

APÉNDICE A

Espectro disperso.

Con el paso de los años, las transmisiones por ondas de radio se han hecho cada vez más comunes por la gran cantidad de ventajas que proporcionan, sin embargo, el congestionamiento del espectro debido a los límites finitos que este presenta, obligan al humano a encontrar nuevas técnicas de modulación que faciliten la coexistencia de las señales dentro de un ancho de banda determinado.

Como en muchas de las tecnologías que usamos hoy, el espectro disperso (SS, *spread spectrum*), fue desarrollado por los militares después de la segunda guerra mundial. El objetivo principal era encontrar una técnica de comunicación que fuera inmune a las perturbaciones y que tuviera baja probabilidad de ser interceptada o detectada. Es a mediados de los años 80's que la FCC (Federal Communications Commission) autorizó el uso del espectro disperso en aplicaciones civiles y su uso se está popularizando debido a las ventajas que proporciona. En la actualidad se permite la operación sin licencia en las bandas de 902 MHz a 928 MHz, 2.4 GHz a 2.483 GHz y 5.725 GHz a 5.85 GHz con 1 Watt de potencia.

En México, la norma NOM-EM-121-SCT1-1994 es la que asigna estas bandas de operación: 902-928, 2450-2483.5 y 5727-5850 MHz y clasifica los sistemas de radios de espectro disperso según su alcance en:

- Área local
- Área restringida
- Enlaces de cobertura amplia

Cabe mencionar que en los sistemas de área restringida y los de cobertura amplia, la banda inferior es de 902-907.2 MHz y 922.8-928 MHz en lugar de 902-928 MHz de los sistemas de área local. Esto se debe a que en México la banda de 902-928 MHz se usa para la transmisión fija de datos y el servicio de radiolocalización para redes meteorológicas.

Además, en otros países se usa la banda de 2400-2500 MHz mientras que en México se autorizó únicamente la banda de 2450-2483.5 MHz debido a que en la banda de 2300-2450 MHz operan sistemas punto-multipunto de telefonía rural y en el resto operan equipos de transmisión de datos en áreas urbanas¹.

SISTEMAS DE ESPECTRO DISPERSO

El ancho de banda y la potencia son recursos primarios de comunicación y por lo tanto deben ser usados con cuidado al momento de diseñar sistemas de comunicación. Sin embargo, hay situaciones en las que es necesario sacrificar el uso eficiente de estos dos recursos para alcanzar ciertos objetivos de diseño, por ejemplo, para que el sistema provea comunicación segura en un ambiente hostil.

Los esquemas regulares de modulación tienden a usar completamente una sola banda de frecuencias. El ruido en esa banda degradará la señal y es por lo tanto vulnerable tanto al *jamming* (señal intencional que se genera con el propósito de alterar la comunicación de un dispositivo) como a la interferencia no intencional.

¹ “Radios de espectro disperso –comunicaciones para todos-“ CACERES Juan Carlos, 1999.

Apéndice A

Espectro disperso.

Esta sola frecuencia también permite el rastreo hecho por gente indeseable que puede rastrear la señal con técnicas de encuentro de dirección (DF, *direction-finding*). El espectro disperso soluciona estos problemas expandiendo el espectro de forma intencional para que la información ocupe un ancho de banda mucho mayor que el necesario para transmitir la información y por lo tanto disminuya la densidad espectral provocando que la señal tenga apariencia de ruido para cualquiera que esté escuchando el canal protegiendo de esta forma al sistema de fuentes perturbadoras y evitando el jamming.

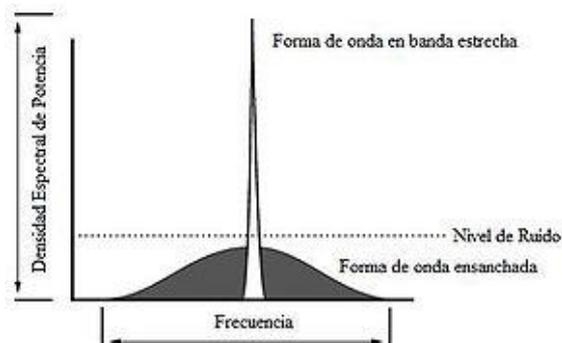


Imagen tomada de http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_ensanchado

Para que un sistema sea considerado de espectro disperso, debe satisfacer dos criterios:

1. El ancho de banda de la señal transmitida, $s(t)$, necesita ser mucho más grande que el del mensaje, $m(t)$.
2. El ancho de banda relativamente grande de $s(t)$ debe ser causado por una señal de modulación independiente, $c(t)$, llamada señal de *chipping*, y esta señal debe ser conocida por el receptor para que este pueda detectar la señal del mensaje, $m(t)$ ².

Consecuentemente, la envolvente de la señal de espectro disperso es una función de $m(t)$ y $c(t)$. En la mayoría de los casos se usa una función producto:

$$g(t) = g_m(t)g_c(t)$$

La diferencia esencial entre un sistema de espectro disperso y uno cualquiera con portadora modulada, es una modulación adicional con un código pseudoaleatorio discreto con una alta tasa (R_c). La tasa de transferencia del código pseudoaleatorio $c(t)$ debe ser mucho mayor que la del mensaje R_m por dos o tres órdenes de magnitud.

