

# Modulación y densidad espectral

Por Juan Navalpotro



**Juan Navalpotro**, trabajó once años (desde 1962) en Telefonken Ibérica, los seis últimos en el Laboratorio de Desarrollo de TV Color, otros seis años en Honeywell SA dedicado a la instrumentación y ordenadores de control de procesos industriales en tiempo real, un año en PESA y veintidós años con Tektronix Española SA. En los seis últimos años ha representado a Tektronix en diversos organismos internacionales como el DVB (UER), UIT y 3GPP (ETSI). Actualmente es Director Gerente de Abacanto Digital SA, compañía que representa a Tektronix, Albalá Ingenieros, Z-Technology, IneoQuest y Anritsu [www.abacantodigital.com](http://www.abacantodigital.com)

*En la presente Edición, publicamos la primera parte de una serie de tres, del excelente trabajo "Modulación y densidad espectral" de Juan Navalpotro. En el mismo, se aborda desde una perspectiva eminentemente práctica, las enormes posibilidades que la Digitalización y el Tiempo Real, por solo citar dos de sus más relevantes características, aportan a los modernos Analizadores Espectrales, muy especialmente en el estudio y medición de señales de Comunicación Digital. La vasta experiencia del autor sobre estos temas, así como su improbable trabajo de campo, puesto de manifiesto en los excelentes espectrogramas que ilustran esta serie, permitirán al estudioso lector menos avezado en estas lides, obtener una muy impagable información.*

*En el presente número, el autor aborda las medidas sobre señales moduladas analógica y digitalmente, dejando para los próximos las medidas CCDF en las señales digitales y analógicas, así como el análisis detallado de las particularidades de los sutiles detalles de algunas modulaciones digitales, utilizando el espectrograma tanto en su funcionamiento en tiempo real como en muestreo espectral.*

## Las modulaciones analógicas

Las modulaciones analógicas se caracterizan por su relativa sencillez de ejecución pero se admite que hacen un uso poco eficiente del espectro disponible.

La modulación de amplitud se viene usando con diversas variantes como es la modulación con doble banda lateral (la más sencilla, y quizás por ello, la más usada), la modulación con portadora suprimida, que permite un mejor aprovechamiento de la potencia total transmitida a costa de una mayor complejidad en los receptores, la modulación con

banda lateral única, con y sin portadora, o portadora atenuada y la modulación con banda lateral vestigial, que se viene usando hasta nuestros días en la televisión analógica y en la televisión digital según el sistema ATSC empleado en Estados Unidos. Estas modalidades con banda lateral parcialmente suprimida permiten hacer un mejor uso del ancho de banda disponible, pero ello implica que los receptores utilicen procedimientos con desmodulación sincrónica en lugar de envolvente para minimizar algunos de los efectos causados con la supresión total o parcial de una banda lateral.

La figura 1 representa una señal de radio de onda media con modulación de amplitud de doble banda lateral y su espectrograma. Obsérvese que la ocupación del espectro es variable y depende del contenido de la señal de audio, tanto en potencia como en la distribución de frecuencia. Este aspecto variable se aprecia mejor en el espectrograma que en el propio espectro, ya que dicho espectrograma proporciona una visión de la evolución temporal del espectro, concretamente se presentan 87 tramas espectrales en el

espectrograma, de los cuales, la trama espectral número 39 es la presentada en el espectro de la parte superior.

La potencia total comprendida en cada banda lateral puede alcanzar hasta un cuarto de la potencia de la portadora, y ambas sumadas pueden aportar la mitad de dicha potencia (por ejemplo, con modulación sinusoidal del 100%).

La modulación de amplitud se sigue utilizando mucho en la actualidad y la modulación de la portadora de vídeo en la difusión de TV analógica sigue siendo un buen ejemplo.

La figura 2 representa una señal de TV analógica y puede verse que es un compendio de diferentes tipos de modulación, desde la AM con banda vestigial (vídeo), la AM en cuadratura con portadora suprimida (QAM de la portadora de color), la FM (sonido analógico) y en algunos casos, opcionalmente, la modulación digital DQPSK para la señal de audio estéreo digital NICAM.

