

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R SM.1600-3
(09/2017)

Identificación técnica de las señales digitales

Serie SM
Gestión del espectro



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2018

© UIT 2018

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R SM.1600-3

Identificación técnica de las señales digitales

(2002-2012-2015-2017)

Cometido

Esta Recomendación describe varios procesos, métodos y herramientas para la identificación técnica de las señales digitales. Proporciona un conjunto de métodos y herramientas de varias fuentes y recomienda su aplicación para distintos casos de utilización. No se requiere utilizar todas las herramientas para cumplir esta Recomendación. No ofrece una explicación detenida de los algoritmos o las características de diseño de las herramientas de hardware y software.

Palabras clave

Análisis de señales, identificación de señales, señales digitales

Abreviaturas/Glosario

ADC	Convertidor analógico a digital (<i>analog to digital converter</i>)
AM	Modulación en amplitud (<i>amplitude modulation</i>)
AMDC	Acceso múltiple por división de código
AMDF	Acceso múltiple por división de frecuencia
AMDT	Acceso múltiple por división en el tiempo
CAF	Función de autocorrelación cíclica (<i>cyclic autocorrelation function</i>)
EVM	Magnitud del vector de error (<i>error vector magnitude</i>)
FDE	Ecualización en el dominio de la frecuencia (<i>frequency domain equalization</i>)
FM	Modulación de frecuencia (<i>frequency modulation</i>)
GSM	Sistema Mundial para Comunicaciones Móviles (<i>global system for mobiles</i>)
I/Q	En fase y en cuadratura (<i>in-phase and quadrature</i>)
MAQ	Modulación de amplitud en cuadratura
MDA	Modulación por desplazamiento de amplitud
MDF	Modulación por desplazamiento de frecuencia
MDFO	Multiplexión por división de frecuencia ortogonal
MDMG	Modulación por desplazamiento mínimo gaussiano
MDP	Modulación por desplazamiento de fase
MDP-4	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura
PRF	Frecuencia de repetición de impulsos (<i>pulse repetition frequency</i>)
SC	Una sola portadora (<i>single carrier</i>)
SCF	Función de correlación espectral

SNR	Relación señal/ruido (<i>signal-to-noise ratio</i>)
UWB	Banda ultraancha (<i>ultra-wide band</i>)
VSA	Analizador de señal de vector (<i>vector signal analyser</i>)

Informes de la UIT afines

Informe UIT-R SM.2304.

NOTA – En todos los casos debe utilizarse la última edición del correspondiente Informe/ Recomendación.

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 licencia o sin haber pasado un proceso de certificación, lo que dificulta a las administraciones la identificación de la fuente de una emisión;
- d) que existe la tendencia de compartir el mismo espectro por varias tecnologías de radiocomunicaciones;
- e) que las reclamaciones de interferencia en las que intervienen emisiones digitales a menudo son difíciles de resolver;
- f) que la identificación técnica generalmente es un requisito esencial antes de realizar cualquier medición en las señales digitales con formas de onda compleja como las que utilizan la mayoría de los sistemas de comunicaciones digitales;
- g) que se dispone de bases de datos de señal que pueden asociar las modernas señales digitales con sus respectivos parámetros externos e internos;
- h) que se dispone de nuevas herramientas y técnicas de análisis e identificación que facilitan el reconocimiento de la naturaleza de una señal desconocida o la identificación completa de las modernas normas digitales,

recomienda

- 1 que las señales digitales se identifiquen en el siguiente orden:
 - proceso de identificación general basado en las características externas de la señal;
 - identificación basada en las características internas de la señal (tipo de modulación y otros parámetros internos de la forma de onda) cuando se tiene *a priori* un conocimiento bajo/parcial de la señal;
 - identificación basada en la correlación con las características de una forma de onda conocida cuando *a priori* se tiene un conocimiento preciso de la señal;
 - identificación confirmada por la demodulación o decodificación de la señal, o su comparación con características de forma de onda conocidas, (si no se ha utilizado ya en el proceso de identificación);
- 2 que se considere la utilización del conjunto de procesos, métodos y herramientas descritos en el Anexo 1.

