



Modulación

Taller de Redes Inalámbricas

Federico Larroca



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



Introducción



- ¿Qué es la modulación?
 - Es el proceso de transformar una señal (el mensaje) de manera tal de que pueda ser transmitida físicamente.
- En nuestro caso tenemos dos requerimientos:
 1. El espectro disponible es limitado y fijo (e.g. podemos usar sólo la banda de 1800 MHz)
 2. Una señal de bajas frecuencias requeriría antenas de tamaños gigantescos
- Hay que transformar la secuencia de 0s y 1s (el mensaje) en una señal (analógica) pasabanda en la frecuencia correspondiente



Introducción

- La manera más común y sencilla de modular es transformando una senoide:

$$s(t) = a \sin(2\pi ft + \theta)$$

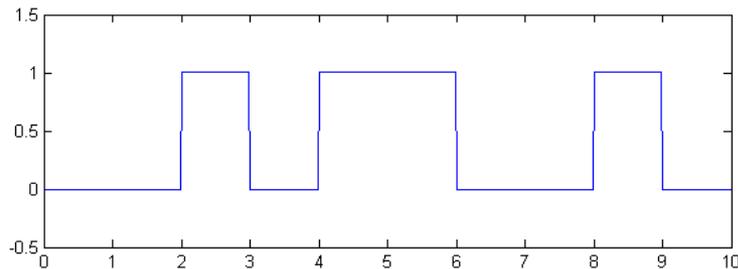
- ¿Qué se puede cambiar en una senoide?
 - La amplitud (a)
 - Amplitude-Shift Keying (ASK)
 - La frecuencia (f)
 - Frequency-Shift Keying (FSK)
 - La fase (θ)
 - Phase-Shift Keying (PSK)



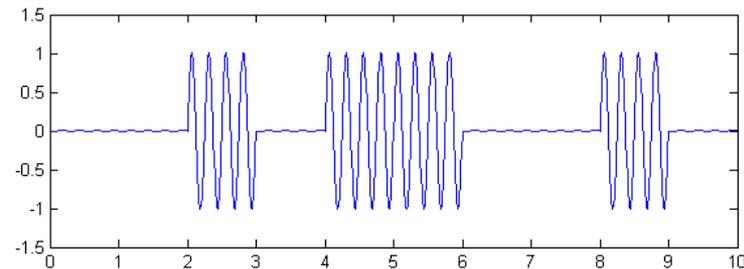
ASK



- En ASK la información se representa por variaciones en la amplitud de la senoide
- Un ejemplo particular es On-Off Keying (OOK)
 - El uno binario se representa por la presencia de la portadora
 - El cero binario se representa por la ausencia de la portadora



Mensaje: 0010110010



Señal modulada

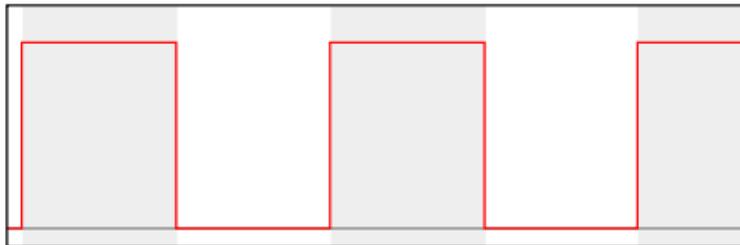
- Usos
 - Transmisión de código morse por RF (en este caso el símbolo no es binario ni la duración es la misma por símbolo)
 - Comunicaciones ópticas (e.g. Infrarrojo)



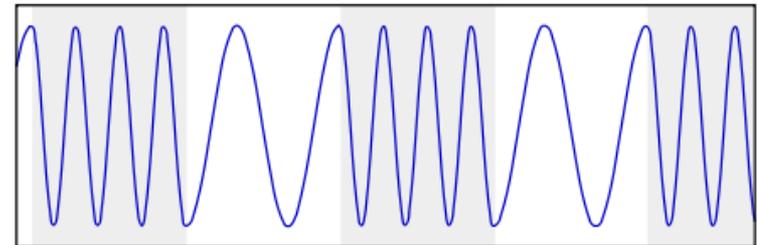
FSK



- En FSK la información se representa por variaciones en la frecuencia de la senoide
- Un ejemplo particular es Binary FSK (BFSK)
 - El cero binario se representa por una frecuencia f_0
 - El uno binario se representa por una frecuencia f_1



Mensaje: 010101



Señal modulada

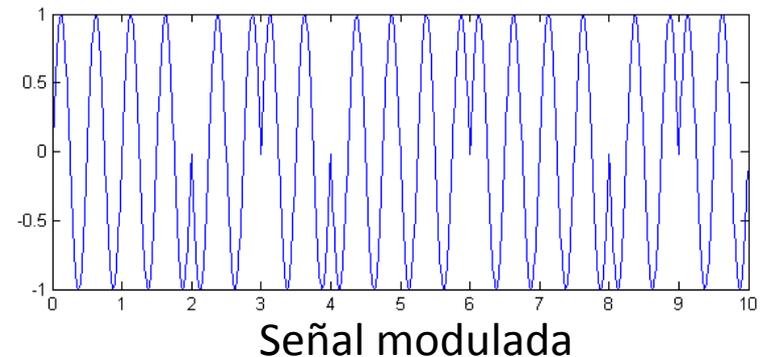
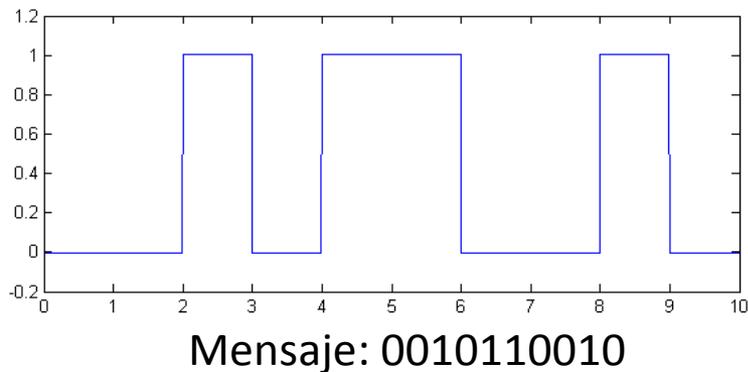
- Usos
 - Una variante de FSK (llamada Gaussian FSK) es muy usada (e.g. Bluetooth)



PSK



- En PSK la información se representa por variaciones en la fase de la senoide
- Un ejemplo particular es Binary PSK (BPSK)
 - El cero binario se representa por la fase 0
 - El uno binario se representa por la fase π



- Usos
 - PSK o alguna de sus variantes (que son muchas) son los esquemas de codificación más usados (e.g. 802.11, 802.15.4, 802.16, RFID, etc.)
 - Lo vemos en más detalle en lo que sigue...



Bits y Símbolos



- ¿Es necesario una correspondencia 1-1 entre la señal transmitida y el “bit” del mensaje?
 - Claro que no!
- Si en vez de considerar dos fases, consideramos cuatro, podemos enviar dos bits en el mismo tiempo (duplicando la eficiencia)
 - $0=00$
 - $\pi/2=01$
 - $\pi=10$
 - $3\pi/2=11$
- Lo que la señal representa es un **símbolo**, que a su vez puede representar cualquier cantidad de bits
 - Baudios = símbolos/segundo



Cuadratura y Fase



- Tomemos una senoide de fase y amplitud arbitraria:

$$a \cos(2\pi f_c t + \theta) = a \cos(\theta) \cos(2\pi f_c t) - a \sin(\theta) \sin(2\pi f_c t)$$

- Podemos construir todas las posibles seales mediante una combinaci3n lineal de la base:

$$\phi_1(t) = \cos(2\pi f_c t)$$

$$\phi_2(t) = \sin(2\pi f_c t)$$

- Las componentes en fase y cuadratura son las coordenadas de la seial en esta base (y se las denomina generalmente como I y Q)



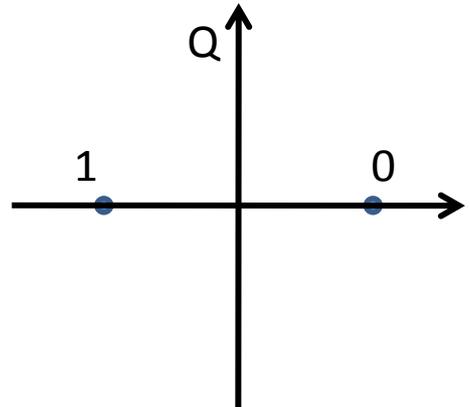
Cuadratura y Fase



- Ejemplos: BPSK

$$\left. \begin{array}{l} 0 : a \cos(2\pi f_c t + 0) \\ 1 : a \cos(2\pi f_c t + \pi) \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} 0 : I = a; Q = 0 \\ 1 : I = -a; Q = 0 \end{cases}$$

