

TÉCNICAS DE ESPECTRO EXPANDIDO

AUTOR: ING. JOSÉ A. RAPALLINI

En esta sección haremos una introducción teórica al tema de espectro expandido (*spread spectrum*, SS), indicando las técnicas más utilizadas para su generación y recepción, los beneficios que se obtienen y sus aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

Como ya adelantamos, se define a un sistema de espectro expandido a aquel que cumple con los siguientes requerimientos :

1. La señal ocupa un ancho de banda mucho mayor que el mínimo ancho de banda necesario para transmitir la información.
2. La expansión del espectro se lleva a cabo por medio de una *señal de expansión* también llamada *señal de código* la cual es independiente del mensaje.
3. En el receptor, para recuperar los datos originales, se debe realizar la correlación entre la señal recibida y una réplica exacta de la señal de código utilizada en el proceso de expansión.

A pesar de que algunos métodos tradicionales de modulación, como frecuencia modulada y PCM también amplían el espectro de la señal de información para su transmisión, no son calificados como de espectro expandido porque no cumplen con los postulados 2 y 3 de la definición.

La principal ventaja de los sistemas de comunicaciones de espectro expandido es su capacidad para rechazar interferencia, sea esta intencional o no. En este último caso podemos citar cuando otro usuario intenta transmitir simultáneamente por el mismo canal, mientras que la interferencia intencional puede ser causada adrede para evitar la comunicación entre dos puntos.

Es por esto que la técnica de espectro expandido fue originalmente desarrollada con fines militares con la intención de crear sistemas de comunicaciones que ofrezcan mayor resistencia a las señales interferentes. Sin embargo luego se encontraron otras aplicaciones que hacen uso de esta capacidad, que serán explicadas más adelante.

Existen en la actualidad dos técnicas principales utilizadas para generar señales de espectro expandido, estas son *secuencia directa* (*direct sequence*, DS) y *saltos de frecuencia* (*frequency hopping*, FH). Para su funcionamiento, ambas técnicas utilizan como señal de código una secuencia de datos de apariencia aleatoria, llamada *secuencia pseudo-aleatoria* ó *secuencia de pseudo-ruído* (*pseudo-random* ó *pseudo-noise sequence*, PN sequence). Debido a que estas secuencias son necesarias para el funcionamiento de estos esquemas de modulación, es lógico comenzar por describir sus propiedades y los circuitos para su generación.

SECUENCIAS SEUDO-ALEATORIAS

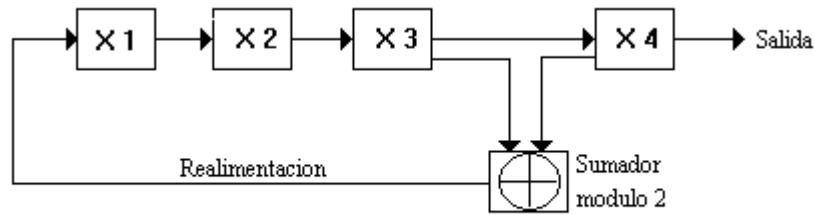
En general podemos decir que una señal aleatoria es aquella que no podemos predecir y que su comportamiento puede describirse solamente desde un punto de vista estadístico. Por el contrario, una señal pseudo-aleatoria no es realmente aleatoria, sino que es determinística, en el sentido que puede ser generada por el transmisor y el receptor. Su nombre se debe a que cumple ciertas propiedades estadísticas que le da apariencia aleatoria, para cualquiera que observe dicha señal.

Hay tres propiedades que se aplican como prueba a una secuencia periódica binaria para determinar su aleatoricidad, estas son :

1. **Balance** : se dice que una secuencia está *balanceada* cuando en un período de la secuencia, la cantidad de unos difiere de la cantidad de ceros en, a lo sumo, un dígito.
2. **Corrida** : se define una *corrida* (*run*) como una secuencia de un solo tipo de dígitos binarios (1s ó 0s). La aparición de un dígito opuesto termina una corrida y empieza otra. El largo de una corrida es el número de dígitos que posee. Es deseable que de la totalidad de corridas existentes en un período de una secuencia pseudo-aleatoria, la mitad de las corridas de cada tipo sean de largo 1, un cuarto sean de largo 2, un octavo sean de largo 3 y así sucesivamente.
3. **Correlación** : si el período de una secuencia se compara término a término con la misma secuencia desplazada cíclicamente, es deseable que la cantidad de bits coincidentes difiera de la cantidad de bits opuestos en no más de uno.

