

TEMA 1

INTRODUCCIÓN

Sistema de comunicaciones

- **Objetivo:** Transmitir información desde un emisor hasta un destino a través de un canal o medio de transmisión
- **¿Cómo?:** Usando un conjunto **finito** de formas de onda (en comunicaciones **analógicas**, el conjunto es **infinito**)



- Representación física de la información más habitual para ser transmitida: **señal eléctrica**
 - ▶ Conversión de información a señal eléctrica: Transductor

Sistemas de comunicaciones analógicos y digitales

- Sistema de comunicaciones **analógico**
 - ▶ Información codificada una **forma de onda continua** (infinitas posibilidades)

Sistemas de comunicaciones analógicos y digitales

- Sistema de comunicaciones **analógico**
 - ▶ Información codificada una **forma de onda continua** (infinitas posibilidades)
- Sistema de comunicaciones **digital**
 - ▶ Información codificada una secuencia de **símbolos** pertenecientes a un alfabeto finito (M posibles valores para cada símbolo)
 - ★ Ejemplo más común: **Bits** ($M = 2$): $\{0, 1\}$
 - ▶ Transmisión a una velocidad (tasa de símbolo) dada: R_s símbolos/s
 - ★ Se transmite un símbolo cada $T_s = \frac{1}{R_s}$ segundos
 - ★ Cada símbolo se asocia a una forma de onda
 - ★ Caso más simple: formas de onda de $T_s = \frac{1}{R_s}$ segundos

Sistemas de comunicaciones analógicos y digitales

- Sistema de comunicaciones **analógico**
 - ▶ Información codificada una **forma de onda continua** (infinitas posibilidades)
- Sistema de comunicaciones **digital**
 - ▶ Información codificada una secuencia de **símbolos** pertenecientes a un alfabeto finito (M posibles valores para cada símbolo)
 - ★ Ejemplo más común: **Bits** ($M = 2$): $\{0, 1\}$
 - ▶ Transmisión a una velocidad (tasa de símbolo) dada: R_s símbolos/s
 - ★ Se transmite un símbolo cada $T_s = \frac{1}{R_s}$ segundos
 - ★ Cada símbolo se asocia a una forma de onda
 - ★ Caso más simple: formas de onda de $T_s = \frac{1}{R_s}$ segundos
- Tendencia: Sistemas de comunicaciones **digitales** se imponen (e.g. Televisión Analógica \rightarrow TDT).

¿Por qué?

Ventajas de los sistemas digitales

- Capacidad de regeneración

Ventajas de los sistemas digitales

- Capacidad de regeneración
- Flexibilidad:
 - ▶ Existen técnicas de detección y corrección de **errores**

Ventajas de los sistemas digitales

- Capacidad de regeneración
- Flexibilidad:
 - ▶ Existen técnicas de detección y corrección de **errores**
 - ▶ Permite corregir la **distorsión** introducida por el canal (igualación)
 - ▶ La información se puede **encriptar** (proteger)

Ventajas de los sistemas digitales

- Capacidad de regeneración
- Flexibilidad:
 - ▶ Existen técnicas de detección y corrección de **errores**
 - ▶ Permite corregir la **distorsión** introducida por el canal (igualación)
 - ▶ La información se puede **encriptar** (proteger)
 - ▶ Formato **independiente** del tipo de información (voz, datos, TV, etc.)

Ventajas de los sistemas digitales

- Capacidad de regeneración
- Flexibilidad:
 - ▶ Existen técnicas de detección y corrección de **errores**
 - ▶ Permite corregir la **distorsión** introducida por el canal (igualación)
 - ▶ La información se puede **encriptar** (proteger)
 - ▶ Formato **independiente** del tipo de información (voz, datos, TV, etc.)
- Permite utilizar CDM/CDMA (además de FDM/FDMA y TDM/TDMA) como mecanismo de multiplexación/acceso al medio

Ventajas de los sistemas digitales

- Capacidad de regeneración
- Flexibilidad:
 - ▶ Existen técnicas de detección y corrección de **errores**
 - ▶ Permite corregir la **distorsión** introducida por el canal (igualación)
 - ▶ La información se puede **encriptar** (proteger)
 - ▶ Formato **independiente** del tipo de información (voz, datos, TV, etc.)
- Permite utilizar CDM/CDMA (además de FDM/FDMA y TDM/TDMA) como mecanismo de multiplexación/acceso al medio
- Los circuitos son, en general
 - ▶ Más fiables
 - ▶ De menor coste
 - ▶ Más flexibles (programables)