- El dibujo de los puntos correspondientes en esta representación se denomina “diagrama de constelación”



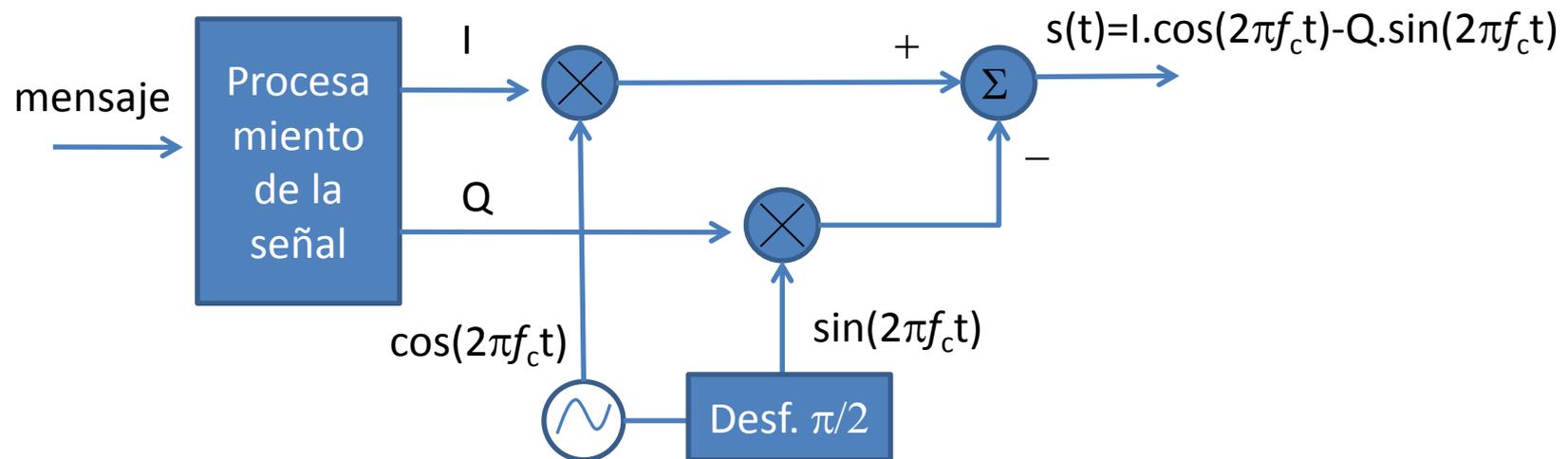
- **Importante:** la fase y la amplitud del vector del punto corresponde con la fase y la amplitud de la señal con la que se representa el símbolo



Cuadratura y Fase



- Más allá de servir como una representación matemática, las componentes en fase y cuadratura son útiles para generar la señal modulada

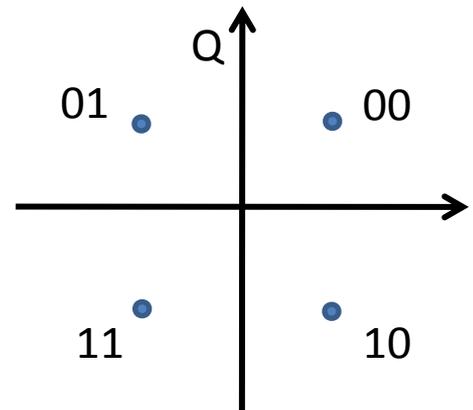
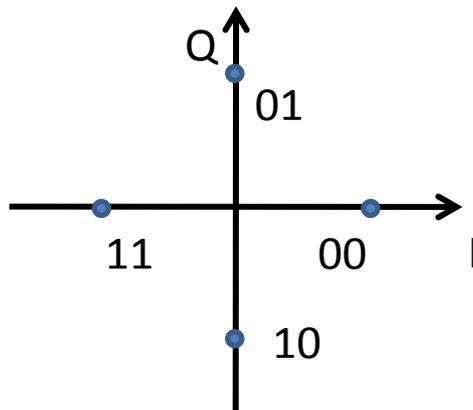




QPSK



- Quadrature-PSK (QPSK)
 - Igual que PSK, pero considera cuatro posibles fases (y envía dos bits por símbolo)
- Constelaciones usuales:

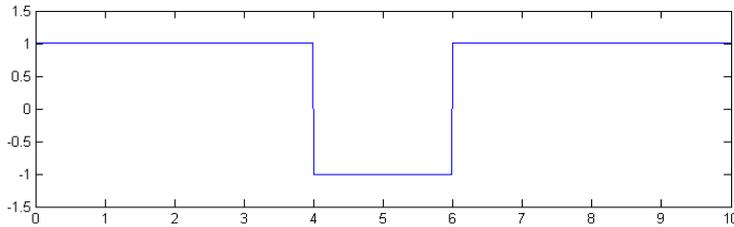
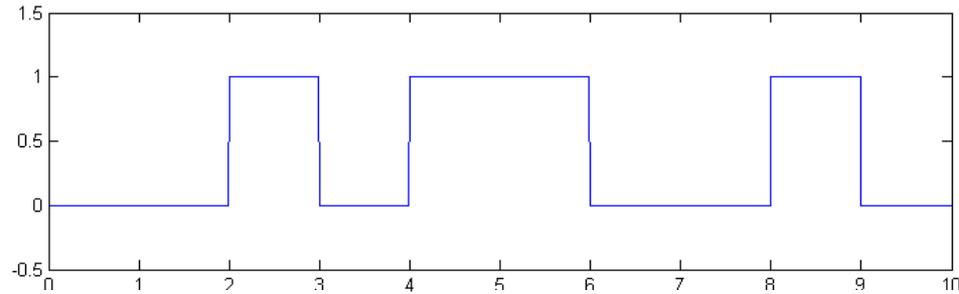


- Notar que la diferencia con el símbolo más cercano es sólo de un bit (código de Gray)

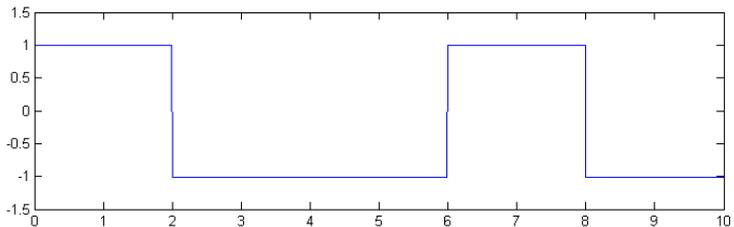
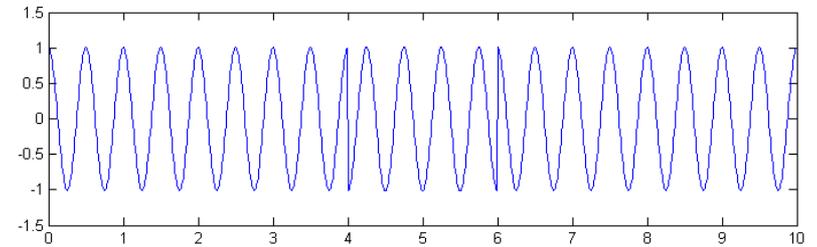


