

La radiodifusión en las bandas sub 30 MHz, el sistema DRM

Por: Sigfredo Pagel, Fernando Aguado y Fernando Isas

Dto. Teoría de la Señal
E.T.S.E de Telecom.
Universidad de Vigo

La utilización del espectro radioeléctrico en frecuencias por debajo de los 30MHz ha estado gobernado principalmente por la modulación de amplitud (AM) desde los principios de La Radio, es decir, desde hace más de 80 años. Se han realizado muchos esfuerzos a lo largo del siglo 20 para mejorar su calidad, siempre desde el punto de vista de los circuitos, sin embargo los métodos de modulación en dicha gama de frecuencias se han dejado intactos y, hoy en día, siguen siendo los clásicos. Quizá la razón de la longevidad de este sistema de AM sea su simplicidad y su relativa robustez: los receptores resultan sencillos y baratos: miles de millones de receptores en uso actualmente certifican esta popularidad.

Desde la introducción del "Compact Disc" por Phillips en 1982 el escucha se ha vuelto cada vez más exigente con el sonido lo que ha potenciado también la investigación en sistemas de Radio de mayor calidad, así apareció en Europa en 1990 la DSR (Digital Satellite Radio) aplicado a satélite en 12GHz y, también, se amplió la FM convencional a los sistemas RDS (Radio Data System) en las bandas normales de FM.

A la vista de la precipitación de los acontecimientos inmediatamente se detectó la necesidad de establecer un estándar que llegara a tiempo y evitara una atomización en los productos de los diversos fabricantes.

El proyecto Eureka, denominado Proyecto N° 147, estableció un estándar para Europa respecto de la denominada DAB (Digital Audio Broadcasting) que opera en frecuencias de la gama de VHF entre 47MHz y 230MHz. En estos sistemas se utiliza una modulación COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex).

La COFDM es una versión mas compleja del sistema de modulación denominado OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) donde los datos a transmitir se distribuyen sobre un gran número de portadoras

que, en general, puede llegar a ser bastante mayor a 1000.

En septiembre de 1996, en el marco del proyecto Eureka, se lanzó el "Proyecto N° 1559 denominado NADIB (Narrow Band Digital Broadcasting). El objetivo de este proyecto estaba orientado al desarrollo de un sistema de radiodifusión digital que aprovechara parcialmente la gama de frecuencias normalmente utilizada en la radiodifusión de AM por debajo de los 30MHz.

La gran cantidad de tareas que había por delante y su complejidad, tanto institucional como industrial, llevaron a la idea de crear un amplio consorcio internacional el 5 de marzo de 1998 (Guangzhou, China) se trata de DRM (Digital Radio Mondiale). En la actualidad dicho consorcio cuenta ya con más de 60 miembros entre instituciones y empresas dentro y fuera de Europa.

El estándar DRM emergente, de las acciones de este consorcio será el tema principal de este artículo.

El estándar DRM

El estándar DRM describe los cambios y modificaciones mínimas necesarias a efectuar en los transmisores de AM de Onda Larga (LF), Onda Media (MF) y Onda Corta (HF) para poder cubrir un servicio de radiodifusión con el nuevo sistema de modulación OFDM conservando en lo posible la ocupación espectral de los sistemas de AM.

Los canales de AM de onda corta presentan un ancho de banda de 10kHz, los anchos de onda media son de 9kHz en Europa y 10kHz en USA y el sistema debe diseñarse para dichos anchos de banda. Además se pretende que en un futuro exista la posibilidad de utilizar canales múltiples con 18kHz ó 20kHz, por ejemplo, para soportar una mejor calidad o realizar transmisiones en estéreo.

Con este estándar se trata de recuperar para la radiodifusión de calidad una banda de frecuencias

históricamente destinada a radiodifusión en AM y que no resulta apetecible a los operadores telefónicos, tampoco puede ser utilizada por los sistemas móviles razón por la cual no ha podido ser "fagocitada" por estos poderosos operadores.

El método de modulación propuesto en el proyecto DRM es el OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) y será uno de los temas a tratar aquí, pero antes habrá que explicar unos cuantos fundamentos que hacen a la base de este sistema.

Consideraciones sobre el canal ionosférico

Cuando se trabaja en la banda de HF podría pensarse que con un ancho de banda de 10kHz se estaría en condiciones de banda estrecha: esto no es estrictamente cierto. En el receptor suelen presentarse, además de la señal ionosférica principal, una o más reflexiones conteniendo la misma información pero que llegan al receptor con un cierto retardo respecto de la principal. Este hecho es habitual e inherente al medio que constituye el canal de comunicación en esta gama de frecuencias.

El fenómeno de la recepción en presencia de dos o más ondas provenientes de la misma fuente con diferentes retardos se conoce habitualmente como multitrayecto.

En la Figura 1 se muestra el caso en que el receptor recibe la onda principal, dibujada en línea gruesa, y una secundaria indicada en trazo discontinuo, donde la diferencia de longitud entre ambos trayectos hace que los retardos sean también diferentes.



Figura 1. Multitrayecto

En los sistemas de transmisión en HF que utilizan modulación AM portadora única, en presencia de multitrayecto y bajo determinadas condiciones, se produce un desvanecimiento intenso como consecuencia de la diferencia de fase destructiva debida al retardo entre la onda principal y la secundaria.

