

RECOMENDACIÓN UIT-R SM.1600

Identificación técnica de las señales digitales

(2002)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) el continuo crecimiento de la utilización de las radiocomunicaciones;
- b) que las señales digitales se utilizan ampliamente;
- c) que cada vez pueden utilizarse más dispositivos sin necesidad de poseer una licencia o haber pasado un proceso de certificación, lo que impide a las administraciones identificar sus emisiones;
- d) que las reclamaciones de interferencia en las que intervienen emisiones digitales a menudo son difíciles de resolver;
- e) que la identificación previa generalmente es un requisito esencial antes de realizar cualquier medición en señales digitales con formas de onda complejas como las que se utilizan en radiodifusión digital (radiodifusión de sonido digital (DAB), radiodifusión digital de señal de vídeo (DVB)) y en radiotelefonía celular (acceso múltiple por división en tiempo (AMDT), acceso múltiple por división de código (AMDC),

recomienda

que las señales digitales se identifiquen en el siguiente orden:

- 1 proceso de identificación general descrito en el Anexo 1;
- 2 identificación basada en las componentes fundamentales de la señal, como se explica en el Anexo 2;
- 3 identificación basada en las características de la forma de onda de la señal, como se describe en el Anexo 3.

ANEXO 1

Proceso de identificación general**1 Preámbulo**

Con respecto a la identificación de las señales digitales es interesante realizar el proceso de análisis de la forma siguiente:

- a) Debe realizarse una identificación preliminar de las señales conocidas o normalizadas utilizando el método de intercorrelación.

Las emisiones normalizadas con características específicas (palabras de sincronización, secuencias de instrucción como las incluidas en muchos protocolos AMDT, códigos de

ensanchamiento breves en algunos protocolos AMDC, etc.), pueden detectarse mediante técnicas de correlación que proporcionan al mismo tiempo una identificación previa de estas señales. Ello es particularmente interesante para la comprobación técnica del espectro de las formas de ondas utilizadas en las radiocomunicaciones digitales terrenales en ondas decimétricas (GSM, IS 95, DECT, etc.) y en las comunicaciones por satélite (GLOBALSTAR, ICO, IRIDIUM), presentando a la vez un diseño muy sencillo y ofreciendo una gran flexibilidad de utilización. Los elementos principales que deben buscarse en el método de intercorrelación son los siguientes:

- preámbulo;
- tiempo de guarda;
- palabra de sincronización, secuencias de instrucción;
- códigos;

y si se produce un fallo en la identificación previa.

- b) Debe realizarse una identificación de la señal de acuerdo con sus características de forma de onda.

Con respecto a la identificación de las señales de transmisión de conformidad con sus características de diseño, lo cual debe realizarse si se produce un fallo o es imposible efectuar una identificación previa, se recomienda llevar a cabo el siguiente proceso de análisis:

- detección preliminar de situaciones de multiemisión con separación de las emisiones cuando sea posible;
- discriminación de las señales analógicas, las señales digitales no múltiplex por división en frecuencia ortogonal codificada (MDFOC) y las señales digitales MDFOC;
- identificación de las características de transmisión de las señales analógicas;
- identificación de las características de transmisión de las señales digitales no MDFOC;
- identificación de las características de transmisión de las señales digitales MDFOC.

Los elementos principales que deben analizarse son los siguientes:

- reconocimiento de la señal digital/analógica;
- disposición de canales y anchura de banda de la señal;
- forma del espectro, forma de la señal temporal, forma de la señal en el dominio del tiempo/frecuencia (señal continua/de ráfagas, señal de frecuencias fija/señal de espectro ensanchado, características de dispersión de la frecuencia de las señales en ráfaga: duración del intervalo, velocidad de transiciones entre intervalos, etc.);
- respuesta de la señal a varias transformadas (momentos de orden más elevado, cruce por cero, etc.);
- tipo de modulación (lineal/no lineal, etc.);
- características de la modulación de acuerdo con su tipo (número de símbolos, transición entre símbolos, profundidad de modulación, etc.).

Estos distintos parámetros de las señales pueden utilizarse para llevar a cabo la identificación mediante los métodos recomendados en lo que sigue.

2 Captura de la señal y dispositivo de digitalización para llevar a cabo la identificación de la señal

Para la transferencia a I/Q o a frecuencia intermedia, la digitalización de la señal y el registro de muestras de señal se recomienda la utilización de un sistema digital de recepción con anchura de banda ajustable.

- a) Para las señales de banda estrecha que probablemente se identificarán en tiempo real, se recomienda utilizar filtros de entrada con una frecuencia central fija y anchura de banda B seguidos de filtros de banda más estrecha con una anchura de banda de frecuencia central ajustable para obtener anchuras de banda bien centradas sobre las emisiones estudiadas; la magnitud de los valores adecuados de B es:
 - en el caso de emisiones con anchuras de banda de telegrafía o telefonía: 100 Hz a 3,4 kHz;
 - en el caso de emisiones con anchura de banda media: 15 a 45 kHz.
- b) Para las señales de banda amplia, sujetas a la identificación en tiempo diferido, se recomiendan las siguientes magnitudes para los valores de los filtros de captura de la señal, realizándose el postprocesamiento mediante filtros más selectivos:
 - $B = 300$ kHz (para la mayoría de las señales de radiocomunicaciones de hoy en día);
 - $B = 2$ MHz (principalmente para señales DAB e IS 95);
 - $B = 8$ a 10 MHz (para las emisiones de banda más amplia tales como DVB, señales UMTS e IMT-2000 etc.).
- c) Las anchuras de banda más elevadas exigen digitalizadores y procesadores más costosos así como medios de transmisión de velocidad binaria elevada en el caso de estaciones con control remoto, realizando una menor cantidad de emisiones. Por lo tanto, las estaciones de comprobación técnica deberían instalarse en una primera etapa únicamente con las anchuras de banda más bajas.

Para lograr un sistema aceptable, se recomienda utilizar los siguientes componentes:

- un receptor analógico o uno digital con una frecuencia central ajustable con gran precisión y una magnitud de control de ganancia muy dinámica y elevada (se recomiendan unos valores típicos de 50 a 60 dB para la magnitud del control de ganancia);
- filtros, convertidores a banda base, convertidores analógico a digital y registradores que proporcionen:
 - más de 8 bits para cada muestra de señal (12 bits es el valor típico recomendado),
 - velocidades de muestreo que den más de 4 muestras por cada símbolo de modulación digital,
 - profundidad de almacenamiento que proporcione una duración de la señal registrada de unos pocos milisegundos para señales de banda amplia y unos pocos segundos para señales de banda estrecha.

ANEXO 2

Identificación preliminar mediante técnicas de intercorrelación con una señal de prueba y mediante otras técnicas de correlación

Los métodos de intercorrelación se basan en la siguiente consideración teórica:

1 Breve presentación teórica de las técnicas de correlación

Estas técnicas de intercorrelación utilizan elementos conocidos de la señal que va a medirse que permiten realizar el cálculo de intercorrelación para la detección, sincronización temporización y compensación del efecto Doppler.