QPSK: Un ejemplo

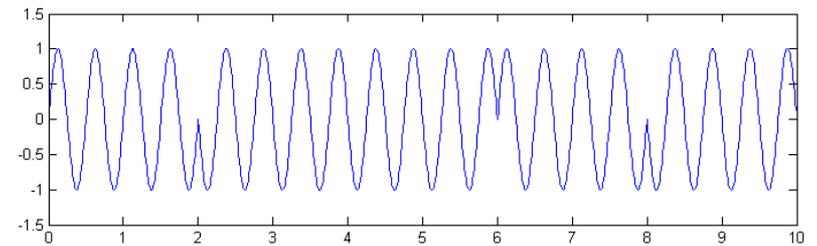
Mensaje
0010110010



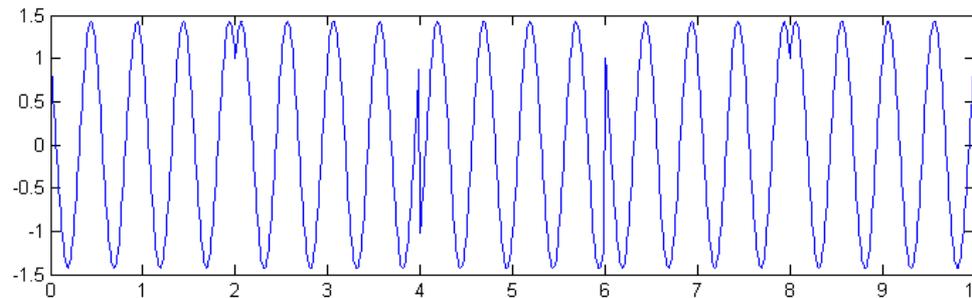
Canal I
1 1 -1 1 1



Canal Q
1 -1 -1 1 -1



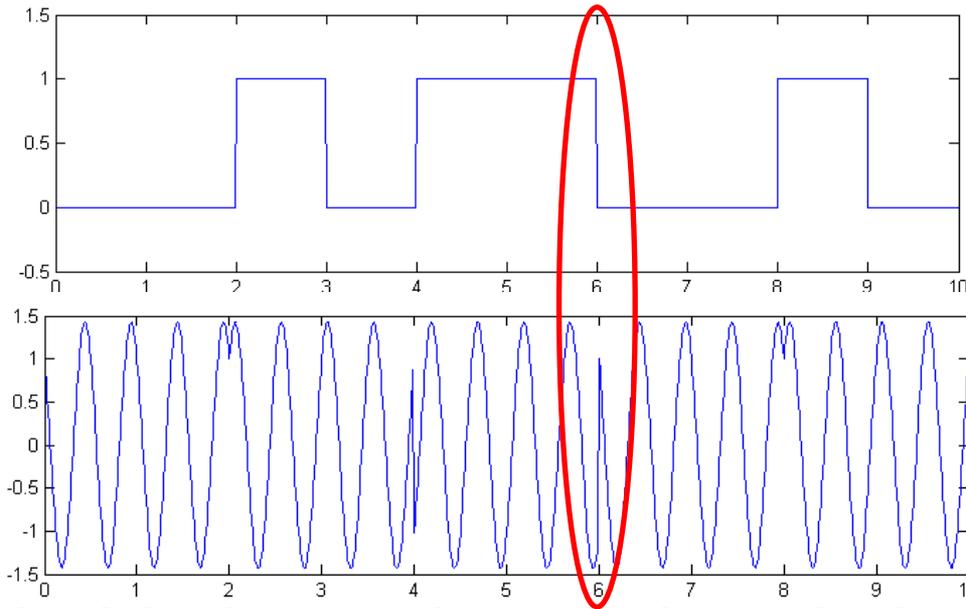
Señal = I+Q





QPSK

Mensaje
0010110010

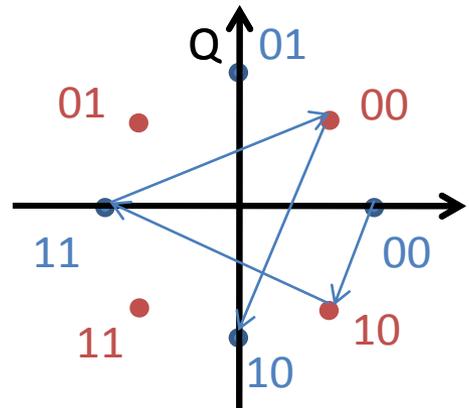


- Las irregularidades en la señal enviada resultan en un aumento de su ancho de banda (sobre todo las discontinuidades)
 - Ejemplo: cambios que pasen por el origen de la constelación generan discontinuidades importantes (marcado en el ejemplo, cambio de 11 a 00)
 - Indeseable, pues aumenta la interferencia



$\pi/4$ -QPSK

- $\pi/4$ -QPSK es como el QPSK ordinario, pero se usan alternativamente las dos constelaciones



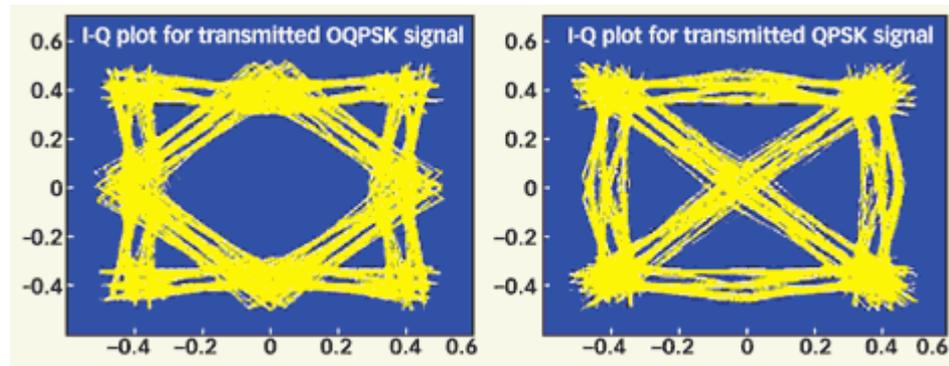
- Ejemplo: 0010110010
- La ventaja frente a QPSK es que hay menos cambios de fase
 - En particular, los cambios nunca pasan por el origen



OQPSK



- Offset QPSK es otra forma de evitar cambios bruscos en la fase de la señal
- La idea es simple:
 - Se agrega un retardo de medio tiempo de símbolo entre el canal I y el Q
 - Los cambios de fase en la señal total nunca serán más de $\pi/2$
- Beneficios de minimizar los cambios de fase:



Constelación de los símbolos recibidos por OQPSK y QPSK
Fuente: www.mwrf.com

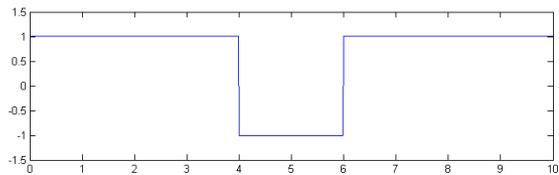
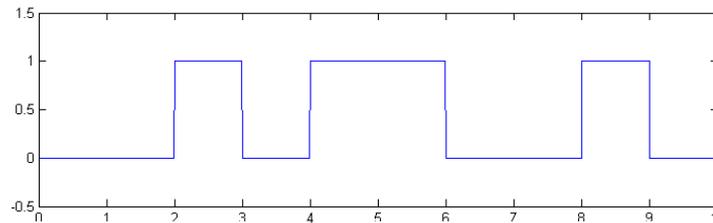
- Notar que los cambios de fase de π en QPSK resultan en amplitudes variables: complica en caso de usar amplificadores (e.g. satélites)



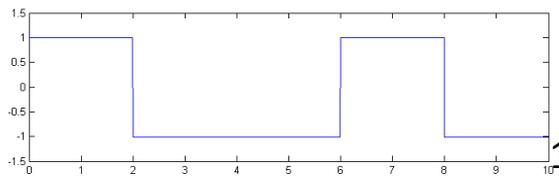
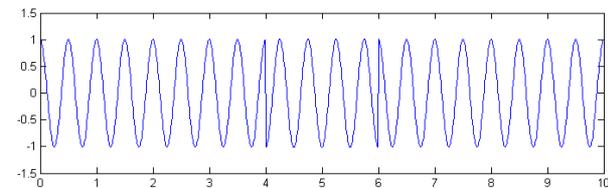
Shaping del pulso

- El problema de las discontinuidades es inherente al tren de rectángulos usado en el canal I y Q

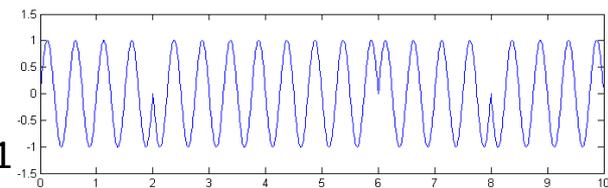
Mensaje
0010110010



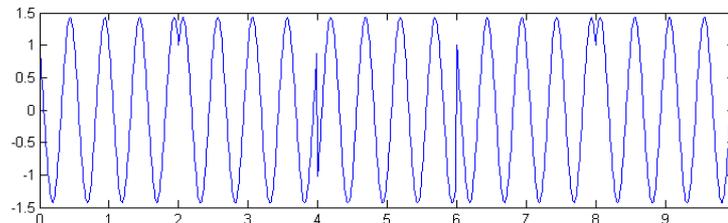
Canal I
1 1 -1 1 1



Canal Q
1 -1 -1 1 1



Señal = I+Q

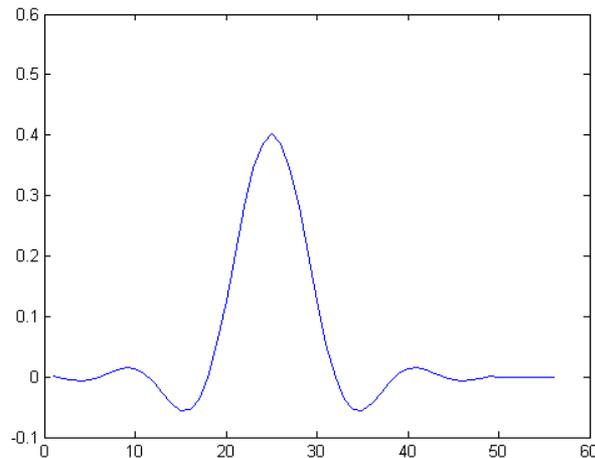




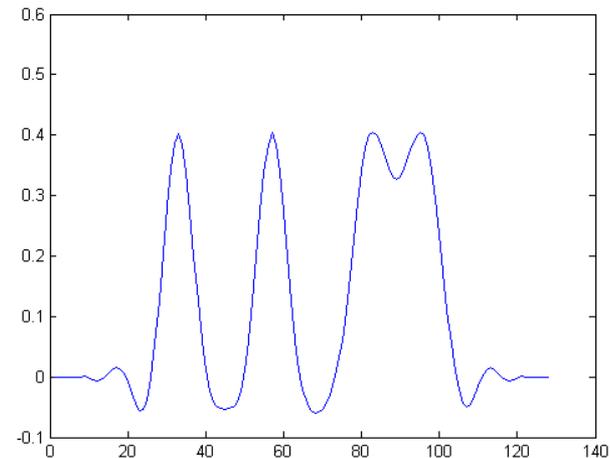
Shaping del pulso



- ¿Porqué utilizar una función tan abrupta?
- Naturalmente, en vez de utilizar un rectángulo, es muy común que se utilicen funciones más suaves
 - Root Raised Cosine



