

Espectro expandido

- 9.1. El concepto de espectro expandido**
- 9.2. Espectro expandido por salto de frecuencias**
 - Esquema básico
 - FHSS usando MFSK
 - Análisis de prestaciones de FHSS
- 9.3. Espectro expandido de secuencia directa**
 - DSSS usando BPSK
 - Análisis de prestaciones de DSSS
- 9.4. Acceso múltiple por división de código**
 - Principios básicos
 - CDMA para espectro expandido de secuencia directa
- 9.5. Lecturas recomendadas**
- 9.6. Términos clave, cuestiones de repaso y ejercicios**
 - Términos clave
 - Cuestiones de repaso
 - Ejercicios



CUESTIONES BÁSICAS

- La técnica de espectro expandido constituye una forma de codificación cada vez más importante en comunicaciones inalámbricas. El empleo de este esquema dificulta las interferencias y la interceptación, al tiempo que mejora la recepción.
- La idea básica del esquema de espectro expandido es la modulación de la señal, de modo que se incremente de manera significativa el ancho de banda (expansión del espectro) de la señal a transmitir.
- La técnica de **espectro expandido por salto de frecuencias** es una variante en la que la señal se transmite sobre una serie aparentemente aleatoria de radiofrecuencias, saltando de frecuencia en frecuencia en intervalos temporales fijos.
- La técnica de **espectro expandido de secuencia directa** es una variante en la que cada bit de la señal original se representa mediante varios bits en la señal transmitida, a través del empleo de un código de expansión.
- El **acceso múltiple por división de código** aprovecha la naturaleza de la transmisión de espectro expandido para posibilitar a varios usuarios utilizar de forma independiente el mismo ancho de banda con muy pocas interferencias.



El esquema de espectro expandido constituye una forma de codificación cada vez más importante en comunicaciones inalámbricas. Esta técnica no se puede encuadrar dentro de las categorías definidas en el Capítulo 5, puesto que puede utilizarse para transmitir tanto datos analógicos como digitales, haciendo uso de una señal analógica.

La técnica de espectro expandido fue originalmente desarrollada con objetivos militares y de inteligencia. La idea esencial subyacente en este tipo de esquema es la expansión de la señal de información en un ancho de banda superior con objeto de dificultar las interferencias y la interceptación. La primera variante de espectro expandido desarrollada fue la denominada por salto de frecuencias¹. Una forma más reciente de espectro expandido es la de secuencia directa. Ambas variantes se utilizan en numerosos estándares y productos en comunicaciones inalámbricas.

Tras una breve discusión, se examinarán ambos tipos de esquemas de espectro expandido. Seguidamente se estudiará una técnica de acceso múltiple basada en el esquema de espectro expandido.

9.1. EL CONCEPTO DE ESPECTRO EXPANDIDO

La Figura 9.1 destaca las características principales de un sistema de espectro expandido. La entrada va a un codificador de canal que produce una señal analógica con un ancho de banda relativamente estrecho centrado en una frecuencia dada. Esta señal se modula posteriormente haciendo uso de una secuencia de dígitos conocida como código o secuencia de expansión. Generalmente, aunque no siempre, el código expansor se genera mediante un generador de pseudoruido o números pseudoaleatorios. El efecto de esta modulación es un incremento significativo en el ancho de banda

¹ Por increíble que pueda parecer, la técnica de espectro expandido (por salto de frecuencias) fue inventada por la estrella de Hollywood Hedy Lamarr en 1940, a los 26 años de edad. Ella, junto con un socio, consiguieron una patente en 1942 («U.S. patent 2.292.387», el 11 de agosto de 1942). Lamarr consideró que ésa iba a ser su contribución a la causa de la guerra, no obteniendo nunca beneficios por su invención.

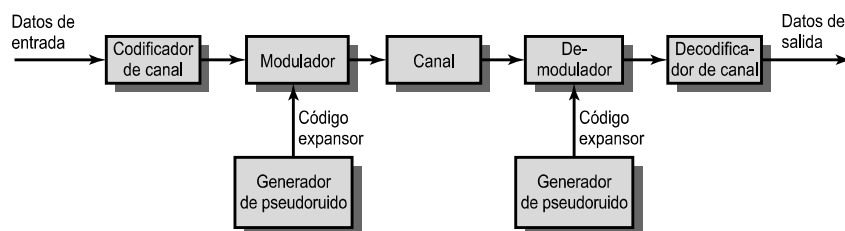


Figura 9.1. Modelo general de un sistema de comunicación digital de espectro expandido.

(expansión del espectro) de la señal a transmitir. El extremo receptor usa la misma secuencia pseudoaleatoria para demodular la señal de espectro expandido. Finalmente, la señal pasa a un decodificador de señal a fin de recuperar los datos.

A través de este aparente desaprovechamiento de espectro se consigue:

- Más inmunidad ante diversos tipos de ruido y distorsión multirayectoria. Las primeras aplicaciones del esquema de espectro expandido eran militares, donde se usaba por su inmunidad a interferencias.
- También puede utilizarse para ocultar y cifrar señales. Sólo un usuario que conozca el código expensor podrá recuperar la información codificada.
- Varios usuarios independientes pueden utilizar el mismo ancho de banda con muy pocas interferencias entre sí. Esta propiedad es usada en aplicaciones de telefonía celular a través del empleo de una técnica conocida como multiplexación por división de código (CDM, *Code Division Multiplexing*) o acceso múltiple por división de código (CDMA, *Code Division Multiple Access*).