En la práctica, estas señales conocidas son señales moduladas situadas en el interior de una forma de onda cuyo tren de símbolos representa las normas, las especificaciones del sistema, etc.:

- palabra de sincronización en muchas formas de onda continuas normalizadas (como múltiplex con división en frecuencia),
- secuencias de instrucción en formas de onda normalizadas AMDT,
- códigos PILOTO o palabras de sincronización en formas de onda AMDC o AMDT/AMDC normalizadas, etc.

NOTA 1 – Frente a una señal desconocida que deba procesarse, es posible utilizar una señal previamente registrada como señal conocida o señalar dichas señales mediante el cálculo de autocorrelación. En todos los casos pueden lograrse simplificaciones importantes si se conocen las condiciones de registro de la señal conocida, especialmente la velocidad relativa o el desplazamiento Doppler de la fuente de señal.

Considerando una señal conocida $z(t)$ incluida en el interior de una señal emitida $s(t)$ y considerando la señal recibida conexas $x(t)$ y una duración de integración, IT , puede determinar la función de intercorrelación y de autocorrelación de la siguiente forma:

$$\Gamma_{x,z}(\tau) = \frac{1}{IT} \cdot \left[\int_{\zeta=\tau}^{\zeta=\tau+IT} x(\tau + \zeta) \cdot z^*(\zeta) d\zeta \right] \quad \text{y} \quad \Gamma_{x,x}(\tau) = \frac{1}{IT} \cdot \left[\int_{\zeta=\tau}^{\zeta=\tau+IT} x(\tau + \zeta) \cdot x^*(\zeta) d\zeta \right]$$

y si $x(\tau + \zeta) \equiv z(\zeta)$ durante $[\tau, \tau + IT]$, se obtiene $\Gamma_{x,z}(\tau) = \Gamma_{z,z}(\tau) = \frac{1}{IT} \cdot \left[\int_{\zeta=\tau}^{\zeta=\tau+IT} |z(\zeta)|^2 d\zeta \right]$ que es

la potencia media de la señal conocida z durante τ y $\tau + IT$.

En estas expresiones:

\cdot : símbolo de la multiplicación

$z^*(\zeta)$: conjugada compleja de la señal $z(\zeta)$, y $|z(\zeta)|$ es el módulo de la señal $z(\zeta)$: si escribimos $z(\zeta) = a(\zeta) + i \cdot b(\zeta)$ siendo $a(\zeta)$: parte real de $z(\zeta)$, $b(\zeta)$: parte imaginaria de $z(\zeta)$, e $i^2 = -1$, entonces $z^*(\zeta) = a(\zeta) - i \cdot b(\zeta)$ y $|z(\zeta)|^2 = (a(\zeta))^2 + (b(\zeta))^2$

$x^*(\zeta)$: conjugada compleja de la señal $x(\zeta)$, con la misma definición que antes

τ : tiempo de retardo.

Si $x(\tau + \zeta)$ es igual a la señal conocida $z(\zeta)$ durante el intervalo $[\tau, \tau + IT]$, ello corresponde al máximo valor de $\Gamma_{s,z}(t)$, igual a la potencia media de la señal recibida $z(t)$ durante IT , que da el tiempo de llegada de la señal $z(t)$ incluida en la señal recibida $x(t)$.

En la práctica, la señal recibida $x(t)$ contiene la señal emitida $s(t)$ que se filtra por las pérdidas de propagación h y $x(t)$ contiene una contribución de ruido $n(t)$ y a veces una contribución de interferencia externa $j_{ext}(t)$. De manera que la señal recibida completa x puede expresarse como $x(t) = h*s(t) + n(t) + j_{ext}(t)$. En esta expresión, el símbolo $*$ representa el producto de convolución y h representa la respuesta del canal del filtro de propagación, que incluye la atenuación atmosférica, los efectos del suelo, los trayectos múltiples, etc. Se dan modelos prácticos de h , por ejemplo, en normas celulares. Obsérvese que la aproximación más sencilla de la propagación es considerar que la respuesta impulsiva del canal h es igual al coeficiente de atenuación media h_0 que debe aplicarse a la señal emitida $s(t)$, de manera que $h*s(t) = h_0 \cdot s(t)$: para mayor sencillez se considerará en lo que sigue esta última aproximación. En el instante de sincronización (o tiempo de llegada) t_{SYNC} , la señal emitida $s(t)$ es igual a la señal conocida $z(t)$ o incluye dicha señal conocida $z(t)$ (se considerará después que $s(t) = z(t) + (s(t) - z(t))$, siendo $z(t)$ la señal conocida dentro de $s(t)$ y $s(t) - z(t)$ la parte desconocida de la señal $s(t)$). Por consiguiente, en el instante de sincronización t_{SYNC} , la señal recibida total $x(t)$ toma la forma:

$$x(t_{SYNC}) = h_0 \cdot z(t_{SYNC}) + n(t_{SYNC}) + j(t_{SYNC})$$

En esta última expresión $j(t_{SYNC}) = [h_0 \cdot (s(t_{SYNC}) - z(t_{SYNC})) + j_{ext}(t_{SYNC})]$ y $j(t)$ representa la contribución de interferencia total relativa a la parte «desconocida» $s(t) - z(t)$ de la señal emitida $s(t)$ y a la interferencia externa $j_{ext}(t)$. A partir de esta última expresión e introduciendo la densidad del espectro de potencia relativo a la señal z y a la señal $n + j$ y la anchura de banda BW de la señal z , y considerando además un filtrado y muestreo adecuados de la anchura de banda de la señal BW , la relación S/N a la salida de la intercorrelación y a la entrada están relacionadas por la siguiente expresión teórica, donde C_z es la potencia de la señal z y $N + J$ es la potencia total del ruido más la interferencia deliberada en la anchura de banda BW :

$$\left(\frac{C_z}{N + J} \right)_{salida} = \left(\frac{C_z}{N + J} \right)_{entrada} \cdot BW \cdot IT$$

Esta última expresión demuestra que el procesamiento de la intercorrelación proporciona una ganancia de recepción proporcional al producto $(BW \cdot IT)$. En el caso de señales muestreadas que respetan el criterio de Nyquist, $BW \cdot IT = L_{muestra}$: número de muestras de la señal durante la duración de la integración IT , de manera que la ganancia de intercorrelación $10 \log_{10}(BW \cdot IT) = 10 \log_{10}(L_{muestra})$ viene dada directamente por el número de muestras de la señal. Por ejemplo, 10^6 muestras de la señal suponiendo el criterio Nyquist proporcionarán una ganancia de intercorrelación de 60 dB. Bajo esta hipótesis, las Figs. 1 y 2 destacan el interés de la técnica de intercorrelación para la detección de señales, procesador de la señal digital (DSP) de bajo nivel (caso simulado).

