

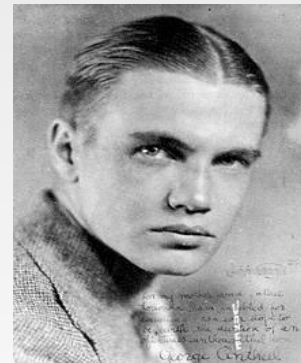
Sistemas de Comunicación Digital

INF2010

Clase 11:
Espectro Expandido

Espectro Expandido

- Hasta ahora siempre nos preocupamos por transmitir de tal manera de obtener una señal por encima del nivel del ruido
- De tal manera de poder entender la señal en el receptor con una cierta probabilidad de confundir los datos.
- Ahora, nos preguntamos si podemos transmitir por debajo del nivel del ruido y aún así poder decodificarlo en el receptor.
- ¿Es posible?



George Anthell, Hedy Lamarr

Espectro Expandido

- También se puede tomar en cuenta:
 - Capacidad de acceso múltiple
 - Capacidad de evitar interferencias forzadas y naturales
 - Baja probabilidad de interceptación
 - Capacidad de transmisión encubierta
- El acceso múltiple hace falta en comunicaciones celulares:
 - Hay una banda limitada de frecuencias disponible y no se puede asignar permanentemente un canal a cada usuario
 - Permitiendo una banda ancha para un grupo de usuarios, mediante CDMA (Code Division, Multiple Access) para compartir el espectro – además de TDMA y FDMA.

Espectro Expandido

- Hay varios tipos de Espectro Expandido (Spread Spectrum, SS).
- Debe cumplir los criterios:
 - El ancho de banda de la señal transmitida debe ser mucho mayor al del mensaje
 - La señal de banda ancha debe ser generada por una forma de onda modulante independiente, llamada señal de spreading, y debe ser conocida por el receptor.

Espectro Expandido

- Entonces definimos la señal:

$$s(t) = \Re \{g(t)e^{j\omega_c t}\}$$

- Donde la envolvente es función de la señal $m(t)$ y de la portadora $c(t)$.
- En la mayoría de los casos, se usa un producto:

$$s(t) = g_m(t)g_c(t)$$

- Donde cada una de las funciones son las mismas que se utilizan para generar AM, PM, FM, etc.

Espectro Expandido

- Por otro lado, podemos clasificar el Espectro Expandido en:
 - Secuencia Directa (DS): Se genera DBLPS*, con una señal polar NRZ como portadora $c(t)$. (Es decir $g_c(t)=c(t)$)
 - Salto en Frecuencia (FH, Frequency Hopping): $g_c(t)$ es del tipo FM, y denominamos $M=2^k$ frecuencias de salto determinada por palabras de k bits obtenidas de la forma de onda de spreading
 - Técnicas Híbridas, incluyendo DS y FH.

*DBLPS: doble banda lateral con portadora suprimida

Espectro Expandido

- Asumimos que la señal de información $m(t)$ es:

- Digital
- Polar con valores entre +1 y -1.

- Veamos ahora una señal BPSK, donde:

$$g(t) = A_c m(t)$$

- Para secuencia directa, donde $g_c(t) = c(t)$, la envolvente queda:

$$g(t) = A_c m(t) c(t)$$

- Generando una señal $s(t)$:

$$s(t) = \Re \{ g(t) e^{j\omega_c t} \}$$

- Llamada BPSK-DS-SS.