Desventajas de los sistemas digitales

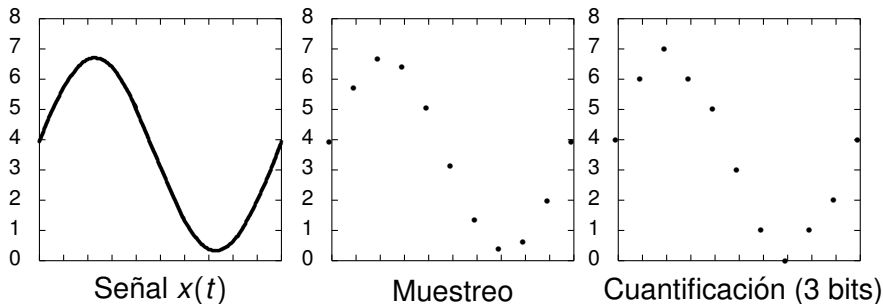
- Necesidad de **sincronismo**
- Mayor **ancho de banda**

Desventajas de los sistemas digitales

- Necesidad de **sincronismo**
- Mayor **ancho de banda**
- Muchas fuentes de información son de naturaleza analógica
 - ▶ Conversión A/D
 - ★ Muestreo
 - ★ Cuantificación → error de cuantificación
 - ▶ Conversión D/A
 - ★ Interpolación
 - ★ Filtrado paso bajo

Conversión Analógico Digital (A/D)

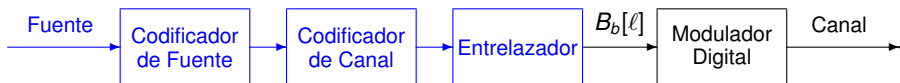
- Fuentes analógicas: **amplitudes continuas, tiempo continuo**
- Conversión analógico/digital:
 - ▶ **Tiempo discreto:** Muestreo a frecuencia f_s muestras/s
 - ▶ **Amplitudes discretas:** Cuantificación a n bits/muestra
 - ★ Ruido de cuantificación: sólo hay 2^n niveles de cuantificación



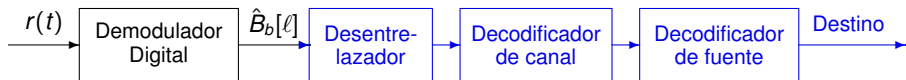
- Tasa binaria (bits/s): $R_b = f_s$ (muestras/s) \times n (bits/muestra)

Sistema de Telecomunicación Digital

● Transmisor digital



● Receptor digital



- Codificador de **fuentes**
 - ▶ Reduce la redundancia de la fuente (compresión)
 - ▶ Reducción de la tasa binaria a transmitir

- Codificador de **fuentes**

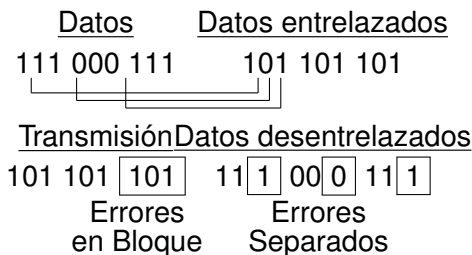
- ▶ Reduce la redundancia de la fuente (compresión)
- ▶ Reducción de la tasa binaria a transmitir

- Codificador de **canal**

- ▶ Introducción de redundancia de forma controlada
- ▶ Detección y corrección de **errores** (capacidad de detección/corrección dependiente de su complejidad)
- ▶ Ejemplo más sencillo: códigos de repetición
 - ★ Código de repetición de orden 1: $0 \rightarrow 00, 1 \rightarrow 11$
 - **Detecta 1** error sobre un bloque de dos bits
 - ★ Código de repetición de orden 2: $0 \rightarrow 000, 1 \rightarrow 111$
 - **Detecta 2** errores o **corrige 1** error (corrección basada en decisión por mayoría) sobre un bloque de tres bits