Forma del nuevo pulso



Mensaje: 0100100111



Shaping del pulso



- ¿Porqué utilizar una función tan abrupta?
- Naturalmente, en vez de utilizar un rectángulo, es muy común que se utilicen funciones más suaves
 - Root Raised Cosine
 - Media Sinusoide
 - Gaussiano



Ejemplos de shaping



■ MSK (Minimum-Shift Keying)

- Igual que OQPSK pero usando pulsos de media senoide en vez de cuadrados
- MSK también se puede interpretar como una técnica de modulación FSK

$$s(t) = a_I(t) \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \cos(2\pi f_c t) - a_Q(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \sin(2\pi f_c t)$$

$$s(t) = \begin{cases} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2T}\right); & \text{si } a_I(t) = a_Q(t) = 1 \\ \cos\left(2\pi f_c t - \frac{\pi}{2T}\right); & \text{si } a_I(t) = -a_Q(t) = 1 \\ \cos\left(2\pi f_c t - \frac{\pi}{2T} + \pi\right); & \text{si } a_I(t) = -a_Q(t) = -1 \\ \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2T} + \pi\right); & \text{si } a_I(t) = a_Q(t) = -1 \end{cases}$$

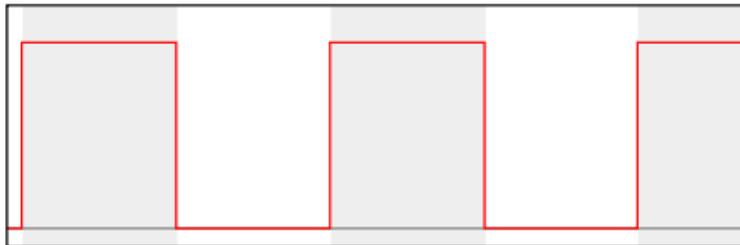


Ejemplos de shaping

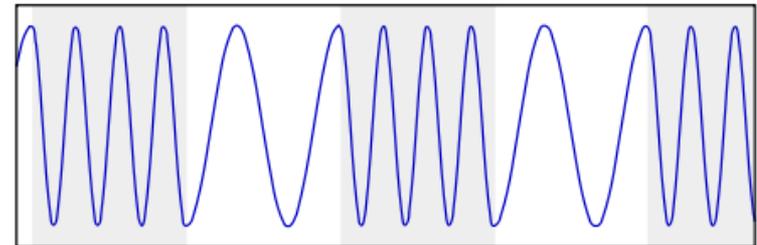


■ MSK (continuado...)

- Se puede probar que la diferencia en frecuencia de media tasa de símbolo es la mínima posible (de ahí su nombre) tal que:
 - Permite una detección coherente (ver más adelante)
 - La señal modulada tiene fase continua



Mensaje: 010101



Señal modulada



Ejemplos de Shaping



■ GMSK (Gaussian MSK)

- Igual que MSK, pero se aplica un filtro gaussiano
 - Es decir, en vez de un filtro de media senoide, un filtro gaussiano
 - **Ventaja:** la señal resultante tiene un menor ancho de banda que MSK (menor interferencia co-canal)
 - **Desventaja:** el filtro tiene un soporte temporal mayor que MSK, por lo que tiene mayor interferencia inter-símbolo
- Es la codificación usada en GSM

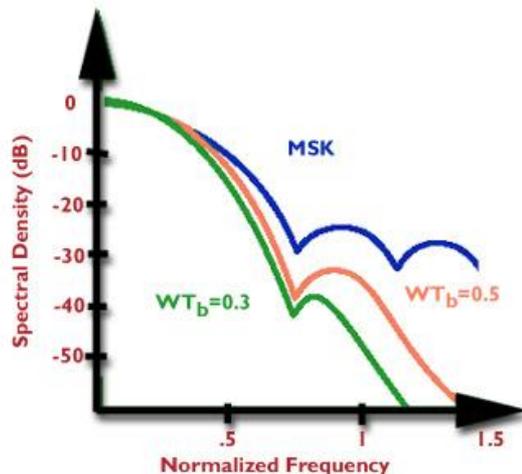


Figure 4

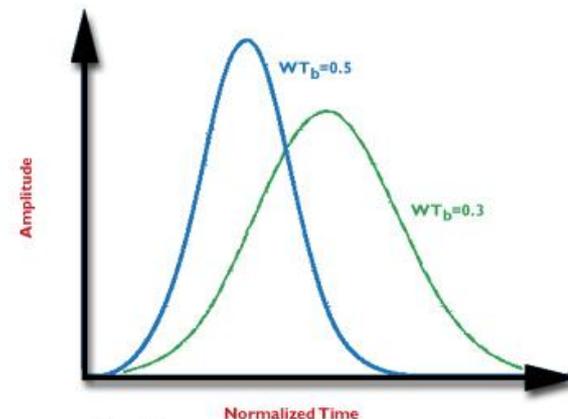


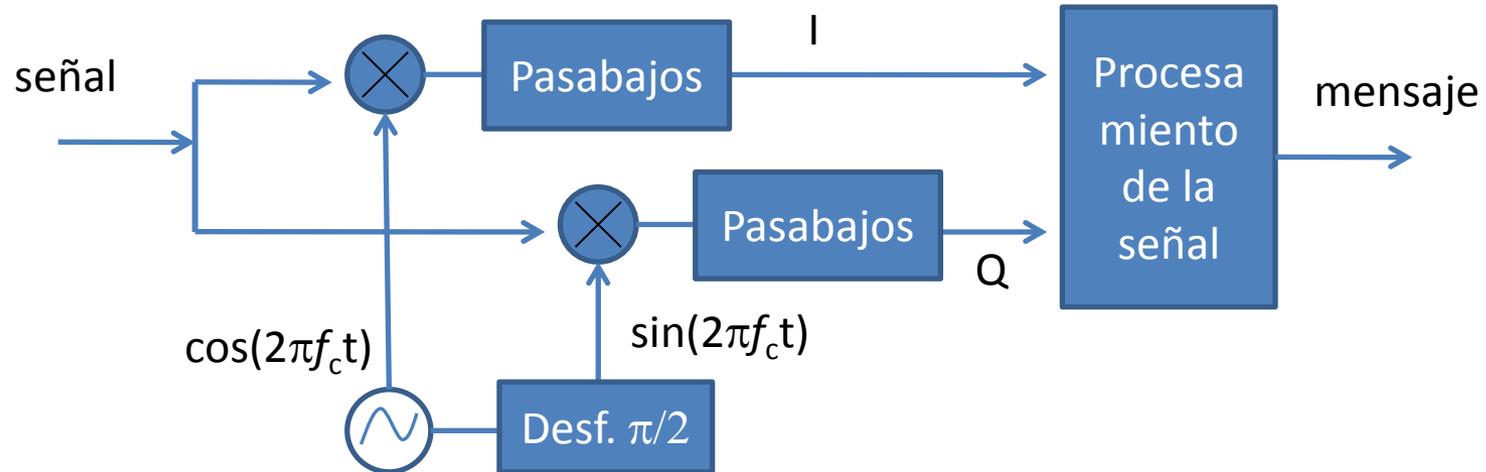
Figure 5



DPSK



■ Demodulación coherente:



■ Problema:

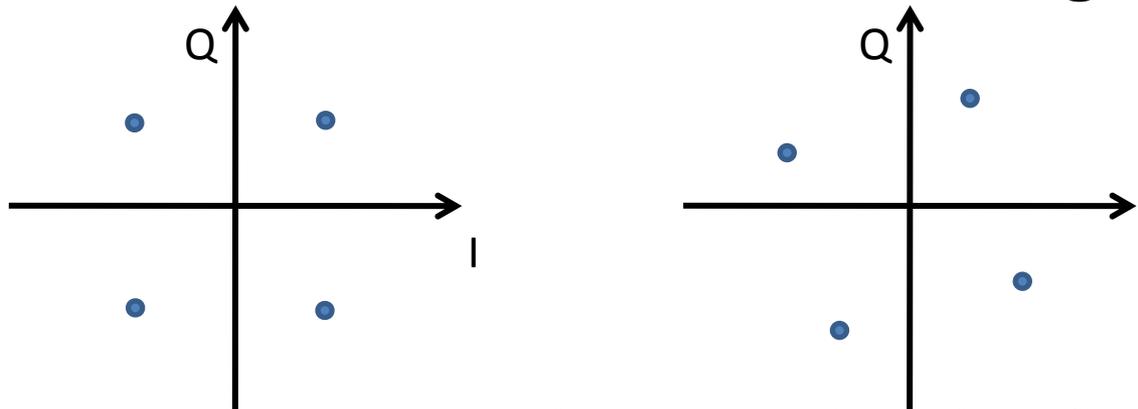
- Necesita un oscilador que esté exactamente a la misma frecuencia y fase que el original
- Para evitarme tener la misma fase, se puede usar codificación **diferencial**



DPSK



- En Differential-PSK (DPSK) el símbolo está indicado por la diferencia de fase con el símbolo anterior
- Para DPSK estas constelaciones son iguales



- Lo importante no es la posición absoluta en la constelación, sino la relativa con respecto al símbolo anterior
- Problema: el error en la decodificación de un símbolo se “arrastra” al siguiente



$\pi/4$ -DQPSK



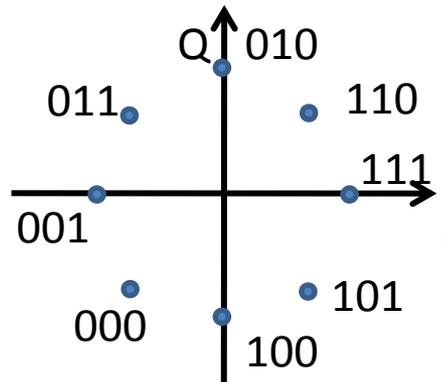
- $\pi/4$ -DQPSK no es más que una combinación entre $\pi/4$ -QPSK y DPSK
 - Es un $\pi/4$ -QPSK donde los símbolos los da la diferencia de fase entre las señales sucesivas
- La ventaja son las mismas que $\pi/4$ -QPSK y DPSK
- Varios sistemas radio usan la codificación diferencial:
 - 802.11b
 - A 1Mbps usa DBPSK y a 2Mbps usa DQPSK
 - Bluetooth 2.0 usa $\pi/4$ -DQPSK para alguna de sus velocidades



M-PSK



- ¿Porqué no aumentar el ancho de banda usando más de dos bits por símbolo?
- M-PSK (con $M=2^i$) es exactamente eso
- Ejemplo: constelación de 8-PSK con codificación gray



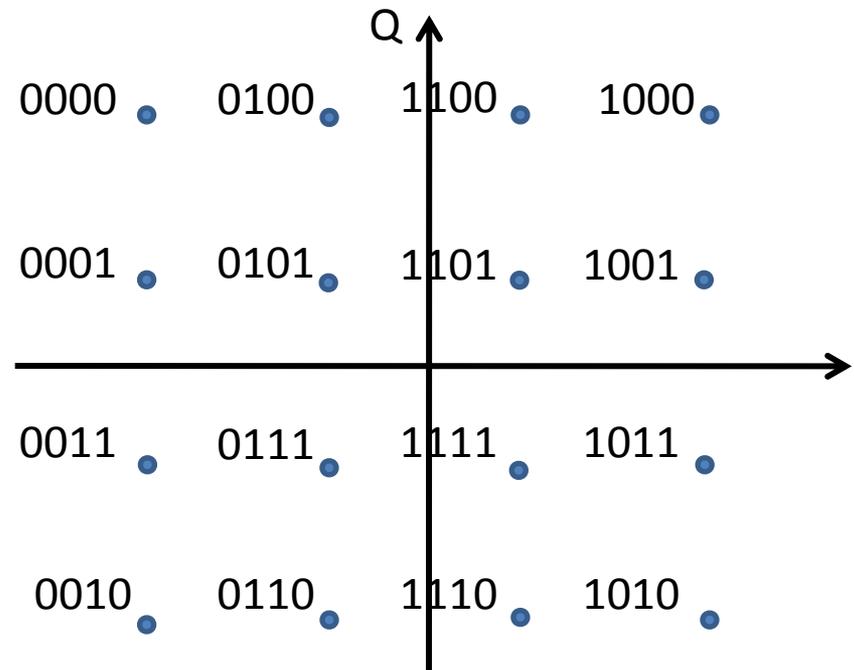
- A medida que aumento M , aumento la tasa de información, pero también la tasa de error será mayor
 - Por lo general se considera que 8 es el máximo M (e.g. se usa en EDGE)
 - Para seguir aumentando la tasa de transmisión se usa, por ejemplo, QAM (ver a continuación...)



QAM



- Quadrature Amplitude Modulation (QAM)
 - En QAM se modulan tanto la amplitud como la fase de la señal
 - Ejemplo: Constelación de 16-QAM





QAM



- Cambiando también la amplitud de la senoide se logra una mayor distancia entre los símbolos (comparar la constelación anterior con lo que sería un 16-PSK)
 - Por lo tanto se requiere una menor relación señal a ruido para una performance similar
- La constelación rectangular que mostramos no es la única forma de distribuir los símbolos en el plano
 - Cualquier forma es posible (e.g. circular), pero la rectangular es la más sencilla de modular/demodular
- Usos:
 - 802.11a usa 16 y 64-QAM adaptativamente (además de QPSK y BPSK)
 - 802.16 (WiMax) es similar
 - También LTE (Long Term Evolution)
 - ... y también HSDPA



Otras modulaciones ...



- Hasta ahora hemos visto las modulaciones más clásicas
- En los sistemas actuales, en muchos casos estas técnicas de modulación se usan como base a otras más sofisticadas
- A continuación veremos más en particular dos de ellas:
 - OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
 - Spread Spectrum
 - FHSS
 - DSSS



OFDM



- Vimos antes que las funciones $\sin(x)$ y $\cos(x)$ forman una base de las sinusoides con amplitud y fase arbitraria
- El hecho que sean fáciles de separar simplificó la demodulación
 - E.g. multiplicando la señal por $\sin(x)$ e integrando durante un período obtenemos la componente en cuadratura
- ¿Existe otra base que tenga estas misma características?
 - Sí! $\sin(2\pi kfx)$ (i.e. todos los armónicos de la frecuencia f , la base de la serie de Fourier)



OFDM



- La idea básica de OFDM es:
 - Convertir mi mensaje en N sub-mensajes paralelos
 - El sub-mensaje k -ésimo es modulado con alguna de las técnicas que ya vimos (resultando en el número complejo $X_k=I+jQ$)
 - La frecuencia portadora del sub-mensaje k -ésimo será kf , lo que sumando resulta en:

$$v(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k t f}$$

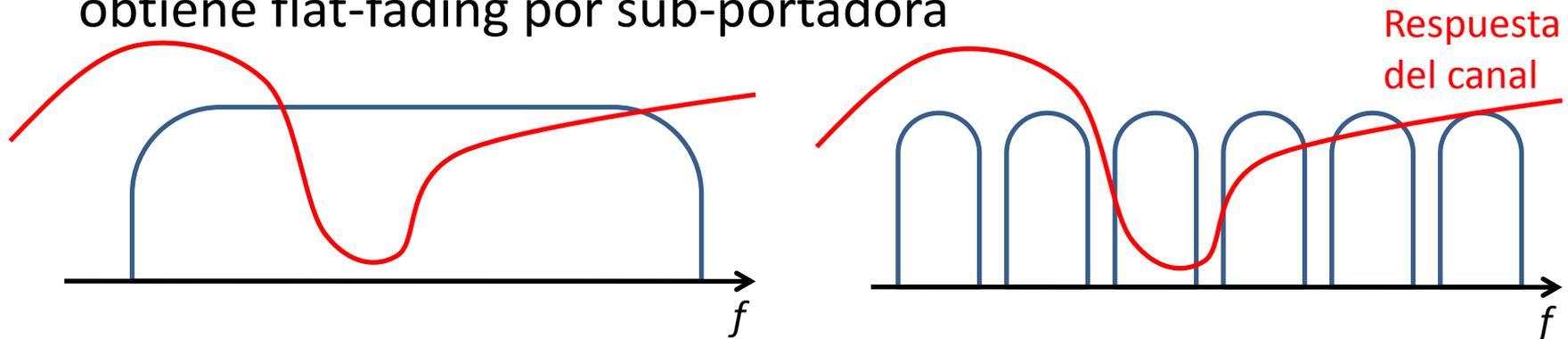
- En los hechos la parte real de $v(t)$ se enviará en fase, y la parte imaginaria en cuadratura, a la frecuencia portadora f_c ($\gg f$)