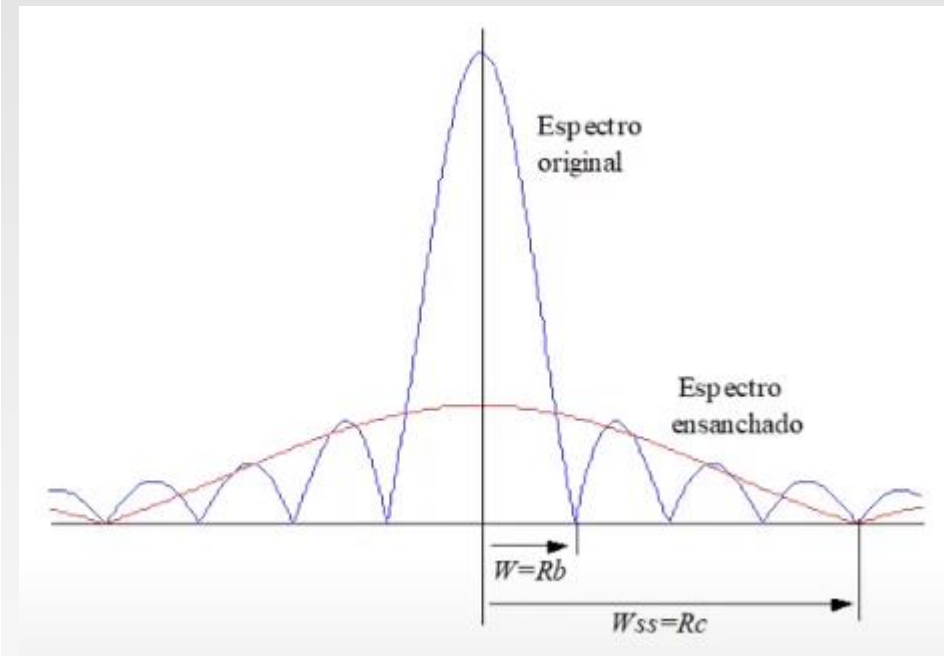
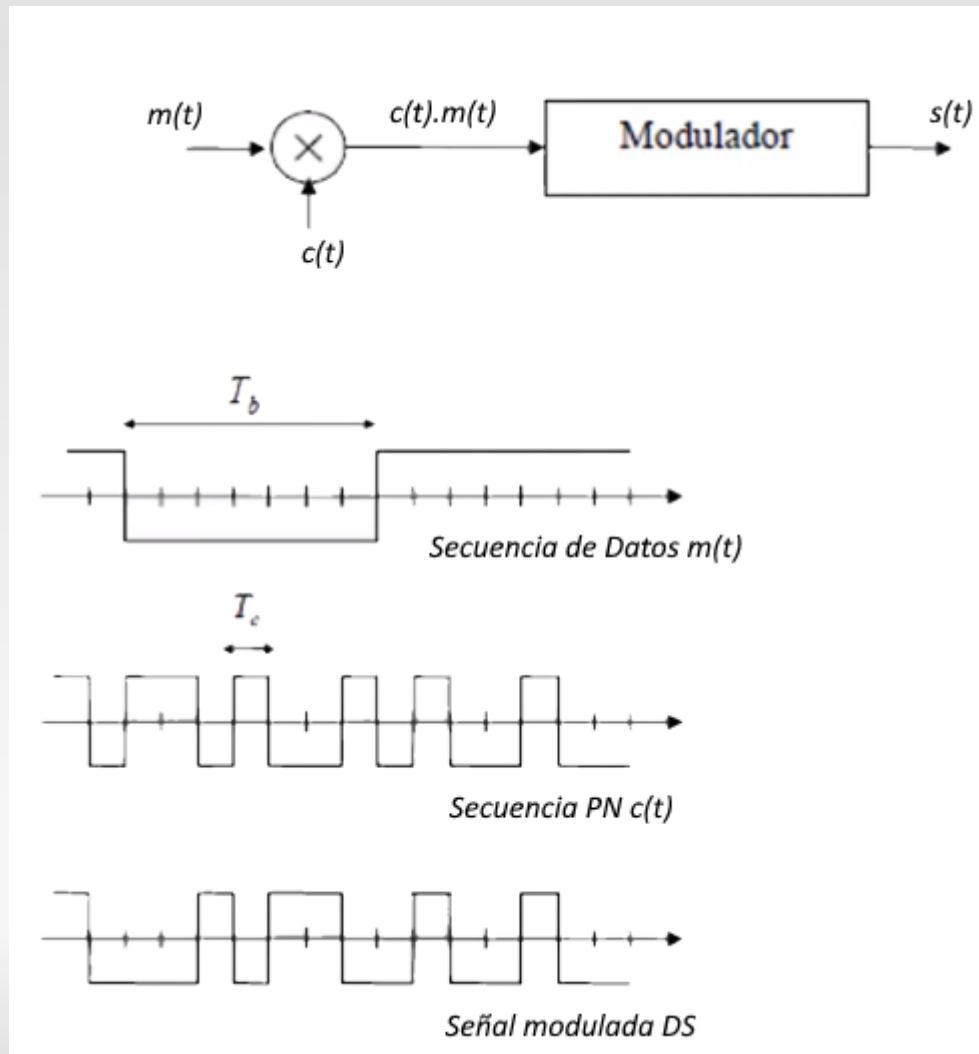
(señal de espectro ensanchado por secuencia directa con datos con modulación por corrimiento de fase binaria)

Espectro Expandido

- Hagamos que la señal de spreading sea provista por un generador polar de pseudoruido (PseudoNoise generator, PN).
- El ancho de pulso de $c(t)$ llamado T_c es llamado intervalo de chip.
- Este generador utiliza un sumador de módulo 2 y un registro de corrimiento (Shift Register, SR) de r etapas que avanza cada T_c .
- Y las etapas de realimentación del SR se ordenan de tal manera de obtener un período máximo de N chips, donde:
$$N = 2^r - 1$$
- Llamado secuencia de máxima longitud.

