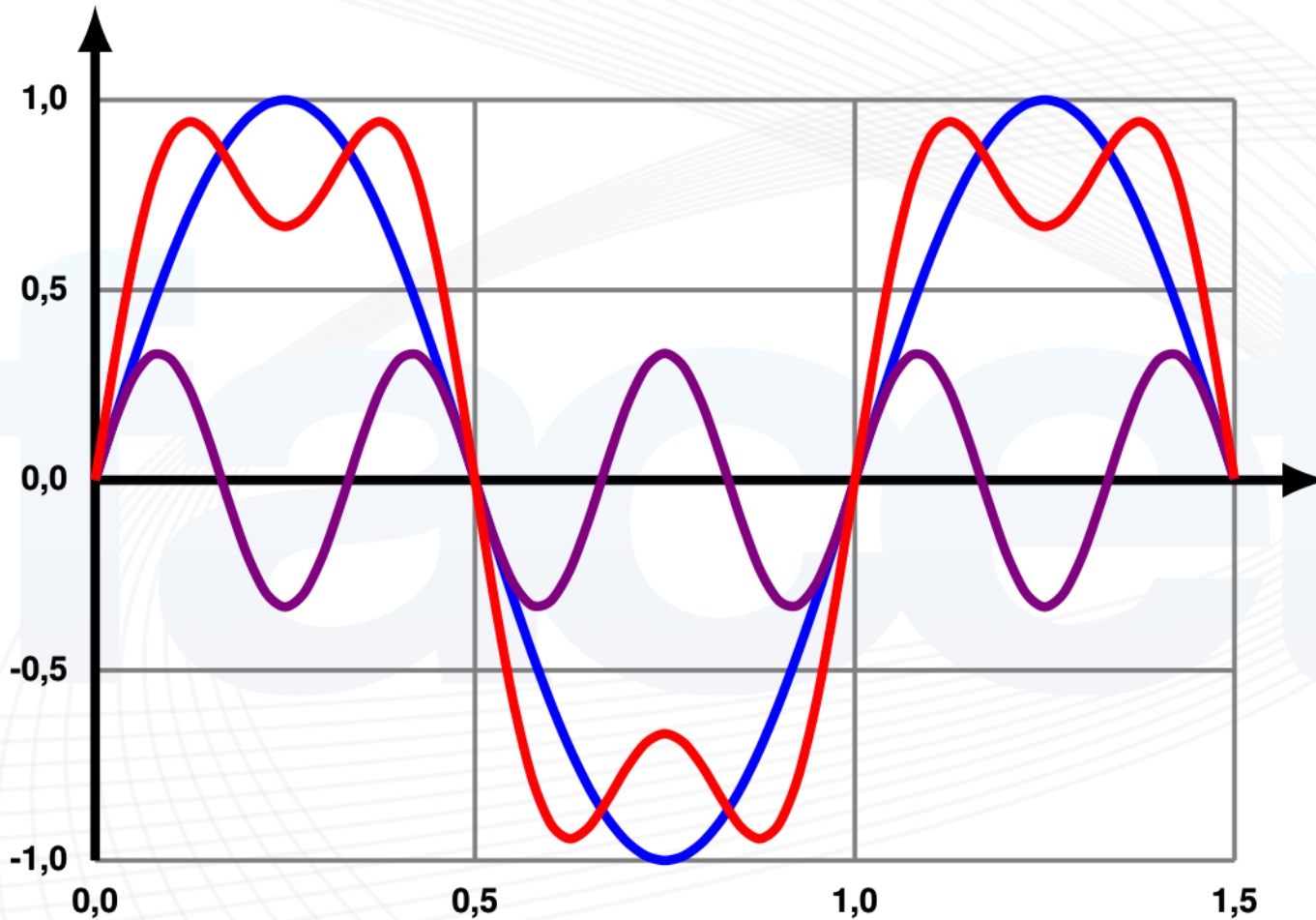
Ondas sinusoidales variables



Dominio de la frecuencia

- ▶ Por el análisis de Fourier se sabe que cualquier señal se puede representar por la suma de señales senoidales de diferentes frecuencias.
- ▶ Se puede expresar entonces una señal por sus componentes de frecuencia o armónicos.

Componentes de frecuencia



Espectro de las señales

- ▶ Se denomina **espectro** de una señal al conjunto de componentes de frecuencia que conforman la señal.
- ▶ Las señales periódicas tienen espectros discretos.
- ▶ Las señales no periódicas tienen espectros continuos.

Ancho de banda

- ▶ Se denomina Ancho de Banda Absoluto a la diferencia entre la mayor y la menor componente de frecuencia del espectro de una señal.
- ▶ Se denomina **Ancho de Banda Efectivo** (o simplemente ancho de banda) a la porción del espectro que contiene la mayor parte de la energía de la señal.

Atenuación

- ▶ El medio influye en la señal provocando que el nivel de la misma decaiga con la distancia.
- ▶ La atenuación es una función creciente con la frecuencia.
- ▶ Al receptor debe llegar una señal suficiente para ser detectada sin error.

Distorsión de retardo

- ▶ La velocidad de propagación de la señal en un medio guiado depende de la frecuencia.
- ▶ Para una señal limitada en banda la velocidad tiende a ser mayor en la frecuencia central.
- ▶ La señal sufre una distorsión por el cambio relativo de fase en sus armónicos.

Ruido

- ▶ Ruido térmico o Ruido blanco
 - ▶ Se debe a la agitación de los electrones y tiene una distribución uniforme.
- ▶ Intermodulación
 - ▶ Se debe a comportamientos no lineales en el transmisor o receptor que generan señales con frecuencias que son combinaciones lineales de las originales.
- ▶ Diafonía
 - ▶ Se produce por el acoplamiento inductivo y/o capacitivo en las líneas de transmisión.
- ▶ Impulsivo
 - ▶ Se produce por diversas razones, una de las más frecuentes son perturbaciones electromagnéticas externas.

Relación Señal-Ruido

- ▶ Es el cociente entre la potencia de la señal y la potencia del ruido.
- ▶ Generalmente se mide en el receptor porque es el responsable de decodificar la señal.
- ▶ Por comodidad se suele medir en dB

$$\begin{aligned} SNR_{dB} &= 10 \cdot \log_{10}(SNR) \\ &= 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \end{aligned}$$

Capacidad del canal (Nyquist)

- ▶ En un canal sin ruido la capacidad de transmisión del canal se puede calcular como:

$$c = 2 \cdot B \cdot \log_2(n)$$

- ▶ Donde n es la cantidad de estados significativos de la señal y B es el ancho de banda.

Capacidad del canal (Shannon)

- ▶ En un canal con ruido, a mayor velocidad de transmisión más bits son alterados por un ruido de igual duración.
- ▶ En este caso la capacidad de canal se puede calcular como:

$$c = B \cdot \log_2(1 + SNR)$$

- ▶ Donde B es el ancho de banda y SNR es la relación señal ruido.

Capacidad del canal

- ▶ El criterio de Shannon establece la capacidad de transmisión máxima del canal sin errores.
 - ▶ Recordemos que ya vimos que si hay errores, se reduce la capacidad efectiva.
- ▶ Si la velocidad de transmisión es menor a este valor entonces es posible encontrar una codificación que permita la comunicación sin errores.

Capacidad del canal – Ejemplo

- ▶ Supongamos que un canal posee un espectro situado entre 3 MHz y 4 MHz, y que la relación SNRdb es de 24 dB.
- ▶ **¿Cuánto es el ancho de banda B?**
 - ▶ $B = 4 \text{ MHz} - 3 \text{ MHz} = \mathbf{1 \text{ MHz}}$
- ▶ **¿Cuánto es la relación señal ruido SNR?**
 - ▶ $\text{SNRdb} = 10 \log_{10} (\text{SNR})$
 - ▶ $\text{SNR} = 10^{(24 / 10)} = 10^{2,4} = \mathbf{251}$
- ▶ **¿Cuánto sería la capacidad máxima del canal según Shannon?**
 - ▶ $C = B * \log_2 (1 + \text{SNR})$
 - ▶ $C = 1 \text{ M} * \log_2 (252) = \mathbf{8 \text{ Mbps}}$
- ▶ **¿Cuántos niveles de señalización se necesitan para alcanzar esta capacidad máxima?**
 - ▶ Según Nyquist, $C = 2 * B * \log_2 (n)$
 - ▶ $8 \text{ M} = 2 \text{ M} * \log_2 (n) \rightarrow n = 2^4 = \mathbf{16}$

Conceptos clave clase anterior

- ▶ Definiciones y terminología:
 - ▶ Señales continuas, discretas y periódicas.
 - ▶ **Amplitud (A)**, **Frecuencia (f)**, **Fase**, **Período (T)**.
 - ▶ **Espectro** de una señal, **Ancho de Banda (B)** y **Relación señal-ruido (SNR)**.
 - ▶ **Capacidad** del canal, según **Nyquist** (sin ruido) y según **Shannon** (con ruido).
- ▶ Modulaciones de datos digitales en señales analógicas: características y objetivos.

Datos digitales en señales analógicas

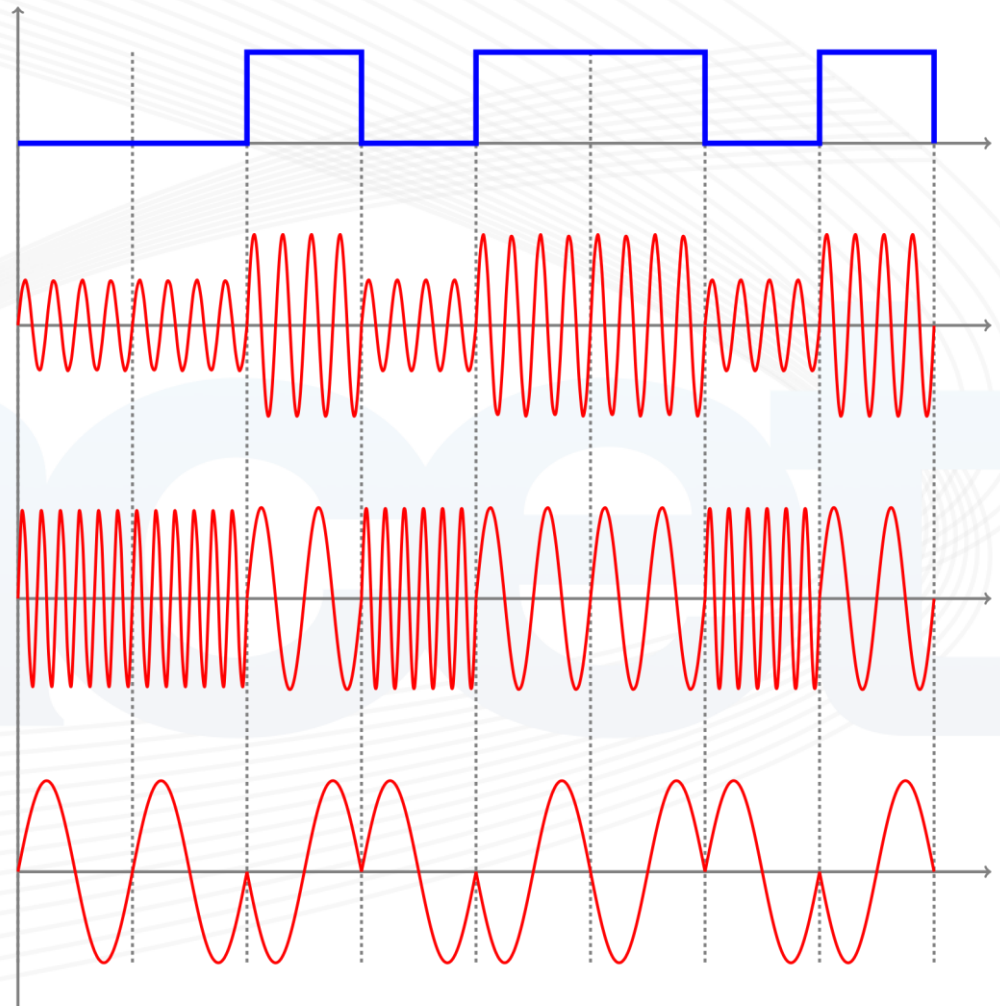
- ▶ En inglés, a esta modulación digital se la denomina **keying**.
 - ▶ Es el proceso de convertir un flujo de datos digitales en un flujo de señales analógicas aptas para ser enviadas por un canal.
- ▶ Se caracteriza porque la señal moduladora posee un número limitado de estados posibles.
 - ▶ Normalmente, '0's y '1's. Pero depende de la codificación de línea.
 - ▶ Estos estados componen un alfabeto de M símbolos.
- ▶ Se utiliza como base una señal conocida llamada portadora, a la que se le modifican los parámetros en función de la información a transmitir.
 - ▶ Esta portadora suele tener una frecuencia mucho mayor que la de la señal a transmitir.

Objetivos de la modulación

- ▶ Facilitar la propagación de la señal por el medio de transmisión
- ▶ Posibilitar el multiplexado para mejorar el uso del canal.
- ▶ Reducción del ruido e interferencias.
- ▶ Superar las limitaciones de los equipos.

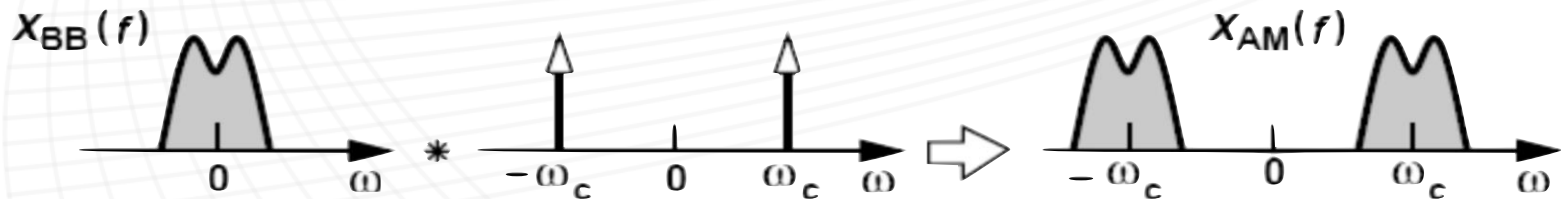
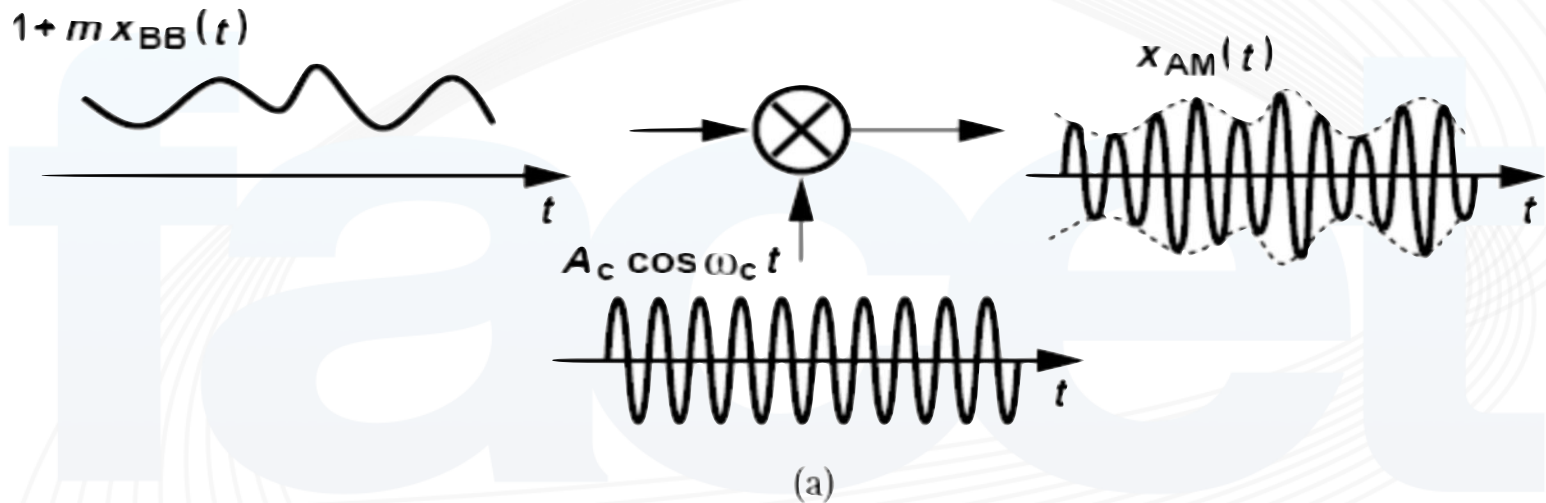
Repaso: Esquemas en banda pasante