GENERACIÓN DE SECUENCIAS SEUDO-ALEATORIAS

Un método simple para la generación de secuencias pseudo-aleatorias ó de pseudo-ruido (PN), es mediante la utilización de un registro de desplazamiento realimentado. Un ejemplo se puede ver en la figura :



Registro de desplazamiento realimentado

Este circuito está formado por un registro de desplazamiento de 4 etapas implementado con 4 flip-flops y un sumador modulo 2 cuya salida realimenta la primer etapa del registro. La operación de este registro está controlada por un circuito de reloj (no mostrado en la figura). En cada pulso de reloj, el contenido de cada flip-flop se desplaza un lugar hacia la derecha, mientras que la suma módulo 2 del contenido de las etapas 3 y 4 realimenta la primera. La secuencia de salida se toma como la salida de la última etapa (X4 en este ejemplo).

Daremos como ejemplo la secuencia que se obtiene si tenemos inicialmente un 1 en la primer etapa y un 0 en las restantes. Podemos ver que los diferentes estados que presentará este registro son :

```

1000 0100 0010 1001 1100 0110 1011 0101
1010 1101 1110 1111 0111 0011 0001 1000
  
```

Debido a que el último estado coincide con el primero, vemos que la secuencia de salida se repetirá cada 15 pulsos de reloj, es decir que tendrá un período de 15 bits. Anotando el contenido de la cuarta etapa en cada pulso de reloj obtendremos un período de la secuencia de salida, que será :

000100110101111

Ahora vamos a comprobar si esta secuencia cumple con las propiedades antes citadas :

Balance : hay siete ceros y ocho unos por lo tanto esta secuencia cumple con esta propiedad.

Corrida : hay cuatro corridas de ceros, la mitad de ellas (2) son de largo 1 y un cuarto (1) es de largo 2; lo mismo sucede con las corridas de unos. Por lo tanto, aunque la secuencia es corta, podemos ver que cumple con esta propiedad.

Correlación : si comparamos la secuencia anterior con la misma desplazada cíclicamente un lugar obtenemos :

$$\begin{array}{r}
 000100110101111 \\
 100010011010111 \\
 \hline
 011001010000111
 \end{array}$$

donde el número de coincidencias (1) es 7 y el número de bits opuestos (0) es 8, por lo que cumple con esta propiedad.

Se puede demostrar (no lo haremos aquí) que la función de autocorrelación es periódica y tiene solo dos valores. El período de esta función es igual al período de la secuencia, es decir 15; y los valores que adopta es 1 y 1/15.

El generador de secuencias pseudo-aleatorias basado en un registro de desplazamiento produce secuencias cuyo período depende del número de etapas del registro, y los valores que toma esta secuencia depende de las condiciones iniciales y de la topología de las ramas de realimentación. Las secuencias así generadas se llaman de *máxima longitud*, y para un registro de 'n' etapas, el período de la secuencia 'N' está dado por :

$$N = 2^n - 1$$

TÉCNICAS DE MODULACIÓN DE SS

Como ya dijimos existen en la práctica dos métodos principales para la generación de señales de espectro expandido, ellos son : Secuencia directa con conmutación por desplazamiento de fase M-aria (Direct sequence, M-ary phase shift keying; DS/MPSK) y Saltos de frecuencia con conmutación por desplazamiento de frecuencia (Frequency hopping, M-ary frequency shift keying; FH/MFSK).

En el primer caso se usa una secuencia pseudo-aleatoria para modular una señal de MPSK, obteniéndose una expansión *instantánea* del ancho de banda de transmisión. La señal así obtenida tiene cierta apariencia de *ruido* para quien la observa.