Se impone un comentario acerca de los números pseudoaleatorios. Estos números son generados por un algoritmo que utiliza un valor inicial llamado semilla. El algoritmo es determinista y, por tanto, genera secuencias de números que no son estadísticamente aleatorios; sin embargo, si el algoritmo es adecuado, dichas secuencias pueden superar diversos tests de aleatoriedad. Estos números se denominan a veces pseudoaleatorios² y su principal característica radica en el hecho de que, a menos que se conozca el algoritmo y la semilla, es prácticamente imposible predecir la secuencia correspondiente. Por tanto, sólo un receptor que comparta esta información con el emisor está capacitado para decodificar correctamente la señal.

9.2. ESPECTRO EXPANDIDO POR SALTO DE FRECUENCIAS

En el esquema de espectro expandido por salto de frecuencias (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*), la señal se emite sobre una serie de radiofrecuencias aparentemente aleatoria, saltando de frecuencia en frecuencia en intervalos fijos de tiempo. El receptor captará el mensaje saltando de frecuencia en frecuencia sincronamente con el transmisor. Por su parte, los receptores no autorizados escucharán una señal ininteligible. Si se intentase interceptar la señal, sólo se conseguiría para unos pocos bits.

² Véase [STAL02] para un estudio más detallado acerca de números pseudoaleatorios.

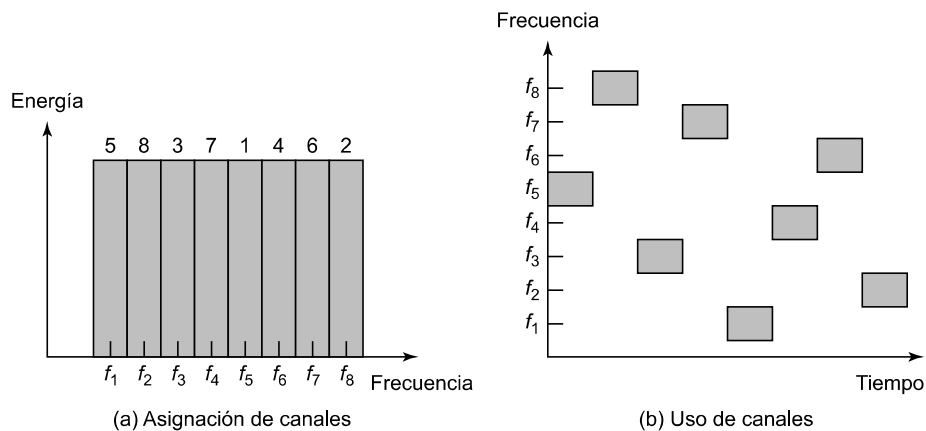


Figura 9.2. Ejemplo de salto de frecuencias.

ESQUEMA BÁSICO

El diagrama típico de un sistema basado en salto de frecuencias se muestra en la Figura 9.2. Se reservan varios canales para la señal FH, existiendo por lo general 2^k frecuencias portadoras que dan lugar a 2^k canales. El espaciado entre frecuencias portadoras y, por tanto, el ancho de banda de cada canal, se corresponde generalmente con el de la señal de entrada. El emisor opera en un canal durante un intervalo fijo (por ejemplo, el estándar IEEE 802.11 considera un intervalo de 300 ms). Durante este intervalo se transmiten varios bits (posiblemente correspondientes a una fracción de un bit, como veremos más adelante) haciendo uso de algún esquema de codificación. La secuencia de canales queda especificada por un código expensor, utilizando el emisor y el receptor el mismo a fin de sincronizar la secuencia de canales seguida.

En la Figura 9.3 se muestra un diagrama de bloques típico correspondiente a un sistema basado en salto de frecuencias. En la transmisión, los datos binarios constituyen la entrada de un modulador que usa algún tipo de esquema de codificación digital a analógico, como por ejemplo desplazamiento en frecuencias (FSK, *Frequency Shift Keying*) o desplazamiento en fase binario (BPSK, *Binary Phase Shift Keying*). La señal resultante estará centrada en torno a una frecuencia base. Se utiliza un generador de números pseudoaleatorios o pseudoruido (PN, *pseudonoise*) que servirá como puntero en una tabla de frecuencias; éste es el código expensor referido anteriormente. Cada k bits del generador PN especifican una de las 2^k frecuencias portadoras, seleccionándose una nueva frecuencia en cada intervalo sucesivo (cada k bits PN). Esta frecuencia es modulada por la señal generada en el modulador inicial, dando lugar a una nueva señal con la misma forma pero ahora centrada en torno a la frecuencia elegida. En el receptor, la señal de espectro expandido se demodula haciendo uso de la misma secuencia de frecuencias derivadas de PN y, posteriormente, se demodula la señal resultante para producir los datos de salida.