- ▶ Datos digitales
- ▶ Modulación en Amplitud (ASK)
- ▶ Modulación en Frecuencia (FSK)
- ▶ Modulación por cambio de Fase (PSK)



Modulación en Amplitud Analógica

$$x_{AM}(t) = A_c [1 + m x_{BB}(t)] \cos \omega_c t$$

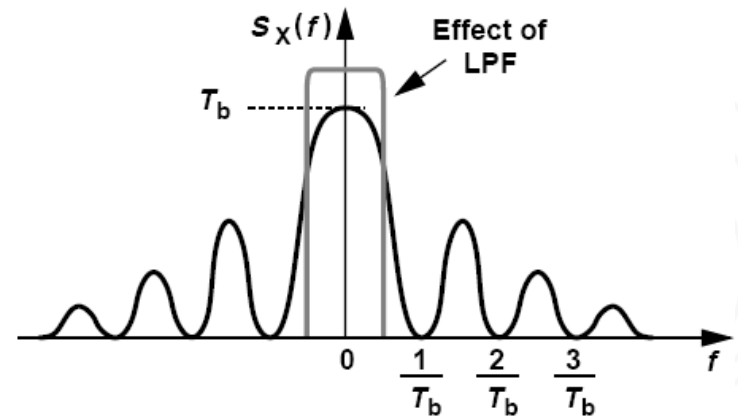
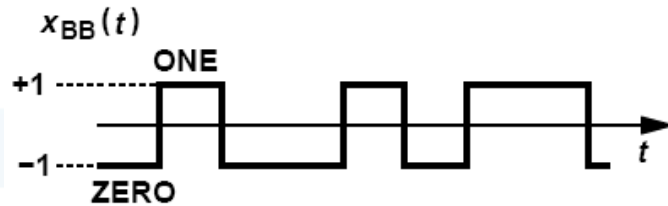


Modulación en Amplitud Digital

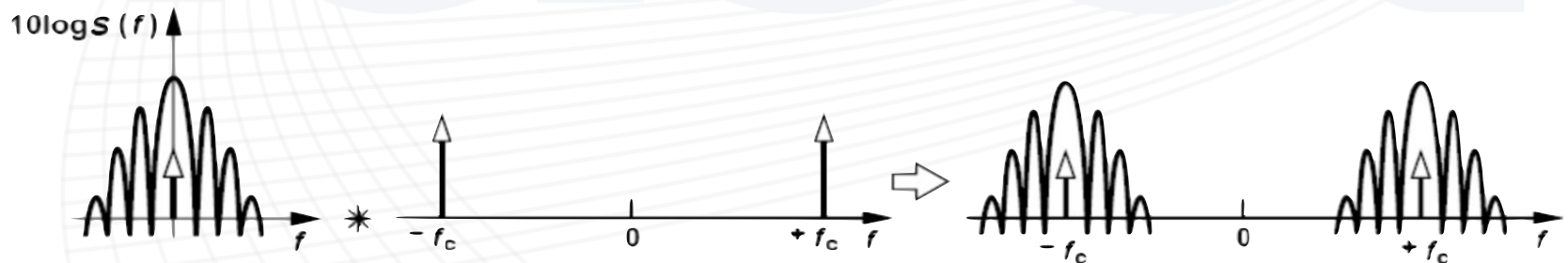
- ▶ Los valores binarios se representan mediante diferentes amplitudes de la portadora.
- ▶ Frecuentemente se utilizan dos niveles de amplitud para transmitir un bit por cada baudio.
- ▶ Se pueden utilizar más niveles para transmitir múltiples bits por cada baudio.
- ▶ La moduladora puede ser cualquier señal en banda base, por lo que puede tener una codificación de línea previa a la modulación.

Amplitude Shift Keying (ASK)

- ▶ Si se usa una secuencia binaria de dos niveles que alterna entre 0 y 1.



- ▶ La modulación produce el corrimiento (**shift**) del espectro

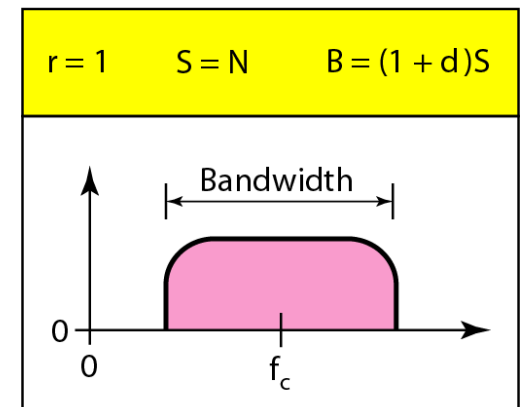
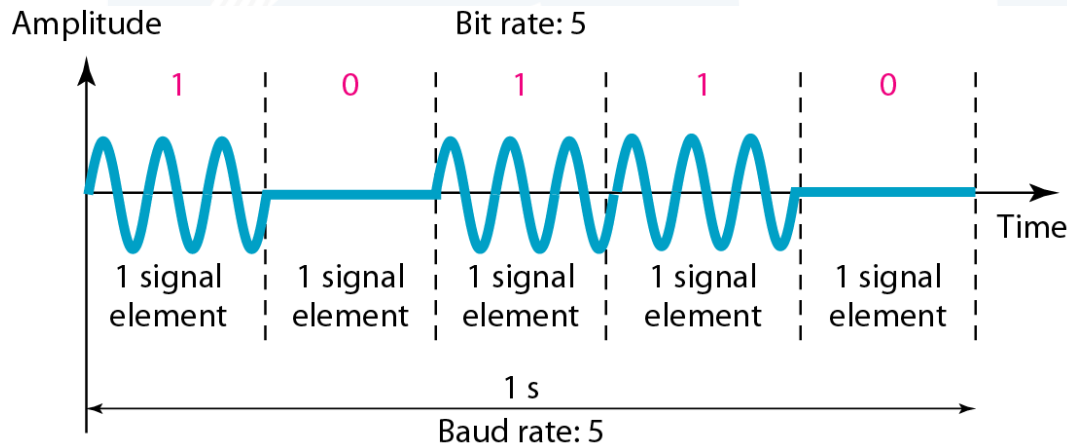


Ancho de Banda de ASK

- ▶ El ancho de banda B corresponde al total de frecuencias ocupadas por la señal ASK y es proporcional a la tasa de transferencia R .

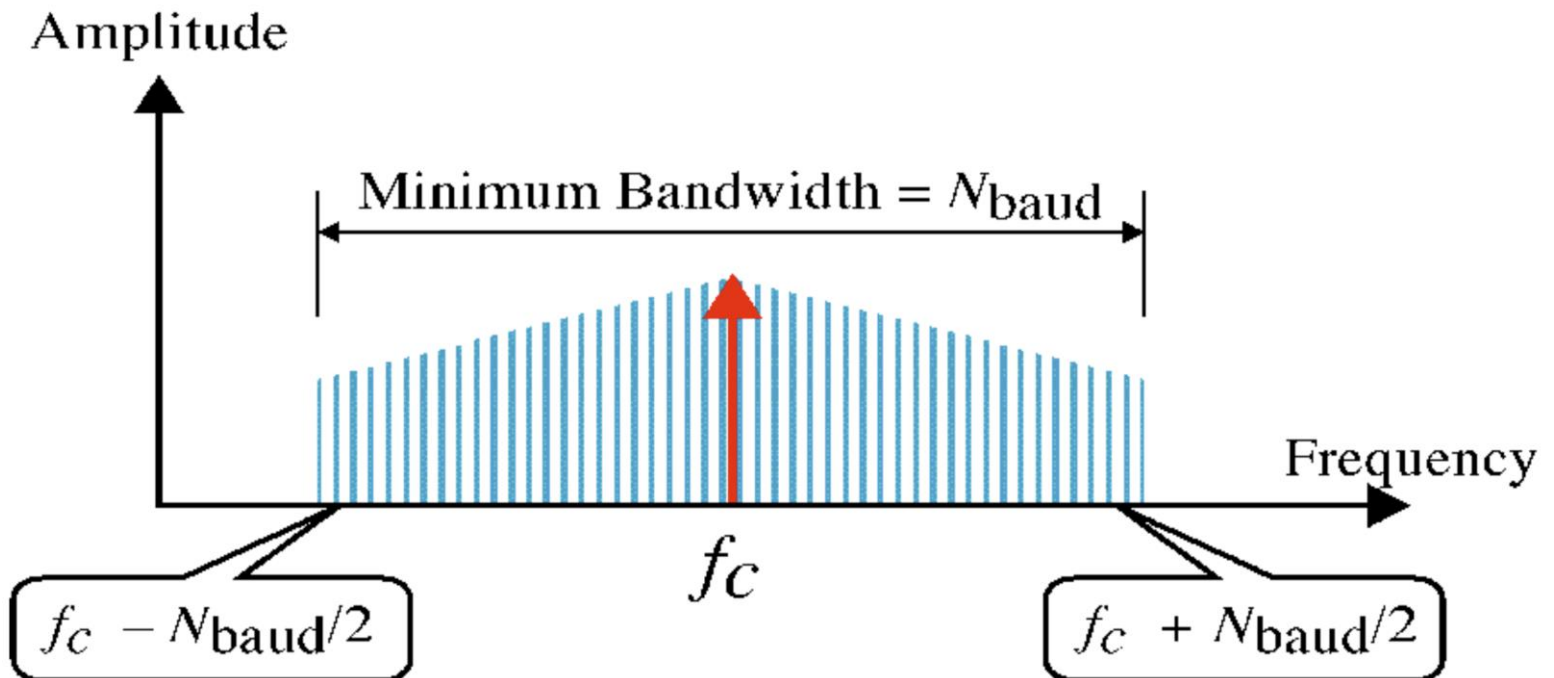
$$B = (1 + d) \cdot R$$

- ▶ Donde d es un coeficiente que puede tomar valores entre 0 y 1, y depende del esquema de modulación y filtrado usados



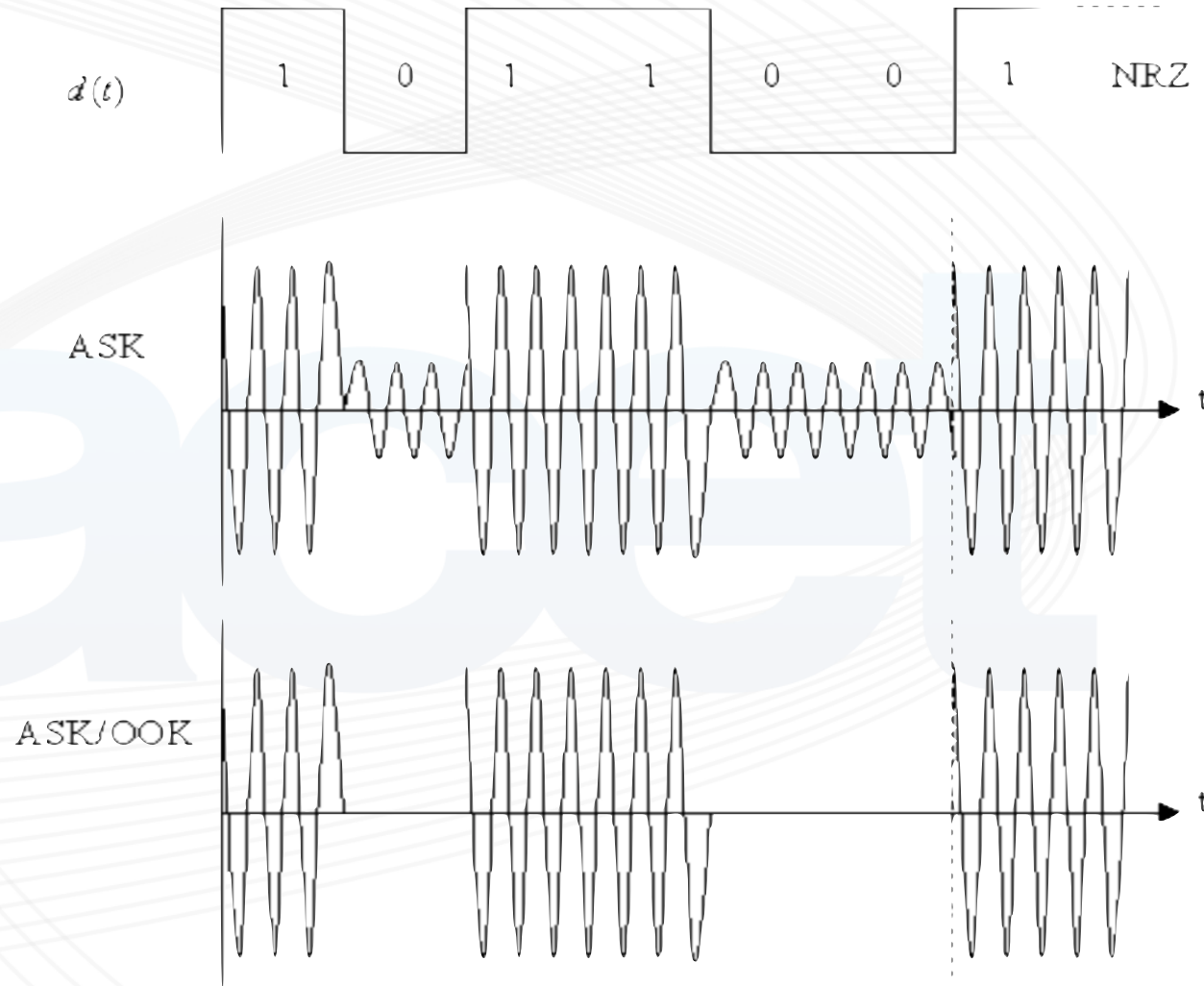
Ancho de Banda de ASK

- ▶ N_{baud} es la velocidad de modulación
- ▶ f_c es la frecuencia de la portadora



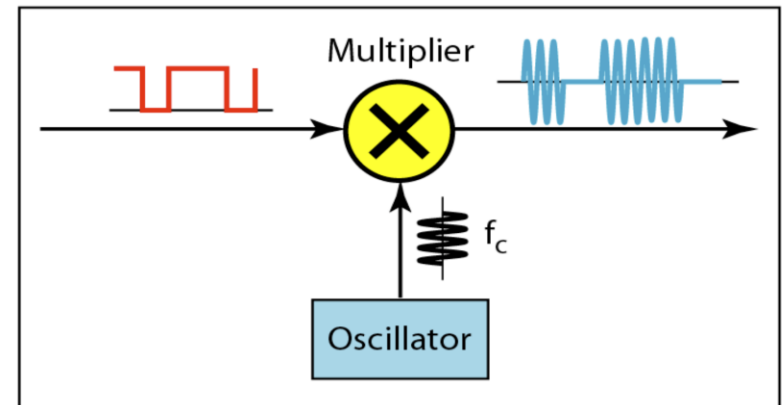
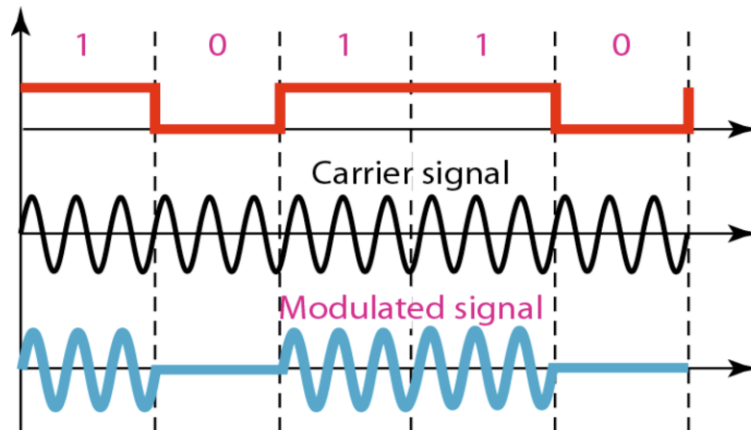
Modulación OOK (On-Off)

- ▶ Caso particular de ASK, en los que el nivel bajo se modula con una amplitud igual a cero.