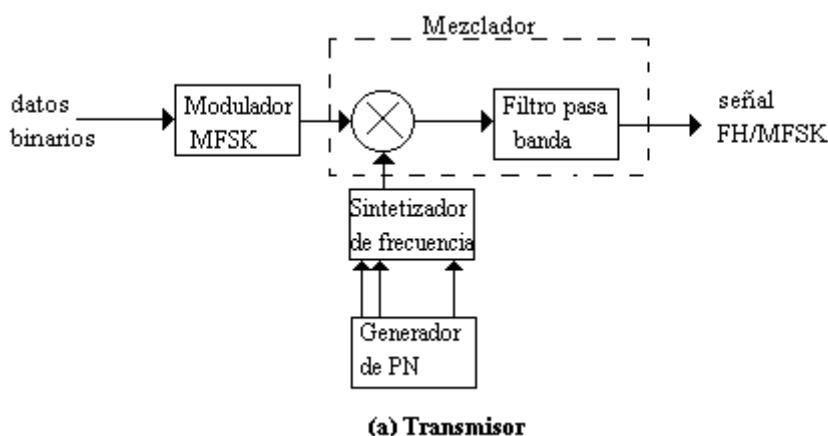
EXPANSIÓN DEL ESPECTRO POR SALTOS DE FRECUENCIA

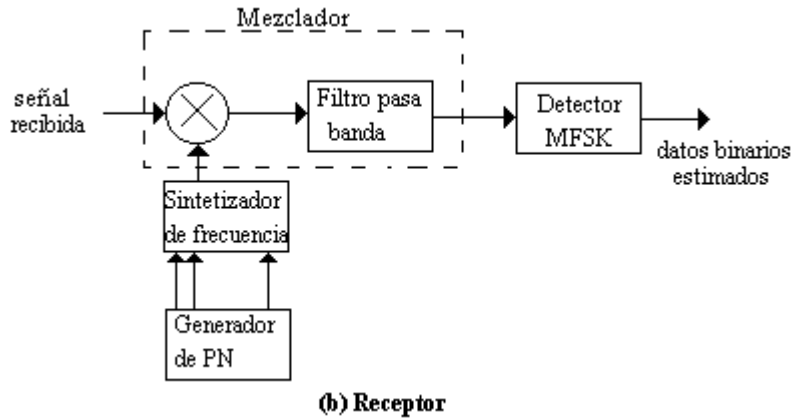
En esta técnica se utiliza una secuencia de pseudo-ruido para hacer que la frecuencia de la onda portadora ‘salte’ por diferentes valores, de una manera pseudo-aleatoria. En este caso el espectro de la señal transmitida se expande *secuencialmente* y no en forma instantánea como en el caso de DS/MPSK. El término ‘secuencialmente’ se refiere a que los saltos de frecuencia no cubren todo el espectro en forma instantánea por lo que resulta necesario tener en cuenta la velocidad a la que estos saltos ocurren. Esto trae aparejado dos tipos de esquemas :

1. **Salto de frecuencias lentos (Slow frequency hopping, SFH)** : en este caso la velocidad de símbolo R_s de la señal MFSK es un múltiplo entero de la velocidad de saltos (*hop rate*) R_h . Esto es, varios símbolos son transmitidos por cada salto de frecuencia.
2. **Salto de frecuencia rápidos (Fast frequency hopping, FFH)** : en donde la velocidad de saltos R_h es un múltiplo de la velocidad de símbolo R_s de la modulación MFSK. Esto equivale a decir que la frecuencia portadora cambiará varias veces durante la transmisión de un símbolo.

SALTOS DE FRECUENCIA LENTOS (SFH)

En la figura se vé el diagrama en bloques de un transmisor y receptor de un sistema de espectro expandido por saltos de frecuencia :





Los datos binarios ingresan al modulador FSK; la señal modulada de salida mas la señal de salida de un sintetizador de frecuencia ingresan a un mezclador que consiste de un multiplicador y un filtro pasabanda diseñado para seleccionar la componente suma de frecuencia de la señal resultante. La señal que genera el sintetizador de frecuencia resulta de aplicar a su entrada k bits de una secuencia pseudo-aleatoria que permite a la frecuencia portadora tomar 2^k valores de frecuencia distintos.