Si se analiza en detalle la modulación de vídeo se puede comprobar que no se ocupa el espectro con igual potencia a lo largo del ancho de banda asignado a vídeo. La potencia se encuentra distribuida alrededor de

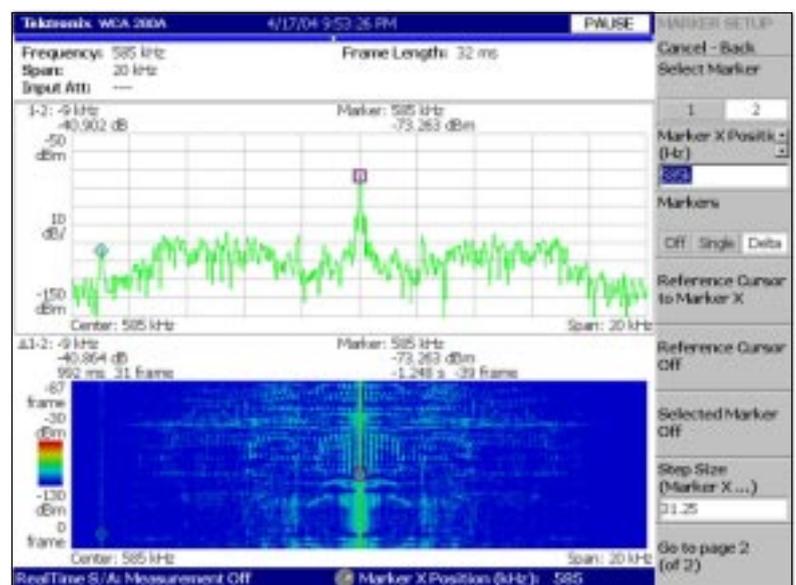
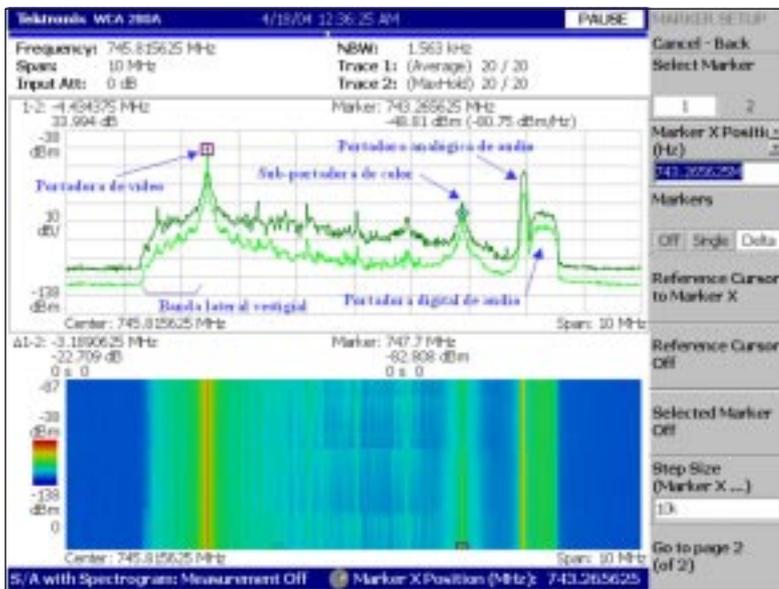


Fig. - 1 Espectro y espectrograma de una emisora de Onda Media (AM, Modulación de Amplitud)



situada a 4,43 MHz por encima de la portadora de vídeo.

Al igual que no se ocupa el espectro con igual potencia a lo largo del ancho de banda asignado a vídeo, tampoco la distribución de potencia es fija a lo largo del tiempo pues, aunque sigue concentrada en su mayor parte en líneas correspondientes al barrido, depende del contenido de vídeo, véase la figura 4. Las escenas oscuras de la imagen se transmiten con gran potencia, mientras que las escenas más claras requieren menos potencia (modulación negativa), las escenas complejas, es decir con mucho detalle, distribuyen su espectro por toda la banda asignada, mientras que las señales sencillas, es decir más "planas" como suelen ser los dibujos animados, concentran su potencia en los alrededores de la portadora de vídeo y/o de la subportadora de color.

La figura 4 muestra el espectrograma, tomado en tiempo real, del intervalo de borrado vertical de la imagen, en el que la señal de luminancia es del nivel de negro (máxima potencia del transmisor) pero con poco contenido de frecuencias altas, la energía transmitida está concentrada alrededor de la portadora de vídeo y el resto del espectro de vídeo está prácticamente vacío, como puede verse en la zona marcada por las dos líneas horizontales dibujadas sobre la figura. La adquisición fue de un segundo y se tomaron 2.500 tramas espectrales consecutivas de

líneas espectrales que son múltiplos de las frecuencias de líneas (barrido horizontal) y tramas, o campos, (barrido vertical) de las imágenes de TV, estas líneas espectrales son más potentes cuanto más próximas están a la portadora de vídeo.

