

SPREAD SPECTRUM, GANANCIA DE PROCESAMIENTO Y LA PROTECCIÓN CONTRA INTERFERENCIA: “ANTIJAMMING”

Fernando A. Rodríguez Duc

La tecnología del espectro ensanchado (Spread Spectrum, SS) se originó como una solución para contrarrestar la interferencia intencional (jamming) y ocultar las comunicaciones propias de escuchas no deseadas. Su origen puede remontarse hacia finales de la Segunda Guerra Mundial.

Con esas dos importantes características, los primeros desarrollos fueron orientados hacia aplicaciones militares, hasta que en 1989 se comenzó a utilizar en el ámbito civil, cuando esta tecnología fue liberada por el gobierno de los Estados Unidos.

Seguramente hemos escuchado en innumerables ocasiones la terminología de espectro ensanchado en radioenlaces, telefonía inalámbrica, enlaces satelitales, sistema de posicionamiento global, sistemas de comunicaciones militares, en sistemas celulares (acceso múltiple por división de códigos, CDMA), etc. Y a mi entender cada vez va a ser mayor su uso en el área de telecomunicaciones.

Esto se debe fundamentalmente a que los recursos que utiliza no son el espectral ni el temporal, en la actualidad muy explotados, sino la diferenciación entre códigos pseudoaleatorios.

Esta característica amplía el campo de desarrollo poniendo el rendimiento del sistema en función de estos códigos, estudiados y diseñados matemáticamente. En la medida que se puedan crear secuencias cada vez más distintas entre sí y fáciles de generar, se mejorará la performance del sistema incrementándose su capacidad de transmisión de información.

En este artículo me propongo describir en forma simplificada las características fundamentales del Spread Spectrum y analizar una de sus propiedades más destacadas, su protección contra la interferencia.

Cuando por primera vez escuché sobre este tipo de sistema me pareció sumamente interesante desde varios puntos de vista, pero lo que más me despertó la curiosidad fue:

- Que hace una aplicación directa y extrema de la ley Shannon para el intercambio de ancho de banda por potencia de señal, condensado en su expresión matemática $C = B \log_2 (1 + S/N)$.

El Capitán de Corbeta (R) Fernando Alberto Rodríguez Duc es Ingeniero en Electrónica y Especialista en Docencia Universitaria, por la Universidad Tecnológica Nacional Frba. En 1982 egresó como Guardiamarina del Cuerpo Combate, de la Escuela Naval Militar. Es Magíster en Telecomunicaciones, Instituto Tecnológico de Buenos Aires (2000). En 2005 cursó Tecnología y Proyectos de Telefonía Celular, en Universidad Argentina de la Empresa. Es Profesor de las materias "Telecomunicaciones II" y "Comunicaciones II", en la Universidad Argentina de la Empresa y Ayudante de Cátedra de la materia "Sistemas de Comunicaciones" en la Universidad Tecnológica Nacional, Frba. Trabajó en la investigación de la transmisión segura de la Información utilizando la técnica de Spread Spectrum, para el Instituto Tecnológico de Buenos Aires. Participó de la Conferencia Bial del Its 2000, "On The Use Of Chaotic Sequences In Cdma Systems" y en las Jornadas de Comunicaciones 2000. Además de haber estado en diferentes destinos de la Armada, participó del Proyecto Sidom, para el Servicio de Comunicaciones Navales. Actualmente se desempeña en la Cooperativa Telefónica de Tortuguitas como subgerente técnico.



- En la recepción/detección se realiza una aplicación práctica del filtro óptimo adaptado para el caso de señales digitales.

La expresión del primer punto modeliza matemáticamente un enlace de comunicaciones ruidoso. En ella C representa la capacidad de transmisión de información del canal de comunicaciones en bit por segundos (bps), B es el ancho de banda del enlace en Hertz (Hz) y S/N es la relación de la potencia de la señal (S) respecto de la potencia de ruido térmico, blanco y gaussiano (N) propio del medio. Esta relación podría representar la sensibilidad del receptor, se especifica un valor en dB por debajo del cual lo recibido no es confiable.

