

TELECOMUNICACIONES

“SILENCIOSAS”

JULIO M. PÉREZ

El objeto de este artículo es mostrar los conceptos básicos de uno de los más modernos procesos de modulación, conocido como “modulación por espectro distribuido” (*spread spectrum*) que están produciendo un cambio sustantivo en las telecomunicaciones modernas.

Por ser éste un artículo de difusión, previamente ilustraremos algunos conceptos básicos para facilitar la comprensión del proceso.

Ancho de banda

Cuando se tiene una señal que tiene la característica que su forma de onda se repite en el tiempo con una determinada regularidad, se dice que la misma es periódica, denominándose período T al intervalo de tiempo que transcurre entre una y otra repetición de dicha forma de onda. Un ejemplo típico de una señal periódica es la que se ilustra en la figura 1 que corresponde a pulsos rectangulares de amplitud A que se repiten cada T segundos, es decir con período T . Se define como frecuencia fundamental de repetición a la inversa del período ($f = 1/T$).

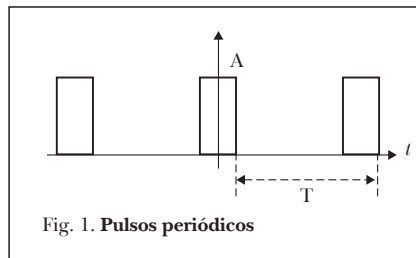


Fig. 1. Pulsos periódicos

Ahora bien, pulsos del tipo señalado corresponden en realidad a la suma de una cantidad (en teoría infinita) de señales senoidales, es decir de señales alternas de distintas frecuencias y, en consecuencia, pulsos rectangulares como el ilustrado son la suma de todas esas señales senoidales. Esto es lo que en electrónica se conoce como el “espectro” (componentes senoidales de distintas frecuencias) del pulso. Matemáticamente se puede determinar cuáles son estas componentes senoidales si se aplica al pulso el conocido desarrollo en serie de Fourier.

Un ejemplo típico es el caso de los instrumentos musicales. En ellos una misma nota, por ejemplo DO, corresponde en todos los instrumentos a una misma frecuencia fundamental, tanto sea un violín como un contrabajo. Lo que cambia de instrumento a instrumento es la forma de onda que se repite con dicha frecuencia y por consiguiente cambia el contenido de frecuencias armónicas y sus amplitudes relativas (tienen distintos espectros).

El Contraalmirante VGM (RE) Julio Marcelo Pérez cursó estudios en el Colegio del Salvador. Egresó de la Escuela Naval en 1958 como Guardiamarina y alcanzó el grado de Contraalmirante, retirándose del Servicio activo en 1992. Realizó estudios de Ingeniería Electromecánica orientación electrónica en la Facultad de Ingeniería de la UBA y posgrado en Control y Guiado en la Universidad de Roma (Italia. 1967-68). Profesor en universidades estatales y privadas argentinas nombrado por concurso. Se desempeñó como Rector del Instituto Universitario Naval y actualmente es asesor del director de Educación Naval. Condecorado por la Armada Argentina y el Congreso Nacional por el diseño, construcción y operación de un sistema misilístico Exocet operado desde tierra con el que, durante el conflicto del Atlántico Sur, dejó fuera de combate al crucero liviano HMS Glamorgan. Condecorado por el gobierno francés con la *Ordre National du Mérite* en el grado de Comandante.

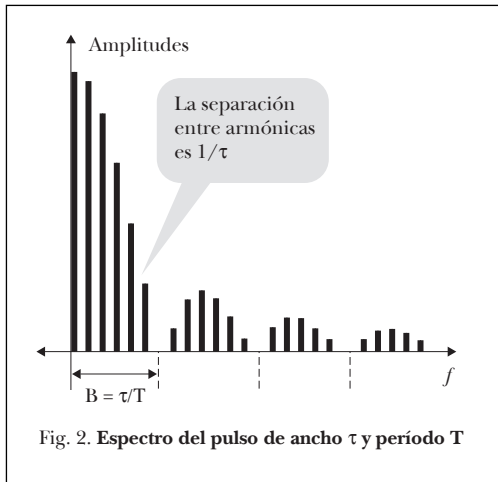


BOLETÍN DEL CENTRO NAVAL

Número 818

Septiembre/diciembre de 2007

Recibido: 17.6.2006



En la práctica, si se desarrolla en serie de Fourier la señal de la figura 1 resultan infinitas componentes senoidales cuyas amplitudes decrecen con el número de armónica (y por consiguiente su aporte energético). Obviamente, para reproducir con exactitud el pulso en cuestión es necesario que el sistema de comunicaciones sea capaz de transmitir y de recibir a todas las componentes lo que exige un ancho de banda infinito!