2 Aplicación práctica de la técnica de intercorrelación

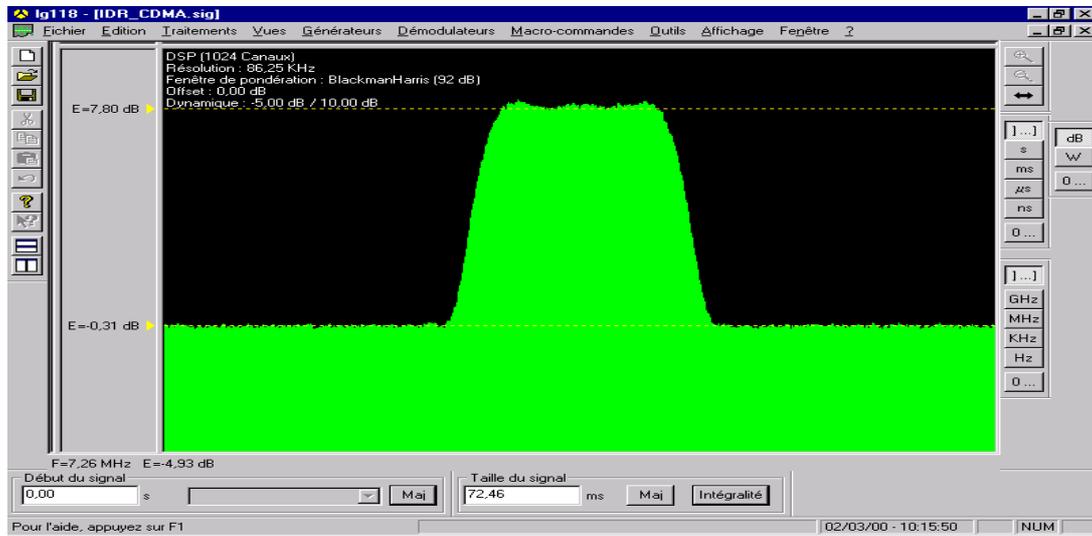
La aplicación práctica de estas técnicas hace uso de ventanas deslizantes para determinar el instante de llegada de la señal y las técnicas de compensación del efecto Doppler a fin de tener en cuenta el movimiento de la fuente de la señal. Generalmente los métodos prácticos emplean dos Pasos:

Paso 1: Estiman el error de frecuencia Doppler y el instante de sincronización.

Paso 2: Corrigen el error de frecuencia Doppler y optimizan la detección y la separación de la fuente.

FIGURA 1

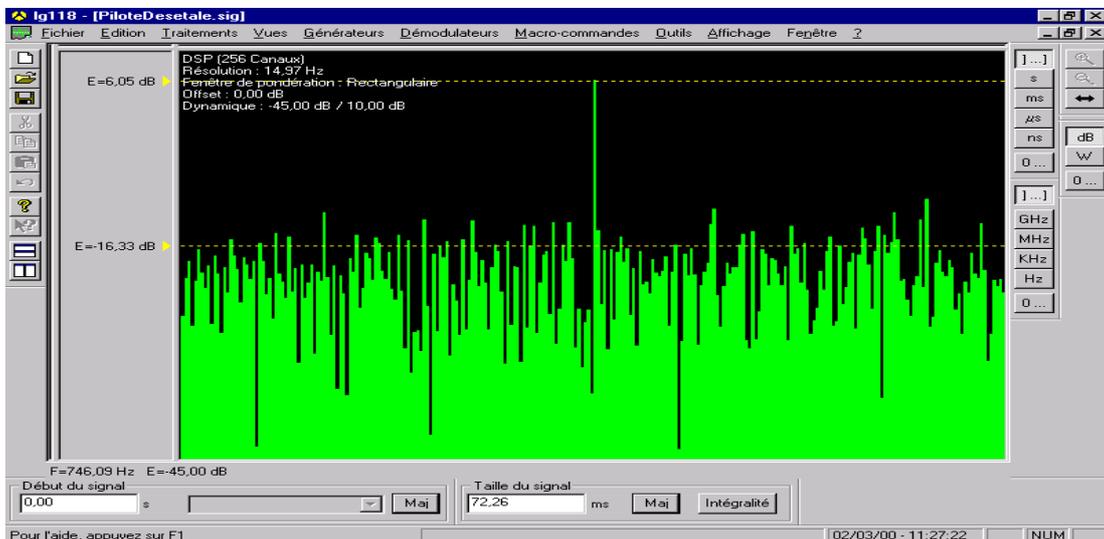
Espectro de una señal dominante S_1 + ruido gaussiano + una señal AMDC secundaria de nivel inferior S_2 . S_1 es 8 dB superior al ruido de fondo N y aparece claramente visible en el gráfico del espectro, S_2 es 13 dB inferior al ruido de fondo y no aparece en la representación del espectro



1600-01

FIGURA 2

Gráfico de la intercorrelación de la señal previa (incluyendo S_1 , S_2 y N) con un código piloto incluido en la señal AMDC S_2 . Aparece claramente un pico relativo a S_2 , aproximadamente 20 dB por encima del ruido de fondo en este caso



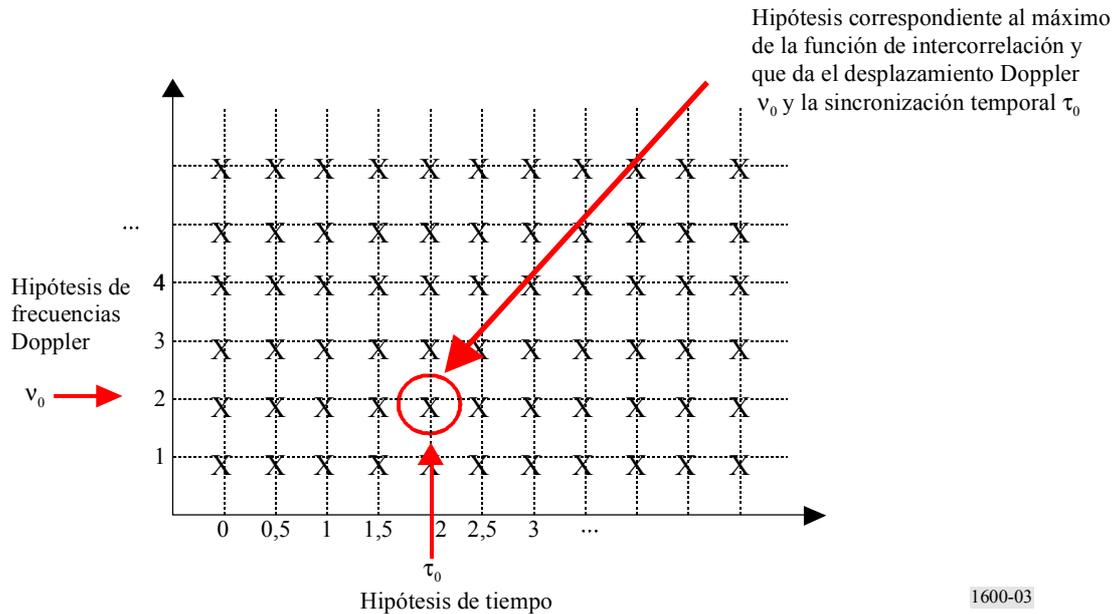
1600-02

2.1 Descripción de la sincronización temporal y Doppler

El principio de la sincronización temporal y Doppler es llevar a cabo la intercorrelación de la señal con la señal conocida para diferentes hipótesis de tiempo y desplazamiento Doppler. De esta forma, el instante de sincronización y la frecuencia Doppler se estiman conjuntamente determinando el punto en el plano tiempo/frecuencias en el que se obtiene el máximo valor de la intercorrelación.