En esta ecuación queda demostrado que se puede realizar un intercambio de ancho de banda (B) por relación de señal a ruido (S/N), manteniendo constante la capacidad del enlace. Estos dos parámetros relacionados logarítmicamente en base dos.

De esta forma si realizo un ensanchamiento espectral (spread spectrum) de la señal, agrandando B , puedo disminuir la potencia de señal emitida (disminuye S/N) manteniendo constante la capacidad de transmisión de información, todo de acuerdo con la sensibilidad del receptor.

Con respecto a la recepción, la misma se realiza a través de la correlación de la señal recibida con un código conocido sólo por el transmisor y el receptor.

Este código tiene un período sumamente largo y características de aleatoricidad, por tal motivo se lo denomina seudoruido (PN).

La correlación es una comparación entre dos señales, donde el resultado es máximo cuando las mismas son idénticas y mínimo cuando son distintas.

Por lo tanto varias señales llegan al receptor, cada una con un código diferente, el receptor correlaciona cada una de ellas con la secuencia propia y discriminará la útil de las demás, porque con ella el resultado de la correlación será máximo.

Con la utilización de estos dos principios fundamentales de las comunicaciones se crea un sistema intrínsecamente seguro y con alto rendimiento en la transmisión.

Pero qué es en sí SS: ¿un tipo de modulación?, ¿un sistema de comunicación?, ¿un medio?...

Luego de meditarlo bastante he llegado a la conclusión que lo podríamos denominar como un tipo de modulación, pues realiza un tratamiento digital de la señal produciendo mejoras en su transmisión, optimizando las condiciones de recepción para casos muy específicos.

La definición extraída de Viterbi (*) es:

“SS es el método de transmisión en el cual la señal ocupa un ancho de banda superior del mínimo necesario para enviar la información; la banda base es ensanchada por medio de un código independiente de los datos, éste es conocido por el receptor, quien correlaciona la señal recibida con el código en correcta fase para recuperar los datos enviados”.

De esta definición podemos extraer tres características básicas:

1. La señal ocupa un ancho de banda superior al mínimo necesario para transmitir la información.
2. La banda base (señal de datos original) es ensanchada por medio de una señal código independiente de los datos.
3. En el receptor la señal de datos original es recuperada “correlacionando” la señal recibida con una réplica sincronizada y en fase de la señal de código utilizada para el ensanchamiento de la banda base.

(*)
Andrew J. Viterbi, CDMA,
Principles of Spread Spectrum
Communication,
Addison-Wesley (Eds), EE.UU.,
junio de 1995.

Existen otros tipos de modulación de banda ancha, pero en este método el spread se realiza en la banda base, antes de la modulación digital propiamente dicha, y en magnitudes del orden de 10 a 1.000 veces y mayores.

Además, si la particularidad anterior no lo diferencia totalmente, tenemos las otras dos únicas, donde el ensanchamiento se realiza por un código pseudoaleatorio y su detección es a través de una correlación discreta.

Otra característica muy interesante en esta técnica es el control de potencia, la cual se puede disminuir de acuerdo con el ensanchamiento realizado.

Como se destacó anteriormente, ésta es una aplicación directa de la teoría de Shannon.

Así podemos regular la potencia de los emisores en relación con el ensanchamiento de la banda, manteniendo la capacidad del canal constante, mejorando las condiciones de propagación en el sector espectral utilizado, controlando la interferencia entre canales y ocultando las señales bajo el ruido térmico propio del lugar, haciendo las mismas casi indetectables para receptores no deseados.

Por esta razón, cuando se instala un radioenlace con SS no son tan estrictos los trámites respecto del control del espectro, en algunos lugares sólo se debe informar, ya que la potencia utilizada, la banda de frecuencia y el código impiden la interferencia sobre estaciones vecinas.