La Figura 9.3 indica que las dos señales se multiplican. Veamos un ejemplo de funcionamiento haciendo uso del esquema de modulación BFSK. Podemos definir la entrada FSK al sistema FHSS [compárese con la Ecuación (5.3)] como:

$$s_d(t) = A \cos(2\pi(f_0 + 0.5(b_i + 1)\Delta f)t) \quad \text{para} \quad iT < t < (i + 1)T$$

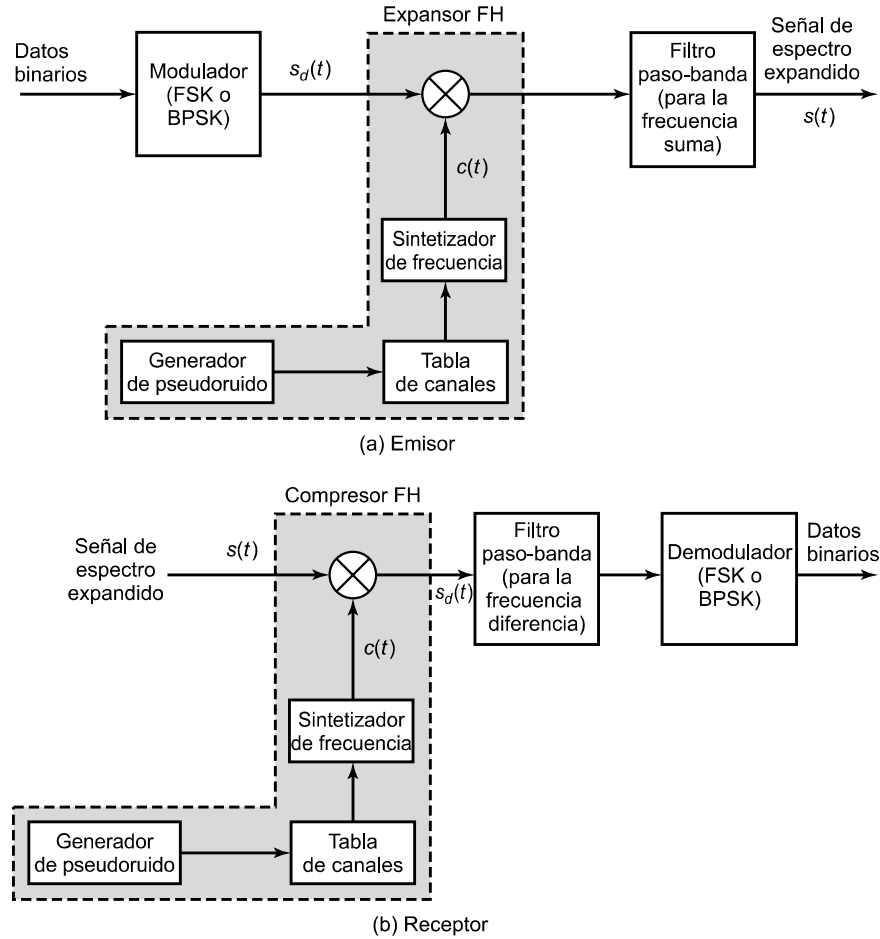


Figura 9.3. Sistema de espectro expandido por salto de frecuencias.

donde

A = amplitud de la señal.

f_0 = frecuencia base.

b_i = valor del i -ésimo bit de datos (+1 para el valor binario 1, -1 para el 0).

Δf = separación en frecuencia.

T = duración de bit; velocidad = $1/T$.

De este modo, durante el i -ésimo intervalo de bit, la frecuencia de la señal de datos es f_0 si el bit de datos es -1 y $f_0 + \Delta f$ si el bit de datos es +1.

El sintetizador de frecuencias genera un tono a frecuencia constante cuya frecuencia salta entre un conjunto de 2^k frecuencias posibles, estando determinado el patrón de salto por k bits de la secuencia PN. Por simplicidad, se supone que la duración de un salto es la misma que la de un bit y se ignoran diferencias de fase entre la señal de datos, $s_d(t)$, y la señal expandida, también llamada

señal de minibits («chips»), $c(t)$. Así, la señal producto durante el i -ésimo salto (durante el i -ésimo bit) es

$$p(t) = s_d(t)c(t) = A \cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f)t) \cos(2\pi f_i t)$$

donde f_i es la frecuencia de la señal generada por el sintetizador de frecuencias durante el i -ésimo salto. Haciendo uso de la identidad trigonométrica³ $\cos(x) \cos(y) = (1/2)(\cos(x+y) + \cos(x-y))$, tendremos

$$p(t) = 0,5A[\cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f + f_i)t) + \cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f - f_i)t)]$$

Se utiliza un filtro paso-banda (véase la Figura 9.3) para eliminar la frecuencia diferencia y preservar la frecuencia suma, dando lugar a una señal FHSS:

$$s(t) = 0,5A \cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f + f_i)t)$$

De este modo, durante el intervalo del bit i -ésimo la frecuencia de la señal de datos será $f_0 + f_i$ si el bit de datos es -1 y $f_0 + f_i + \Delta f$ si el bit de datos es $+1$.

En el receptor se recibirá una señal de la forma $s(t)$ definida previamente, la cual se multiplicará por una réplica de la señal expandida para obtener una señal producto de la forma

$$p(t) = s(t)c(t) = 0,5A \cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f + f_i)t) \cos(2\pi f_i t)$$

Recurriendo de nuevo a la identidad trigonométrica, tendremos

$$p(t) = s(t)c(t) = 0,25A[\cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f + f_i + f_i)t) + \cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f)t)]$$

Se usa un filtro paso-banda (véase la Figura 9.3) para eliminar la frecuencia suma y preservar la frecuencia diferencia, dando lugar a una señal de la forma $s_d(t)$ definida en la Ecuación (9.1):

$$0,25A \cos(2\pi(f_0 + 0,5(b_i + 1)\Delta f)t)$$

FHSS USANDO MFSK

Una técnica de modulación usual empleada en conjunción con FHSS es la llamada FSK múltiple (MFSK). Recuérdese del Capítulo 5 que MFSK utiliza $M = 2^L$ frecuencias diferentes para codificar L bits de entrada de una vez. La señal transmitida es de la forma (Ecuación 5.4):

$$s_i(t) = A \cos 2\pi f_i t, \quad 1 \leq i \leq M$$

donde

$$f_i = f_c + (2i - 1 - M)f_d$$

f_c = frecuencia portadora.

f_d = frecuencia diferencia.