Cuando toda la información se transporta mediante una única portadora resulta una desventaja añadida que es la insuficiente robustez del histórico sistema de modulación AM^{NA1} que el sistema OFDM pretende paliar parcialmente como se verá más adelante.

El uso de múltiples portadoras, sus razones

El sistema OFDM utilizado en DRM combina la modulación digital con el multiplexado. En FDM varios usuarios multiplexan sus anchos de banda que no necesitan ser uniformes. En OFDM las señales provienen de la misma fuente constituyendo un subconjunto (partición) del ancho de banda total de un único usuario; las diversas partes (subconjunto) son multiplexadas con subportadoras ortogonales entre sí.

Para introducir este tema adoptaremos una idea intuitiva y didáctica utilizada por varios autores.

Supóngase que quiere transportar una carga que se puede fraccionar en tres sectores; se tienen dos opciones: 1) se contrata la empresa AM que transportará el total de la carga en un único camión de gran tonelaje o, 2) se utilizan los servicios de la empresa OFDM que fracciona la carga en tres sectores y los transporta en tres camiones medianos.

Ambas empresas transportan la misma carga, sin embargo si se analiza con más detalle surge inmediatamente que frente a un accidente en la ruta la empresa OFDM sólo perdería 1/3 de la carga, en cambio con AM se perdería toda la carga.

Esta analogía en términos de señales sería válida para el OFDM, sistema que combina múltiples subportadoras, ortogonales entre sí, pertenecientes a un único usuario. En el canal de transmisión (la ruta) un accidente equivale a un desvanecimiento profundo que con OFDM afectaría sólo a parte de la señal.

Más sobre los fundamentos

En el ejemplo de la Figura 1 se muestra la señal recibida a través de dos caminos diferentes, uno de ellos, el principal y, el otro, el secundario recibido con un cierto retardo respecto del principal. Cuando el retardo con que se recibe la señal secundaria es mayor que la duración de un símbolo no hay coincidencia de intervalos homólogos, (ver fig. 2).



A la señal secundaria interferente se la denomina Interferencia Intersímbolo ISI. Para una recepción normal la señal principal debe prevalecer sobre la interferente y sólo se podrán tolerar niveles bajos de interferencia de la señal secundaria.

Cuando el retardo relativo resulta menor que la duración de un símbolo, Figura 3, una parte se solapa con la señal útil y podrá actuar constructivamente reforzando la señal principal o destructivamente debilitándola (desvanecimiento), en la figura, la parte solapada oscura del símbolo anterior (n) de la señal secundaria actuará como interferencia (ISI) sobre el símbolo principal (n+1).



El solape parcial entre dos símbolos diferentes puede paliarse ajustando el periodo de símbolo. Más adelante se verá cómo se ataca el problema pero antes debemos saber algo sobre el principio de ortogonalidad.

Subportadoras ortogonales

Como se dijo antes, cuando se transmite en FDM cada canal con su ancho de banda asociado modula a una subportadora diferente y éstas se deben separar lo suficiente (Guarda) como para que las bandas no se solapen, de esta forma, el ancho de banda total resulta considerable.

En la Figura 4 se muestra como ejemplo un sistema FDM hipotético de 6 subportadoras con una guarda en frecuencia.

La utilización de un número elevado de subportadoras (100 ó más) ocuparía así un considerable ancho de banda. La recuperación de cientos de canales puede parecer complicada si se utiliza FDM



NA1. El sistema AM ha dado inmensas satisfacciones a los radioescuchas durante casi un siglo y aún sigue y seguirá dándolas, habiendo sido el principal sistema de comunicación de larga distancia durante décadas.

Figura 2 Recepción con señal secundaria con mucho retardo

Figura 4. Ejemplo de disposición de los canales FDM con 6 subportadoras

y podría pensarse que se podrían requerir cientos de filtros^{NA2}, sin embargo, las dificultades se soslayan si las portadoras se encuentran igualmente espaciadas en una frecuencia exacta $f_u = 1/T_u$, siendo T_u el denominado período de símbolo útil o activo utilizado por el receptor para integrar la señal demodulada.

En estas condiciones, se dice que las subportadoras forman un conjunto ortogonal y como resultado de ello los espectros de las diferentes subportadoras pueden solaparse parcialmente lo que permite reducir considerablemente el ancho de banda total del espectro.

NA2. Veremos luego que esta tarea se realiza por software mediante la transformada rápida de Fourier.

Figura 3. Retardo menor que la duración de símbolo

Figura 6. Espectro de un hipotético sistema de OFDM de 7 subportadoras

NA3. Estocástico: predice resultados en base a factores probabilísticos

La condición de ortogonalidad^{RB1} puede expresarse con fórmulas matemáticas lujuriosas pero, sencillamente puede decirse que si el producto escalar entre dos señales determinísticas es nulo se dice que dichas señales son ortogonales entre sí.

Si se tiene en cuenta la naturaleza aleatoria de las señales de comunicaciones de los sistemas OFDM, otra forma de definir la ortogonalidad es desde el punto de vista estocástico^{NA3}, en tal caso, puede establecerse que: si dos procesos aleatorios no están correlacionados (correlados) entonces se dice que son ortogonales entre sí.