FIGURA 3

Búsqueda de las hipótesis en el plano frecuencias/tiempo que optimizan el pico de intercorrelación



Este procesamiento puede realizarse de forma simplificada utilizando técnicas de las transformadas de Fourier. Para disminuir la complejidad de las transformadas rápidas de Fourier (TRF), la compresión coherente puede realizarse en tramos sucesivos de la señal de tal forma que la portadora Doppler tenga un efecto limitado sobre un tramo de señal determinado.

2.2 Optimización de la detección y separación de la fuente

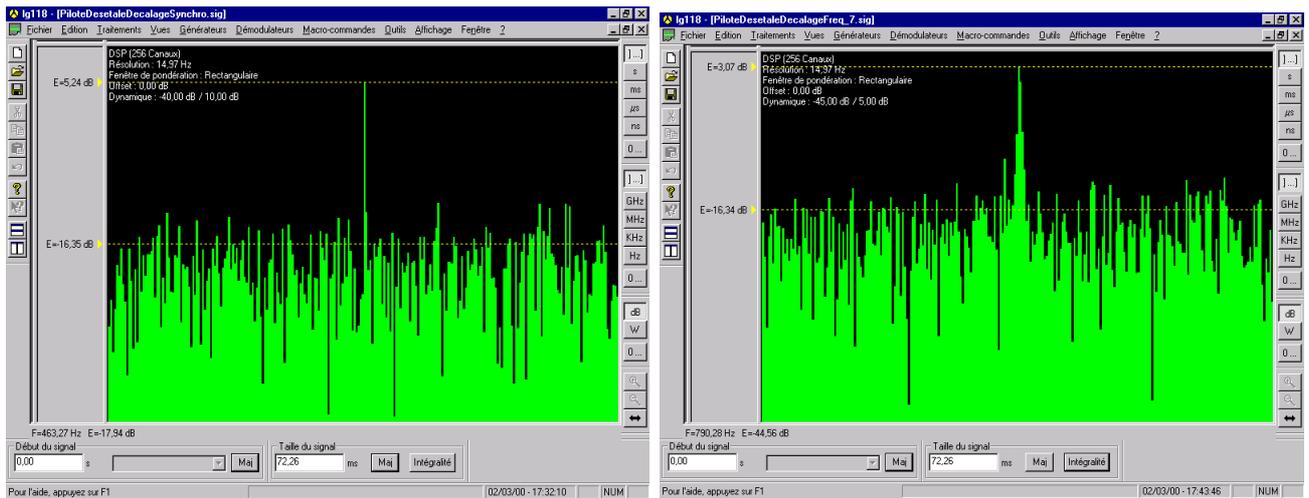
Para ello es necesario:

- optimizar la elección del tiempo de integración IT ; ello puede lograrse determinando la relación C/I y la relación S/N de la señal que va a detectarse;
- evaluar la precisión en la determinación de la sincronización temporal y Doppler; esto puede lograrse por varios métodos basados en muestreo adaptativo e interpolación en el plano tiempo/frecuencia;
- estimar la degradación debida a la desadaptación residual de la sincronización temporal y Doppler. Normalmente, la calidad de la sincronización temporal y Doppler viene afectada por al menos cuatro factores cuya importancia está relacionada con la duración de la integración IT , la naturaleza de las relaciones C/I y C/N de la señal y la aplicación práctica del algoritmo de sincronización:
 - estimador TRF con error de frecuencia Doppler;
 - frecuencia residual Doppler tras la compensación;
 - desadaptación de la temporización en recepción en caso de filtrado de Nyquist (error de muestreo);
 - interferencia causada por otras señales relativas a la matriz de intercorrelación.

Como ilustración, considerando por ejemplo la señal AMDC S_2 de la Fig. 1 cuya detección se logra en un caso ideal en la Fig. 2, la Fig. 4 que aparece a continuación muestra la detección de esa misma señal S_2 bajo las mismas condiciones salvo:

- una desadaptación de tiempo de $T_c/(2 \cdot N_e) = T_c/4$ (T_c : duración del segmento) en la Fig. 4a);
- una desadaptación de frecuencia de 8 Hz para la sincronización Doppler en la Fig. 4b).

FIGURA 4
Detección con desadaptación de tiempo y desadaptación Doppler



a) Desadaptación de tiempo de $T_c/4$

b) Desadaptación Doppler de 8 Hz

1600-04

La degradación en este caso es menor que 1 dB para el pico en la Fig. 4a) y de unos 4 dB en la Fig. 4b).

3 Aplicación de las técnicas de intercorrelación para el reconocimiento e identificación preliminar de las señales de transmisión

Por lo tanto, las herramientas para la identificación deben proporcionar las siguientes funciones:

3.1 Sistema de recepción digital de la anchura de banda ajustable para traslación de frecuencias y registro de la señal muestreada que permita aplicar posteriormente procesos en tiempo real y en tiempo diferido.

3.2 Generación de señales de prueba – Constitución de una base de datos

Se recomienda poder generar las señales de prueba:

- por simulación (generación de una señal de transmisión con control del tren de bits, la modulación, la velocidad de transmisión y la portadora) y utilizando generadores de señal de soporte lógico y soporte físico;
- por extracción de los ficheros de las señales existentes («cortar y pegar» (cut and paste) en una señal digitalizada procedente, por ejemplo, de un generador de señal o de señales reales previamente registradas);

y sin otros límites que las capacidades de procesamiento de datos del equipo utilizado (para aplicar estas técnicas puede que sea necesario utilizar un gran número de muestras de señal de acuerdo con

la velocidad de muestreo y la longitud de las señales de prueba), a fin de aprovechar al máximo el futuro aumento de los tamaños de memoria y de las unidades centrales de procesamiento (CPU, *central processing unit*) de los ordenadores.