Modulador Binario ASK

- ▶ La señal modulada se obtiene al multiplicar la moduladora por la portadora

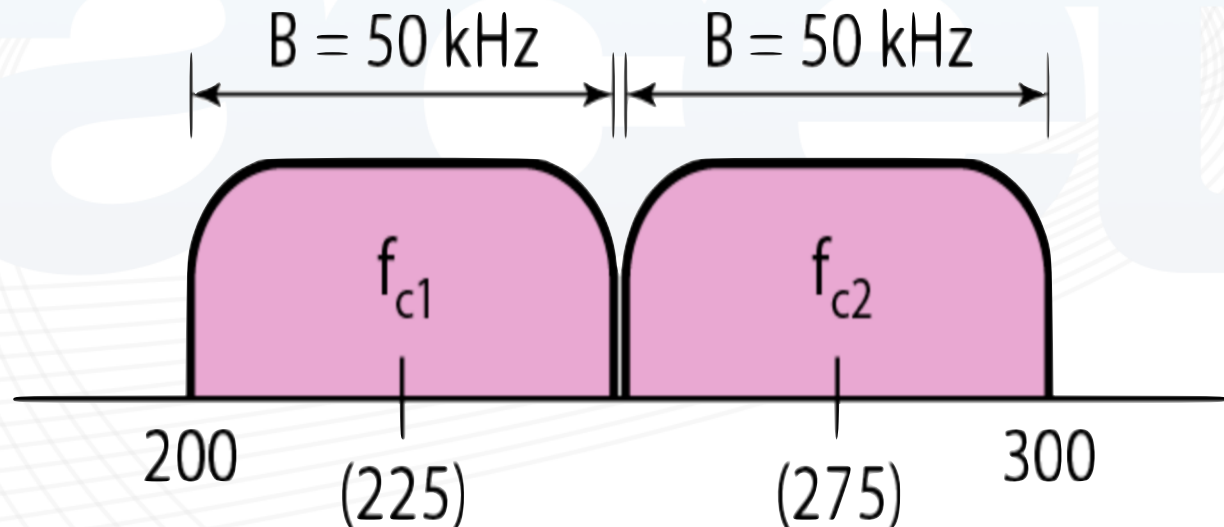


Demodulador ASK

- ▶ Demodulador Sincrónico: Se genera una portadora local y se multiplica la señal recibida por la portadora local, para después pasar por un filtro pasa bajo.
- ▶ Detector de Envolverte: La señal recibida se pasa por un rectificador de media onda y un filtro RC (pasa bajo).

Ancho de Banda en Full Duplex

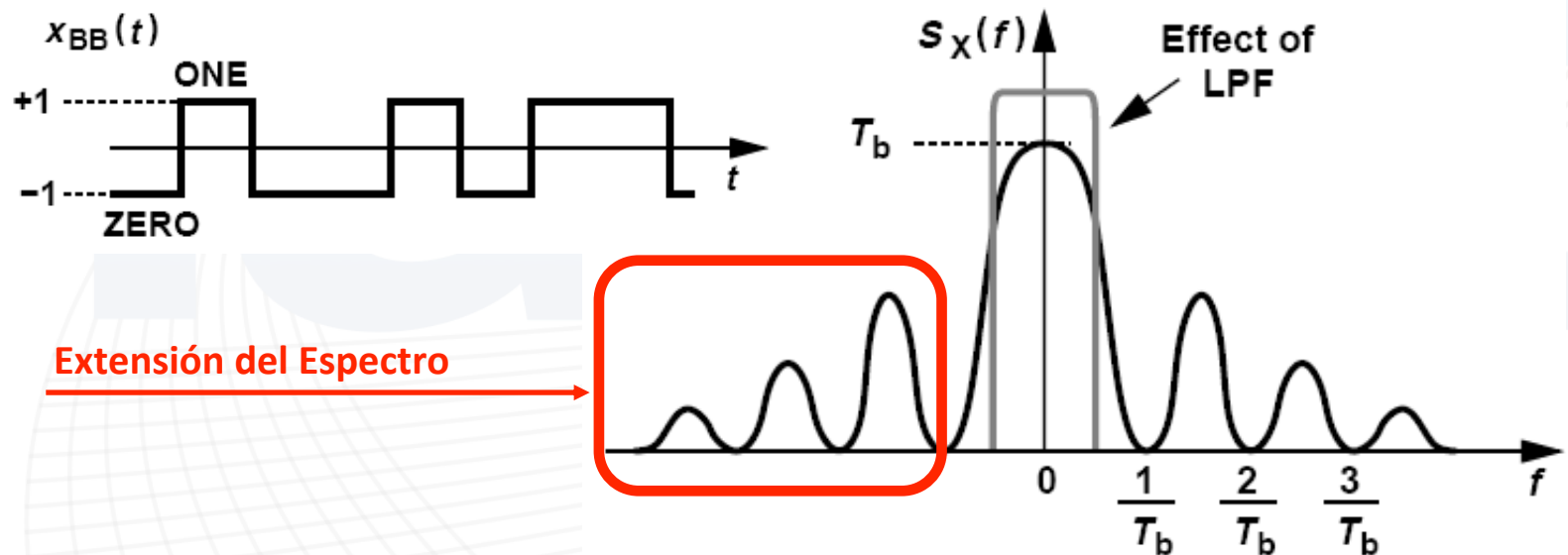
- ▶ En comunicaciones digitales se utilizan enlaces full-duplex.
- ▶ Para esto se divide el ancho de banda en dos canales usando dos frecuencias portadoras diferentes.



Interferencia Intersimbolos (ISI)

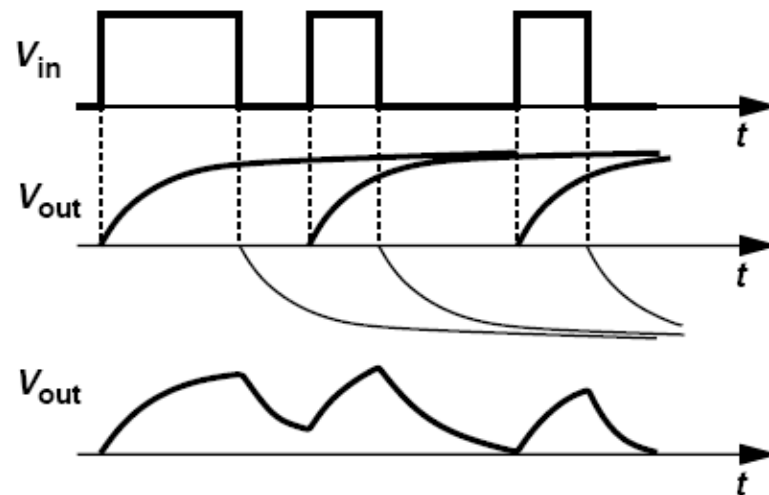
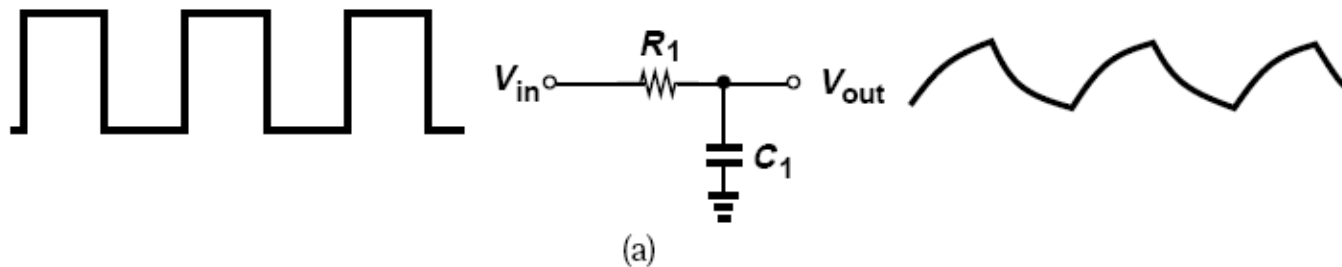
- ▶ El espectro de una secuencia de pulsos de ancho T_b .

$$S_x(f) = T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2$$



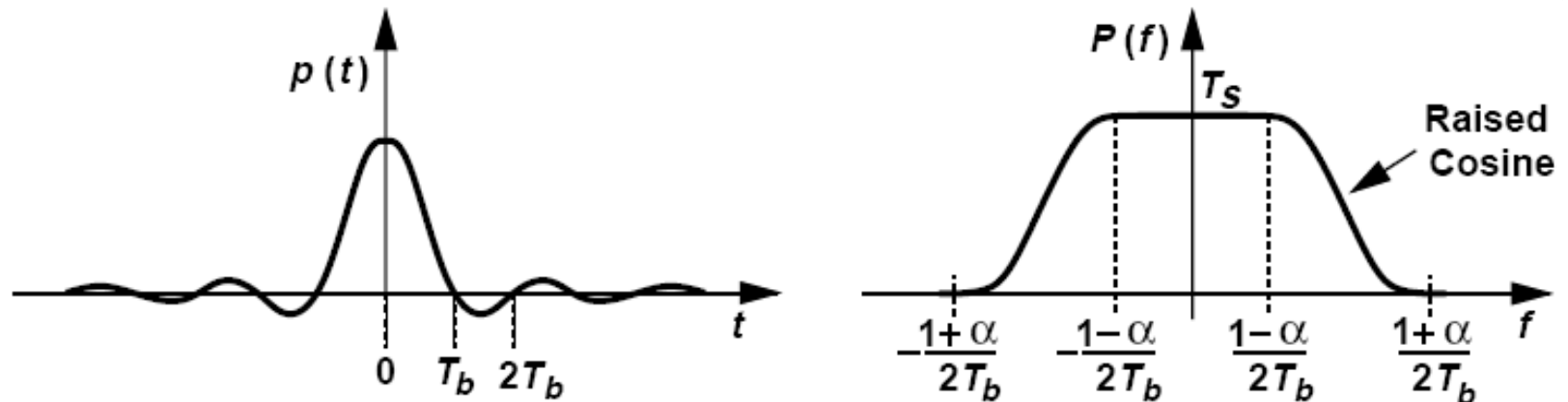
Interferencia Intersimbolos (ISI)

- ▶ Cada nivel de bits está dañado por la descomposición de las colas creadas por los bits anteriores.



Conformación de los pulsos

- ▶ Los pulsos en banda base son diseñados para ocupar un ancho de banda angosto utilizando un coseno elevado.



Características adicionales ASK/OOK

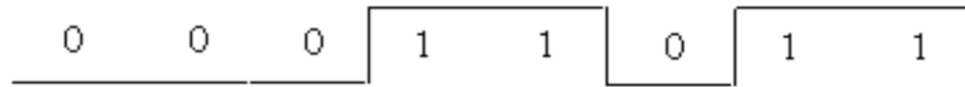
- ▶ Actualmente utilizan frecuencias entre 315 MHz y 2.4 GHz.
- ▶ Velocidades de transferencia de alrededor de 2 Mbps.
- ▶ Poseen un bajo consumo de energía.
- ▶ Poseen un bajo costo de implementación.
- ▶ Usos más comunes:
 - ▶ Comunicaciones para automatismos caseros o industriales.
 - ▶ Controles para portones o cerraduras a distancia.

Modulación ASK en múltiples niveles

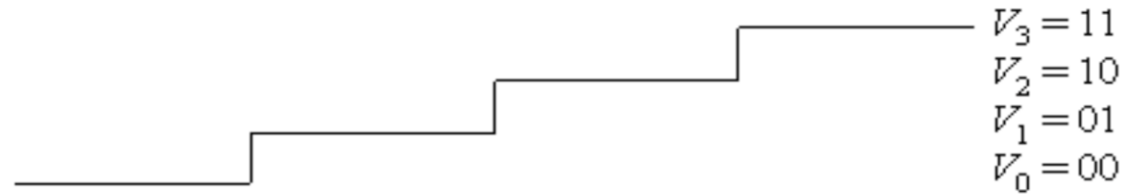
- ▶ Se puede mejorar la tasa de transferencia utilizando más de dos niveles de amplitud.
- ▶ Esto permite transmitir más de un bit por baudio.
- ▶ El ancho de banda de la señal generada no cambia respecto a un sistema de dos niveles.