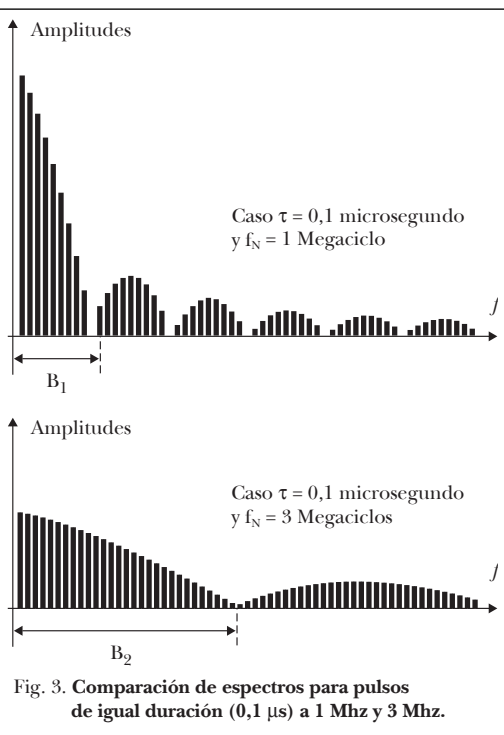
En la práctica podemos considerar que el ancho de banda necesario para reproducir aceptablemente a la señal original es aquel que abarca las frecuencias comprendidas entre la componente continua (frecuencia cero) y $1/T$. Esta situación se ilustra en la figura 2 donde se visualiza la amplitud de cada componente y su frecuencia. Nótese que una parte de las componentes senoidales, aquellas que corresponden a frecuencias superiores a B , no son consideradas (no serán transmitidas) y ello implica una deformación de la señal que se reciba (en la

práctica, esta deformación, si recibimos todas las componentes que existen en la banda de frecuencias $B = \tau/T$, es aceptable y es lo que normalmente se usa).

Es entonces evidente que el ancho de banda B necesario (para τ constante) resulta inversamente proporcional al período T de los pulsos periódicos, es decir que cuanto mayor es la frecuencia de repetición de pulsos, mayor es el ancho de banda requerido.

El análisis de casos de pulsos de igual duración t y de distinto período de repetición (un ejemplo se ilustra en la figura 3) muestra que:

- A menor período de repetición de pulsos (mayor frecuencia), mayor es el ancho de banda requerido para transmitir la señal (caso $B_2 > B_1$).
- A menor período (mayor frecuencia), para igual potencia de la señal, las componentes tienen menor amplitud (la potencia por unidad de ancho de banda o densidad de potencia es menor) (caso B_2).
- Cuanto menor es la duración del pulso repetitivo (menor τ), mayor es el contenido armónico en el ancho de banda de interés ($1/T$).



En concreto vemos que el ancho de banda mínimo requerido para la transmisión de pulsos repetitivos con período T es proporcional a $1/T$ y en consecuencia, cuanto menor sea el período (más rápidamente se repiten los pulsos) mayor será el ancho de banda requerido para transmitirlo.

Dado que el espectro de comunicaciones es un bien escaso, en general, todos los sistemas de comunicaciones tienden a utilizar el menor ancho de banda compatible con la señal y la forma de modulación adoptada.

Ruido

Las señales espurias que indefectiblemente acompañan a las señales que entran al receptor se las conoce como "ruido". En general, podemos considerar dos tipos de ruido, uno que se debe a distintos efectos y que denominaremos "normal" (producido por efectos térmicos, chispas, atmosférico, etc.) y otro originado en quien desea perturbar o impedir nuestras comunicaciones y que denominamos "interferencia" (en la nomenclatura inglesa se lo conoce como *jamming*).

El "ruido normal" presenta como característica que se encuentra en

toda la banda de frecuencia (su amplitud tiene distribución gaussiana con valor medio cero) y su densidad de potencia por unidad de ancho de banda es constante, es decir que cuanto mayor es el ancho de banda de recepción, mayor es la potencia de ruido “normal” recibido. En concreto, en toda la banda de recepción existirá una señal de ruido “normal” de tal manera que si la señal a recibir se encuentra a un nivel inferior al de dicho ruido será imposible detectarla (queda “enmascarada” en el ruido).

Ésta es una razón más por la cual los sistemas clásicos de telecomunicaciones tratan de utilizar el menor ancho de banda posible. Si observamos la figura 2 es evidente que, si utilizamos el ancho de banda B de la figura, la potencia de la señal recibida (es un valor proporcional a la suma de los cuadrados de las amplitudes) tendrá un valor determinado, mientras que la potencia de ruido tendrá un valor proporcional a B . Si duplicamos el ancho de banda (observar que las amplitudes de las componentes de la señal que se agregan son mucho menores) el incremento de la potencia de señal no supera el 6% (este valor resulta de calcular para el espectro del pulso la potencia de las componentes hasta la frecuencia τ/T) mientras que la potencia de ruido se duplica lo que en definitiva implica que empeorará la relación entre la potencia de señal y la potencia de ruido.

