

# Capítulo 8: Sistemas celulares CDMA

# Sistemas celulares CDMA

1. Fundamentos de espectro ensanchado.
2. Fundamentos de CDMA.
3. Características de sistemas celulares CDMA.

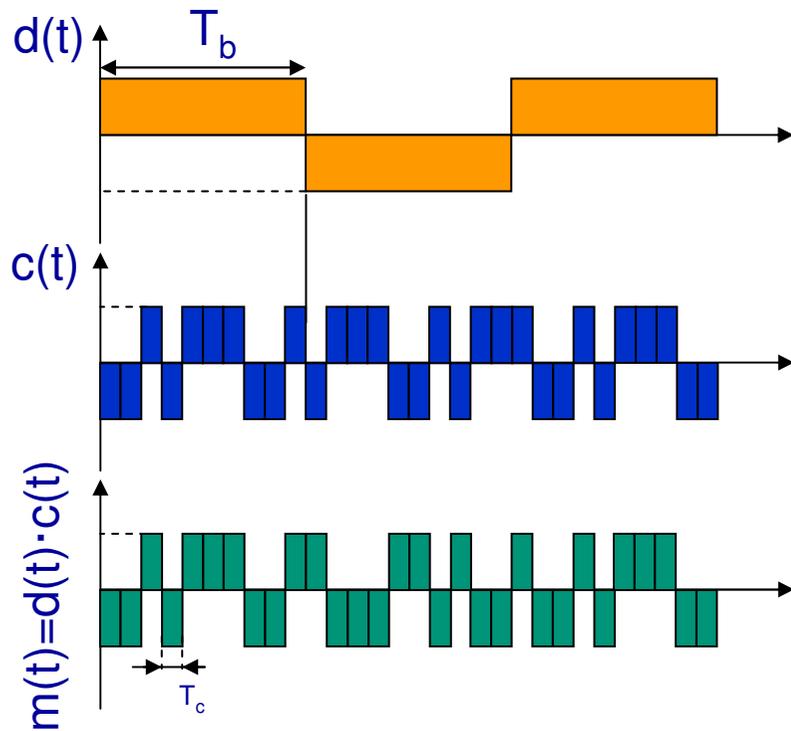
# 1. Fundamentos de espectro ensanchado

# Espectro ensanchado (SS)

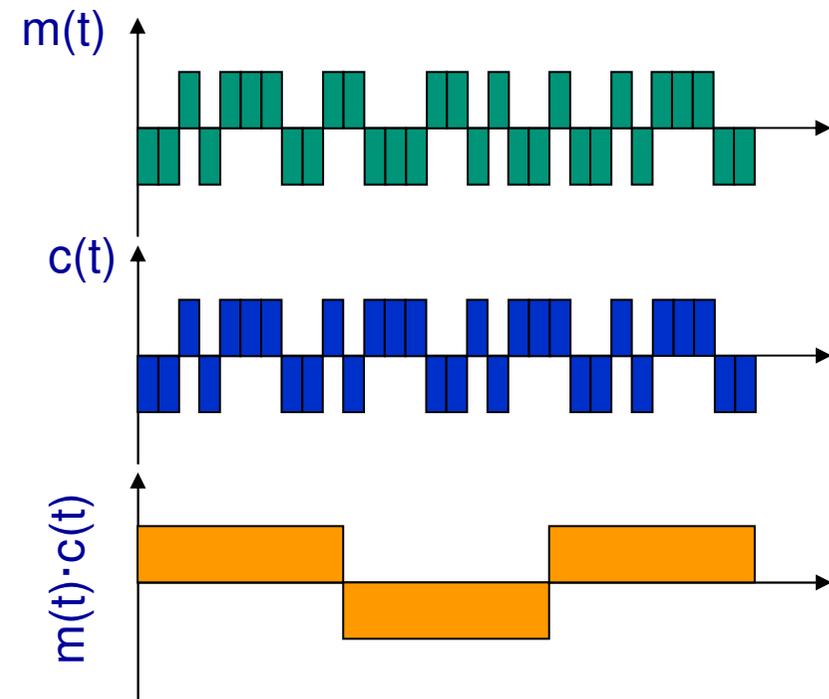
- Definición:  $W \gg R$ .  
Se utiliza para ello una **secuencia código**.
- Clasificación:
  - Saltos de frecuencia, FH (*Frequency Hopping*)
  - Saltos de tiempo, TH (*Time Hopping*)
  - Secuencia directa, DS (*Direct Sequence*)
  - Multiportadora, MC (*Multicarrier*)

# Espectro ensanchado por secuencia directa (DS-SS)

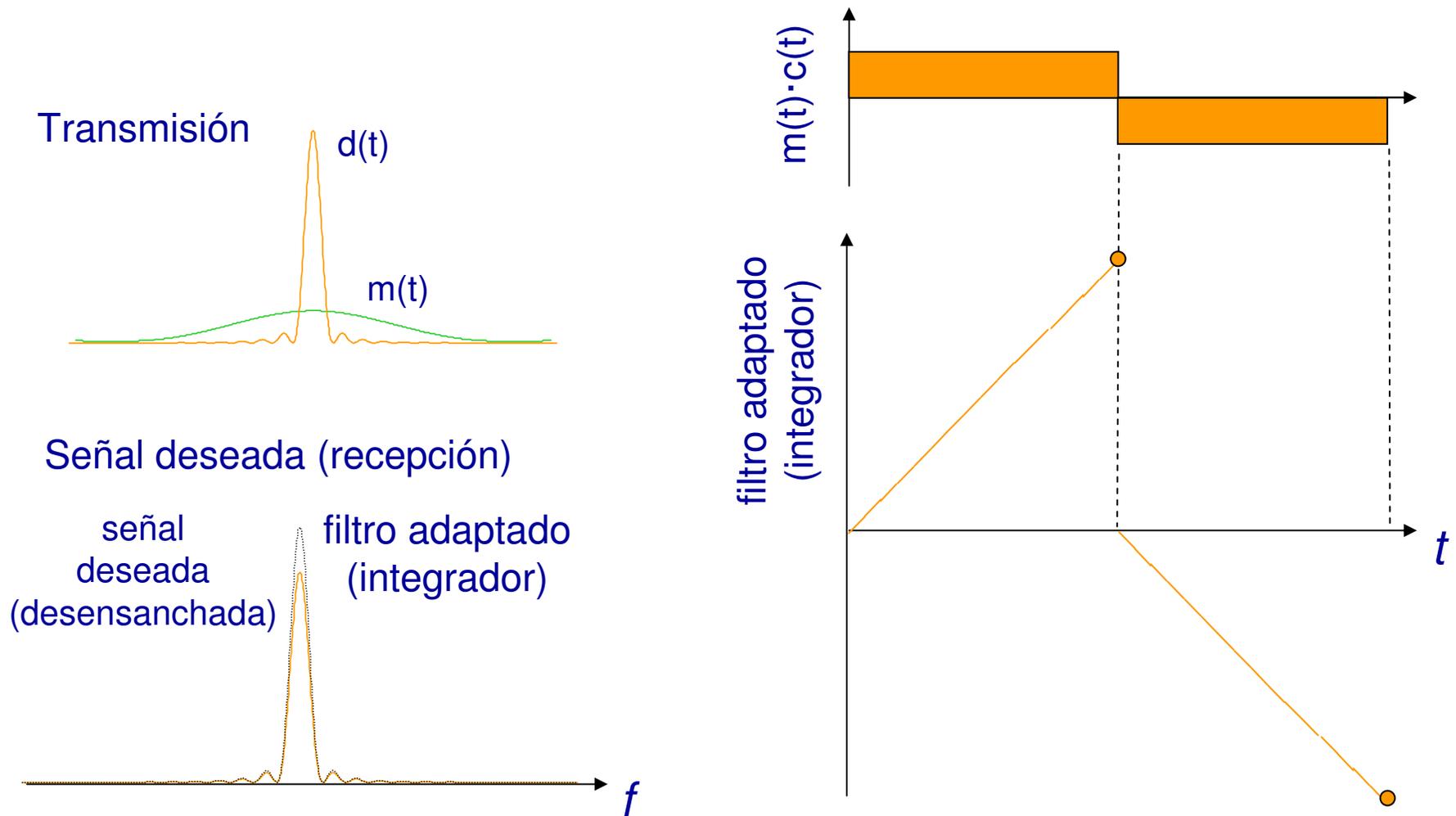
Ensanchamiento (transmisión)



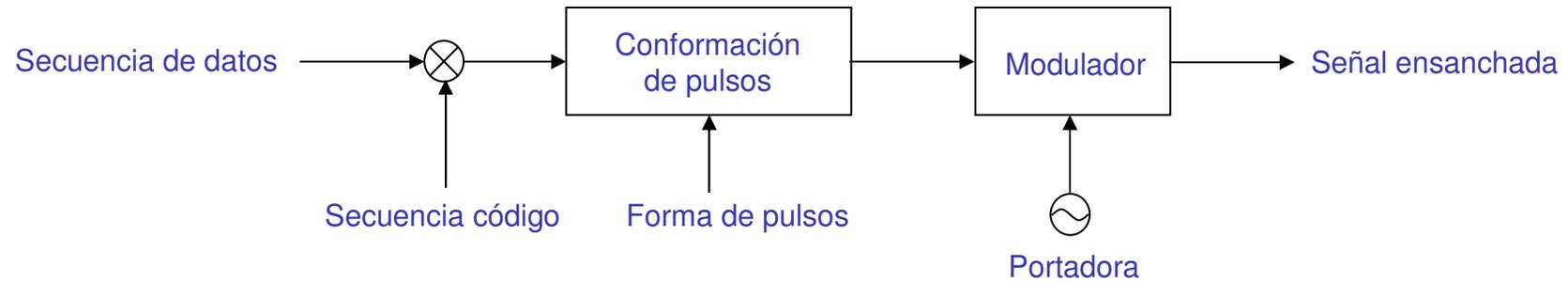
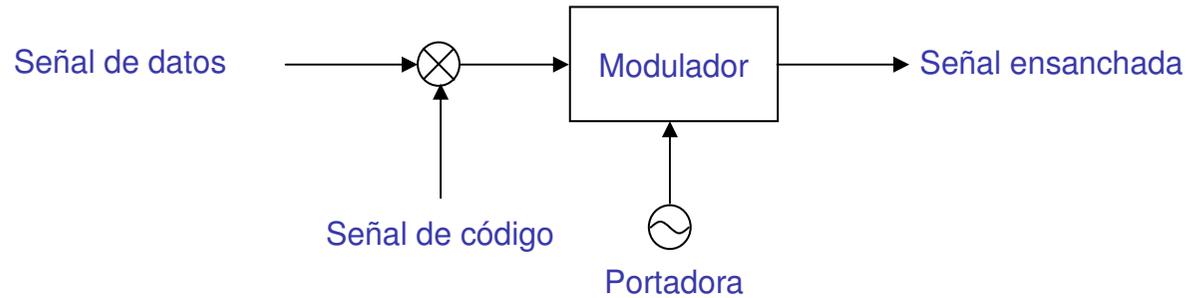
Desensanchamiento (recepción)



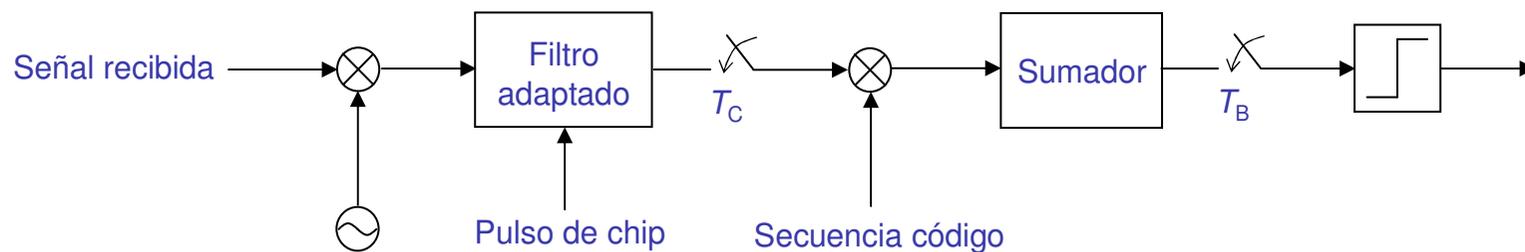
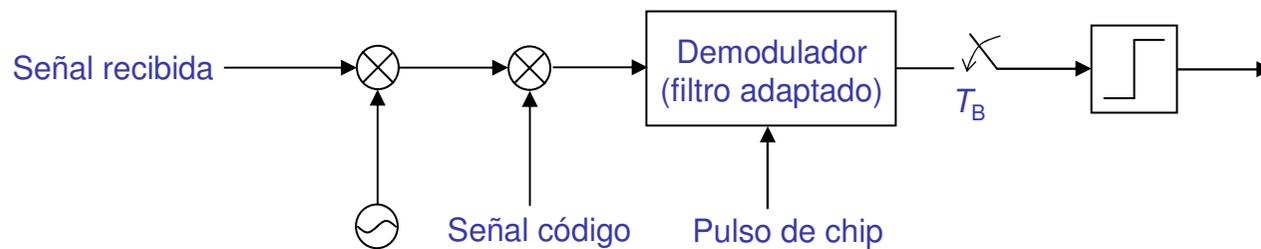
# Espectro ensanchado por secuencia directa (DS-SS)



# Transmisor DS-SS BPSK



# Receptor DS-SS BPSK



# Ventajas de SS (DS)

- Reducción de densidad espectral

Esto es ventajoso en ciertas aplicaciones (por ejemplo militares) en las que se busca que la señal sea difícil de detectar.

- Protección frente a interferencias

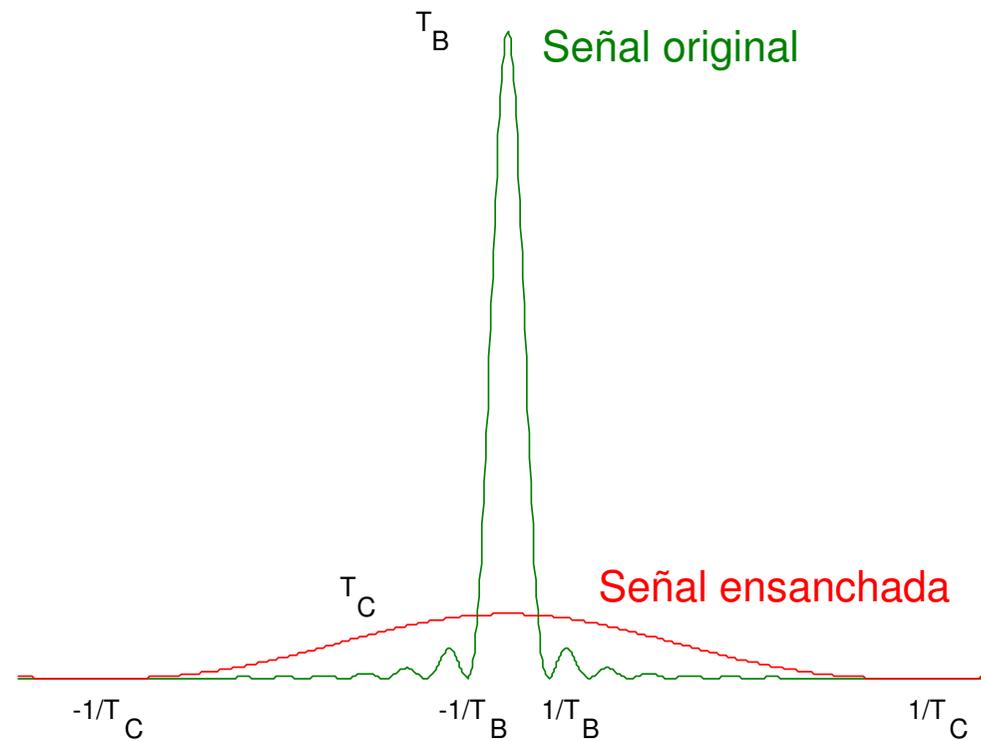
- De banda estrecha
- De banda ancha

Esta característica es interesante en **sistemas celulares** (ya que por diseño están sujetos a interferencia), y permite además la utilización de **acceso múltiple por división en el código** (CDMA).