La secuencia de *chipping* $c(t)$, como también se le conoce a este código pseudoaleatorio, debe tener baja correlación con sí misma, es decir que sólo se

² “Digital and analog communication systems”, COUCH Leon, Macmillan Publishing Co., EE. UU., 1993

Apéndice A

Espectro disperso.

parece consigo misma en un cierto instante, y debe ser completamente independiente de la señal del mensaje. Cuando se cumplen estos dos criterios, el espectro de la señal del mensaje modulado será incrementado (dispersado) en una cantidad dada por la relación

$$G = \frac{R_c}{R_m}$$

Donde G es llamada la *ganancia de procesamiento*. La señal de espectro disperso obtenida sólo puede ser correctamente demodulada si el receptor posee un circuito que use $c(t)$. Tras la recepción, el receptor puede determinar, después de reconocerla, que la transmisión está a punto de comenzar, y puede establecer una referencia precisa para la sincronización.

Las señales de espectro disperso tienen una serie de características que los diferencian de los sistemas de banda angosta.

Capacidad de múltiple acceso. Si múltiples usuarios intentan transmitir una señal de espectro disperso al mismo tiempo, el receptor podrá identificar y decodificar cada una de las señales ya que cada usuario está dotado de un código único que tiene una correlación suficientemente baja con los otros. Al correlacionar la señal recibida con el código del usuario, sólo se “desesparcirá” la señal de dicho usuario mientras que el resto de las señales permanecerán esparcidas en el espectro.

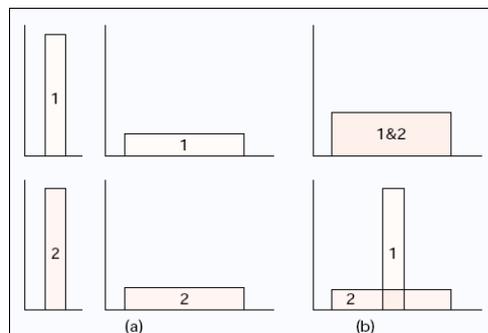


Imagen tomada de “An overview of CDMA evolution toward wideband CDMA”

En el inciso (a) de esta imagen podemos ver cómo dos dispositivos generan una señal de espectro disperso a partir de una señal de banda angosta. En el inciso (b) apreciamos que ambos dispositivos transmiten su señal de espectro disperso al mismo tiempo y en el receptor sólo la señal de 1 es “desesparcida” y se recupera la información.

Protección contra la interferencia multitrayecto. En un canal de radio, no hay sólo una ruta que puede seguir la señal desde su origen hasta su destino. Debido a las reflexiones (y refracciones) una señal puede ser recibida desde varias rutas diferentes. Las señales de los diferentes caminos son copias de la señal original transmitida pero con diferentes amplitudes, fases, retrasos y ángulos de arribo. La suma de estas señales puede ser constructiva en algunas frecuencias y destructiva

Apéndice A

Espectro disperso.

en otras. En el dominio del tiempo, esto resulta en una señal diseminada. Este problema puede solucionarse con la ayuda del espectro disperso.

Privacidad. La señal transmitida sólo puede ser “desesparcida” y los datos recuperados si el receptor conoce el código.

Rechazo a la interferencia. Cuando se opera la señal de banda angosta con la señal del código, se esparce la potencia de la señal de banda angosta y por lo tanto se reduce la interferencia de potencia en el ancho de banda de la información.

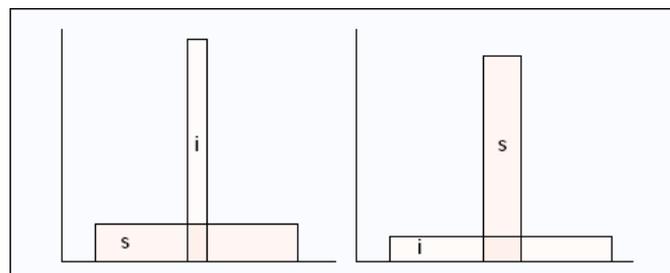


Imagen tomada de “An overview of CDMA evolution toward wideband CDMA”

En esta figura vemos cómo la señal de espectro disperso (*s*) recibe una interferencia de una señal de banda angosta (*i*). En el receptor, la señal se “desesparce” mientras que la señal interferente se esparce haciendo que parezca como ruido comparada con la señal “desesparcida”.

Baja probabilidad de interceptación. Debido a la baja densidad de potencia, las señales de espectro disperso son difíciles de detectar e interceptar por *hackers*.

En la siguiente imagen se presentan diagramas de bloques que explican la técnica que se utiliza para hacer una transmisión con espectro disperso.

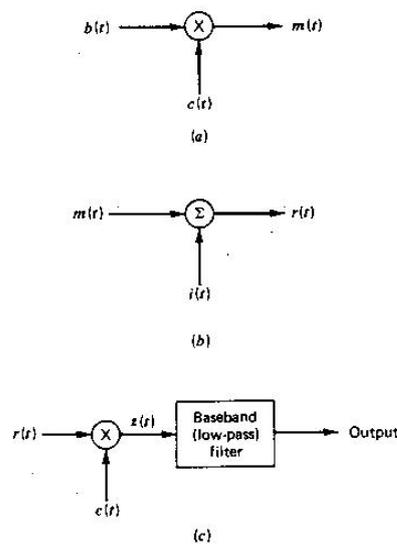


Imagen tomada de “Digital communications”.

Apéndice A

Espectro disperso.

Una secuencia de datos $b(t)$ se usa para modular una secuencia de pseudoruido $c(t)$ aplicando estas dos secuencias a un modulador de producto o multiplicador como se ve en el inciso (a). Para que esta operación funcione, ambas secuencias se presentan en su forma polar, esto es en términos iguales de amplitud y polaridad opuesta (-1, +1). Si la secuencia de datos $b(t)$ es de banda angosta y la secuencia $c(t)$ es de banda ancha, la señal resultante $m(t)$ tendrá un espectro muy parecido al de la secuencia de pseudoruido, es decir, la secuencia de pseudoruido funciona como el *código de dispersión*.