En cuanto al “ruido de interferencia”, el mismo puede ser de banda angosta (cuando el interferidor emite una señal potente a una única frecuencia o en una banda de frecuencias relativamente estrecha) o de banda ancha (el interferidor emite en una banda de frecuencias relativamente ancha, en cuyo caso, la densidad de potencia por unidad de ancho de banda [es el cociente entre la potencia total y el ancho de banda considerado] es mucho menor que en el caso de banda angosta). El efecto de esto en el caso de modulación por espectro distribuido lo analizaremos más adelante.

Teorema de la capacidad de canal

La ecuación fundamental en telecomunicaciones es la que resulta del teorema de la capacidad de canal que establece que la velocidad de transmisión o capacidad C de un canal de comunicaciones, para una probabilidad de error arbitrariamente pequeña, está relacionada con el ancho de banda B , la potencia de la señal S y la potencia de ruido N según

$$C = B \times \log_2 \left[\frac{1+S}{N} \right] \text{ en bits/segundo}$$

De esta expresión vemos que, para una dada capacidad de canal C y de potencia de ruido N (en general, la potencia de ruido es un valor no modificable) podemos:

- a) Aumentar la potencia de señal S y reducir el ancho de banda B
- b) Aumentar el ancho de banda B y reducir la potencia de señal S

La casi totalidad de los sistemas de telecomunicaciones buscan mejorar la relación S/N (en general aumentando la potencia de emisión) a fin de mantener B lo más pequeña posible (debe notarse que un aumento de la potencia de emisión que duplique la relación señal a ruido sólo permite una reducción del ancho de banda en un 20%).

La modulación por espectro distribuido

Un concepto nuevo surgió alrededor de los años 41 y lo singular del caso es que los inventores del sistema no tuvieron ninguna relación con el área electrónica. Los mismos fueron, por un lado, la austríaca Hedwing Kiesler casada con Fritz Mandl, uno de los dirigentes de los trabajos de investigación en el área de armamentos de III Reich, de quien se divorció para trasladarse a los EE.UU. donde triunfó como actriz con el nombre de Hedy Lamarr, y por otro George Antheil, un músico experimental, quien se hizo amigo de la actriz, la que le confió la idea de enviar los mensajes a los torpedos (era la época de la Segunda Guerra Mundial) a través de múltiples frecuencias según una forma aleatoria. Antheil pudo resolver el problema, si bien

a través de un sistema electromecánico con rollos de papel y el uso de 88 frecuencias (correspondientes al número de teclas del piano) y el 11 de agosto de 1942 Lamarr y Antheil obtuvieron la patente 2.292.387 por su sistema secreto de comunicaciones, donando los derechos de su patente al gobierno como contribución al esfuerzo de guerra.

La idea quedó archivada hasta que, alrededor de 1950, los ingenieros de Silvania Electronics la desarrollaron utilizando tecnología electrónica. El sistema, denominado "spread spectrum" se puso en servicio en torno de los años 1960 y se empleó exclusivamente en las comunicaciones militares de los EE.UU.

El sistema de espectro distribuido es por definición: ***Un sistema de telecomunicaciones que utiliza una banda mucho más grande que lo necesario produciendo una señal que presenta todas las características del ruido, siendo poco probable su detección así como el interferirla, para lo cual utiliza un código binario de características pseudoaleatorias.***

En razón de ser difícilmente detectable y además bastante difícil de interferir (como veremos), este tipo de telecomunicaciones fue prácticamente de uso exclusivo en el campo militar pasando al campo civil en los últimos treinta años.

Conceptualmente, el proceso implica generar un espectro de ancho de banda varias veces mayor que el que en realidad requiere la señal útil y para ello se utiliza una secuencia de pulsos de amplitud ± 1 denominada secuencia pseudoaleatoria $N(t)$ (*pseudo noise* o PN en inglés) de características particulares (la condición de ser aleatoria corresponde a pensar que la misma puede ser generada, por ejemplo, lanzando al aire una moneda y adoptando el valor +1 si salió cara y -1 si salió seca. En realidad es un circuito el que genera la secuencia y por lo tanto no es estrictamente aleatoria por lo cual se la denomina pseudoaleatoria). Un generador muy utilizado para estas secuencias es el registro de desplazamiento como generador recursivo lineal (ver Matemática discreta y algoritmos, cap. XI, pág. 497 del autor del artículo). Esta secuencia, de una cierta longitud, goza de la propiedad de ortogonalidad respecto de todas las otras secuencias de igual longitud (la ortogonalidad significa que dos secuencias similares pero de distinta distribución de los valores +1 y -1, cuando se las multiplica entre sí dan como resultado un valor cuyo promedio es cero), ya que como veremos esto es importante para asegurar que los receptores no sufran interferencias de otro usuario de la misma banda.