Entrelazado (Interleaving)

- Protección frente a **errores de ráfaga**
 - ▶ En combinación con el codificador de canal
- **Reordenación de bits**
- Ejemplo más sencillo: entrelazadores bloque matriciales
 - ▶ Código de canal: código de repetición de orden 2



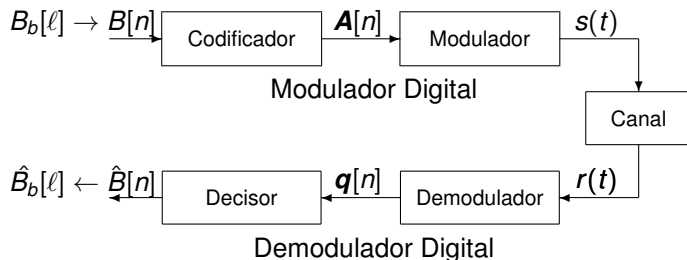
Entrelazador $N_c \times N_b$ Desentrelazador $N_b \times N_c$

1	0	1
1	0	1
1	0	1

1	1	1
0	0	0
1	1	1

Entada de datos: por columnas
Salida de datos: por filas

Modelo de comunicación digital



- Transmisión de la secuencia de bits $B_b[\ell]$ a R_b bits/s
- Secuencia de bits a **símbolos** $B[n]$
 - ▶ Un símbolo es un bloque de m bits
 - ★ Posibles símbolos $M = 2^m$. Alfabeto: $B[n] \in \{b_0, b_1, \dots, b_{M-1}\}$
 - ★ Tasa de símbolo para $B[n]$: $R_s = \frac{R_b}{m}$ baudios (símbolos/s)
- Función del **modulador** digital
 - ▶ Convertir la secuencia de símbolos en una señal $s(t)$
- Función del **demodulador** digital
 - ▶ Convertir la señal $r(t)$ en símbolos recibidos

Transmisor digital: Conversión de m bits en una señal

- **Agrupar** los bits de m en $m \rightarrow$ símbolo = m bits.

$$B[n] = b_j \text{ (} m \text{ bits)}$$

Transmisor digital: Conversión de m bits en una señal

- **Agrupar** los bits de m en $m \rightarrow$ símbolo = m bits.

$$B[n] = b_j \text{ (} m \text{ bits)}$$

- **Codificador mapeador:** Convertir cada símbolo en un punto del espacio N dimensional (\mathbf{a}_i):

$$B[n] \rightarrow A[n] = \mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} a_{i,0} \\ a_{i,1} \\ \vdots \\ a_{i,N-1} \end{bmatrix}$$

Transmisor digital: Conversión de m bits en una señal

- **Agrupar** los bits de m en $m \rightarrow$ símbolo = m bits.

$$B[n] = b_j \text{ (} m \text{ bits)}$$

- **Codificador mapeador:** Convertir cada símbolo en un punto del espacio N dimensional (\mathbf{a}_i):

$$B[n] \rightarrow A[n] = \mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} a_{i,0} \\ a_{i,1} \\ \vdots \\ a_{i,N-1} \end{bmatrix}$$

- **Modulador:** Generación de $s_i(t)$, la forma de onda asociada al símbolo i :
 - ▶ Mediante la base ortonormal (N señales ortonormales):

$$\{\phi_0(t), \phi_1(t), \dots, \phi_{N-1}(t)\}, \quad \mathcal{E}\{\phi_j(t)\} = 1, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \phi_j(t)\phi_k^*(t) dt = 0, \text{ si } k \neq j$$

Generación de $s_i(t)$

- Mediante la base ortonormal (N señales ortonormales):

$$s_i(t) = \sum_{j=0}^{N-1} a_{i,j} \cdot \phi_j(t), \quad 0 \leq t < T_s$$

Codificador mapeador

- Diseño: definir los M puntos representando a las M señales
 - ▶ Constelación

Codificador mapeador

- Diseño: definir los M puntos representando a las M señales
 - ▶ Constelación
- Factores a tener en cuenta en el diseño de la constelación:

Codificador mapeador

- Diseño: definir los M puntos representando a las M señales
 - ▶ Constelación
- Factores a tener en cuenta en el diseño de la constelación:
 - ▶ Prestaciones
 - ★ P_e (probabilidad de error de símbolo) y BER :
 - ★ Disminuyen cuando aumentan la distancia entre símbolos:

$$d(\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j) = \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (a_{i,k} - a_{j,k})^2}$$

- Diseño: definir los M puntos representando a las M señales
 - ▶ Constelación
- Factores a tener en cuenta en el diseño de la constelación:
 - ▶ Prestaciones
 - ★ P_e (probabilidad de error de símbolo) y BER :
 - ★ Disminuyen cuando aumentan la distancia entre símbolos:

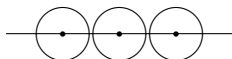
$$d(\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j) = \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (a_{i,k} - a_{j,k})^2}$$

- ▶ Energía de los símbolos a transmitir
 - ★ E_s : energía media por símbolo
 - ★ La energía de cada símbolo es la norma al cuadrado:

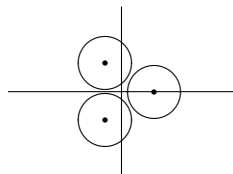
$$E_{s_i} = \mathcal{E}\{\mathbf{a}_i\} = \|\mathbf{a}_i\|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} |a_{i,k}|^2$$

Codificador mapeador (II)

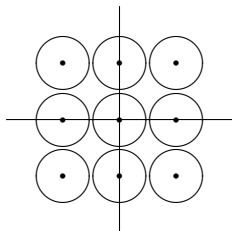
- Diseño de la constelación: P_e , BER , E_s
- Diseño óptimo: Empaquetado de esferas



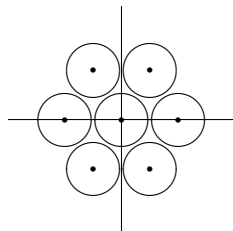
a)



b)



c)

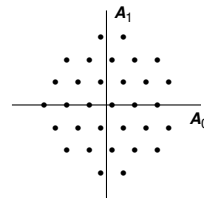


d)

Codificador mapeador (III)

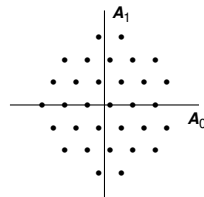
- Empaquetado de esferas

- ▶ Óptimo: P_e mínima para una E_s dada



- Empaquetado de esferas

- ▶ Óptimo: P_e mínima para una E_s dada

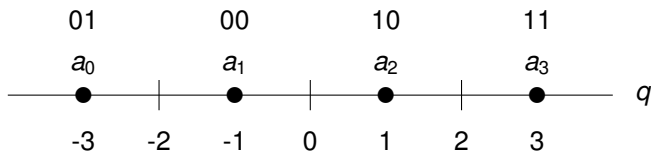


- Consideraciones prácticas

- ▶ Facilidad de implementación del transmisor
 - ▶ Limitación de la energía de pico
 - ★ Relación potencia media/potencia de pico lo más alta posible
 - ▶ Facilidad de implementación del receptor
- ⇒ Constelaciones QAM, PSK, unipolares, ortogonales, ...

Asignación binaria: Codificación de Gray

- Asignación binaria
 - ▶ Asociar cada posible combinación de m bits a un punto de la constelación
- Mínima BER para una P_e dada: Codificación de Gray
 - ▶ Codificar símbolos adyacentes (a mínima distancia) con una asignación binaria que difiera únicamente en un bit