En la figura 3a se ve el detalle del entorno de la portadora de vídeo (Canal 49 en 695,25 MHz) con la potencia distribuida en líneas espectrales separadas en 15.625 kHz que corresponde a la frecuencia de líneas, cada una de estas líneas espectrales tiene unos lóbulos de potencia a su alrededor que corresponden a la potencia de otras líneas espectrales separadas 50 Hz entre sí, que es la frecuencia de tramas (dos tramas por imagen) y que, en esta figura 3a, no están resueltas como líneas aisladas dados el Span de frecuencia y filtro de resolución seleccionados. Entre medias de todas estas líneas espectrales se encuentran todas las demás componentes de señal de vídeo que no tienen una correlación exacta con las frecuencias indicadas.

Esta distribución de potencia en líneas espectrales discretas es lo que permitió pasar de la TV monocroma a la TV en colores usando el mismo ancho de banda que el utilizado para

la TV en B/N. El espectro de la señal de luminancia tiene su máxima potencia entorno a la portadora de vídeo y a intervalos discretos de frecuencia, por lo que se puede situar la información de color modulando a una subportadora situada en la parte alta del espectro e imbricada entre las líneas espectrales de luminancia. Esto se hace modulando la subportadora con una modulación del tipo QAM analógica (es decir, en cuadratura con portadora suprimida) que lleva la información de las dos componentes de color (B-Y y R-Y respectivamente). Esta subportadora de color está centrada en la figura 3b y en el caso del sistema PAL, usado en España (y gran parte de Europa), está

Fig.-3 Espectro y espectrograma en las proximidades de la portadora de vídeo y de crominancia

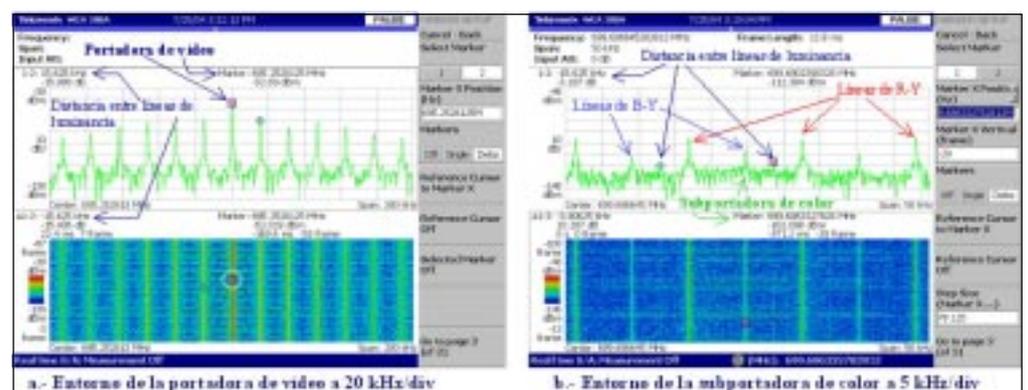
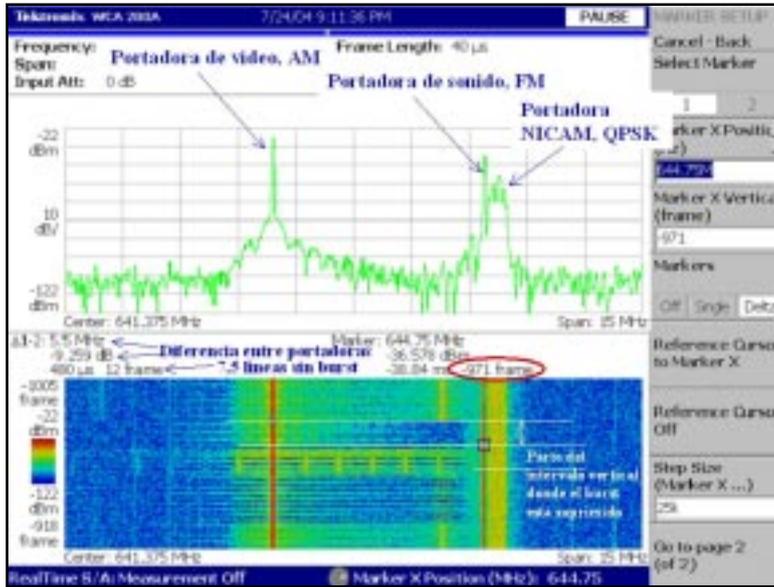


Fig.-4 El análisis en tiempo real de un espectro de TV (trama 971) de las tramas consecutivas tomadas en el espectrograma, que ilustra un detalle de la evolución espectral durante el intervalo vertical.



