

# COMUNICACIONES DIGITALES

Tema 2: MODULACIONES  
DIGITALES AVANZADAS

## Índice

### 1. Modulaciones monoportadora.

- Modulaciones digitales de eficiencia espectral menor de 2 bps/Hz: QPSK, OQPSK,  $\pi/4$ -QPSK, MSK.
- Modulaciones digitales de eficiencia espectral  $\geq$  2 bps/Hz : MQAM.

### 2. Modulaciones multiportadora: modulación OFDM.

- 3. Modulaciones de espectro ensanchado (CDMA).
- 4. OFDM con acceso multiusuario.
- 5. Estándares y tecnologías actuales.

## - Canal AWGN

Capacidad máxima canal

$$C = B \cdot \log_2 [1 + SNR] \quad [\text{bps}]$$

Nota  $B = W$  (Ancho de banda)

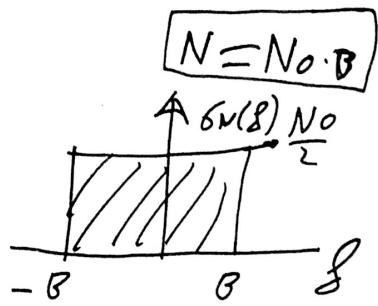
[bps]

$$SNR = \frac{P_{ale}}{N} = \frac{E_x}{D} = \frac{E_x}{T_b}$$

$$P_{ale} = \frac{E_x}{D} = \frac{E_x}{T_b} = E_x \cdot R$$

$$R = \frac{1}{T_b}$$

$$SNR = \frac{P_{ale}}{N} = \frac{E_x \cdot R}{N_0 \cdot B}$$



$$P_{ale} = \frac{E_x}{D} = \frac{E_x}{T_b} = E_x \cdot R$$

$$C = B \cdot \log_2 [1 + SNR] = B \cdot \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{E_x}{N_0} \right) \cdot \left( \frac{R}{B} \right) \right]$$

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{SNR}{\text{por bit}} \right] \quad \left[ \frac{\text{bps}}{\text{Hz}} \right] \\ & \text{eficiencia espectral} \end{aligned}$$

## - Curva Capacidad

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{E_B}{N_0} \right) \left( \frac{R}{B} \right) \right]$$

$\boxed{\text{Si } R = \epsilon}$

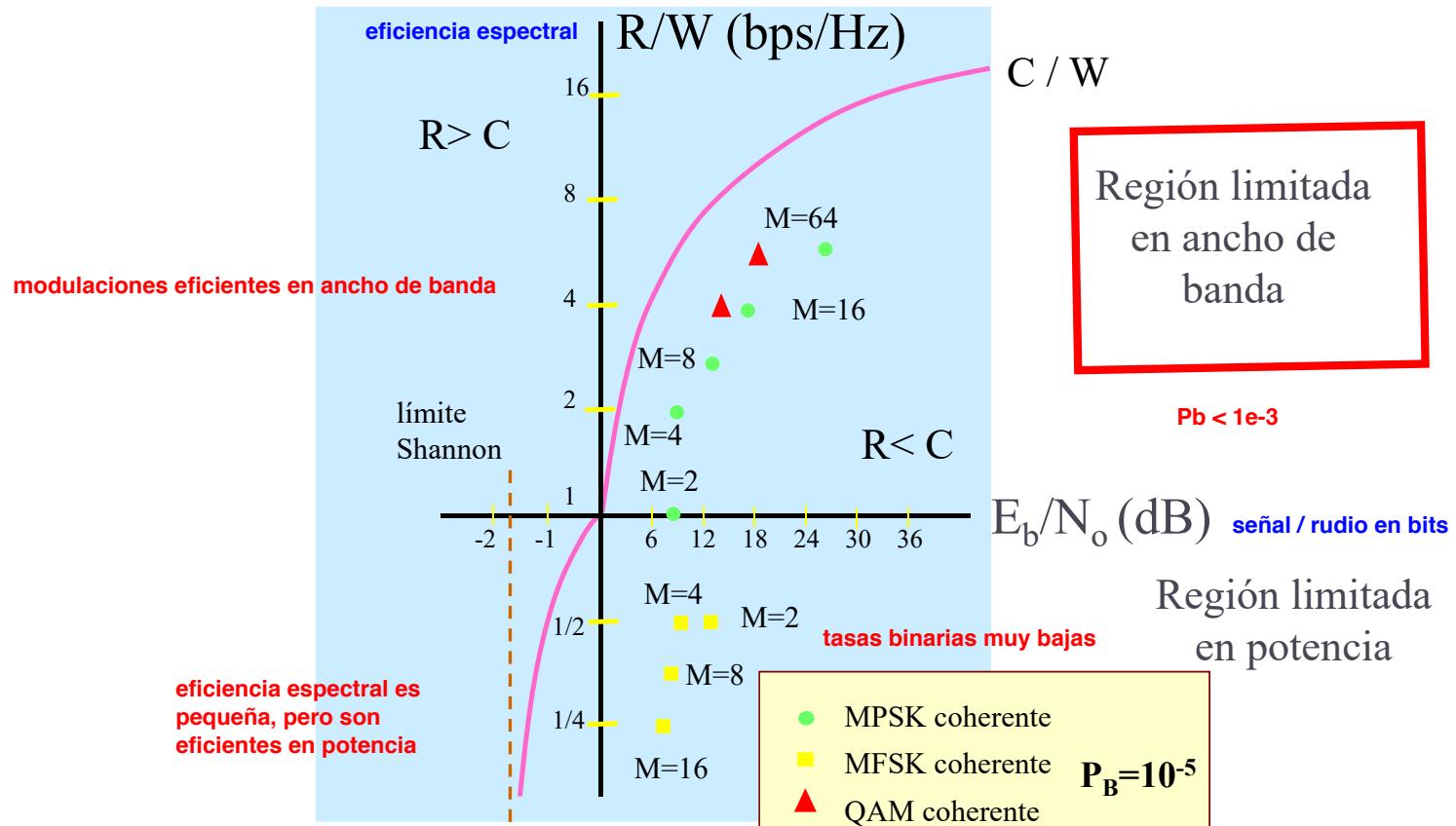
$$\frac{C}{B} = \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{E_B}{N_0} \right) \cdot \left( \frac{C}{B} \right) \right] \rightarrow \text{despejando}$$

$$\frac{E_B}{N_0} = \frac{2^{\frac{C}{B}} - 1}{C/B}$$

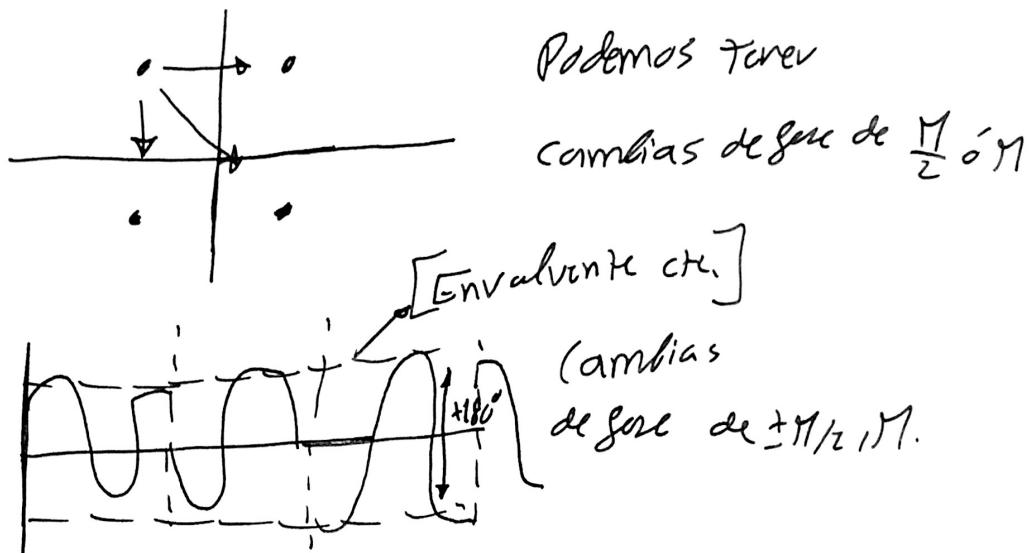
$$\lim_{C/B \rightarrow 0} \frac{E_B}{N_0} = \ln 2 \approx \boxed{-1.6 \text{ dB}}$$

Límite Shannon  
Menor señal a  
Ruido en bits  
que necesita  
para transmitir

## Eficiencia espectral ( $R/W$ ) versus $E_b/N_o$



- Modulación QPSK 4 símbolos, 2 bits por símbolo



Idea clave

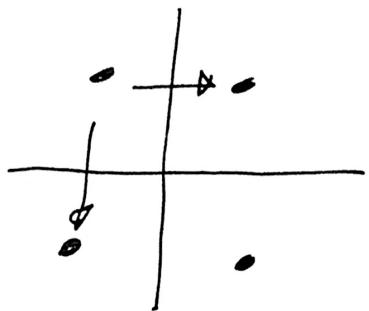
Modulaciones  
Envolvente CTC → Amplificadores  
en zona NO → Mayor Rendimiento → Menor consumo.

R: Amplitud de la Envolvente. Para el límite el ancho de banda

con un filtro  $\frac{V_{max}}{V_{min}} = \infty$  polígono.

- Esta Modulación Admite Codificación diferencial  
↳ Canales Móviles.

- Mejoramos los cambios de fase.



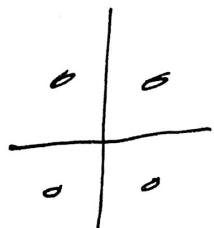
Solo cambios  
de fase  $\frac{\pi}{2}$

Para evitarnos los cambios  
de fase de  $180^\circ$  que son los  
desirables.

$$\frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \sqrt{2} \approx 3 \text{ dB.}$$

Esta modulación se llama:

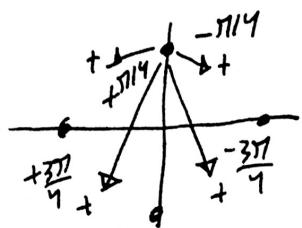
- Modulación offset QPSK (OQPSK)



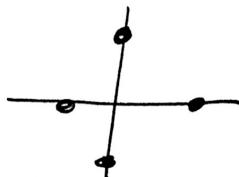
constelación identica a la  
QPSK. Y por tanto