Modulación ASK en múltiples niveles

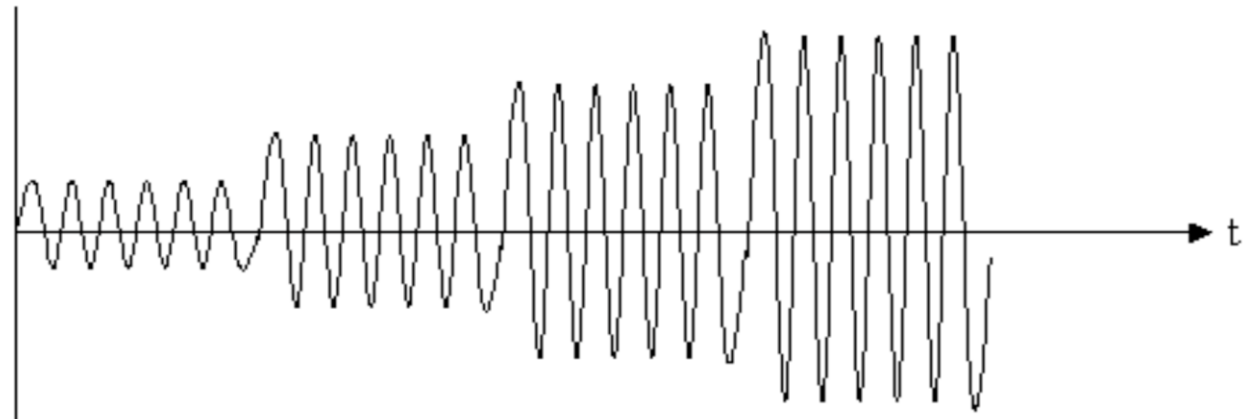
Information



m levels
 $m = 4$



4 level
ASK

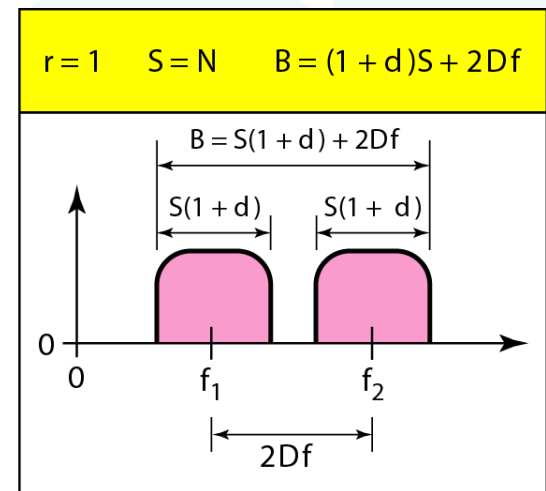
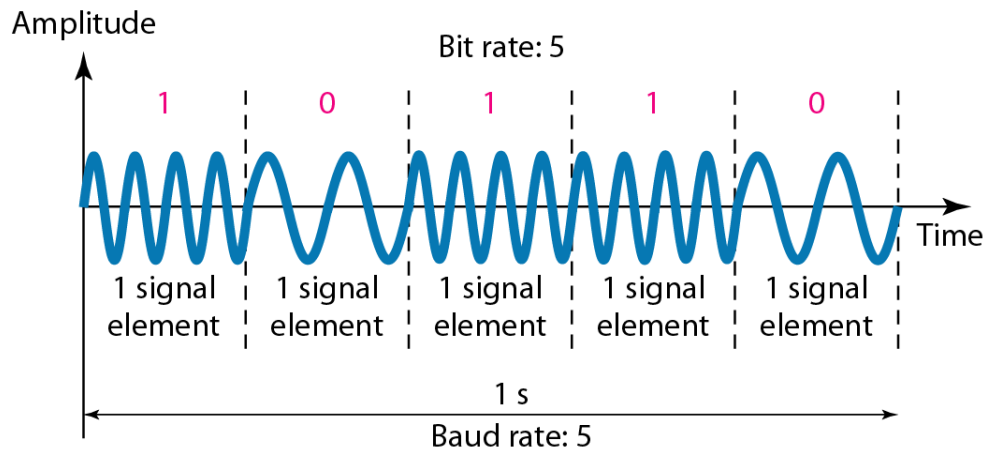


Frequency Shift Keying (FSK)

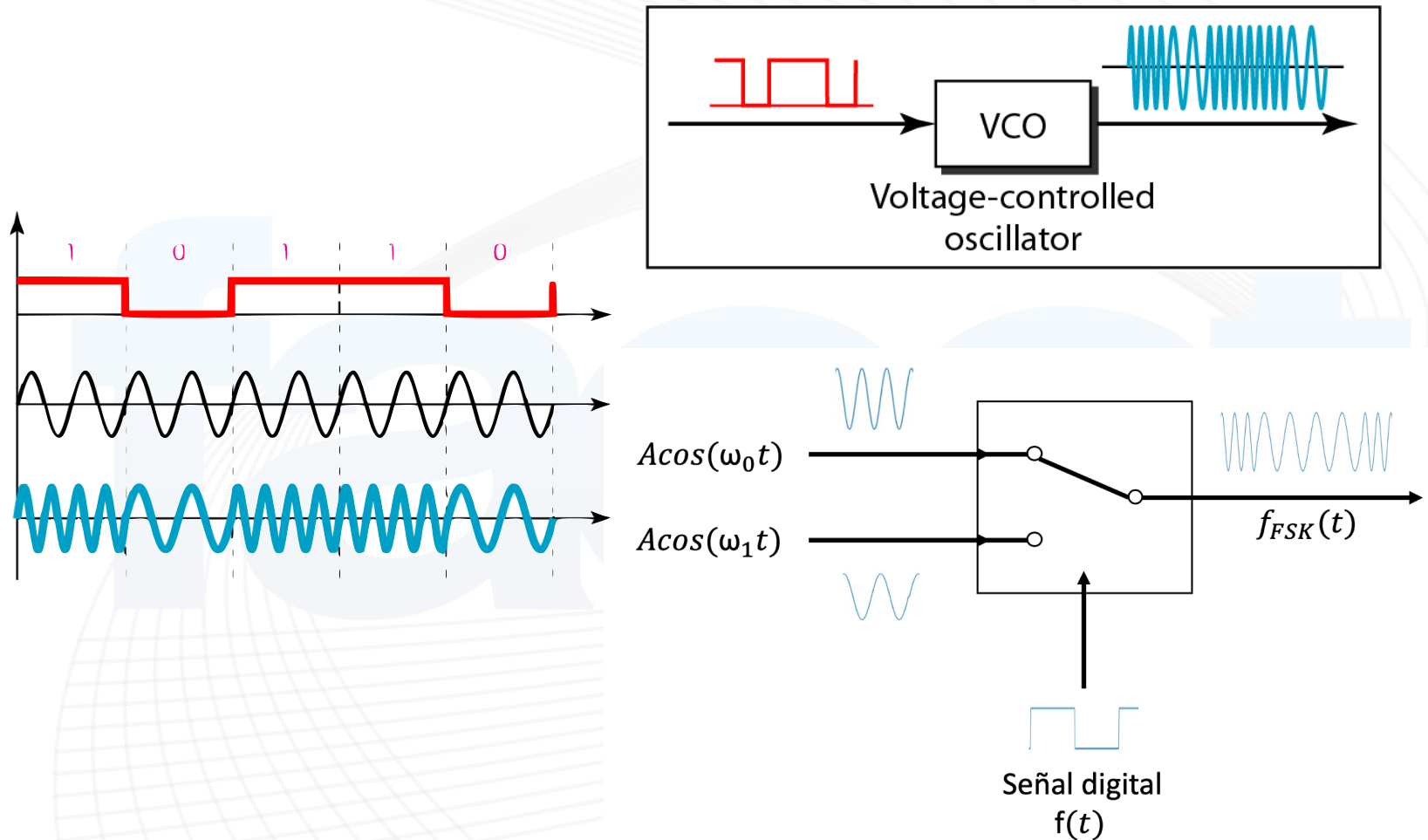
- ▶ Los valores binarios se representan mediante cambios en la frecuencia de la portadora.
- ▶ Se pueden utilizar dos portadoras de diferentes frecuencias para transmitir un bit por cada baudio.
- ▶ Se pueden utilizar más frecuencias para transmitir múltiples bits por cada baudio.
- ▶ Siempre se puede expresar como $f_c \pm \Delta f$.

Ancho de banda de FSK

- ▶ Una señal FSK se puede pensar como dos señales OOK superpuestas.

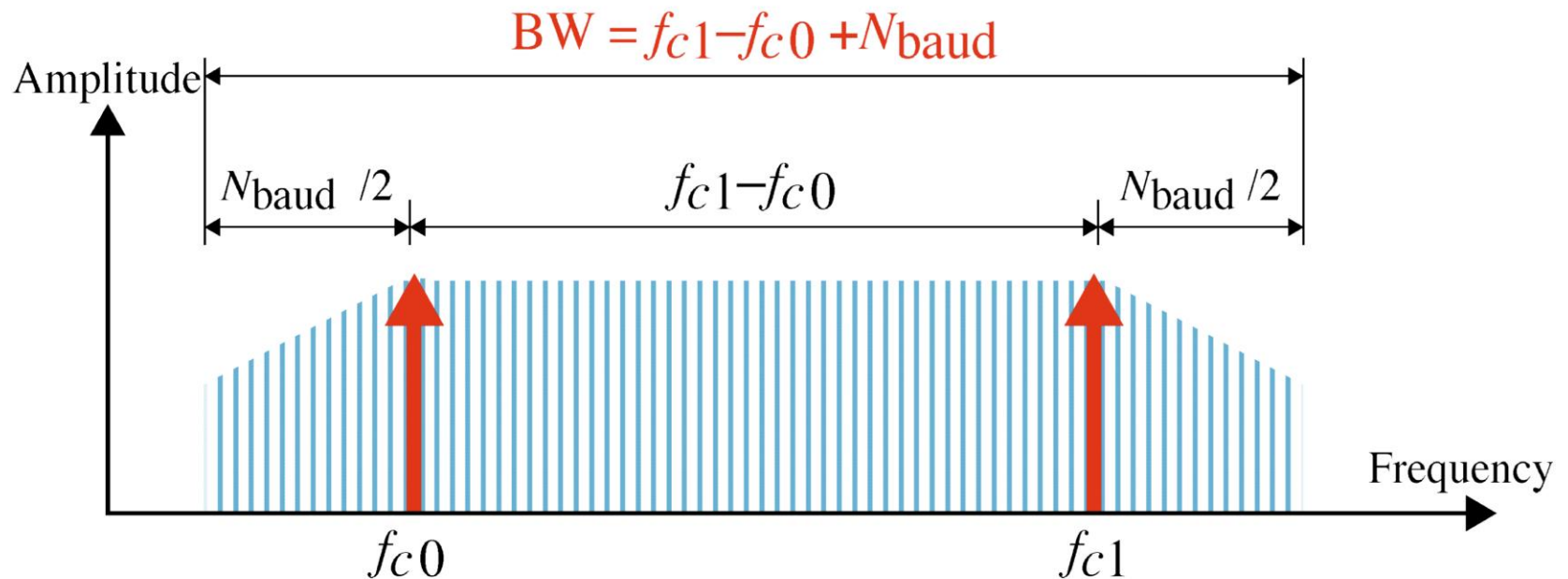


Modulador FSK



Ancho de Banda de FSK

- ▶ N_{baud} es la velocidad de modulación
- ▶ f_c es la frecuencia de la portadora

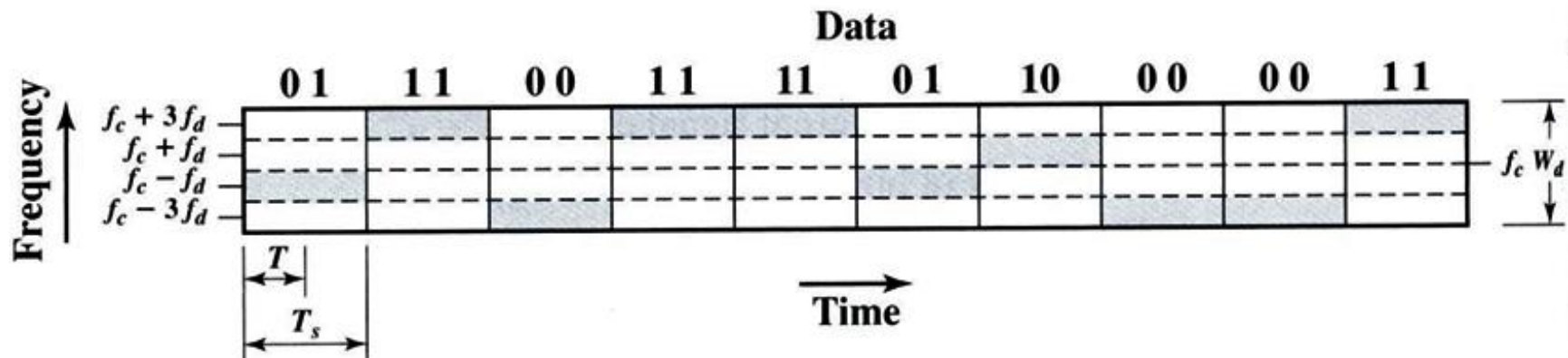


Modulación FSK coherente e incoherente

- ▶ En un esquema FSK incoherente, cuando se hace el cambio entre una frecuencia y la otra, no se tiene el cuidado de preservar la fase de la señal.
 - ▶ Es el esquema más simple.
- ▶ En el esquema FSK coherente, el cambio de frecuencias sólo ocurre en fase con la frecuencia precedente.
 - ▶ Es el más usado en la práctica.
 - ▶ Reduce la interferencia entre canales vecinos.
 - ▶ También conocido como FSK de fase continua.

Modulación FSK en múltiples niveles

- ▶ Para transmitir más de un bit por baudio en FSK se requieren múltiples frecuencias para representar cada uno de los símbolos.
- ▶ En este caso se requiere un ancho de banda mayor para transmitir múltiples bits por baudio.

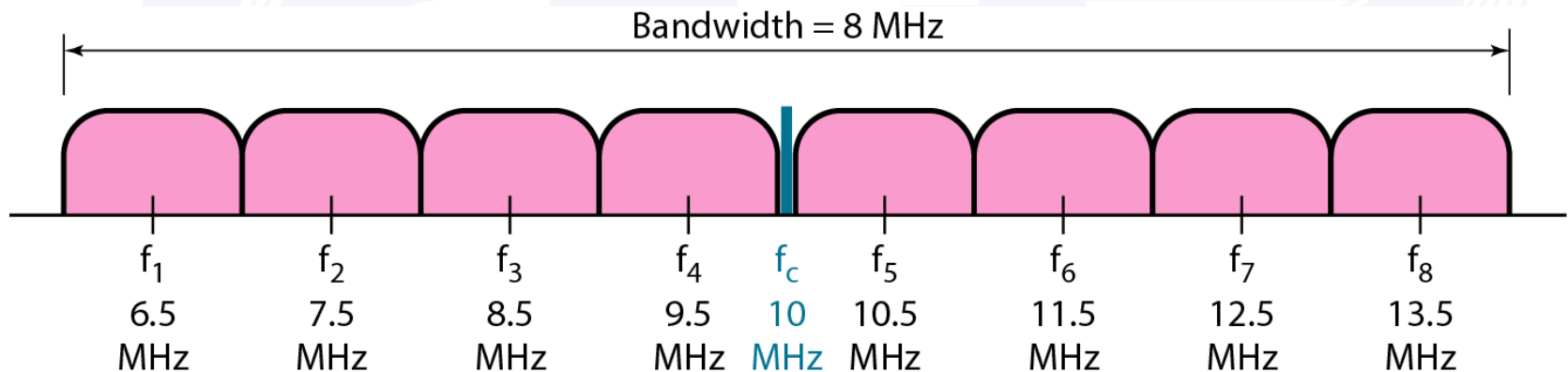


Ejemplo FSK en múltiples niveles

- ▶ Se necesita enviar 3 bits en cada instante de transmisión a una tasa de 3 Mbps.
- ▶ La frecuencia portadora es de 10 MHz.
- ▶ Calcule:
 - ▶ El número de niveles necesarios (número de frecuencias diferentes) necesarios.
 - ▶ La velocidad de modulación (baudrate).
 - ▶ El ancho de banda que la aplicación demanda.

Ejemplo FSK en múltiples niveles

- ▶ La cantidad de frecuencias será $2^3=8$
- ▶ El baudrate será $3 \text{ Mbps}/3 = 1 \text{ Mbaudio}$.
- ▶ Las frecuencias deben estar separadas 1 MHz.
- ▶ El ancho de banda B será $8 \times 1 \text{ MHz} = 8 \text{ MHz}$.