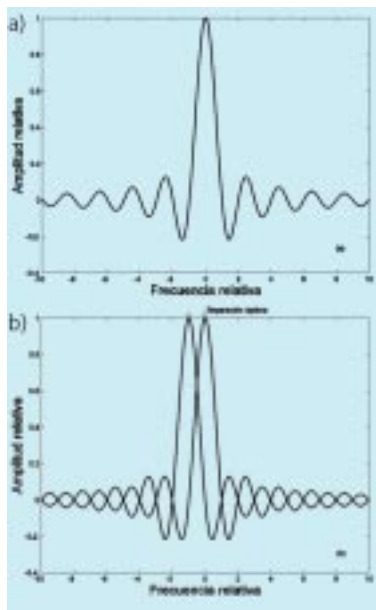


Figura 5. (a) Espectro de una portadora. (b) dos subportadoras con $f_s = 1/T_s$

Desde el punto de vista gráfico el espectro de frecuencias de cada subportadora puede describirse mediante una función:

$$\text{Sinc} = \text{sen}(x)/x$$

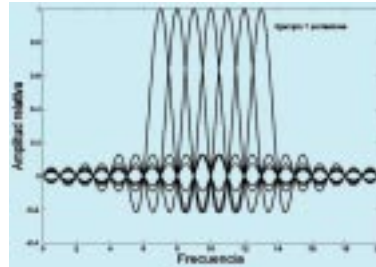
como se muestra en la Figura 5a.

La ortogonalidad se produce cuando cada subportadora se ubica a una distancia frecuencial:

$$f_s = 1/T_s$$

(donde T_s es el período de símbolo) de la anterior, se produce así una cancelación de los lóbulos como se observa en la Figura 5b.

Figura 7 Diagrama en bloques de un sistema OFDM básico



Por ejemplo, en el caso de acomodar el espectro de 7 subportadoras se tiene la Figura 6.

Implementación de un sistema OFDM básico

En la práctica se trabaja con una señal muestreada con una frecuencia de muestreo por encima de la frecuencia de Nyquist:

$$f_{Ny} (f_{Ny} \geq 2f_{m\acute{a}x})$$

de manera que la aplicación de la transformada rápida de Fourier en todos estos procesos es válida.

En los sistemas OFDM^{RB2} se utiliza la *transformada rápida de Fourier*: la transformada directa (FFT) para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y la inversa (IFFT) para pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.

Para mostrar el proceso en forma simplificada se partirá de una determinada constelación (dominio de la frecuencia) por ejemplo -una de las más utilizadas en DRM- la 16QAM. En el transmisor la señal en el dominio de la frecuencia es tratada por el bloque IFFT (transformada inversa de Fourier) que convierte la secuencia frecuencial en una

secuencia temporal como una suma de sinusoides como indica la Fig. 7.

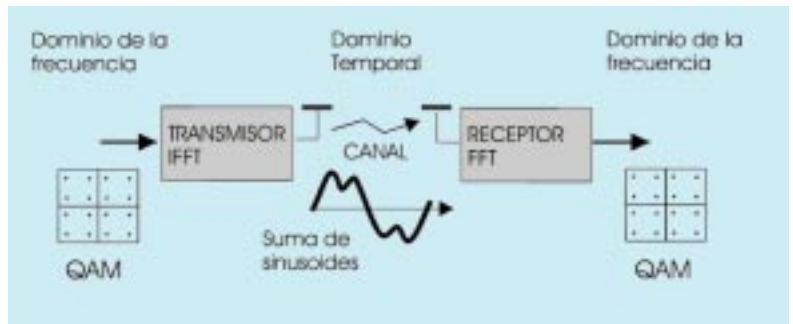
Dicha secuencia temporal se radia mediante la antena transmisora por el canal de comunicación (la ionosfera en este caso).

Cuando la señal es recibida en el receptor ésta pasa por el bloque de demodulación donde la transformada rápida de Fourier FFT la reconvierte en una secuencia frecuencial, es decir, teóricamente se recupera la constelación original lista para su reproducción.

Está claro que en un esquema tan sencillo, donde sólo hemos querido dar una idea sobre los fundamentos del sistema, hubo que dejar muchas cosas en el tintero, detalles que serán explicados en los párrafos siguientes.

Resguardo de la ortogonalidad

La ortogonalidad entre subportadoras -además de permitir acomodar un gran número de subportadoras (200 ó más) en un ancho de banda tan reducido como los 10kHz disponibles en el sistema DRM- resulta imprescindible a la hora de realizar la demodulación. En un sistema no ortogonal como el FDM clásico se necesitarían más de 100 filtros para separar las más de 100 subportadoras, el proceso se simplifica con OFDM donde la transformada rápida de Fourier FFT se hace cargo del proceso de filtrado mediante un buen software y un PC con capacidad de procesamiento en tiempo casi real.



Volviendo a la Figura 3 donde el área de solapamiento (indicado en sombreado negro) producía interferencia entre símbolos ISI, este mecanismo destruye la ortogonalidad debido a la aparición, dentro del intervalo de evaluación, de señales secundarias extra intervalo.