Como dijimos, esta tecnología se inició en aplicaciones militares, sus beneficios la hacen muy apropiada para este tipo de escenario:

1. Supresión de interferencia, "antijamming".
2. Sistemas con baja probabilidad de interceptación ("LPI: low probability of intercept").
3. Alta resolución para determinar posicionamiento.

Como se puede observar la primera y segunda cualidad son indispensables para la realización de comunicaciones en un ambiente hostil.

Pero la tercera no es menor, pues tiene aplicación directa en el sistema de posicionamiento global (GPS) implementado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos en la década del 80, mejorando la precisión en la ubicación de blancos.

Por otro lado, como suele suceder en estos desarrollos militares, las aplicaciones civiles también son importantes y actualmente se implementan enlaces en SS para microondas, satelitales y celulares, la aplicación más desarrollada en la actualidad.

En comunicaciones móviles con Acceso Múltiple por División de Código (CDMA), este método está teniendo su auge, y si bien la tecnología actual es GSM con su acceso básico por división del tiempo, para las implementaciones de banda ancha en la red móvil no se encontró otra forma más eficiente que el uso de división por código.

Para entender la forma en que esta tecnología comparte el medio, una buena analogía sería suponer que nos encontramos en una reunión con personas de diferentes lugares del mundo que hablen distintos idiomas simultáneamente.

A un participante que sólo conoce un idioma le llegan todas las conversaciones a sus oídos.

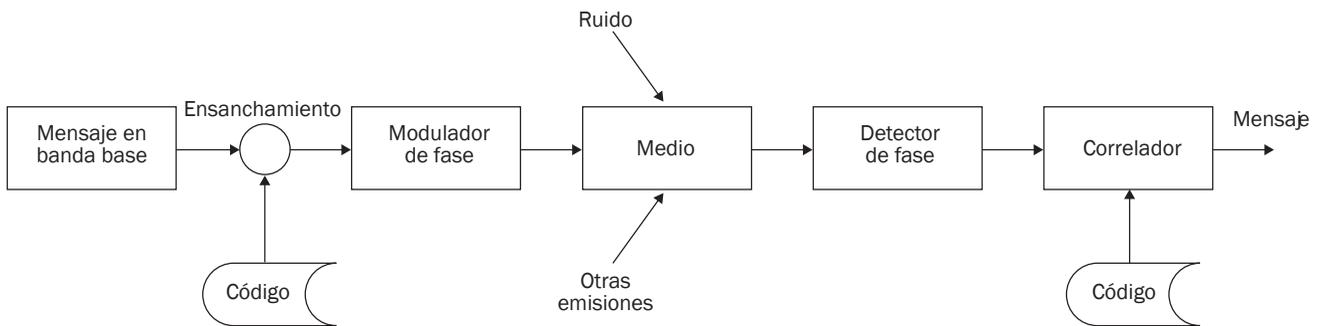
Sin embargo, siempre que el ruido producido por el resto se encuentre dentro de ciertos límites, el mensaje en su propio idioma se destacará del resto y será recibido e interpretado por ese participante (detectado).

El resto interferirá la recepción en más o en menos dependiendo del volumen de voz y de la similitud del idioma. En este ejemplo, el idioma es el "CÓDIGO" del mensaje.

En realidad el receptor en este caso correlaciona no solamente con el lenguaje, sino también con el hilo de la conversación, el tono del interlocutor y hasta los movimientos de sus labios y sus expresiones corporales, todo esto hace a la comunicación y también puede interpretarse como parte del código.

Algunas técnicas para el ensanchamiento del espectro son: modulación con "Direct Sequence", en la cual a partir de una función determinística se genera una secuencia pseudoaleatoria y ésta conteniendo los datos produce la modulación en fase de la portadora; "Frequency Hopping", la frecuencia portadora cambia en forma pseudoaleatoria; y "Time Hopping" donde se transmiten ráfagas de datos en momentos con intervalos pseudoaleatorios. Frecuentemente se usan sistemas híbridos.