$P_{\text{coOQPSK}} = P_{\text{coQPSK}}$

## Modulación T1/4 QPSK



ojo tenemos  
2 bits por simbolo



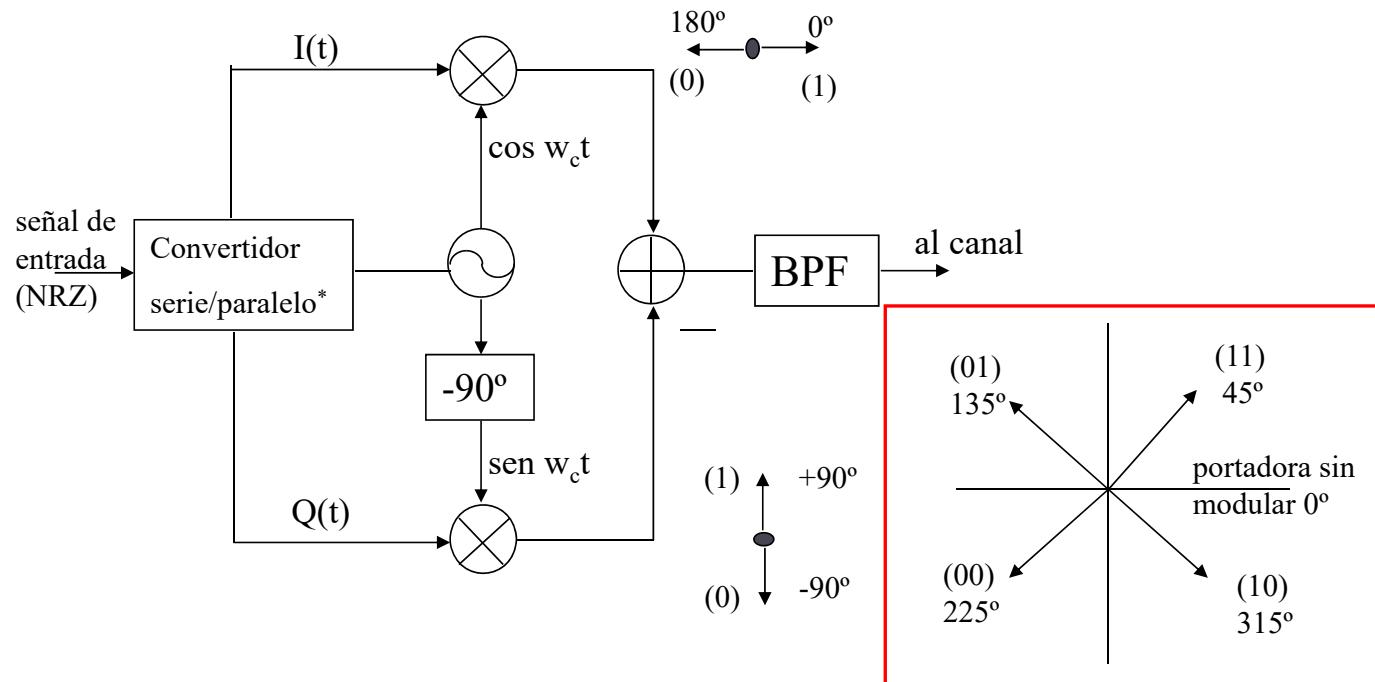
$$T = z_m \cdot 0$$



$$T = (z_{m+1}) \cdot 0$$

## Modulaciones de envolvente constante: Quadrature PSK (QPSK)

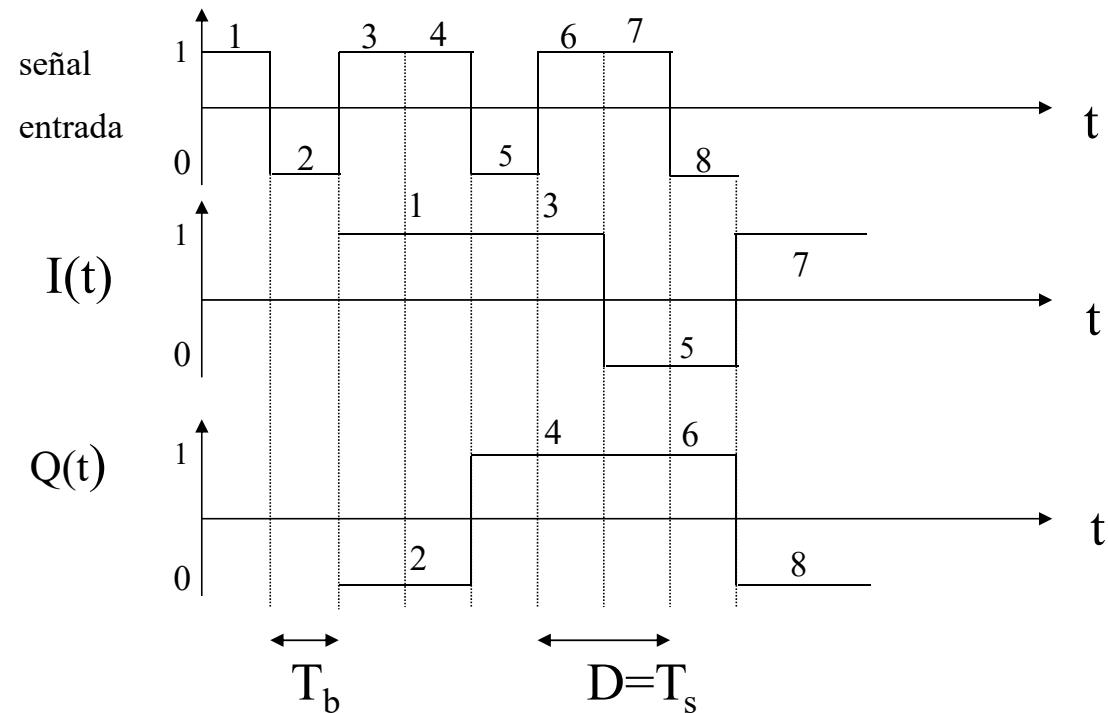
### ➤ Modulador QPSK



\* puede incluir codificación diferencial

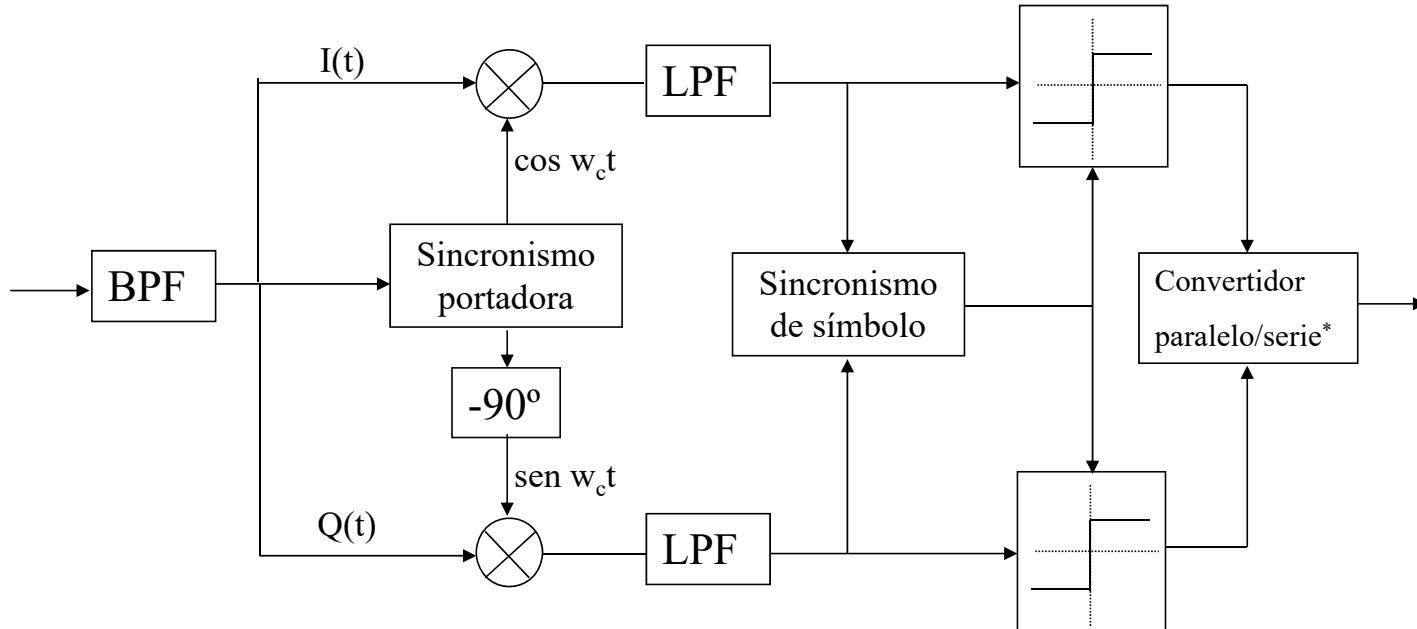
## QPSK

### ➤ Señales BB en QPSK



## QPSK

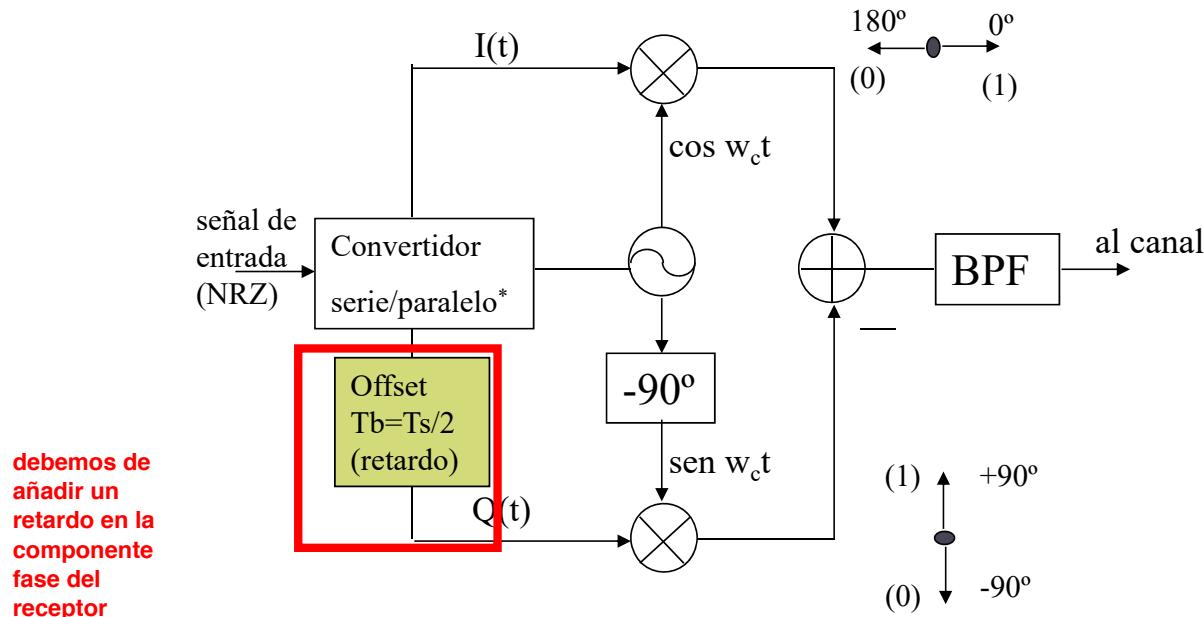
### ➤ Demodulador QPSK.



\* puede incluir decodificación diferencial

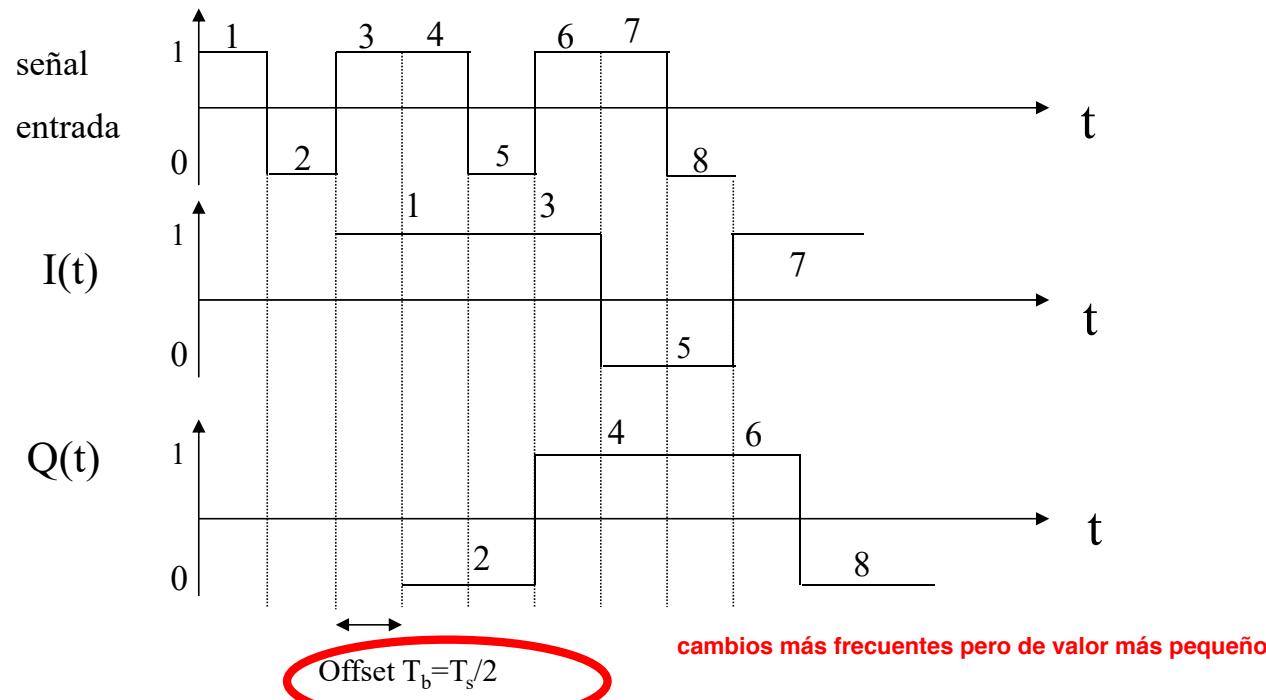
## Offset-QPSK (OQPSK)

### ➤ Modulador OQPSK.



## OQPSK

➤ Señales BB en OQPSK.



## $\pi/4$ -QPSK

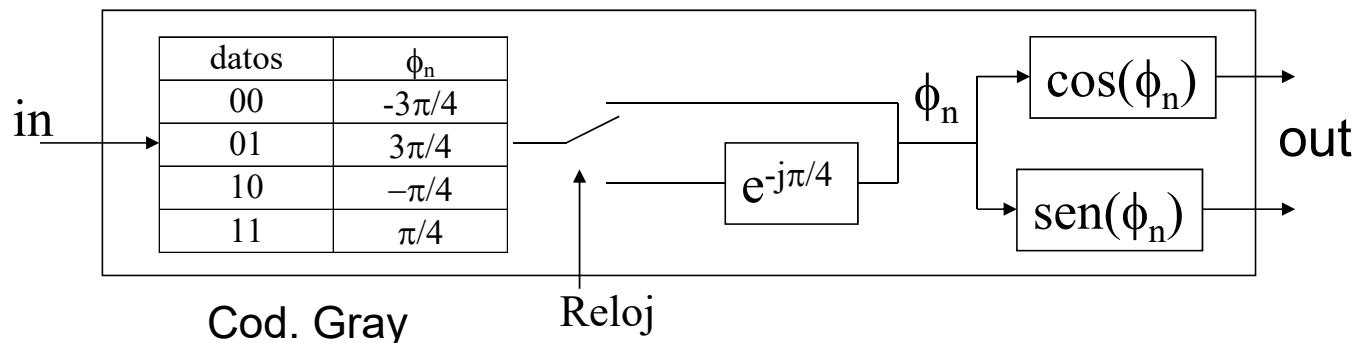
- $\pi/4$  QPSK.
- ✓ Se trata de una modulación **QPSK** en la que se “gira” la constelación  $\pi/4$  cada intervalo de símbolo.
- ✓ Beneficios idénticos a la clásica QPSK:
  - **Eficiente en ancho de banda.**
  - **Buena probabilidad de error** de bit.
  - Admite **codificación diferencial**.
  - “**Sencilla**” de implementar, modular y demodular.
- ✓ Beneficios adicionales:
  - La **envolvente no se “desvanece”** por lo que puede utilizarse con amplificadores no lineales.
  - ✓ Utilizada en Bluetooth 2.0 y el estándar americano 2G de comunicaciones móviles digitales IS-54, IS-136.

## $\pi/4$ -QPSK

- Codificación de Gray para  $\pi/4$ -QPSK.

$(a_{2n-1}, a_{2n})$	$t = (2m+1)D$	$t = 2mD$
00	$\pi$	$-3\pi/4$
01	$\pi/2$	$3\pi/4$
10	$-\pi/2$	$-\pi/4$
11	0	$\pi/4$

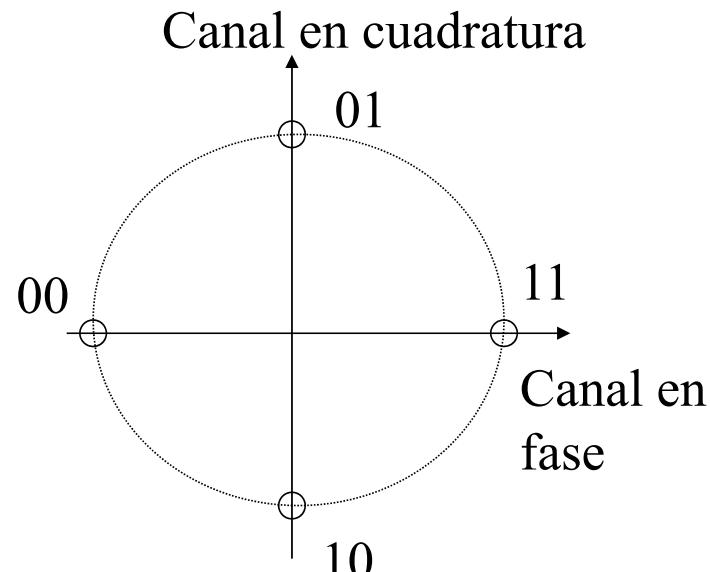
Generador de señal en banda base



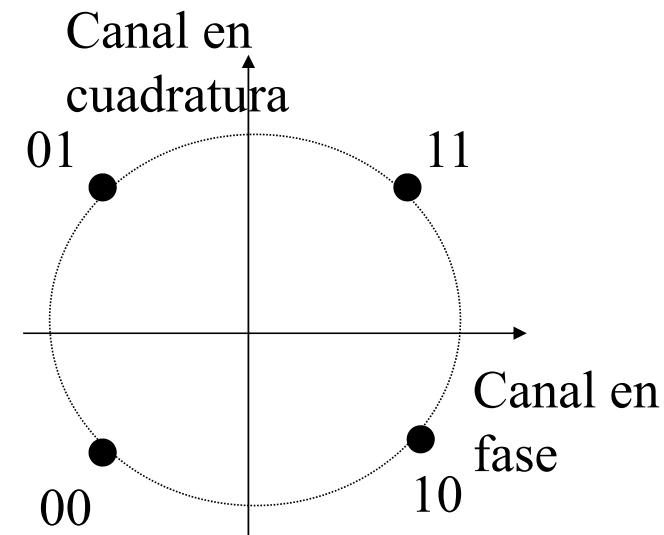
$$f_{clk} = 1/D$$

## $\pi/4$ -QPSK

- Constelaciones de señal para  $\pi/4$ -QPSK (¡hay dos!)



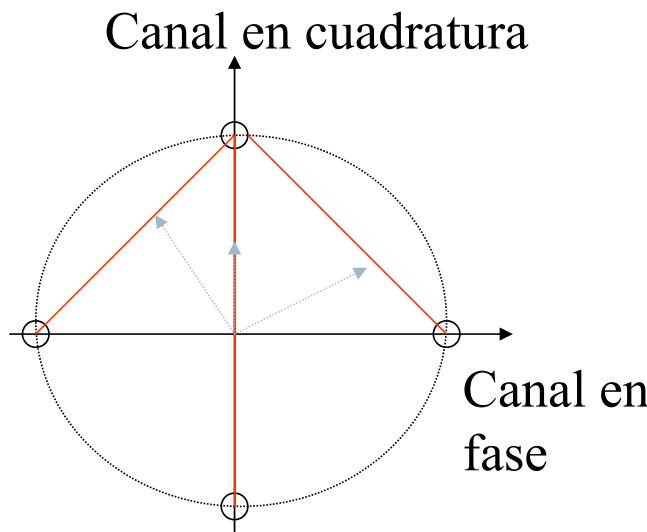
$t=2mD$



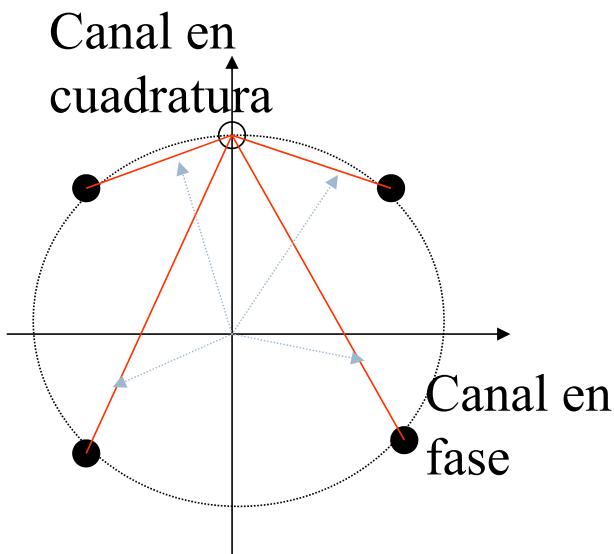
$t=(2m+1)D$

## $\pi/4$ -QPSK

- Evolución de la envolvente en QPSK y  $\pi/4$ -QPSK.