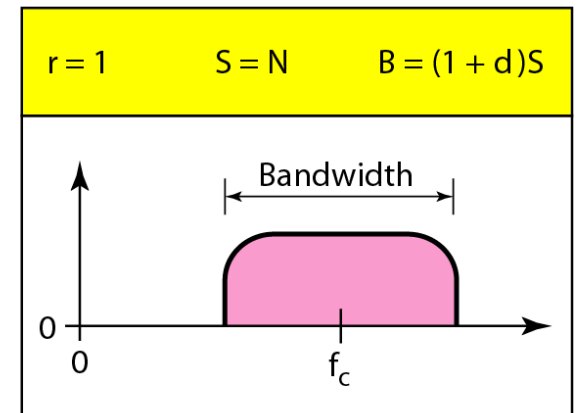
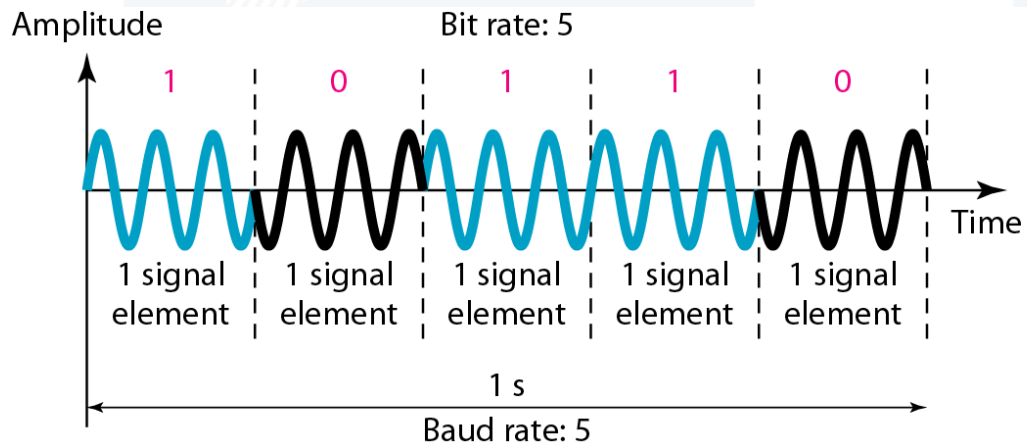


Phase Shift Keying (PSK)

- ▶ Los valores binarios se representan mediante cambios en la fase de la portadora.
- ▶ Se pueden utilizar dos fases diferentes para transmitir un bit por cada baudio.
- ▶ Se pueden utilizar más fases para transmitir múltiples bits por cada baudio.

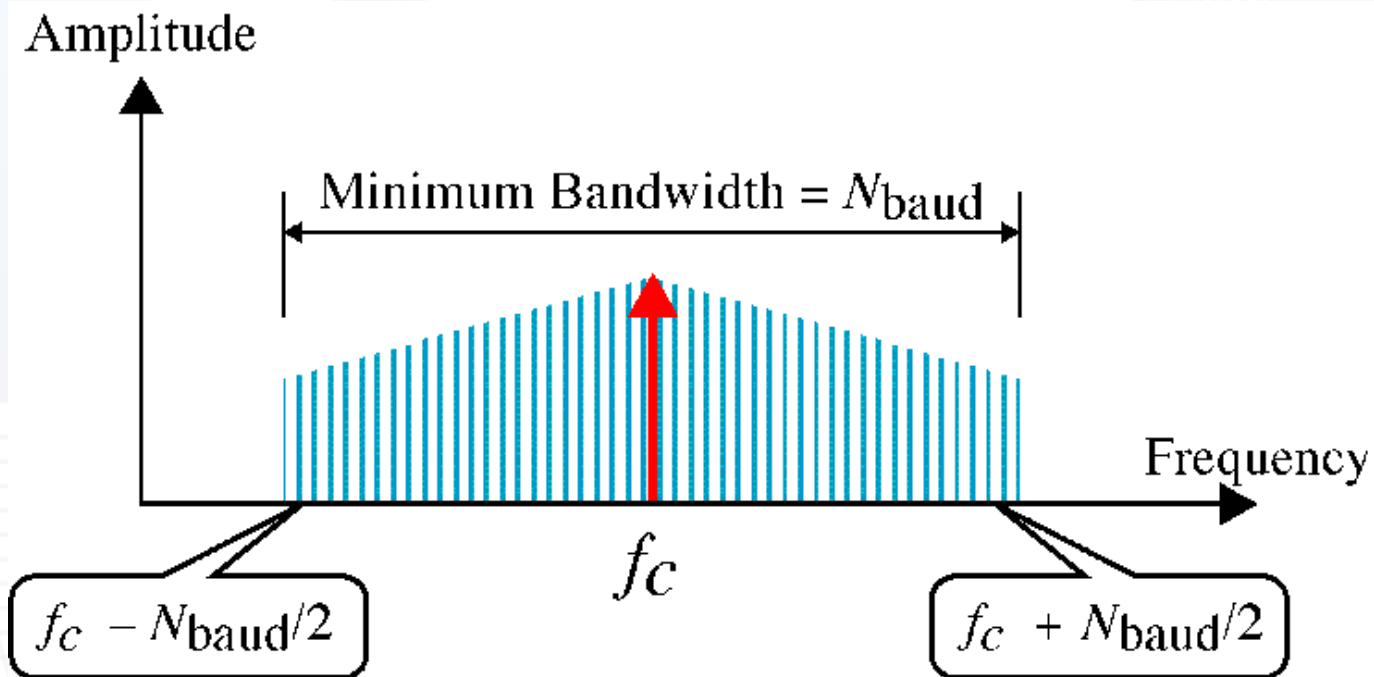
Ancho de Banda de PSK

- ▶ Una señal PSK tiene el mismo ancho de banda que una señal ASK.
- ▶ La modulación PSK es más robusta que ASK porque es inmune al ruido de amplitud.



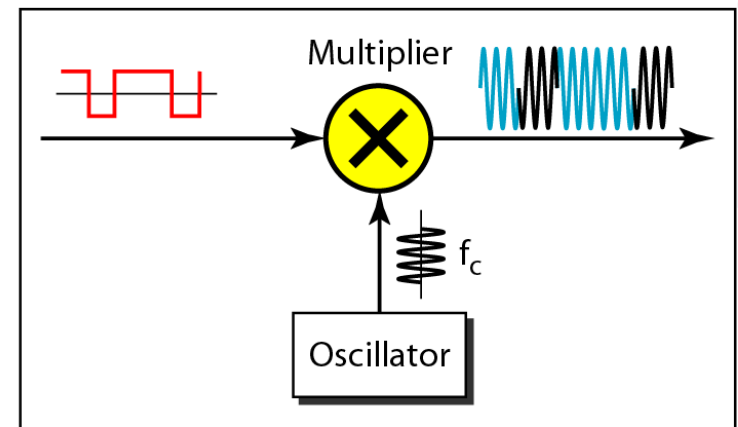
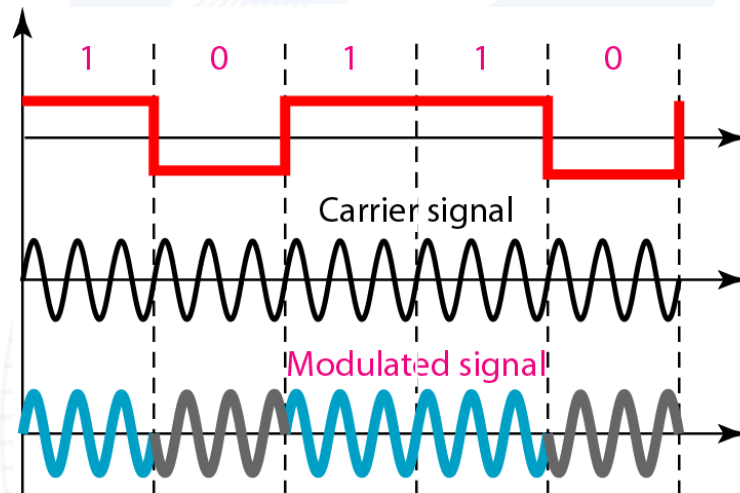
Ancho de Banda de PSK

- ▶ N_{baud} es la velocidad de modulación
- ▶ f_c es la frecuencia de la portadora



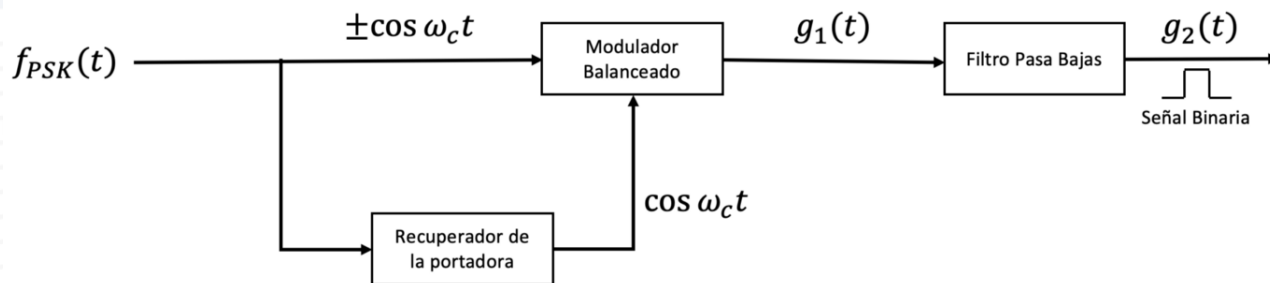
Modulador PSK de dos niveles

- ▶ Es muy similar a un modulador ASK pero la señal en banda base se codifica utilizando niveles de tensión simétricos.



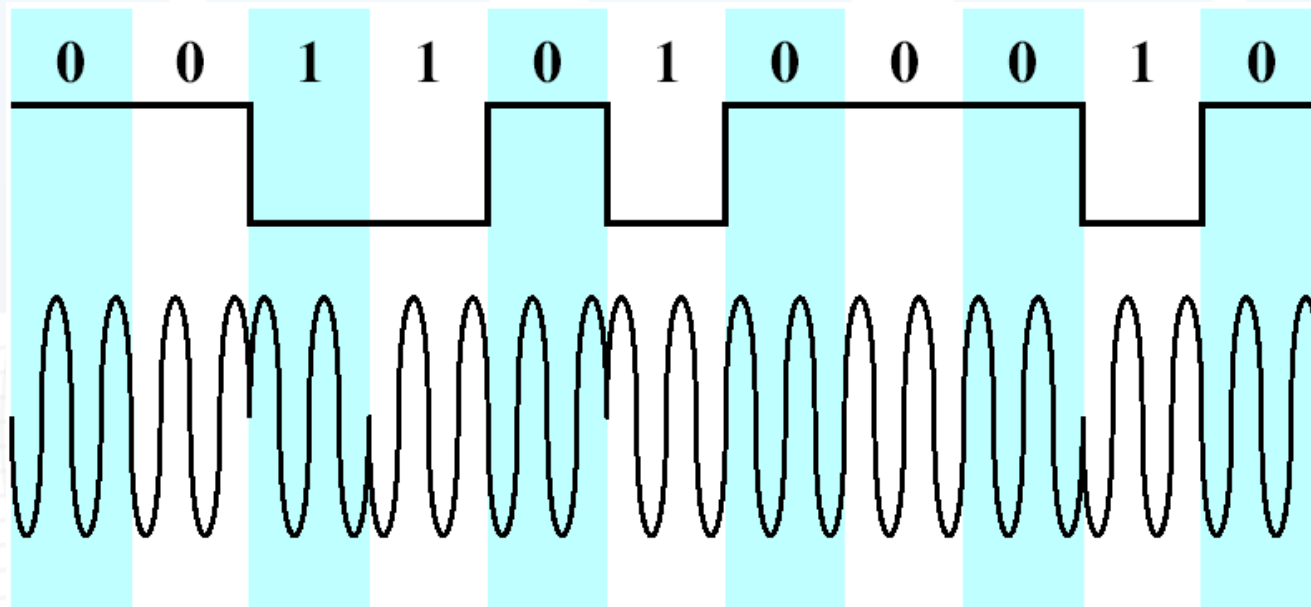
Demodulador de PSK

- ▶ A diferencia de ASK y FSK sólo se puede utilizar el método de detección sincrónica.
- ▶ La portadora se puede recuperar fácilmente de la señal recibida disminuyendo los problemas de corrimiento de frecuencia.
- ▶ Sin embargo todavía resulta difícil sincronizar la fase del receptor con la del transmisor (para que sea coherente), requisito clave para demodular la señal correctamente.



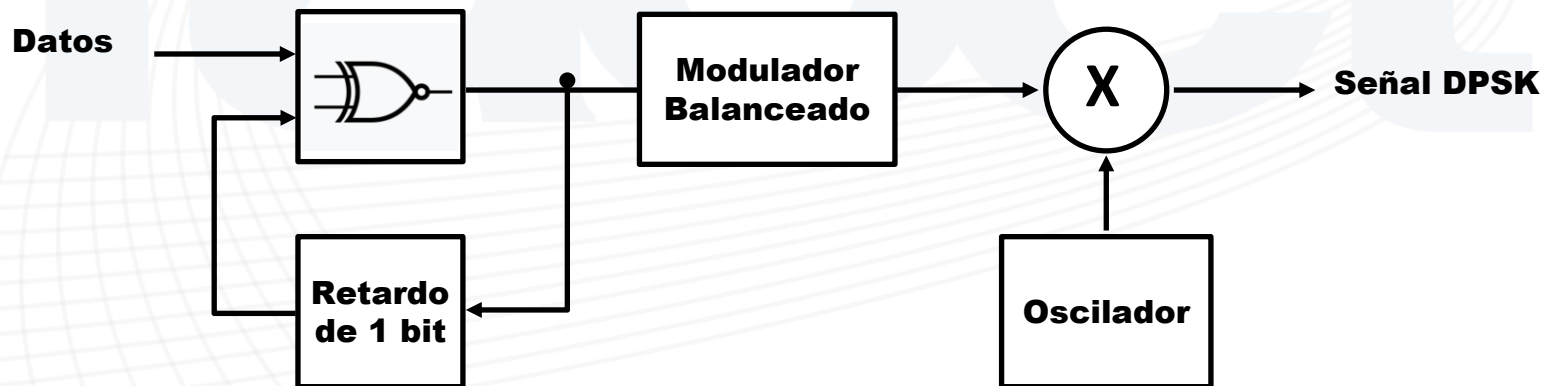
Differential Phase Shift Keying (DPSK)

- ▶ El cambio de fase se realiza en función del bit anterior transmitido.
- ▶ Por ejemplo, un '0' mantiene la fase y un '1' cambia la fase.



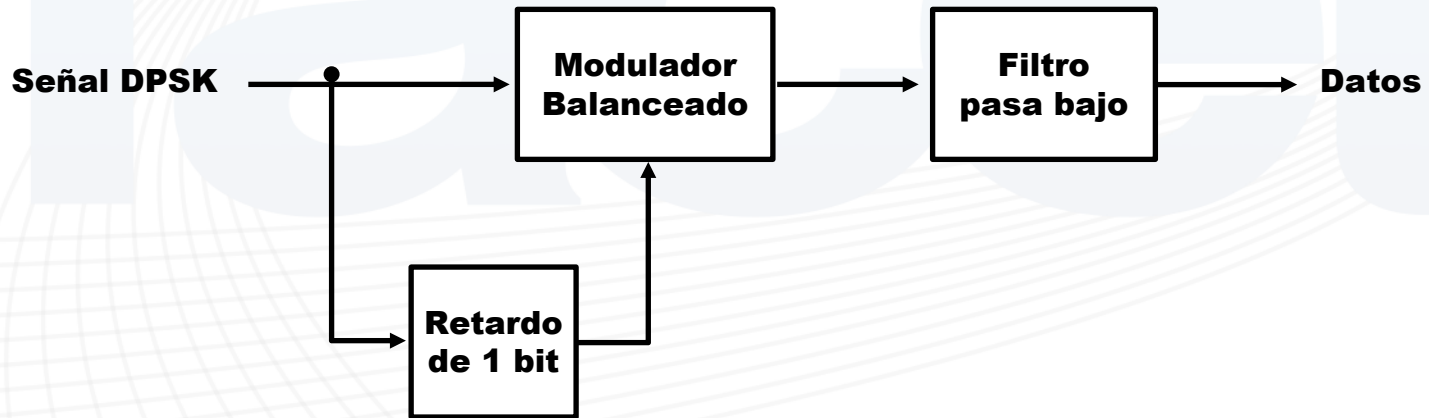
Modulador DPSK

- ▶ Se agrega una compuerta XNOR y un retardo de un bit para modificar la señal de entrada.
- ▶ El resultado se procesa como en PSK.