Para preservar la ortogonalidad se ha optado por alargar el período de símbolo agregando un intervalo de guarda marcado en sombreado gris, Figura 8, de manera tal que las reflexiones secundarias, peor caso, no interfieran de forma destructiva. Por ejemplo, el período del símbolo secundario (n) actúa sólo sobre el período principal (n) y no sobre (n + 1) como ocurría en la Figura 3.



La duración del intervalo de guarda debe elegirse de tal manera que siempre supere el máximo retardo de la posible señal secundaria debida al multitrayecto.

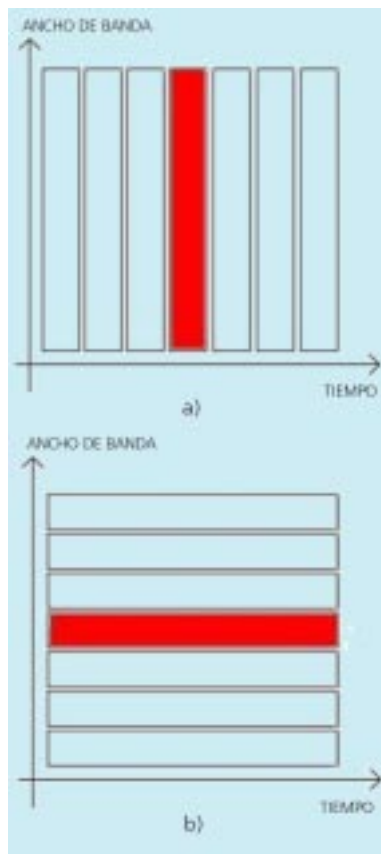
La duración, o período de símbolo, T_s estará formado por la suma del intervalo útil T_u y el intervalo de guarda T_g , es decir,

$$T_s = T_u + T_g \quad [1]$$

En el sistema DRM la duración del intervalo de guarda generalmente, salvo casos extremos, se adopta entre 1/5 y 1/10 de la duración del símbolo.

Para transmitir una determinada cantidad de información entra en juego el producto: Ancho de banda \times Intervalo de tiempo de transmisión, es decir, se puede transmitir la misma cantidad de información con un menor ancho de banda si se aumenta correspondientemente el tiempo de transmisión de una determinada señal.

Este principio se aprovecha en el sistema OFDM al repartir el flujo de la información sobre un gran



misma figura y, de esta forma, la cantidad de información transmitida se mantiene inalterada respecto de (a).

Figura 9. Producto Ancho de banda por duración del símbolo

La arquitectura DRM - extremo transmisor

En la Figura 10 se muestran de forma simplificada los principales procesos que llevan a la conformación de la señal FDM utilizada para excitar al modulador. Estos procesos se realizan en el terminal transmisor.

El sistema es capaz de ofrecer cuatro prestaciones de audio y de datos codificados. Para adaptar el sistema a la capacidad de transmisión disponible y al contenido del programa que puede ser de música o locución se dispone de diversos tipos de codificación.

Veamos con un poco más de detalle el proceso en su conjunto y los diferentes pasos, en grandes líneas, que se deben realizar para poder transmitir una señal de audio digital de acuerdo con el esquema de la Figura 10.

Figura 8. Introducción de un intervalo de guarda

número de subportadoras con un pequeño ancho de banda asociado. En otras palabras, en lugar de transmitir símbolos contiguos de corta duración con un ancho de banda grande, como en la Figura 9a, se transmiten muchos símbolos simultáneos de larga duración como en (b) de la

En el extremo transmisor la señal de audio que, obviamente, es analógica debe convertirse primero a la modalidad digital. La tasa binaria (velocidad de bits) en bruto que surge de este proceso de digitalización suele ser excesiva para un ancho de banda tan reducido como el de 10kHz de que se dispone. Se necesita reducir esta tasa lo que se consigue con la

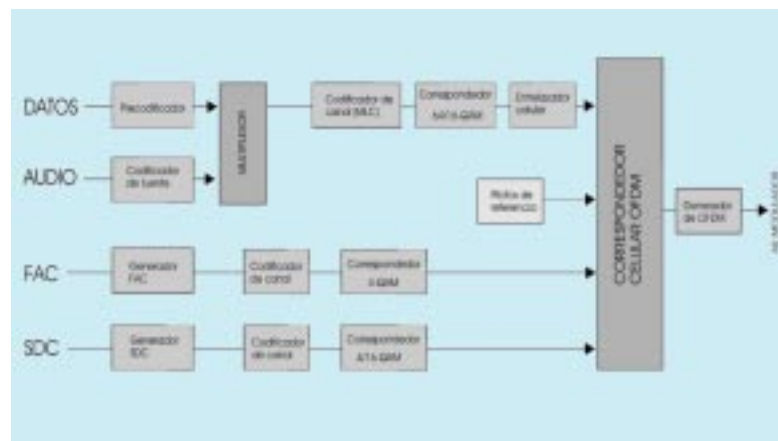


Figura 10 Formación de la señal DRM en el extremo transmisor

denominada codificación de fuente. Los datos codificados de fuente se multiplexan con los demás datos que forman la carga útil (payload). Este multiplexado de la carga útil sufre entonces una codificación del canal para mejorar su robustez a costa de un aumento de la tasa de bits (tasa binaria). La codificación es del tipo multinivel MLC (Multilevel Coding) con dos posibles niveles de protección: UEP (Unequal Error Protection) y modulación jerárquica.