- Resolución temporal y protección frente a multitrayecto.

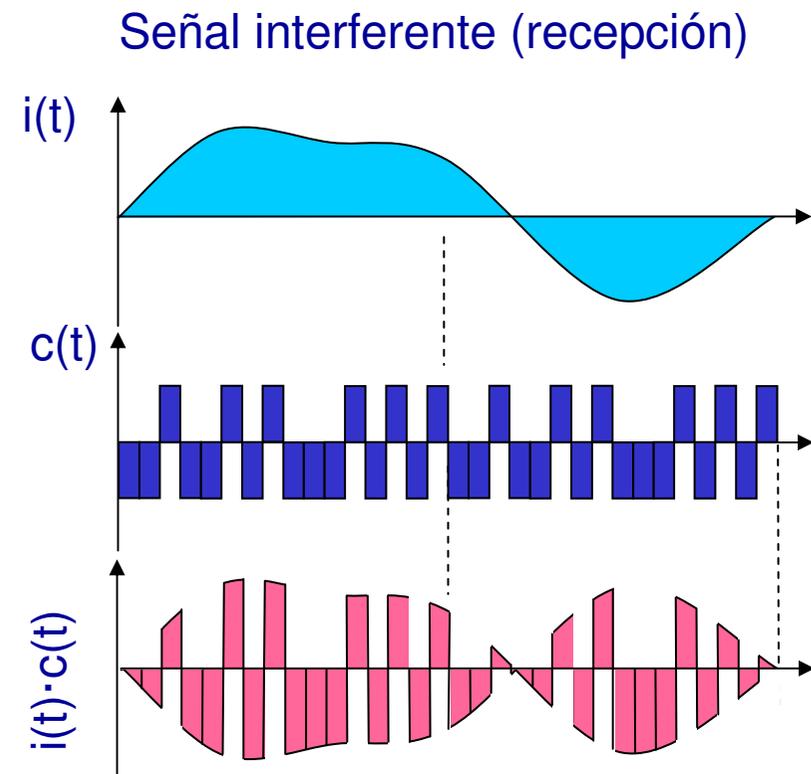
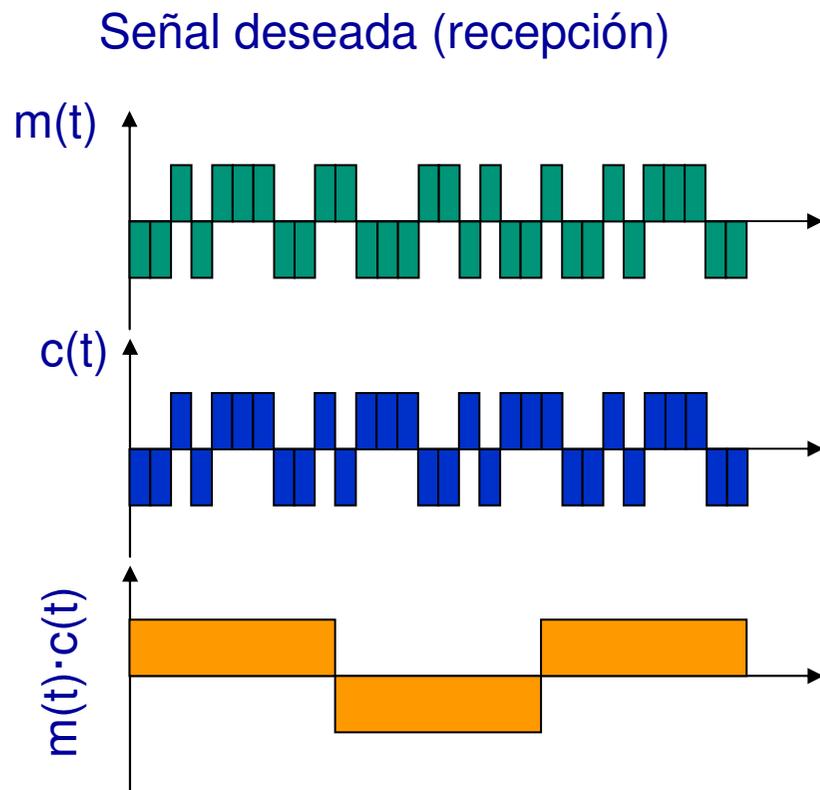
Esta característica es especialmente útil en **sistemas móviles**, en los que es habitual la propagación multitrayecto.

# Reducción de densidad espectral de potencia



# Protección frente a interferencias

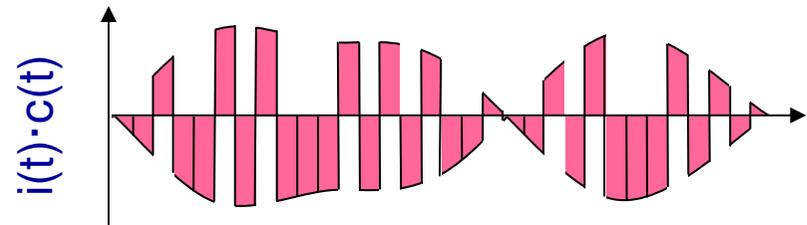
## Protección frente a interferencias de banda estrecha



# Protección frente a interferencias

## Protección frente a interferencias de banda estrecha

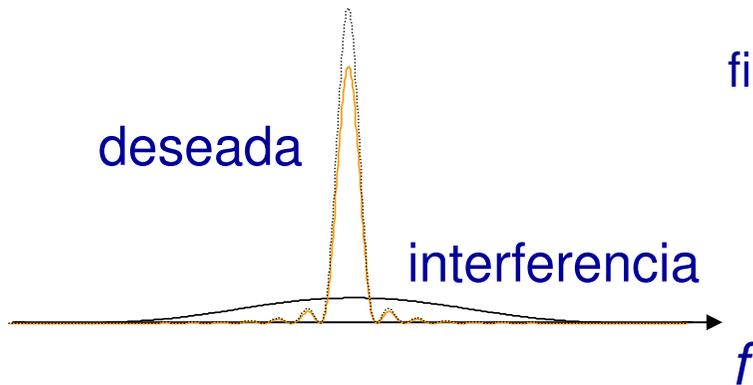
Señal interferente (recepción)



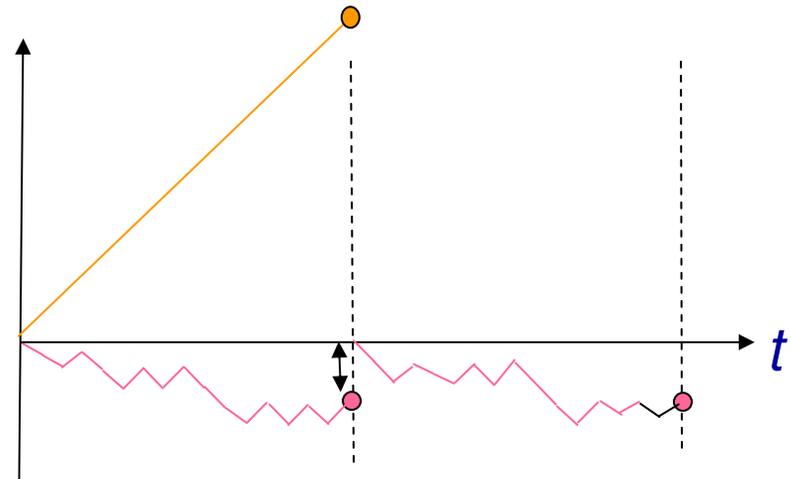
filtro adaptado  
(integrador)

deseada

interferencia



filtro adaptado  
(integrador)



# Protección frente a interferencias

## Protección frente a interferencias de banda estrecha

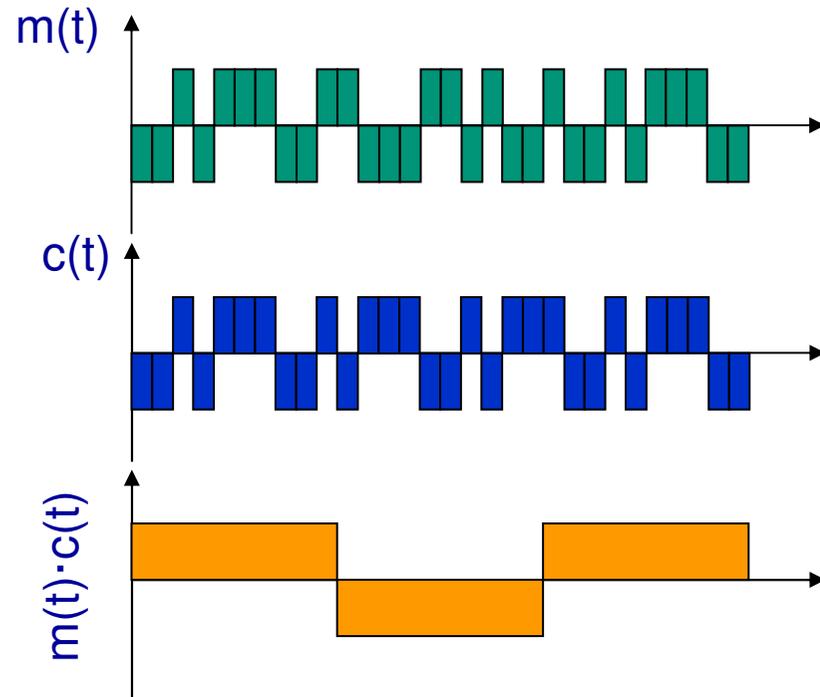
- El proceso de desensanchamiento de la señal deseada ensancha la interferencia
- Como consecuencia, la interferencia vista por el filtro adaptado se reduce en un factor igual a la **ganancia de procesado**:

Ganancia de procesado  $G_p =$  Factor de ensanchamiento (chips/símbolo)

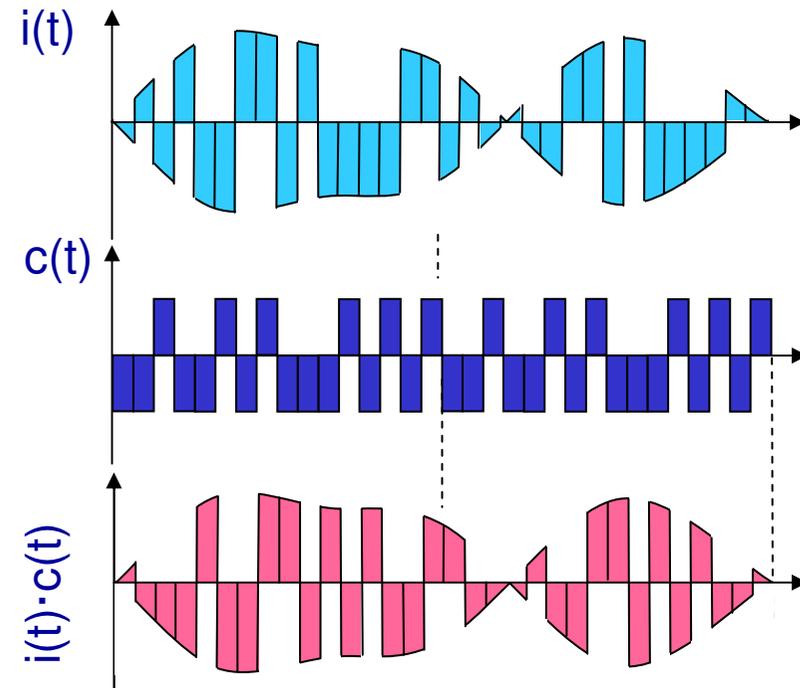
# Protección frente a interferencias

## Protección frente a interferencias de banda ancha

Señal deseada (recepción)



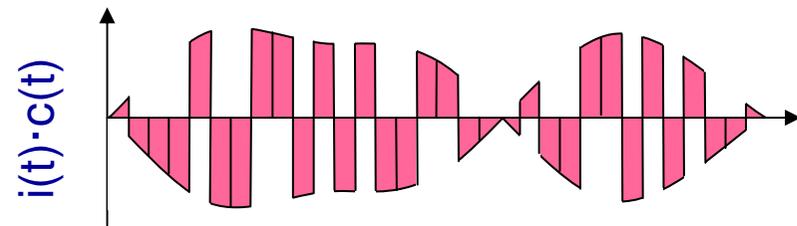
Señal interferente (recepción)



# Protección frente a interferencias

## Protección frente a interferencias de banda ancha

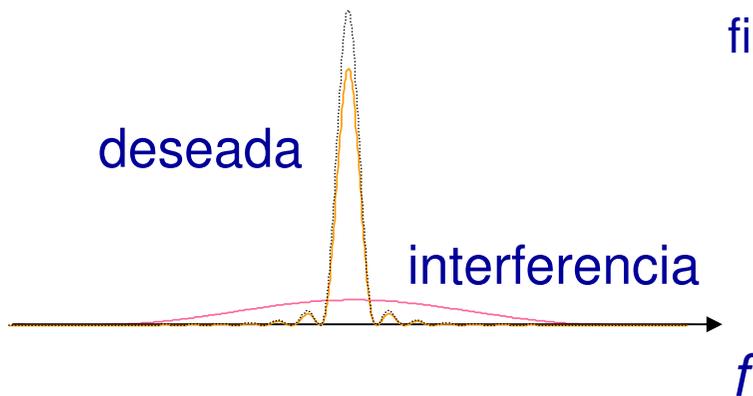
Señal interferente (recepción)



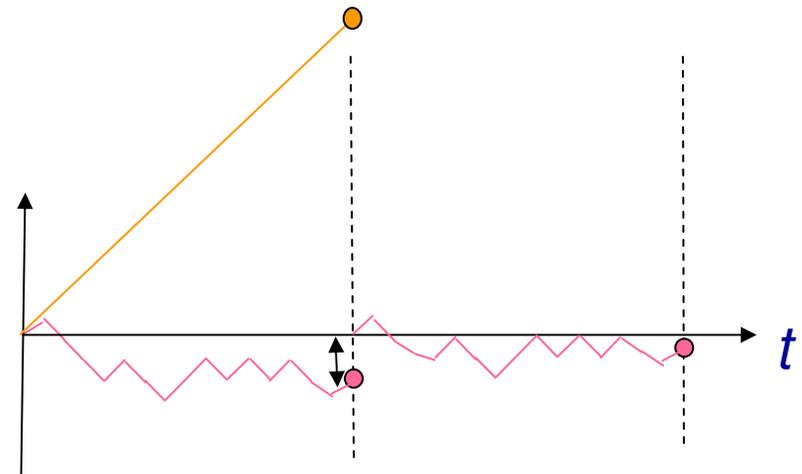
filtro adaptado  
(integrador)

deseada

interferencia



filtro adaptado  
(integrador)



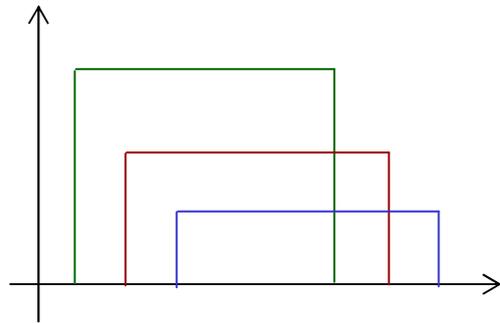
# Protección frente a interferencias

## Protección frente a interferencias de banda ancha

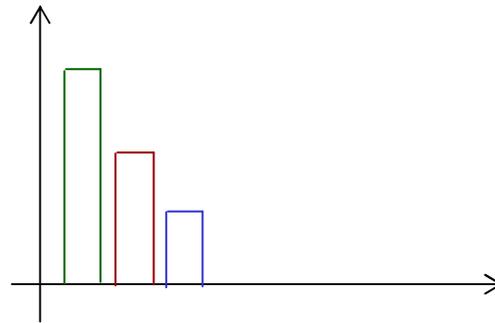
- El proceso de desensanchamiento de la señal deseada mantiene la interferencia ensanchada
- La señal interferente puede ser una señal ensanchada correspondiente a otro usuario: CDMA
- En CDMA, el grado de rechazo depende de la **correlación cruzada** entre las secuencias código.