A esta señal además se le suma la interferencia $i(t)$ del ambiente obteniéndose una señal $r(t)$ que es la suma de la señal $m(t)$ con $i(t)$. Para recuperar la señal $b(t)$, la señal $r(t)$ se aplica a un demodulador que consiste en multiplicador que tiene un generador local que proporciona la misma secuencia pseudoaleatoria $c(t)$ que se usó en el transmisor y obtenemos una señal $z(t)$ que es el producto de $c(t)$ por $r(t)$.

Vemos entonces que la señal $b(t)$ es multiplicada dos veces por la señal $c(t)$ mientras que la interferencia sólo es operada una vez teniendo entonces una señal que contiene la señal de datos más la señal de interferencia esparcida debido a la multiplicación de esta señal con el código pseudoaleatorio.

Finalmente esta señal se pasa por un filtro paso banda que elimina la componente de interferencia y obtenemos solamente la señal de los datos $b(t)$ original enviada por el transmisor.

$$\begin{aligned}m(t) &= c(t)b(t) \\r(t) &= m(t) + i(t) \\r(t) &= c(t)b(t) + i(t) \\z(t) &= c(t)r(t) \\z(t) &= c^2(t)b(t) + c(t)i(t) \\c^2(t) &= 1 \\z(t) &= b(t) + c(t)i(t) \\Output &= b(t)\end{aligned}$$

La sincronización y la multiplicación apropiadas del código de dispersión, así como el conocimiento de este código en recepción, se llaman *contracción* y es una función crítica de los sistemas de espectro disperso. Es importante mencionar que la técnica de espectro disperso se establece en las normas actuales como la técnica que se debe usar para evitar que provoquen interferencias perjudiciales a equipos que operen en la misma banda de frecuencias

SECUENCIAS DE RUIDO FALSO (PN, *pseudo-noise*).

Ya se ha mencionado que los sistemas de espectro disperso son operados por una señal que tiene una baja auto correlación. Estas señales son conocidas

Apéndice A

Espectro disperso.

como secuencias de ruido falso ya que dan la apariencia de ser ruido para alguien que esté escuchando el canal y que no tenga conocimiento de dicha secuencia. Las secuencias de pseudoruido se distinguen de las verdaderamente aleatorias porque las primeras tienen cierta periodicidad dependiendo del número de etapas del generador que las crea.

Aunque podemos pensar en palabras de código que se almacenen en la memoria del transmisor y receptor, disponemos de sistemas lineales que son capaces de generar palabras de código con correlaciones muy buenas y que nos permiten ahorrar el espacio en la memoria que utilizarían dichas palabras de código. Estas palabras se producen con generadores de secuencia de registro de desplazamiento.

Un generador de secuencia de registro de desplazamiento consiste en un registro de n etapas con derivaciones en algunas de ellas y con la salida conectada a la lógica combinatoria que retroalimenta la entrada. En la figura se muestra el ejemplo de un generador de secuencia de registro de desplazamiento de tres etapas, en el que la entrada al registro es la suma módulo 2 (es decir, una suma binaria sin acarreo) del contenido de las etapas S_2 y S_3 y la salida se lee en el contenido de S_3 .

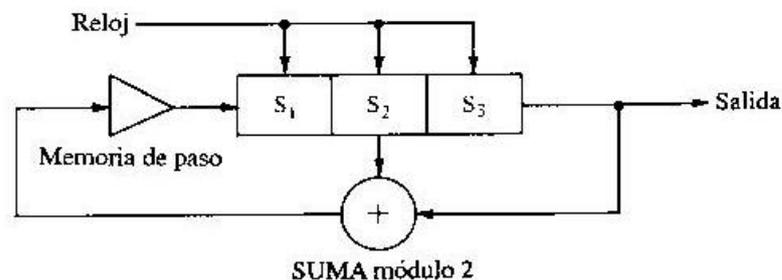


Imagen tomada de "Introducción a los sistemas de comunicación".

Supongamos que se asignan valores iniciales al generador de la figura cargando unos en todos los registros de desplazamiento. Las dos entradas a la operación SUMA módulo 2 son 1 y 1; el resultado, 0, se guarda en la memoria de paso. En el siguiente intervalo de reloj, el contenido de S_2 se transfiere a S_3 , el de S_1 a S_2 , y el contenido de la memoria de paso a S_1 . De nuevo, la operación SUMA módulo 2 da 0 y se guarda en la memoria de paso hasta el siguiente pulso de reloj. Continuando la secuencia, encontramos que los tres registros de desplazamiento tienen los siguientes contenidos:

111, 011, 001, 100, 010, 101, 110, 111, ...

Como este generador obtiene información únicamente de los tres bits más recientes, cuando se repita el estado inicial (para este caso 111), se repite el resto de la secuencia. La salida del generador se toma de contenido del último registro y a la salida obtenemos la palabra código

1 1 1 0 0 1 0 ...

Apéndice A

Espectro disperso.

Esta palabra es periódica con periodo de 7 bits.

Para alguien que conoce esta palabra o código, la información tiene coherencia, mientras que para alguien que la desconoce, ve la señal simplemente como enteramente aleatoria y por lo tanto como ruido. Es por eso que a estas secuencias se les conoce también como *pseudoaleatorias*.

Para que un sistema tenga la característica de ser pseudoaleatorio se deben mantener ciertos criterios de aleatoriedad pero comenzando siempre desde un valor inicial conocido y producirá los números aleatorios de una manera totalmente determinada y repetitiva.

Las propiedades enlistadas a continuación para toda secuencia pseudoaleatorias son generales y deseables para cualquier generador de secuencia pseudoaleatorias, independientemente de la aplicación que se le vaya a dar.