QPSK



$\pi/4$ -QPSK

## $\pi/4$ -QPSK Diferencial

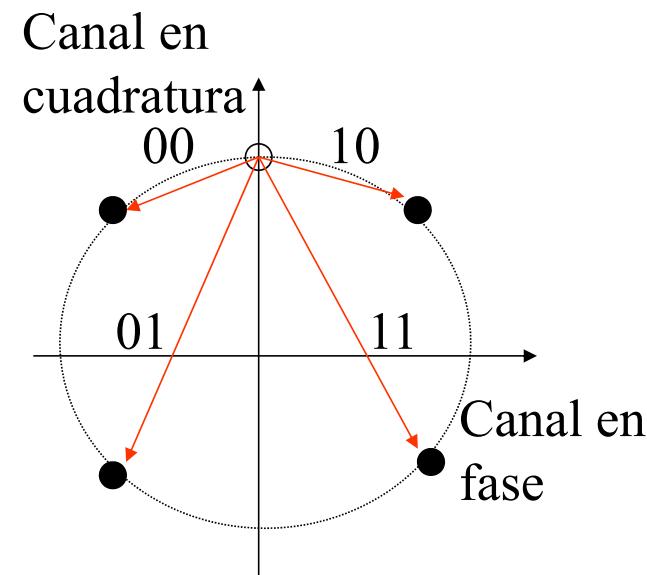
**muy importante**

- Codificación diferencial para  $\pi/4$ -QPSK.

primer simbolo es  
la fase absoluta

$$\phi_n = \phi_{n-1} + \Delta\phi_n$$

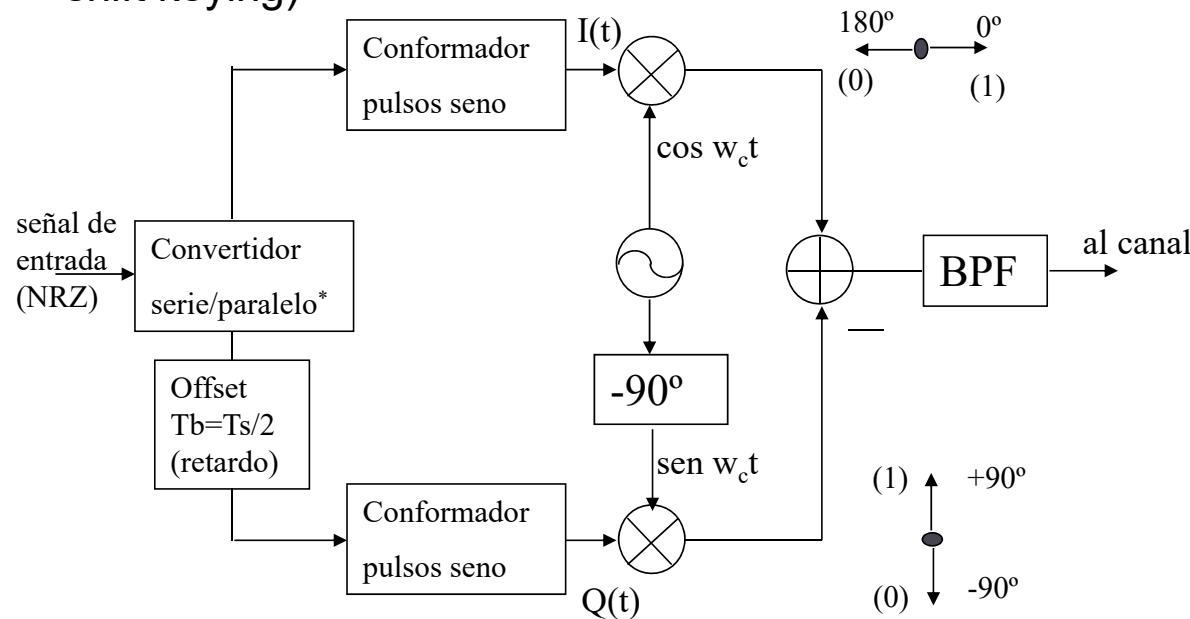
$(a_{2n-1}, a_{2n})$	$\Delta\phi_n$
00	$+\pi/4$
01	$+3\pi/4$
10	$-\pi/4$
11	$-3\pi/4$



Si se tiene en cuenta el desplazamiento de fase de  $45^\circ$  cada periodo de símbolo, la detección de los símbolos es idéntica a cualquier otro esquema diferencial

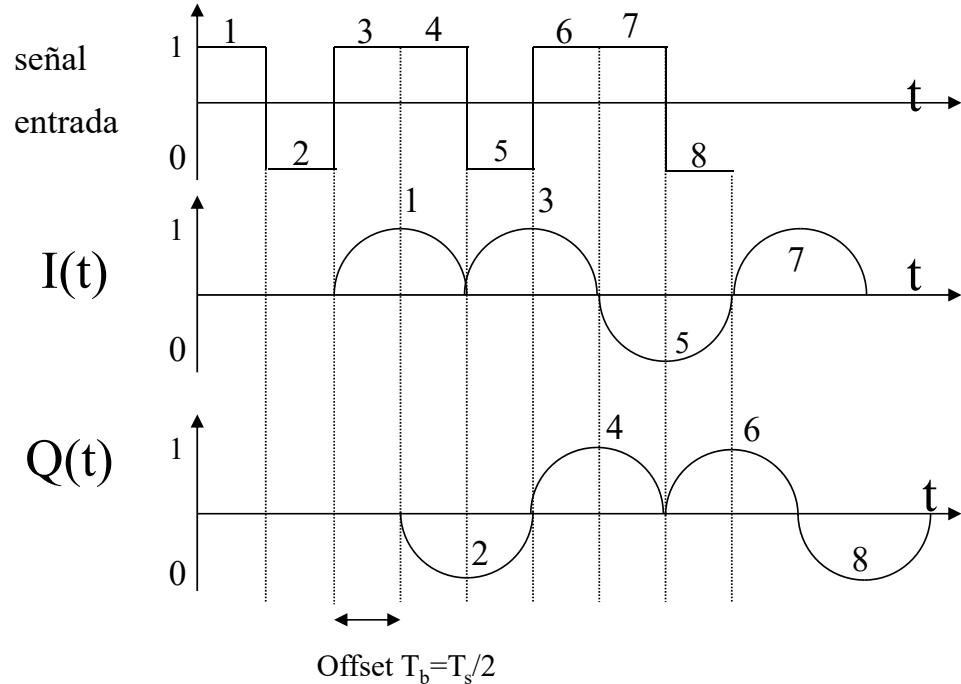
## Caso particular OQPSK

- OQPSK con pulsos sinusoidales = MSK (Minimum frequency-shift keying)



## Caso particular OQPSK

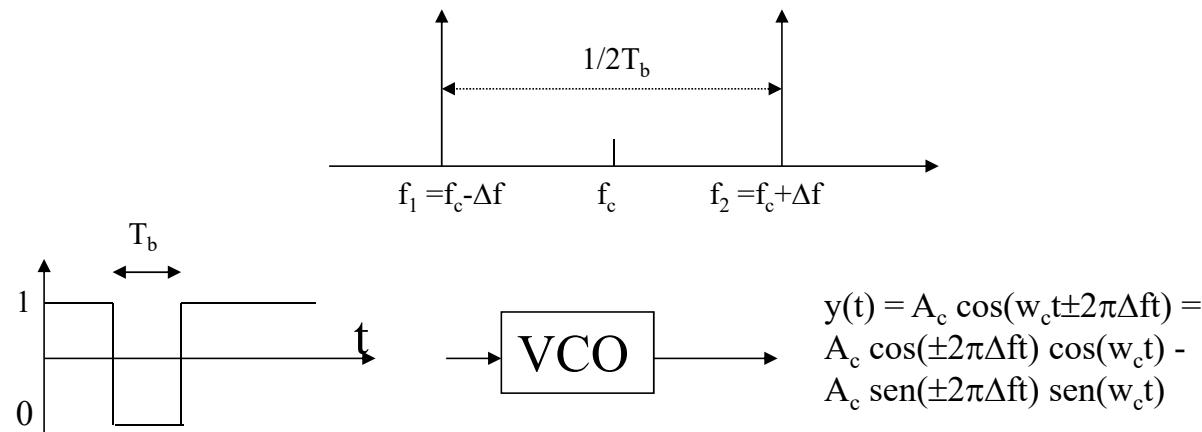
➤ Señales BB en MSK (OQPSK con pulsos sinusoidales)



Obsérvese  
como:  
 $I^2+Q^2=\text{cte.}$

## MSK

- Señal MSK: puede verse como una modulación de frecuencia.



Ambas señales (sinusoidal-OQPSK y MSK) son equivalentes.

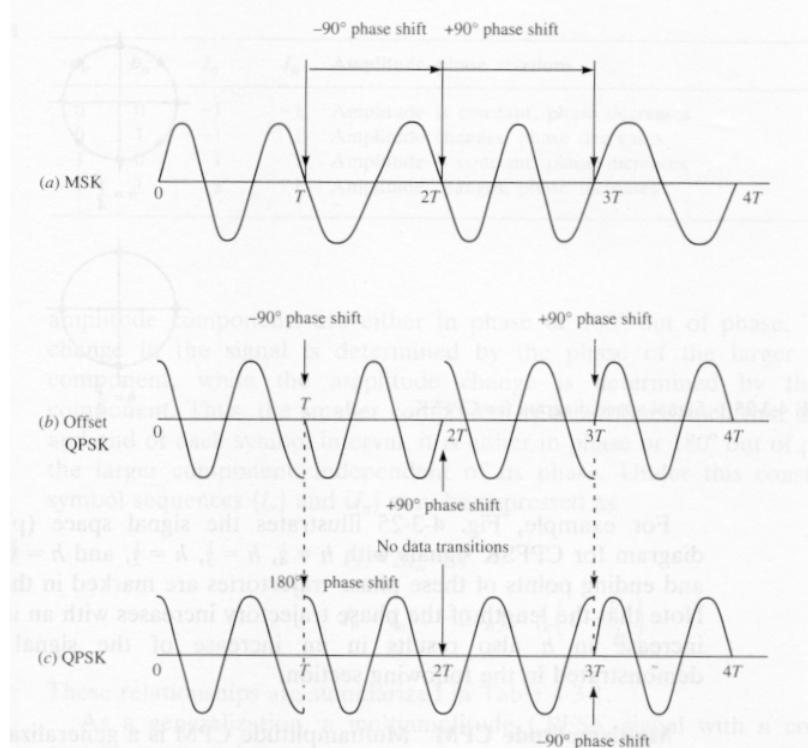
## Comparativa

- Ejemplo de formas de onda QPSK, OQPSK y MSK

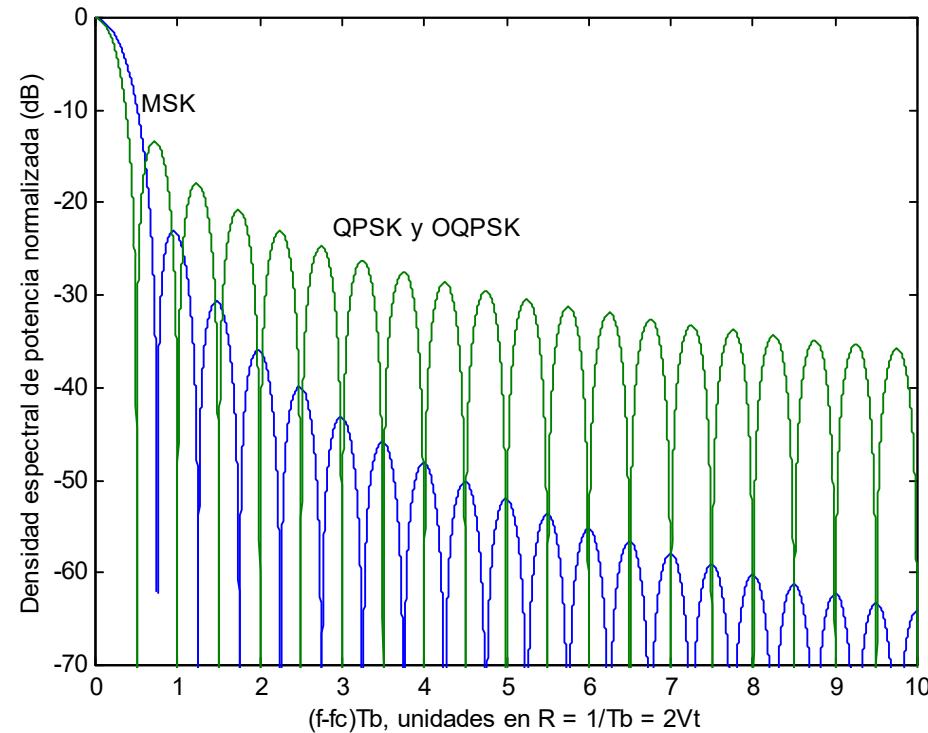
MSK

OQPSK

QPSK



## Comparativa de espectros



## Índice

### 1. Modulaciones monoportadora.

- Modulaciones digitales de eficiencia espectral menor de 2 bps/Hz.
- Modulaciones digitales de eficiencia espectral  $\geq 2 \text{ bps/Hz}$ .

### 2. Modulaciones multiportadora: modulación OFDM.

### 3. Modulaciones de espectro ensanchado (CDMA).

### 4. OFDM con acceso multusuario.

### 5. Estándares y tecnologías actuales.

- 19 -

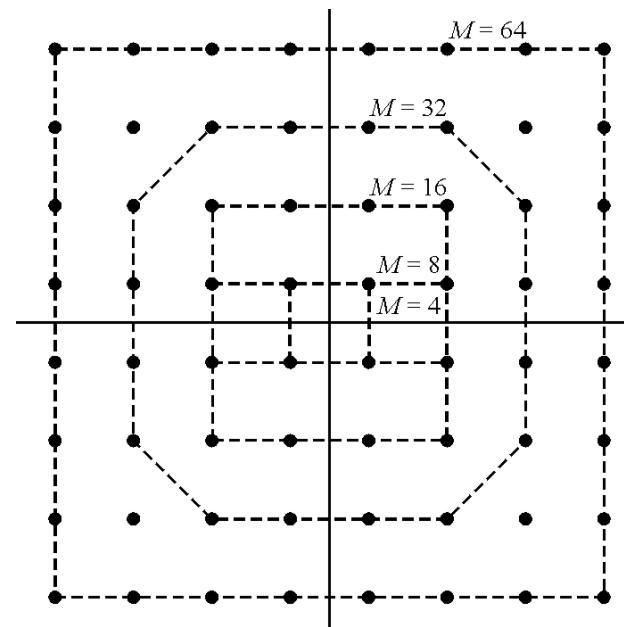
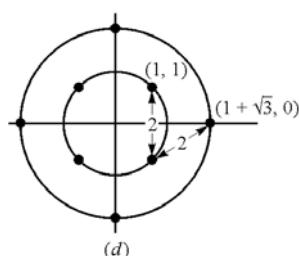
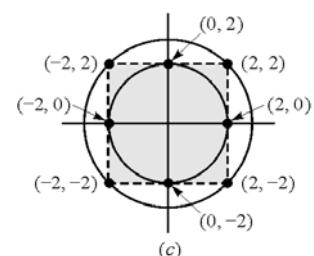
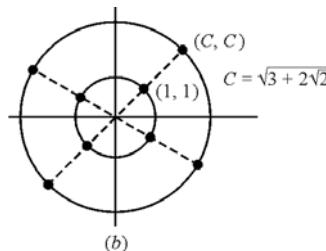
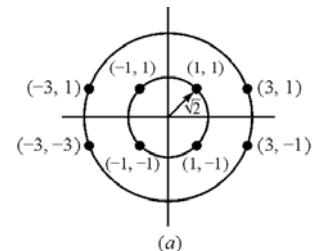
## Modulaciones de eficiencia espectral $\geq 2$ bps/Hz

- Sus constelaciones tienen más de 4 símbolos.
- Emplean el mismo ancho de banda que las modulaciones QPSK → eficientes en ancho de banda.
- Necesitan más potencia de transmisión (o mejor Eb/No) para conseguir la misma probabilidad de error.
- Las constelaciones típicas se pueden clasificar en:
  - MQAM con  $M=4, 16, 32, 64, \dots$
  - Modulaciones CPM (Continuous Phase Modulation) donde sus pulsos banda base emplean señalización por respuesta parcial.