# Protección frente a multitrayecto

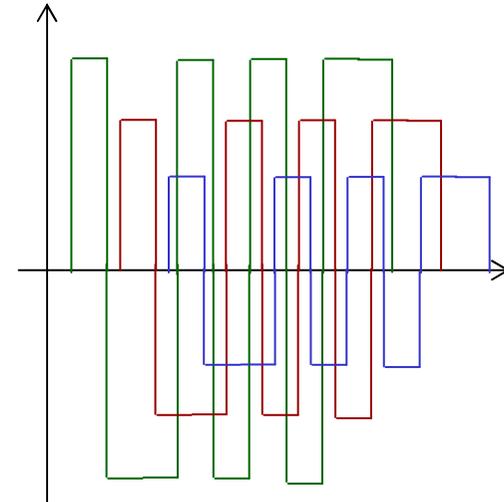
## Resolución temporal



a) Pulsos anchos:  
mala resolución



b) Pulsos estrechos:  
buena resolución



c) Espectro ensanchado:  
buena resolución

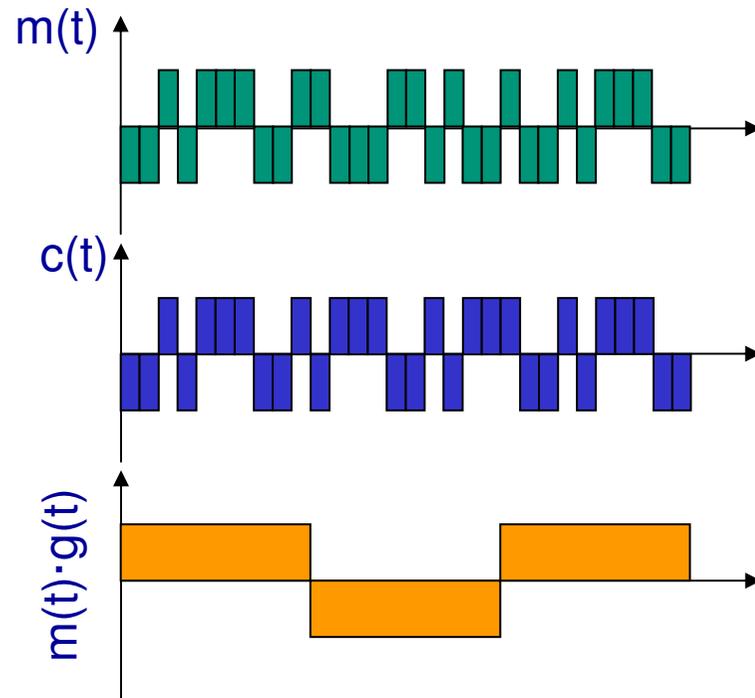
- Con c) se tiene mayor  $E_B/N_0$  (para misma potencia) que con b).
- Requiere buenas propiedades de **autocorrelación**.

Para tener buena resolución temporal no es necesario transmitir una señal breve; puede usarse una señal larga pero con variaciones rápidas (y buenas propiedades de autocorrelación).

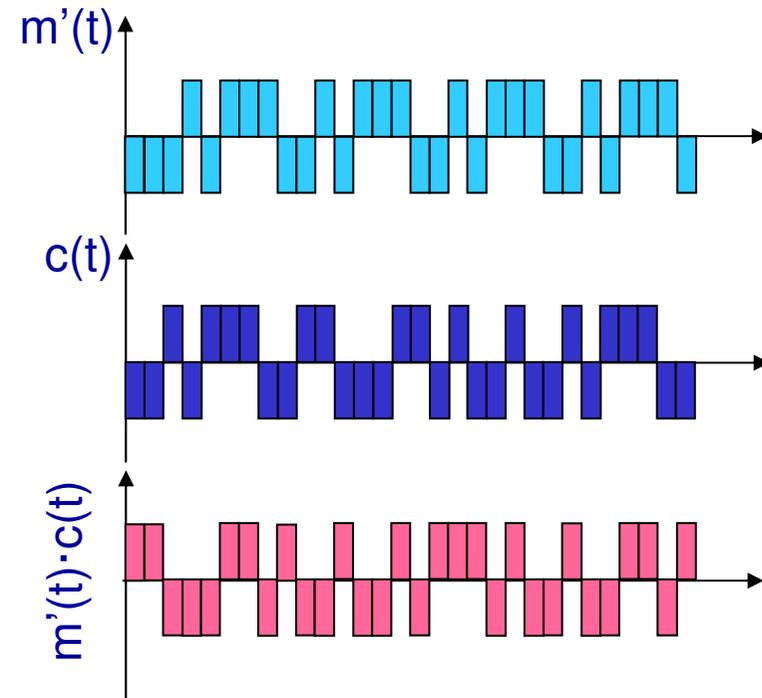
# Protección frente a multitrayecto

## Resolución temporal / protección frente a multitrayecto

Señal “deseada” (recepción)



Señal retardada (recepción);  $\tau = T_C$

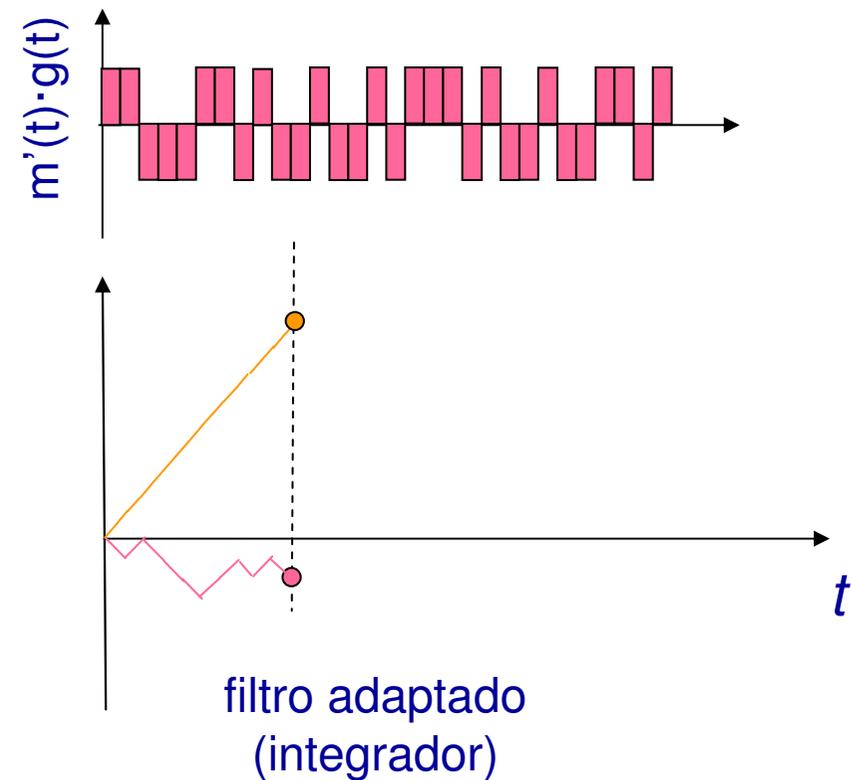
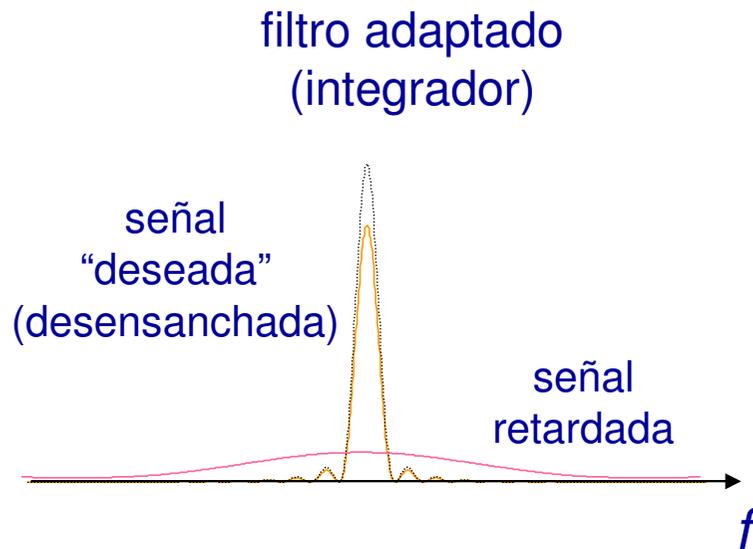


$$m'(t) = m(t-\tau) \quad (\tau = T_C \text{ en el ejemplo})$$

# Protección frente a multitrayecto

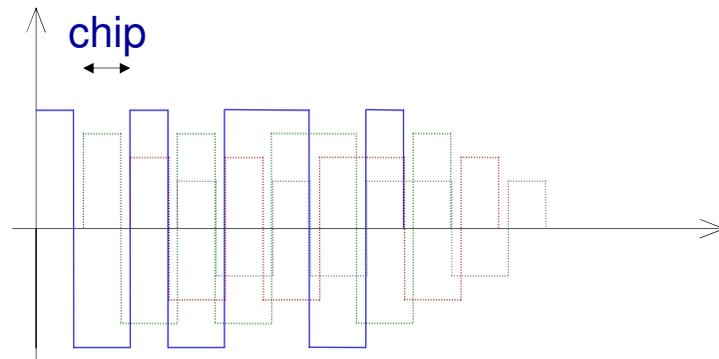
## Resolución temporal / protección frente a multitrayecto

Señal retardada (interferencia multitrayecto)



# Protección frente a multitrayecto

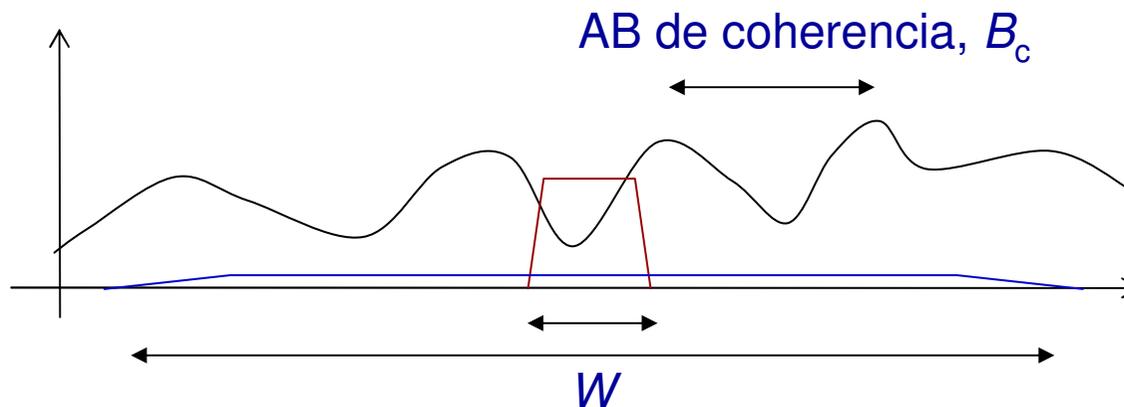
Protección frente a multitrayecto: dominio del tiempo



- Resolución temporal  $\approx T_C$ : se pueden separar los ecos.
- Sólo pueden interferir destructivamente (desvanecimiento) ecos con diferencia de retardos  $< T_C$ .
- Menor  $T_C$  implica mayor resolución y mayor protección frente a desvanecimiento.

# Protección frente a multitrayecto

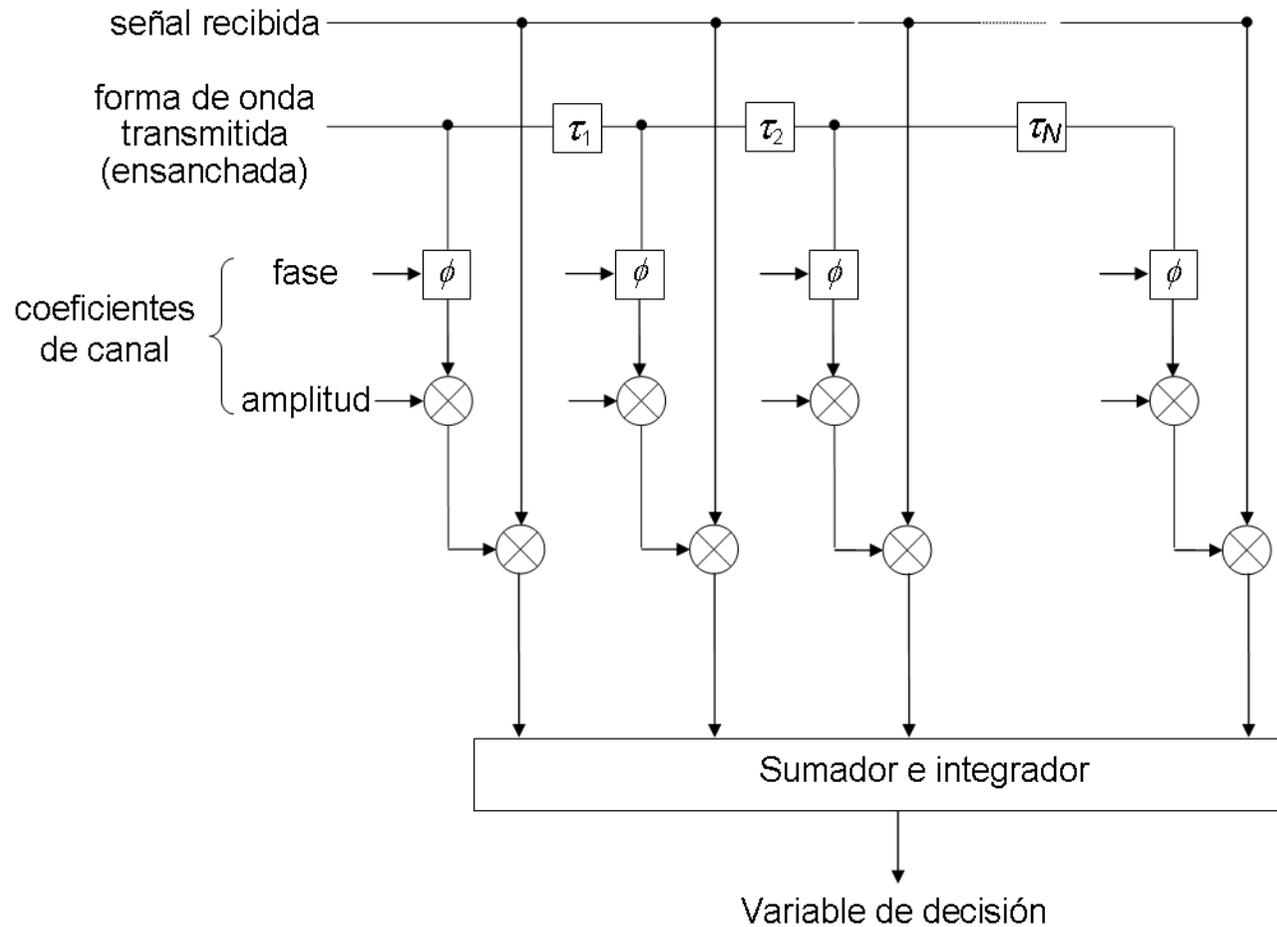
Protección frente a multitrayecto: dominio de la frecuencia



- AB de señal  $\gg$  AB de coherencia del canal: menor variación (menores desvanecimientos)
- La señal se distorsiona. La recepción debe llevarse a cabo mediante un receptor Rake (filtro adaptado a la señal **recibida**), que debe ajustarse a la forma del canal (estimación de canal)
- A pesar de la distorsión, la ISI es muy pequeña gracias al uso de SS (ganancia de procesamiento).
- A veces, para mejorar aún más las prestaciones, se usan ecualizadores.