Después de esta codificación los datos son correspondidos (mapping) con la constelación pertinente (16 ó 64QAM). Luego se le aplica un entrelazado celular para finalmente combinarse en un correspondedor con los canales auxiliares.

El multiplex

El canal principal^{NA4} MSC (Main Service Channel) es el de mayor capacidad, lleva la carga útil y presenta cuatro flujos que pueden ser de audio o datos. El audio, puede ofrecerse en una o varias lenguas, existe sin embargo cierta flexibilidad en la asignación de los flujos de información disponibles donde se incluyen también los datos.

El sistema dispone de dos canales auxiliares, el canal de acceso rápido FAC (Fast Access Channel) y el canal de descripción del servicio SDC (Service Description Channel). Estos canales aportan información sobre la configuración para indicarle al receptor cómo debe realizar la decodificación y, también, información sobre el servicio, tales como, el nombre de la estación recibida, frecuencias alternativas, etc.

Respecto del FAC, está constituido por 64 bits por cada trama de 400ms y se pretende que sea prontamente decodificado por el receptor (durante el barrido inicial) dado que aporta un determinado número de datos que se repiten continuamente y son de fundamental importancia en esta etapa del proceso. Informa al

receptor sobre el ancho de banda, el tipo de modulación utilizada en el SDC y MSC, etc., etc.

Por su parte el SDC contiene más datos enviados en un ciclo repetitivo de mayor duración hecho este último que conserva la eficiencia del sistema. Contiene la identificación del servicio disponible en el MSC (Main Service Channel) con información adicional que indica al receptor la forma de decodificar cada servicio. Será aquí donde se informará sobre frecuencias alternativas y la programación de frecuencias.

Además, el sistema DRM utiliza celdas (células) piloto de referencia, estas celdas pueden ser de tres tipos: 1) de referencia de frecuencia; 2) de referencia de temporización; 3) de referencia de ganancia.

Se darán más detalles sobre estas celdas cuando se estudien los parámetros de transmisión.

Codificación de fuente

Se trata de uno de los primeros bloques donde se procesa el audio en el sistema de transmisión, Figura 10. Tal como se dijo antes, la capacidad del sistema DRM está limitada por el ancho de banda de unos 10kHz hecho que conduce a una tasa binaria de hasta 24kbit/s^{NA4} en el caso más favorable y, en condiciones más desfavorables de propagación, puede reducirse hasta unos 10kbit/s. Una tasa tan baja como 24kbps o menor es poco compatible con una buena calidad de sonido. Se necesitará entonces algún sistema de codificación de fuente que permita mantener una buena calidad con una tasa binaria relativamente baja.

El sistema DRM ha adoptado las técnicas de codificación existentes y las ha adaptado cuidadosamente, una de ellas, se denomina AAC (Advanced Audio Coding) y, la otra, SBR (Spectral Band Replication), estos mecanismos forman parte del estándar MPEG-4.

La técnica AAC analiza el espectro de audio en detalle y representa cada parte sólo con la calidad mínima necesaria para satisfacer las exigencias del oído, descartando todo enmascaramiento en la zona de los sonidos más intensos.

La técnica SBR sintetiza los sonidos que se encuentran en la octava superior del espectro que suelen ser de dos tipos:

- 1) tipo simil ruido (platillos, silbidos, maracas, etc.) y,
- 2) tipo periódicos (armónicos o sobretonos de los instrumentos musicales, etc.).

La distribución espectral de las frecuencias más altas de la banda de audio es separada del resto del audio y analizada en el transmisor, se la separa en las dos categorías anteriores 1) y 2) y se la prepara agregándole unos pocos datos de información lateral (side information) para referencia del decodificador en el receptor.

La restante información –sin la banda alta recientemente removida– pasa por el codificador AAC donde se codifica de forma convencional.

El “milagro” se realiza en el receptor donde un decodificador AAC decodifica primero el audio principal y luego el decodificador SBR añade una banda superior sintética apoyándose en las instrucciones contenidas en la información lateral. Los sobretonos (parte periódica) salen de la información AAC, mientras que el simil ruido se obtiene a partir de generadores de ruido. ¡Todo en tiempo casi real! De donde surge la necesidad de una gran capacidad de procesado en el PC.

Codificación de canal

Otro de los bloques puestos en evidencia en la Figura 10 es el codificador MLC del canal de información que pasaremos a explicar ahora.

Cuando se trabaja en la banda de HF se utiliza el canal de transmisión ionosférico^{NA5} que experimenta, como se vio, una propagación

NA4. Se utilizará también para kbit/s la notación kbps.

NA5. No debe causar confusión el hecho de que se utilice la palabra canal para dos conceptos tan diferentes como lo son el canal de información que constituye uno de los bloques internos del sistema, y el canal de transmisión o canal ionosférico externo.

multitrayecto. En tales condiciones pueden producirse retardos de 1ms o más entre la onda principal y la/s secundaria/s. Esta situación hace que el sistema DRM sea apto para el uso del sistema COFDM (OFDM codificado); esta codificación se refiere al codificado FEC (Forward Error-correction Coding). Este sistema aporta una redundancia que permite que el receptor pueda hacer frente al ruido, a las consecuencias del desvanecimiento, etc. Se trata de una codificación bastante elaborada denominada MLC (Multi-level Coding) y que se observa en el bloque homónimo de la Figura 10. Se suele utilizar un entrelazado en frecuencia y en tiempo.