## QAM

Señal MQAM

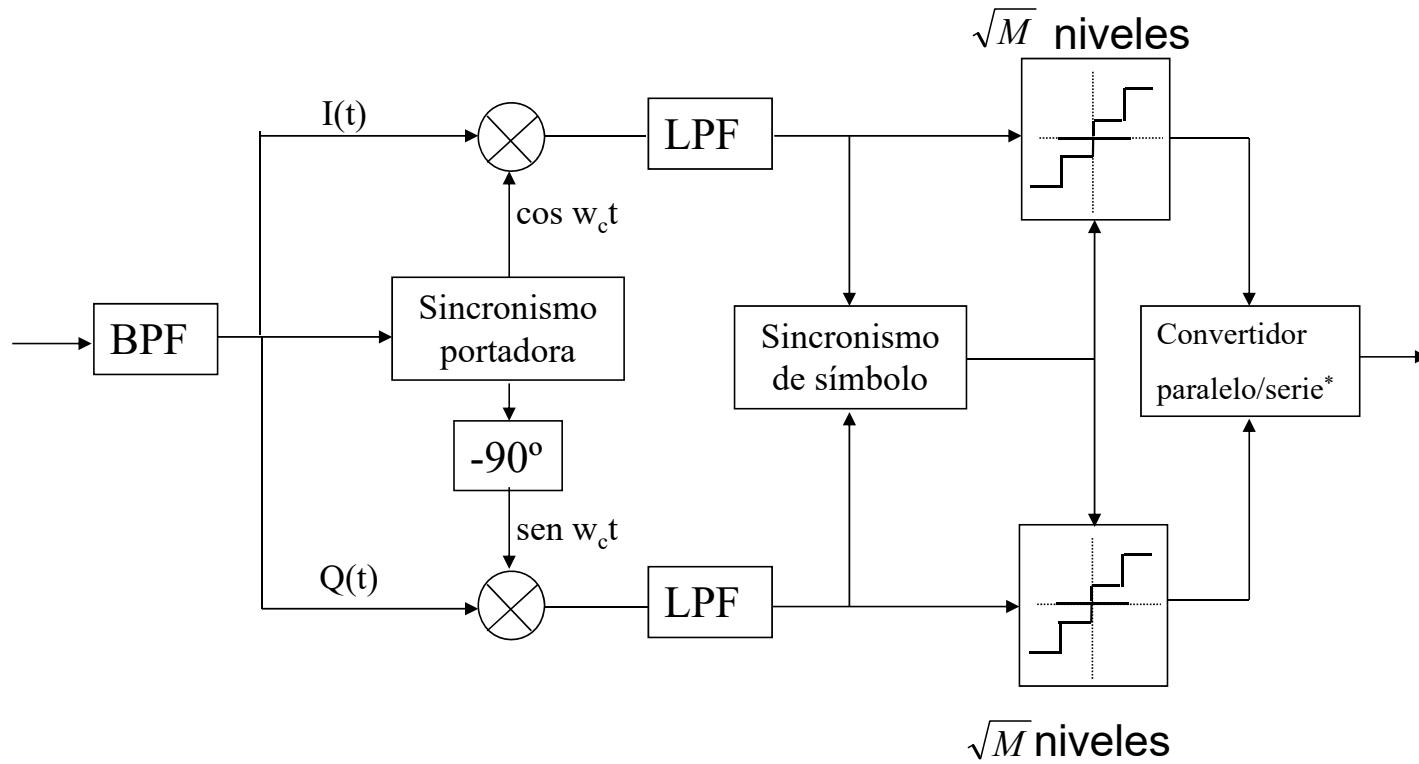
$M=8$



Constelación d):  $P_{av}$  mínima, para la misma  $d_{min}$

## Demodulador M-QAM rectangular

Para modulación MQAM rectangular con  $\log_2 M = par$



## Conclusiones modulaciones monoportadora

- La familia de modulaciones QPSK es ampliamente utilizada por su eficiencia espectral y facilidad de implementación.
- MQAM proporciona eficiencias espetrales mayores de 2 bps/Hz.
- En los estándares actuales son básicas las modulaciones QPSK, 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM.

## Índice

---

1. Modulaciones monoportadora.
2. Modulaciones multiportadora: modulación OFDM.
3. Modulaciones de espectro ensanchado (CDMA).
4. OFDM con acceso multusuario.
5. Estándares y tecnologías actuales.

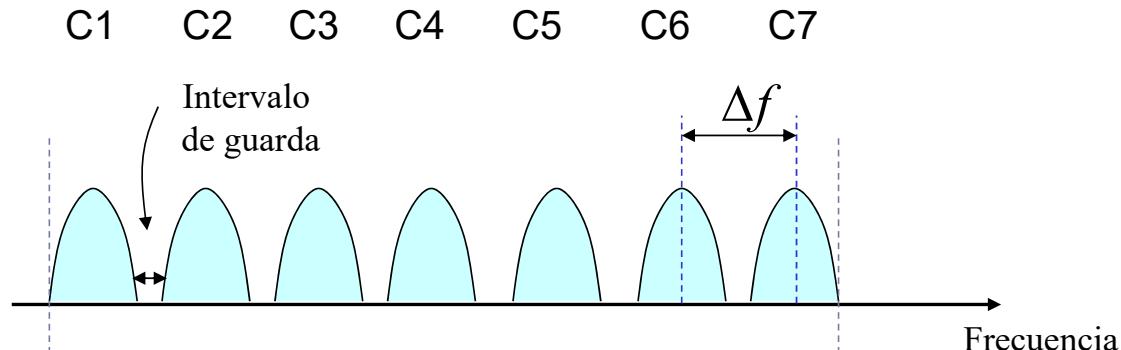
## 2. Modulaciones multiportadora

### ➤ Ventajas:

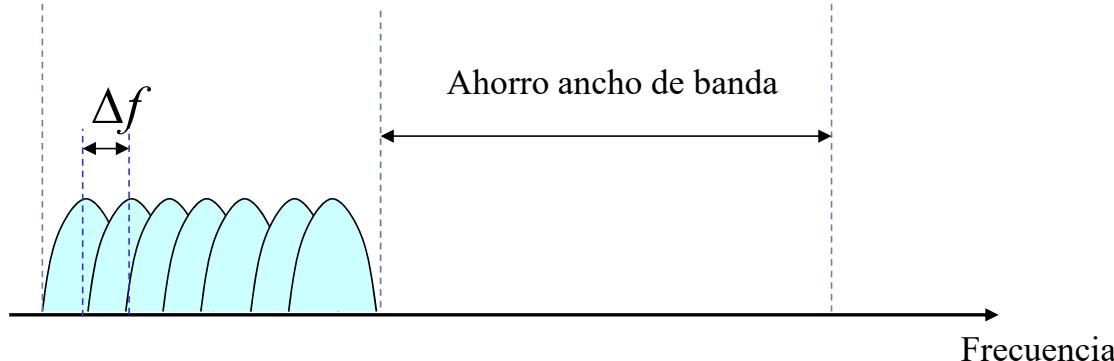
- N portadoras (también denominadas subportadoras) transmiten N símbolos en paralelo.
- Cada símbolo sobre 1 de N subcanales
- Cada subportadora se modula de forma independiente.
- Se alcanzan mayores velocidades de transmisión.
- Un canal frequency-selective fading se ve como N canales flat fading “ideales”.
- Ecualizadores sencillos => receptores baratos
- Robustas a desvanecimientos del canal (p.ej. canales móviles e inalámbricos).

## Modulaciones multiportadora

Técnica convencional

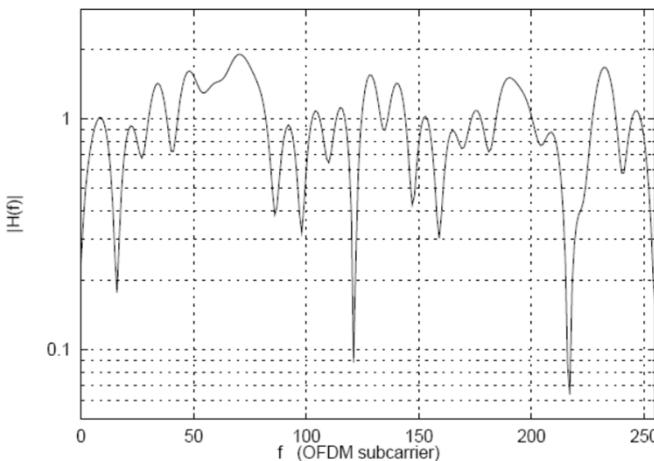


Técnica ortogonal



## Modulaciones multiportadora

- Considere un canal selectivo en frecuencia (no ideal) de respuesta en frecuencia  $C(f)$ , que presenta problemas (distorsión temporal, ISI). Necesidad de ecualización.
- Canal de ancho de banda  $W$  con AWGN.
- Idea de Shannon:  
Subdividir el canal en un número de subcanales de forma que cada uno sea casi ideal (casi plano).



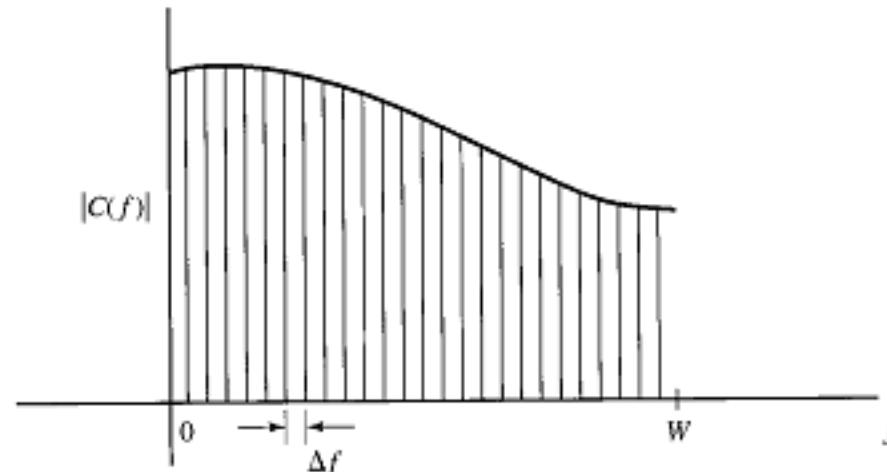
## Modulaciones multiportadora: máxima capacidad del canal

- ✓ Subdividimos en N subbandas:

$$N = \frac{W}{\Delta f}$$

- ✓  $\Delta f$  se escoge de forma que

$$\frac{|C(f)|^2}{G_n(f)} \approx cte \quad \text{en cada subbanda.}$$



## Máxima capacidad del canal

- Capacidad del canal ideal gaussiano limitado en banda [bits/s]:

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{P_{av}}{WN_o} \right)$$

$P_{av}$ : potencia media transmitida

- Capacidad del subcanal:

$$C_i = \Delta f \log_2 \left( 1 + \frac{\Delta f P(f_i) |C(f_i)|^2}{\Delta f G_n(f_i)} \right)$$

$P(f_i)$ : dep. de la señal tx en el subcanal i-ésimo

$C(f_i)$ : respuesta en frecuencia del subcanal i-ésimo

## Máxima capacidad del canal

- Capacidad total del canal:

$$C = \sum_{i=1}^N C_i = \Delta f \sum_{i=1}^N \log_2 \left( 1 + \frac{P(f_i) |C(f_i)|^2}{G_n(f_i)} \right)$$

- Si  $\Delta f \rightarrow 0$ ,

$$C = \int_W \log_2 \left( 1 + \frac{P(f) |C(f)|^2}{G_n(f)} \right) df$$

- Por tanto:  
 $P(f)$  que maximiza  $C$ :

$$P(f) = \begin{cases} K - G_n(f) / |C(f)|^2, & f \in W \\ 0, & f \notin W \end{cases}$$

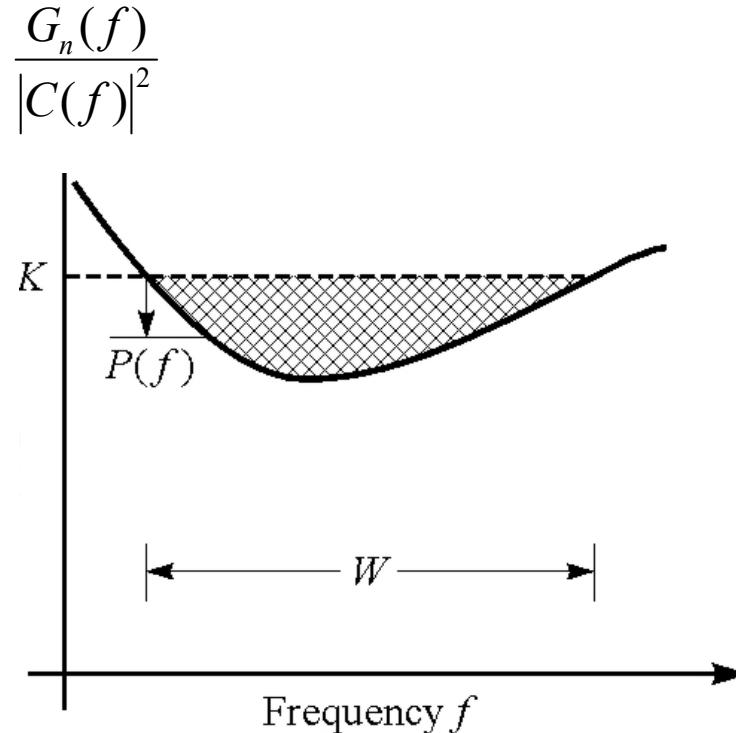
(Shannon, 1949)

## Modulaciones multiportadora: distribución de potencia en el canal

### *Interpretación Water-filling:*

- La potencia transmitida  $P(f)$  debe crecer con la SNR del canal  $|C(f)|^2/G_n(f)$ .

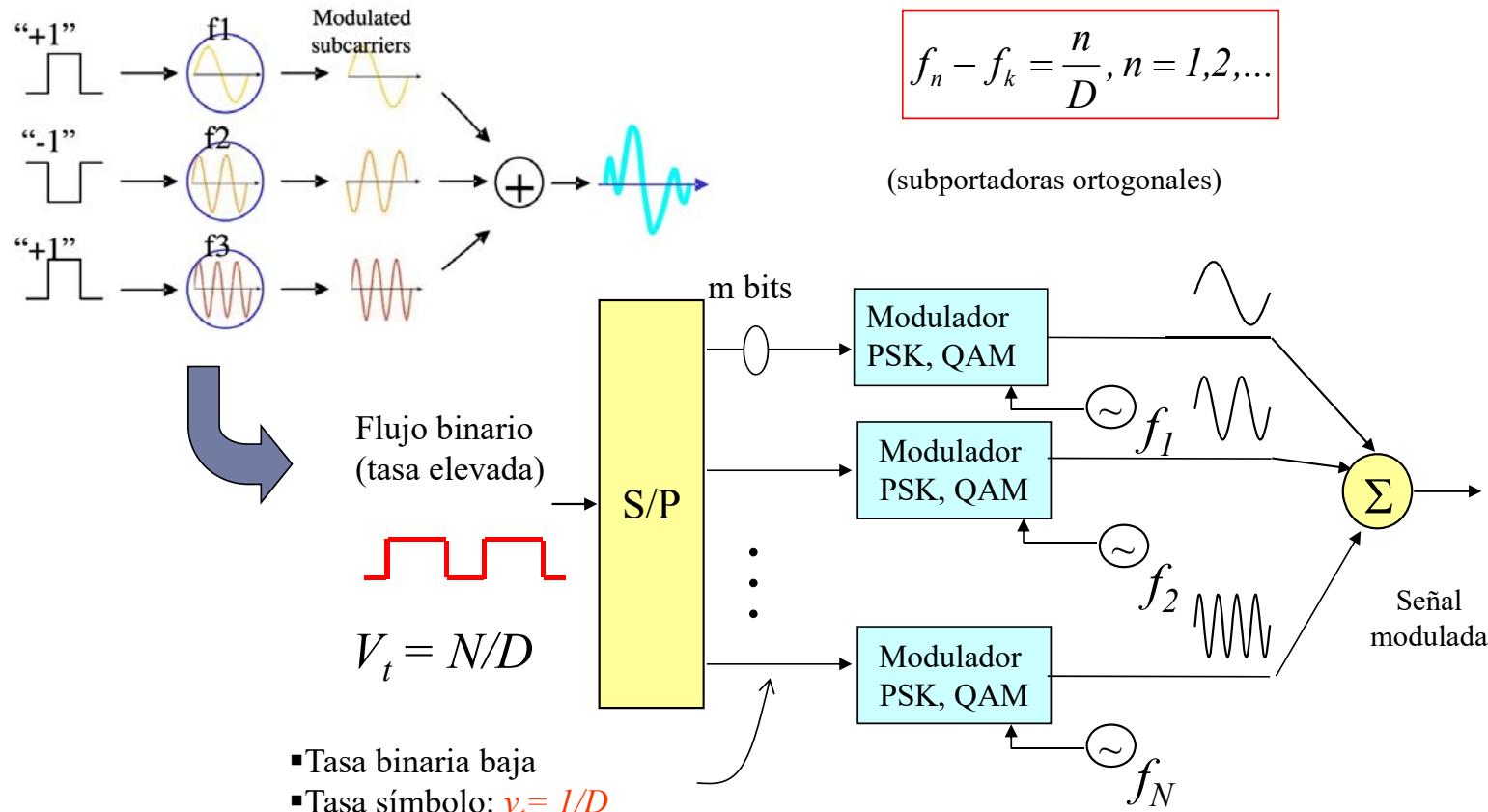
$$P(f) \uparrow \text{cuando } \frac{G_n(f)}{|C(f)|^2} \downarrow$$



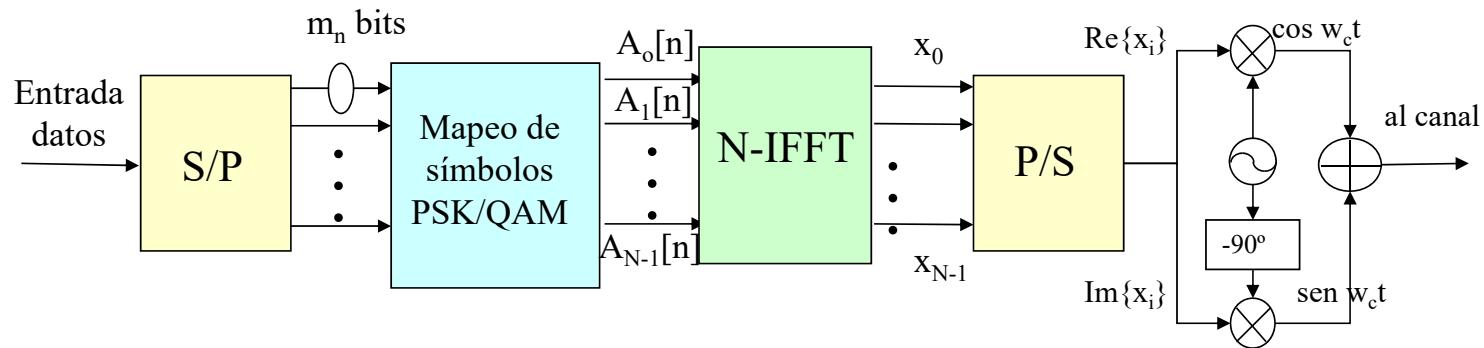
## Historia modulaciones multiportadora

- Sistemas de comunicaciones multiportadora introducidos en **1960s** (aplicaciones militares).
- 1966: **Primera patente** laboratorios Bell. **Diseño analógico**.
- **1971** se propone la FFT y permite implementación **eficiente** de OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).
- En **1980s**, comienza a emplearse en **comunicaciones móviles, módems de alta velocidad y grabación de alta densidad**.
- En 1990s: comunicaciones de datos de banda ancha sobre canales móviles, líneas DSL,...
- **Actualidad:**
  - **Estándar** en aplicaciones de cable (**ADSL**). Denominada (Discrete Multitone Modulation (DMT)).
  - **Estándar** de modulación en radiodifusión digital de audio y vídeo (**DAB y DVB**).
  - **Estándar** de modulación en **sistemas de comunicación inalámbricos**: Wi-Fi (802.11, HiperLAN), WiMax, LTE, LTE-A, 5G.