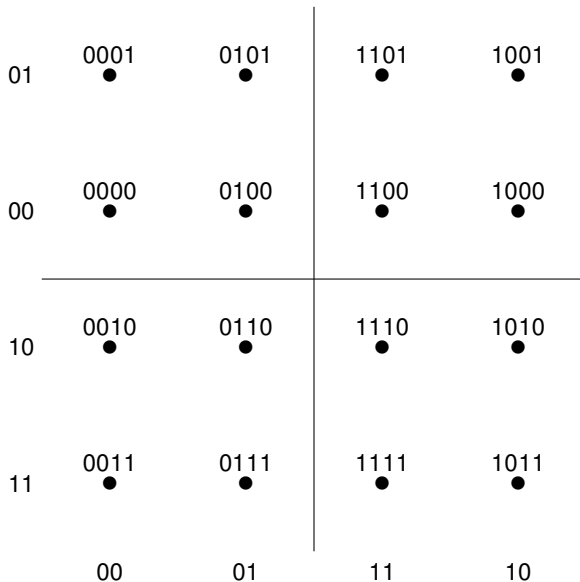


- ▶ Para relaciones señal a ruido altas

$$BER \approx \frac{1}{m} \cdot P_e$$

$m = \log_2(M)$: número de bits por símbolo

Codificación Gray QAM



- Transformación **de símbolos a formas de onda analógicas**
 - ▶ Determina las características espectrales de la señal
 - ▶ Se debe adecuar a las características del canal

- Transformación **de símbolos a formas de onda analógicas**
 - ▶ Determina las características espectrales de la señal
 - ▶ Se debe adecuar a las características del canal
- **Base ortonormal** en un espacio de señales de dimensión N

$$\{\phi_j(t)\}, \quad j = 0, \dots, N - 1$$

Definidas en el intervalo de duración de un símbolo $0 \leq t < T_s$

- ▶ Ejemplo $N = 2$

$$\phi_0(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_s} t\right), \quad \phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos\left(\frac{2\pi}{T_s} t\right)$$

- Transformación **de símbolos a formas de onda analógicas**
 - ▶ Determina las características espectrales de la señal
 - ▶ Se debe adecuar a las características del canal
- **Base ortonormal** en un espacio de señales de dimensión N

$$\{\phi_j(t)\}, \quad j = 0, \dots, N - 1$$

Definidas en el intervalo de duración de un símbolo $0 \leq t < T_s$

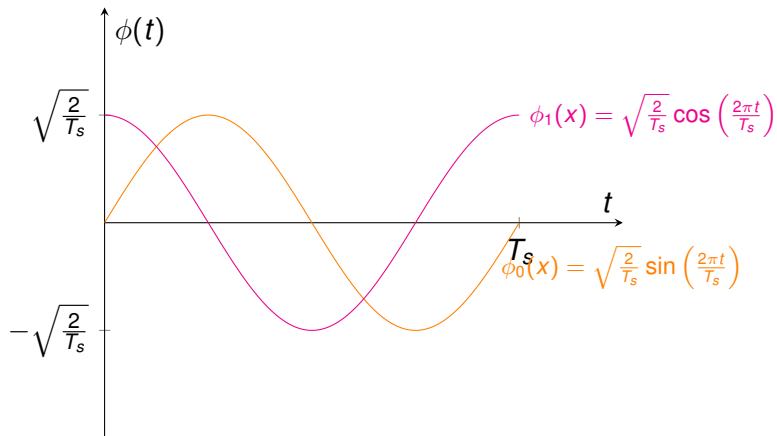
- ▶ Ejemplo $N = 2$

$$\phi_0(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_s} t\right), \quad \phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos\left(\frac{2\pi}{T_s} t\right)$$