Espectro Expandido

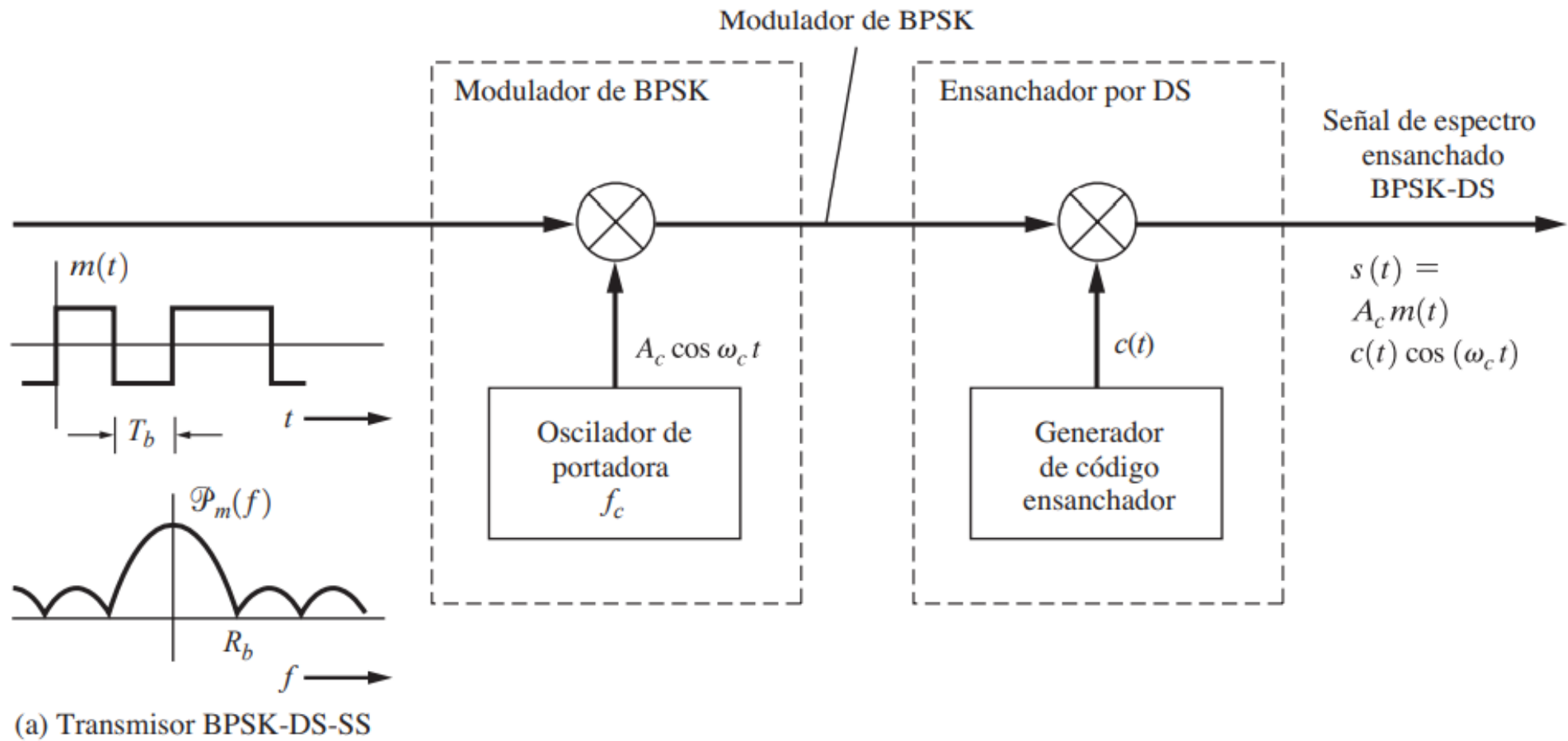
- DSSS. (Direct Sequence Spread Spectrum) → ¿Cómo funciona?



El ancho de pulso de $c(t)$ llamado T_c es llamado intervalo de chip.

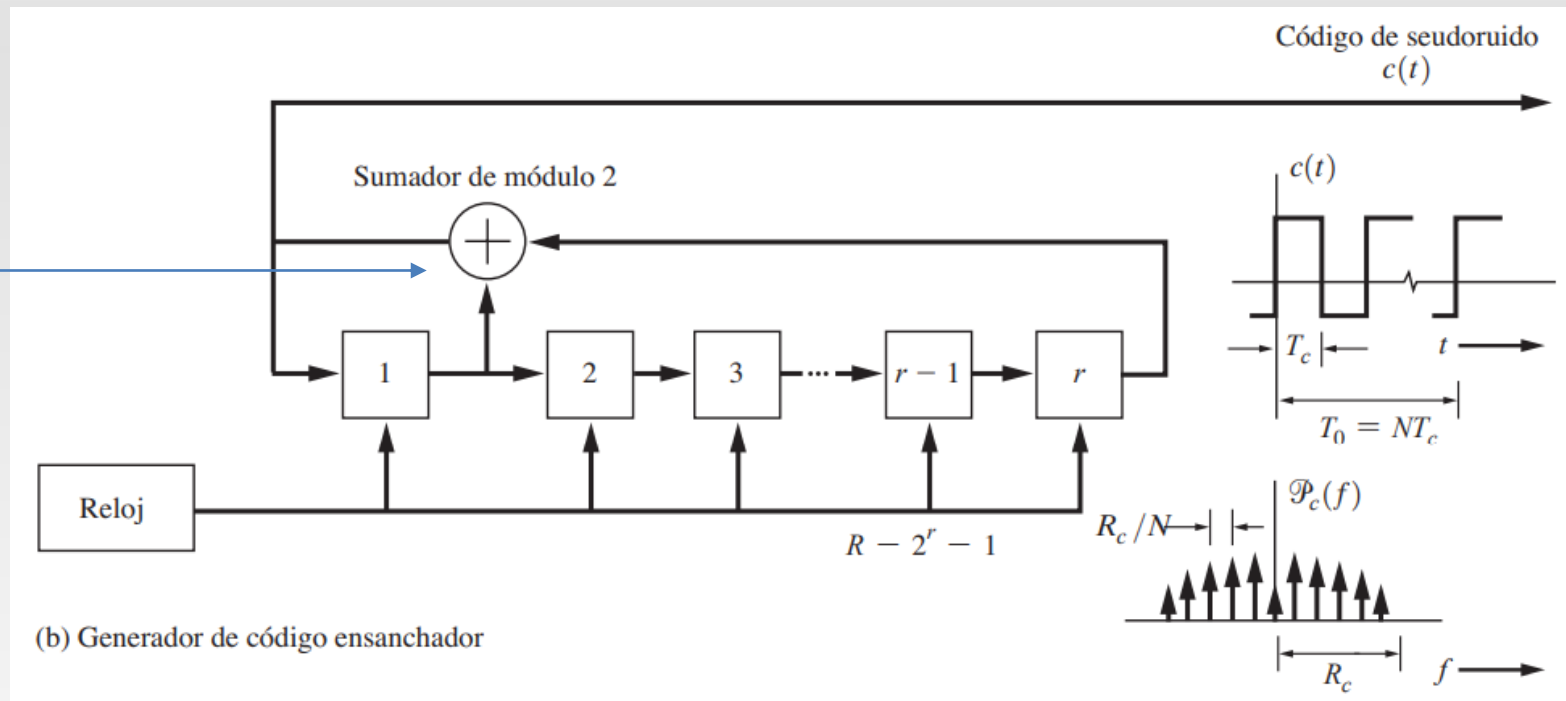
Espectro Expandido

- El modulador:



Espectro Expandido

- El generador de código de pseudoruido



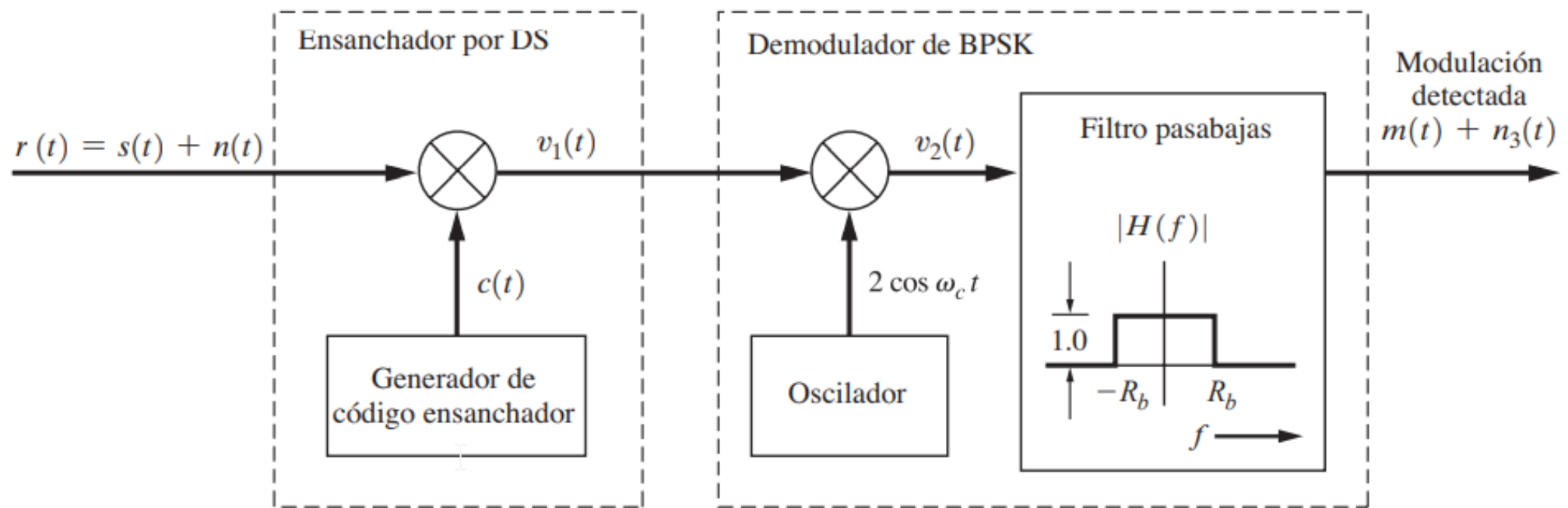
Se utiliza un sumador de módulo 2 y r etapas de un registro de corrimiento que se sincronizan cada T_c segundos.

Puede mostrarse que $c(t)$ es periódica. Además, muestras de retroalimentación de las etapas de los registros de corrimiento y sumadores de módulo 2 se arreglan de tal manera que la forma de onda $c(t)$ tienen un máximo periodo de N chips

Se dice que este tipo de generador de código PN produce una forma de onda de secuencia con máxima longitud o secuencia m .

Espectro Expandido

- El demodulador



(c) Receptor BPSK-DS-SS.