## Fundamentos modulaciones multiportadora



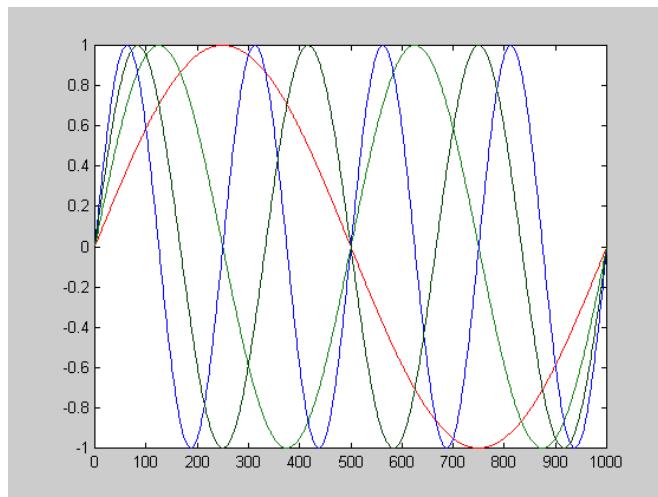
## Transmisor OFDM mediante IFFT



- Bloque S/P: Reparte los bits de entrada en N ramas, asignando a la rama i-ésima  $m_i$  bits
- N subcanales QAM o PSK independientes con diferente constelación de señales. Número de señales en el subcanal i-ésimo: 
$$M_i = 2^{m_i}$$
- Todos los subcanales tienen la misma velocidad de transmisión ( $v_t=1/D$ ) y una tasa binaria dada por  $R=v_t \cdot m_i$

## OFDM: Ortogonalidad subportadoras

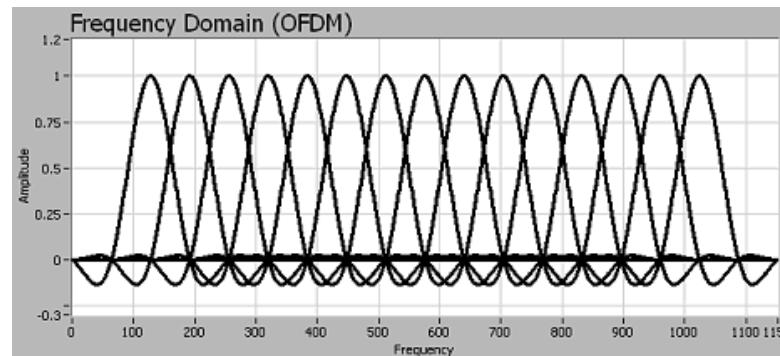
Ejemplo de 4 subportadoras en un periodo de símbolo



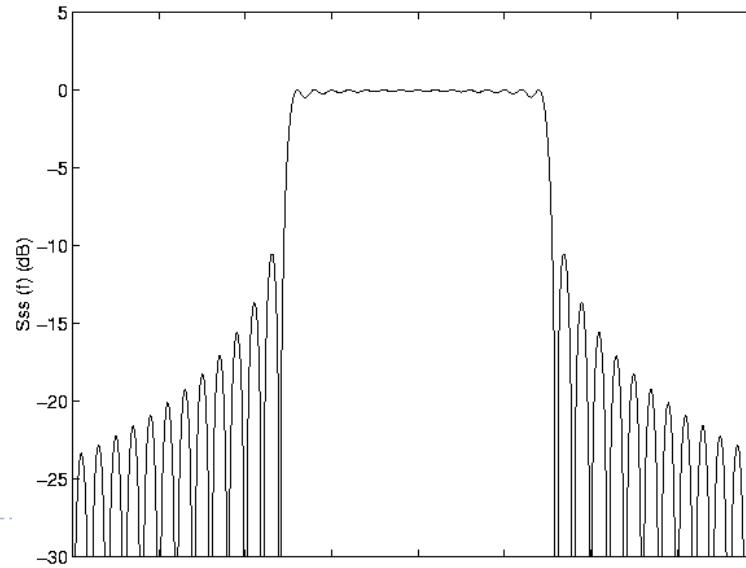
- ✓ 4 subportadoras de frecuencias múltiplo de  $1/D$ .
- ✓ Señales ortogonales limitadas en el tiempo.
- ✓ Espectro: Convolución de 4 deltas en las  $f_{sc}$  con espectro de un pulso cuadrado de duración un periodo de símbolo [ $\text{sinc}(fD)$ ].

## OFDM: Ortogonalidad subportadoras

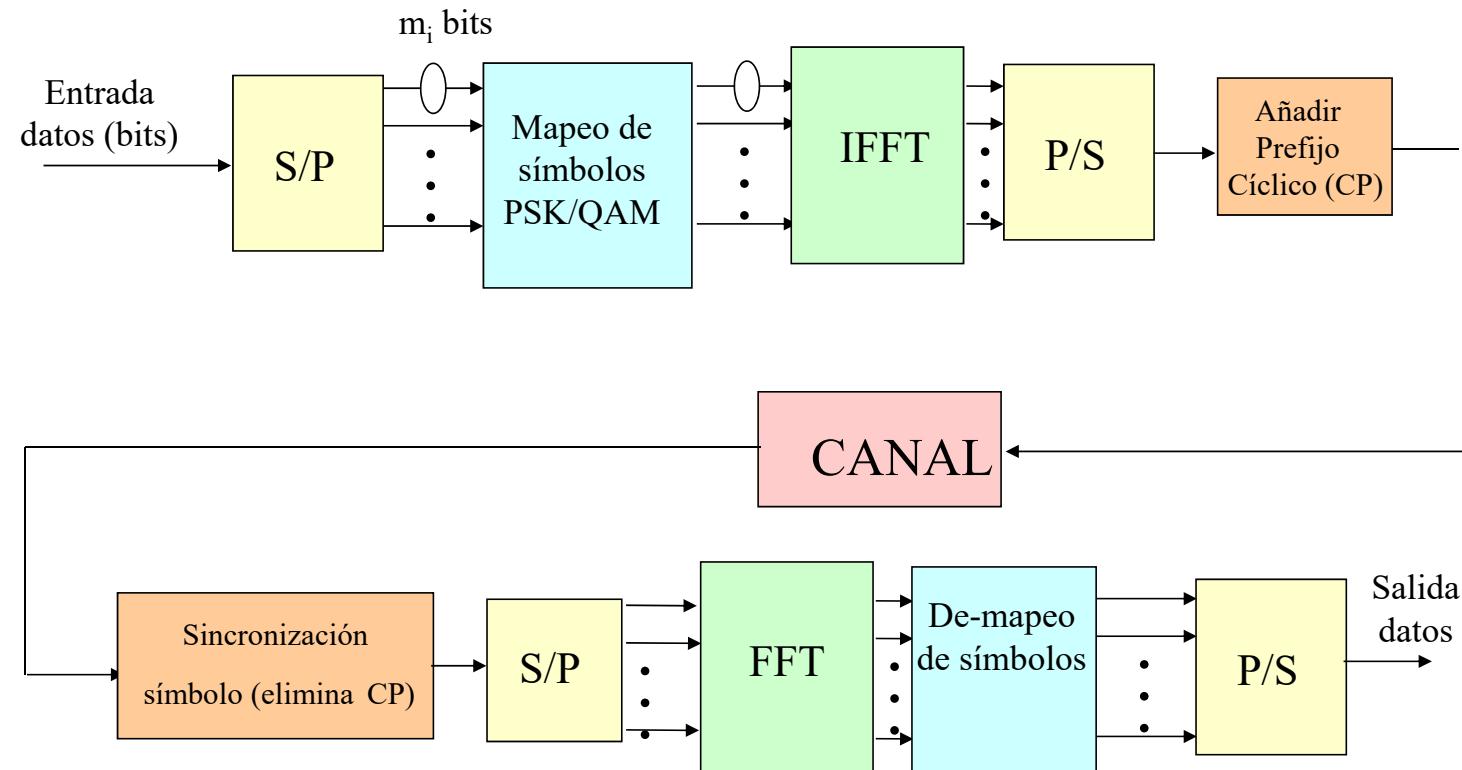
Espectro individual  
de cada subportadora



Espectro  
de la señal OFDM



## OFDM con Prefijo Cíclico

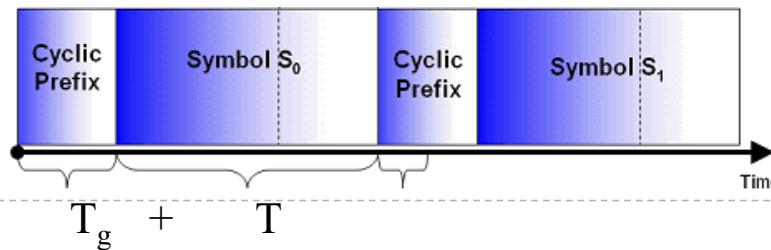


## OFDM con Prefijo Cíclico

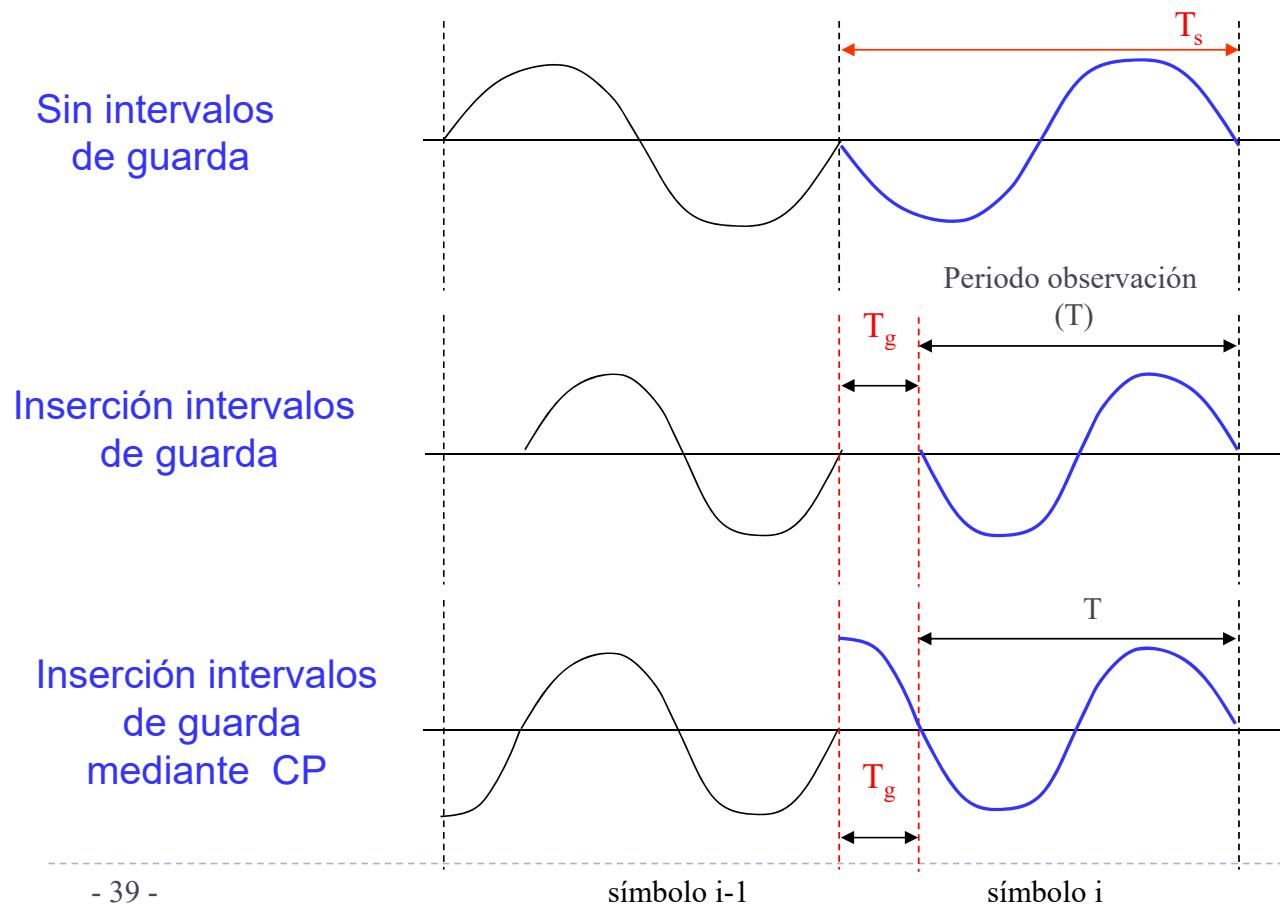
- En recepción, la ortogonalidad de las subportadoras asegura la separación de cada subcanal mediante la FFT si no existe **ISI** (Interferencia entre Símbolos).
- Multicamino genera ISI.
- Solución: añadir un **intervalo de guarda ( $T_g$ )**.

Opción 1. Periodo de tiempo mayor al retardo máximo del multicamino (delay spread)  $\Rightarrow$  puede provocar Interferencia entre subportadoras (**ICI**).

Opción 2. Extendiendo de forma cíclica el símbolo OFDM. Cada símbolo es **precedido** por una extensión periódica de sí mismo (**PREFIJO CÍCLICO**).

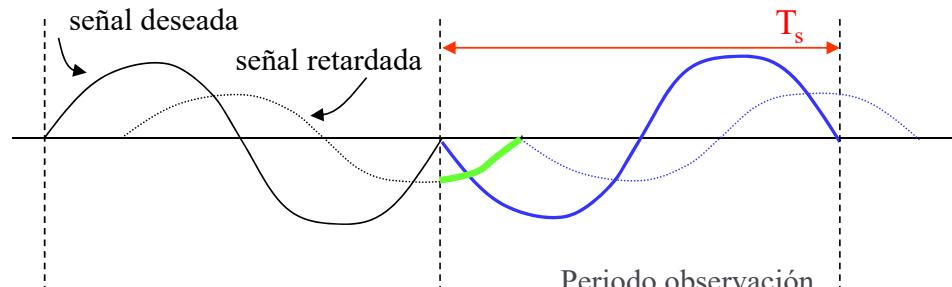
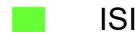


## PC: Señal transmitida



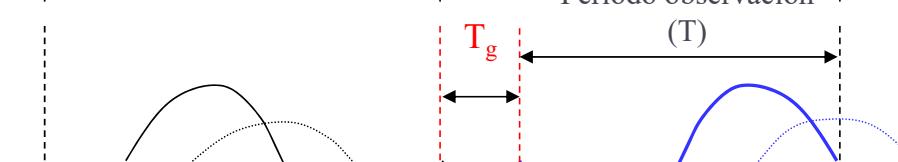
## PC: Señal recibida

Sin intervalos de guarda



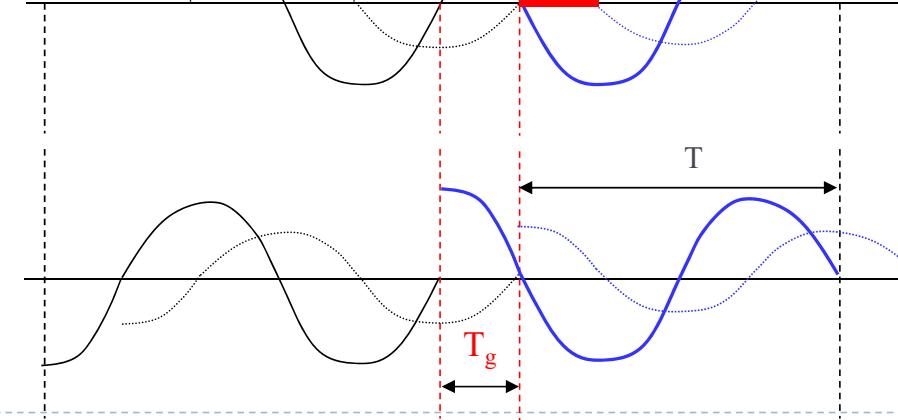
Inserción intervalos de guarda

- cambio de forma de onda genera ICI

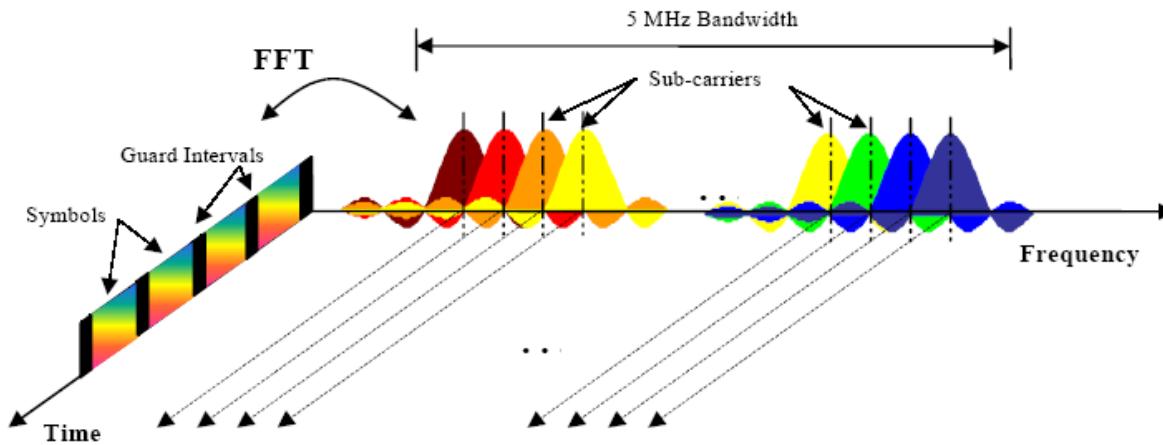


Inserción intervalos de guarda: CP

Asegura nº entero ciclos de las réplicas en el T (no ICI)



## Señal OFDM



- Señal OFDM de 5MHz.
- En frecuencia: datos modulados y transmitidos en diferentes subportadoras ortogonales.
- En tiempo: Forma de onda compuesta de N subportadoras.
- Símbolo OFDM: se inserta PC al inicio.