- Generación de la forma de onda asociada al símbolo \mathbf{a}_i

$$s_i(t) = \sum_{j=0}^{N-1} a_{i,j} \cdot \phi_j(t), \quad 0 \leq t < T_s$$

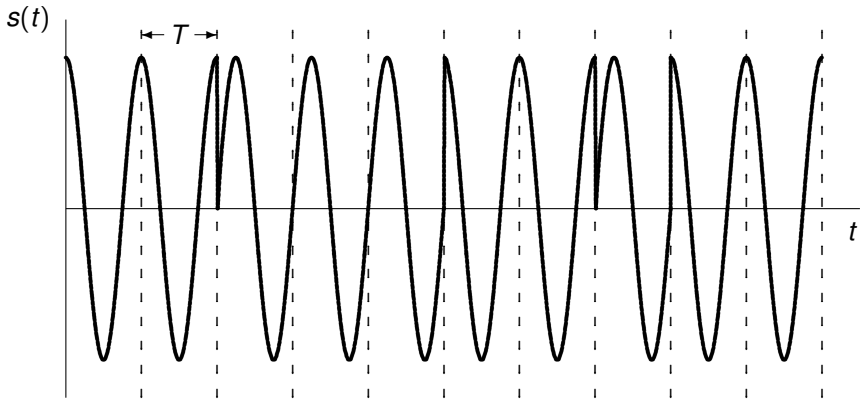
Modulador - Transmisión indefinida



$$s(t) = \sum_n \sum_{j=0}^{N-1} A_j[n] \cdot \phi_j(t - nT_s)$$

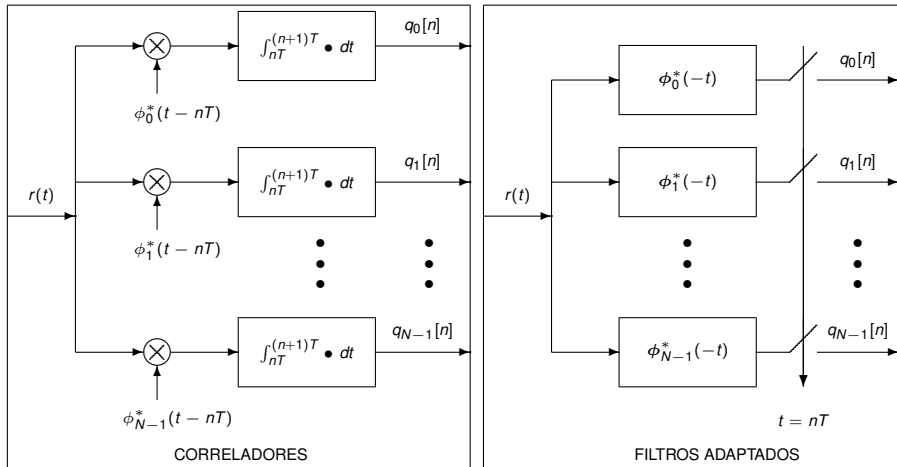
$$1 \rightarrow \mathbf{a}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow s_0(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_s} t\right), \quad 0 \leq t < T_s$$

$$0 \rightarrow \mathbf{a}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow s_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos\left(\frac{2\pi}{T_s} t\right), \quad 0 \leq t < T_s$$



Demodulador

- Representación en tiempo discreto de una señal continua



- Modelo de canal gaussiano en situación ideal (sin canal, sin distorsión...)

$$\mathbf{q}[n] = \mathbf{A}[n] + \mathbf{z}[n]$$

- ▶ Ruido $\mathbf{z}[n]$: Distribución gaussiana N -dimensional

$$f_{\mathbf{q}|\mathbf{A}}(\mathbf{q}|\mathbf{a}_i) = \frac{1}{(\pi N_0)^{N/2}} e^{-\frac{\|\mathbf{q}-\mathbf{a}_i\|^2}{N_0}}$$

- Modelo de canal gaussiano en situación ideal (sin canal, sin distorsión...)

$$\mathbf{q}[n] = \mathbf{A}[n] + \mathbf{z}[n]$$

- ▶ Ruido $\mathbf{z}[n]$: Distribución gaussiana N -dimensional

$$f_{\mathbf{q}|\mathbf{A}}(\mathbf{q}|\mathbf{a}_i) = \frac{1}{(\pi N_0)^{N/2}} e^{-\frac{\|\mathbf{q}-\mathbf{a}_i\|^2}{N_0}}$$

- Regiones de decisión: $\hat{B} = b_j$ si $\mathbf{q}_0 \in I_j$

- Modelo de canal gaussiano en situación ideal (sin canal, sin distorsión...)

$$\mathbf{q}[n] = \mathbf{A}[n] + \mathbf{z}[n]$$

- ▶ Ruido $\mathbf{z}[n]$: Distribución gaussiana N -dimensional

$$f_{\mathbf{q}|\mathbf{A}}(\mathbf{q}|\mathbf{a}_i) = \frac{1}{(\pi N_0)^{N/2}} e^{-\frac{\|\mathbf{q}-\mathbf{a}_i\|^2}{N_0}}$$

- Regiones de decisión: $\hat{B} = b_j$ si $\mathbf{q}_0 \in I_j$
- Minimizar la probabilidad de error de símbolo

- Modelo de canal gaussiano en situación ideal (sin canal, sin distorsión...)