M = número de elementos de señal distintos = 2^L .

L = número de bits por elemento de señal.

³ Véase el documento WilliamStallings.com/StudentSupport.html como resumen de las identidades trigonométricas.

Para FHSS, la señal MFSK se traslada a una nueva frecuencia cada T_c segundos mediante la modulación de la señal MFSK con la señal portadora FHSS. El efecto es la traslación de la señal MFSK al canal FHSS apropiado. Para una velocidad R , la duración de un bit es $T = 1/R$ segundos y la duración de un elemento de señal $T_s = LT$ segundos. Si T_c es mayor o igual que T_s , la modulación expandida se denomina espectro expandido por salto de frecuencias lento; en caso contrario, se denominará espectro expandido por salto de frecuencias rápido⁴. En resumen,

Espectro expandido por salto de frecuencias lento	$T_c \geq T_s$
Espectro expandido por salto de frecuencias rápido	$T_c < T_s$

En la Figura 9.4 se muestra un ejemplo de FHSS lento, haciendo uso del esquema MFSK de la Figura 5.9. Se tiene $M = 4$, lo que significa que se usan cuatro frecuencias distintas para codificar 2 bits de entrada a la vez. Cada elemento de señal es un tono de frecuencia discreto y el ancho de banda total MFSK es $W_d = Mf_d$. Se hace uso de un esquema FHSS con $k = 2$, es decir, existen $4 = 2^k$ canales diferentes, cada uno de ancho W_d . El ancho de banda total del esquema FHSS es $W_s = 2^k W_d$. Cada 2 bits de la secuencia PN se utilizan para elegir uno de los cuatro canales, ocupándose el canal en cuestión durante un intervalo de dos elementos de señal, o cuatro bits ($T_c = 2T_s = 4T$).

En la Figura 9.5 se muestra un ejemplo de FHSS rápido haciendo uso del mismo esquema MFSK. Como antes, $M = 4$ y $k = 2$. Sin embargo, en este caso, cada elemento de señal se representa mediante dos tonos de frecuencia. De nuevo, $W_d = Mf_d$ y $W_s = 2^k W_d$. En este ejemplo, $T_c = 2T_s = 2T$. En general, FHSS rápido presenta unas mejores prestaciones que FHSS lento frente al ruido o las interferencias. Por ejemplo, si se usasen tres o más frecuencias («chips») para cada elemento de señal, el receptor podría decidir que el elemento de señal enviado es aquel para el que se obtiene una mayor cantidad de minibits correctos.

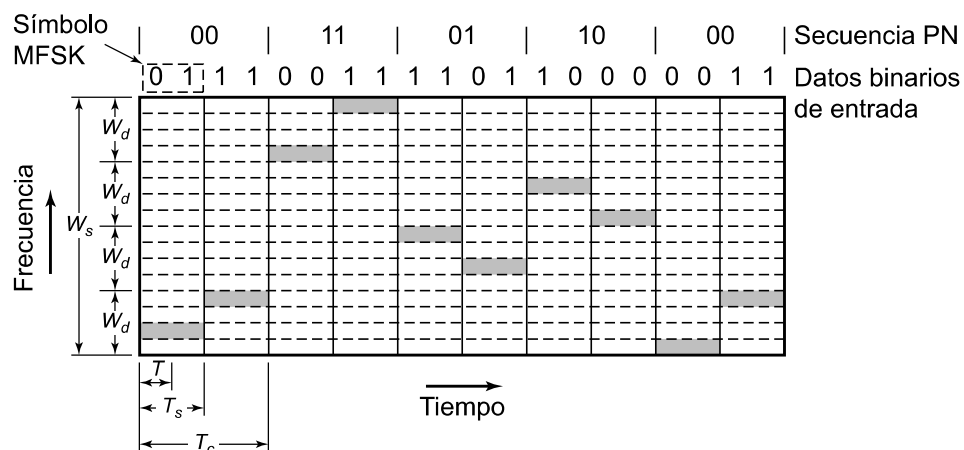


Figura 9.4. Espectro expandido por salto de frecuencias lento usando MFSK ($M = 4$, $k = 2$).

⁴ Algunos autores utilizan una definición ligeramente diferente (por ejemplo, [PICK82]): varios saltos por bit en el caso de salto de frecuencias rápido, varios bits por salto en el salto de frecuencias lento y un salto por bit en otro caso. La definición más usual, que nosotros emplearemos, relaciona saltos con elementos de la señal en lugar de con bits.