El sistema DRM en su versión COFDM transmite sus datos codificados sobre un número determinado de subportadoras, de esta forma cada subportadora sólo tiene que conducir una pequeña parte de la información lo que reduce considerablemente las consecuencias del multitrayecto.

Además, las subportadoras se encuentran igualmente espaciadas en frecuencia en base al criterio de la ortogonalidad ($\Delta f = 1/T_s$), Figura 5, lo que evita, en gran parte, la modulación cruzada.

El proceso de modulación y demodulación se realiza de acuerdo con el esquema básico de la Figura 7, utilizando simplemente la transformada rápida de Fourier en sus dos versiones, la inversa IFFT y la directa FFT.

Entrelazado

Otro de los bloques importantes que se observan en la Figura 10 es el del entrelazado de celdas que aparece en la mayoría de los sistemas que utilizan FEC. Normalmente el decodificador puede manejar una considerable cantidad de bits erróneos, sin embargo cuando esa cantidad de bits erróneos que recibe se encuentran todos en el mismo intervalo el sistema deja de funcionar y la infor-

mación se deteriora perdiéndose en su conjunto.

El desvanecimiento selectivo puede producir este tipo de deterioro cuando actúa sobre grupos de bits vecinos, para evitarlo se utiliza el entrelazado. Este sistema desacomoda los bits contiguos de la señal original a diferentes posiciones, de esta forma, un posible desvanecimiento no habrá afectado brutalmente la señal cuando ésta sea reconstruida en el receptor.

El sistema DRM emplea entrelazado en frecuencia y en tiempo y se realiza fundamentalmente sobre una base de celdas utilizando convolución.

Parámetros de transmisión

Como se dijo antes, el canal de transmisión en la banda de HF, la ionosfera, es un canal muy variable y, en base a esta característica, se ha tratado de encontrar un compromiso entre la robustez necesaria y la calidad de la información que con el sistema DRM se pretende hacer llegar al usuario. Es así que se han previsto 4 modos de transmisión⁴ como se muestra en la Tabla 1.

Parámetro	Modo			
	A	B	C	D
N portadoras	226	206	118	88
T_s (ms)	24	21 1/3	14 2/3	9 1/3
T_g (ms)	223	513	513	713

Para explicar estas modalidades habrá que entender primero los tipos de posibles deterioros que se pueden producir en el canal de transmisión (ya sea de onda de superficie o ionosférica).

En las mejores condiciones se tiene lo que ha dado en llamarse un canal de transmisión gaussiano donde las condiciones de propagación son muy regulares sin desvanecimientos profundos. Este tipo de propagación se da en onda larga y onda media donde predomina la

onda superficial para ello se ha pensado en el "modo A". En estas condiciones el sistema OFDM se transmite en un ancho de banda de 10kHz con el mayor número de subportadoras ($N=226$). El período de símbolo viene dado por la Ecuación 1 y, como surge de la tabla anterior, de los 26 2/3 ms de la duración de un símbolo T_s el período útil T_u es de 24 ms dejándose 2 1/3 ms para el intervalo de guarda T_g .

De esta forma el modo A lleva la velocidad de transmisión más alta, del orden de los 20kbps o mayor y, por ende, se tiene el mejor aprovechamiento de los datos pero su robustez es baja, por lo que este modo sólo se usa en canales gaussianos.

En las frecuencias más altas de la onda media y en la banda de HF la propagación depende de la ionosfera (canal ionosférico) donde las condiciones de propagación son bastante peores que las gaussianas anteriores. Se habla entonces de un canal Rice o, incluso, de un canal Rayleigh donde el desvanecimiento (fading) debido al multitrayecto empeora notoriamente las condiciones de recepción.

Para conseguir unas contramedidas que preserven una robustez compatible con una relativa buena calidad se hace necesario aumentar el intervalo de guarda a costa del período útil, ya que el período T_s seguirá siendo el mismo, Ec. 1. Esto es lo que se hace en los modos B, C y D, por ejemplo en el modo B el período útil $T_u=21$ 1/3 mientras que el tiempo de guarda se aumenta a $T_g=5$ 1/3.

Para las peores condiciones de propagación se ha descrito el modo D que lleva la más alta robustez pero la velocidad de transmisión (tasa de bits) se reduce notablemente (a una tasa binaria de 10kbps o menor). Se observa, en este modo, que el tiempo de guarda se aproxima al tiempo útil y se transmiten sólo 88 subportadoras. De esta forma, en el modo D la calidad se degrada notoriamente ya que el ancho de banda sigue

Tabla 1. Parámetros de transmisión más importantes

siendo el mismo, 10kHz, pero la cantidad de información que se puede transmitir en ese ancho de banda resulta mucho menor, véase la explicación de la Figura 9.