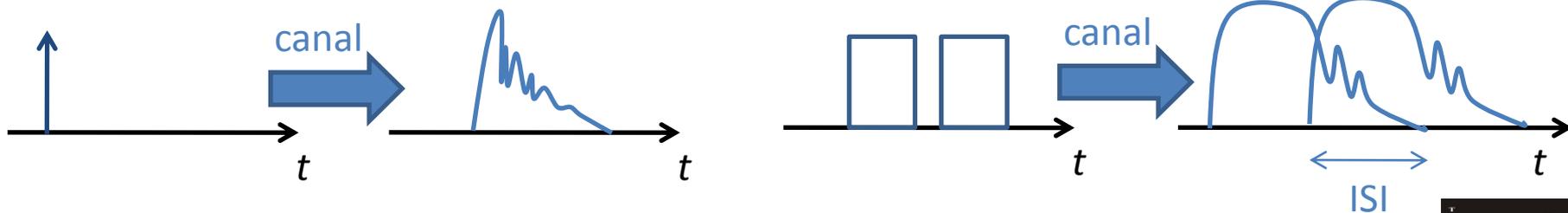
OFDM - Ventajas



- Ventajas de enviar la señal en varias sub-portadoras:
 - Si el ancho de banda de los sub-mensajes es pequeño, se obtiene flat-fading por sub-portadora



- Los pulsos de cada sub-mensaje tendrán una duración mayor (divido la frecuencia por N): se tiene un ISI debido al multicamino menor

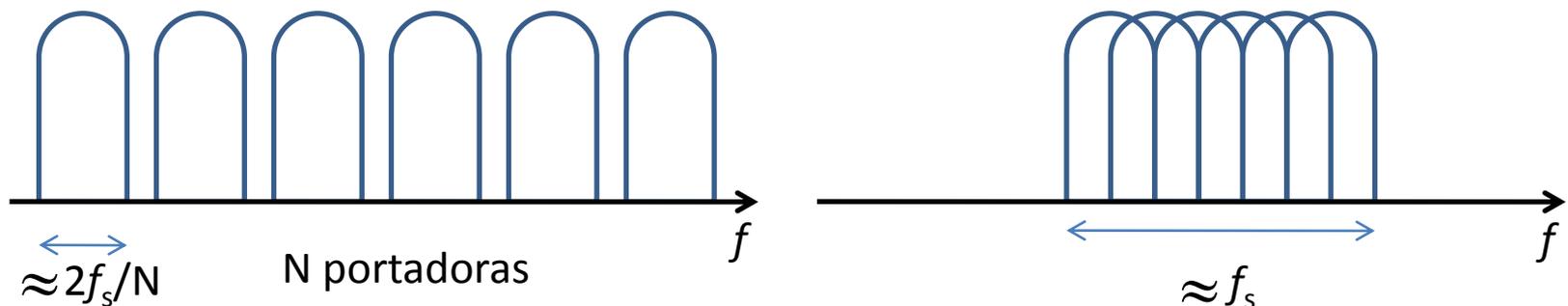




OFDM - Ventajas



- Importante: ¿Qué ventaja tiene usar frecuencias ortogonales sobre usar unas cualquiera?
 - El uso de frecuencias ortogonales hace que no sean necesarias las bandas de guarda de protección entre dos portadoras no ortogonales (mejor uso espectral)
 - Es más, las sub-portadoras se pueden superponer con una distancia mínima entre sub-portadoras de f_s/N (en el infinito, duplico la eficiencia espectral)

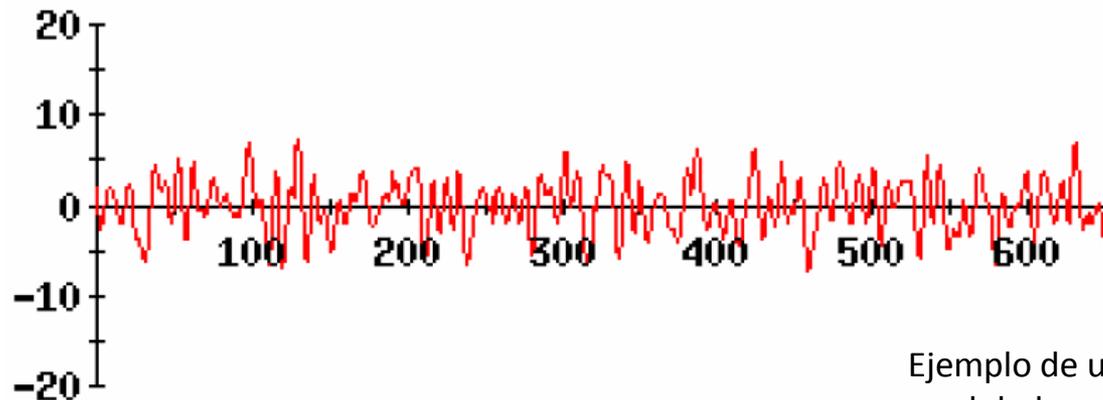




OFDM - Desventajas



- No todo es bueno en OFDM
 - La influencia del efecto Doppler en este caso es importante y quita ortogonalidad
 - Ocurre lo mismo con pequeñas asincronías en la frecuencia de los relojes de modulación y demodulación (requiere el uso de señales piloto)
 - La variabilidad en la amplitud de la señal no lo hace el mecanismo de elección cuando se requieren amplificadores de gran ganancia (e.g. satélites)



Ejemplo de una señal modulada en OFDM.

Fuente:

www.complextoreal.com



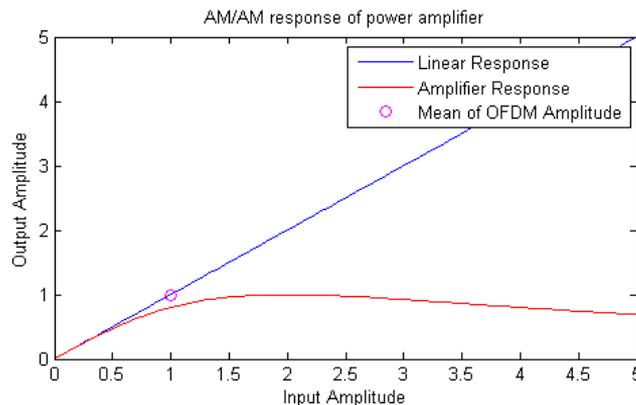
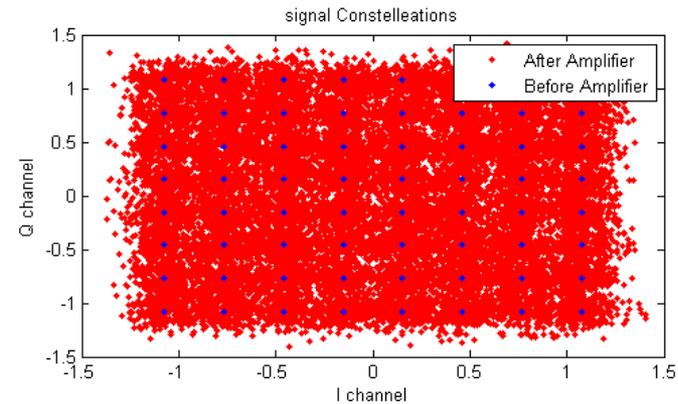
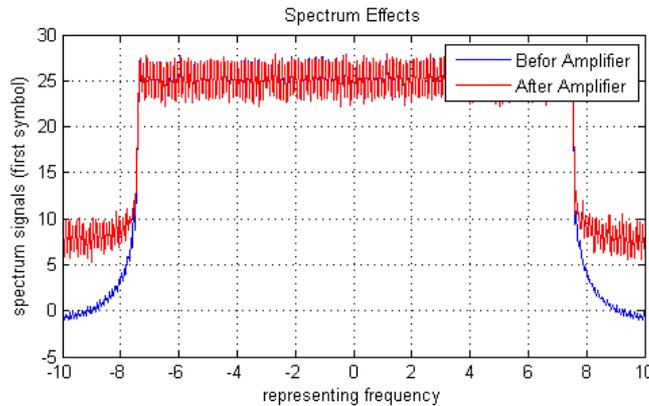
OFDM - Desventajas



- No todo es bueno en OFDM

- Ejemplo del efecto de un amplificador no lineal (fuente:

<http://www.mathworks.es/matlabcentral/fileexchange/15331-ofdm-high-power-amplifier-effects>)