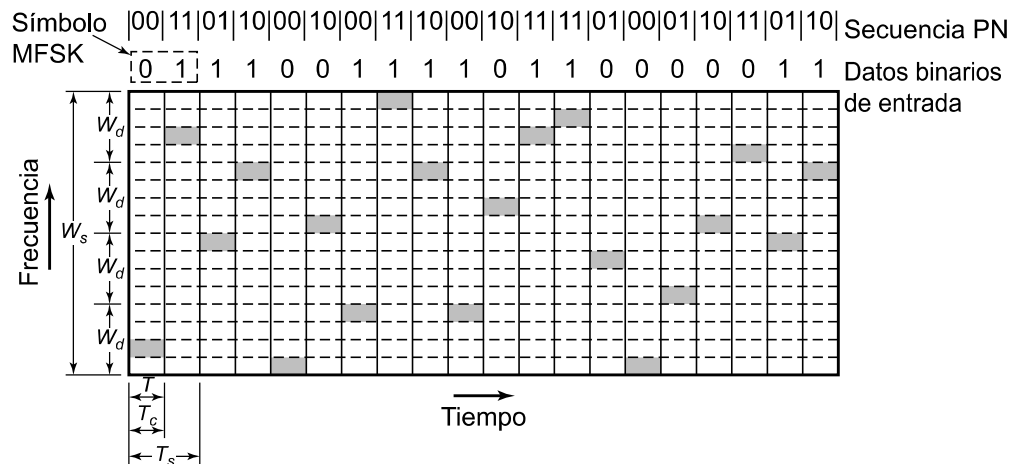


Figura 9.5. Espectro expandido por salto de frecuencias rápido usando MFSK ($M = 4$, $k = 2$).

ANÁLISIS DE PRESTACIONES DE FHSS

Por lo general se usa un gran número de frecuencias en FHSS, de modo que W_s es muy superior a W_d . Una ventaja de este hecho es que el uso de un valor de k elevado da lugar a sistemas altamente inmunes a interferencias. Por ejemplo, supongamos que tenemos un emisor MFSK con ancho de banda W_d e interferencias de ruido del mismo ancho de banda y potencia fija S_j sobre la frecuencia portadora de señal. Entonces, se tendrá una relación de energía de señal por bit frente a densidad de potencia del ruido por hercio de

$$\frac{E_b}{N_j} = \frac{E_b W_d}{S_j}$$

Si se usa el esquema de salto de frecuencias, la interferencia debe afectar a las 2^k frecuencias. Si la potencia es fija, esto reduce la potencia de la interferencia en cualquier banda de frecuencias a $S_j/2^k$. La ganancia en la relación señal-ruido, o ganancia de procesamiento, es

$$G_P = 2^k = \frac{W_s}{W_d}$$

9.3. ESPECTRO EXPANDIDO DE SECUENCIA DIRECTA

En el esquema de espectro expandido de secuencia directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*), cada bit de la señal original se representa mediante varios bits en la señal transmitida, haciendo uso de un código de expansión. Este código expande la señal sobre una banda de frecuencias más ancha de forma directamente proporcional al número de bits considerados. Es decir, un código de expansión de 10 bits expande la señal a una banda de frecuencias de anchura 10 veces mayor que un código de expansión de 1 bit.

Una técnica de espectro expandido de secuencia directa consiste en combinar la secuencia digital de entrada con el código expansor mediante la función or-exclusiva (XOR), la cual cumple las siguientes reglas:

$$0 \oplus 0 = 0 \quad 0 \oplus 1 = 1 \quad 1 \oplus 0 = 1 \quad 1 \oplus 1 = 0$$

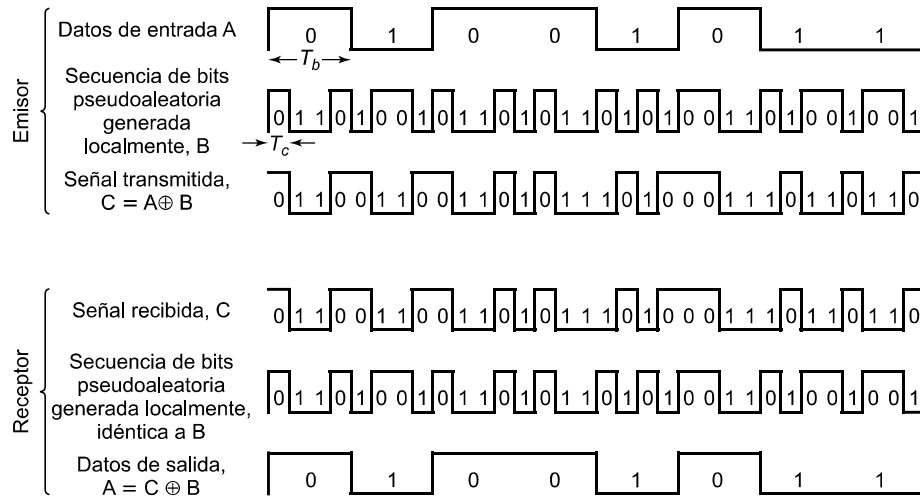


Figura 9.6. Ejemplo de espectro expandido de secuencia directa.

En la Figura 9.6 se muestra un ejemplo. Obsérvese que un bit 1 de información invierte los bits pseudoaleatorios, mientras que un bit de información igual a 0 hace que los bits pseudoaleatorios se transmitan sin ser invertidos. La cadena resultante tendrá la misma velocidad de transmisión que la secuencia original pseudoaleatoria, por lo que tendrá un ancho de banda mayor que la secuencia de información. En el ejemplo, el código de expansión tiene una frecuencia de reloj igual a cuatro veces la velocidad de la información.