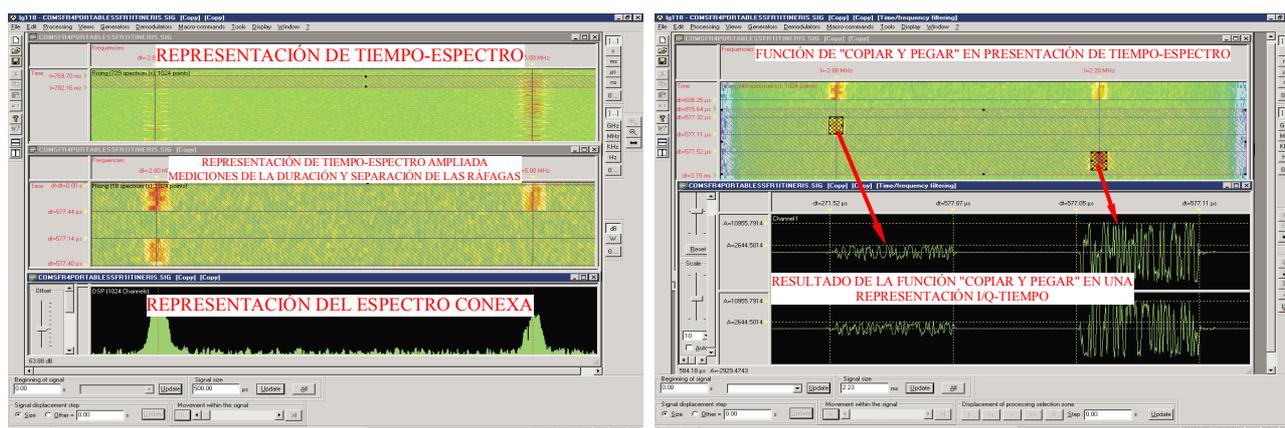
3.3 Análisis preliminar para ayudar al usuario a elegir las funciones de prueba adecuadas

Para ello, se recomienda particularmente la utilización de cursores o rejillas adaptados a las formas de ondas normalizadas comunes y aplicados a pantallas de presentación de tiempo, espectro y tiempo/frecuencia. Así se determina rápidamente la frecuencia portadora, la disposición de canales, la anchura de banda, la velocidad de transmisión y la duración de las señales, tanto en el caso de señales multiportadora como en el de señales de ráfaga, en condiciones de ocupación del espectro moderada a intensa (red celular, por ejemplo).

Estas mediciones (con funciones de zoom, copiar y pegar, etc.) frecuentemente llevan a un reconocimiento intermedio de la naturaleza de la señal como muestra la Fig. 5 (señal GSM reconocida por la duración de su ráfaga de 577 μs y su canalización de 200 kHz).

FIGURA 5

Representación tiempo-espectro y presentación panorámica de una señal de ráfaga GSM con funciones asociadas de zoom, copiar y pegar y mediciones



1600-05

En la Fig. 5, el reconocimiento de la señal GSM se confirma mediante mediciones, la separación de canales es un múltiplo de 200 kHz (en este caso 600 kHz), la duración de la ráfaga es 577 μs , etc.

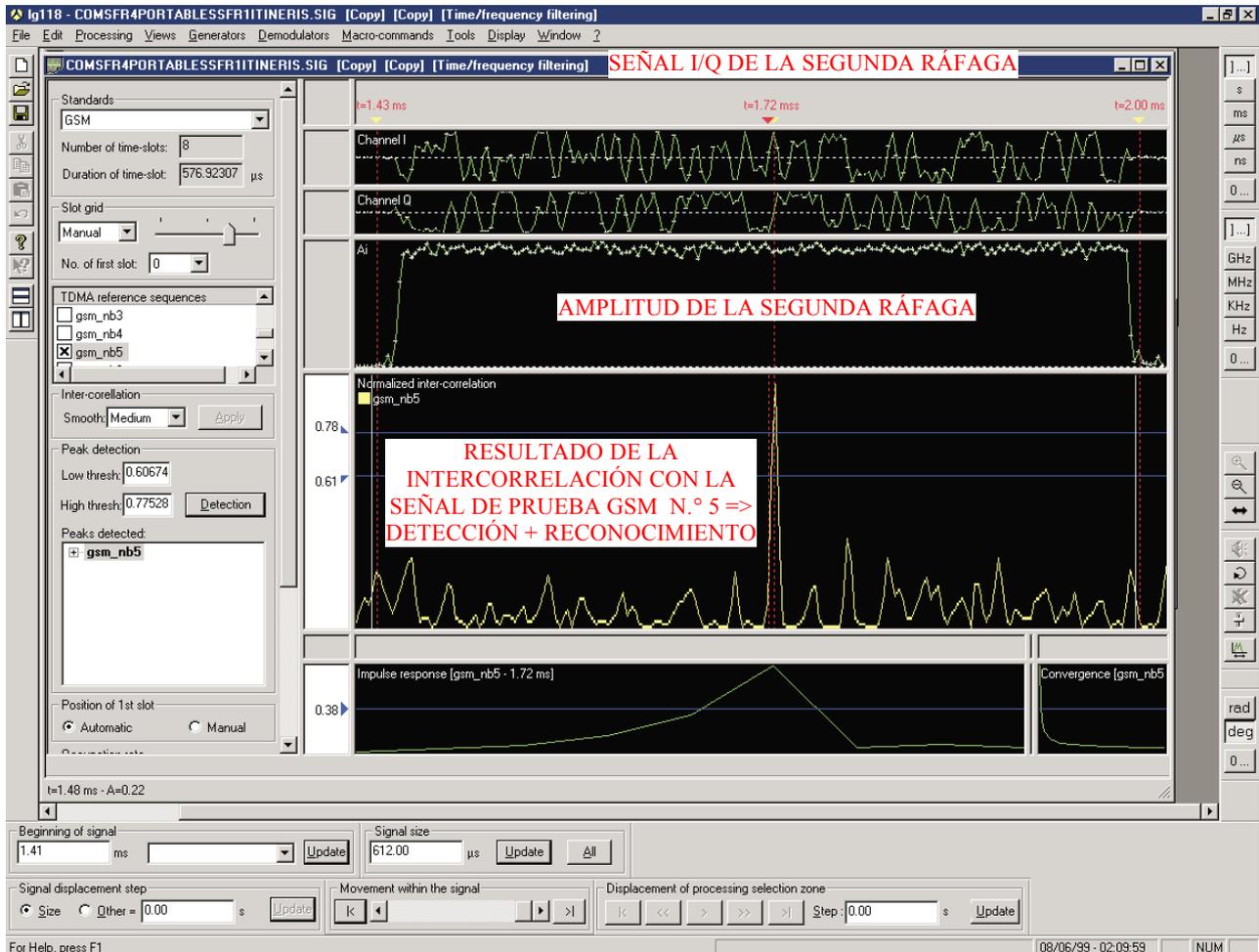
3.4 Intercorrelación con señales de prueba y funciones de búsqueda

El valor de cresta de la intercorrelación de la señal analizada con una señal de prueba hace posible detectar la presencia de la señal de prueba dentro de la señal analizada. Por consiguiente, la intercorrelación de una señal con las secuencias de referencia permite especificar su identidad técnica.