El concepto es, en consecuencia, "distribuir" el espectro de nuestra señal original en un espectro mucho más amplio. Para ello existen varias formas, de las cuales las dos más utilizadas son:

1. Dispersión Directa de la Secuencia -DSS (o en inglés DS-SS)
2. Dispersión por Salto de Frecuencia -DSF (o en inglés FH-SS)

Dispersión Directa de la Secuencia (*Direct Sequence Spread Spectrum*)

En este caso se actúa sobre la señal en banda base (la señal original). Supongamos para ello que la señal $S(t)$ que queremos emitir está formada por pulsos rectangulares que representan los valores binarios cero y uno (esta suposición es a sólo efecto de simplificar la idea de este tipo de modulación). La imagen de la señal es, en un instante considerado, la que se ilustra en la figura 4 punto (A) donde su período es T_S .

Por otra parte generamos una secuencia de pulsos $N(t)$ con características pseudoaleatorias con un período T_N que es un submúltiplo entero del período de la señal T_S . Esta secuencia pseudoaleatoria adopta valores ± 1 , como por ejemplo la que se ilustra en la figura 4 parte (B).

Si multiplicamos la señal pseudoaleatoria $N(t)$ por la señal de información $S(t)$ obtendremos una señal cuya imagen se ilustra en la parte (C) de la figura 4. En consecuencia resulta una nueva señal $M(t)$ tal que:

$$M(t) = S(t) \times N(t)$$

Esta nueva señal, como es evidente, presenta una periodicidad que es la de $N(t)$, que corresponde a un período mucho menor que el de la señal que contiene la información. La relación entre los períodos es

$$M_N = \frac{T_S}{T_N}$$

En los casos prácticos esta relación puede ser del orden de 1.000 o más. La señal $M(t)$ modula finalmente en amplitud a una portadora f_p generando las dos bandas laterales correspondientes. La figura 5 ilustra muy esquemáticamente el resultado del proceso (se ilustran las dos bandas).

Obsérvese que si la densidad espectral de ruido "normal" es N_0 , la potencia de ruido en la banda $2/T_S$ será

$$2x N_0/T_S$$

mientras que en la banda $2/T_N$ será

$$2x N_0/T_N$$

En la figura 5 se ilustra en punteado el espectro que correspondería a la modulación de amplitud con la señal de período T_S y que, centrado en la frecuencia de portadora, tiene un ancho de banda total de $2/T_S$. También se ilustra el espectro correspondiente al caso de haber modulado la portadora con la señal resultante del producto de la señal original por la secuencia pseudoaleatoria de período T_N que genera un ancho de banda, centrado en la misma frecuencia de portadora, de valor $2/T_N$ (se muestra, por ejemplo, también un posible nivel de ruido "normal" donde se ve que en el último caso todo el espectro quedó "sumergido" en el ruido).