Demodulador DPSK

- ▶ Es prácticamente igual al demodulador PSK pero también con el agregado de un retardo de un bit.
- ▶ Es no coherente, pero mucho más simple.
 - ▶ Más propenso a errores.



Binary Phase Shift Keying (BPSK)

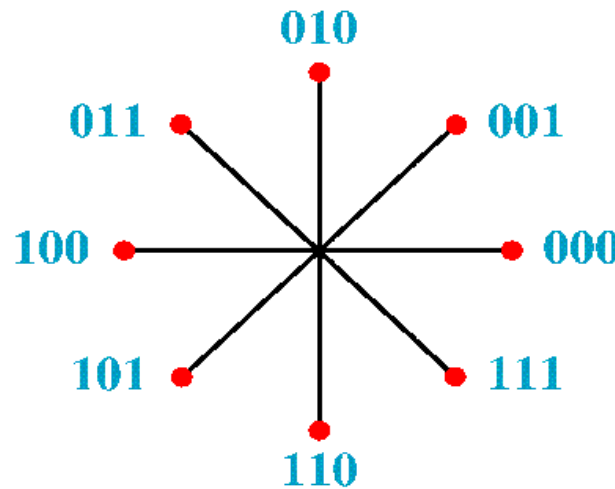
- ▶ Es un caso particular de PSK, en el cual las dos fases están separadas exactamente por 180° .
- ▶ Al ser la mayor separación de fases posible, es la variante de PSK que mejor soporta alteraciones por ruido.
- ▶ La limitación es que solamente puede transmitir un bit por baudio.
- ▶ Normalmente es coherente, por lo que hay una versión no coherente denominada DBPSK.
 - ▶ Usa el mecanismo diferencial visto anteriormente.

Modulación PSK en múltiples niveles

- ▶ Para transmitir más de un bit por baudio en PSK se requieren múltiples fases para representar cada uno de los símbolos.
- ▶ Se empiezan a representar por lo que se denomina **diagrama de constelaciones**.

Tribit	Phase
000	0
001	45
010	90
011	135
100	180
101	225
110	270
111	315

Tribits
(3 bits)



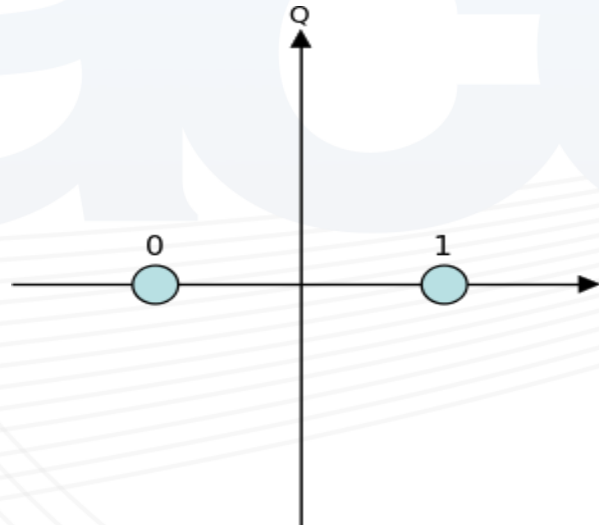
Constellation diagram

Diagrama de constelaciones

- ▶ Es un método conveniente visualmente para representar modulaciones de tipo PSK.
- ▶ La idea es mostrar un plano, con ejes perpendiculares:
 - ▶ El eje x se denomina **I**, por las señales que están en fase (*in-phase*).
 - ▶ El eje y se denomina **Q**, por las señales que están en cuadratura (*Quadrature*), o defasadas.
- ▶ Cada modulación será representada por un punto en el plano.
 - ▶ El ángulo del punto representa la desviación en fase.
 - ▶ La distancia del punto al origen representa la amplitud.
 - ▶ Cada punto se denomina **punto de constelación**.
- ▶ Usualmente se traza un círculo, para indicar que todas las señales poseen la misma amplitud.
 - ▶ Y que todas transmiten la misma energía.

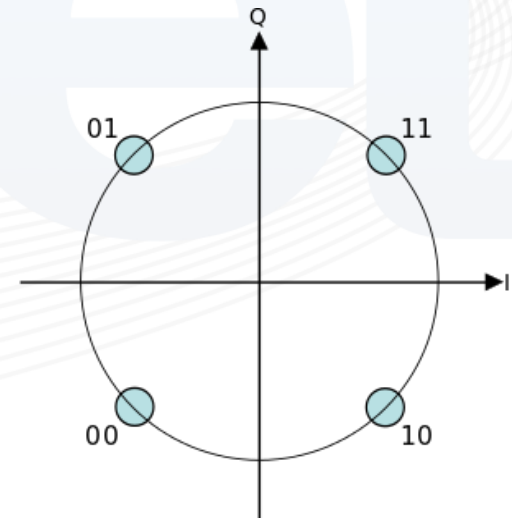
Diagrama de constelaciones

- ▶ La cantidad de puntos en un diagrama de constelaciones se corresponde con la cantidad de símbolos a transmitir, M .
- ▶ Entonces, una modulación con M puntos de constelación transmite $N = \log_2 M$ bits por baudio.
- ▶ El diagrama de constelaciones más simple es para **BPSK**:

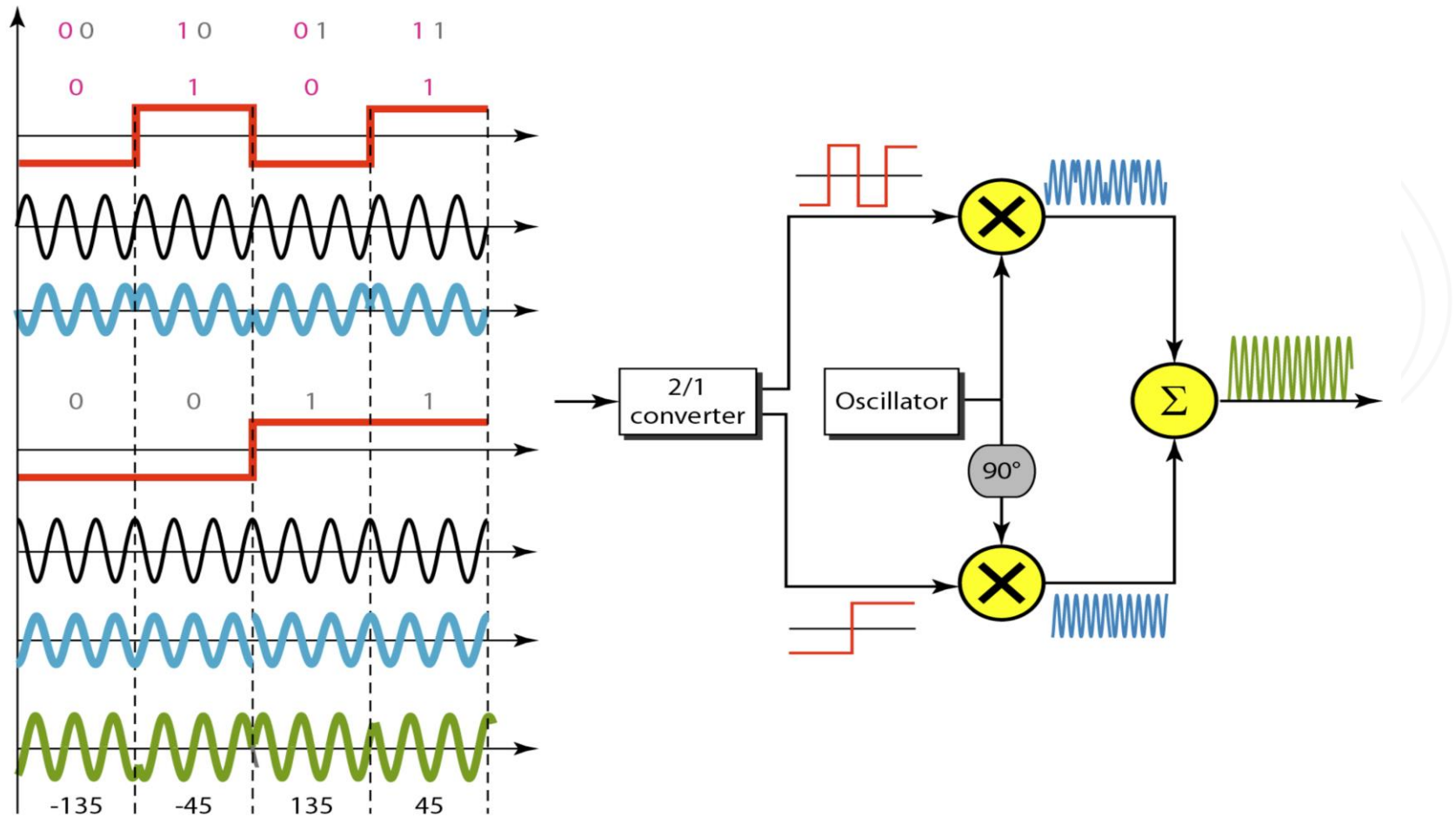


Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

- ▶ Variante de PSK para transmitir **dos bits por baudio**.
- ▶ Se utilizan dos portadoras en cuadratura (con un corrimiento de fase de 90 grados).
- ▶ Se divide el flujo de datos en dos para generar dos señales PSK, una con cada portadora.
- ▶ Las dos señales PSK moduladas se suman para generar los elementos de señal.
- ▶ Diagrama de constelación:



Modulador QPSK

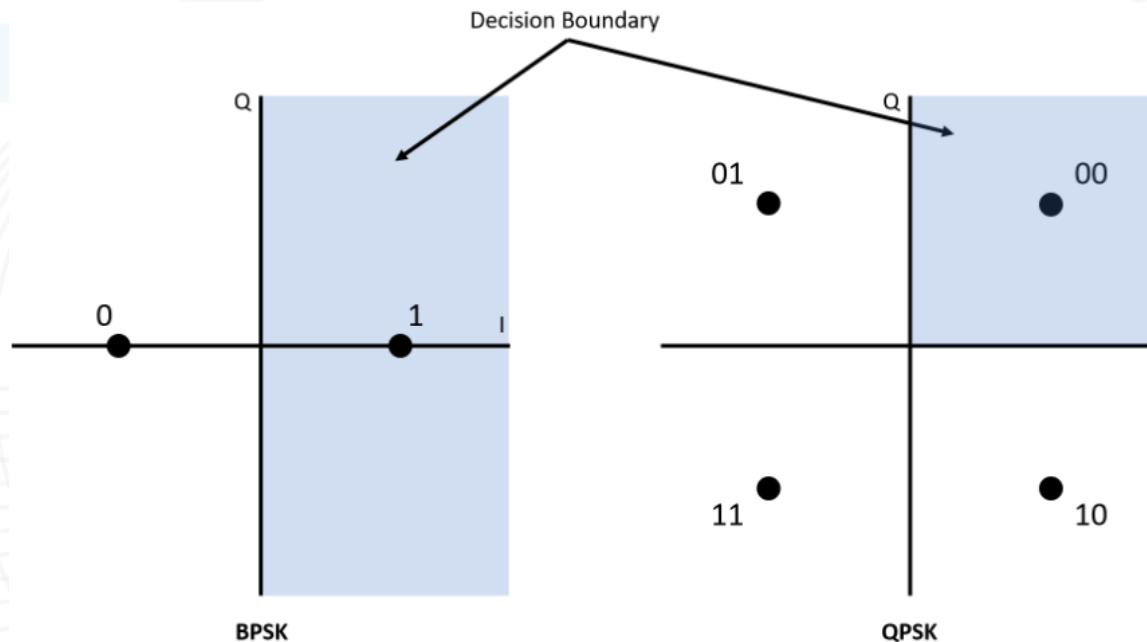


Ventajas de QPSK

- ▶ La principal ventaja es que, como transmite 2 bits por baudio, duplica la velocidad de transmisión de BPSK, usando el mismo ancho de banda.
- ▶ O alternativamente, para la misma velocidad de transmisión, necesita la mitad del ancho de banda.

Desventajas de QPSK

- ▶ Es más difícil detectar los cambios de fase en comparación con BPSK, ya que los límites de decisión son más marcados.
- ▶ Por lo tanto, es más propenso a generar errores en la recepción.

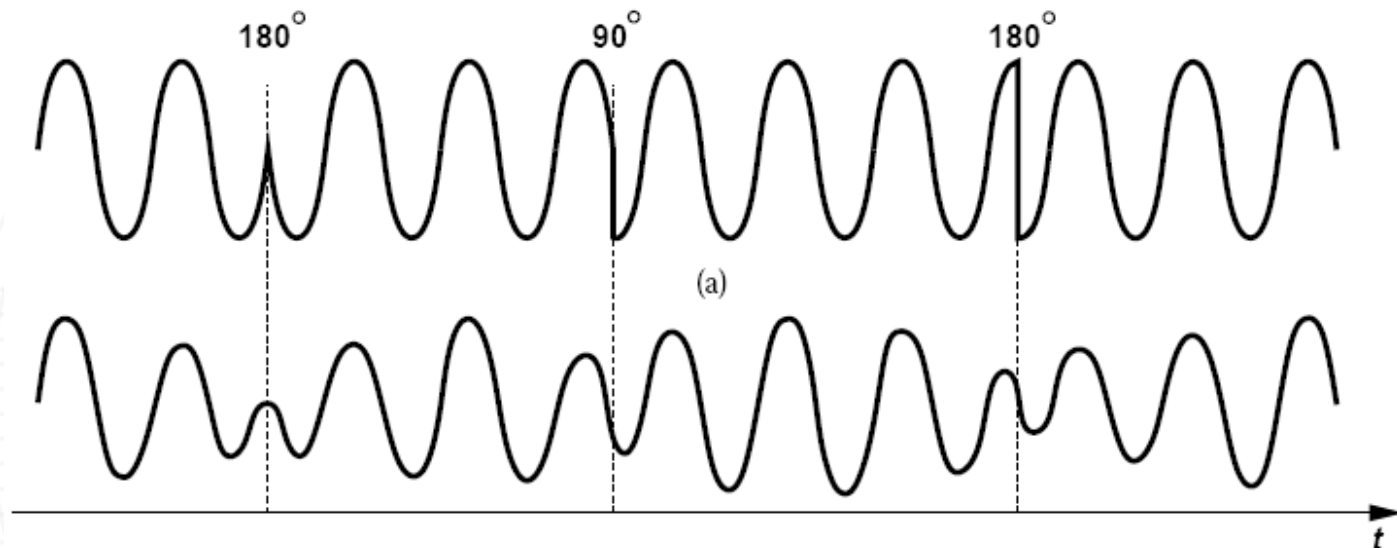


Desventajas de QPSK

- ▶ Al igual que PSK y BPSK, es una modulación coherente.
- ▶ Por lo tanto, es costoso el demodulador.
- ▶ La solución es la misma vista anteriormente: utilizar una variante diferencial, denominada DQPSK.
 - ▶ Esta variante es utilizada en Bluetooth 2 y los primeros estándares de WiFi.