40 ms cada una. La trama espectral mostrada en la parte superior de la figura corresponde a la número 971 anterior al final del espectrograma adquirido y puede verse que no se aprecian restos de subportadora de color. (El tiempo se marca como negativo, más antiguo, cuanto más alto está en el espectrograma)

Los dos cursores, remarcados por las líneas dibujadas, señalan una parte significativa de la evolución temporal del espectro durante la transmisión de los impulsos de sincronismo vertical de TV. El intervalo es de 12 tramas (480 ms) que corresponden a las 7,5 líneas seleccionadas en este ejemplo porque tienen el burst suprimido, lo que permite asegurar que se trata de las líneas que contienen los 5 impulsos pre-igualadores, los cinco impulsos de sincronismo vertical y los cinco post-igualadores que ocupan media línea cada uno haciendo el total de 7,5 líneas. El que sean 7,5 líneas permite suponer que se trata del campo III ó VII de la secuencia PAL (el campo IV tiene 9 líneas con el burst borrado; el campo I borra 8,5; el campo II borra 8 y el campo III borra 7,5 líneas). Recorriendo el espectrograma se encuentran los restantes

campos que corroboran el diferente número de líneas borradas.

Después de las 7,5 líneas indicadas aparece el resto de líneas del intervalo vertical que contienen información digital de teletexto, señales test y algunas otras líneas borradas (hacia abajo en la figura del espectrograma).

Dentro de las modulaciones analógicas, la modulación de frecuencia (denominada de potencia constante)

aporta ventajas, como es la mayor relación señal a ruido y una mayor libertad en el diseño de la linealidad de los amplificadores de potencia que no necesitan ser tan precisos como los usados en modulaciones de amplitud. Y aunque esto proporciona una mejor inmunidad frente a perturbaciones, todavía no ocupa el espectro asignado en todo momento, es decir, no tiene un espectro denso como tienen las modulaciones digitales.

En la figura 5 se aprecian las emisoras de FM de la banda de radiodifusión, comprendiendo desde 88 MHz a 108 MHz, que se recibían en el lugar de la medida, el espectro está densamente poblado, se pueden contabilizar más de 30 emisoras. La denominación de potencia constante, se debe a que la portadora es única y tiene siempre la misma amplitud. Sin embargo al desviarse de su posición central en base a la señal moduladora, aparecen unas frecuencias laterales alrededor de la posición de reposo que se describen por las funciones de Bessel (la portadora en reposo significa silencio si se trata de una emisión de audio).

Estas bandas laterales obtienen su potencia a costa de disminuir la

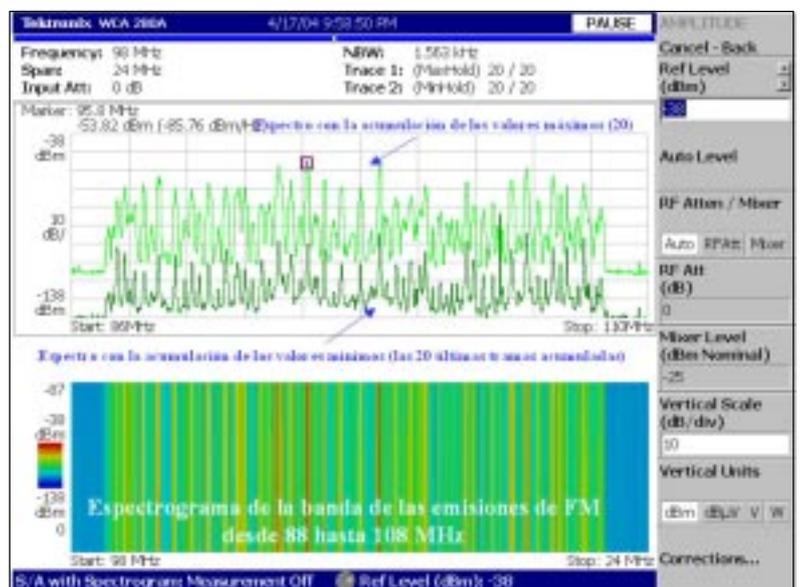


Fig.-5 Espectro de las emisoras de FM, cada portadora tiene una potencia constante.

potencia de la portadora de modo instantáneo, pero la suma de las potencias de todas las frecuencias instantáneas en el ancho de banda del canal es igual a la potencia de la portadora en reposo, por lo que el aprovechamiento del espectro no es total, a pesar de la característica de potencia constante, ya que su densidad espectral es variable en función de la modulación.

### El espectro denso de las modulaciones digitales

Son las modulaciones digitales las que mejor hacen uso del espectro gracias a que el espectro producido es del tipo "denso" con un nivel de potencia medio muy constante y con una relación entre potencia de pico y potencia media relativamente pequeña.