Por ejemplo, en el caso de una señal GSM de las Figs. 5 y 6, que se reconoce fácilmente por las características de tiempo/frecuencia (ráfaga de 577 μs , periodicidad múltiplo de 8, canalización múltiplo de 200 kHz), la intercorrelación sistemática con las secuencias de instrucción aquí consideradas como señales de prueba permiten especificar que se trata de un canal de tráfico que utiliza una secuencia de instrucción N° 5 (véase la Fig. 6). De la misma forma, en los canales de transmisión o en el tráfico de las redes celulares pueden identificarse otros canales de tráfico, las ráfagas de sincronización, las ráfagas de corrección de frecuencia y las ráfagas de relleno.

FIGURA 6

Reconocimiento de la identidad técnica de una ráfaga GSM; se identifica una ráfaga de tráfico: su intercorrelación con la secuencia N.º 5 es casi uno



1600-06

Este método se aplica también a las palabras de sincronización, los códigos PILOTO o los códigos de sincronización utilizados en los protocolos AMDC de manera que sus formas de onda pueden comprimirse e identificarse.

Puede obtenerse fácilmente información adicional tal como la estimación de la respuesta impulsiva del canal, la verificación de la calidad de la demodulación y datos sobre el grado de ocupación por intervalo de tiempo en el caso de una señal AMDT (véase la Fig. 6).

3.5 Sistematización y automatización del proceso de búsqueda de la señal de prueba

El proceso de identificación preliminar de las señales es muy eficaz con los protocolos normalizados que tienen palabras o secuencias de sincronización (lo cual es común para muchas formas de onda AMDT), códigos PILOTO (habitual en muchas formas de onda AMDC), etc. pero puede exigir una gran potencia de ordenador. Se recomienda la utilización de algoritmos acelerados que elevan el grado de sistematización y automatización del proceso a fin de procesar las señales de prueba por familia de normas tales como:

- sistemas de radiocomunicaciones móviles PMR, sistemas celulares, sistemas terrenales o por satélite basados en un protocolo AMDT (incluidos TETRA, GSM, D-AMPS, PDC, DECT, IRIDIUM, ICO, etc.);

- sistemas de radiocomunicaciones móviles PMR, sistemas celulares, sistemas terrenales o por satélite basados en un protocolo AMDC (incluidos IS 95, UMTS, IMT-2000, GLOBALSTAR, etc.);

Para ello es conveniente:

- realizar simultáneamente varias pruebas por intercorrelación (prueba por familia de normas, es decir en todas las señales conocidas de una norma determinada, por ejemplo TETRA, GSM, IS 136, IS 95, etc.);
- asociar a las técnicas de intercorrelación sistemas de presentación adecuados junto con una asistencia gráfica para destacar el modelo característico de las señales, utilizando funciones de búsqueda de cresta, búsqueda recurrente, etc. como las que aparecen en la Fig. 2.

ANEXO 3

Verificación de las características de la forma de onda

1 Introducción

Con respecto a la identificación de las señales de transmisión de acuerdo con sus características de modulación se recomienda llevar a cabo el siguiente proceso de análisis:

2 Detección de multiemisiones

2.1 Importancia práctica de la detección de multiemisiones

Para realizar una buena medición y aumentar las posibilidades de identificar una señal de acuerdo con sus características de diseño, el operador tiene tendencia a elegir un filtro amplio para la exploración, normalmente varios kHz en ondas decamétricas y unas pocas decenas o cientos de kHz en ondas métricas y decimétricas, en la cual pueden coexistir varias emisiones.

Sin embargo, la medición y la identificación sólo pueden realizarse de forma satisfactoria con una sola emisión en la anchura de banda analizada. La detección de una situación multiemisión es, por tanto, una función importante de un sistema de comprobación técnica y medición del espectro.

2.2 Reconocimiento y procesamiento de situaciones multiemisión

Para detectar una situación multiemisión, se recomienda utilizar representaciones adecuadas de la señal. En cierto número de casos, una simple representación visual paramétrica hace posible diagnosticar las situaciones multiemisión y aislar los patrones de energía correspondientes a las diversas señales.

Para ello se recomienda asociar los tres tipos de análisis y representaciones visuales indicados a continuación:

- análisis de frecuencia para segmentar el espectro según un criterio de energía;

- análisis de tiempo asociado con el análisis de frecuencia, por ejemplo, para no dividir el espectro de una emisión multiportadora;
- análisis de tiempo/frecuencia que hace posible reconocer y asociar las diversas contribuciones de una señal de ráfaga o reconocer una señal variable en el tiempo y en la frecuencia.

Por ejemplo, la representación de tiempo/frecuencia hace posible distinguir el caso de una señal de modulación por desplazamiento de frecuencia (MDF) modulada con una sola fuente del caso de una señal MDF de tono continuo (por ejemplo, señal MDFO) o del caso de una señal múltiple de banda estrecha.

2.3 Separación de las señales – Separación de los patrones de energía

Se recomienda separar las componentes de la señal correspondiente a una fuente utilizando funciones de filtrado en el dominio angular (utilización de un radiogoniómetro) y en los dominios del tiempo, frecuencia y tiempo/frecuencia (las funciones de zoom, filtrado con posibilidad de elegir un filtro existente o definir uno nuevo, funciones de «cortar/pegar/concatenar», etc. son características adecuadas al efecto). Estas técnicas son suficientes en la mayoría de los casos que normalmente aparecen en la comprobación técnica del espectro.

Como ejemplo, en la Fig. 8 se muestra la extracción de dos señales de ráfaga realizando un filtrado en el dominio del tiempo/frecuencia y se ilustra la separación de una de las señales de ráfaga tras el filtrado en el tiempo.

3 Identificación de una señal analógica

Para identificar una señal analógica, se recomienda aplicar cuatro Pasos:

Paso 1: escucha directa de la señal en MA, MF o MP demodulada; este método también es adecuado para las señales MDF y MDT analógicas tras sucesivas demodulaciones y filtrados;

Paso 2: presentación directa de la señal de televisión analógica demodulada (puede utilizarse para ello tarjetas de sintonizador/demodulador de televisión disponibles a un coste razonable para su conexión directa en ordenadores portátiles comunes); este método se aplica a señales múltiplex con división en frecuencia analógicas tras sucesivas demodulaciones y filtrados;

Paso 3: método automático: identificación de señales vocales utilizando las características a largo plazo de la señal vocal (en particular sus parámetros dinámicos), mediante cálculos y representaciones en histogramas de la varianza y los valores de cresta de la señal;

Paso 4: simultáneamente con los métodos precedentes:

- representaciones panorámicas y presentaciones de tiempo/frecuencia de la señal para determinar su naturaleza (MA, BLU, MF, múltiplex con división en frecuencia, etc.);
- consulta básica de la base de datos de las señales analógicas de radiocomunicaciones;
- técnicas de medición previamente recomendadas para la determinación de los parámetros de modulación:
 - frecuencias de portadora y subportadora en el caso de protocolos MDF;
 - anchura de banda de la señal;
 - características de la modulación (profundidad de la amplitud, desviaciones de frecuencia y fase)

medidas de acuerdo con las Recomendaciones UIT-R en vigor.