1. Los números producidos por un generador de secuencias aleatorias deben seguir la distribución uniforme, ya que los sucesos verdaderamente aleatorios siguen esta distribución.
2. Los números producidos deben ser estadísticamente independientes, es decir, el valor que tome un número en una secuencia aleatoria no debe afectar el valor del siguiente número. Este concepto se suele denominar *impredecibilidad* de las secuencias y se puede generalizar aún más, de forma que conocidos n números de la secuencia debe ser muy difícil (idealmente imposible) predecir el siguiente número ($n + 1$) con una probabilidad mayor que $\frac{1}{2}$.
3. Las secuencias de números pseudoaleatorias producidas deben ser fácilmente reproducibles.
4. La secuencia debe ser no repetitiva para una cierta longitud especificada de antemano.
5. La generación de números aleatorios debe ser rápida y eficiente.
6. El método empleado debe presentar la menor complejidad estructural posible.

La propiedad de ser fácilmente reproducibles es indispensable en los sistemas de comunicación ya que en un lado del sistema se usa para la codificación del mensaje y en el otro extremo la misma secuencia se usa para la decodificación.

Siguiendo con el caso que presentamos del generador de secuencia de tres etapas, a continuación presentamos la correlación de esta secuencia periódica con una réplica de 7 bits. Para el inciso (a) tenemos el caso binario encendido-apagado (0, 1) usando la operación NOR-EXCLUSIVO para la multiplicación y el esquema de correlación mostrado en el inciso (b) es para el caso binario polarizado (-1, +1). En cualquier caso, el máximo está dado por la energía normalizada (siete para este caso) con desplazamiento cero. La correlación decrece a un nivel plano para todos los demás desplazamientos hasta un periodo más adelante cuando se reinicia la

Apéndice A

Espectro disperso.

secuencia. Como resultado de esto, la densidad espectral de potencia se aproxima a una densidad espectral blanca a medida que aumenta la longitud de la secuencia.

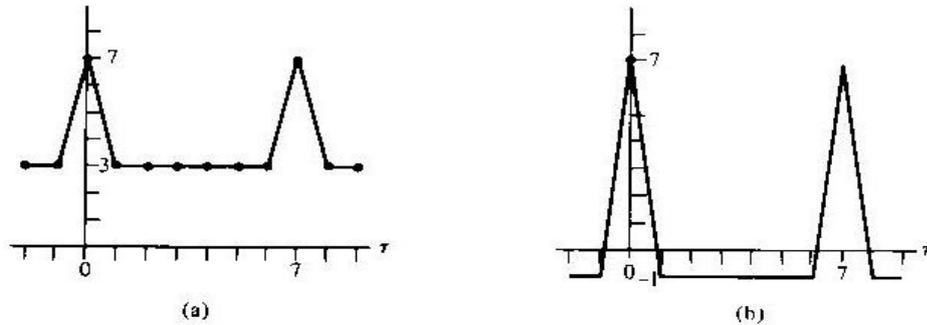


Imagen tomada de "Introducción a los sistemas de comunicación".

Los códigos de dispersión utilizados en sistemas de espectro disperso son principalmente secuencias de máxima longitud (*maximum-length sequence*), llamadas *secuencias-m* y *códigos Gold*. Los *códigos Gold* son una combinación de *códigos de máxima longitud* y fueron inventados en 1967 en la corporación Magnavox específicamente para aplicaciones CDMA de acceso múltiple.

Los *códigos de secuencia-m* son los más usados en sistemas que trabajan con espectro disperso. Pueden ser generados utilizando un sumador módulo-2 (una compuerta ex-OR) y una estación-*r* de cambio de registro serial. La máxima longitud está dada por

$$N = 2^r - 1$$

donde *N* es el número de chips de duración *T_c* antes de que la secuencia aleatoria se repita. Por lo tanto, la longitud del período del código *secuencia-m* en segundos está dada por

$$T_{DS} = NT_c$$

Para un sistema de espectro disperso de secuencia directa³.

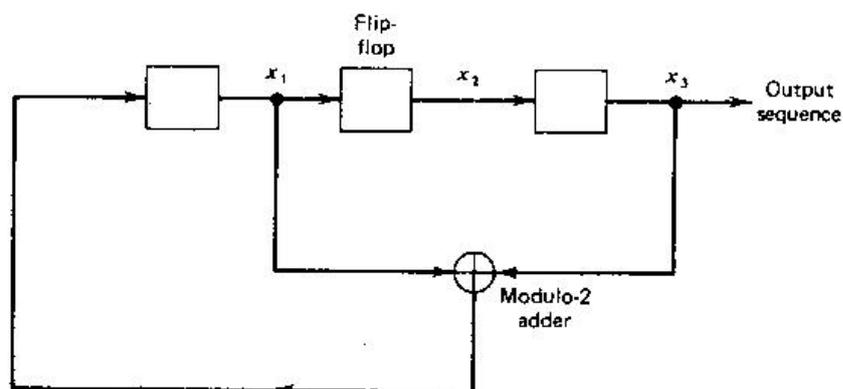


Imagen tomada de "Digital communications".

³ "Electronic communication techniques" YOUNG Paul, Macmillan Publishing Co., EE. UU., 1990

Apéndice A

Espectro disperso.

La figura nos muestra un generador de secuencia de máxima duración.

En la tabla que se presenta a continuación se dan conexiones apropiadas de retroalimentación para varios valores de registros n .

N	Longitud de la secuencia	Secuencia de salida
2	3	110
3	7	1110010
4	15	111100010011010
5	31	1111100110100100001010111011000

Propiedades de las secuencia de máxima duración.

Propiedad 1. En un período, el número de 1's es siempre uno más que el número de 0's.