Distribuyen la energía emitida por los transmisores de una manera regular, y casi constante, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

Hay otras ventajas como es el hecho de que, aunque la señal se degrade analógicamente en su forma, es decir, en sus tiempos de subida y bajada, anchura, amplitud, rizado (ringing), etc. se pueden recuperar los pulsos, aunque deformados, que acarrean la información y también la información en sí misma se recupera en su integridad sin deformaciones. Incluso cuando el deterioro es excesivo, como para afectar a la información digital, todavía es posible recurrir a procedimientos de protección ante errores (sistemas FEC y similares, Forward Error Correction) para recuperar la información íntegramente hasta cierto grado de deformación de los impulsos.

Desde el punto de vista de aprovechamiento del espectro se puede afirmar que la densidad espectral es casi constante en todo el ancho de banda asignado al canal y durante

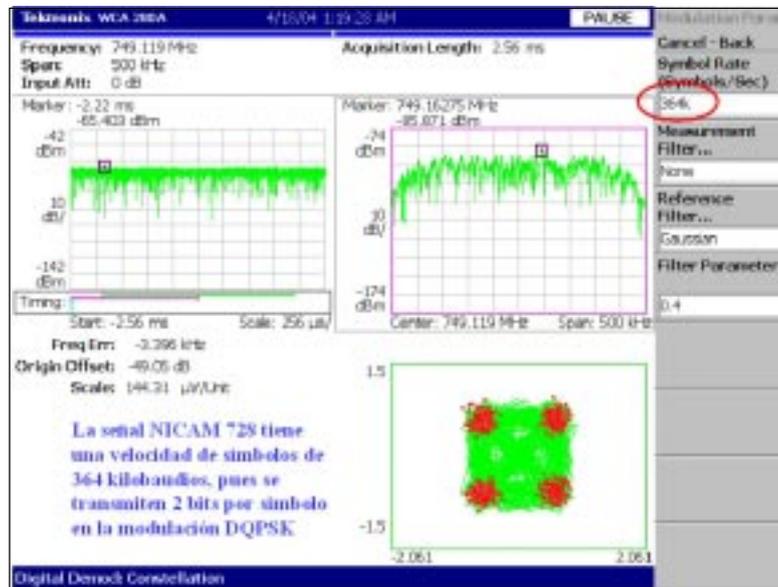


Fig-6 Desmodulación y constelación de la portadora NICAM (QPSK) del canal 49 de TV.

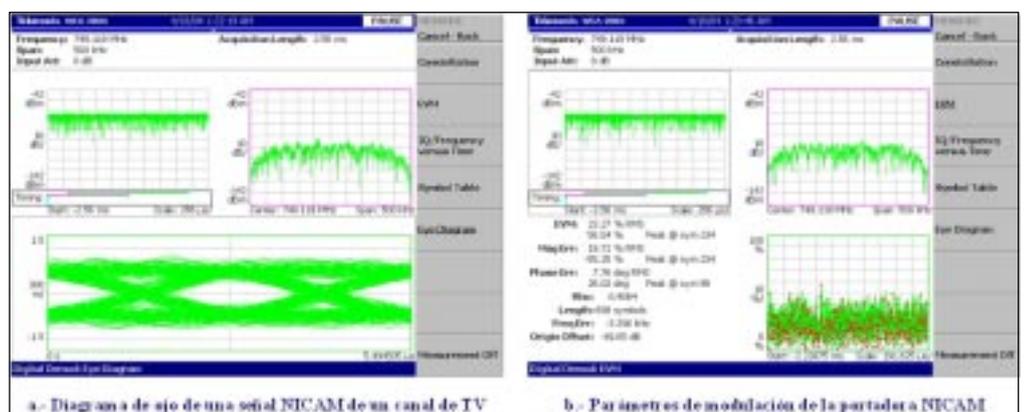
todo el tiempo de la emisión, con independencia del contenido, aunque la relación entre potencia de pico y potencia media puede llegar a alcanzar incluso 13 dB en largos períodos de tiempo.

En las figuras 2 y 4 se indicaba una señal con modulación digital QPSK (ó 4 QAM), se trata de la señal de audio estereofónico NICAM. Puede verse que la densidad espectral es casi constante en todo su ancho de banda útil, sobre todo en la figura 2 que muestra la traza de valores promedios, y no se aprecia tanto en la figura 4 que representa una instantánea del espectro, las figuras 6 y 7 muestran el espectro ampliado

(parte superior derecha) y otros detalles de la señal digital, como es la variación de potencia en función del tiempo (parte superior izquierda) y el diagrama de constelación (parte inferior derecha) de la figura 6, o el diagrama de ojo de la parte inferior de la figura 7a o la lista de parámetros de modulación medidos sobre la señal NICAM (parte inferior izquierda, fig. 7b)

La señal de TV digital tiene también sus variedades, desde la modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) utilizada en las emisiones por satélite (DVB-S, Digital Video Broadcasting Satellite), pasando por la modulación QAM (Quadrature