Anexo 1

1 Introducción

Este Anexo describe los pasos destinados a su utilización de forma autónoma o conjuntamente en secuencia para identificar una señal digital de interés. La información tiene por objeto proporcionar orientaciones fundamentales, prácticas y lógicas sobre el tratamiento de las modernas señales digitales normalizadas. El texto aborda la utilización de parámetros externos de la señal, ofrece directrices sobre el análisis de los parámetros internos de la señal para analizar de manera más completa la señal y describe el uso de herramientas y técnicas de software para identificar positivamente una señal digital moderna normalizada. El conjunto de herramientas descrito en este Anexo es un ejemplo de las herramientas que pueden utilizarse para la identificación de señales digitales, pero se requiere utilizar todas las herramientas para cumplir esta Recomendación y, de hecho, los equipos disponibles para un servicio de comprobación concreto pueden no incluir todas las herramientas. Las herramientas y las técnicas descritas en este Anexo suponen en general una interacción entre el operador y el sistema porque la mayoría de los sistemas no realizan automáticamente el proceso de identificación de las señales digitales.

Si bien algunos analizadores de espectro modernos tienen la capacidad de caracterizar señales, la mayoría no pueden preservar y proporcionar los datos de la señal en fase y en cuadratura (I/Q) útiles para realizar análisis más detallados de las características internas de la señal. Aunque este Anexo se centra en los analizadores de señales vectoriales y en los receptores de comprobación técnica, también pueden emplearse en algunos casos analizadores de espectro y sistemas de comprobación del espectro que dispongan de características de análisis de la señal.

2 Definiciones de las señales digitales y métodos para el análisis e identificación de la señal

Modernas señales digitales normalizadas: Estas señales incluyen normalmente los siguientes esquemas de modulación y formatos de acceso múltiple:

- Modulación por desplazamiento de amplitud, de fase y de frecuencia (MDA, MDP, MDF), incluida la modulación por desplazamiento mínimo (MDM).
- Modulación de amplitud en cuadratura (MAQ).
- Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (MDFO).
- Acceso múltiple por división en el tiempo (AMDT).
- Acceso múltiple por división de código (AMDC).
- Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (codificado) (AMDFOC).
- Acceso múltiple por división de frecuencia con una sola portadora (SC-AMDF).
- Ecuilibración en el dominio de la frecuencia con una sola portadora (SC-FDE).

Clasificar; clasificación de la señal; La clasificación de las señales trata del proceso de ordenación de las señales en función de las características de parámetros como el plan de frecuencias, el ancho de banda, la forma espectral, la duración, la ocupación (ejemplos de características externas), así como el formato de modulación y la velocidad de baudios (ejemplos de características internas). El proceso de clasificación no incluye una determinación del contenido original de la señal, sino que pretende más bien ayudar al operador a determinar el tipo de dispositivo emisor de la señal. Por ejemplo, el proceso puede proporcionar información para determinar si un emisor es un enlace ascendente o descendente, un canal de control o de tráfico. Mientras que, normalmente, las características externas de la señal pueden medirse con un analizador de espectro, la clasificación de la modulación necesita, en general, una serie temporal de datos I/Q y algoritmos especiales de

software. Con la configuración adecuada y buenas condiciones (SNR y tiempo de adquisición adecuados, etc.), el software de clasificación de la modulación puede funcionar automáticamente para indicar el formato correcto y la velocidad de símbolo. Sin embargo, en muchos casos, es necesaria la intervención de un operador para la clasificación de la modulación, como se describe en el proceso indicado en este Anexo.

Identificación de la señal, sistemas y software de análisis de la señal: Se trata de una clase de sistema o software que puede proporcionar identificación positiva de una señal digital moderna correlando la forma de onda de la señal con una biblioteca de modelos conocidos tales como preámbulo, medioámbulo, tiempo de guarda, palabra de sincronización, tonos de sincronización, secuencias de instrucción, símbolos y códigos piloto y códigos de aleatorización, y correlando la señal demodulada o decodificada con una biblioteca de modelos conocidos tales como los datos de señalización en los canales de difusión.