Propiedad 2. El módulo 2 sumatorio de cualquier secuencia- m , cuando es sumado chip a chip con una versión alterada de la misma secuencia, produce otra versión alterada de la misma secuencia.

Propiedad 3. Si una ventana de ancho r (donde r es el número de etapas en el generador de cambio de registro) se desliza a lo largo de la secuencia durante N cambios, entonces todas las palabras posibles de r -bits aparecerán solamente una vez, excepto la palabra de r -bits de solo 0's.

Propiedad 4. Si los 0's y los 1's se representan con -1 volt y +1 volt, la secuencia de auto correlación puede expresarse de la siguiente manera

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

Donde $R_c(k) \cong \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{n=0}^{N-1} c_n c_{n+k}$ y $c_n = \pm 1$

La onda de forma de auto correlación, $c(t)$, denotada $R_c(\tau)$ es

$$R_c(\tau) = \left(1 - \frac{\tau_\varepsilon}{\tau_c}\right) R_c(k) + \frac{\tau_\varepsilon}{\tau_c} R_c(k+1)$$

Donde $R_c(\tau) = \langle c(t)c(t+\tau) \rangle$ y τ_ε está definida por

$$\tau = kT_c + \tau_\varepsilon \quad \text{y} \quad 0 \leq \tau_\varepsilon < T_c$$

Por lo tanto la primer fórmula se reduce a

$$R_c(\tau) = \left[\sum_{\ell=-\infty}^{\ell=\infty} \left(1 + \frac{1}{N}\right) \Lambda\left(\frac{\tau - \ell NT_c}{T_c}\right) \right] - \frac{1}{N}$$

Apéndice A

Espectro disperso.

Como la función de auto correlación es periódica, puede expresarse como una serie de Fourier⁴

$$R_c(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_n e^{j2\pi n f_0 \tau}$$

Donde $f_0 = \frac{1}{NT_c}$ y r_n es el conjunto de coeficientes de la serie de Fourier.

ESPECTRO DISPERSO DE SECUENCIA DIRECTA (DSSS, *direct sequence spread spectrum*).

Se usa en la transmisión de bits digitales y es el resultado de multiplicar la señal modulada del mensaje por una onda “dispersora” en un mezclador llamado correlator. La tasa del código de dispersión es $R_c = \frac{1}{T_c}$ donde T_c es la duración de un solo pulso ± 1 , llamado *chip* y que tiene una duración de 100 a 1000 veces menor que el bit del mensaje de datos. Dicho código de dispersión conocido también como *chipping sequence*, es una secuencia pseudoaleatoria, cuanto mayor sea esta secuencia mayor será la resistencia a las interferencias. Debido a la duración de los chips, el espectro transmitido será de 100 a 1000 veces mayor que el ancho de banda inicial de la portadora modulada de los datos por BPSK, QPSK o FSK y el mensaje queda fraccionado en pequeños pulsos cuya duración está directamente relacionada con la duración de los chips obteniéndose entonces un código de dispersión único. El receptor multiplica la señal de entrada por la misma secuencia de chipping para recuperar la señal digital original, es la característica de “pseudo” la que permite que la señal pueda ser recreada.

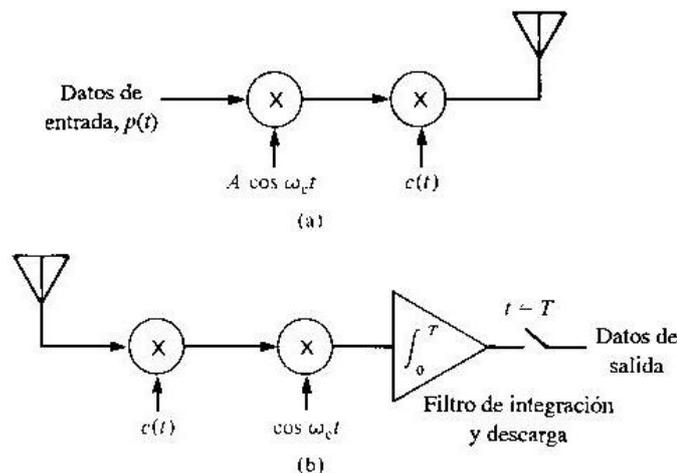


Imagen tomada de “Introducción a los sistemas de comunicación”.

En esta imagen vemos los bloques que se emplean para una transmisión de espectro disperso de secuencia directa. Para este caso se usa BPSK como modulación de expansión ya que la forma más simple de espectro disperso utiliza este tipo de modulación. $A \cos \omega_c t$ es una expresión para la señal BPSK y $c(t)$ es la señal de modulación expansora o secuencia de chipping. El inciso (a) representa la

⁴ “Digital and analog communication systems” COUCH Leon, Macmillan Publishing Co., EE. UU., 1993

Apéndice A

Espectro disperso.

modulación de la señal para ser después transmitida y el inciso (b) es la forma que toma el receptor del sistema.

Es común utilizar el mismo tipo de modulación digital de fase para los datos y para el código expensor. Cuando se utiliza BPSK para ambas modulaciones, se puede eliminar un modulador de fase (mezclador) y los datos binarios y el código expensor se pueden combinar utilizando una suma módulo 2 de los datos y el código expensor.