Mean Error Rate : -17.3989 dB

Bit Error Rate : 0.18309

Modulation : 64 QAM

IFFT Size : 256 points

Guard Interval Size : 256 points

Saturation Level : 2 dB relative to AM Avg

OFDM - Implementación

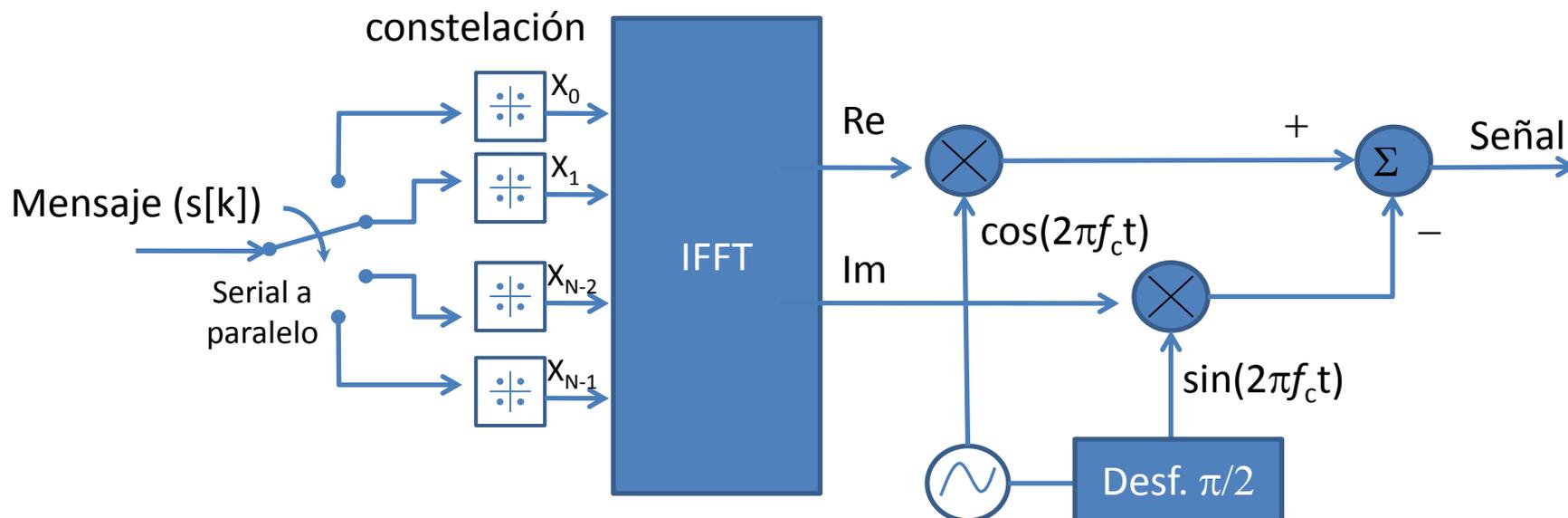
- Dijimos que la señal a enviar es:

$$v(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k t f}$$

- ¿No les resulta familiar?
- Sí! Es la Transformada Inversa Discreta de Fourier de la secuencia $\{X_k\}_{k=1,\dots,N}$
- Muy rápidamente calculable con el algoritmo IFFT
- La mayoría de los DSPs de hoy en día calculan la (I)FFT fácilmente
 - Una de las principales razones de la popularidad de OFDM
- Con esto, ya tenemos una idea de cómo sería un modulador OFDM (ver siguiente transparencia...)

OFDM - Implementación

■ Modulador OFDM:



- Con los conceptos adquiridos hasta ahora, es fácil imaginar cómo es un demodulador OFDM (queda como ejercicio)

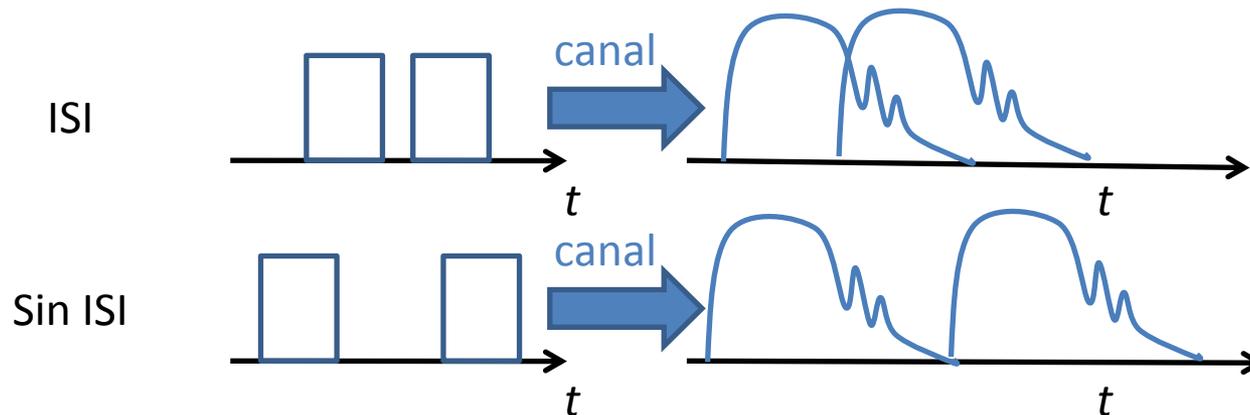


OFDM



■ Cyclic prefix

- La duración de un símbolo en OFDM es $T_s * N$
- Si N es grande, entonces la duración de un símbolo será importante
- Podemos evitar totalmente el ISI poniendo tiempos de guarda entre los símbolos, sin por ello perder demasiada capacidad



- ¿Qué poner como señal durante los tiempos de guarda? Se puede probar que poniendo el final del símbolo al comienzo se simplifica mucho la ecualización del canal y se refuerza la ortogonalidad



OFDM



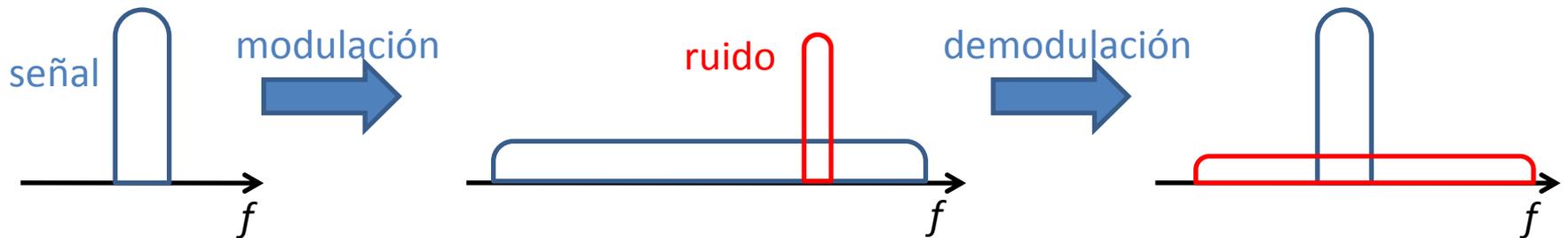
- OFDM es un esquema de modulación muy popular, que es usado por varios sistemas:
 - 802.11a/g
 - 52 sub-portadoras (48 para datos y 4 para piloto)
 - Duración de símbolo de $4\mu\text{s}$, incluyendo una guarda de $0.8\mu\text{s}$
 - Cada sub-portadora se codifica en BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM
 - 802.16 (WiMax)
 - LTE también usa alguna forma de OFDM
 - Pero también en sistemas cableados como ADSL (donde se conoce como Discrete Multi-Tone Modulation o DMT)



Spread Spectrum



- Las técnicas de ensanchamiento de espectro (Spread Spectrum) surgieron en la época de las 1era y 2ª guerra mundial, como una manera de evitar la interferencia y la intercepción de la señal
- La idea básica es la siguiente:



- El ensanchamiento del espectro de la señal se logra mediante la aplicación de códigos (ver más adelante...)