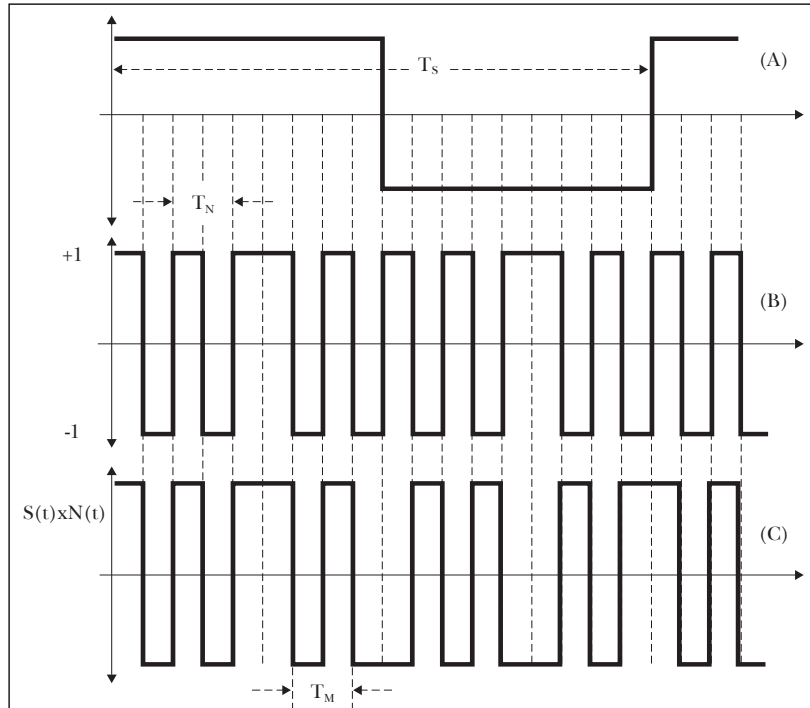


Fig. 4. Multiplicación de un seudoruido $N(t)$ por una señal $S(t)$

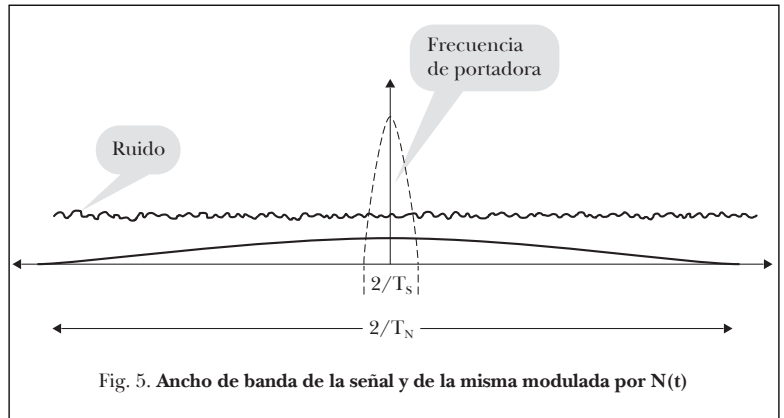


Fig. 5. Ancho de banda de la señal y de la misma modulada por $N(t)$

Por otra parte, la potencia de señal, tanto en una como en otra banda tendrá un cierto valor P y la relación de potencia de señal a potencia de ruido será para la banda $2/T_S$ igual a $PxT_S/2xN_0$, mientras que en la banda extendida será $PxT_N/2xN_0$. Por ejemplo si P (potencia de señal a la entrada del receptor) es de 10 mW, el ancho de banda correspondiente a $2/T_S$ es de 20Khz y la densidad espectral de ruido es $N_0 = 0,05 \mu W/hz$ la potencia de ruido en esta banda será $N = 0,05x10^{-6}x20x10^3 W = 1 mW$ y, por lo tanto, en esta banda la potencia de señal (10 mW) supera en 10 veces a la potencia de ruido.

Si ahora consideramos la banda dispersa y suponemos que es de 20 Mhz, la potencia de ruido será $N = 0,05x10^{-6}x20x10^6 W = 1 W$ y ahora la potencia de ruido supera a la de señal en 1.000 veces con lo que la señal resulta totalmente enmascarada por el ruido!

Por otra parte, la densidad espectral de señal en el caso del espectro distribuido será $\Delta P = 10 mW/20 Mhz = 0,5x10^{-3} \mu W$ y cualquier receptor normal de ancho de banda $2/T_S$ recibirá una potencia de señal (dispersa) igual a:

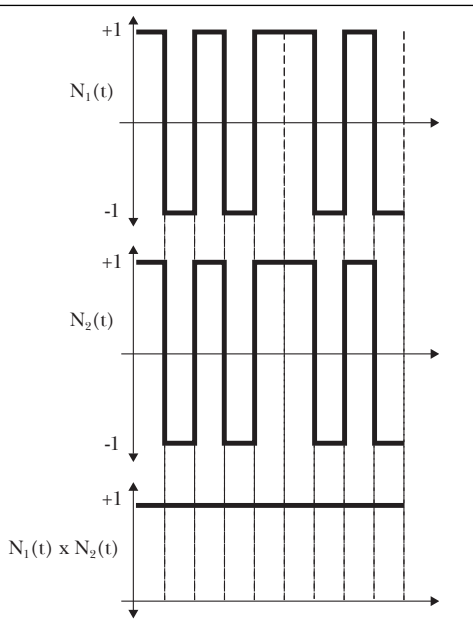


Fig. 6. Efecto de multiplicar dos señales ± 1 iguales en sincronismo

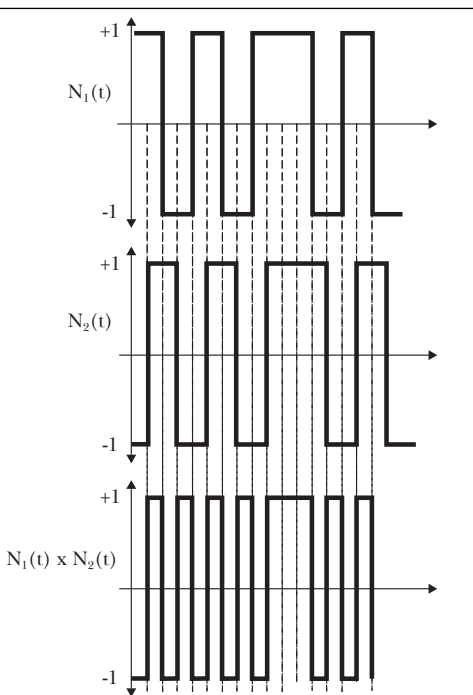


Fig. 7. Efecto de multiplicar dos señales ± 1 iguales y no en sincronismo

$0,5 \times 10^{-3} \mu\text{W} \times 20 \times 10^3 \text{ Hz} = 10 \mu\text{W}$, un valor que es muchísimo menor que el ruido en dicha banda.