La trama

Una supertrama de transmisión en el sistema DRM está formada por tres tramas de transmisión, cada una de estas tramas contiene N_s símbolos de OFDM. Esos símbolos, a su vez, contienen datos e información de referencia. El número N_s de símbolos depende del modo de transmisión, para los modos A y B $N_s=15$, en el modo C es $N_s=20$ y en el más robusto, el D, $N_s=25$.

Concretando, la trama de transmisión del sistema OFDM contiene celdas (células) de datos, celdas de control y celdas piloto, las celdas de control son las FAC y SDC.

Las celdas piloto cumplen dos funciones importantes, la primera, con fines de sincronización de trama, frecuencia y temporización, la segunda está relacionada con la estimación del canal para una correcta demodulación.

Las celdas de referencia de frecuencia son tonos piloto de fase continua que se transmiten en determinadas subportadoras en las siguientes frecuencias a partir de cero: 750Hz, 2250Hz y 3000Hz. Son excelentes auxiliares para estimar frecuencias.

Por su parte, las celdas de referencia de temporización se instalan

sólo en el primer símbolo de cada trama. Se las utiliza con fines de sincronización de trama.

Finalmente, las celdas de referencia de ganancia son las más abundantes y se encuentran esparcidas en dirección de la frecuencia y en dirección del eje de tiempos y están destinadas a la estimación de la función de transferencia del canal.

No entraremos en detalle sobre la ubicación de las celdas piloto, sin embargo diremos que, dado que el sistema DRM es un sistema de transmisión coherente, para una detección coherente se requiere una correcta estimación de la función de transferencia del canal y las celdas piloto son de fundamental importancia en esta tarea. La dispersión del efecto Doppler y la de los retardos define la cantidad necesaria de estas celdas para conseguir una determinada robustez.

En la Figura 11 se muestra una supertrama OFDM donde se han resaltado los varios tipos de celdas.

centrada en 12kHz. Esta señal con su banda asociada, generalmente de un ancho de 10kHz, es aplicada a la entrada de sonido de un PC (micrófono o línea).

Luego, mediante un programa (software) adecuado, la señal es procesada obteniéndose como producto final, a la salida de la misma placa de sonido, el audio contenido originalmente en la modulación. Esta es la razón por la cual la tarjeta de sonido debe soportar el modo duplex (full duplex).

Además, en la pantalla se exhiben ciertos datos que contienen información sobre la señal transmitida.

Para formarnos una idea de los procesos que se deben realizar en el receptor daremos un esquema de bloques donde se mezclan los circuitos (hardware) y las acciones programadas o software.

En la Figura 12 se muestran las mencionadas acciones en grandes líneas. La circuitería (hardware en inglés) de RF se encarga de hacerle

Figura 12. Arquitectura básica de un receptor DRM

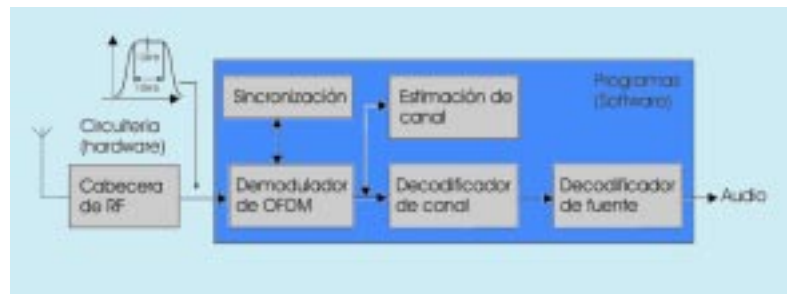
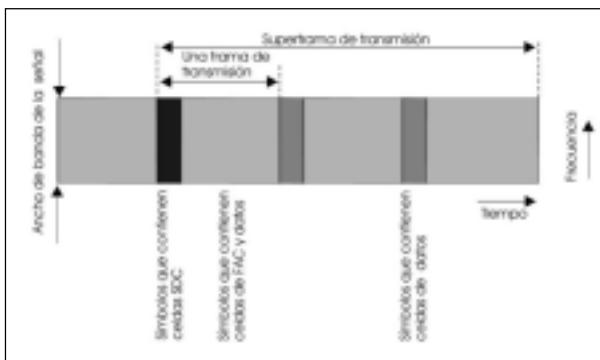


Figura 11 Detalle de una supertrama OFDM



Consideraciones sobre el receptor

El receptor recibirá el múltiplex en RF y deberá efectuar sobre él todos los procesos inversos a los realizados en el transmisor para obtener finalmente una señal de audio y de datos.

En el estado actual de la técnica, la señal que se recibe en antena entra a una unidad frontal de RF donde sufre una serie de procesos de conversión en frecuencia hasta obtener finalmente una salida de RF

llegar al PC el ancho de banda de 10kHz centrado en 12kHz sin sobrecargas.

La antena recibe la señal modulada OFDM y la cabecera de RF que es un delicado receptor de comunicaciones con bajísimo ruido y distorsión también muy baja convierte la señal a una frecuencia intermedia de 12kHz. Esta señal así convertida entra al PC donde se la "desprocesa".

Primero se la demodula en forma sincronizada de acuerdo con las instrucciones contenidas en la información recibida.