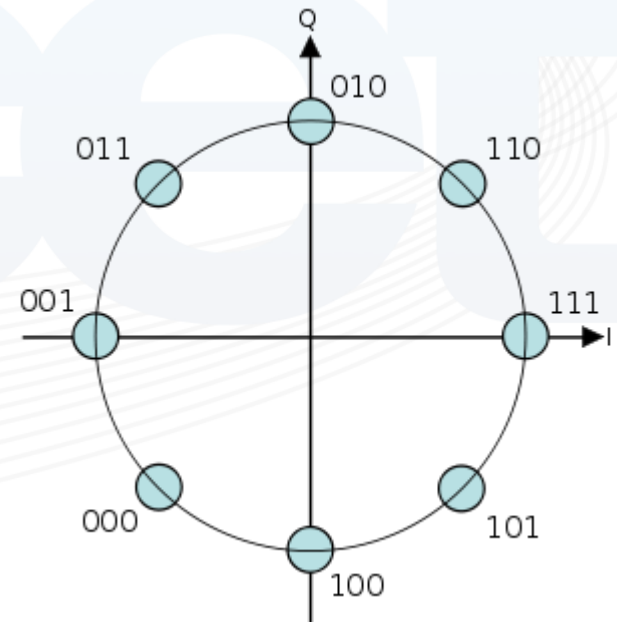
Desventajas de QPSK

- ▶ Por la forma de los pulsos la amplitud de la señal de salida experimenta grandes cambios cada vez que la fase cambia 90° o 180° .
- ▶ El resultado es una envolvente de amplitud en la señal.



Modulaciones PSK de mayor orden

- ▶ En teoría, se pueden construir modulaciones PSK con mayor cantidad de bits por baudio.
- ▶ En la práctica, la mayor es con 8 fases, denominada 8-PSK.
- ▶ Aumentar el número de fases genera muchos errores en la recepción.



Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

- ▶ Nace de la combinación de ASK y PSK.
- ▶ Los canales I y Q se modulan en amplitud a la misma frecuencia pero defasados 90° .
- ▶ Las señales se combinan para formar la señal QAM.
- ▶ PSK pasa a ser un caso particular de QAM.

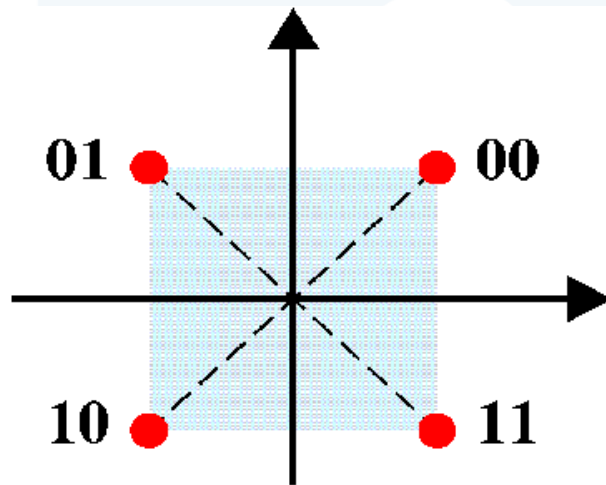
Constelaciones QAM

- ▶ Normalmente en arreglos en forma de cuadrícula, con igual espaciado vertical y horizontal.
 - ▶ Sin embargo, otras configuraciones son posibles.
- ▶ Permite mayores velocidades de transferencia que 8-PSK al distribuir mejor los puntos de constelación.

Constelaciones QAM

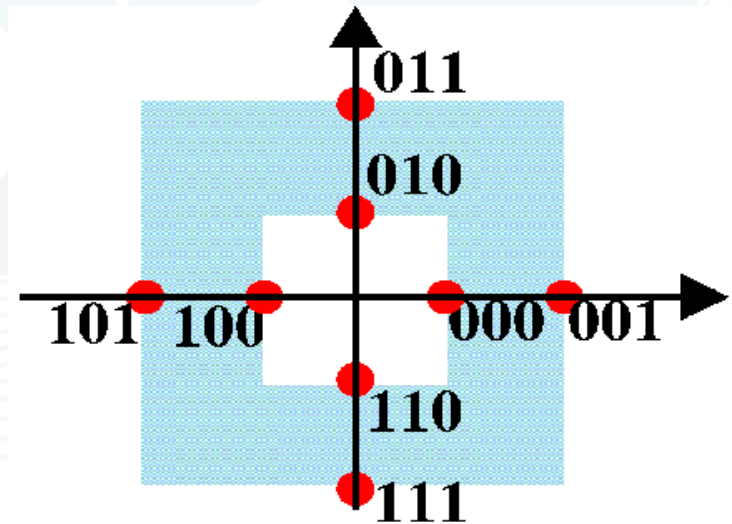
▶ 4-QAM (igual que QPSK)

- ▶ 1 Amplitud
- ▶ 4 Fases
- ▶ 4 combinaciones
- ▶ 2 bits por baudio

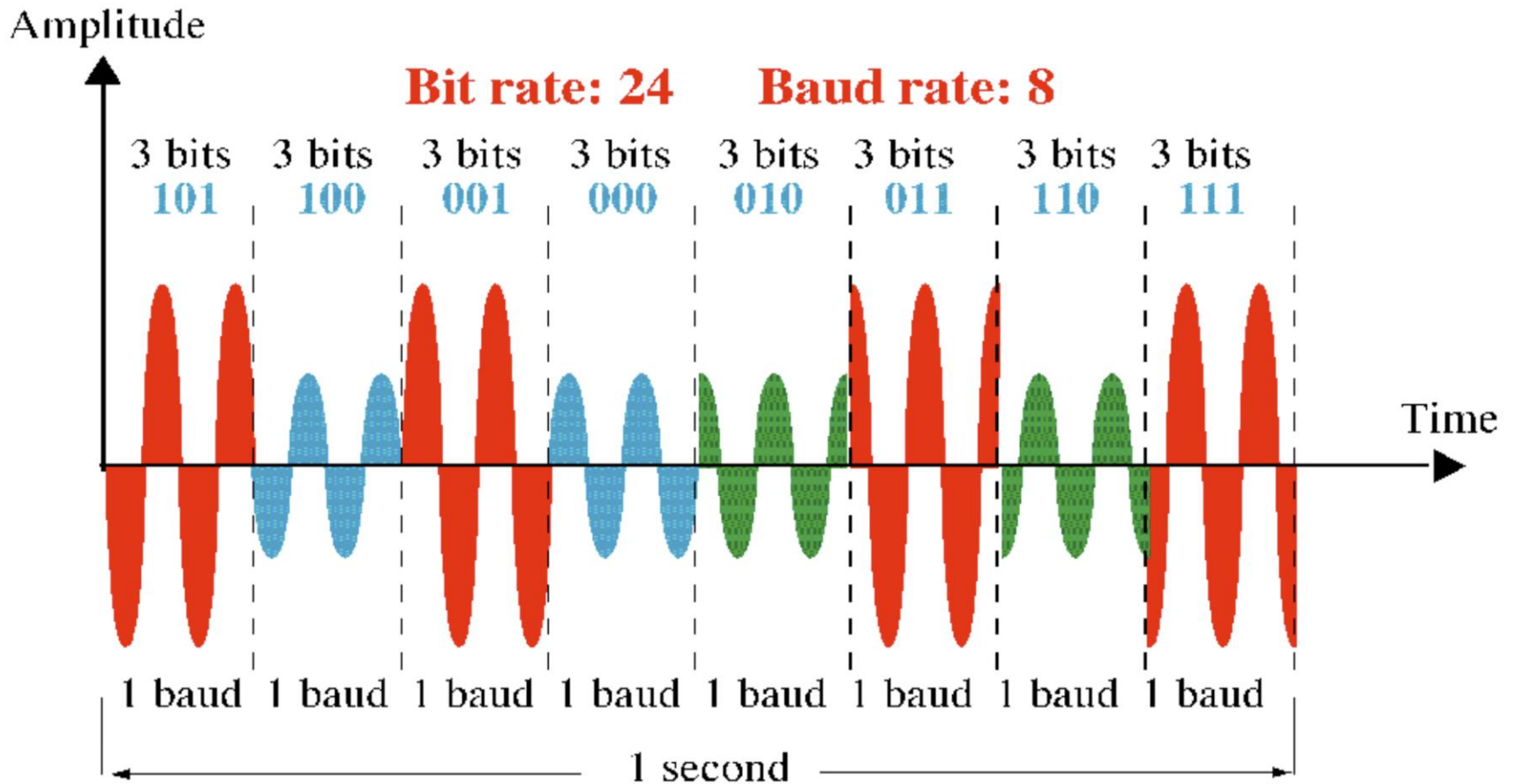


▶ 8-QAM

- ▶ 2 Amplitudes
- ▶ 4 Fases
- ▶ 8 combinaciones
- ▶ 3 bits por baudio



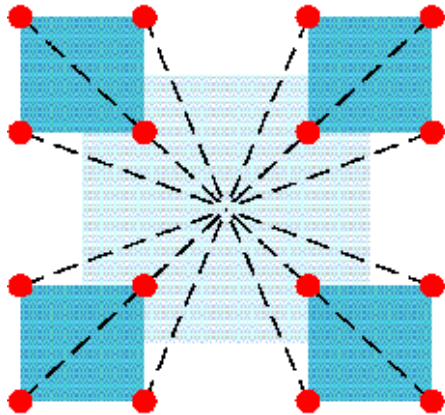
Ejemplo modulación 8-QAM



Constelaciones QAM

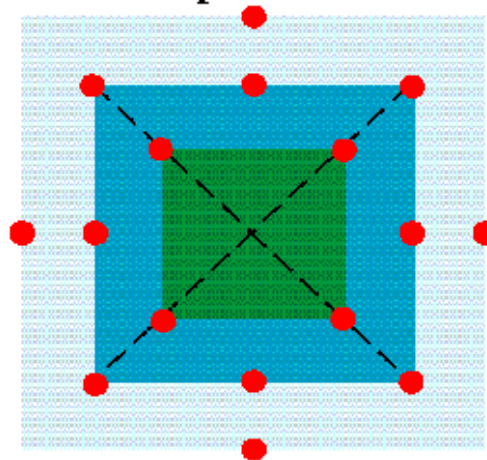
▶ 16-QAM

- ▶ 3 Amplitudes
- ▶ 12 Fases
- ▶ 36 combinaciones
- ▶ 4 bits por baudio



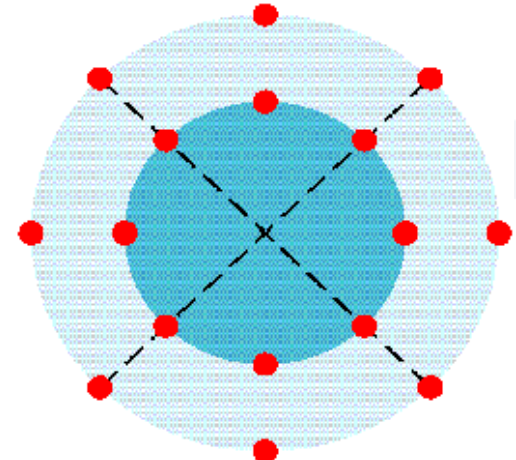
▶ 16-QAM

- ▶ 4 Amplitudes
- ▶ 8 Fases
- ▶ 32 combinaciones
- ▶ 4 bits por baudio



▶ 16-QAM

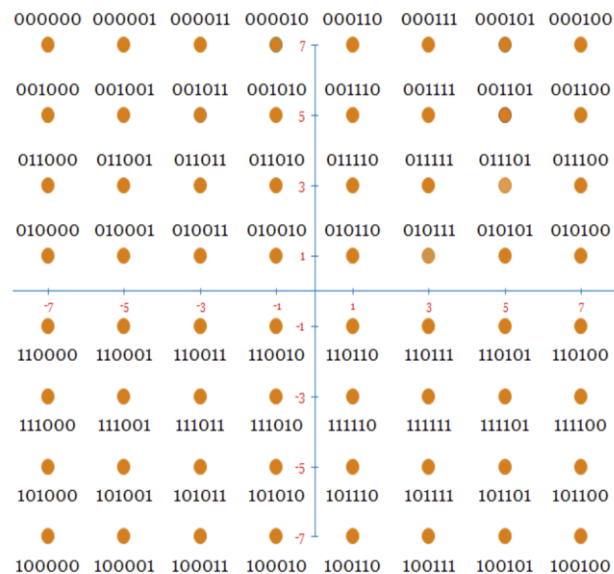
- ▶ 2 Amplitudes
- ▶ 8 Fases
- ▶ 16 combinaciones
- ▶ 4 bits por baudio