A continuación se muestra un diagrama en bloques muy simplificado del sistema:



Tradicionalmente, cada usuario de un sistema de acceso múltiple usa un determinado recurso casi en forma exclusiva, un ancho de banda, un "time slot" o ambos, los cuales difieren entre sí. De esta forma el acceso múltiple se reduce a una gran cantidad de enlaces punto a punto, asumiendo una perfecta aislación entre los recursos que se le otorgan a cada uno de los integrantes del sistema.

La capacidad de los sistemas está limitada por el ancho de banda o el tiempo disponible; la degradación de la señal, por el ruido blanco gaussiano y anomalías de la propagación, producidas fundamentalmente por trayectos múltiples.

A diferencia de los anteriores métodos de acceso, en la técnica de acceso múltiple por división de código (CDMA) se utiliza SS.

Como se explicó anteriormente se está usando otro recurso, los usuarios pueden transmitir al mismo tiempo y en la misma frecuencia, su separación está en el código. Cada uno usa un código diferente. Esta forma de compartir los mismos recursos se mejora controlando la potencia de transmisión con el ensanchamiento y manteniendo una relación señal a ruido acorde con una performance aceptable para el equipo receptor.

Cada usuario utiliza un amplio ancho de banda, de esta forma cada uno contribuye al ruido general del ambiente en el cual se realizan las comunicaciones.

Esta interferencia adicional junto con el ruido propio del medio limita la capacidad del sistema, pero al no haber restricciones en los recursos espectrales y temporales, la capacidad resultante final se ve incrementada respecto de los otros sistemas convencionales.

Supresión de interferencia, "antijamming"

Uno de los puntos que me interesa tratar en este artículo es la protección contra la inter-

ferencia. Básicamente podemos decir que éstas son anomalías comunes en cualquier tipo de sistemas de comunicaciones inalámbricas.

Esta tecnología tiene una inmunidad intrínseca por su método de modulación y su muy especial forma de detección.

El principio básico se basa en la distribución de la señal de un ancho de banda relativamente pequeño en un entorno espectral más amplio, de forma tal que un jammer con una potencia total fija es obligado a:

- Distribuirse en un espectro más grande, provocando una pequeña interferencia en cada sector espectral, o
- Actuar sobre una porción del ancho de banda total de la señal, dejando el resto del espacio libre.

Este punto será aclarado a través del análisis como un problema clásico de la detección de señales en presencia de ruido.

Se parte de la premisa que el transmisor y el receptor conocen un set de M señales $S_i(t)$ ($0 \leq t \leq T$; $1 \leq i \leq M$).

El transmisor selecciona una de las señales para enviar de duración T con una velocidad R en bits por segundo (bps).

Si por ejemplo la señal $S_i(t)$ es enviada, el receptor recibe

$$r(t) = S_i(t) + n_w(t) \quad \text{sobre el intervalo } [0, T]$$

donde $n_w(t)$ es ruido aditivo, térmico, blanco y gaussiano (AWGN) con densidad espectral de potencia $\eta_0/2$ [W/Hz] sobre todo el espacio espectral $-\infty < f < +\infty$.

Se sabe que el set de señales puede ser completamente definido por una combinación lineal de D señales ortonormales básicas, y que aunque el ruido blanco, similarmente expandido, requiera un número infinito de términos, sólo aquellos que se encuentran dentro del espacio de la señal son relevantes (dentro de la misma banda).

Decimos que el set de señales es D -dimensional si el número mínimo de funciones básicas ortonormales requeridas para su definición es D .

Si tomamos en forma particular como señales ortogonales las funciones exponenciales ($e^{j\omega t}$) o trigonométricas (seno y coseno) estaríamos en el caso especial de las Series de Fourier.