En una frecuencia portadora dada, el ancho de banda de la señal transmitida es igual al ancho de banda de una señal MFSK convencional con un alfabeto de $M = 2^K$ señales posibles. Mientras que para un rango completo de 2^k saltos de frecuencias de la onda portadora, la señal transmitida de un sistema FH/MFSK tiene un ancho de banda mucho mayor.

Debido a este gran ancho de banda, es imposible que el sintetizador de frecuencia del receptor se pueda mantener enganchado en fase con el del transmisor, por lo tanto estos sistemas usan modulación MFSK no coherente.

En el receptor mostrado en la figura (b), se observa que la señal recibida es primeramente mezclada con la señal de salida del sintetizador de frecuencia, el cual está controlado por una secuencia pseudo-aleatoria generada de manera sincrónica con la del transmisor. La señal resultante es filtrada y luego procesada por un detector de MFSK no coherente.

Al tono de mas corta duración de una señal FH/MFSK se lo denomina *chip*. La velocidad de *chip* (R_c) en un sistema FH/MFSK se define como :

$$R_c = \text{máx.}(R_h, R_s)$$

donde R_h es la velocidad de saltos y

R_s es la velocidad de símbolo.

Los sistemas SFH se caracterizan por tener varios símbolos por cada salto de frecuencia por lo tanto un símbolo corresponde a un chip. La relación entre la velocidad de datos R_b , la de símbolo R_s , la de chips R_c y la de saltos R_h , está dada por :

$$R_s = R_c = R_b/K > R_h \quad \text{con} \quad K = \log_2 M$$

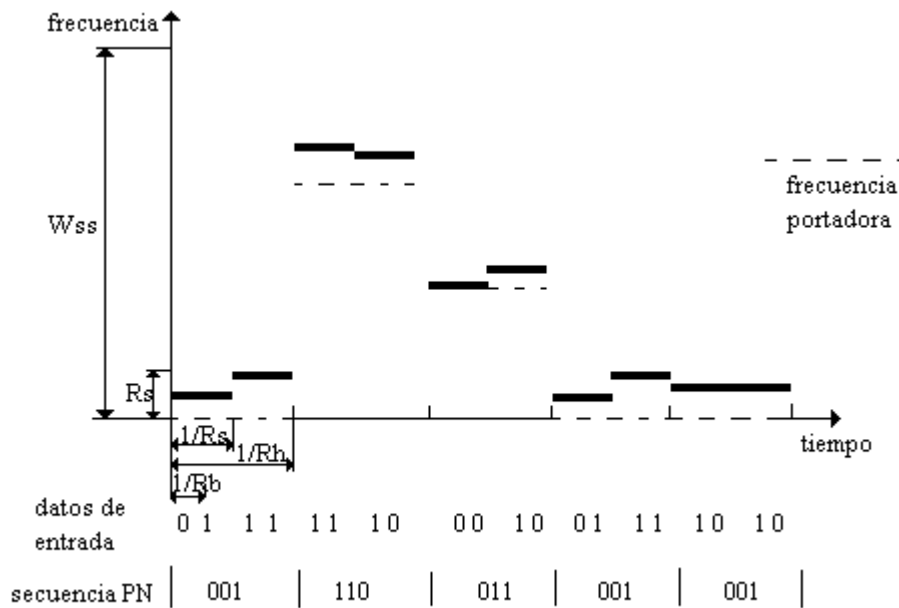
La performance de este sistema frente al ruido blanco aditivo Gaussiano (AWGN), es igual a la de un sistema convencional MFSK.

EJEMPLO

Supongamos un sistema SFH/MFSK con los siguientes parámetros :

Cantidad de bits por símbolos	$K = 2$
Cantidad de símbolos	$M = 2^K = 4$
Bits de la secuencia PN utilizados por hops	$k = 3$
Cantidad de saltos de frecuencia posibles	$2^k = 8$

En este ejemplo la frecuencia portadora cambia cada 2 símbolos transmitidos, es decir cada 4 bits de información. Se puede observar en la siguiente figura la variación de frecuencia que se obtiene para un período de la secuencia PN, los datos binarios de entrada y la secuencia PN. Hay que destacar que aunque es posible la generación de 8 frecuencias portadoras distintas, solo 3 son utilizadas por esta secuencia PN.