DSSS USANDO BPSK

Para ver cómo funciona esta técnica en la práctica, supongamos que se emplea un esquema de modulación BPSK. En lugar de representar los datos binarios con 1 y 0, es más adecuado para nuestros fines utilizar +1 y -1 para representar los dos dígitos binarios. En tal caso, una señal BPSK se puede representar como se mostró en la Ecuación (5.6):

$$s_d(t) = A d(t) \cos(2\pi f_c t)$$

donde

A = amplitud de la señal.

f_c = frecuencia portadora.

$d(t)$ = función discreta que toma el valor +1 durante un intervalo de bit si el bit correspondiente de la secuencia es 1, y el valor -1 durante un intervalo de bit si el bit correspondiente de la secuencia es 0.

Para generar una señal DSSS, se multiplica la señal anterior por $c(t)$, la cual es una secuencia PN que toma los valores +1 y -1:

$$s(t) = A d(t)c(t) \cos(2\pi f_c t)$$

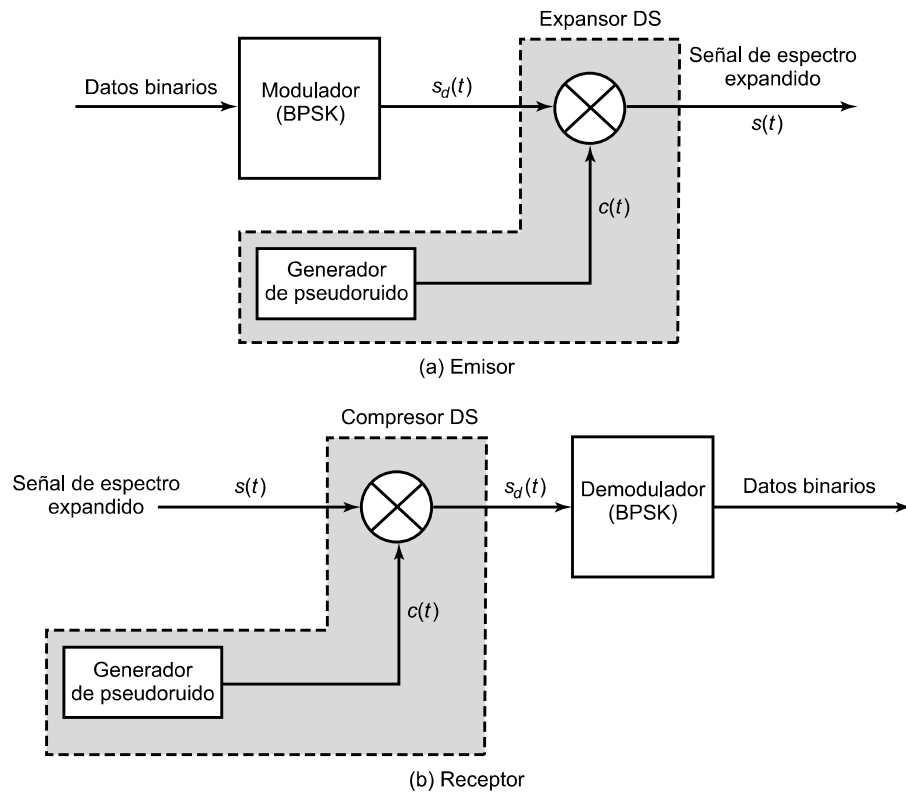


Figura 9.7. Sistema de espectro expandido de secuencia directa.

En el receptor, la señal entrante se multiplica de nuevo por $c(t)$. Dado que $c(t) \times c(t) = 1$, se consigue recuperar la señal original:

$$s(t)c(t) = A d(t)c(t)c(t) \cos(2\pi f_c t) = s_d(t)$$

La Ecuación (9.5) puede tener una doble interpretación, dando lugar a dos implementaciones distintas. La primera interpretación consiste en multiplicar $d(t)$ por $c(t)$ y después realizar una modulación BPSK. Ésta es la interpretación que aquí hemos presentado. Frente a ésta, en primer lugar se puede llevar a cabo una modulación BPSK sobre la secuencia de datos $d(t)$ para generar la señal de datos $s_d(t)$, señal que se multiplicará posteriormente por $c(t)$.

En la Figura 9.7 se muestra una implementación haciendo uso de la segunda interpretación. Por su parte, en la Figura 9.8 se ilustra un ejemplo de dicho esquema.

ANÁLISIS DE PRESTACIONES DE DSSS

La expansión del espectro conseguida mediante la técnica de secuencia directa se determina fácilmente (véase la Figura 9.9). En nuestro ejemplo, la señal de información tiene una anchura de bit igual a T , lo que equivale a una velocidad igual a $1/T$. En tal caso, el espectro de la señal, dependiendo de la técnica de codificación, es aproximadamente igual a $2/T$. De forma análoga, el espec-