Fig-7 Diagrama de ojo y parámetros de modulación de la portadora NICAM



a.- Diagrama de ojo de una señal NICAM de un canal de TV

b.- Parámetros de modulación de la portadora a NICAM

Amplitud Modulation) utilizada en los sistemas de difusión por cable (DVB-C, Digital Video Broadcasting Cable) y la modulación COFDM (Coded Orthogonal Frequency División Multiplex) utilizada para la difusión terrestre de la señal de TV (en los sistemas europeo (DVB-T, Digital Video Broadcasting Terrestrial), en el japonés y en el chino, no así en el americano ATSC (Advanced Television System Comite)), pero todas ellas presentan una utilización muy eficiente del espectro con el objetivo de densidad espectral casi constante muy bien conseguido.

La radio digital en VHF, es decir el DAB (Digital Audio Broadcast) que se emite en España desde hace varios años y que quizás sustituya en el futuro a la actual FM, también hace uso de la modulación de portadoras ortogonal y la radio digital en OM que sustituirá en un futuro, quizás algo más lejano, a las emisiones en Onda Media, es decir el DRM (Digital Radio Mondiale), también hace uso de dicha modulación ortogonal OFDM.

El espectro denso usando modulación OFDM se utiliza también en las redes inalámbricas en su versión IEEE 802.11a denominada también WiFi5 así como en las comunicaciones ADSL. Las modulaciones de telefonía móvil de tipo CDMA y W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access), por ejemplo UMTS, utilizan también un espectro denso en el que una sola portadora se modula con señales digitales de códigos ortogonales

Centrando la atención en los espectros de la señal de TV digital no se detectan características detalladas sobre aspectos concretos de la señal y la modulación. Así las medidas que se hacen sobre ellos se alejan bastante de las medidas clásicas que se hacen sobre espectros de señales analógicas.

#### Medidas típicas, con analizadores de espectro, sobre difusión de TV analógica

- Potencia de pico de sincronismo
- Profundidad de modulación (AM)
- Desviación de frecuencia (FM)
- Medidas de frecuencia de portadoras
- Relación de amplitud y de frecuencia entre diferentes portadoras
- Estabilidad de frecuencia, (FM residual)
- Intermodulación intra-canal por el método de tres portadoras
- Interferencias sobre el espectro
- Supresión de banda vestigial
- Relación de potencia entre portadora y ruido (C/N)
- Intermodulaciones CTB y CSO...

En cambio, con las modulaciones digitales, los analizadores de espectro deben medir determinados parámetros espectrales y otros aspectos relacionados con la modulación vectorial o con la evolución de la potencia en el dominio del tiempo, por ello ahora es necesario prestar atención a otros aspectos de la señal transmitida.

#### Medidas típicas con analizadores de espectro: difusión de TV digital

- Potencia total del canal (integración del espectro)
- Anchura de espectro respecto a la velocidad de símbolos (ancho de banda nominal)
- Potencia emitida en el canal adyacente (ACLR, "Adjacent Channel Leakage Ratio"),
- Altura de los "hombros" (es un modo de interpretar la intermodulación en modulaciones OFDM)
- Magnitud del vector de error de modulación (EVM, "Error Vector Magnitude")
- Relación de error de modulación (MER, "Modulation Error Ratio")
- Visualización de las constelaciones de vectores de modulación
- Función de distribución de probabilidad de la potencia (PDF, "Probability Distribution Function")

- Integral de la distribución de densidad de potencia (CDF, "Cumulative Density Function")
- O más convenientemente el complemento (CCDF, "Complementary Cumulative Density Function")

#### Otras medidas

Además, en el caso de modulaciones digitales como es la COFDM del sistema DVB-T y del DAB es necesario hacer medidas de frecuencia muy precisas y con gran resolución lo que implica el uso de analizadores de grandes prestaciones en sus características de precisión de frecuencia y de estabilidad, otras veces lo que interesa medir son los intervalos de símbolos nulos del DAB usando espectrogramas en tiempo real o los productos de intermodulación mediante el uso del espectrograma.