Señal de datos I/Q: I/Q se refiere a los datos de la señal en fase y en cuadratura. Los datos I/Q resultantes del muestreo de una señal permiten preservar toda la información sobre amplitud, frecuencia y fase contenida en la señal. Ello posibilita el análisis o la demodulación precisa de la señal de diferentes formas y es un método común de realizar un análisis detallado de la señal.

Software de reconocimiento de la modulación: Se trata de un software que puede funcionar sobre registros demodulados de audio o de I/Q en bruto y estimar las características de la señal que incluyen:

- la frecuencia central y la distancia en frecuencia entre portadoras;
- el ancho de banda de la señal;
- la duración de la señal y la duración entre impulsos (cuando se trata de una señal impulsiva);
- la clase de modulación: una sola portadora o múltiples portadoras, lineal o no lineal;
- el formato de modulación;
- la velocidad de símbolos;
- la relación señal/ruido (S/N)¹;
- los patrones específicos de la señal (tales como los tonos de sincronización/piloto, los tiempos de guarda, los intervalos de guarda y la estructura de trama).

Analizadores de señal vectoriales (VSA) y software VSA: Los instrumentos de los VSA combinan tecnología de superheterodino o hardware de conversión directa con convertidores analógico-digital (ADC) de alta velocidad y procesamiento digital de la señal (DSP), conjuntos de sistemas de puertas programables (FPGA) o procesadores programables generales (GPP) incorporados para llevar a cabo mediciones del espectro rápidas y de alta resolución, demodulación y análisis avanzado en el dominio del tiempo y en el dominio del espectro-tiempo. Los VSA son especialmente útiles para caracterizar señales complejas tales como ráfagas, transitorios o señales con modulación digital utilizadas en las comunicaciones, el vídeo y la difusión. Pueden proporcionar a los usuarios la capacidad de recopilar datos I/Q en bruto en las señales de interés, capacidades de reconocimiento de la modulación y capacidades de identificación de la señal como las definidas anteriormente. El software VSA puede controlar o no un receptor físico, sin embargo, en todos los casos permite al usuario analizar los datos I/Q en bruto procedentes de un receptor o de ficheros.

¹ Si bien este no es un parámetro de modulación común, a menudo viene indicado por el software de reconocimiento de la modulación.

Por otra parte, el software VSA suele ofrecer configuraciones predeterminadas o plantillas de señales para demodular y decodificar formatos normalizados de comunicaciones digitales (enumerados en el § 6). El usuario puede utilizar estas plantillas para validar fácilmente el formato de los tipos de señales objeto de análisis con el fin de confirmar que concuerdan con las características del tipo de señales con licencia en la banda de frecuencias.

Receptor de comprobación técnica: Un receptor de comprobación técnica selecciona una señal radioeléctrica entre todas las señales interceptadas por la antena a la que está conectado y reproduce a la salida del receptor la información transmitida por la señal radioeléctrica, proporcionando a la vez acceso a la medición de las características detalladas de la señal. Esto se lleva a cabo normalmente:

- accediendo a etapas intermedias en la cadena de la señal, o
- en los receptores más modernos, registrando o proporcionando como salida las características completas de amplitud y fase (normalmente muestreando y almacenando los datos I/Q).

Magnitud del vector error (EVM): El vector error es la diferencia en un instante determinado entre la señal de referencia ideal y la señal medida. Dicho de otra forma, se trata del ruido residual y la distorsión restante después de eliminar una versión ideal de la señal. La EVM es el valor eficaz (valor cuadrático medio) del vector error a lo largo del tiempo en los instantes de transición del reloj (o chip) de símbolo.

3 Pasos para identificar una señal digital

3.1 Evaluar las características externas de la señal

El primer paso para identificar una señal digital es emplear el método más sencillo. Ello supone comparar los parámetros «externos» de la señal con la base de datos de las señales con licencia y el plan de frecuencias del servicio de comprobación.