## OFDM Codificada (COFDM)

- Canales selectivos en frecuencia: diferentes subportadoras experimentan diferentes desvanecimientos.
- En caso de fading severo puede obtenerse un **BER elevado** ( $\approx 0.5$ ).



### Codificación de canal:

- Codificación de canal se realiza antes de la conversión S/P. Emplea **códigos de corrección de errores**. Introduce nuevos bits (tasa de codificación= input/output bits: 2/3, 7/9,...).
- Bloque S/P incluye **entrelazado de los bits**: los bits se reordenan de forma que los bits de salida del codificador se envían en subportadoras separadas (diversidad en frecuencia).
- Es improbable los diferentes bits de la palabra código experimenten fading severo  $\Rightarrow$  los bits se corrijen con el decodificador de canal y mejora el **BER**.



### OFDM codificada (COFDM)

## Índice

---

1. Modulaciones monoportadora.
2. Modulaciones multiportadora: modulación OFDM.
3. Modulaciones de espectro ensanchado (CDMA).
4. OFDM con acceso multusuario.
5. Estándares y tecnologías actuales.

### 3. Modulaciones de espectro ensanchado o Spread Spectrum (SS)

- En realidad es una **técnica de acceso múltiple** (MA) que intenta **mitigar la distorsión lineal** del canal.
- Emplea un **ancho de banda elevado**.
- **Ventajas en un sistema de un único usuario:**
  - Ante interferencias localizadas en algunas frecuencias del canal, no afectarán (en promedio) tanto a la señal deseada si el  $W$  es elevado.
  - La potencia se distribuye en todo el ancho de banda. Si el ancho de banda es elevado, la potencia transmitida en las zonas “*malas*” del canal será pequeña.

## Modulaciones de espectro ensanchado

- Uso en sistemas de acceso múltiple (MA) :
  - Minimiza las necesidades de bandas de guarda en tiempo y frecuencia.
  - Todos los **usuarios** presentes **transmiten en el mismo W**.
  - La ortogonalidad de las señales transmitidas permite la separación de la información en el receptor. La interferencia de acceso múltiple (MAI) se minimiza.
  - Cada usuario emplea un código diferente



**Code-Division Multiple Access (CDMA)**

## Clasificación CDMA

### ➤ CDMA Puro:

- DS-CDMA (CDMA por secuencia directa).
- FH-CDMA (CDMA por salto en frecuencia).
- TH-CDMA (CDMA por salto en el tiempo).

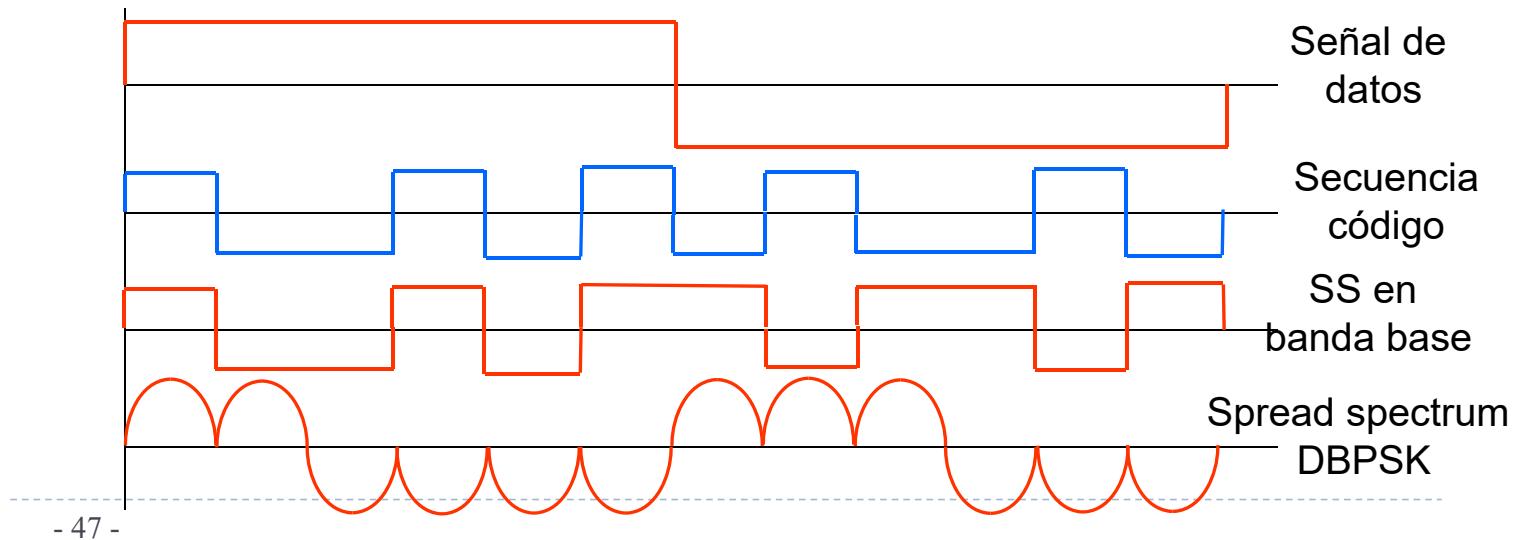
### ➤ CDMA Híbrido:

- DS/FH, DS/TH,...
- TDMA/CDMA, FDMA/CDMA,...
- Híbrido OFDM/CDMA: MC-CDMA, MT-CDMA.

## (Direct Sequence) DS-CDMA

- La señal de información se multiplica por una secuencia ensanchadora pseudoaleatoria (determinista pero con apariencia externa de ruido blanco).
- Secuencia formada por bits del código (“*chips*”) de valor (+1,-1).

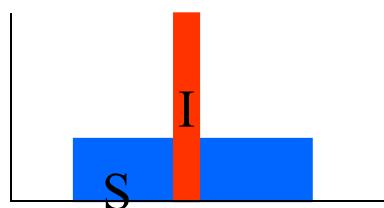
Señal de espectro ensanchado modulada en DBPSK



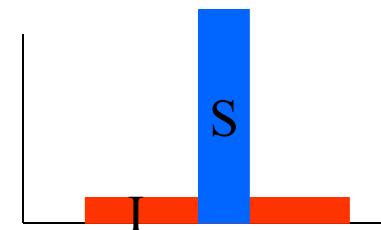
## DS-CDMA

- Proceso de ensanchado aumenta el ancho de banda.
- **Des-ensanchado al receptor:** multiplica la señal recibida con una réplica sincronizada del código de ensanchado.
- **Rechazo de interferencias:** el receptor convierte una interferencia de banda estrecha en una de banda ancha pero con la misma potencia.

Señal recibida



Señal recibida después de des-ensanchado



S: Señal SS de interés ensanchada por el código

I: Interferencia de banda estrecha

S: Señal recuperada en el receptor.

I: Interferencia de banda ancha (ruido de fondo)

## Propiedades DS-CDMA

- Múltiples usuarios en el canal → múltiples señales se solapan en recepción. La señal deseada se recupera concentrando su potencia en el ancho de banda original. El resto de señales interferentes sitúan una pequeña porción de su potencia en ese ancho de banda.
- Cada usuario transmite empleando **una secuencia de pulsos ortogonal a las demás**.
- Todos los usuarios **comparten todo el ancho de banda**.
- La señal DS-CDMA se genera con una multiplicación.
- Es una modulación de **portadora única**.
- No es necesaria la **sincronización entre usuarios**.

## (Frequency Hopping) FH-CDMA

- La frecuencia de la portadora ( $f_c$ ) de la señal transmitida cambia cada  $T_2$  (periodo de salto).
- Emplea una pequeña banda del ancho disponible, pero ésta cambia con el tiempo.
- Dos implementaciones posibles:
  - Salto rápido: la  $f_c$  cambia varias veces por cada símbolo (duración  $T$ )  $T_2 / T < 1$
  - Salto lento: se transmiten varios símbolos por cada cambio de la portadora  $T_2 / T \geq 1$

## FH-CDMA

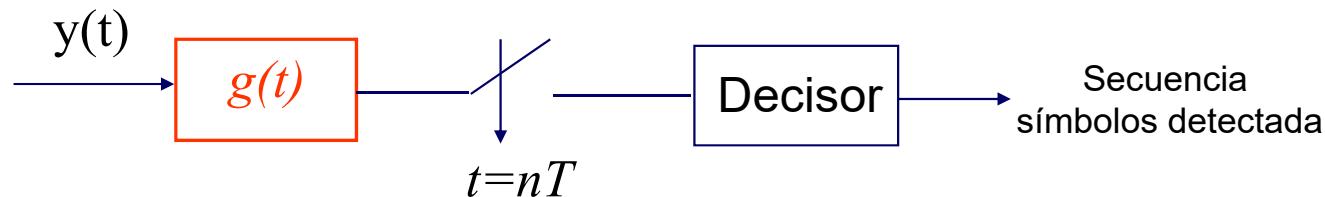
- Se emplea habitualmente la implementación de **salto lento**.
- Debe proporcionar una baja probabilidad de multiples usuarios usando la misma banda a la vez.
- Uso de ancho de banda elevado reduce efecto interferencias.
- Es más **compleja de implementar** debido a la generación de frecuencias de portadora.

## (Time Hopping) TH-CDMA

- Cada trama temporal se divide en slots donde cada usuario transmite (slots de tiempo variables).
- Para cada usuario: transmisión de ráfagas de datos en intervalos de t determinados por código.
- Cada usuario transmite en todo el ancho de banda en pequeños periodos de tiempo.
- TH-CDMA no es tan popular como DS o FH.

## Receptor Rake

- R. Price y P.E. Green, "A Communication Technique for Multipath Channels," Proceedings of the IRE, 1958.
- Aprovecha la diversidad multicamino (señal se recibe con diferentes atenuaciones, desfases y retardos).
- Intenta separar cada camino de propagación para mejorar el sistema (más fácil cuanto mayor sea W). Debe estimar la respuesta del canal
- L ramas (púas) paralelas combinan sus salidas para producir un único valor que será la entrada del detector.
- Estructura basada en filtro adaptado.



## Receptor Rake

- $h(t)$  es la respuesta impulsional equivalente en banda base del canal con multicamino (suponemos slow fading)

$$h(t) = \sum_{l=1}^L h_l \delta(t - \tau_l)$$

$L$ : número de caminos de propagación.  
 $h_l$ : ganancia compleja del camino  $l$ -ésimo.

$\tau_l$ : retardo del camino  $l$ -ésimo.

- Respuesta impulsional  $r(t)$  del filtro adaptado:

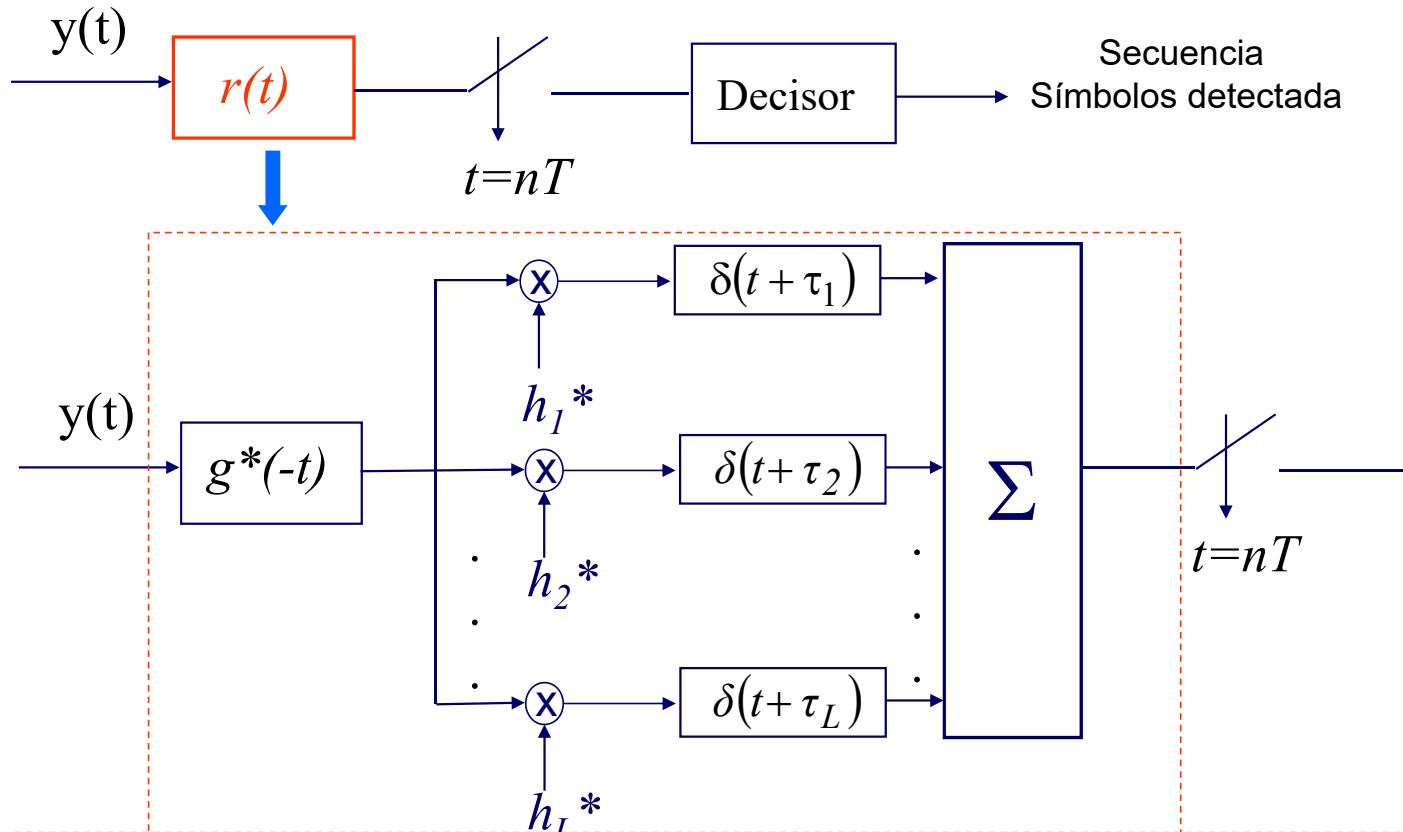
- $g(t)$ : secuencia de pulsos transmitida (spread spectrum).
- Respuesta impulsional combinada de la secuencia y el canal:

$$g(t) * h(t) = \sum_{l=1}^L h_l g(t - \tau_l)$$

- **FILTRO ADAPTADO=RAKE**

$$r(t) = g^*(-t) * h^*(-t) = g^*(-t) * \sum_{l=1}^L h_l^* \delta(t + \tau_l)$$

## Receptor Rake



## Índice

---

1. Modulaciones monoportadora.
2. Modulaciones multiportadora: modulación OFDM.
3. Modulaciones de espectro ensanchado (CDMA).
4. OFDM con acceso multusuario.
5. Estándares y tecnologías actuales.