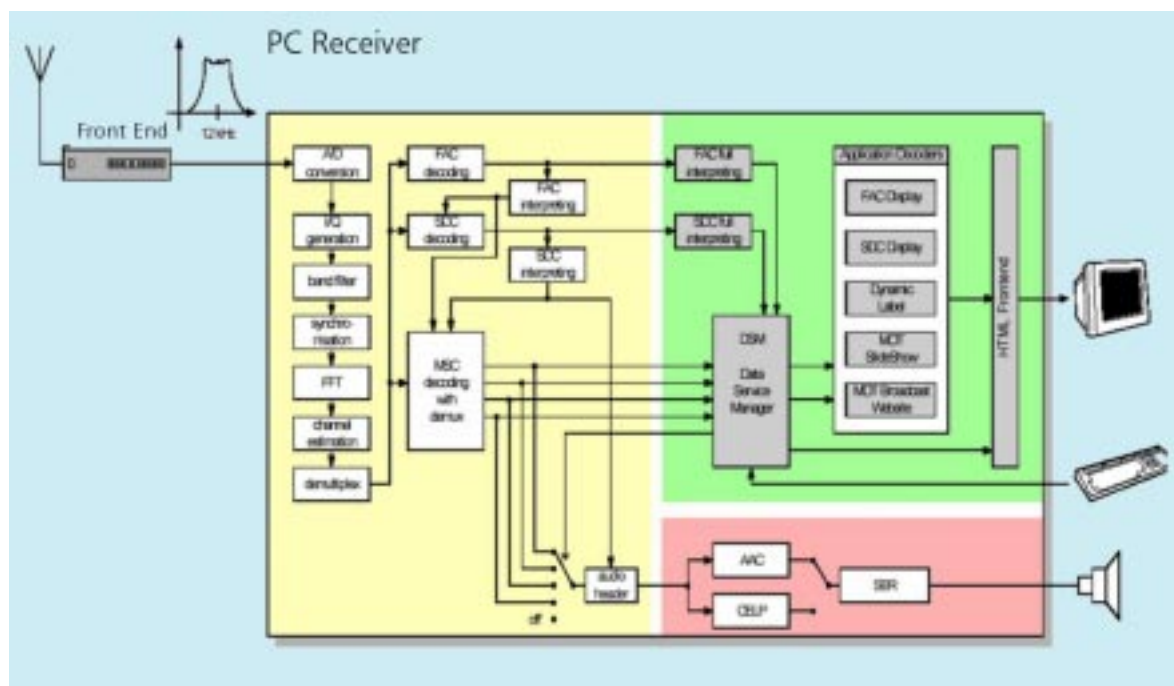


Figura 13 Arquitectura del programa DRM del instituto FhG

Después de la demodulación, se realiza una estimación de canal para permitir el ecualizado y finalmente poder decodificar tanto el canal como la fuente.

Con más detalle, por ejemplo, el programa software DRM FhG realiza las operaciones indicadas en la Figura 13 obtenidas directamente de las especificaciones del laboratorio FhG.

Obsérvese en la Figura 13 que el proceso de recepción es el inverso al de transmisión de la Figura 10. La señal analógica llega al PC centrada en 12kHz donde se le aplica una conversión A/D para generar la constelación, se filtra y sincroniza la señal para aplicarle la transformada rápida de Fourier FFT.

Luego de la estimación del canal se demultiplexa la señal para separarla en sus tres canales originales: el SDC, el FAC y el principal MSC. La información de cada uno de estos canales de inteligencia, una vez interpretada y decodificada, es bifurcada, por una parte, los datos son administrados por un bloque denominado Data Service Manager y, por otra, el audio es derivado a un bloque de

cabecera de audio y conducida a la tarjeta de sonido.

Resumen

El estándar DRM está destinado a la utilización de las bandas por debajo de los 30MHz y se pretende una calidad equivalente a FM con menor ruido. Está basado en un canal de un ancho de 10kHz o de ancho doble para recepción en estéreo.

La transmisión se realiza sobre un canal principal MSC y los dos canales auxiliares FAC y SDC para establecer las condiciones de recepción. Se utiliza generalmente la modulación digital en 4QAM para el FAC, para el SDC 16QAM o 64QAM lo mismo que para el MSC; el multiplexado es el OFDM adaptado a este tipo de transmisión.

Se prevén 4 modos de transmisión, el más robusto de 88 subportadoras y el de mayor calidad, para canales gaussianos, con 226 subportadoras.

El multiplexado OFDM, la condición de ortogonalidad⁵, el intervalo de guarda y la arquitectura del sis-

tema tanto para la transmisión como para la recepción son los conceptos más importantes desarrollados en este capítulo.

Referencias bibliográficas

- RB1. Louis Litwin and Michael Pugel. The principles of OFDM. Radiofrequency Signal processing. January 2001.
- RB2) RNE (Radio Nacional de España, S.A.). Proyecto de especificación y pruebas de un sistema experimental para el desarrollo de la radiodifusión sonora digital terrenal en España.
- RB3) M. Zumkeller. The Future of Digital Broadcasting in the AM Bands. Sony International. E-mail zumkeller@sony.de.
- RB4. F. Hofmann, Ch. Hansen, and W. Schäfer. Digital Radio Mondiale (DRM) Digital Sound Broadcasting in the AM Bands. IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 49, N° 3, september 2003.
- RB5) J. H. Stott. The How and Why of COFDM. BBC Research and Development.