Espectro Expandido

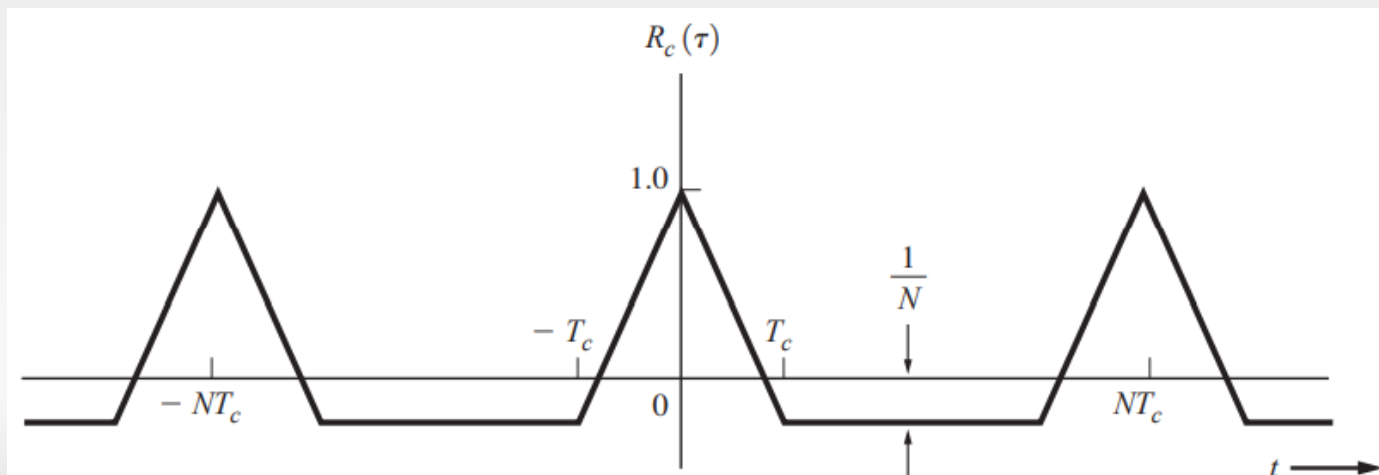
- Propiedades de las secuencias de longitud máxima:
 - En un período, el número de 1s es mayor que el número de 0s.
 - La suma módulo 2 de cualquier secuencia m , sumado chip a chip con una versión desplazada de la misma secuencia genera otra versión desplazada de la misma secuencia
 - Si una ventana de largo r se desplaza por la secuencia en N corrimientos, entonces todas las palabras posibles de largo r aparecerán una vez, excepto por la palabra nula (todos 0).

Espectro Expandido

- Si los 0s y 1s son representados por +1V y -1V, la secuencia de autocorrelación $R_c(k)$ es:

$$R_c(k) = \begin{cases} 1, & k = \ell N \\ -\frac{1}{N} & k \neq \ell N \end{cases}$$

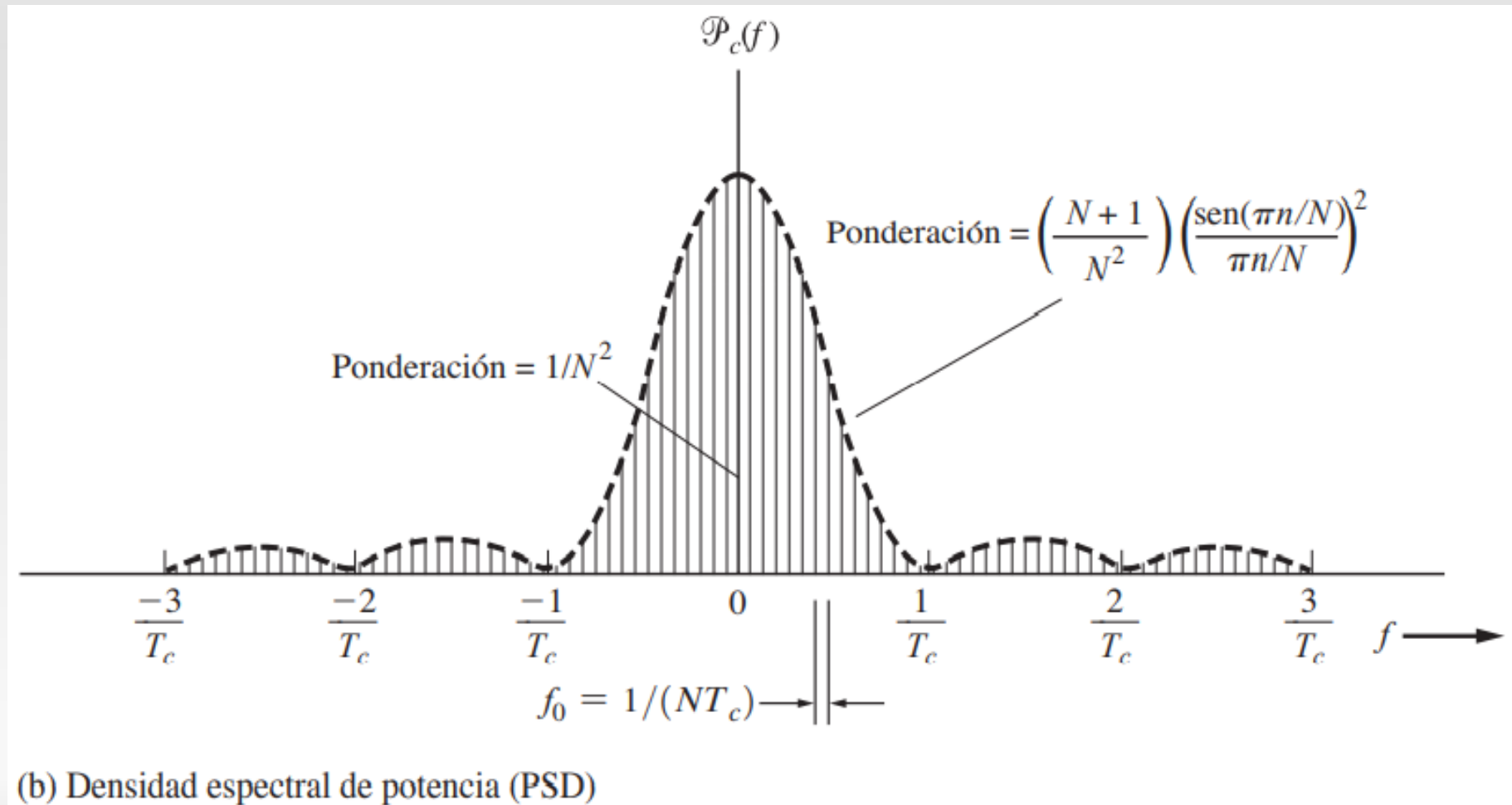
- Y en un gráfico temporal da:



(a) Función de autocorrelación

Espectro Expandido

- Y cuyo espectro es:

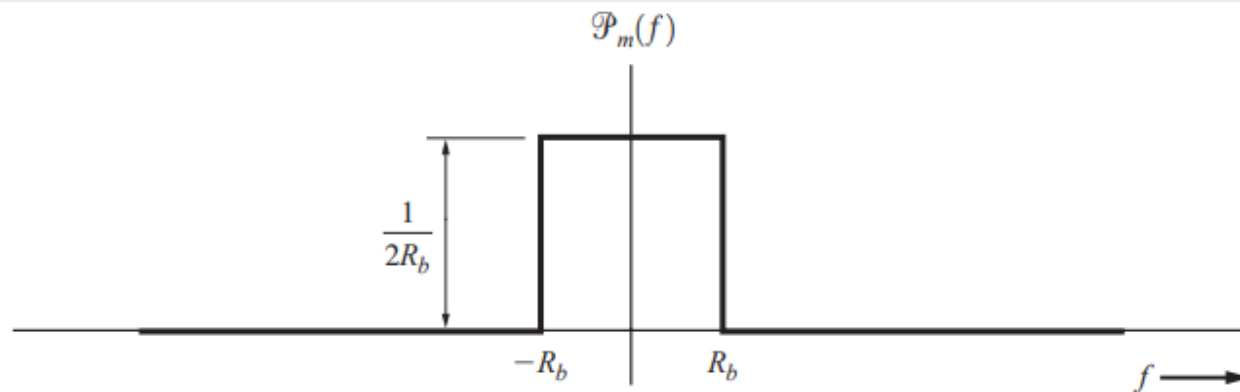


Espectro Expandido

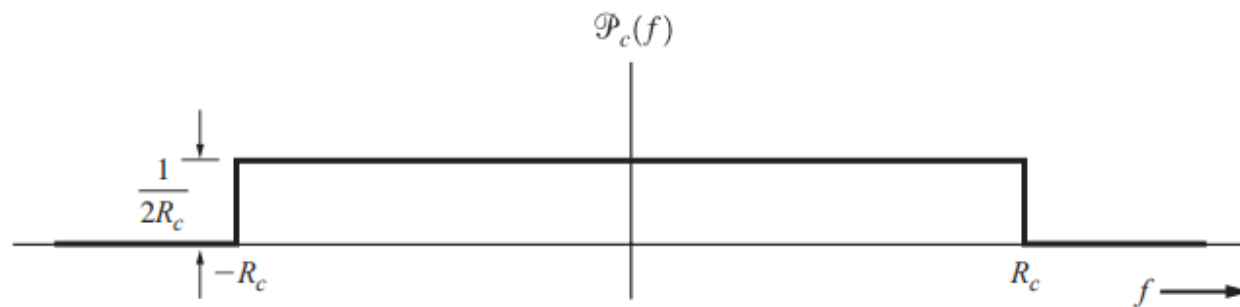
- ¿Qué tanto se expande el ancho de banda?
- El ancho de banda expandido es debido a la secuencia de pseudoruido y no a la señal envolvente.
- Al ser ambas señales rectangulares, $m(t)$ y $c(t)$ tienen el mismo tipo de espectro, $\text{sinc}(x)^2$, donde el ancho de banda de $c(t)$ es mucho mayor que $m(t)$.
- Esto es, el rate de chips $R_c=1/T_c$ es mucho mayor que el rate de bits $R_b=1/T_b$.
- Sabemos que el producto en el tiempo resulta una convolución en frecuencia:

$$P_g(f) = A_c^2 P_m(f) * P_c(f)$$

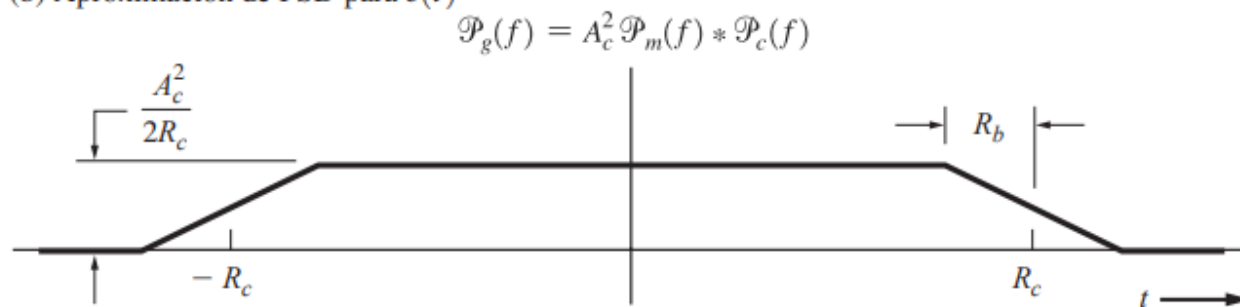
Espectro Expandido



(a) Aproximación de PSD para $m(t)$



(b) Aproximación de PSD para $c(t)$



(c) Aproximación de PSD para la envolvente compleja de la señal SS

Aproximación de PSD de la señal BPSK-DS-SS.