Por lo tanto, el proceso ha generado una señal que ocupa un ancho de banda que es varias veces el ancho de banda necesario y a igual potencia de transmisión ha generado un espectro cuya densidad de potencia es muchísimo menor que la que corresponde al espectro original.

La señal así generada goza de dos propiedades importantes:

- Es muy difícil detectar cuándo se está o no transmitiendo a menos que se tenga un receptor adecuado al método de modulación, ya que sólo se percibe un débil ruido de fondo indistinguible de los "ruidos normales".
- Ocupa un ancho de banda muy superior a la realmente imprescindible.

Para la recepción, el receptor debe poseer la misma secuencia pseudoaleatoria $N(t)$ la que además debe estar en sincronismo con la del emisor. A la entrada del receptor se efectúa el producto de la señal recibida $M(t)$ con la $N(t)$ generada internamente es decir que la señal $R(t)$ que se obtiene luego de este proceso será $R(t) = N(t) \times M(t)$. Si observamos la figura 4, lo que se hace es hacer el producto de la forma de onda (B) con la forma de onda (C) y como es simple de verificar resulta la forma de onda (A), es decir la $S(t)$ original. Lo que ocurre es que siendo $M(t) = N(t) \times S(t)$ estamos haciendo el producto de $N(t)$ por $N(t)$ y estando ambas señales en sincronismo dicho producto vale 1 (ver figura 6). Dejamos por ahora cómo conseguir que la $N(t)$ generada internamente esté en sincronismo con la generada por el transmisor y analicemos lo que ocurre con el ruido y con la posible interferencia.

Indiquemos la señal de ruido como $I_N(t)$ la cual es directamente proporcional al ancho de banda (admitimos que es una señal aditiva, gaussiana y del tipo "blanco", es decir de densidad constante en toda la banda) y por lo tanto, a la entrada del receptor el ruido es proporcional al ancho de banda $2/T_N$ (que es muchísimo mayor que la que corresponde al ancho de banda $2/T_S$ de la señal original). Asimismo ingresará, si existe, la señal interferente $I_I(t)$. Por lo tanto al efectuar el producto que hemos señalado precedentemente tendremos una señal $S_T(t)$ que será $S_T(t) = N(t) \times M(t) + N(t) \times I_N(t) + I_I(t) = R(t) + N(t) \times I_N(t) + I_I(t)$. A la salida de este proceso existe un filtro que sólo deja pasar las señales comprendidas en el ancho de banda definido por $2/T_S$.

Como $R(t)$ posee un ancho de banda $2/T_S$ la señal útil pasa sin problemas, en cambio el término $N(t) \times I_N(t)$ es, como en análisis de la figura 4, también una dispersión en la banda $2/T_N$ del ruido, que al ser filtrado sólo dejará el aporte del ruido existente en la banda $2/T_S$, es decir que no empeora la relación señal a ruido (tampoco la mejora). Un proceso similar ocurre con la interferencia (sea ésta de banda angosta o banda ancha) pero, al "dispersar" su espectro en $2/T_N$ y luego filtrarlo dejando sólo el contenido en $2/T_S$ resulta en una atenuación de la interferencia en la relación dada por el factor M_N . Esto es aplicable aun a todo receptor que opere con otra secuencia pseudoaleatoria en la misma banda, lo que permite que el ancho de banda $2/T_N$ centrado en una frecuencia de portadora sea utilizado simultáneamente por distintos transmisores y receptores (el bien escaso que es el espectro radioeléctrico resulta así mucho mejor aprovechado). Es importante señalar que para que no exista interferencia entre aquellos que usan el mismo ancho de banda centrado en la misma portadora deben utilizar secuencias pseudoaleatorias que sean ortogonales entre sí (es decir que el producto de dos secuencias $N_1(t)$ y $N_2(t)$ den como resultado cero o próximo a cero).

El efecto de multiplicar la señal pseudoaleatoria usada en transmisor por una igual y en sin-

cronismo generada en el receptor se ilustra en la figura 6, y en la 7 el efecto de no estar en sincronismo.

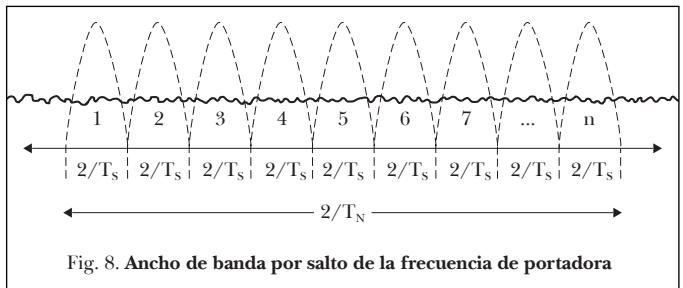
En conclusión, desde el punto de vista del receptor todo ocurre como si se hubiese transmitido en forma convencional la señal de información $S(t)$ con el agregado normal del ruido que corresponde a su banda de transmisión pero atenuando, en un valor igual a M_N , a toda señal interferente.