$$\mathbf{q}[n] = \mathbf{A}[n] + \mathbf{z}[n]$$

- ▶ Ruido $\mathbf{z}[n]$: Distribución gaussiana N -dimensional

$$f_{\mathbf{q}|\mathbf{A}}(\mathbf{q}|\mathbf{a}_i) = \frac{1}{(\pi N_0)^{N/2}} e^{-\frac{\|\mathbf{q}-\mathbf{a}_i\|^2}{N_0}}$$

- Regiones de decisión: $\hat{B} = b_j$ si $\mathbf{q}_0 \in I_j$
- Minimizar la probabilidad de error de símbolo
 - ▶ Asignación para \mathbf{q}_0 : región de decisión del símbolo que maximiza la probabilidad a posteriori $p_{B|\mathbf{q}}(b_j|\mathbf{q}_0)$
 - ★ Símbolo \mathbf{a}_j que maximiza $p_A(\mathbf{a}_j)f_{\mathbf{q}|\mathbf{A}}(\mathbf{q}_0|\mathbf{a}_j)$ (Criterio MAP)

- Modelo de canal gaussiano en situación ideal (sin canal, sin distorsión...)

$$\mathbf{q}[n] = \mathbf{A}[n] + \mathbf{z}[n]$$

- ▶ Ruido $\mathbf{z}[n]$: Distribución gaussiana N -dimensional

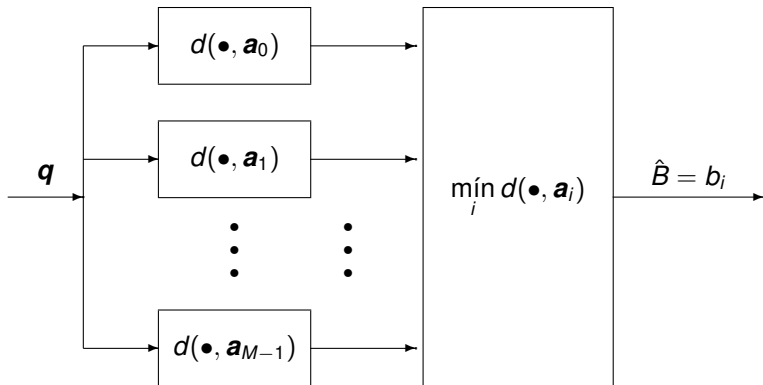
$$f_{\mathbf{q}|\mathbf{A}}(\mathbf{q}|\mathbf{a}_i) = \frac{1}{(\pi N_0)^{N/2}} e^{-\frac{\|\mathbf{q}-\mathbf{a}_i\|^2}{N_0}}$$

- Regiones de decisión: $\hat{B} = b_j$ si $\mathbf{q}_0 \in I_j$
- Minimizar la probabilidad de error de símbolo
 - ▶ Asignación para \mathbf{q}_0 : región de decisión del símbolo que maximiza la probabilidad a posteriori $p_{B|\mathbf{q}}(b_j|\mathbf{q}_0)$
 - ★ Símbolo \mathbf{a}_j que maximiza $p_{\mathbf{A}}(\mathbf{a}_j)f_{\mathbf{q}|\mathbf{A}}(\mathbf{q}_0|\mathbf{a}_j)$ (Criterio MAP)
 - ▶ Si los símbolos son equiprobables
 - ★ Símbolo \mathbf{a}_j que maximiza $f_{\mathbf{q}|\mathbf{A}}(\mathbf{q}_0|\mathbf{a}_j)$ (Criterio ML)

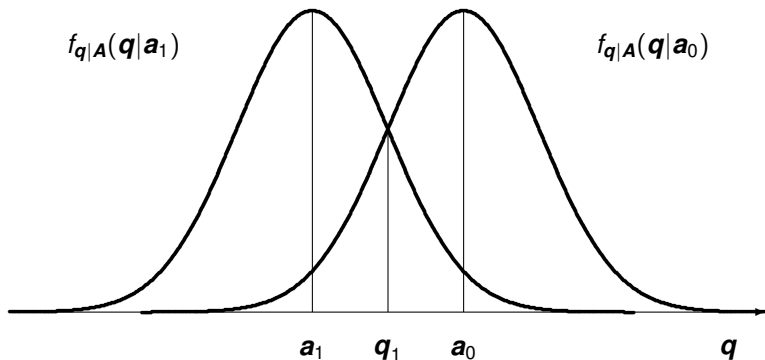
Decisor de mínima distancia: Criterio ML