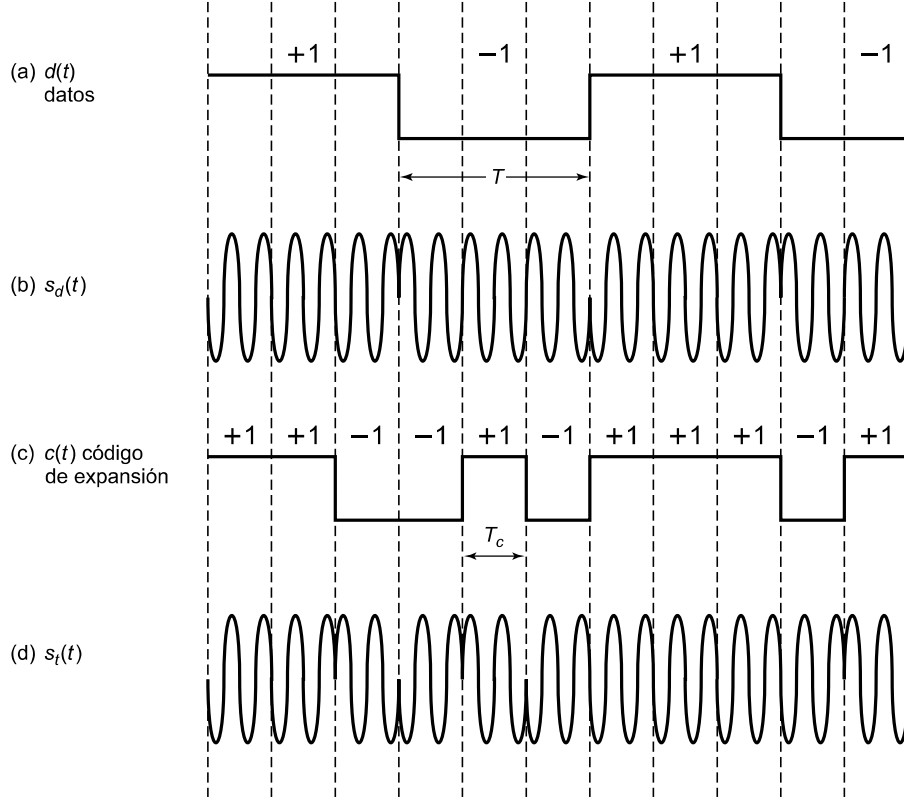


Figura 9.8. Ejemplo de espectro expandido de secuencia directa usando BPSK.

tro de la señal PN es $2/T_c$. La Figura 9.9c muestra la expansión resultante para el espectro, expansión obtenida como resultado directo de la velocidad de la secuencia PN.

Como en el caso FHSS, se pueden estudiar las prestaciones de DSSS en base a su efectividad frente a las interferencias. Supóngase una señal de interferencia sencilla en la frecuencia central del sistema DSSS. Dicha señal de interferencia tiene la forma

$$s_j(t) = \sqrt{2S_j} \cos(2\pi f_c t)$$

y la señal recibida es

$$s_r(t) = s(t) + s_j(t) + n(t)$$

donde

$s(t)$ = señal transmitida.

$s_j(t)$ = señal de interferencia.

$n(t)$ = ruido blanco aditivo.

S_j = potencia de la señal interferente.

El compresor en el receptor multiplica $s_r(t)$ por $c(t)$, de modo que la componente de señal debida a la señal de interferencia es

$$y_j(t) = \sqrt{2S_j} c(t) \cos(2\pi f_c t)$$

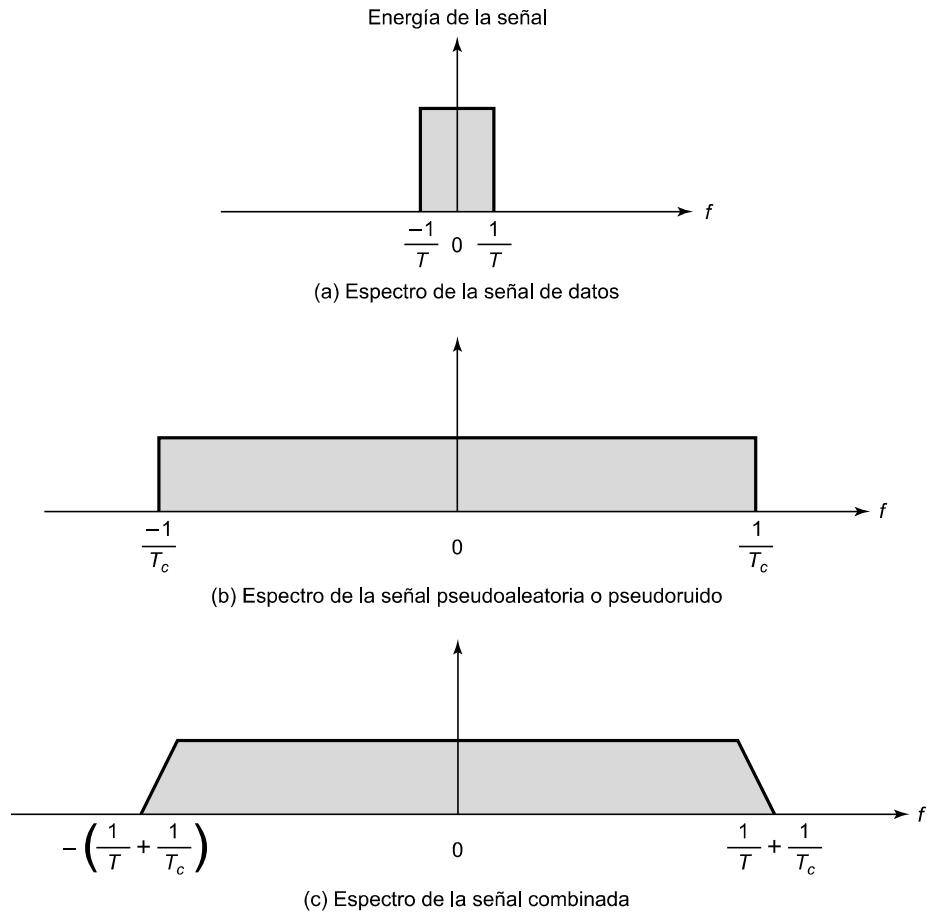


Figura 9.9. Espectro aproximado de una señal de espectro expandido de secuencia directa.