De acuerdo a Nyquist podemos calcular el ancho de banda B_D de la señal $S_i(t)$ como:

$$D = 2 B_D T \quad \iff \quad B_D = D (1/2T)$$

El detector óptimo (que produce mínima probabilidad de error recibiendo AWGN) consiste de un banco de correladores o filtros adaptados para cada señal. Verificando a la salida de cada uno de los correladores, se toma la señal de mayor potencia, correspondiendo ésta a la señal de datos transmitida.

La teoría del filtro óptimo adaptado nos dice que dado un diseño de señal específico, la performance del sistema solamente es función de la relación entre la energía por bit y la densidad espectral de ruido $\frac{2E}{\eta}$.

Así, con respecto al ruido blanco (el cual tiene potencia infinita y energía constante en todo el espacio espectral), el uso del ensanchamiento de banda ofrece la ventaja en el uso del

filtro óptimo adaptado que maximiza la relación de potencia de señal recibida respecto del ruido (S/N) en el momento de muestreo en el detector.

La situación es bastante diferente, sin embargo, si en lugar de ruido usamos una señal interferente "jammer" con potencia finita y con una densidad espectral de energía inicial

$$J_o = \frac{E_j}{B_{ss}}$$

donde B_D es el ancho de banda de la señal antes del ensanchamiento y E_j su energía total.

Si la señal antes de ser transmitida es expandida en un ancho de banda mayor B_{SS} , esto obliga a que la interferencia distribuya su potencia finita sobre un espacio espectral mayor.

La nueva densidad de energía de interferencia en la banda expandida será:

$$J_{SS} = \frac{E_j}{B_{SS}} ; B_{SS} \text{ es el ancho de banda ensanchado}$$

Reemplazando en esta expresión el valor de energía de la interferencia E_j por el valor antes del ensanchamiento, nos queda:

$$J_{SS} = \frac{E_o B_D}{B_n} \text{ y la ventaja del ensanchamiento se puede representar como:}$$

$$J_{SS} = \frac{J_o}{G_p} \quad G_p = \frac{B_n}{B_D}$$

G_p es la ganancia de procesamiento, y representa la cantidad de veces que la señal fue ensanchada respecto de su banda base. Parámetro fundamental en la tecnología de SS.

Un parámetro muy utilizado en comunicaciones digitales es la figura de mérito, como la relación entre la energía por bit de la señal transmitida por la densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_o), en nuestro caso definiremos una figura de mérito similar, pero incorporaremos la densidad de energía de jammer, así nos queda:

$$\frac{E_b}{J_{SS}} = \frac{E_b B_{SS}}{J_o B_D} = \frac{E_b}{J_o} G_p$$

Se observa que $\frac{E_b}{J_o}$ es la situación inicial sin ensanchamiento y G_p es la mejora propia del sistema.

Por lo tanto existe una mejora en la recepción contra la interferencia directamente proporcional al ensanchamiento de la banda representado en la ganancia de procesamiento G_p . Dicho en otras palabras se demuestra que el spread protege a la transmisión de la interferencia de cualquier tipo.

Podemos concluir que esta forma de procesar la información es muy superior a las utilizadas en la actualidad, fundamentalmente en cuanto a la seguridad, como también en la utilización de los recursos espectrales y en la forma de compartir el medio de transmisión.

La información así transmitida es más robusta, con mayor protección ante interferencia de diferentes tipos (cocanal, canal adyacente, trayectos múltiples, etc.), de muy difícil detección por su baja potencia de emisión, y aunque la transmisión fuera descubierta, se dificulta mucho su decodificación, ya que la misma se encuentra oculta por un código conocido solamente por el transmisor y el receptor, de período largo y difícil de ser reconstruido a partir de tramos cortos.

En suma este sistema cumple con muchas de las características que son requeridas en las comunicaciones actuales donde el ancho de banda y la seguridad pasaron a tener amplia importancia ya que son las falencias que a los servicios de comunicaciones inalámbricas les está costando superar. ■