Ejemplo de un sistema SFH

APLICACIONES

La principal aplicación que se obtiene con la utilización de las técnicas de espectro expandido es la protección contra interferencias, sean estas intencionales o no. También tiene otras importantes aplicaciones como *acceso múltiple por división de código* y mejoras frente al *desvanecimiento* de señales que se produce por el arribo de éstas al receptor por múltiples caminos.

1) PROTECCIÓN CONTRA INTERFERENCIAS

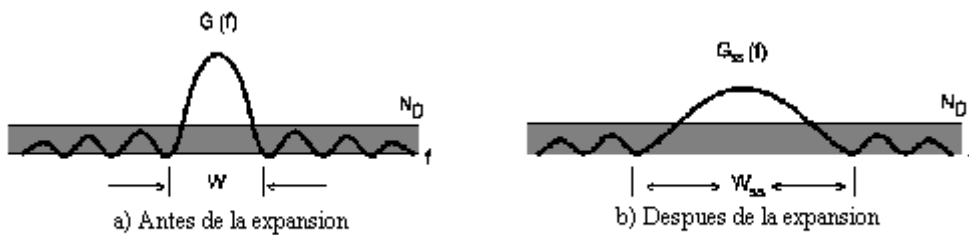
El ruido blanco Gaussiano es un modelo matemático que por definición tiene potencia infinita esparcida uniformemente en todo el espectro de frecuencias. Sin embargo es posible establecer una comunicación con este ruido de potencia infinita debido a que solo afecta a la comunicación las componentes del ruido que comparten el espacio de señal con las componentes de la señal transmitida.

En la siguiente figura (1), se ve el efecto que produce la expansión del espectro de una transmisión, en presencia de ruido blanco. La densidad espectral de potencia de la señal se denota con $G(f)$ antes de la expansión (a) y con $G_{ss}(f)$ después de la expansión. En la figura (b)

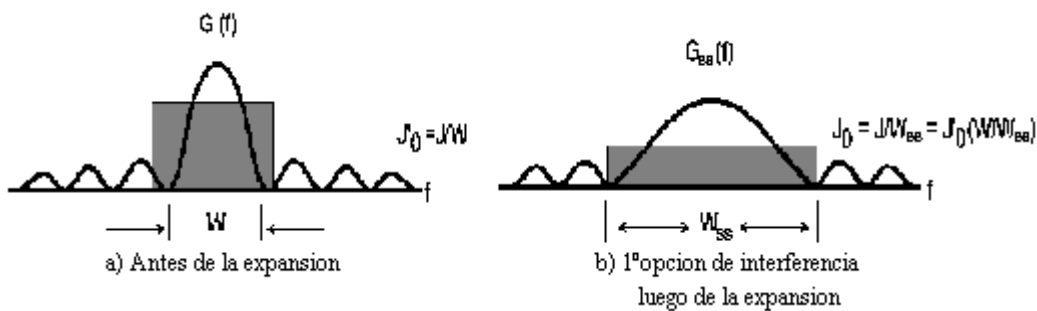
se puede ver que la densidad espectral de potencia unilateral del ruido blanco (N_0), no cambia como consecuencia de la expansión del espectro de la señal desde W hasta W_{ss} ; esto es debido a que la potencia de ruido es infinita. Por lo tanto se puede concluir que el uso de la técnica de espectro expandido no ofrece mejoras en la performance de estos sistemas frente al ruido blanco aditivo Gaussiano.

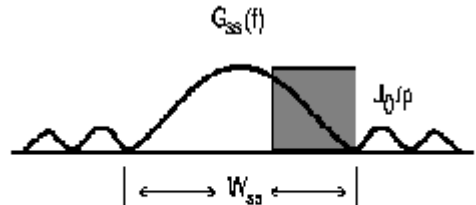
En la figura 2 se supone que no existe ruido blanco, pero la transmisión sufre la interferencia de una señal de potencia J y densidad espectral de potencia $J_0 = J/W$ donde W es el ancho de banda sin expandir (a). Una vez que se expande el espectro de la transmisión, se obtiene una densidad espectral de potencia de la señal $G_{ss}(f)$, y el sistema encargado de interferir (*jammer*) tiene dos alternativas; la primera es ocupar todo el ancho de banda W_{ss} con igual potencia de la señal interferente, obteniéndose una reducción en su densidad espectral de potencia en un factor (W/W_{ss}) , resultando entonces $J_0 = J/W_{ss}$, llamada *densidad espectral de ruido interferente de banda ancha* (b).