Espectro Expandido

- Por ejemplo, si $R_b=9.6\text{Kbps}$ y $R_c=9.6\text{Mchips/s}$, el ancho de banda será B_T aproximadamente $2R_c=19.2\text{MHz}$.
- Otra ventaja es la inmunidad a la interferencia.
- Si vemos las amplitudes normalizadas, para la señal original es:

$$\frac{A_c^2}{2R_b}$$

- Pero si la expandimos, la amplitud queda en

$$\frac{A_c^2}{2R_c}$$

- Teniendo una reducción de R_c/R_b .

Espectro Expandido

- Por ejemplo, si $R_b=9.6\text{Kbps}$ y $R_c=9.6\text{Mchips/s}$, la reducción será de 1000 veces, o 30dB.
- Notablemente, la señal modulada va a estar por debajo del nivel del ruido, haciendo imposible su detección con un analizador de espectro.
- Es el espectro expandido inmune a la interferencia?
- Supongamos que el enemigo interfiere nuestra señal con una señal de banda angosta senoidal:

$$r(t) = s(t) + n(t) = A_c m(t) c(t) \cos w_c t + n_J(t)$$

Espectro Expandido

- Y nuestra señal interferente es:

$$n_J(t) = A_J \cos w_c t$$

- Suponemos que la señal interferente está configurada para el máximo de daño,

$$\frac{A_J^2}{2}$$

- Relativa a la potencia de la señal

$$\frac{A_C^2}{2}$$

Espectro Expandido

- En el de-expansor (despreader) tenemos a la salida:

$$v_2(t) = A_c m(t) + n_2(t)$$

- Donde n_2 es:

$$n_2(t) = A_J c(t)$$

- Y el resto de los términos en $2f_c$ no pasan por el filtro pasabajos.
- La potencia a la salida del receptor va a ser:

$$P_{n3} = \int_{-R_b}^{R_b} P_{n2}(f) df = \int_{-R_b}^{R_b} A_J^2 \frac{1}{2 R_c} df = \frac{A_J^2}{R_c / R_b}$$

Espectro Expandido

- Para un sistema convencional, la interferencia arruinaría completamente la señal, y

$$n_2 = A_J$$

- Mientras que la potencia sería A_J^2 en lugar de

$$\frac{A_J^2}{R_c/R_b}$$

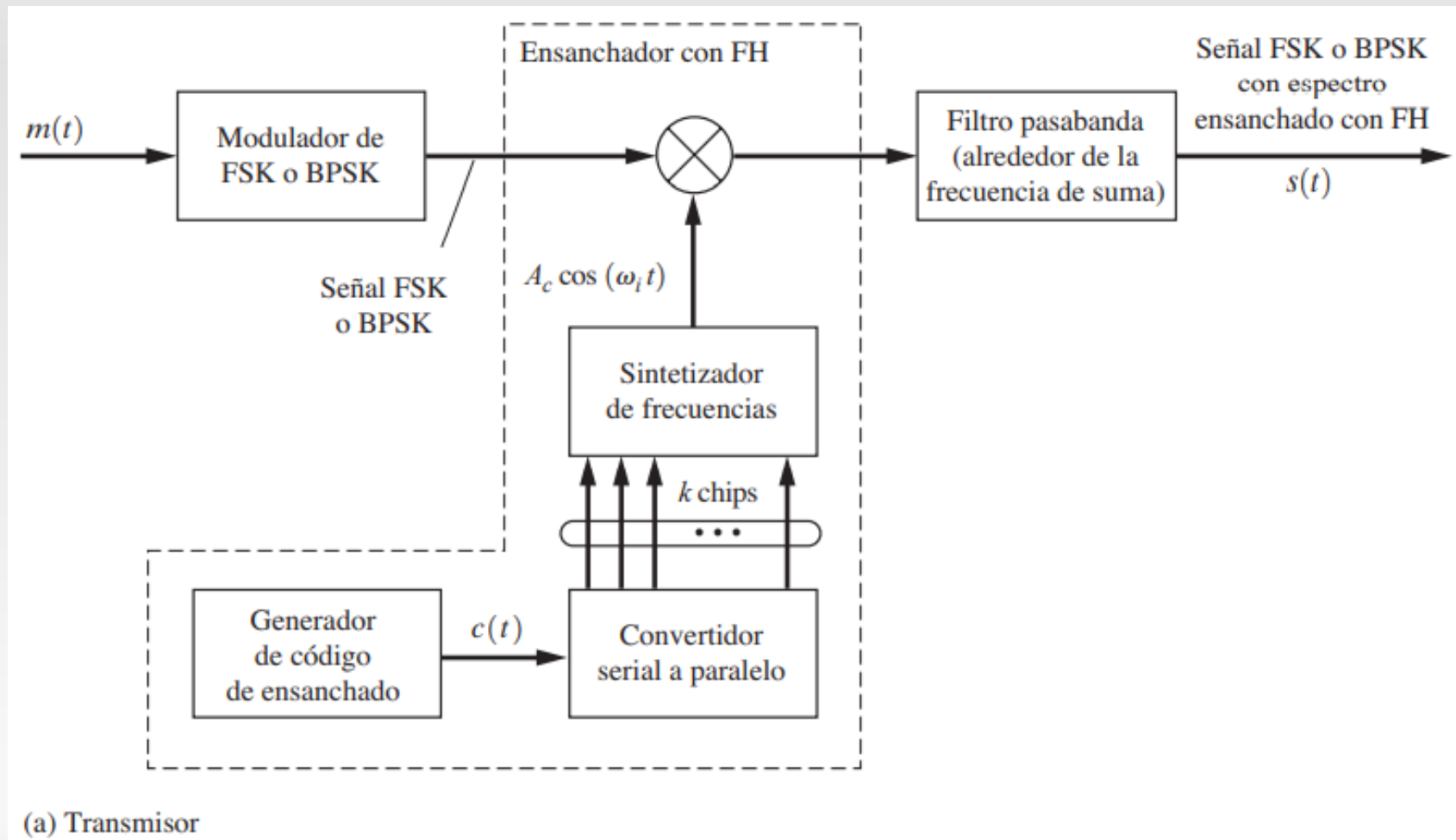
- Llamado ganancia de procesamiento del Spread Spectrum.
- Si tenemos otra vez, $R_b=9.6\text{Kbps}$ y $R_c=9.6\text{Mchips/s}$, la ganancia de procesamiento será de 1000 veces, o 30dB.
- Lo que indica que el enemigo tendrá que poner una potencia 30dB mayor de interferencia para arruinar la señal