- Medida de las portadoras piloto de tipo continuo en redes SFN (OFDM DVB-T)
- Medidas del intervalo de guarda midiendo las portadoras piloto distribuidas (OFDM DVB-T)
- Medidas de intervalo de símbolo nulo (OFDM DAB)
- Espectrogramas (en tiempo real) para análisis de evolución del espectro e intermodulación

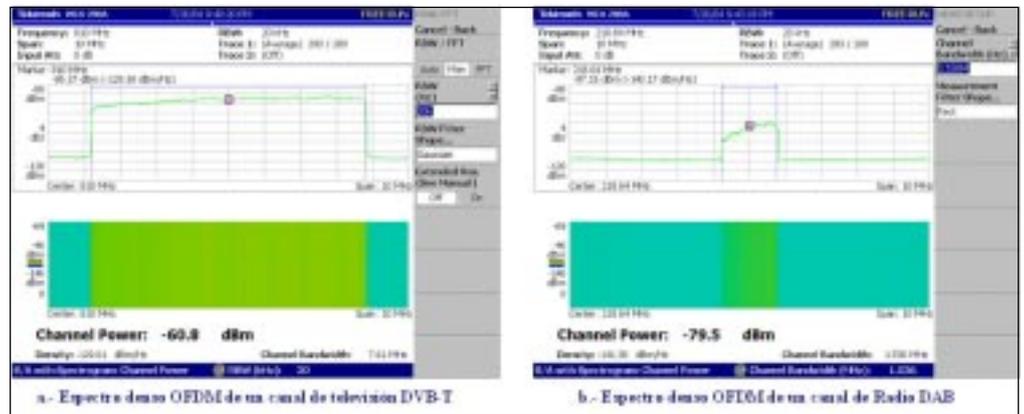
En estos casos los analizadores de barrido convencionales se vuelven tremendamente lentos y algunas medidas son impracticables por lo que es necesario recurrir a los analizadores de tiempo real.

En los espectros OFDM de la figura 8 parece que al no existir detalles específicos del espectro, solo se puede medir alguno de los parámetros de la lista anterior, por ejemplo, la potencia total (integrada a lo largo de la banda nominal, distancia entre portadoras extremas para OFDM) como se indica en la fig.-8a para una señal DVB-T con 7,607 MHz de ancho de banda nominal y en la fig.- 8b para una señal DAB con un ancho de banda nominal de 1,536 MHz. Las señales

se tomaron directamente del aire con una antena. El hecho de usar la integración del espectro, en lugar de medir la densidad espectral en el centro y multiplicar por el ancho de banda nominal, se debe a que el espectro emitido pretende ser plano, pero el recibido raramente lo es y el método de la densidad espectral podría ser muy impreciso. No obstante, la densidad espectral media se indica también en la parte inferior izquierda, debajo del resultado principal de la medida de potencia, mientras que la densidad espectral en el punto del cursor se indica arriba con la frecuencia y potencia del "Marker". Nótese que en el espectro plano de la figura 8a, izquierda, ambos valores casi coinciden, pero en la figura 8b, en que el espectro no se recibe tan plano, la diferencia entre la densidad media y la del centro del espectro es mayor.

En efecto, en el caso del canal de TV se recibía una señal de  $-60,8$  dBm que corresponde a una densidad espectral media de  $-129,61$  dBm/Hz para  $7,61$  MHz y una densidad espectral en el centro del canal de  $-129,38$  dBm/Hz mientras que en el caso del canal DAB la potencia recibida era de  $-79,5$  dBm que corresponde a una densidad espectral media de  $-141,36$  dBm/Hz para  $1,536$  MHz de anchura de canal y una densidad espectral en el centro del canal de  $-140,17$  dBm/Hz, que como puede verse está lejos de ser un espectro plano.

El espectro de las modulaciones QPSK o QAM, es muy similar en cuanto a densidad espectral se refiere, pero distinto del espectro OFDM en su forma. Este es originalmente plano y con los flancos muy abruptos debido a que se usan múltiples portadoras con modulación de banda estrecha, es decir, con símbolos muy largos. El espectro resultante es, prácticamente rectangular, sin embargo en el caso de la modulación QPSK o QAM, se usa una sola portadora con símbolos muy cortos, el



espectro está "acampanado" en función de las características del filtro conformador utilizado y se extiende más allá del ancho de banda nominal correspondiente a la velocidad de símbolos.

El ancho de banda nominal para la medida de potencia en modulaciones digitales para señales DVB de satélite y cable se define como el correspondiente a la velocidad de símbolos más el factor alfa del filtro usado. En el caso de DVB-S,  $\alpha=0,35$ ; para el sistema DVB-C,  $\alpha=0,15$ .