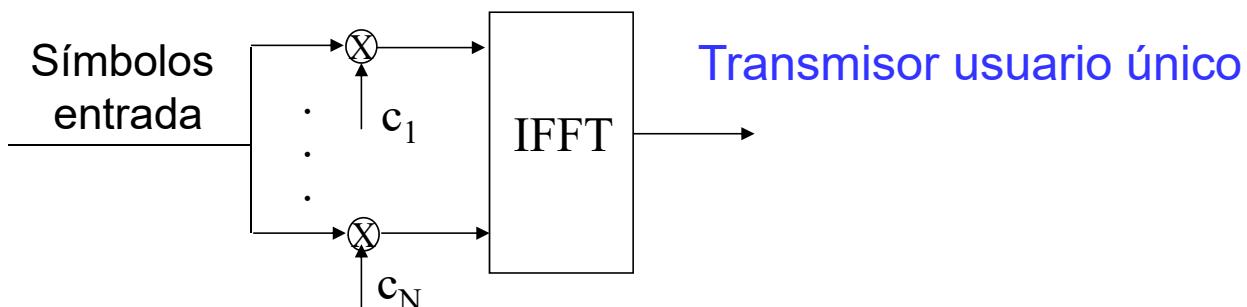
## 4. OFDM con acceso multiusuario

➤ Técnicas de acceso múltiple relacionadas con OFDM:

- OFDM-CDMA o **Multicarrier CDMA**: acceso multiusuario por división de código (CDMA), se combina con OFDM.
- OFDM-TDMA: cada usuario emplea todas las subportadoras en el slot de tiempo asignado. Ideal para tráfico uniforme en tiempo.
- OFDMA: divide la banda de frecuencias disponible en subportadoras y las asigna a diferentes usuarios.

## Multicarrier CDMA (MC-CDMA)

- Forma especial de CDMA que aplica el ensanchado en el dominio de la frecuencia. Después del ensanchado se aplica una IFFT a los símbolos.
- Códigos de ensanchado  $c(t)$ : secuencia ortogonales de +1 y -1 (Códigos Walsh-Hadamard)
- Cada subportadora se multiplica por un “chip”
- Múltiples usuarios transmiten simultáneamente en el mismo conjunto de subportadoras.

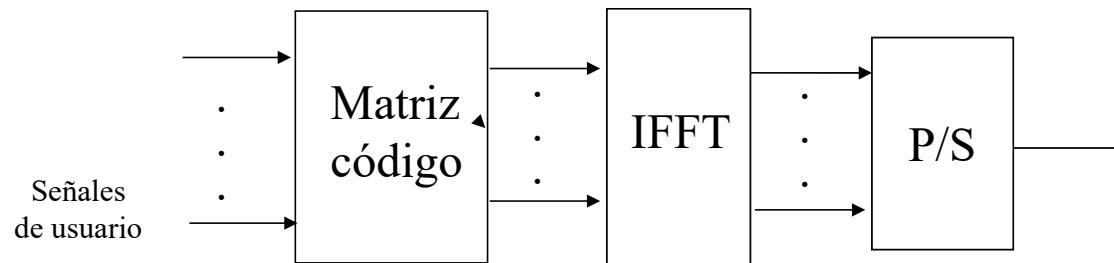


## MC-CDMA

- Transmite el mismo símbolo en paralelo sobre N subportadoras (OFDM tx diferentes símbolos)
- Es una forma de:
  - DS-CDMA, pero tras el ensanchado realiza una IFFT.
  - OFDM, pero los símbolos se multiplican primero por una matriz de ortogonalización.
  - **Diversidad en frecuencia**. Cada bit se tx simultáneamente en diferentes subportadoras.
- Receptor: Primero se aplica una FFT, y en segundo lugar se aplica el código de desensanchado. Y el filtro RAKE.

## MC-CDMA multiusuario

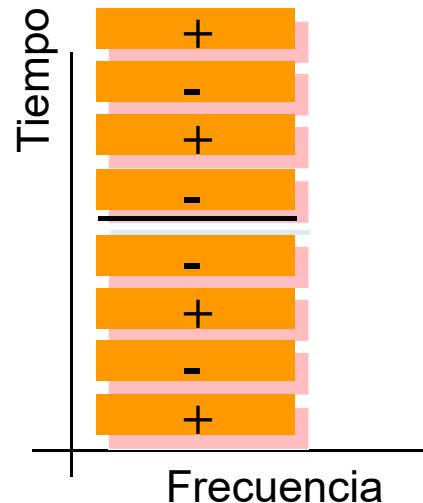
- Permite tx simultánea de varios usuarios usando el mismo conjunto de subportadoras.
- En dirección descendente (base hacia el móvil), el **acceso múltiple** se consigue **superponiendo señales** para diferentes usuarios en las **mismas subportadoras**, empleando un conjunto de **códigos** de ensanchado **ortogonales**.



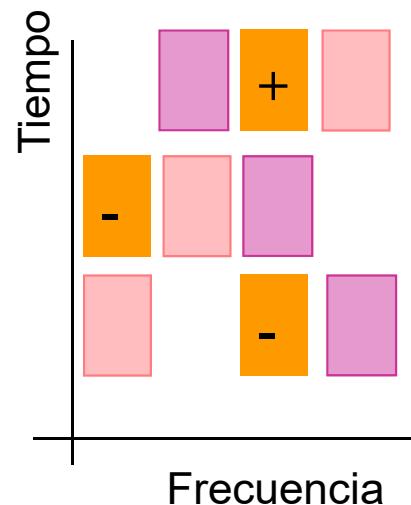
Transmisor enlace descendente

## Esquemas de modulación con CDMA

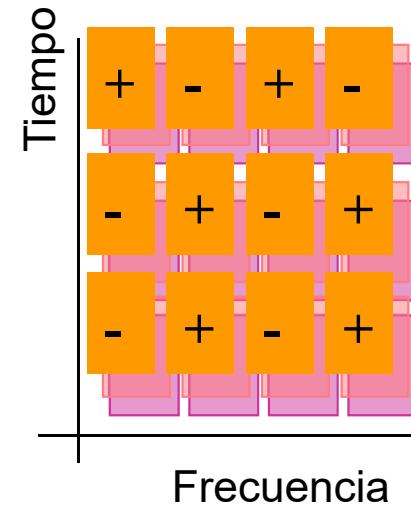
DS-CDMA



FH-CDMA



MC-CDMA



Ensancha el espectro tx multiplicando los símbolos de cada usuario con una secuencia código diferente. Emplea receptor Rake.

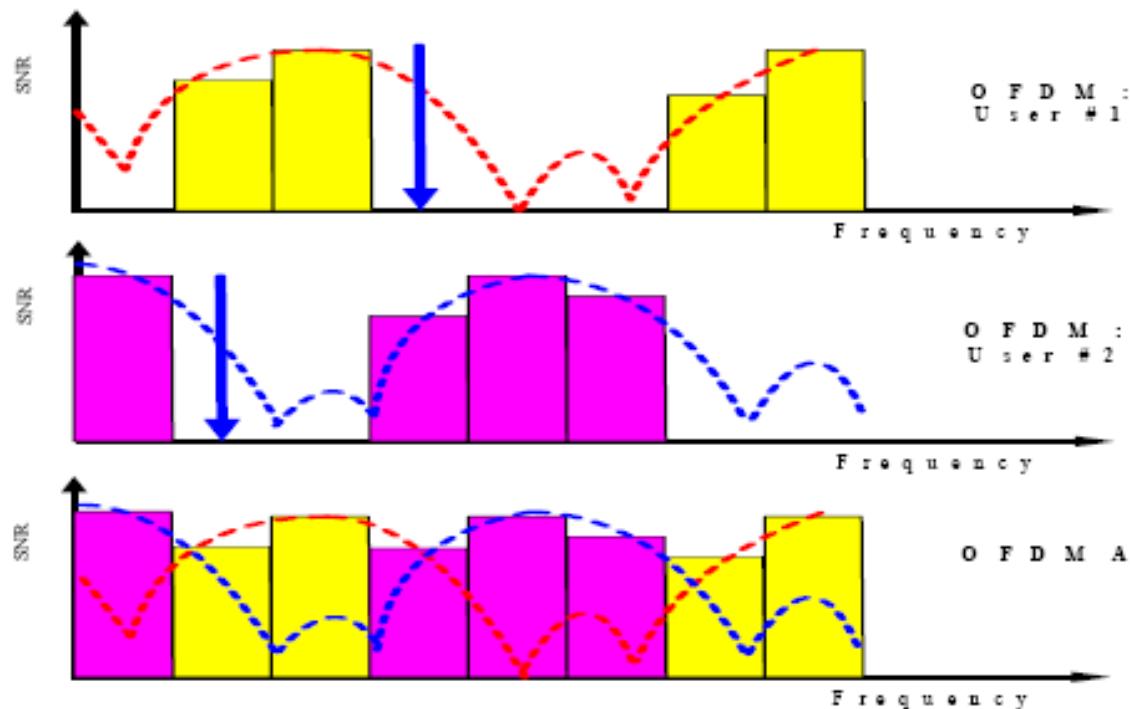
La frecuencia portadora cambia habitualmente para evitar fading (en general salta a frecuencias donde el canal es bueno).

Cada bit se transmite simultáneamente sobre múltiples subportadoras. Usa receptor Rake  
Ventajas de OFDM y DS-CDMA.

## Acceso multiple basado en OFDM: OFDMA

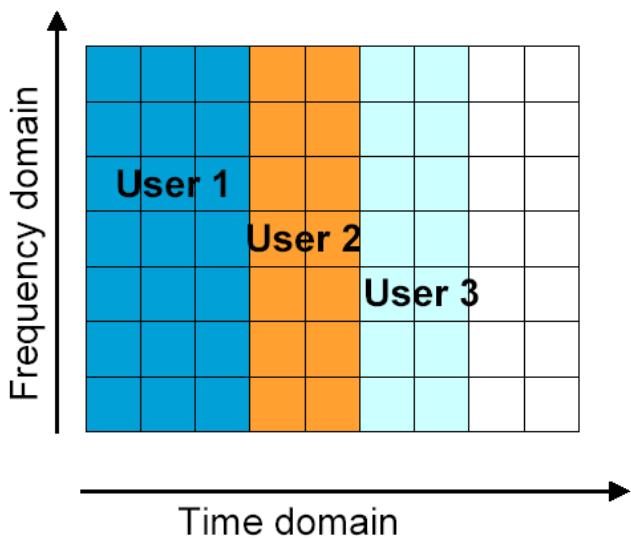
- Se asigna a cada usuario un nº de subportadoras.
- Evita elevadas bandas de guarda (FDMA).
- Diferencias entre **OFDMA** y **MC-CDMA**:
  - MC-CDMA:
    - Todos los usuarios usan **todas las subportadoras** simultáneamente.
    - La Interferencia entre usuarios se evita mediante **códigos de ensanchado ortogonales**.
    - **Ancho de banda** determinado por la secuencia de ensanchado.
  - OFDMA:
    - **Usuarios** emplean **diferente** conjunto de **subportadoras**.
    - **No sufre interferencia** entre usuarios
    - Consigue **velocidades mayores** para la misma capacidad del canal.
    - **Flexibilidad** en asignación de ancho de banda. El número de **subportadoras asignadas** a un usuario es flexible.

## Diferencia entre OFDM y OFDMA

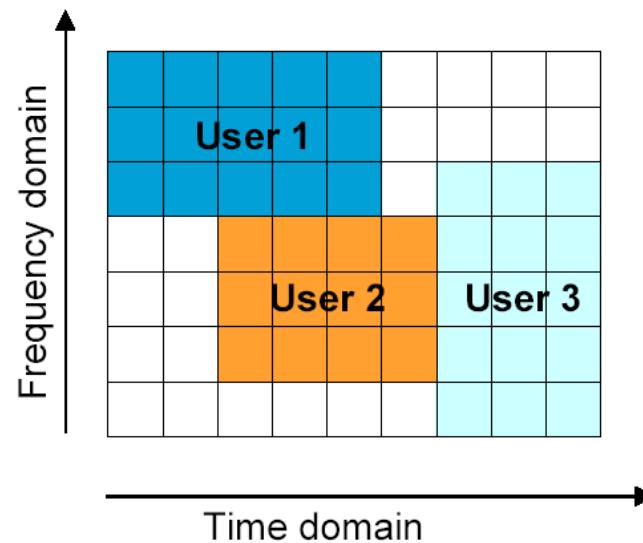


## Diferencia entre OFDM y OFDMA

- OFDM distribuye a los usuarios en el dominio temporal



- OFDMA distribuye a los usuarios en el tiempo y en la frecuencia



## Índice

---

1. Modulaciones monoportadora.
2. Modulaciones multiportadora: modulación OFDM.
3. Modulaciones de espectro ensanchado (CDMA).
4. OFDM con acceso multusuario.
5. Estándares y tecnologías actuales.

## 5. Estándares y Tecnologías actuales

### Digital Audio Broadcasting (DAB)

- Ofrece: calidad sonora comparable CD y elevada eficiencia espectral.
- 1<sup>er</sup> estándar OFDM (1995, ETSI)
- 4 modos tx:

	N	$\Delta f$	$T_g$	$T+T_g$
Modo I	1536	1 kHz	246 $\mu$ s	1.246 ms
Modo III	192	8 kHz	30.8 $\mu$ s	155.8 $\mu$ s

- Señales audio  $f_s=48$  kHz. Banda 175-240 MHz
- Modulación  $\pi/4$ -DQPSK.
- Varios canales de audio se multiplexan y combinan con otras señales de datos y audio  $\Rightarrow$  tasa binaria 2.3 Mbps.

**Digital Video Broadcasting (DVB):** distribución de video digital sobre satélites, cable y tx terrestre.

- 2 modos operación (N=1705 y 6817)
- Modulación QPSK, 16-QAM o 64-QAM. Demodulación coherente mediante subportadoras piloto (ej. 768 pilotos en cada símbolo) para estimar canal.

## Estándares y Tecnologías actuales

### ADSL

- Estándar ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) para el acceso a servicios digitales (Internet) mediante cable desde bucle de abonado a la central telefónica.
- Emplea la modulación FDM ortogonal denominada **DMT** (Discrete Multitone Modulation). Modula en QAM las subportadoras.
- Dos clases estandarizadas de diferente  $R$  en enlace descendente y ascendente: **Full rate ADSL** y **ADSL Lite**.
- ADSL Lite:

	Ascendente	Descendente
$N$	32	255
$\Delta f$	4.3125 kHz	
$R$	500 kbps	1.5 Mbps

## Estándares y Tecnologías actuales

### Wireless Local Area Networks (WLAN)

- Redes WLAN (redes inalámbricas de área local).
- Estándares WLAN que usan OFDM:
  - IEEE 802.11a: CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Cada estación accede al canal cuando está segura de que está libre (acceso por competición).
  - HIPERLAN/2: TDMA.
- Códigos de corrección de errores: códigos convolucionales.
- Servicio en bandas de 5 GHz.
- IEEE 802.11a:

	Modul	R (Mbs)
<b>Modo 1</b>	BPSK	6
<b>Modo 5</b>	16-QAM	24
<b>Modo 8</b>	64-QAM	54

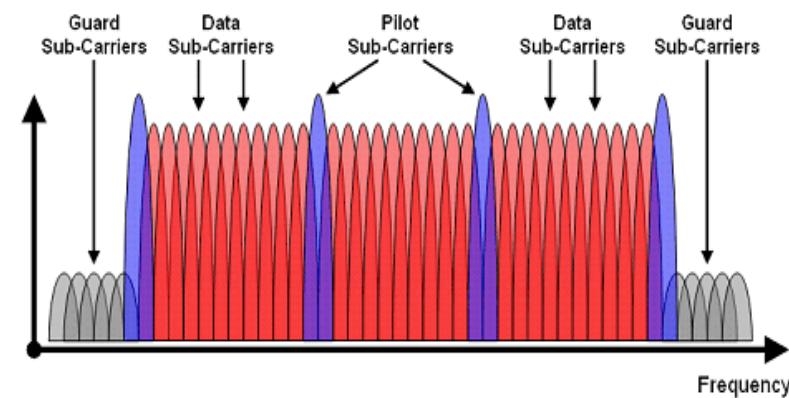
<b>N</b>	52
<b>N<sub>p</sub></b>	4
<b>Δf</b>	20 MHz/64
<b>T</b>	4 μs
<b>T<sub>g</sub></b>	0.8 μs
<b>W</b>	16.66 MHz