Espectro Expandido

- Las técnicas de Spread Spectrum permiten también utilizar la misma banda con múltiples usuarios teniendo mínima interferencia, usando CDMA.
- Esto supone que cada usuario tiene asignado un código de expansión distinto y ortogonal, de tal manera de que la correlación sea nula
- La otra técnica de Spread Spectrum se denomina Frequency Hopping (salto de frecuencia) y logra la expansión alterando constantemente la frecuencia de la portadora.

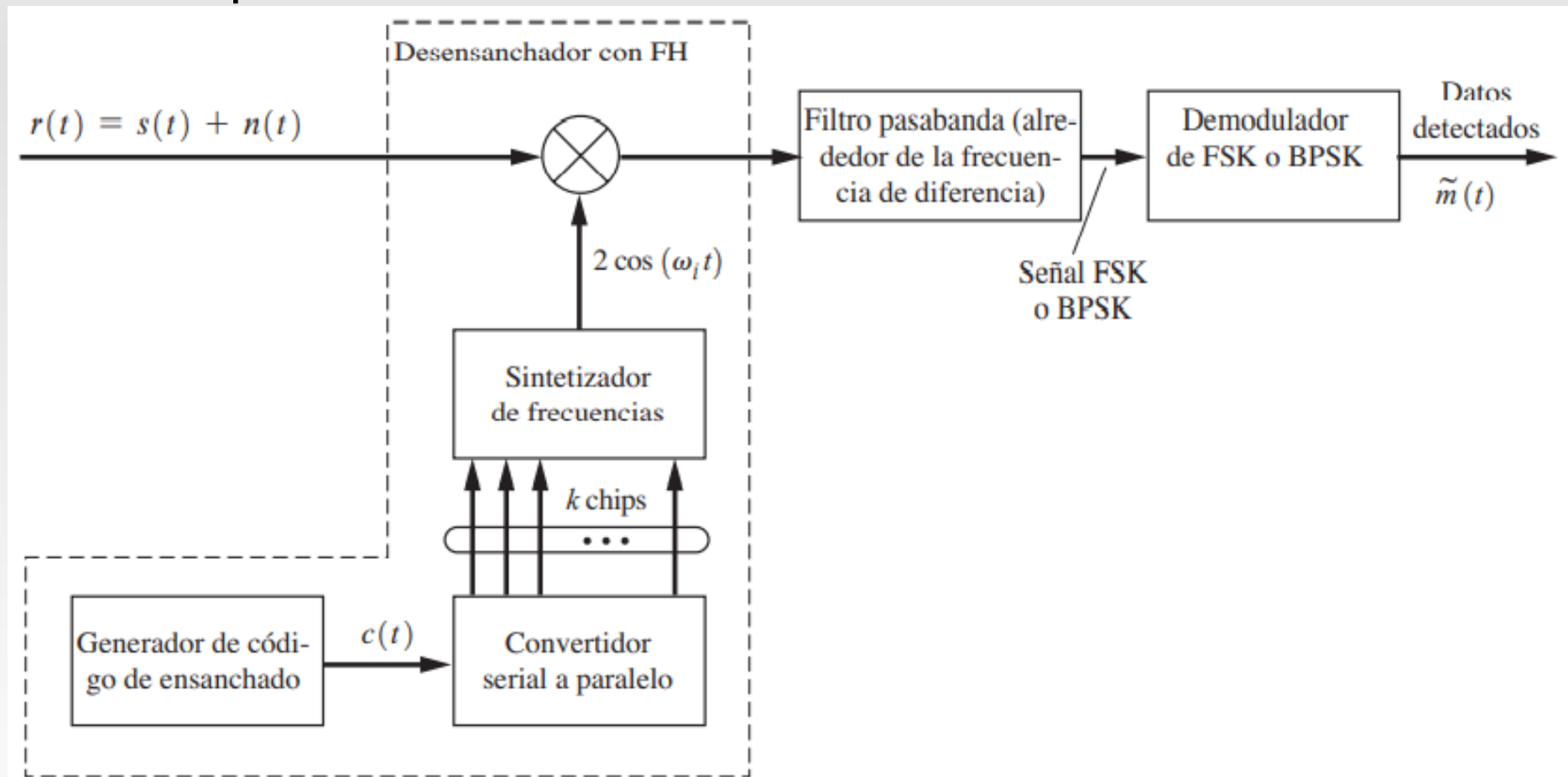
Espectro Expandido

- El transmisor FH:



Espectro Expandido

- El receptor FH:



(b) Receptor