La segunda opción (c), consiste en concentrar toda su potencia en un determinado ancho de banda, menor que W_{ss} , por lo que la densidad espectral de potencia se incrementará de J_0 a J_0/ρ ($0 < \rho < 1$) donde ρ es la porción del espectro expandido que se quiere interferir.



1- Expansion del espectro en presencia de ruido blanco





c) 2ª opción de interferencia
luego de la expansión

2- Expansión del espectro en presencia de interferencia

Cualquiera sea la alternativa que se utilice para interferir la transmisión, se puede ver que la expansión del espectro ofrece cierta protección contra esta interferencia. Por lo tanto podemos concluir que cuanto mayor sea el ancho de banda expandido (ó, más generalmente, cuanto mayor sea la dimensión del espacio de señal), más eficaz será la protección contra interferencias.

2) ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO (CDMA)

Como se explicó en la sección de Introducción a las comunicaciones digitales, el acceso múltiple consiste en compartir los recursos de un sistema de comunicaciones, por varios usuarios; por ejemplo, la utilización de un satélite. De los métodos antes enumerados, los dos más usados son : acceso múltiple por división de frecuencia (frequency division multiple access, FDMA) y acceso múltiple por división de tiempo (time division multiple access, TDMA). En el primer caso, todos los usuarios acceden al canal simultáneamente, pero cada uno utiliza una banda de frecuencia diferente; mientras que con TDMA, todos los usuarios ocupan la misma banda de frecuencia, pero transmiten secuencialmente en el tiempo.

En el caso de acceso múltiple por división de código (code division multiple access, CDMA) todos los usuarios pueden transmitir al mismo tiempo y ocupar la misma banda de frecuencia. Para implementar un sistema CDMA se usa siempre la técnica de espectro expandido, en donde a cada usuario se le asigna un código propio, que utiliza para la modulación, ya sea por secuencia directa o por saltos de frecuencia.

Las ventajas de la utilización de CDMA son :

1. CDMA no requiere una red de sincronización externa
2. Es relativamente fácil incorporar nuevos usuarios al sistema
3. CDMA tiene capacidad para disminuir los efectos adversos producidos por señales interferentes, por usar modulación de espectro expandido.

El punto mas importante en el diseño de un sistema CDMA radica en la utilización de un buen código.

3) MEJORAS FRENTE AL DESVANECIMIENTO

En diversos sistemas de comunicaciones, la señal transmitida llega al receptor por diferentes caminos debido al rebote de la dicha señal en diversas superficies tales como árboles, edificios, montañas, etc.. Este problema es particularmente crítico en sistemas de comunicaciones móviles, en donde el transmisor, el receptor, ó ambos están en movimiento.

Como consecuencia de esto, la señal recibida experimenta variaciones en su amplitud y retardos de tiempo (o fase) en relación a la señal recibida por rayo directo. La interferencia causada por estas señales indeseadas se conoce como *interferencia por múltiples caminos (multipath interference)* y la variación que sufre la señal recibida debido a esta interferencia se conoce como *desvanecimiento (fading)*.

En canales que presentan cierto grado de desvanecimiento, puede disminuirse este efecto utilizando la técnica de espectro expandido. En particular, con un sistema FH/MFSK se puede mejorar la performance del sistema frente a estos múltiples caminos, haciendo que la frecuencia portadora varíe (salte) lo suficientemente rápido en relación a la diferencia de tiempo entre la señal de rayo directo y las retrasadas. Con esto se logra que toda (ó la mayoría) de la energía de la señal que llega con retraso esté en otra frecuencia que la ocupada por la señal actual y por lo tanto, estas señales indeseadas no influyen en la detección, con lo cual el impacto debido a los múltiples rayos se ve minimizado.