- Condiciones:

- ▶ Ruido gaussiano
- ▶ Símbolos equiprobables (símbolos b_i equiprobables)

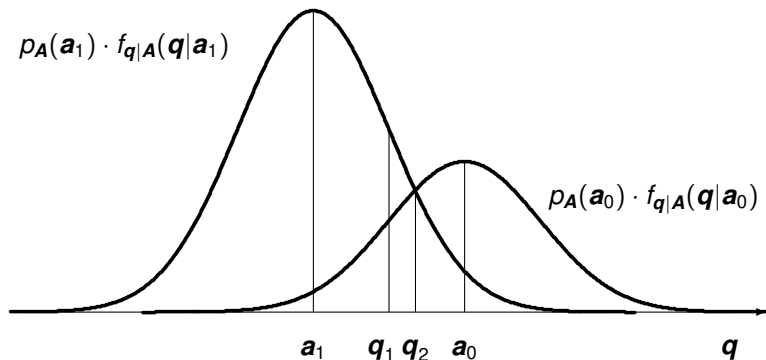


Decisor de mínima distancia: Criterio ML



$$q_1 = \frac{a_0 + a_1}{2}, \quad I_1 = (-\infty, q_1), \quad I_0 = [q_1, \infty)$$

Criterio MAP



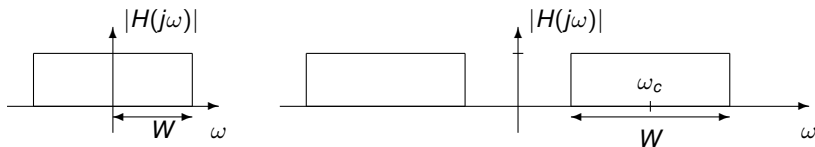
$$l_1 = (-\infty, q_2), \quad l_0 = [q_2, \infty)$$

$$p_B(b_0) < p_B(b_1) \Rightarrow d(q_2, a_0) < d(q_2, a_1)$$

Características de los canales reales

- Limitación en el **ancho de banda**

- ▶ El canal disponible normalmente tiene un ancho de banda utilizable **limitado** (B Hz, $W = 2\pi B$ rad./s)
- ▶ Canales banda base vs paso banda (frec. central ω_c)

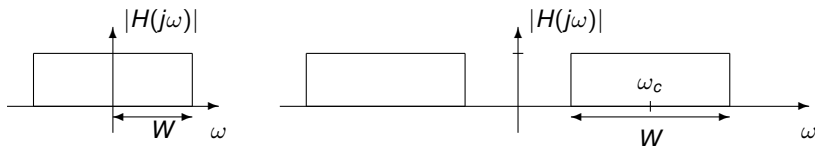


- ▶ Las señales transmitidas tienen que adecuarse a esta **restricción** en el ancho de banda disponible

Características de los canales reales

- Limitación en el **ancho de banda**

- ▶ El canal disponible normalmente tiene un ancho de banda utilizable **limitado** (B Hz, $W = 2\pi B$ rad./s)
- ▶ Canales banda base vs paso banda (frec. central ω_c)



- ▶ Las señales transmitidas tienen que adecuarse a esta **restricción** en el ancho de banda disponible
- Introducción de **distorsiones** (canales no ideales)
 - ▶ AWGN: Ruido blanco gaussiano (no propiamente del canal)
 - ▶ Distorsión lineal: modelo lineal e invariante: $h(t)$, $H(j\omega)$

$$\mathbf{q}[n] \neq \mathbf{A}[n] + \mathbf{z}[n]$$

- ▶ Otras: Distorsión no lineal (no las veremos).

Criterios de rendimiento y de diseño

- Medida de calidad (rendimiento):
 - ▶ Analógico: $SNR = \frac{P_s}{P_n}$
 - ▶ Digital: $BER = \frac{N_{bits\ err.}}{N_{bits\ total}}$
- Recursos:
 - ▶ Ancho de banda
 - ▶ Potencia en el transmisor
 - ▶ Dinero