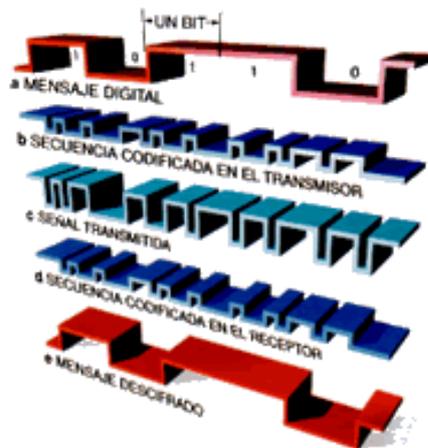
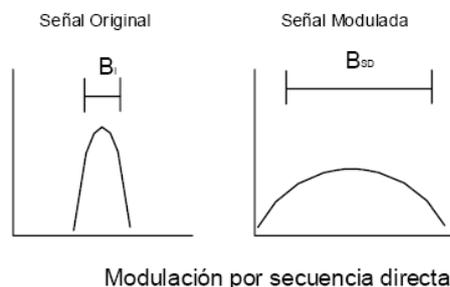


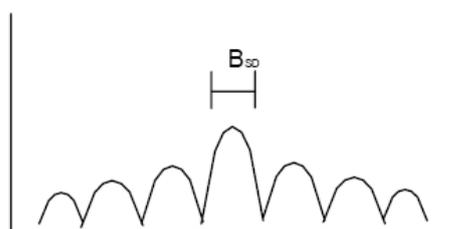
Imagen tomada de www.scinet-corp.com/asociados/index.htm?bbs_edr.htm~index2

Un mensaje digital de "10110" (a) se mezcla con una secuencia codificada (b). A continuación, la señal resultante (c) se transmite de modo tal, que cada bit del mensaje original se envía varias veces con una frecuencia distinta. Esta redundancia aumenta las posibilidades de que el mensaje pase incluso en zonas urbanas muy pobladas, donde las interferencias son un problema. Luego, el receptor emplea la misma secuencia codificada (d) para descifrar la transmisión y obtener el mensaje digital original (e).



Apéndice A

Espectro disperso.



Espectro de secuencia directa

Imágenes tomadas de “Radios de espectro disperso –comunicaciones para todos-“.

La modulación por espectro disperso usa un ancho de banda mayor que el requerido por esquemas de modulación tradicionales. Además de las ventajas ya mencionadas, hay otras que la han hecho muy útil para aplicaciones aparte de las militares donde el emisor no desea que sus transmisiones sean detectadas por otros ni que sufran efectos de *jamming*. El espectro disperso permite que muchos transmisores usen el mismo canal con muy poca interferencia.

La red resultante permite un manejo del canal más eficiente al soportar un mayor número de transmisiones. Las comunicaciones con espectro disperso están siendo introducidas a las bandas que ya están siendo “completamente” utilizadas por técnicas de comunicación convencionales con mínima interferencia. Otra ventaja es la reducción de la atenuación de la señal comparada con sistemas convencionales de banda angosta. Diferentes partes del espectro de frecuencia tienden a atenuarse a tasas variables. La relación de atenuación de la señal recibida es típicamente de 2 a 3 dB contra 20 a 30 dB de las transmisiones convencionales⁵.

ESPECTRO DISPERSO POR SALTO DE FRECUENCIAS (FHSS, *frequency hopping spread spectrum*).

Una alternativa al DSSS es el espectro disperso por salto de frecuencia. El uso de un sistema FHSS difiere considerablemente de un sistema DSSS porque mientras un sistema DSSS ocupa toda la banda cuando transmite, un sistema FHSS usa sólo una parte del ancho de banda al momento de la transmisión, pero la ubicación de esta parte cambia con el tiempo. La densidad espectral de la portadora modulada por datos se amplía cambiando la frecuencia de la portadora a una velocidad llamada *tasa de salto*. El conjunto de frecuencias disponibles en las que la portadora puede trabajar se llama *conjunto de saltos*.

⁵ “Modern electronic communication” MILLER Gary, Prentice Hall, EE. UU., 1998

Apéndice A

Espectro disperso.

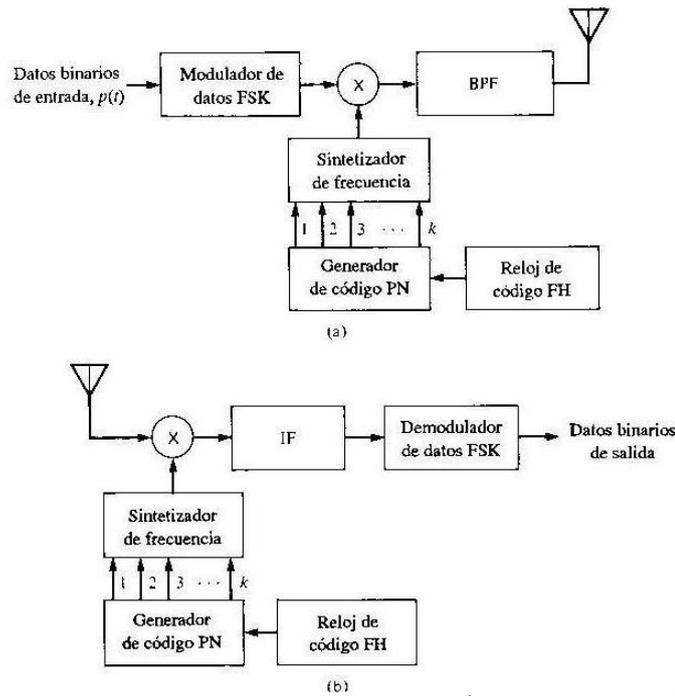
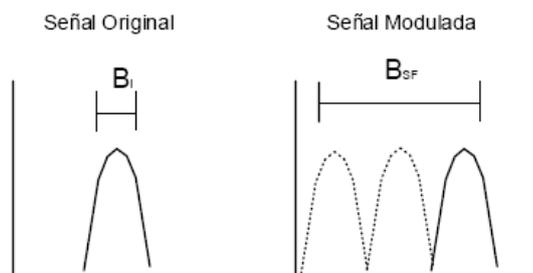


Imagen tomada de "Introducción a los sistemas de comunicación".