Constelaciones QAM

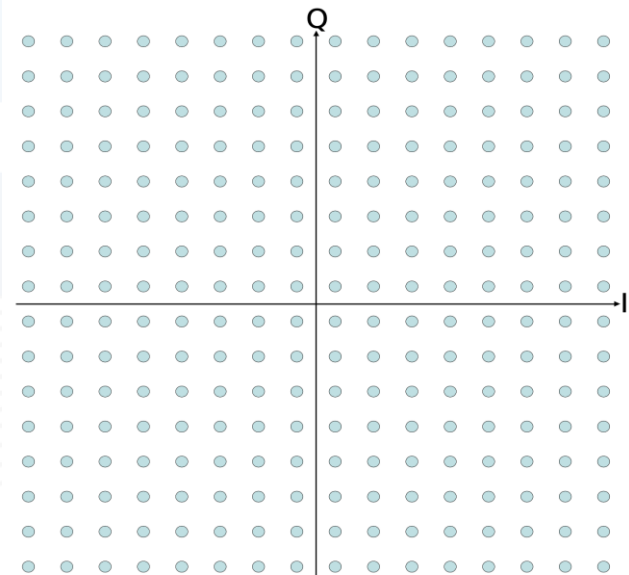
▶ 64-QAM

- ▶ 8 Amplitudes en cada canal
- ▶ 64 combinaciones
- ▶ 6 bits por baudio



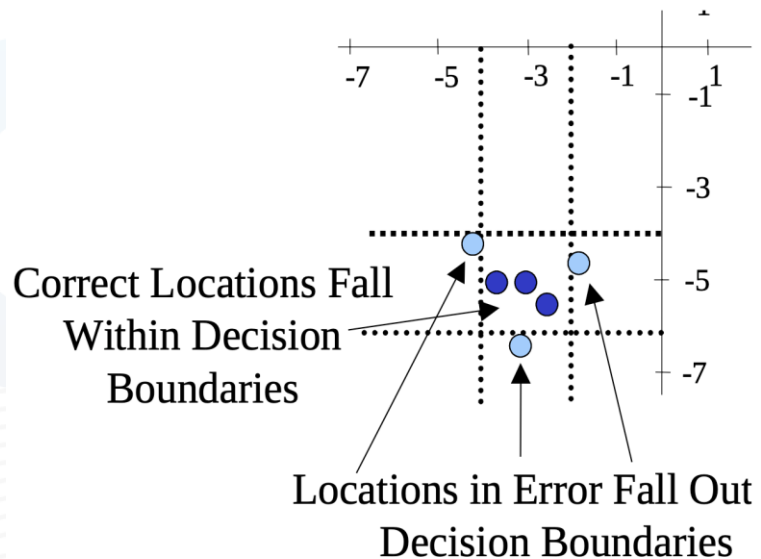
▶ 256-QAM

- ▶ 16 Amplitudes en cada canal
- ▶ 256 combinaciones
- ▶ 8 bits por baudio



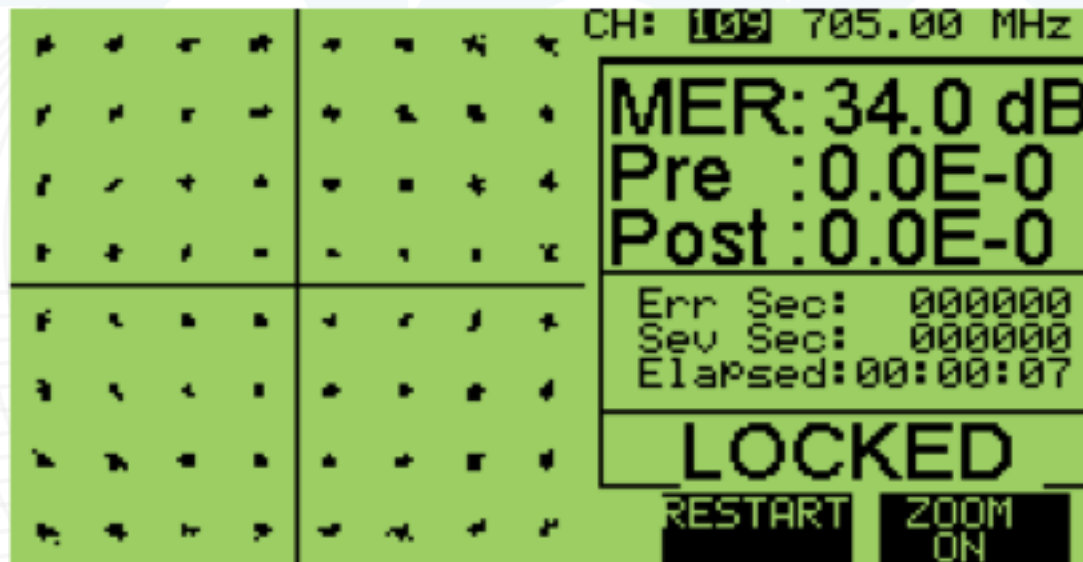
Bordes de decisión

- ▶ Cada ubicación en la constelación está enmarcado por los límites de decisión.
- ▶ Si la señal cae dentro de estos límites se recibirán los datos correctos.
- ▶ Si debido al ruido o interferencias cae en un área adyacente, entonces los datos estarán con error.



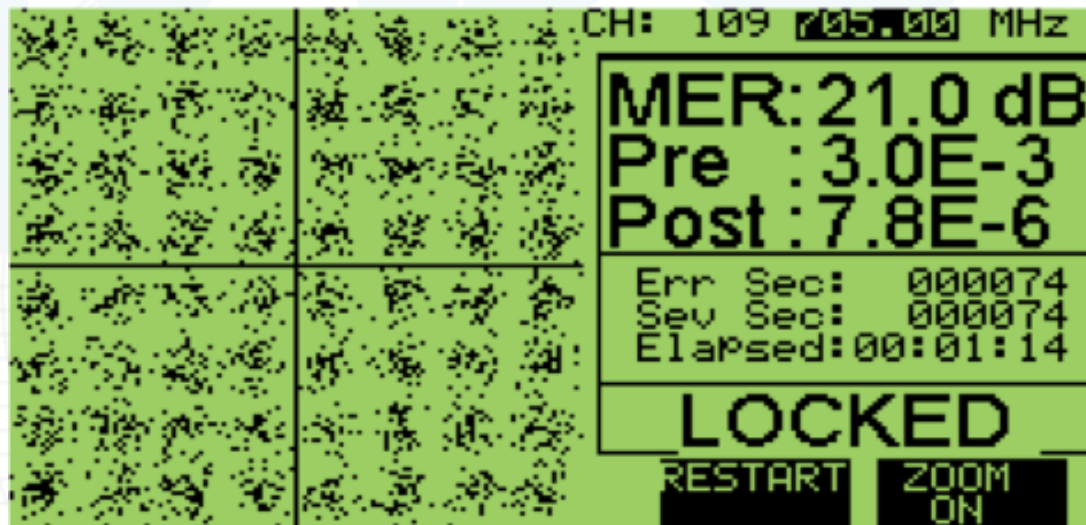
Ejemplos reales de 64-QAM

- ▶ En esta imagen del instrumento los puntos están bien definidos y las áreas de decisión bien formadas.
- ▶ Indica una buena ganancia, bajo ruido de fase y baja tasa de error en la modulación.



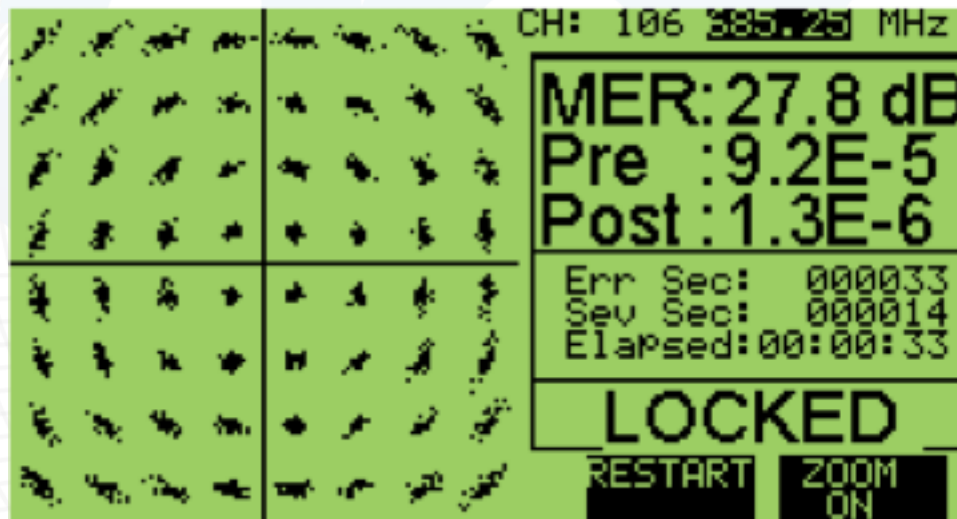
Ejemplos reales de 64-QAM

- ▶ En esta imagen del instrumento los puntos están dispersos y las áreas de decisión difusas.
- ▶ Indica mucho ruido en la señal y altas tasas de error en la modulación.



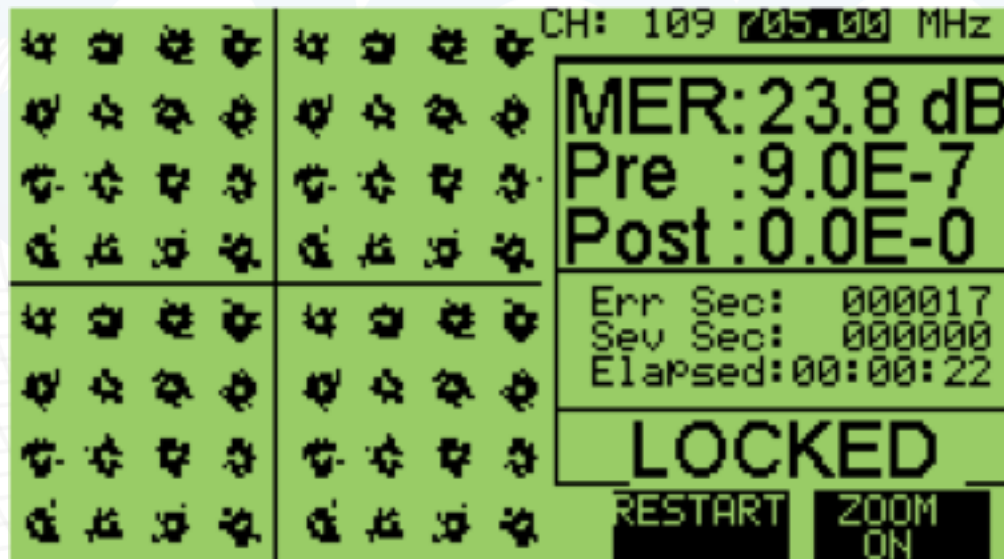
Ejemplos reales de 64-QAM

- ▶ En esta imagen del instrumento los puntos van rotando respecto al centro de la constelación.
- ▶ Indica mucho ruido de fase o problemas de estabilidad en el oscilador del transmisor.



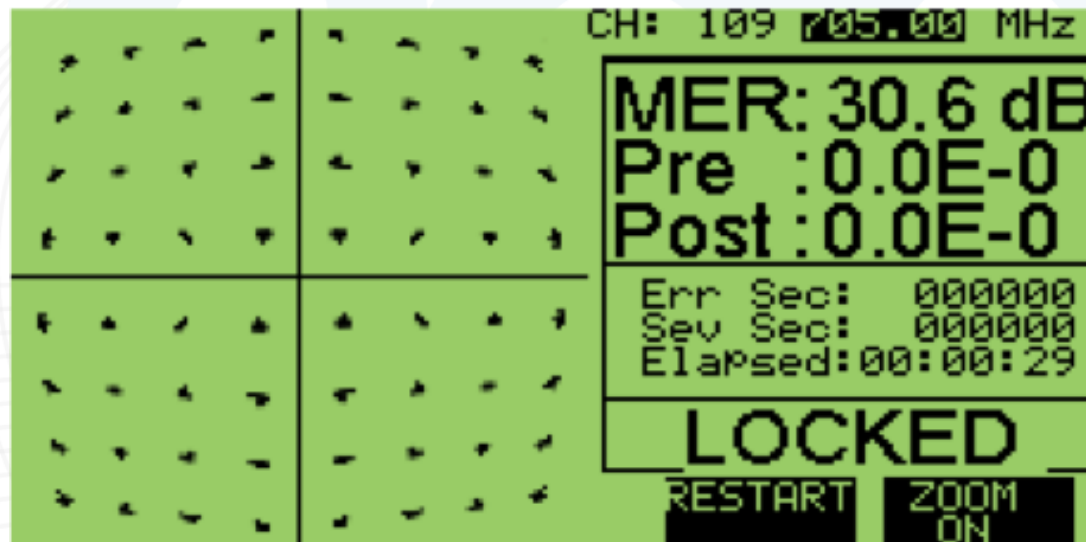
Ejemplos reales de 64-QAM

- ▶ En esta imagen del instrumento los puntos se agrupan formando círculos.
- ▶ Indica problemas de interferencias con armónicas del 2 o 3 orden.



Ejemplos reales de 64-QAM

- ▶ En esta imagen del instrumento los puntos se deforman con un aspecto de tonel.
- ▶ Indica problemas de ganancia con los amplificadores y/o filtros.



Multiplexado en Frecuencia (FDM)

- ▶ *Frequency Division Multiplexing*
- ▶ No es una técnica de modulación en sí.
- ▶ Consiste en dividir un determinado ancho de banda en una serie de bandas que no se superponen.
- ▶ Permite que un mismo medio de transmisión sea utilizado para transmitir múltiples señales.
 - ▶ O para transmitir múltiples segmentos de una misma señal, como en FSK.
- ▶ Es una técnica muy utilizada, en múltiples ámbitos: radio, TV, cable, satélites, DSL, fibras ópticas, etc.

Modulación OFDM

- ▶ *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
- ▶ Es una variante de FDM, en el cual el bitstream de datos es dividido en múltiples partes.
- ▶ Cada una de estas partes es usada para modular una sub-portadora diferente.
 - ▶ Estas sub-portadoras son ortogonales entre sí.
 - ▶ Cada sub-portadora puede usar cualquier esquema de modulación visto.
 - ▶ De esta manera, se transmiten múltiples bits en paralelo.

Modulación OFDM

- ▶ Cada sub-portadora estará separada de las demás por un $\Delta f = 1 / T_b$.
- ▶ Teniendo N sub-portadoras, el ancho de banda es $B = N * \Delta f$.
 - ▶ Logra velocidades de transmisión muy altas, cercanas a las capacidades máximas del canal definidas por Nyquist.
- ▶ Por ejemplo, con un tiempo de bit de 1 ms (velocidad de modulación de 1 kHz), el delta entre sub-portadoras también es de 1 kHz.
 - ▶ En un ancho de banda de 1 MHz, podríamos transferir hasta 1000 bits por baudio.
 - ▶ En la práctica, los números son más bajos, pero mayores que los de otras modulaciones vistas.

Ventajas y Desventajas OFDM

- ▶ Su principal ventaja es que provee una muy buena protección contra las adversidades del canal
 - ▶ Atenuación, interferencias, etc.
- ▶ Esto la hace muy usada
 - ▶ ADSL, TV digital, 4G.
 - ▶ Wi-Fi usa OFDM con cuatro posibles modulaciones: BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM.
- ▶ Requiere una sincronización de frecuencia muy precisa entre el transmisor y el receptor.
- ▶ Es bastante susceptible de la Interferencia Intersímbolos.
- ▶ Requiere sí o sí alguna técnica de corrección de errores.

Resumen

- ▶ Definiciones y terminología:
 - ▶ Amplitud (A), Frecuencia (f), Fase, Espectro de una señal, Ancho de Banda (B), Relación señal-ruido (SNR), y Capacidad del canal (Nyquist y Shannon).
- ▶ Características y objetivos de modulaciones de datos digitales en señales analógicas.
- ▶ Modulación ASK: variaciones de amplitud.
 - ▶ Si nivel bajo es 0 V → Modulación OOK.
- ▶ Modulación FSK: variaciones de frecuencia.
 - ▶ Requiere al menos el doble de ancho de banda que ASK.
 - ▶ Permite mejorar R enviando múltiples bits por baudio, pero aumentando linealmente B.
- ▶ Modulación PSK: variaciones de fase.
 - ▶ Si las diferencias entre las fases es de 180° , entonces la modulación es binaria BPSK.
 - ▶ Si tenemos 4 niveles: $M=4$, $N=2$, $R=2$, $D=1$, se llama QPSK.
 - ▶ Como es más difícil sincronizar la fase en el receptor, se usa un modo diferencial: DPSK, DBPSK o DQPSK.

Resumen

- ▶ Diagrama de constelaciones, como método para representar visualmente una modulación de fase de alto orden.
- ▶ Modulación QAM: variaciones de amplitud y de fase (ASK+PSK).
 - ▶ Permite mayores velocidades de transferencia, al transmitir más de un bit por baudio.
 - ▶ M-QAM tiene M puntos de constelación, y transmite $N = \log_2 M$ bits por baudio (8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, etc.)
 - ▶ La clave es cómo distribuir los puntos en el diagrama de constelación.
- ▶ Modulación OFDM: transmite múltiples bits en paralelo por múltiples frecuencias.
 - ▶ Permite un mejor aprovechamiento del ancho de banda de un canal, con mayores velocidades de transmisión.
- ▶ Modulaciones de espectro extendido: amplían el ancho de banda de una señal.
 - ▶ Permiten agregar seguridad y que el ancho de banda sea compartido.

Agradecimientos

- ▶ Las diapositivas de este tema fueron basadas en las realizadas por el Ing. Esteban Volentini.

facet