# Protección frente a multitrayecto

## Protección frente a multitrayecto: Receptor Rake



# Protección frente a multitrayecto

## Protección frente a multitrayecto: Receptor Rake

- Separa las componentes multitrayecto, con resolución del orden de  $T_C$ , y las **combina de forma óptima**: diversidad multitrayecto.
- El receptor tiene típicamente 4–10 ramas.
- La combinación óptima (MRC) consiste en:
  - Poner todas las componentes **en fase**
  - Ponderar cada una con un peso **proporcional a su amplitud**.

Para ello deben estimarse los **coeficientes de canal** (amplitud y fase).

- Variantes del receptor Rake:
  - Retardos variables, como en la figura: deben estimarse los retardos, para lo cual se utiliza una rama adicional “buscadora”.
  - Retardos fijos e iguales a  $T_C$ : enfoque basado en la limitación de resolución temporal.
- El receptor puede interpretarse también como un filtro adaptado a la señal **recibida**. Por tanto es óptimo en presencia de AWGN.

## 2. Fundamentos de CDMA

# DS-CDMA

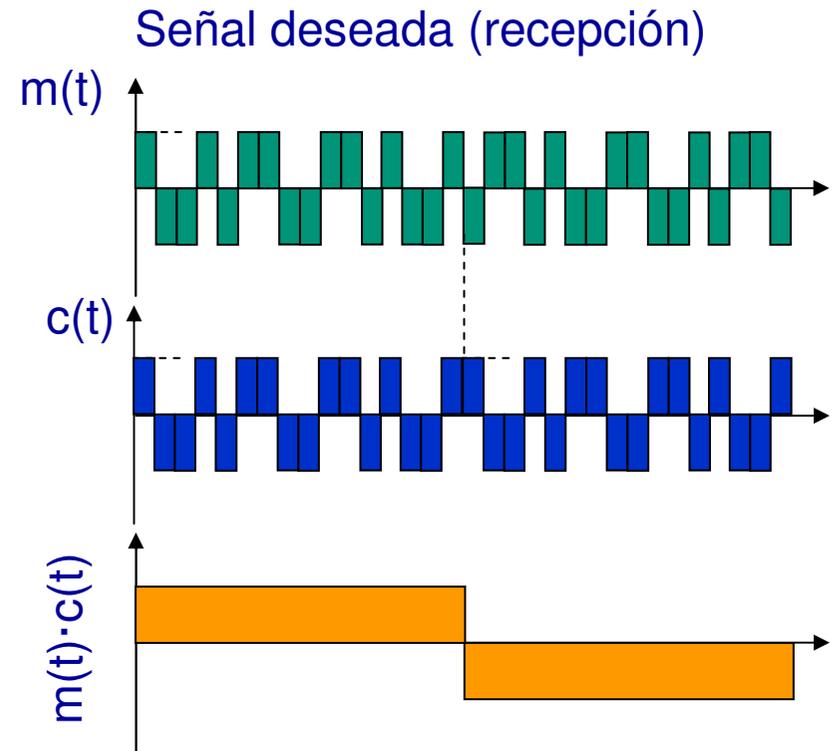
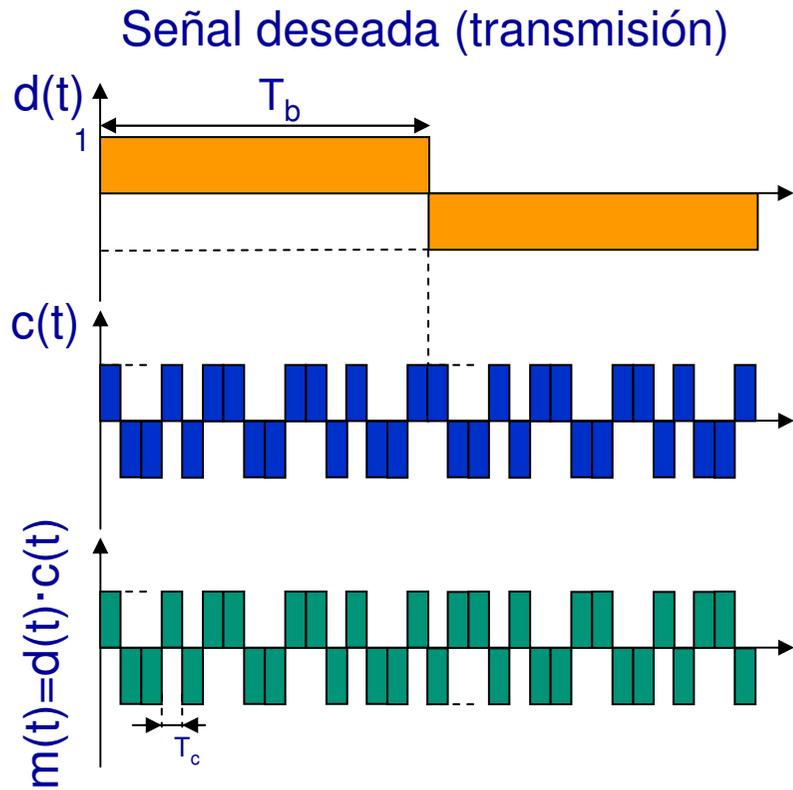
- (DS-)CDMA se basa en la propiedad de las señales (DS-)SS de rechazo a interferencias de banda ancha.
- Todas las señales se transmiten en la misma frecuencia al mismo tiempo. La interferencia se reduce gracias a las propiedades de las secuencias código.
- Existen dos formas de recepción:
  - Monousuario: recepción independiente de cada señal
  - Multiusuario: recepción conjunta de todas las señales
    - Mejores prestaciones
    - Tiene en cuenta la interferencia de las demás señales, basándose en su estructura (no son realmente AWGN)
    - Técnicas análogas a las usadas en ecualizadores, pero más complejas: Viterbi (óptimo), decorrelador, MMSE, IC.

# DS-CDMA ortogonal

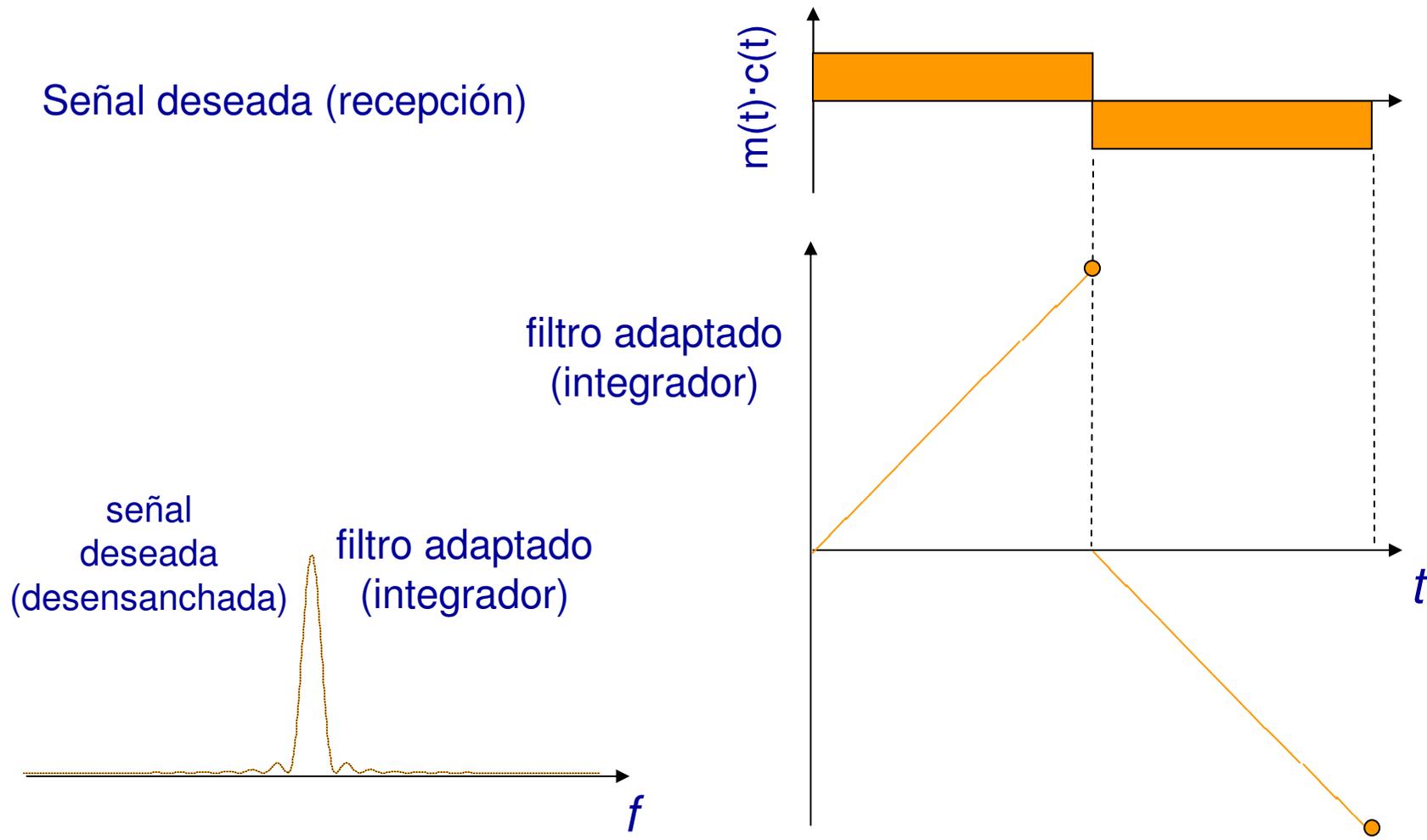
Sistema basado en secuencias ortogonales

- No existe (en principio) interferencia por acceso múltiple
- Número de canales limitado:  $N^{\circ}$  canales = Factor de ensanchamiento (chips/símbolo)
- Necesidad de sincronismo muy preciso (fracción del periodo de chip)
- Secuencias periódicas, con un periodo igual al factor de ensanchamiento (duración de un símbolo).

# DS-SSMA ortogonal



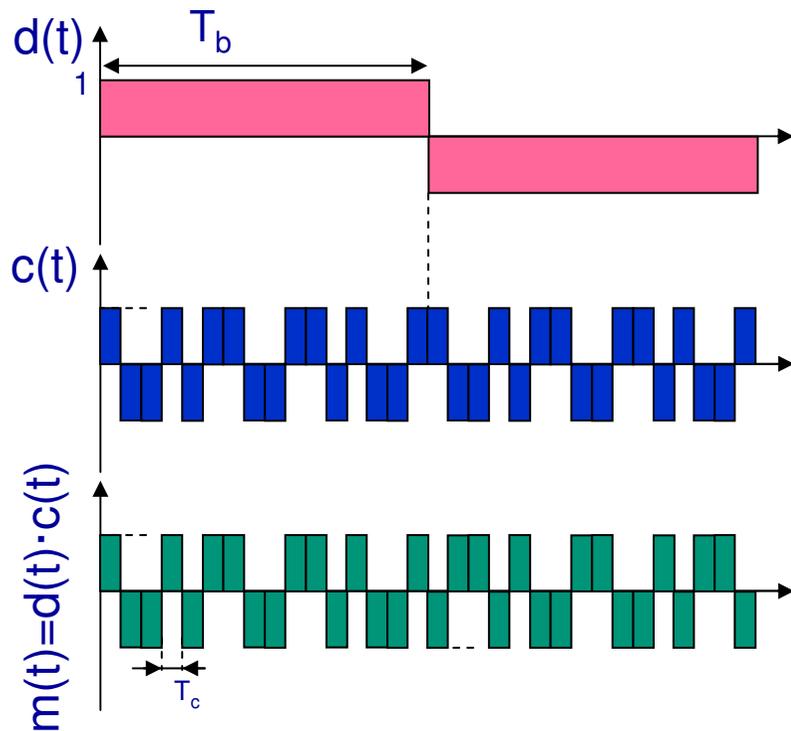
# DS-CDMA ortogonal



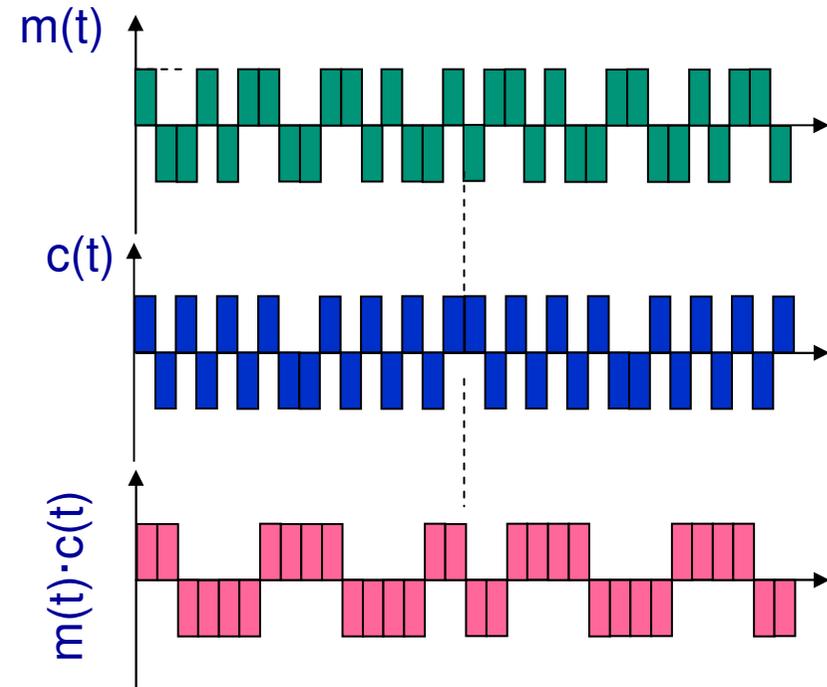
# DS-SSMA ortogonal

Sistema basado en secuencias ortogonales

Señal interferente (transmisión)