En el inciso (a) de esta imagen vemos el diagrama de bloques de un sistema de modulación para generar una señal FHSS. El sintetizador de frecuencia produce una senoidal de amplitud constante cuya frecuencia está determinada por el código digital suministrado al sintetizador. Éste es un componente esencial de los sistemas de espectro disperso FH.

El inciso (b) de la misma figura, muestra el diagrama de bloques del receptor FH. La señal de entrada se mezcla con la portadora de salto de frecuencia generada por un oscilador local que también salta en forma sincronizada con la señal transmitida eliminando así la señal FH.

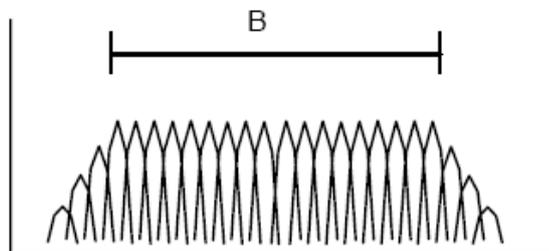
El sintetizador se alimenta por un generador de un código pseudoaleatorio, esta secuencia generada es creada por un registro de corrimiento como los que se comentaron anteriormente. En ocasiones, se puede programar un microprocesador para generar las secuencias pseudoaleatorias.



Modulación por salto de frecuencia

Apéndice A

Espectro disperso.



Espectro de salto de frecuencia

Imágenes tomadas de "Radios de espectro disperso - comunicaciones para todos-".

Si la tasa de salto generada por el código pseudoaleatorio es mucho más grande que la tasa del mensaje, hablamos entonces de fast frequency hopping. En este caso la frecuencia de la portadora cambia varias veces durante la transmisión de un bit del mensaje, de tal modo que ese bit se transmite en diferentes frecuencias. La siguiente imagen ejemplifica esto.

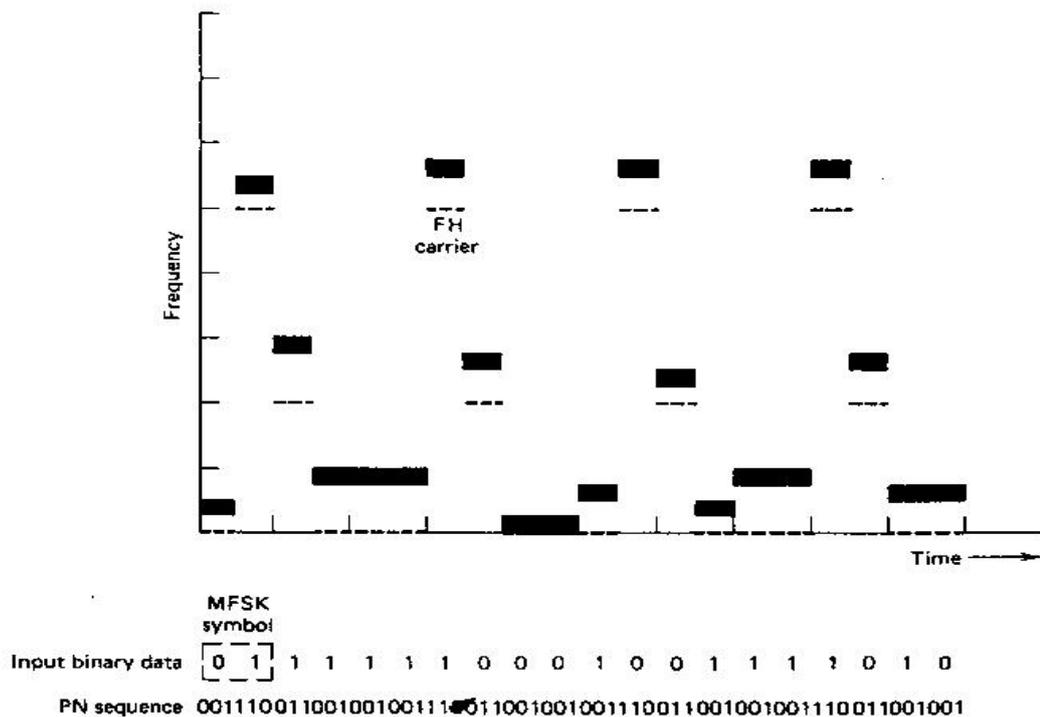


Imagen tomada de "Digital Communications".

Cuando la tasa de salto es mucho más pequeña que la tasa del mensaje, se trata entonces de un sistema slow frequency hopping. En esta modalidad múltiples bits se transmiten en la misma frecuencia. La siguiente imagen muestra cómo se comporta la señal en el dominio del tiempo.

Apéndice A

Espectro disperso.