## Estándares y Tecnologías actuales

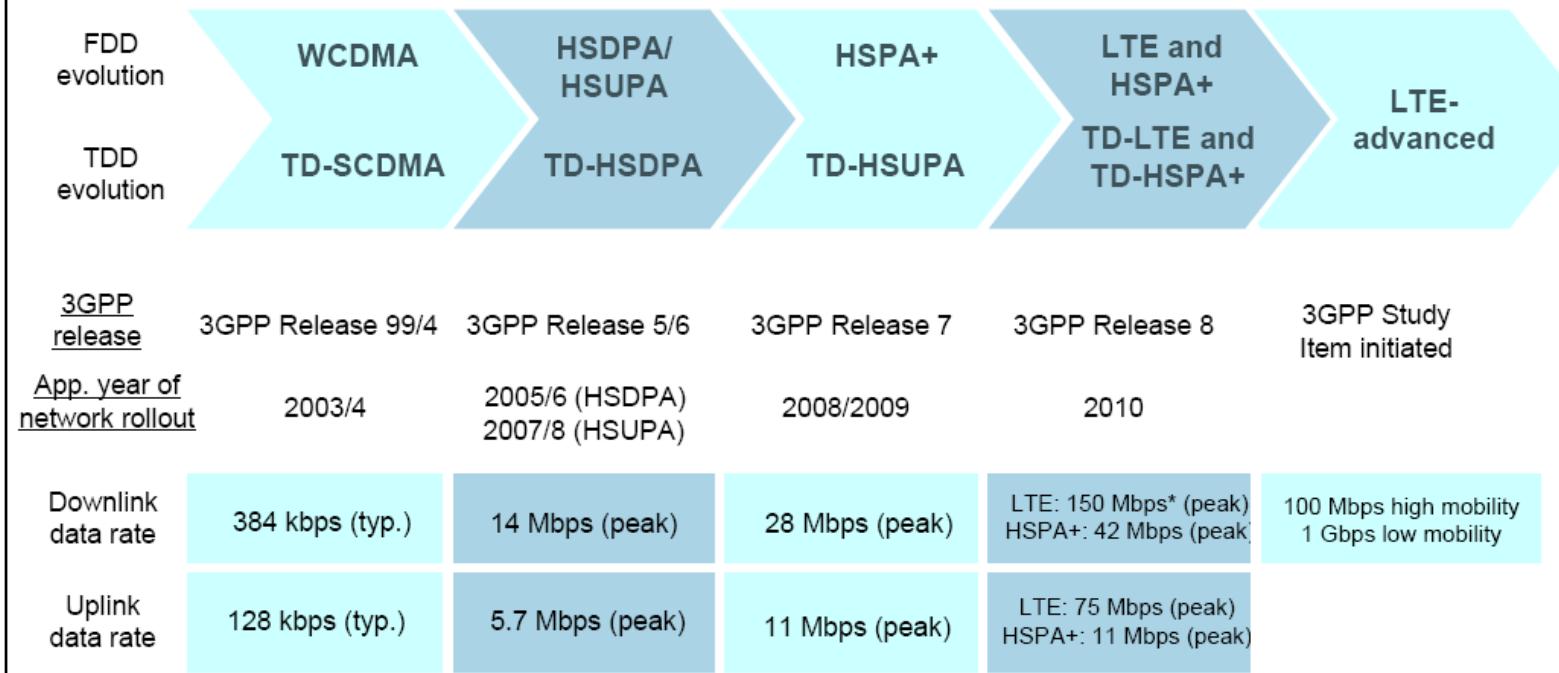
### WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

- Acceso a internet de banda ancha en área metropolitana.
- R desde 1 Mbps hasta 75Mbps. Bandas: 2-11 GHz (fixed), 2-6 GHz (mobile)
- Canal OFDM: 128 a 2048 subportadoras; ocupando W=1.25MHz-10MHz.
- Modulaciones: BPSK, QPSK, 16-QAM,64-QAM
- Uso frecuencias subportadoras en el canal:

Mobile WiMAX OFDMA			
W (MHz)	1.25	5	10
N	128	512	1024
$\Delta f$	10.94 kHz		
$T_s$	91.4 $\mu$ s		
$T_g$	11.4 $\mu$ s		



## Evolución desde 3G UMTS a 4G



## LTE Technology (4G)

- UMTS *Long Term Evolution* (LTE). En sus inicios denominado E-UTRA (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access*).
- Objetivos:
  - 100 Mbit/s enlace descendente ([downlink](#))
  - 50 Mbit/s enlace ascendente ([uplink](#))

## Parámetros clave en LTE (I)

- Modos duplex de transmisión:
  - **TDD:** Time division duplex (LTE-TDD). En una misma llamada, las transmisiones uplink y downlink se realizan en la misma frecuencia, pero asignando diferentes slots de tiempo.
  - **FDD:** Frequency division duplex (LTE-FDD). Uplink y downlink transmiten empleando diferentes frecuencias.
- Esquemas de modulación: QPSK, 16-QAM, 64-QAM.
- Modos de acceso multiusuario:
  - *Downlink:* **OFDMA**.
  - *Uplink:* **SC-FDMA** (Single-carrier frequency division multiple access).

## Parámetros clave en LTE (II)

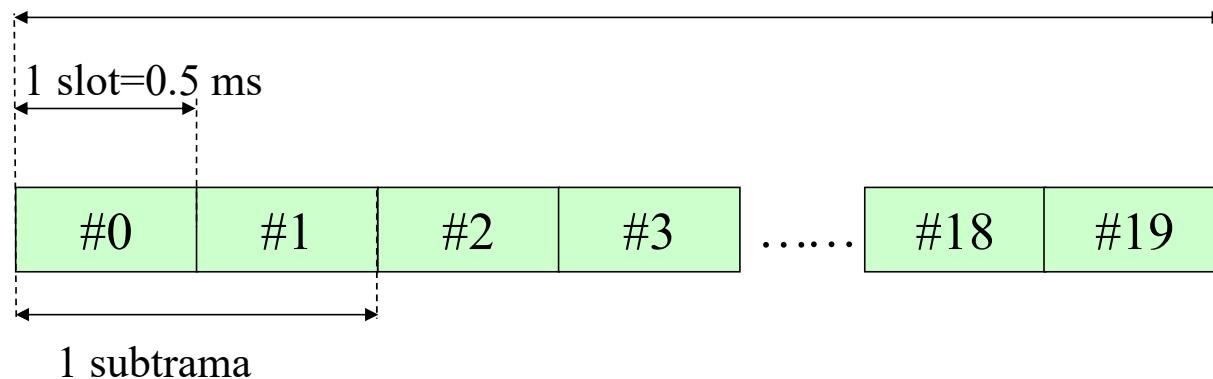
- Rango de frecuencias: bandas definidas para UMTS.
- Separación subportadoras: 15 kHz
- Anchos de banda del canal:
  - Soporta entre 1.4 MHz y 20 MHz.
  - Recurso de asignación mínimo de 180 KHz (12 subportadoras)

Channel bandwidth $BW_{\text{Channel}}$ [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Number of resource blocks	6	15	25	50	75	100

## Estructura de la trama temporal

➤ Tipo 1 (modo FDD):

- ✓ 20 slots de 0.5 ms
- ✓ Subtrama compuesta de 2 slots consecutivos de 1ms
- ✓ Trama radio= 10 subtramas = 10 ms

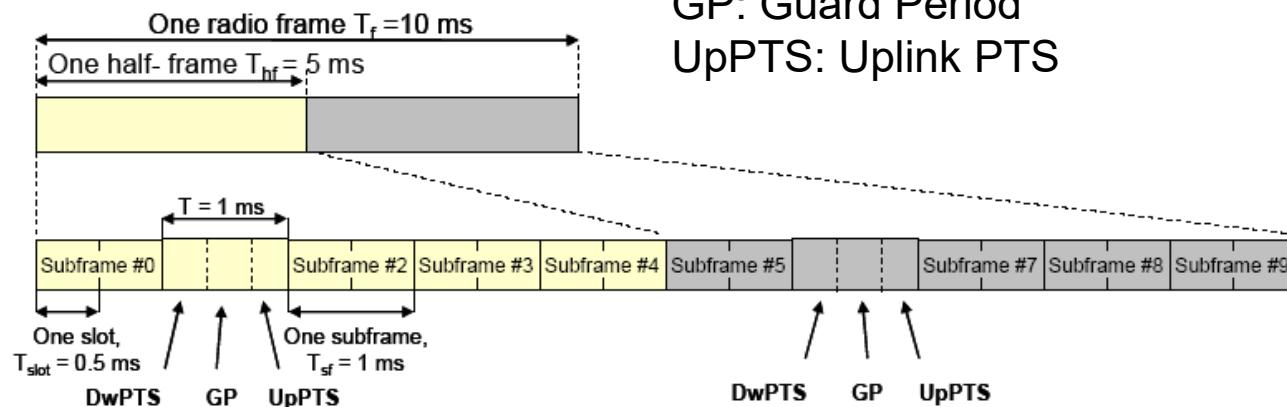


## Estructura de trama temporal

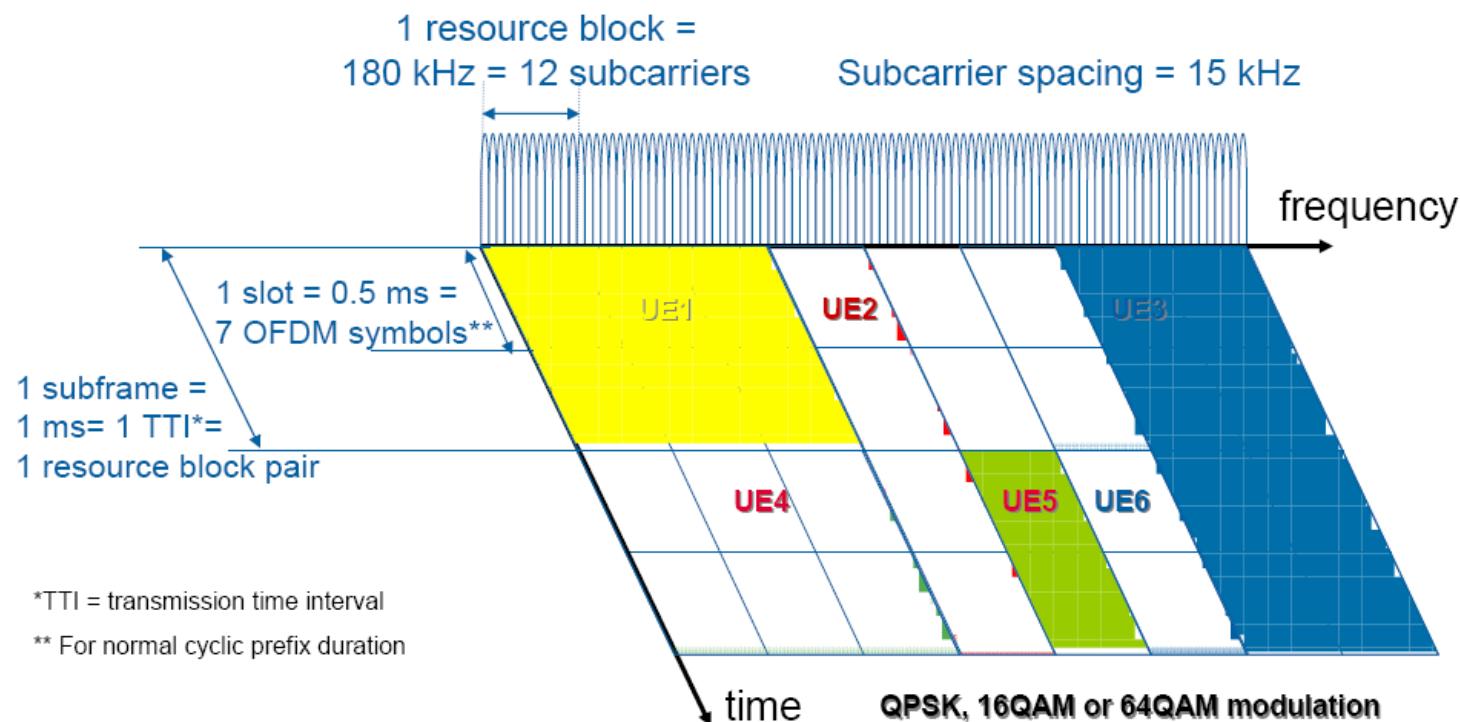
### ➤ Tipo II (modo TDD):

- ✓ Una trama se compone de 2 medias tramas de 5ms cada una.
- ✓ Cada media trama se divide en 5 subtramas de 1ms cada una
- ✓ Subtrama especial con 3 campos (DwPTS, GP y UpPTS)

DwPTS: Downlink Pilot Time slot  
GP: Guard Period  
UpPTS: Uplink PTS



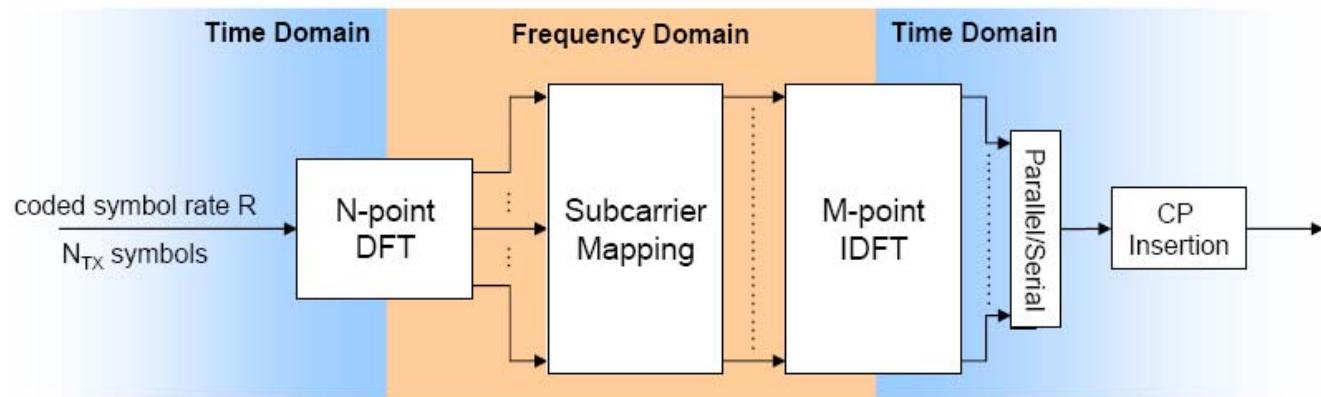
## Asignación de recursos downlink (OFDMA)



## Transmisión uplink (esquema SC-FDMA)

- OFDMA presenta rango de variación de potencia (PAPR) excesivo para los equipos de usuario.
- **SC-FDMA** combina **valores bajos de PAPR** (propios de sistemas de portadora única), con ventajas de OFDMA (**resistencia al multicamino y flexibilidad en asignación de frecuencias**).
- ¿Qué hace SC-FDMA?  
Los **datos en el tiempo** (símbolos) se convierten al **dominio de la frecuencia** empleando una DFT. Se alojan en la frecuencia deseada antes de convertirse de nuevo al **dominio temporal** empleando una IDFT.

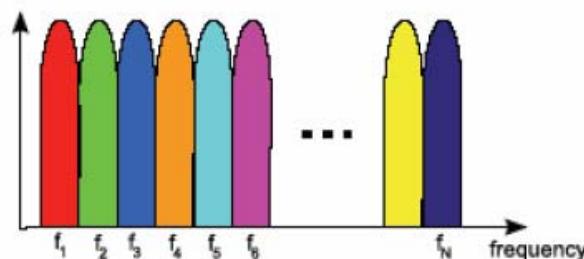
## ¿Cómo generar SC-FDMA?



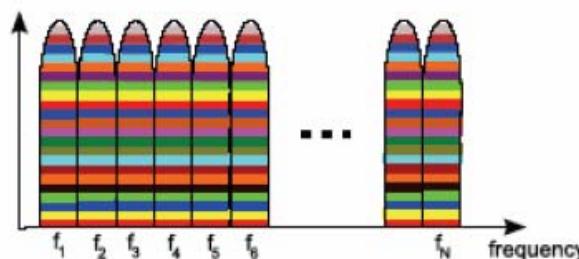
- N símbolos en el tiempo se convierten mediante la DFT al dominio de la frecuencia.
- Se alojan en las frecuencias de subportadoras disponibles en un rango de  $M > N$ .
- Se aplica una IDFT de  $M$  puntos para volver al dominio temporal.

## SC-FDMA

- Similar a una señal OFDM, pero ...
  - En OFDMA, cada subportadora solo transporta información de un símbolo.
  - En SC-FDMA, cada subportadora contiene información de todos los símbolos transmitidos (la DFT extiende los datos sobre subportadoras disponibles).



Subportadoras OFDM



Subportadoras SC-FDMA

## OFDMA vs SC-FDMA

- OFDM modula cada subportadora con un símbolo.
- SC-FDMA distribuye todos los símbolos en cada subportadora.

### OFDMA and SC-FDMA