Obsérvese que independientemente de la sustancial ventaja de hacer extremadamente difícil el detectar una transmisión y de atenuar mucho cualquier intento de interferencia, sólo quien posea la secuencia pseudoaleatoria (y que genere la misma en sincronismo) será capaz de recibir la información, lo que implica una seguridad adicional (a pesar de ello, en las comunicaciones que requieren reserva la señal de información se criptografía).

Dispersión por Salto de Frecuencia (*Frequency Hopping Spread Spectrum*)

Otra de las formas de producir la dispersión del espectro consiste en modular en forma convencional la portadora para producir, en forma análoga a la vista, el salto de la frecuencia de portadora (es decir que se modula en frecuencia la portadora según una secuencia pseudoaleatoria) de manera de llevar el espectro de ancho de banda $2/T_S$ a distintas frecuencias de portadora generando un cubrimiento que abarca un ancho de banda igual a $2/T_N$. La figura 8 ilustra esta situación donde se han identificado con números 1, 2, ..., n los distintos "espectros" congruentes con los saltos de la frecuencia de portadora (la secuencia pseudoaleatoria hace que los "saltos" no sigan el orden con que los hemos numerado pero al cabo de un período T_N cada una de estas "bandas individuales" ha sido cubierta una vez).

Para comprender el efecto sobre un receptor común, supongamos que el mismo acepte una señal de ancho de banda $2/T_S$ y que esté centrado en una portadora que corresponda al "salto 3" de la figura. Supongamos también que la frecuencia de los saltos sea de 1.000 veces por segundo. En estas condiciones, cada $1/1.000$ de segundo el receptor convencional captará la señal. Por otra parte, si el ancho de banda correspondiente a $2/T_S$, es decir de la señal, es por ejemplo de 10 KHz y se emite con una potencia total de 10 watts, la potencia que recibirá el receptor convencional será equivalente a la que emitiera un transmisor de 10 watts/1.000, es decir como si el transmisor transmitiese con una potencia de sólo 10 microwatts.



Como antes, sólo aquel receptor que genere la secuencia pseudoaleatoria igual a la del transmisor y en fase con ella podrá recuperar correctamente la señal emitida.

En la actualidad, los saltos de la frecuencia de portadora se generan por medio de osciladores controlados numéricamente pero, por razones tecnológicas, tanto la velocidad de salto como el ancho de banda controlable tienen limitaciones que hacen que la Dispersión Directa de la Secuencia sea de más amplio uso (es más económica la implementación).

EL problema del sincronismo de las secuencias pseudoaleatorias

Como hemos señalado es imprescindible que la secuencia pseudoaleatoria generada por el receptor esté en sincronismo con la del transmisor. Para ello, en el receptor se realiza una comparación (correlación) entre la secuencia pseudoaleatoria fija que posee el mismo, y a través de un proceso matemático se determina, dentro de un tiempo establecido denominado Tiempo de Incerteza T_i , la correlación (es decir la igualdad de las señales pseudoaleatorias y su sincronismo) entre

la recibida y la generada por el receptor. En el proceso se desplaza en $T_N/2$ la fase del generador del receptor hasta completar el período de repetición de la secuencia del transmisor. Si transcurrido el T_1 no se obtuvo el valor predeterminado de correlación (de valor uno o muy próximo a él) se descarta la señal recibida y se inicia un nuevo proceso de búsqueda.

En general, ésta es la parte más compleja del receptor y a fin de disminuir el Tiempo de Incerteza se recurre a circuitos correladores en paralelo lo que aumenta la complejidad y costo del equipo (la explicación del detalle de este proceso escapa al objetivo de este artículo).

Algunas aplicaciones de la modulación por espectro distribuido

En general también se conoce a este tipo de modulación cuando se aplica a sistemas de comunicaciones como de Acceso Múltiple por División por Código (*Code Division Multiple Access* o CDMA).

Radar: Un radar que opere en dispersión por salto de frecuencia convenientemente diseñado hace que los detectores convencionales de señales radar resulten ineficaces. Para detectarlo es necesario acudir a receptores especiales conocidos como Medidores de Señales Electrónicas (Electronic Signal Measurement o ESM) los que requieren un tiempo relativamente importante para procesar la señal y decidir que en efecto están siendo iluminados por una emisión radar. Una aplicación específica corresponde al caso de radares de control tiro que deben operar sobre blancos a baja altura ya que, por el principio de operación del receptor, el mismo tiende a evitar la recepción de la señal por caminos múltiples (eliminando así el problema del efecto especular, en particular sobre el mar). En este caso, el sincronismo de la señal pseudoaleatoria del receptor debe ajustarse permanentemente en función de la velocidad radial del blanco.