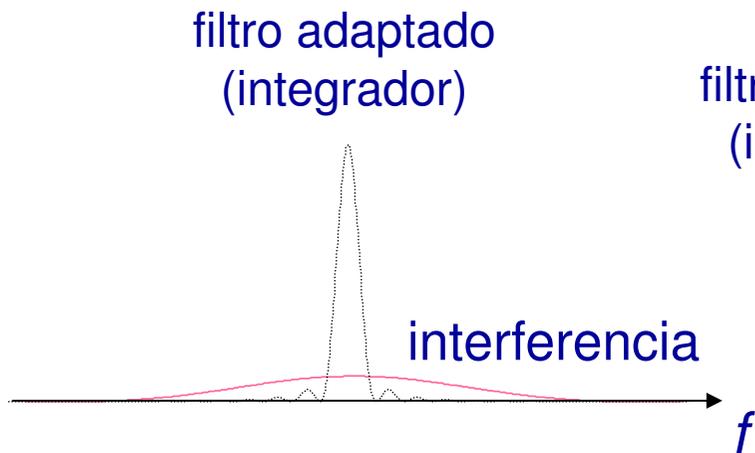
Señal interferente (recepción)



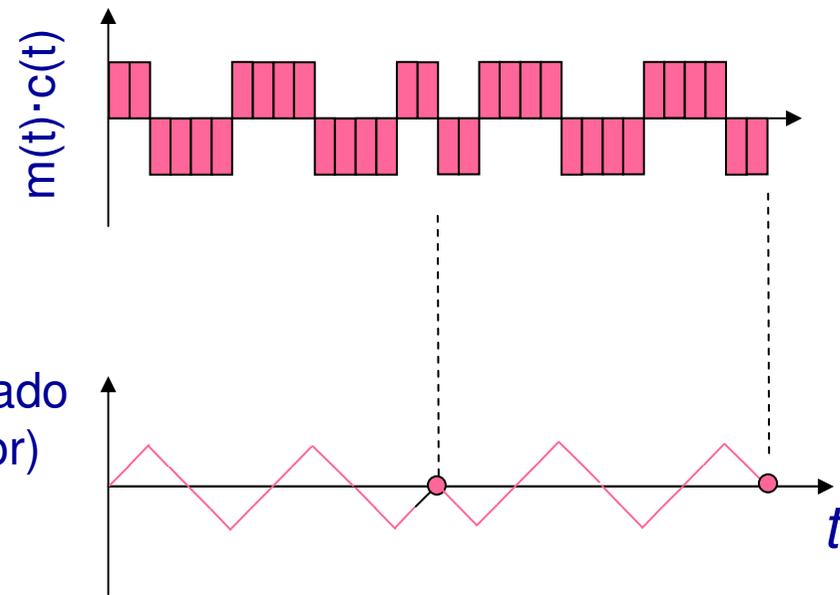
# DS-CDMA ortogonal

Sistema basado en secuencias ortogonales

Señal interferente (recepción)



filtro adaptado (integrador)

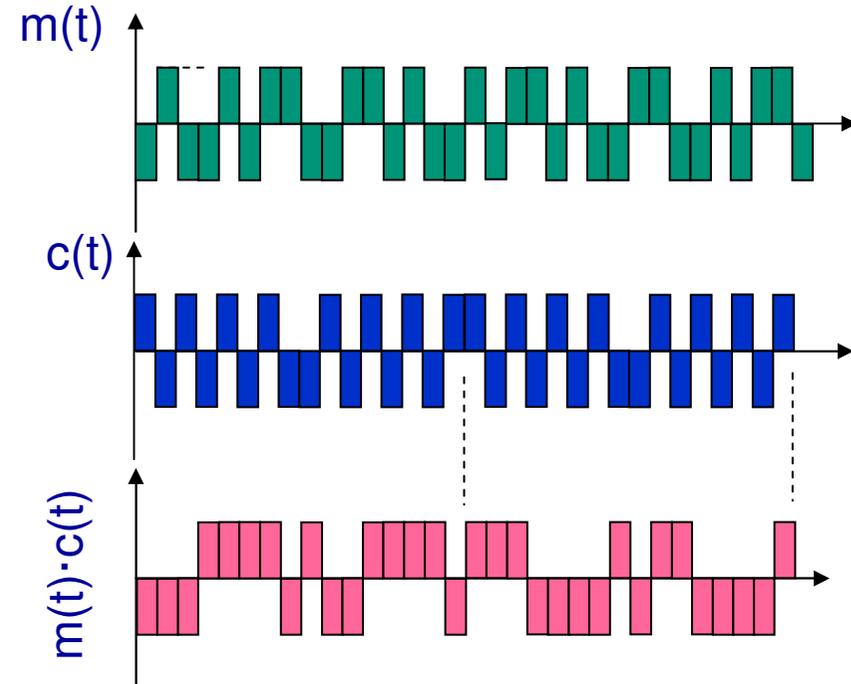
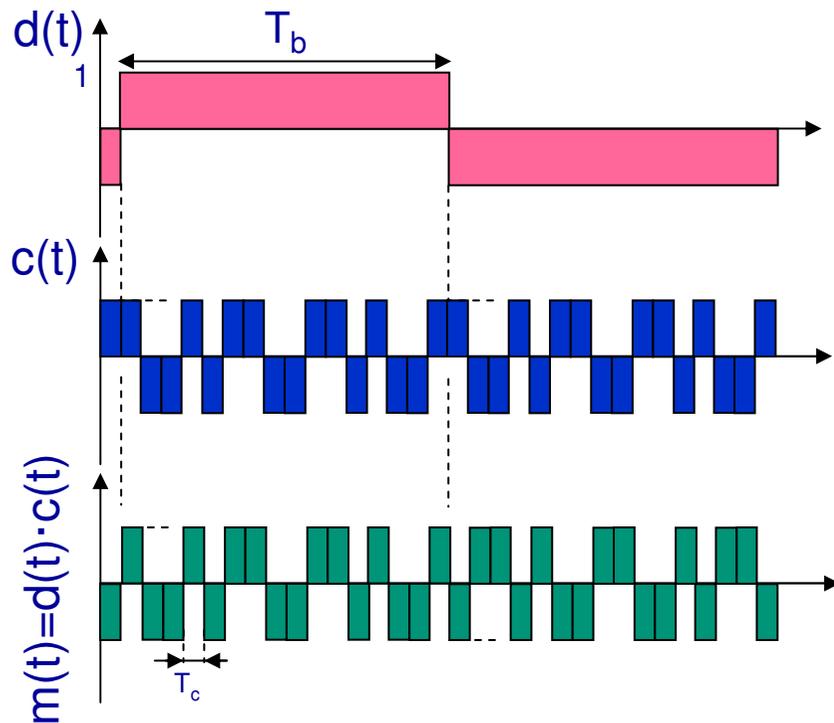


# DS-SSMA ortogonal

## Secuencias ortogonales: necesidad de sincronismo

Señal interferente (transmisión):  
**no sincronizada**

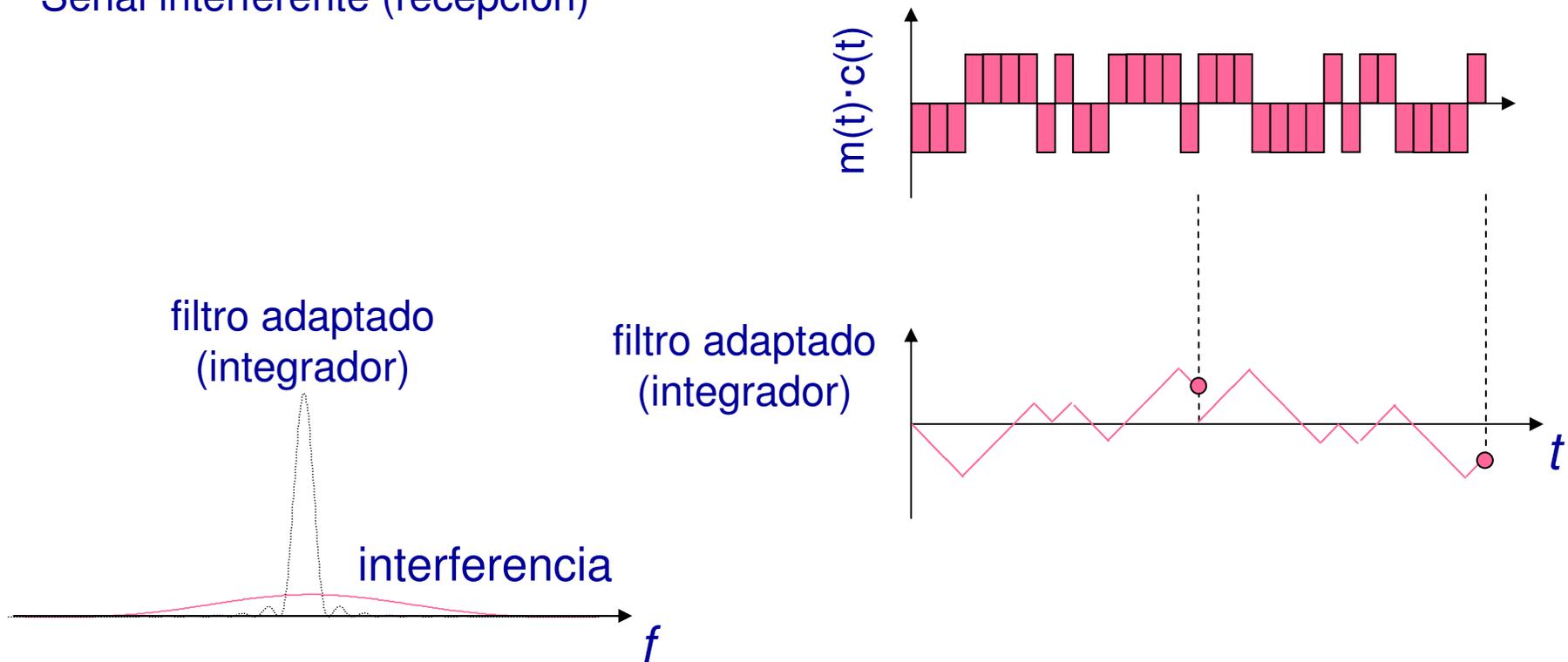
Señal interferente (recepción)



# DS-CDMA ortogonal

## Secuencias ortogonales: necesidad de sincronismo

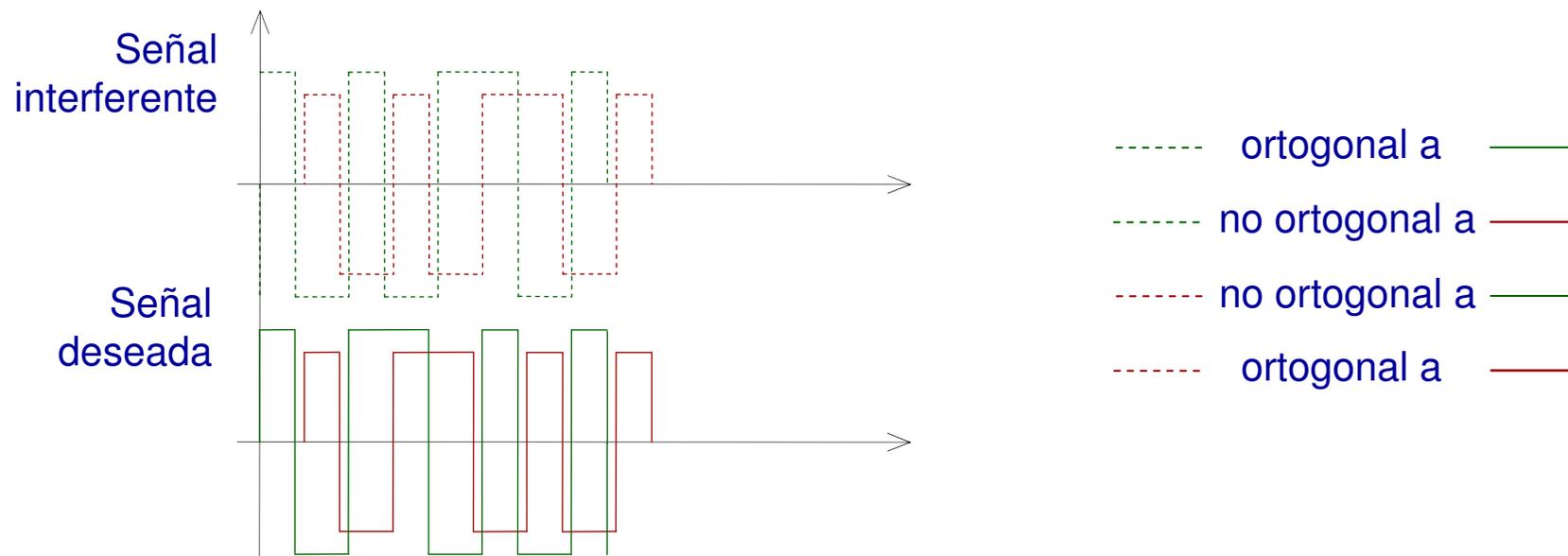
Señal interferente (recepción)



# DS-CDMA ortogonal

## Secuencias ortogonales: ortogonalidad parcial

- En canales multitrayecto, si los retardos entre ecos son comparables o mayores que  $T_C$ , parte de la señal interferente llega no sincronizada.
- Como resultado, la ortogonalidad es parcial: **factor de ortogonalidad**



# DS-CDMA pseudoaleatorio

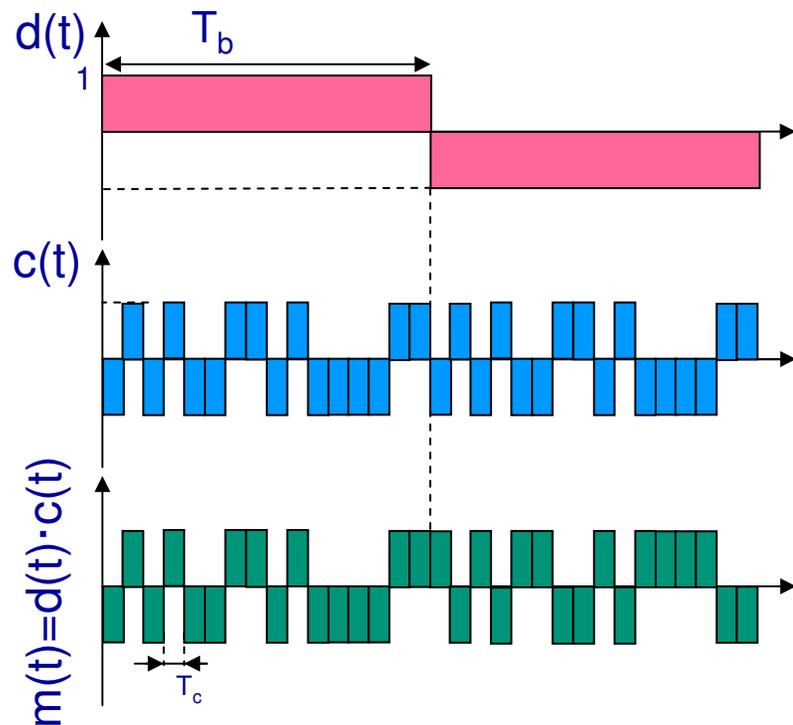
Sistema basado en secuencias pseudoaleatorias (PN)

- Las secuencias no son ortogonales: se produce interferencia por acceso múltiple
- La interferencia es pequeña, gracias al efecto de promediado (integración): **ganancia de procesado**
- Número de canales ilimitado: no es necesaria la reutilización
- No se requiere sincronismo entre señales correspondientes a comunicaciones diferentes
- Las secuencias no tienen por qué tener un periodo igual al de símbolo.