4 Reconocimiento de señales desconocidas MDFO por otras técnicas de correlación

Autocorrelación: la autocorrelación de la señal x es:

$$\Gamma_{x,x}(\tau) = \frac{1}{IT} \cdot \left[\int_{\zeta=\tau}^{\zeta=\tau+IT} x(\tau + \zeta)x^*(\zeta)d\zeta \right]$$

Una aplicación del procesamiento de autocorrelación es el reconocimiento de secuencias periódicas en el interior de señales de transmisión que pueden utilizarse como señales conocidas en procesamientos posteriores. Por ejemplo, puede lograrse un proceso de detección y reconocimiento preciso combinando el cálculo de autocorrelación para el reconocimiento de una señal conocida periódica dentro de una señal de transmisión AMDC y realizando un posterior procesamiento de la intercorrelación basado en esta señal conocida.

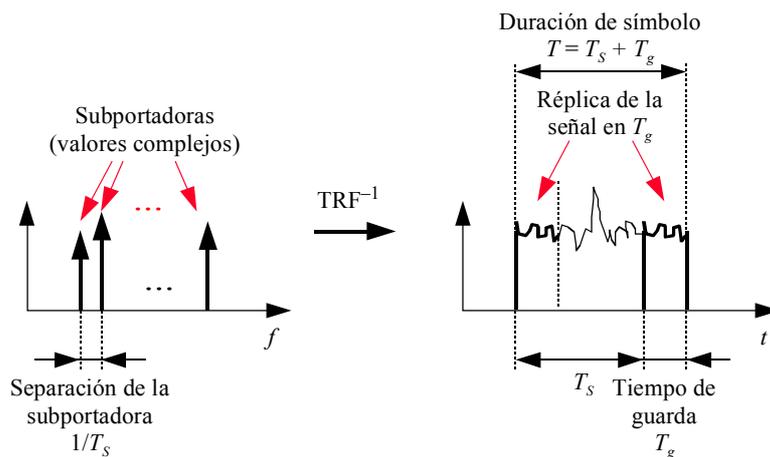
Autocorrelación cíclica: La autocorrelación cíclica ofrece muchas ventajas para enfrentarse a señales parcialmente conocidas, como sucede con muchas señales MDFO y AMDC, y destacar propiedades cíclicas de las señales de transmisión. Su expresión es:

$$\hat{\Gamma}_{x,x}(\alpha, \tau) = \frac{1}{IT} \cdot \left[\int_{\zeta=\tau}^{\zeta=\tau+IT} x(\tau + \zeta)x^*(\zeta)e^{-2j\pi\alpha\zeta} \cdot d\zeta \right]$$

4.1 Aplicación para el reconocimiento de una señal MDFOC

La estructura de los símbolos MDFOC se recuerda en la Fig. 7:

FIGURA 7
Estructura de un símbolo MDFOC en los dominios del tiempo y la frecuencia



1600-07

Para determinar la velocidad de modulación y la sincronización de símbolos, es posible explotar la duplicación del principio o el final del símbolo para constituir la parte de la señal correspondiente al tiempo de guarda. Por consiguiente, utilizando la duplicación de la señal se pueden aplicar métodos eficaces basados en señales conocidas. En el caso de la señal MDFO las funciones matemáticas básicas para el cálculo son la función de autocorrelación y la función de autocorrelación cíclica indicadas anteriormente.

La aplicación práctica de estos métodos puede realizarse en tres Pasos:

Paso 1: Cómputo de subportadoras, que puede realizarse utilizando una representación espectral muy precisa (resolución en frecuencia mejor que un $1/2 T_S$). Se recomiendan presentaciones panorámicas de la señal con resolución espectral (y tiempo de integración) variable y utilizando un gran número de puntos de cálculo (para una buena resolución y a fin de interpolar los puntos del espectro mediante relleno con ceros) asociado con funciones de zoom y mediciones por cursores.

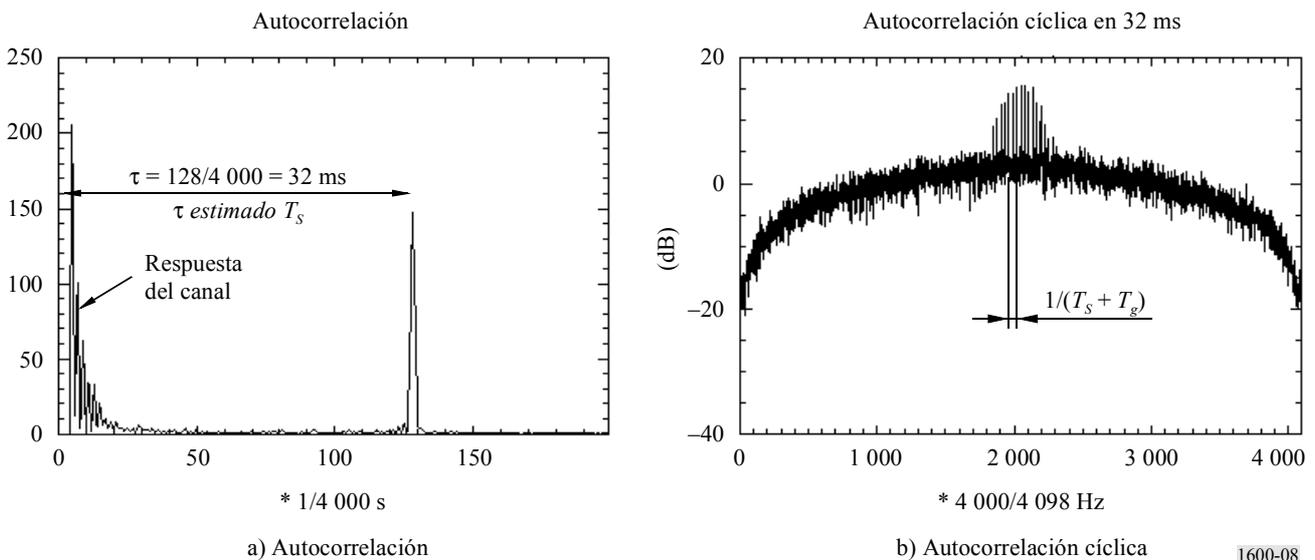
Paso 2: Cálculo de la autocorrelación de la señal para revelar una correspondencia de cresta con el retardo $\tau = T_S$ a fin de determinar la separación entre subportadoras $1/T_S$ (véase la Fig. 8). (Cabe señalar que la serie de crestas correspondientes a los ecos del canal no debe confundirse con la cresta que indica la duración de símbolo de las subportadoras debido a sus valores.)