Teléfonos celulares: Ésta es una de las aplicaciones más comunes del CDMA y en particular emplea la Dispersión Directa de la Secuencia.

Telecomunicaciones: Como se ha visto, el campo de aplicaciones en este aspecto es muy grande, en particular en aplicaciones militares y civiles (en este último caso por el mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico). Una ventaja adicional es que por el principio de operación del receptor tiende a minimizar los efectos de señales por caminos múltiples mejorando así la calidad de recepción.

Informatización sin cables: Mediante el uso de espectro distribuido es fácil y económico la interconexión en áreas cercanas de computadoras sin necesidad de utilizar costosos cableados y permitiendo un amplia flexibilidad para el sistema.

Sistema de Posicionamiento Global (GPS): Ésta es una típica aplicación. En ella, una constelación de 24 satélites orbitan la tierra cada 12 horas. Cada uno de ellos transmite dos portadoras en el rango de las microondas. Todo el sistema está controlado por el Departamento de Defensa de los EE.UU. el cual utiliza una determinada precisión en la posición en tres ejes (dos horizontales y uno vertical) y el tiempo particular para el área de defensa y con valores degradados para uso civil. Los receptores de tierra operan según el sistema CDMA. Para el posicionamiento bastan tres señales pero para disponer de un reloj preciso, cada satélite posee un reloj atómico que envía la señal a los receptores haciendo que estos últimos no requieran disponer de un reloj tan preciso.

Conclusiones

Si bien el uso del espectro distribuido ha significado y significa un gran avance en los sistemas de comunicaciones y el mismo presenta muchas ventajas, no puede obviarse algunas desventajas, algunas de las cuales requiere un análisis pormenorizado del proceso.

Una característica importante a tener en cuenta es que, aparentemente, el número de usuarios en una misma banda y portadora no está limitado por el número de códigos pseudoaleatorios sino por la superposición de “ruido” en la banda $1/T_S$ lo cual depende del factor de utilización de cada usuario (tiempo de emisión respecto de los intervalos de silencio) y del nivel de interferencia aceptable la que depende del tipo de datos (por ejemplo si es voz puede admitirse un nivel de interferencia superior al caso de emitir datos digitales).

En el caso de FH-SS si, como es usual, se realizan “saltos rápidos”, lo que implica que se “salta” de banda varias veces por cada bit de la señal, como un interferidor de banda ancha podrá sólo cubrir algunas de las bandas de salto sólo afectará a una porción del bit (por ejemplo si se salta cinco veces por bit, el interferidor podrá afectar dos de las bandas pero no las otras tres y por lo tanto mediante un circuito de decisión por mayoría es posible anular totalmente el efecto). Por ello, la señal interferente se atenúa, para el caso que hemos ilustrado en una relación T_N/T_S y como T_N es igual al número de bandas n por T_S la atenuación de la interferencia es igual al número n de bandas. En el caso FH-SS el concepto de ortogonalidad de las secuencias pseudoaleatorias implica que no haya dos usuarios que simultáneamente ocupen la misma banda (nos referimos a las bandas de salto).

En resumen:

1. La técnica del espectro distribuido es conocida desde 1940, se aplicó a las telecomunicaciones militares en la década del 50 y a partir de los 70 pasó al uso civil.
2. La característica fundamental de esta técnica es “dispersar” la señal en un ancho de banda que es varias veces la mínima necesaria.
3. El elemento clave de la técnica es la generación de una secuencia con características tales que se asemeje a una señal aleatoria (es generada por un algoritmo por lo que se la denomina pseudoaleatoria).
4. Existen dos técnicas principales: Dispersión Directa (DS-SS) y Salto de Frecuencia (FH-SS).
5. Natural resistencia a la interferencia siendo la DS-SS mejor para la interferencia de banda angosta continua en el tiempo y FH-SS mejor para la interferencia pulsante.
6. Resistente a la distorsión de señal recibida por efecto de caminos múltiples.
7. Resistente al desvanecimiento (fading) por utilización de una banda muy ancha.
8. Capacidad de multiusuarios en la misma banda y frecuencia de portadora.
9. Difícil detección de la emisión. ■

BIBLIOGRAFÍA

- Spread Spectrum Communications - R. Dixon - John Wiley & Sons
- Spread Spectrum Communication Techniques - Tsui & Clarkson - Electronics and Communication Engineering (feb. 1994)
- Digital Communications - Lee & Messerchmitt - Kluwer Academic Publishers
- Digital Communications - B. Sklar - Prentice-Hall
- CDMA Principles of Spread Spectrum Communication - Viterbi - Addison Wesley
- Coherent Spread Spectrum Systems - J. Holmes - John Wiley & Sons