Esto no es más que una modulación BPSK del tono portador. Así, la potencia portadora S_j se expande sobre un ancho de banda de, aproximadamente, $2/T_c$. Sin embargo, el modulador BPSK (véase Figura 9.7) que sigue al compresor DSSS incluye un filtro paso-banda destinado a los datos BPSK, con ancho de banda $2/T$. De este modo, la mayor parte de la potencia de la interferencia queda filtrada. Aunque intervienen varios factores, podemos decir que, aproximadamente, la potencia de la interferencia que pasa el filtro es

$$S_{jF} = S_j(2/T)/(2/T_c) = S_j(T_c/T)$$

La potencia interferente queda reducida en un factor (T_c/T) gracias al empleo del esquema de espectro expandido. El inverso de este factor es la ganancia en la relación señal-ruido:

$$G_p = \frac{T}{T_c} = \frac{R_c}{R} \approx \frac{W_s}{W_d}$$

donde R_c es la tasa de expansión de bit, R la velocidad de datos, W_d el ancho de banda de la señal y W_s el ancho de banda de la señal de espectro expandido. El resultado es similar al obtenido para FHSS [Ecuación (9.3)].

9.4. ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO

PRINCIPIOS BÁSICOS

CDMA es una técnica de multiplexación usada con el esquema de espectro expandido y que funciona como sigue. Supongamos una señal de datos de velocidad D , a la que llamaremos velocidad de bits. Se divide cada bit de la secuencia en k minibits («chips») de acuerdo a un patrón fijo específico para cada usuario, denominado código de usuario. El nuevo canal así obtenido tendrá una tasa de minibits igual a kD minibits/segundo. Para ilustrar esto, pensemos en un ejemplo⁵ sencillo con $k = 6$. Es sumamente simple caracterizar un código como una secuencia de valores 1 y -1. En la Figura 9.10 se muestran los códigos correspondientes a tres usuarios, A, B y C, cada uno de los cuales se está comunicando con la misma estación base receptora, R. Así, el código para el usuario A es $c_A = \langle 1, -1, -1, 1, -1, 1 \rangle$. De forma análoga, el usuario B tiene el código $c_B = \langle 1, 1, -1, 1, 1, -1 \rangle$, y el usuario C el código $c_C = \langle 1, 1, -1, 1, 1, -1 \rangle$.

Veamos la comunicación del usuario A con la estación base, de la cual se supone que conoce el código de A. Además, supondremos que la comunicación está siempre sincronizada, de modo que la estación base sabe cuándo se reciben datos. Si A desea enviar un bit 1, transmite su código como un patrón de minibits $\langle 1, -1, -1, 1, -1, 1 \rangle$. Si se envía un 0, A transmite el complemento (los valores 1 y -1 se invierten) de su código: $\langle -1, 1, 1, -1, 1, -1 \rangle$. El receptor en la estación base decodifica el patrón de minibits. En el caso que nos ocupa, el receptor R recibe un patrón de minibits $d = \langle d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6 \rangle$ y trata de comunicarse con un usuario u del que conoce su

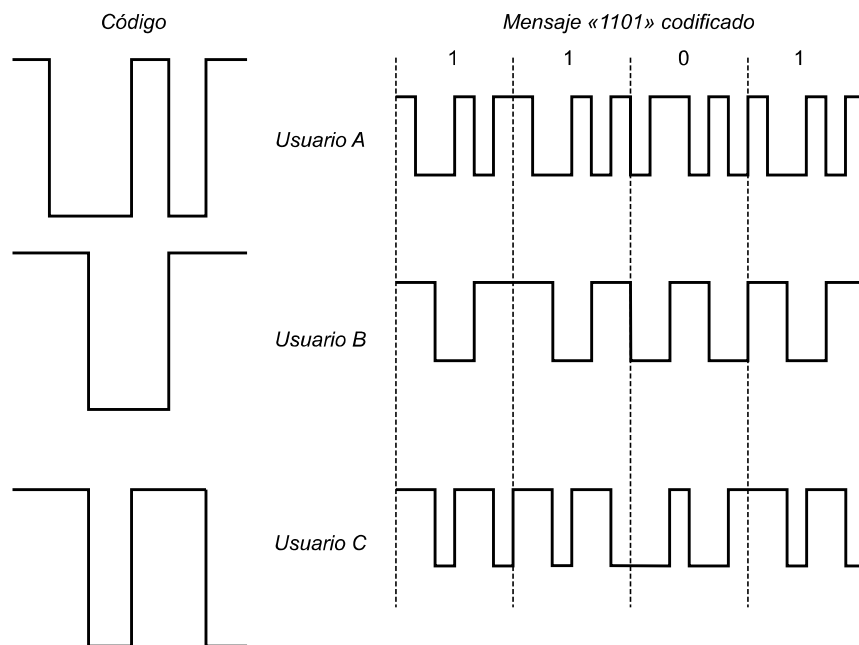


Figura 9.10. Ejemplo de CDMA.

⁵ Este ejemplo fue propuesto por el profesor Richard Van Slyke, de la Universidad Politécnica de Brooklyn.