Paso 3: Cálculo de la autocorrelación cíclica para el retardo τ (τ estimado T_S) dado por la autocorrelación de manera que puedan extraerse las partes de la señal correladas correspondientes a la duplicación de la parte del símbolo para constituir el tiempo de guarda (véase la Fig. 7):

- para confirmar además el valor de la duración de símbolo T_S (la autocorrelación cíclica calculada para un valor τ distinto de T_S no presenta crestas características);
- para determinar la velocidad de modulación de las subportadoras $1/(T_S + T_g)$ y el tiempo de guarda T_g .

FIGURA 8

Métodos de correlación aplicados a una señal MDFOC



1600-08

La determinación de los tres parámetros (duración de símbolo (T_S), tiempo de guarda (T_g) y número de subportadoras) hace que sea posible, en la mayoría de los casos, identificar la señal MDFOC y a continuación realizar las mediciones correspondientes relativas a la modulación de las subportadoras.

5 Identificación de una señal digital distinta a MDFOC

Para ello, se recomienda proceder en tres Pasos muy parecidos al proceso recomendado para realizar las mediciones sobre señales de banda ancha desconocidas *a priori*:

Paso 1: Extracción de la frecuencia portadora y la velocidad de modulación.

Paso 2: Sincronización de símbolo (reloj) y caracterización de la modulación (normalizada, número de estados, constelación de modulaciones lineales, etc.).

Paso 3: Validación de las características de la señal por demodulación con la ayuda de algoritmos y diagramas asociados de medición en pantallas especializadas para:

- modulaciones lineales por un lado;
- modulaciones no lineales, además.

5.1 Extracción de la frecuencia portadora y la velocidad de símbolos

De acuerdo con el tipo de modulación, se recomiendan los métodos indicados en el Cuadro 1.

CUADRO 1

Cuadro resumen de los principales métodos para extraer las características de modulación de las señales de transmisión digital

Parámetros que van a estimarse	Proceso de medición	Modulación correspondiente
Modulación – velocidad de la modulación asíncrona o síncrona	Histograma de la duración de amplitud, A_i , frecuencia, F_i , y frecuencia, F_i pasos	Modulación activada-no activada (OOK) MDF y modulación por desplazamiento de fase (MDP) sin filtrar
	Espectro de amplitud, A_i	MDP filtrada o no filtrada Modulación por impulsos codificados (MIC) o MDF tras filtrado
	Espectro de frecuencias, F_i	MDF sin filtrar
	Cruce de cero a la frecuencia, F_i	MDF filtrada o sin filtrar
	Espectro del módulo de la señal elevado a la potencia N (2 ó 4)	MDP y MAQ filtrada o no
	Espectro del módulo de la señal elevado a la potencia N tras un fuerte filtrado en frecuencia	MDF filtrada o no
	Espectro de la señal elevado a la potencia N ($N = 1/h$, siendo h el índice de modulación)	MIC filtrada o no
Frecuencia portadora Frecuencias subportadoras	Densidad espectral de potencia	Cualquier modulación
	Histograma de frecuencias, F_i	MDF
	Media de frecuencias, F_i	MDF
	Espectro elevado a la potencia N ($= 2$ (MDP), 4 (MAQ) o $1/h$ para MIC)	MDP, MAQ, MIC
Anchura de banda	Densidad espectral de potencia	Cualquier modulación
Distancia de frecuencia entre subportadoras	Densidad espectral de potencia	MDF, MDFOC
	Histograma de frecuencias, F_i	MDF, MDFOC

Estos métodos deben asociarse con representaciones adecuadas de la señal tras las diversas transformaciones que sufre a fin de extraer las características.

5.2 Caracterización de la modulación de la señal

Esta caracterización puede realizarse efectivamente tras la determinación de la frecuencia portadora y de la velocidad de símbolos de la señal utilizando:

- una representación de la sincronización de símbolo tal como un diagrama de ojos y/o una rejilla de fase de acuerdo con el tipo de modulación;
- una representación en coordenadas polares de las modulaciones lineales (validación de la sincronización, determinación de los puntos de la constelación y transiciones entre símbolos);
- representación en histograma para las modulaciones de fase o frecuencia (validación de la sincronización, determinación del número de subportadoras).

De acuerdo con el tipo de modulación, se recomiendan los métodos que se resumen en el Cuadro 2.

CUADRO 2

Cuadro resumen de los métodos principales para caracterizar la modulación de una señal digital

Parámetros que van a estimarse	Proceso de medición	Modulaciones correspondientes
Número de estados	Representación polar en el instante de decisión tras la ecualización o el filtro adaptado	MDP, modulación por desplazamiento de fase de cuatro estados (MDP-4), MDP-2 D $\pi/2$, MDP-4 D $\pi/4$, MAQ
	Histograma de A_i	OOK, modulación por desplazamiento de amplitud (MDA), MAQ
	Histograma de frecuencias, F_i	MDF
	Histograma de fases, Φ_i	MDP
	Densidad espectral de potencia	MDFO, MDFOC, Multiplexión
Número de subportadoras o tonos	Densidad espectral de potencia	Cualquier modulación
	Histograma de frecuencias, F_i	MDF
Distancia de frecuencia entre subportadoras (Desplazamiento para MDF)	Densidad espectral de potencia	MDF, MDFOC
	Histograma de frecuencias, F_i	MDF, MDFOC
Sincronización de símbolos	Diagrama de ojos I/Q , A_i/F_i + representación polar	MDP y MAQ filtrada o no
	Diagrama de ojos A_i/F_i + representación del histograma de frecuencias, F_i	MDF filtrada o no
	Rejilla de fase + representación del histograma de frecuencias, F_i y fase, Φ_i	MIC filtrada o no

5.3 Identificación técnica de una señal digital asociando los métodos de medición y demodulación

Una vez realizada la extracción de las características de la señal, se recomienda validar esta operación mediante una demodulación y un análisis de convergencia.

Para ello se recomienda poder contar en la misma herramienta con un gran número de demoduladores digitales asociados con varios algoritmos de ecualización de canal y con gráficos que permitan el análisis de la convergencia del proceso de demodulación.

- En el caso de modulaciones lineales, se recomienda una representación del tren de símbolos demodulados, el vector error correspondiente, los puntos de la constelación (puntos ideales) y las posiciones de la señal compleja en el instante de decisión en una representación polar que permita un análisis de la convergencia, la transición entre símbolos y posiblemente los sistemas de codificación.
 - En el caso de modulaciones no lineales, se recomienda una representación en histograma de los estados de la frecuencia o fase teóricas y de los estados de la frecuencia o fase de la señal en el instante de decisión, para realizar el análisis de la convergencia del proceso de demodulación.
-