Spread Spectrum



- Ventajas:
 - El efecto de la interferencia es menor
 - Sólo pueden escuchar la comunicación aquellos que posean el código usado en la modulación (mayor seguridad)
 - La señal en el aire parece ruido, dificultando la detección de que una comunicación está llevándose a cabo
 - Usar mucho ancho de banda da cierto grado de diversidad en frecuencia (mejor tolerancia al fading)
 - Distintos códigos no se ven uno al otro
 - Separación de usuarios en código (CDMA)



Frequency-Hopping Spread Spectrum



- Es quizás la técnica de spread spectrum más sencilla
 - La idea es básicamente mandar la señal en distintas portadoras
 - Se utiliza una portadora durante un cierto tiempo predeterminado (llamado *dwell* y generalmente del orden de los 100ms) y luego se cambia
 - En este caso, el **código** es la secuencia de portadoras a ser usada (en la cual se ponen de acuerdo el transmisor y el receptor)
 - El objetivo es que esta secuencia sea relativamente aleatoria (pseudo-random) de manera tal de minimizar las colisiones entre usuarios (aunque si es posible sincronizar los usuarios se obtendrían los mejores resultados)
 - A una portadora dada, se modula con alguna de las técnicas ya vistas



FHSS



- Aunque no es estrictamente una técnica de spread spectrum, sí lo es a escalas del orden del segundo
- Ejemplo:



Foto de un analizador de espectro con una señal FHSS. Fuente: www.sss-mag.com/ss.html

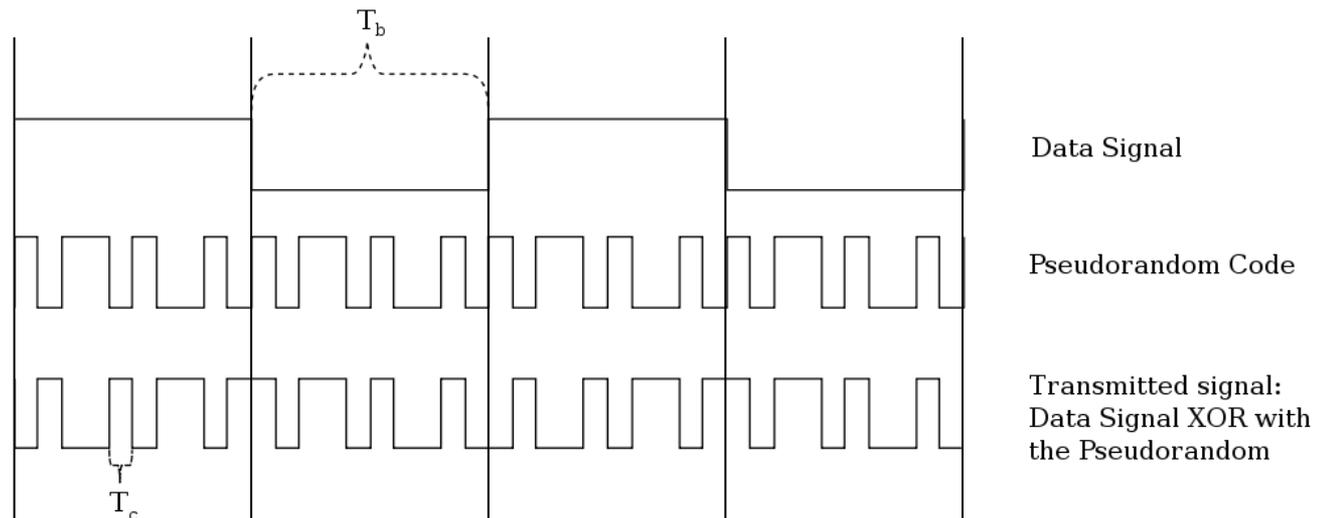
- Ventaja:
 - El sistema se va degradando a medida que hay interferencia en las distintas frecuencias, pero para que deje de funcionar tiene que haber interferencia en TODAS
- De todas formas no es muy usado
 - Se propuso como posible técnica en 802.11 (el original, sin letra), pero luego fue sustituido por OFDM (pues tiene propiedades similares y mucho mejor uso espectral)



Direct-Sequence Spread Spectrum



- En DSSS la manera de ensanchar la señal es mediante un aumento en la tasa de bits, multiplicando el mensaje por un código
 - Serie de 1s y 0s (cada uno de los cuales es llamado chip) que cumple ciertas condiciones que ahora veremos
- Se toma el mensaje a ser enviado y se aplica un XOR de cada bit con el código



- Tanto el mensaje como el código son modulados con alguna de las técnicas que ya vimos (BPSK, QPSK, etc.)
- NOTA: En realidad, el mensajey el código son transformados en -1s y 1s. De esta forma, el XOR se transforma en multiplicación.



DSSS - Códigos



- Uno de los objetivos de Spread Spectrum es que varios usuarios compartan el canal, usando distintos códigos
- Los códigos usados deben ser ortogonales entre sí
 - En este caso, la ortogonalidad se refiere a que la correlación entre dos códigos debe ser cero

$$\text{corr}(c_1, c_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_1(i)c_2(i) = 0$$

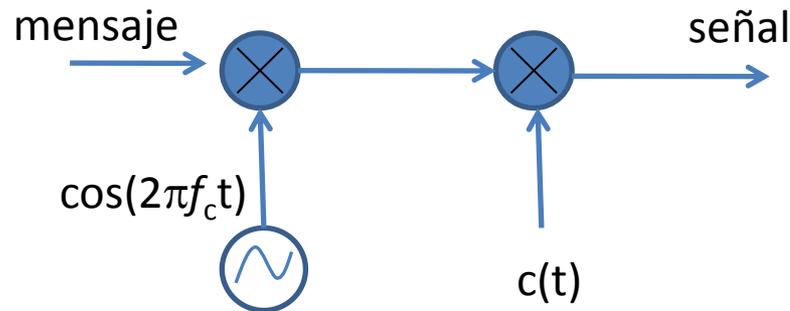
- Pero también deben ser ortogonales con una versión retrasada de si mismo (para evitar problemas con el multicamino)
- Y por último deben ensanchar el espectro, por lo que tiene que cumplir ciertas características de aleatoriedad



DSSS - Modulador



- Asumamos el modulador más sencillo, que usa codificación BPSK (recordar que asumimos que el mensaje y el código son 1s y -1s)



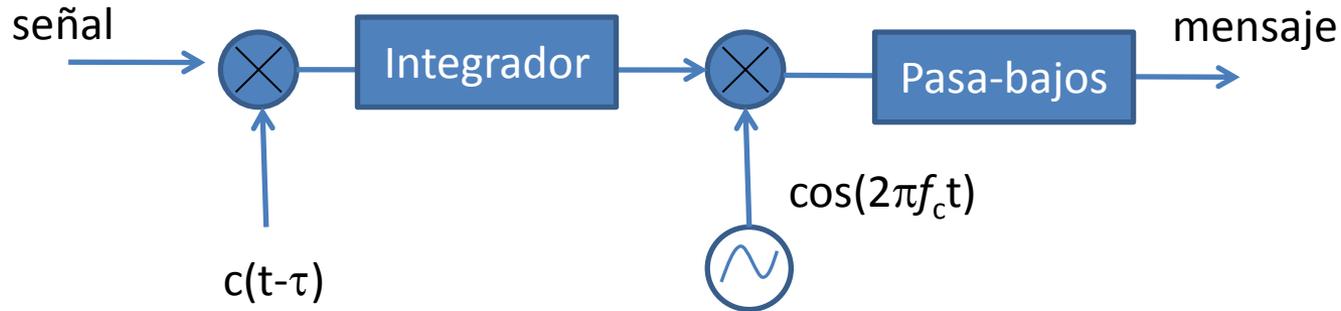
- Un comentario sobre los códigos
 - Existe una cierta cantidad de códigos perfectamente ortogonales (e.g. códigos Walsh)
 - Para que distintos usuarios usen códigos perfectamente ortogonales se requiere coordinación
 - En los hechos, el canal de bajada usa códigos ortogonales, y el canal de subida usa código “bastante” ortogonales (i.e. con correlación baja; e.g. Gold code)



DSSS - Demodulador



- El demodulador resulta:



- La multiplicación en el primer bloque se realiza con una versión retrasada del código, que debe estar perfectamente alineada con la señal que llega
- El bloque integrador no es más que un correlacionador (suma durante un período de bit)
 - Con esto se elimina la señal proveniente de otros códigos
- La manera más usual de modulación es usando BPSK para la señal y QPSK para el código (lo dejamos como ejercicio)



DSSS - Desfasaje



- El desfasaje temporal se puede ver como una ayuda a DSSS y no un problema
 - Varias señales que llegan con distintos desfasajes se pueden demodular independientemente y combinar
 - El receptor Rake es justamente eso
 - Una correcta decodificación de una señal DSSS requiere la estimación del delay en el camino
 - Si conocemos el delay de una fuente a varios lugares con una ubicación conocida, podemos conocer la ubicación de la fuente
 - Este es el principio básico de funcionamiento de un GPS



DSSS - Usos



- DSSS es la técnica de Spread Spectrum más usada:
 - Es usado tanto por GPS como Galileo (el GPS europeo) en el cálculo de la ubicación
 - Direct Sequence CDMA (DS-CDMA), una técnica de acceso múltiple basada en DSSS, es la técnica de CDMA más usada
 - Es usado por algunos teléfonos inalámbricos
 - IEEE 802.11b
 - IEEE 802.15.4
- La dos principales diferencias con FHSS son:
 - No necesitar sincronizarse en cada chip con una portadora distinta logra mejoras en la velocidad, además de un mejor uso del espectro (esto último por usar una única portadora)
 - Si la potencia del ruido en cierta banda es suficiente, puede hacer que DSSS deje de funcionar. Sin embargo, como dijimos antes, FHSS continuará funcionando.