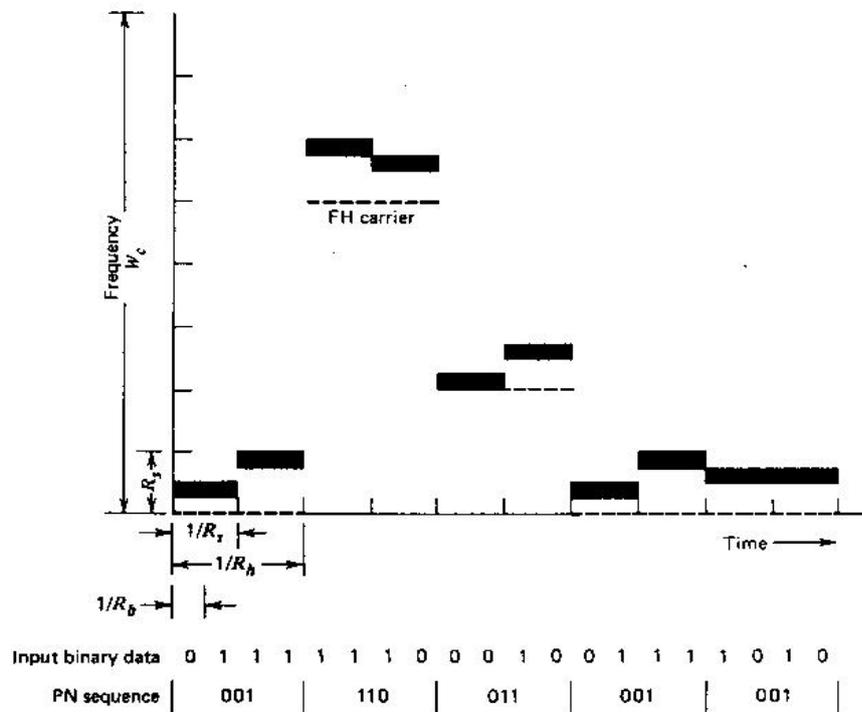


Imagen tomada de "Digital Communications".

El tiempo real de paro en cualquier frecuencia varía con la aplicación y la velocidad de los datos, pero puede ser tan corto como 10ms. En la actualidad, las regulaciones de la FCC especifican que debe haber un mínimo de 50 frecuencias de salto y que el tiempo de paro no debe exceder los 400ms⁶.

El resultado a la salida, $s_{FH}(t)$ es tal que en cualquier instante de tiempo $t = iT_H$, la portadora de la información modulada es transmitida a una frecuencia $f_h(iT_H)$ con un ancho de banda de información que ocupa un slot de frecuencia B_H en el ancho de banda expandido del sistema.

Con k bits direccionando el sintetizador de frecuencia, pueden haber n frecuencias de oscilador local, donde

$$n = 2^k$$

Si la tasa del código de espectro disperso es $R_c = \frac{1}{T_c}$, entonces se necesitan kT_c periodos de reloj para cubrir la estación- k demultiplexora serie a la entrada y paralela a la salida antes de que cada salto ocurra, por lo tanto cada periodo de salto es

⁶ "Sistemas electrónicos de comunicaciones" FRENZEL Louis, Alfaomega, México, 2003

Apéndice A

Espectro disperso.

$$T_H = kT_c = \frac{\log_2 n}{R_c}$$

Y la tasa de saltos es

$$R_H = \frac{1}{T_H} = \frac{R_c}{\log_2 n} = \frac{R_c}{k}$$

O bien

$$R_c = kR_H \quad ^7$$

Es por esto, que en un sistema de salto de frecuencia, la señal se esparce en un ancho de banda muy amplio, la señal puede llegar a expandirse desde 10 hasta 10,000 veces su ancho original. Es la característica de los saltos la que permita que coexista con otras señales sin crear interferencia. Está técnica es muy segura porque un receptor convencional no puede seguir los cambios de frecuencia y no tiene el ancho de banda suficiente para recibir la señal.

Aún cuando dos o más transmisores que usen esta técnica se encuentren operando en un mismo ancho de banda, pueden trabajar sin generar conflictos ya que cada uno tiene su propia secuencia pseudoaleatoria y por lo tanto saltan a distintas frecuencias en tiempos diferentes; por lo tanto, este es también un método para multiplexar porque permite que dos o más señales usen una banda dada al mismo tiempo sin interferirse.

SISTEMAS HÍBRIDOS.

Los sistemas de este tipo usan combinaciones de las técnicas anteriormente mencionadas. La idea es combinar las ventajas de cada una de las técnicas comentadas.

DSSS vs FHSS

Cuando analizamos estas dos técnicas podemos ver que cada una tiene sus propias ventajas sobre la otra, lo que hace que una sea mejor que otra dependiendo de la aplicación. Para sistemas de bajo alcance y con velocidades moderadas, lo más recomendable es la modulación de secuencia directa, sobre todo manteniendo al mínimo posible la potencia total a utilizar para minimizar interferencias a otros equipos de banda angosta operando en la misma banda. Para sistemas que requieren mayor velocidad y alcance, lo mejor será usar sistemas con salto de frecuencia, pero en enlaces direccionales y con potencias limitadas que no afecten a sistemas de banda angosta que coexistan en la banda de salto de frecuencia.

Al disminuir la densidad espectral, la cantidad total de información que podemos transmitir en el caso de secuencia directa es menor que la que se puede

⁷ “Electronic communication techniques” YOUNG Paul, Macmillan Publishing Co., EE. UU., 1990

Apéndice A

Espectro disperso.

enviar con saltos de frecuencia, pero dado que cada vez el volumen de información para transmitir es mayor, los sistemas de salto de frecuencia son la opción más viable.

Los sistemas de secuencia directa son muy fáciles de implementar y no presentan mayores problemas de sincronización. En cambio, los sistemas de salto de frecuencia son más complejos porque se necesita un hardware que genere los saltos con la rapidez debida y tienen una mayor posibilidad de perder la sincronía.

Una ventaja de los sistemas de salto de frecuencia sobre los de secuencia directa es que los primeros pueden programarse para evitar ciertas partes del espectro a diferencia de los segundos que usan el espectro continuo.

Debido a su mejor relación señal a ruido los sistemas de secuencia directa resisten mejor la interferencia (*jamming*) pero son susceptibles a la atenuación por reflexión (*multi-path*). Por su lado, como la portadora permanece activa en una misma frecuencia por cortos periodos, los sistemas de salto de frecuencia se ven menos afectados por atenuación por reflexión ya que esta no ocurre de la misma manera para todas las frecuencias⁸.

⁸ “Radios de espectro disperso –comunicaciones para todos-“ CACERES Juan Carlos, 1999.