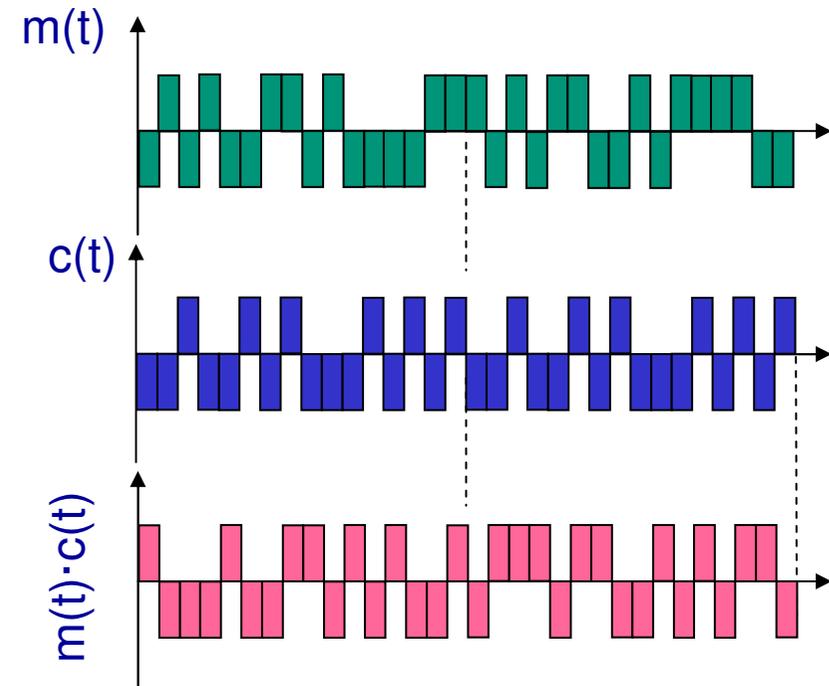
# DS-SSM pseudoaleatorio

Sistema basado en secuencias PN

Señal interferente (transmisión)



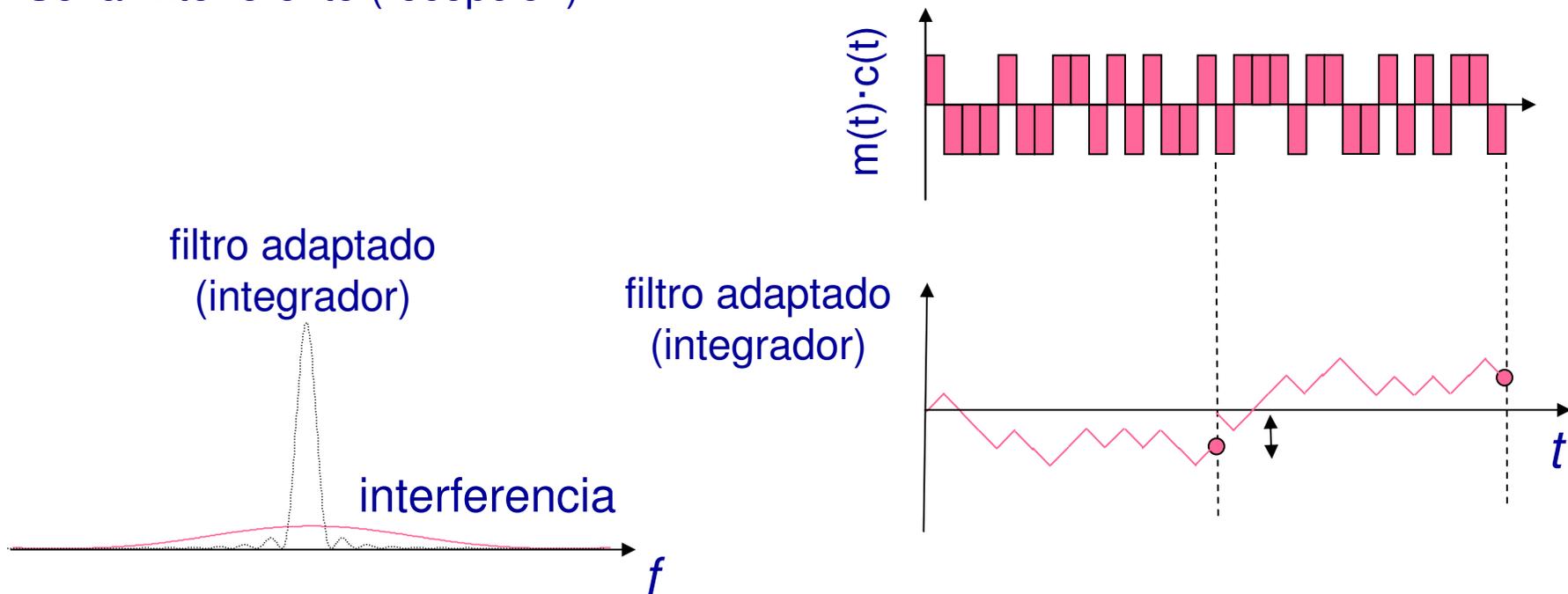
Señal interferente (recepción)



# DS-SS-SSA pseudoaleatorio

Sistema basado en secuencias PN

Señal interferente (recepción)

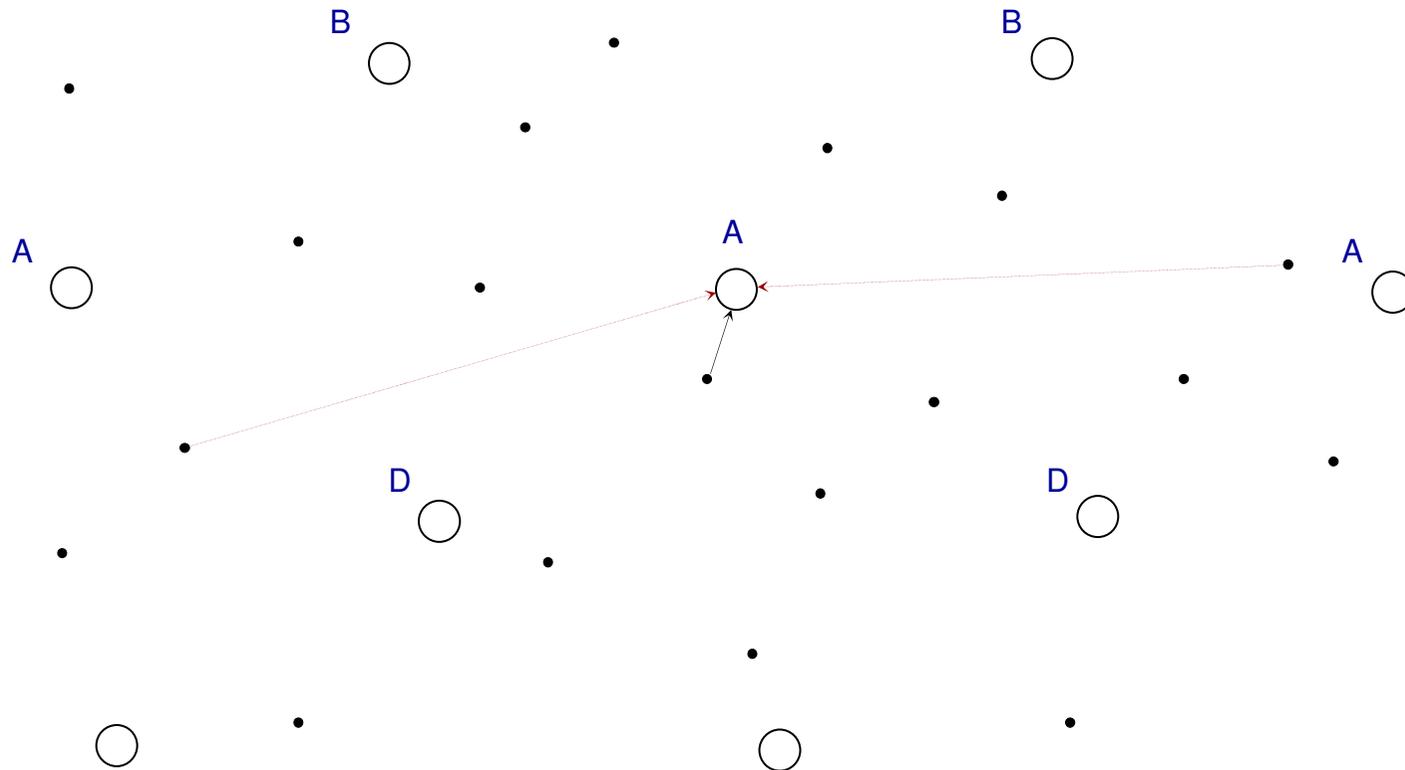


Ganancia de procesamiento  $G_p =$  Factor de ensanchamiento (chips/símbolo)

### 3. Características de los sistemas celulares CDMA

# Sistemas limitados por dimensiones

Sistemas FDMA/TDMA; CDMA ortogonales

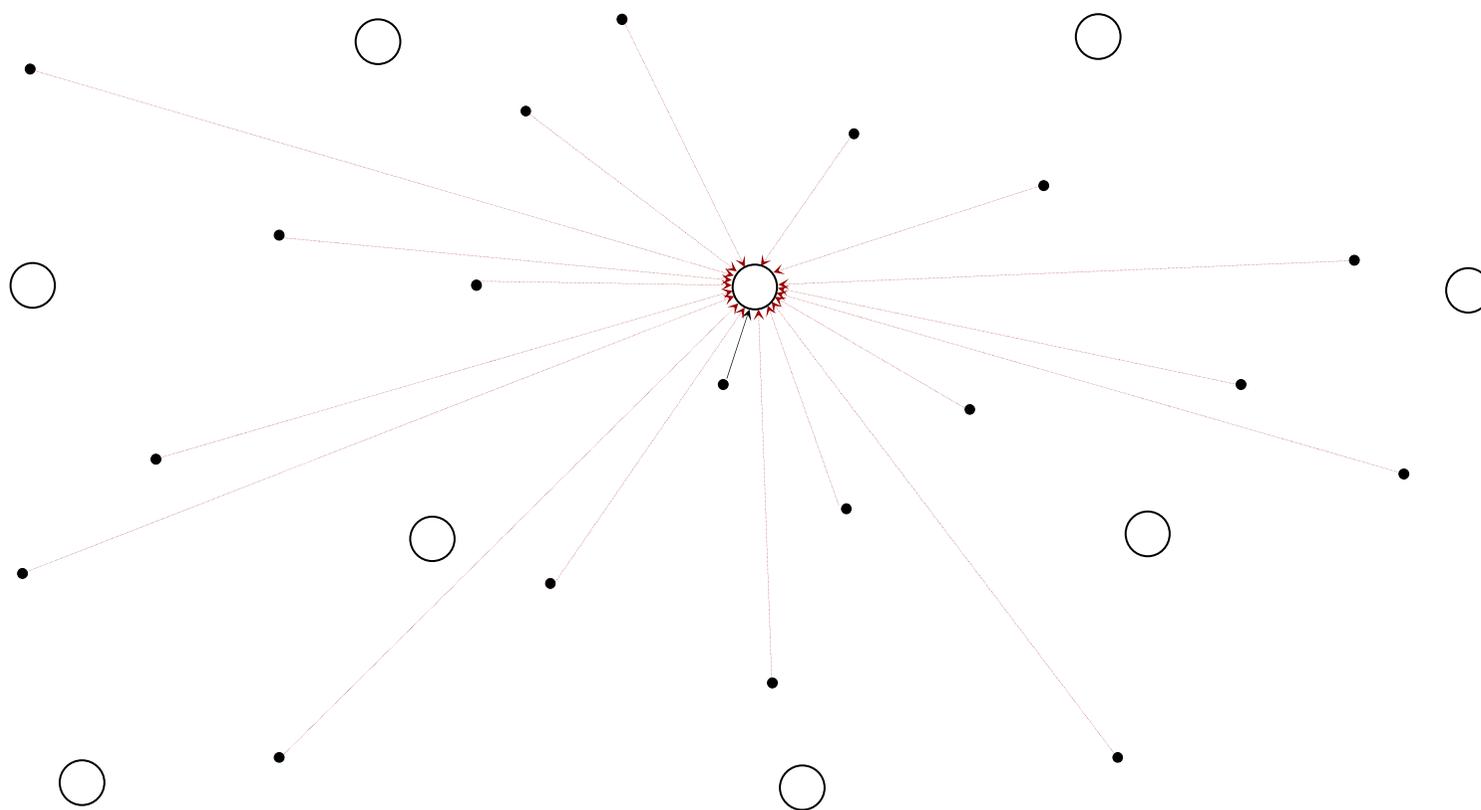


# Sistemas limitados por dimensiones

- Número **reducido** de canales **no interferentes** (ortogonales)
- Formas de establecer los canales:
  - Frecuencias (FDMA)
  - Intervalos de tiempo (TDMA)
  - Secuencias código ortogonales (CDMA)
- Necesidad de **reutilización** para remediar la escasez de canales.
- La capacidad está limitada por el número de canales por célula. Esta limitación es “rígida” (*hard blocking*).

# Sistemas limitados por interferencia

## Sistemas CDMA pseudoaleatorios



# Sistemas limitados por interferencia

- Número prácticamente **ilimitado** de canales ligeramente **interferentes** (no ortogonales).
- Esta modalidad sólo es posible mediante la utilización de CDMA con secuencias código PN.
- No es necesario reutilizar canales.
- La **interferencia** no se produce por reutilización, sino por la propia naturaleza de los canales.
- La capacidad está limitada por la interferencia máxima admisible. Esta limitación es “gradual” (*soft blocking*).