Para el caso NICAM, en su versión para los sistemas de emisión B y G,  $\alpha=0,40$ ; por lo que el ancho de banda para la medida debe ser  $364 \text{ kHz} \cdot 1,4 = 510 \text{ kHz}$  (la velocidad de símbolos en NICAM728 es de  $364 \text{ kHz}$  pues con la modulación QPSK se transmiten dos bits por símbolo). En la fig. 9a se ha medido la potencia usando el ancho de banda

correspondiente a la velocidad de símbolos de  $364 \text{ kHz}$  ( $-70,38$  dBm) para compararlo con el resultado de la fig. 9b que se ha realizado con un ancho de banda de  $525 \text{ kHz}$ , con el fin de incluir toda la potencia posible de la señal, y se encuentra que es ligeramente superior en  $0,28$  dB.  $(-70,1 - (-70,38)) = 0,28$  dB

En realidad esto es de esperar pues, en un tren de pulsos pseudoaleatorios que modulan a una portadora, la potencia se concentra en el lóbulo principal de modulación sin filtrar ( $2 \cdot$  velocidad de símbolos) con el  $91,8\%$  de la potencia total, es decir representa  $-0,37$  dB de la potencia total. El restante ( $8,2\%$ , que representa  $-10,915$  dB de la potencia total) se distribuye entre los infinitos lóbulos laterales que van decayendo en amplitud a medida que se alejan de la portadora. La señal se filtra para evitar la interferencia de todos estos

Fig.- 8 Espectros "sin detalles" de modulación OFDM, a: DVB-T y b: DAB

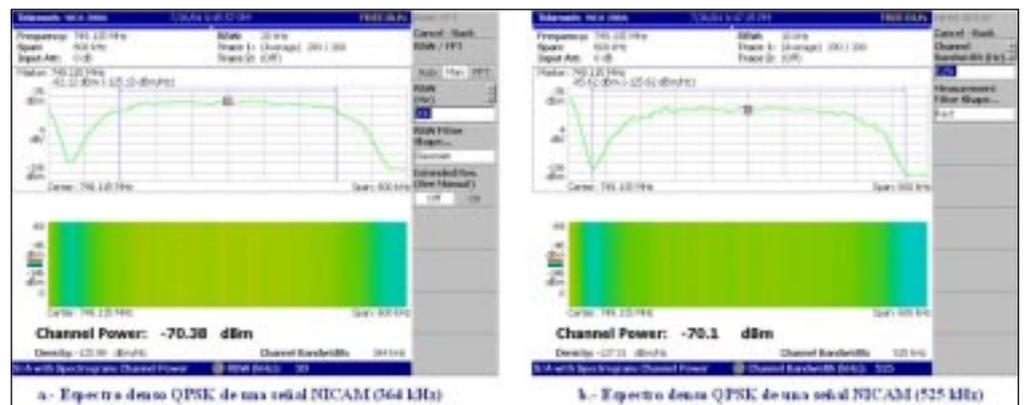


Fig.- 9 Espectros "sin detalles" de la modulación QPSK de la portadora digital NICAM

lóbulos laterales en los canales adyacentes y el filtro suele limitar la banda emitida al valor correspondiente a la velocidad de símbolos más un margen adicional, que se define en cada estándar de modulación como el valor  $\alpha$  indicado más arriba.

La potencia comprendida en el ancho correspondiente a la velocidad de símbolos es del 78,3% de la potencia total, es decir a  $-1,06$  dB, por lo que la potencia medida para el lóbulo principal después del filtrado (con  $\alpha=0,40$ ) estará en un punto intermedio entre  $-0,37$  y  $-1,06$  dB, aproximadamente en los alrededores del 84% ó  $-0,76$  dB, con lo que la diferencia teórica entre ambos valores sería de (lóbulo principal filtrado – potencia al ancho de la velocidad de símbolos) =  $(-0,76) - (-1,06) = -0,30$  dB que es muy aproximado al valor medido de  $-0,28$  dB.

Esta discusión se ha realizado solo para poner en perspectiva la naturaleza de los tipos de errores que se pueden cometer usando anchos de banda incorrectos y la extensión del error, que no es muy grande, si el ancho de banda seleccionado es igual o superior al ancho de banda nominal de la velocidad de símbolos.

Naturalmente la medida correcta, aparte de las consideraciones anteriores, se realiza midiendo a 510 kHz en el caso de señales NICAM para los sistemas B y G y a 728 kHz para señales NICAM en el sistema I (Reino Unido), donde  $a = 1$ .

Las medidas de potencia por integración de espectro son útiles tanto a pie de transmisor para verificar sus prestaciones y ajustes como en señales recibidas con antenas para verificación de coberturas de emisión, en este caso este método es el más adecuado pues tiene en cuenta

la posible falta de planitud del espectro recibido.

Otras medidas típicas en señales digitales son las de potencia en el canal adyacente, aunque estas medidas se realizan a pie de transmisor para verificar que el sistema de emisión y filtrado funcionan respecto a las especificaciones esperadas, ya que las medidas en el espectro tomado por una antena, además de tener poca potencia pueden estar afectadas por otras señales de canales adyacentes usados por otras emisiones.

### Continuará en Octubre

En la próxima Edición publicaremos la segunda parte de este interesante trabajo, que versará sobre las medidas de distribución de la potencia y más concretamente sobre las medidas CCDF