# Sistemas CDMA utilizados en la práctica

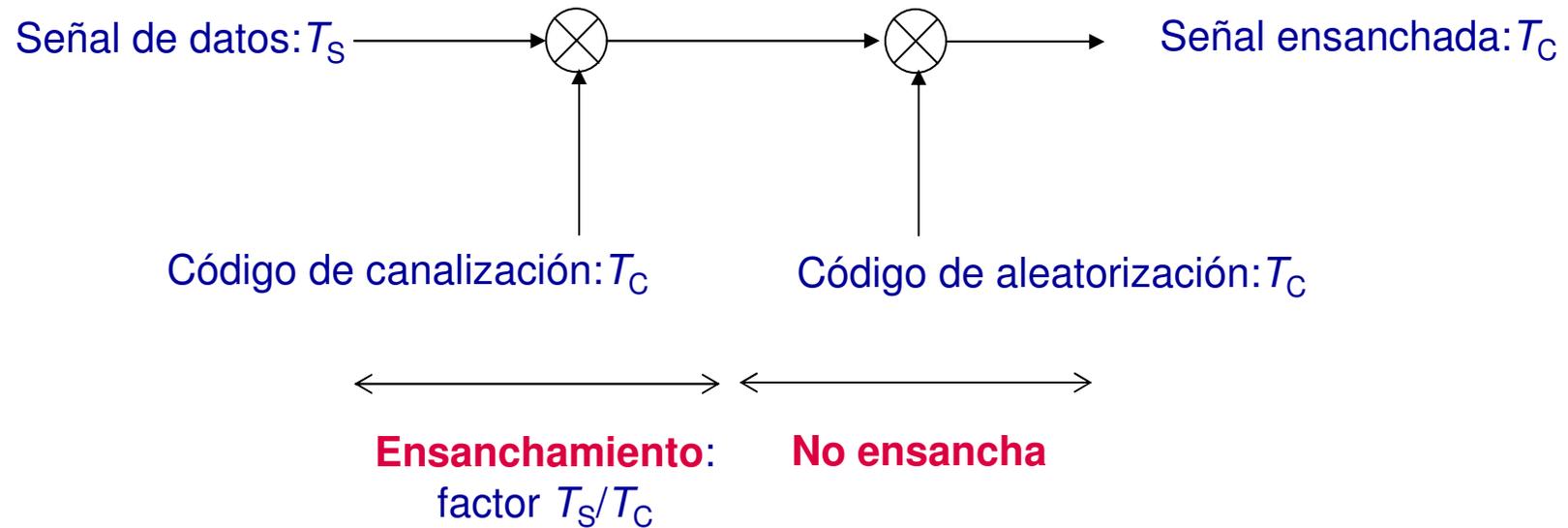
- Se diseñan como sistemas **limitados por interferencia**, pero se establece **ortogonalidad entre algunas señales**.
- En el enlace descendente la ortogonalidad se refiere a señales transmitidas por la misma base
- En el ascendente se refiere a señales transmitidas por el mismo móvil (si hay varios canales simultáneos)
- En el enlace ascendente con movilidad reducida se puede extender la ortogonalidad a móviles de una misma base, pero ello requiere una sincronización muy estricta: poco utilizado.
- La ortogonalidad es, en todo caso, parcial, debido a la propagación multitrayecto.

# Sistemas CDMA utilizados en la práctica

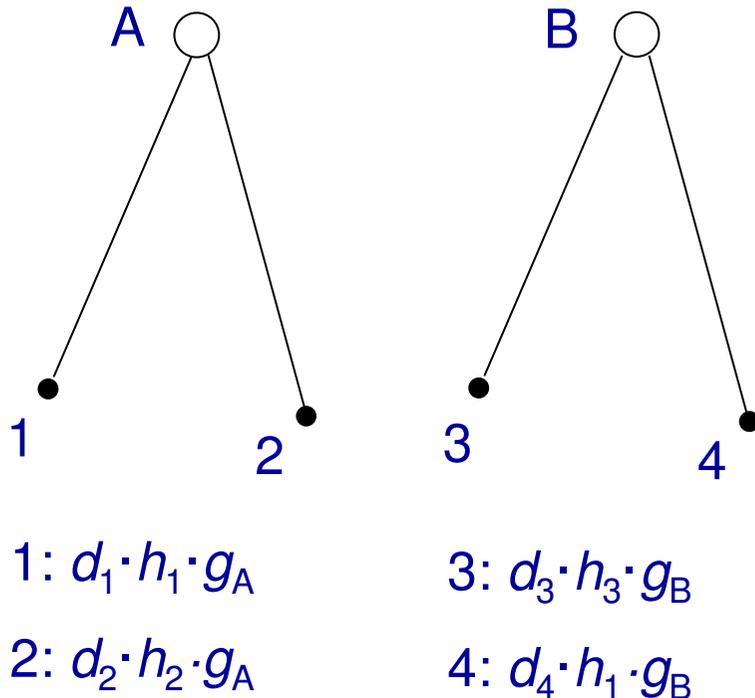
Lo anterior se consigue mediante dos “capas” de código:

- Códigos de **canalización**: ortogonales.
- Códigos de **aleatorización**: pseudoaleatorios (PN).
- Enlace descendente:
  - Códigos ortogonales (de canalización) para usuarios de una misma célula.
  - Códigos PN (de aleatorización) para células diferentes.
- Enlace ascendente:
  - Códigos ortogonales (de canalización) para señales de un mismo móvil.
  - Códigos PN (de aleatorización) para móviles diferentes.

# Códigos de canalización y de aleatorización



# Sistemas CDMA utilizados en la práctica: DL



Secuencias “ $d$ ”: datos

Secuencias código “ $g$ ”: PN

Secuencias código “ $h$ ”: ortogonales

$$\int_0^{T_S} d_1(t)h_1(t)g_A(t) \cdot d_2(t)h_2(t)g_A(t)dt = 0$$

$$\int_0^{T_S} d_1(t)h_1(t)g_A(t) \cdot d_3(t)h_3(t)g_B(t)dt \approx 0 (G_P)$$

$$\int_0^{T_S} d_1(t)h_1(t)g_A(t) \cdot d_4(t)h_1(t)g_B(t)dt \approx 0 (G_P)$$

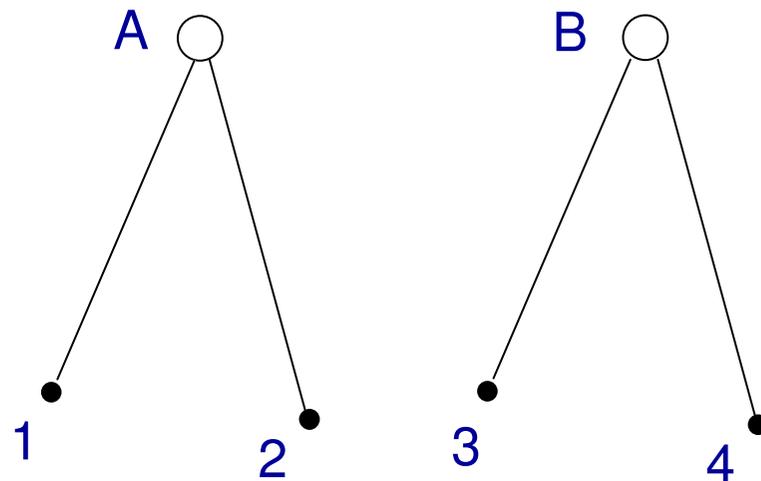
Comportamiento:

- Ortogonal (parcialmente) entre señales de la misma célula
- PN entre señales de células distintas

# Sistemas CDMA utilizados en la práctica: DL

- De este modo se consiguen las ventajas de la limitación por interferencia con la mejora añadida de que se elimina parte de la interferencia (la de señales de la propia célula), por ortogonalidad parcial.
- A pesar de su reducido número, la reutilización de los códigos ortogonales no es problema: pueden utilizarse todos en cada célula, gracias a la etapa de aleatorización.

# Sistemas CDMA utilizados en la práctica: UL



1:  $d_1 \cdot g_1$

2:  $d_2 \cdot g_2$

3:  $d_3 \cdot g_3$

4:  $d_4 \cdot g_4$

Secuencias “ $d$ ”: datos

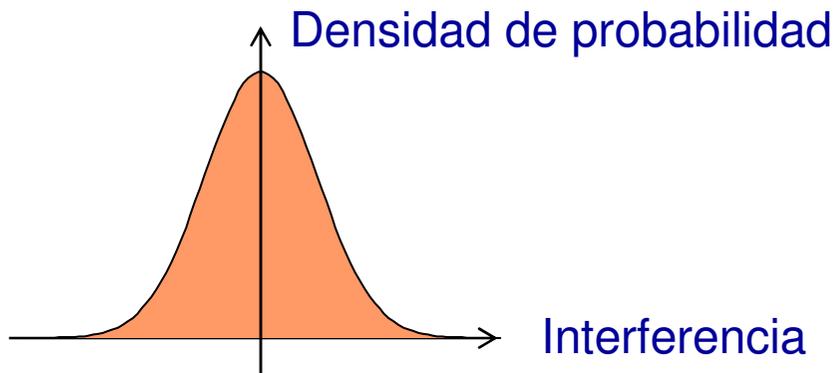
Secuencias código “ $g$ ”: PN

$$\int_0^{T_s} d_1(t)g_1(t) \cdot d_j(t)g_j(t)dt \approx 0 \quad (G_p)$$

Comportamiento:

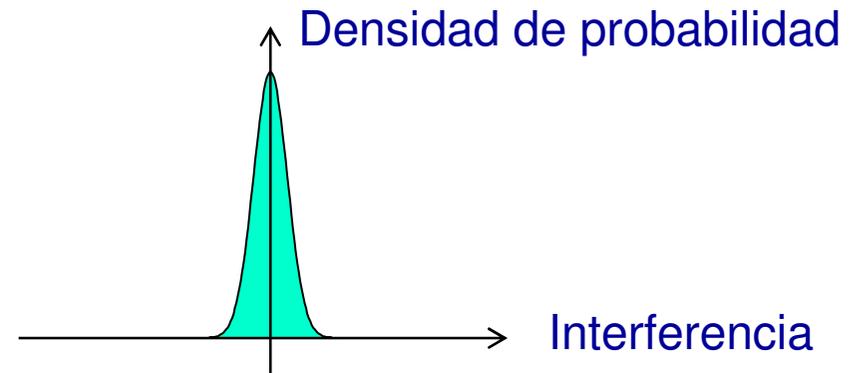
- PN entre señales de móviles distintos
- Ortogonal (parcialmente) entre señales del mismo móvil

# Promediado (diversificación) de interferencia



## LIMITADO POR DIMENSIONES

- Reutilización de canales
- Número reducido de fuentes de interferencia
- Diseño en “caso peor”



## LIMITADO POR INTERFERENCIA

- Canales no ortogonales
- Número elevado de fuentes de interferencia
- **Menor variación** para el mismo valor medio (ley de los grandes números)

# Control de potencia

Necesidad: problema “cerca-lejos” (*near-far*):

- Enlace ascendente: diferente atenuación de las señales.
- Enlace descendente: diferente nivel de las señales de la célula relativo a la interferencia externa y al ruido térmico; diferentes factores de ortogonalidad.

El control debe ser dinámico: actualización periódica: las órdenes de control deben multiplexarse con la información.

- **Bucle abierto**. Compensa desvanecimientos por sombra
- **Bucle interno**. Compensa desvanecimientos por sombra o por multitrayecto
- **Bucle externo**. Funciona en cooperación con el bucle interno. Ajusta la relación  $E_B/N_0$  objetivo al valor necesario.

Se llama **bucle cerrado** a la combinación de interno y externo (a veces se llama bucle cerrado al interno).

# Bucle abierto

- Se basa en estimar la atenuación del enlace descendente midiendo el nivel de señal recibido (canal piloto), y suponer dicha estimación válida para el enlace ascendente.
- En FDD la suposición anterior es válida para la pérdida media de propagación (atenuación determinista y desvanecimiento por sombra), pero no para los desvanecimientos multitrayecto, debido a la **diferencia de frecuencias** entre los dos sentidos de transmisión.
- En TDD, al no existir diferencia de frecuencias, el control de potencia en bucle abierto puede compensar el desvanecimiento multitrayecto, si el periodo de actualización es pequeño en comparación con las variaciones temporales del canal.

# Bucle interno

- Se basa en un proceso de **realimentación negativa**: el receptor mide un cierto parámetro, compara con el valor objetivo (referencia) y ordena al transmisor, mediante un canal de señalización, aumentar o reducir la **potencia transmitida**.
- El parámetro medido puede ser
  - Nivel de señal recibido
  - Relación señal/(interferencia+ruido): SINR (o  $E_B/N_0$ )

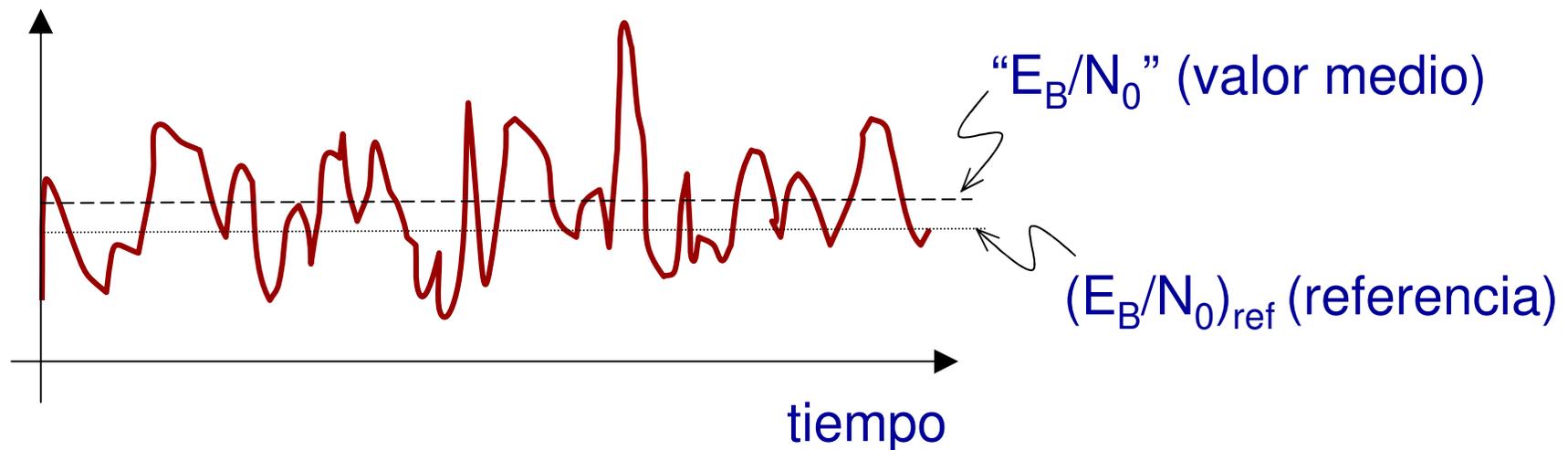
Usar SINR (o  $E_B/N_0$ ) es más efectivo (tiene en cuenta las variaciones en la interferencia), pero más complejo (inestabilidades).

- Las actualizaciones de potencia son periódicas. Debe hacerse rápido (ej.:  $1500 \text{ s}^{-1}$  en UMTS). Normalmente se utiliza un paso fijo, de 0,5–2 dB.

# Relación $E_B/N_0$ instantánea y media

- La  $E_B/N_0$  **instantánea** tiene **variaciones** rápidas en torno al valor de referencia, debido a que el bucle interno no es ideal (retardo, paso discreto, errores): no compensa exactamente los desvanecimientos multitrayecto.
- La “ $E_B/N_0$ ” (sin calificar) se refiere al **valor promediado** respecto a variaciones rápidas (multitrayecto y bucle interno)

$E_B/N_0$  instantánea

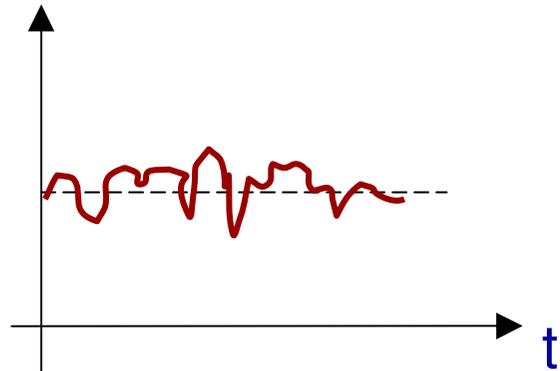


# Bucle externo

- La  $E_B/N_0$  instantánea tendrá mayor o menor variabilidad en función de las **condiciones de propagación**. La variabilidad tiende a ser mayor para:
  - mayor dispersión Doppler (el móvil se mueve más rápido y por tanto el canal varía más deprisa);
  - menor dispersión temporal (el canal varía más, al haber menos diversidad multitrayecto).
- La calidad (BLER) objetivo se corresponderá con un valor medio de la relación  $E_B/N_0$  más alto o más bajo en función de la variabilidad que tenga la  $E_B/N_0$  instantánea,
- Por tanto, una misma calidad objetivo requerirá **diferentes valores medios** de la  $E_B/N_0$ , en función de las condiciones de propagación que tenga la conexión en cada momento.
- Las variaciones de la  $E_B/N_0$  media necesaria en función de las condiciones de propagación son usualmente de 2–5 dB.

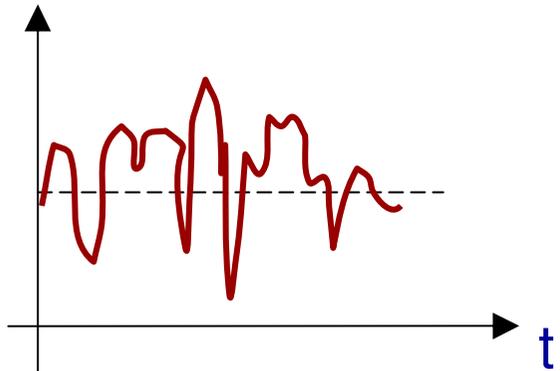
# Bucle externo

$E_B/N_0$  instantánea



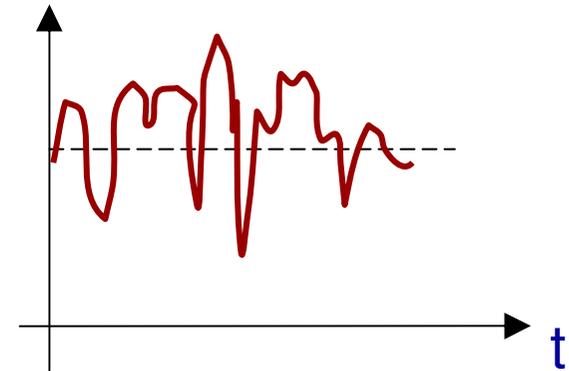
BLER=1%

$E_B/N_0$  instantánea



BLER= 3%

$E_B/N_0$  instantánea



BLER= 1%

# Bucle externo

- De lo anterior surge la necesidad de controlar la  $E_B/N_0$  media del enlace.
- El control se lleva a cabo modificando el **valor de referencia** usado por el bucle interno.
- Se basa en una **realimentación negativa** en la que el parámetro medido es la calidad (BLER) y el parámetro sobre el que se actúa es la  $E_B/N_0$  de referencia del bucle interno.
- Frecuencia de actualización: baja (10-100 Hz), puesto que
  - Las variaciones que debe compensar son lentas
  - Medir la BLER requiere mucho tiempo

# Traspaso con continuidad (*soft handover*)

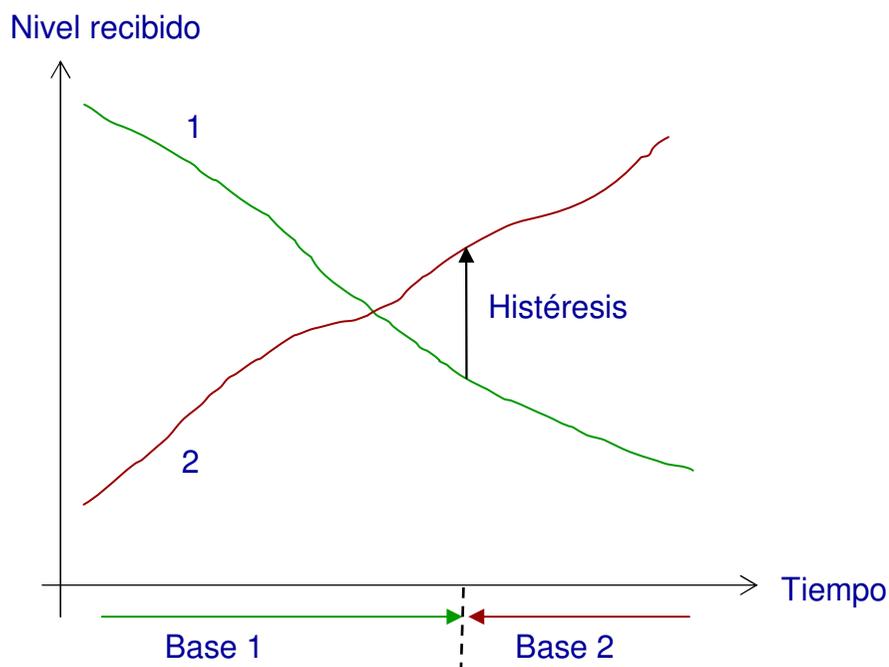
- Enlace ascendente: recepción desde varias bases y selección/combinación.
- Enlace descendente: transmisión desde varias bases y combinación en el móvil (receptor Rake).

## Ventajas:

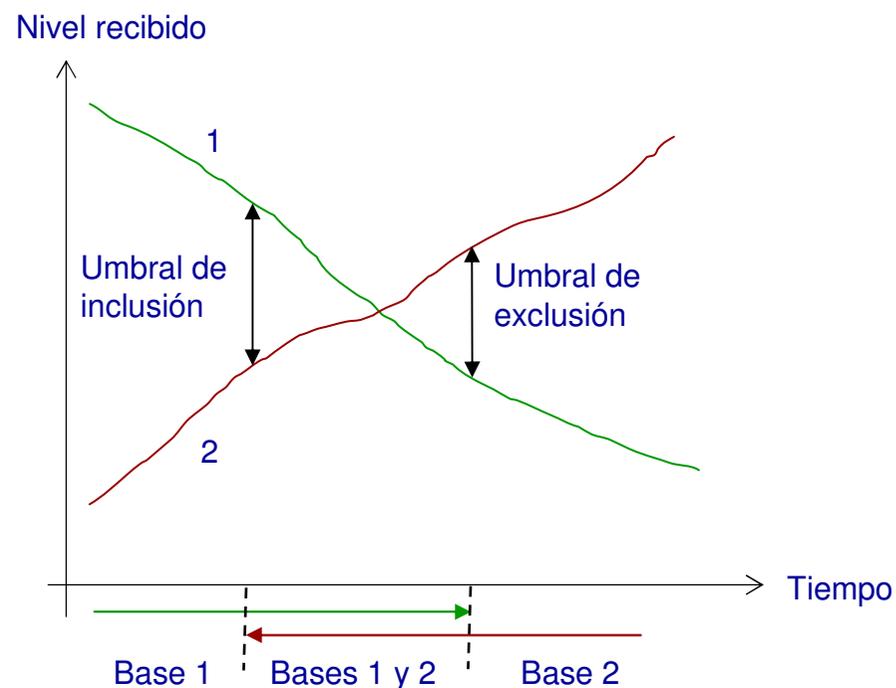
- Reducción de interferencia en enlace ascendente
- Mayor continuidad de las llamadas
- Mayor calidad (macrodiversidad)

# Traspaso con continuidad

## Traspaso convencional



## Traspaso con continuidad



# Traspaso con continuidad: enlace ascendente

- El conjunto de bases que atienden a un usuario se denomina **conjunto activo**.
- En el enlace ascendente, el móvil transmite en cada momento con la potencia mínima de entre las que pidan las bases de su conjunto activo.
- Esto es equivalente a que el móvil se encuentre instantáneamente asignado a la mejor base. Se consigue así reducir la interferencia.
- Las señales en las bases activas
  - se seleccionan (*soft handover*), si se reciben en emplazamientos diferentes; o
  - se combinan (*softer handover*), si se reciben en sectores de un mismo emplazamiento (proximidad física de los equipos).

# Traspaso con continuidad: enlace descendente

- La información se transmite al móvil desde todas las bases del conjunto activo.
- En el móvil las señales se combinan en el receptor Rake (como si fueran componentes multitrayecto, sólo que con secuencias código diferentes). Los bits de control de potencia sólo se combinan en el caso *softer*.
- Al haber varias bases transmitiendo al móvil, puede producirse un incremento del nivel de interferencia en el enlace descendente.
- Una variante es SSDT (*Site Selection Diversity Transmission*):
  - Sólo una de las bases transmite en cada momento información al móvil. Ambas transmiten señalización (de nivel físico).
  - El móvil elige la base más adecuada en cada momento, y lo indica periódicamente mediante señalización ascendente.
  - (+) Disminuye la potencia media transmitida por cada base.
  - (-) Aumenta la variabilidad de la potencia transmitida por cada base.
  - (-) No funciona bien a velocidades del móvil altas.
  - Característica presente (opcional) en las primeras versiones de UMTS.

# Actividad discontinua de fuente



Actividad discontinua

Diversidad de interferencia



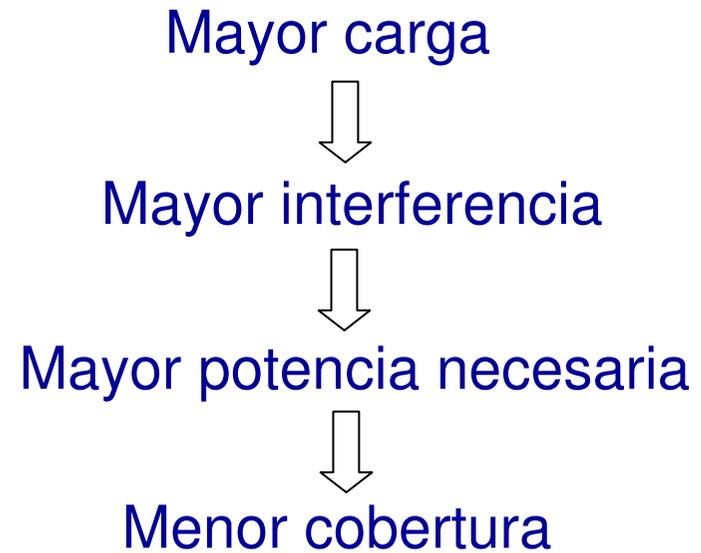
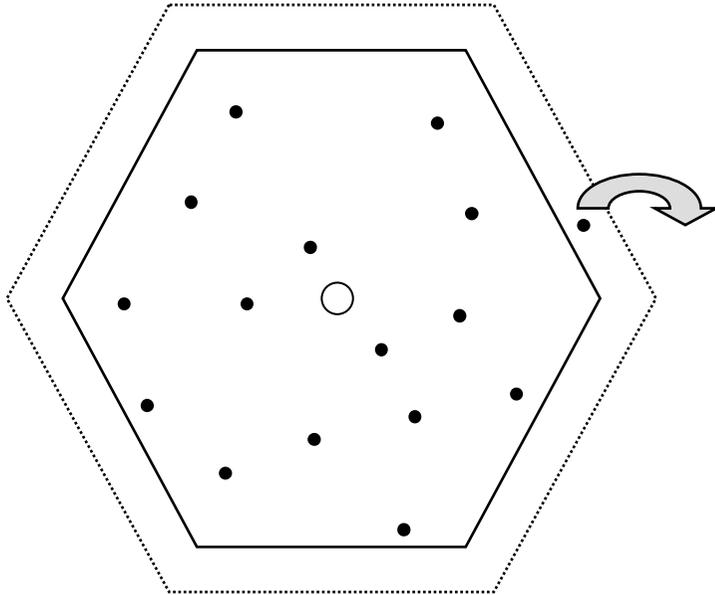
Menor interferencia



Mayor capacidad

- El nivel **medio** de interferencia se reduce.
- Debido a la diversificación de interferencia (sistemas limitados por interferencia), esta reducción del valor medio incrementa la capacidad.

# Relación capacidad-cobertura



# Relación capacidad-cobertura

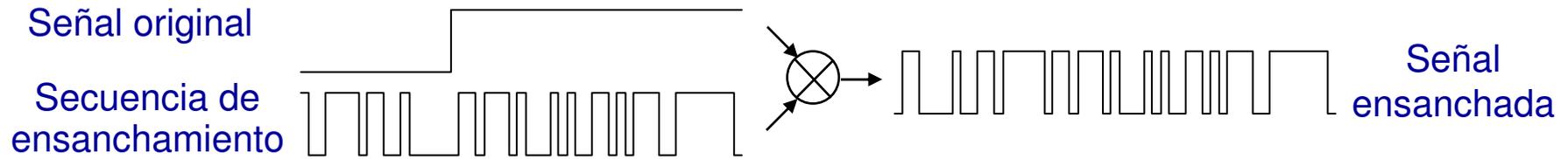
- La cobertura de una célula CDMA queda definida por la potencia máxima que un móvil (enlace ascendente) o base (enlace descendente) puede transmitir.
- Si hay muchos usuarios activos aumenta la interferencia y se solicita más potencia, con lo que la cobertura ascendente se reduce.
- En sentido descendente ocurre lo mismo al aumentar el número de usuarios; y además hay otro efecto: la potencia total de la base debe compartirse entre más usuarios.
- Este fenómeno de relación entre capacidad y cobertura se denomina a veces “respiración celular” (*cell breathing*).

# Compartición automática de capacidad

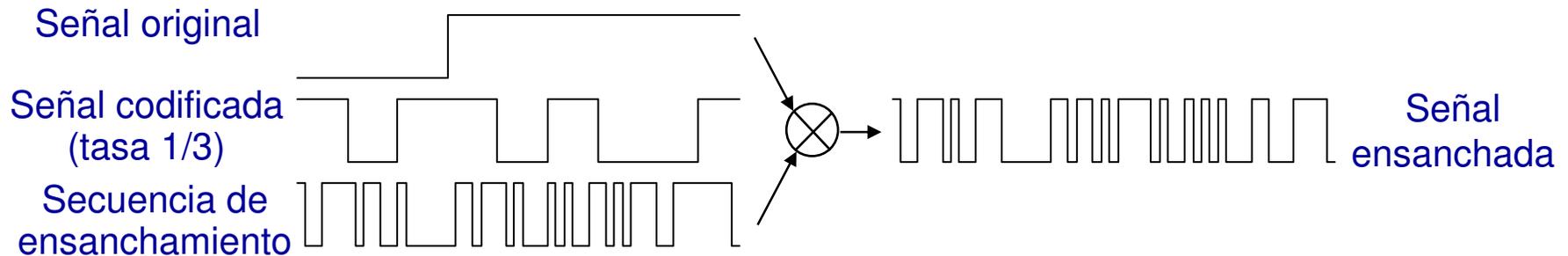
Célula poco cargada  $\Rightarrow$  Menor interferencia sobre células vecinas  $\Rightarrow$  Mayor capacidad para células vecinas

- La capacidad de las células tiende a compartirse, lográndose un uso más eficiente de los recursos.
- La compartición de capacidad se logra de manera más “natural” que en sistemas clásicos, en los que exigiría asignación dinámica de frecuencias.

# Codificación de canal



Sin codificación de canal



Con codificación de canal

# Codificación de canal

- Las propiedades espectrales y estadísticas de la señal ensanchada no dependen de la velocidad binaria antes de ensanchar.
- Esto permite la utilización de tasas de codificación más bajas (más potentes) que en sistemas clásicos.
- Asimismo, simplifica la multiplexación de servicios con diferentes velocidades binarias.
- Normalmente el “factor de ensanchamiento” se define respecto a la tasa binaria de canal, y la “ganancia de procesado” respecto a la de fuente:

$$SF = \frac{T_{B \text{ canal}}}{T_C}$$
$$G_P = \frac{W}{R_{\text{fuente}}} = W T_{\text{fuente}} \approx \frac{T_{B \text{ fuente}}}{T_C}$$