Los parámetros externos de la señal incluyen:

- la frecuencia central y distancia en frecuencia entre portadoras;
- el ancho de banda de la señal;
- la forma espectral;
- la duración de la señal (cuando sea impulsiva o intermitente);
- la deriva de frecuencia.

La inspección visual y la comparación de la señal de interés con la base de datos de licencias del servicio de comprobaciones un buen punto de partida para identificar una señal digital de interés. Si en la señal coinciden todos los parámetros externos, hay muchas posibilidades de realizar una correcta identificación de la señal sin necesidad de más análisis.

En el Cuadro 1 aparece un ejemplo de Cuadro de atribución de bandas de frecuencias. El Cuadro proporciona una descripción general de los servicios con licencia para funcionar en la banda, los parámetros operacionales, los anchos de banda de la señal y la disposición de los canales. Estos datos pueden utilizarse para comprar los parámetros externos de la señal y efectuar una evaluación inicial de la identidad de las señales de interés.

CUADRO 1

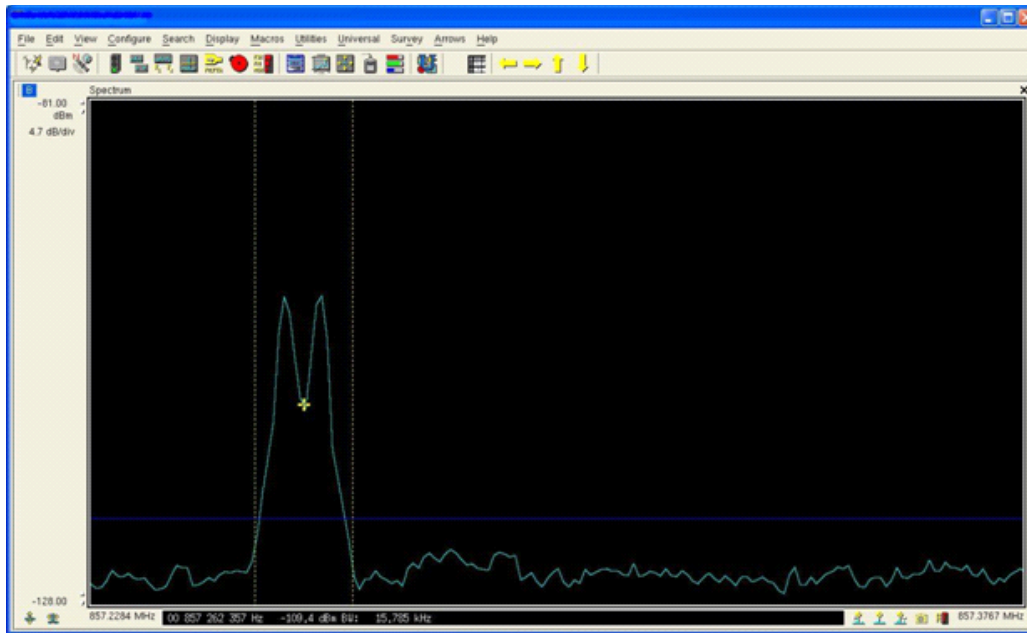
Ejemplo de Cuadro de atribución de bandas de frecuencias

Cuadro de atribución de bandas de frecuencias			698-941 MHz (ondas decimétricas)		Página 29
Cuadro internacional			Cuadro de Estados Unidos de América		Parte de la regla de la FCC
Cuadro Región 1	Cuadro Región 2	Cuadro Región 3	Cuadro Federal	Cuadro no Federal	
(Véase la página anterior)	698-806 FIJO MÓVIL 5.313B 5.317A RADIODIFUSIÓN	(Véase la página anterior)	698-763	698-763 FIJO MÓVIL RADIODIFUSIÓN NG159	Comunicaciones inalámbricas (27) LPTV y Traductor TV
			763-775	763-775 FIJO MÓVIL NG158 NG159	Móvil terrestre para seguridad pública (90R)
			775-793	775-793 FIJO MÓVIL RADIODIFUSIÓN NG159	Comunicaciones inalámbricas (27) LPTV y traductor TV (74G)
790-862 FIJO MÓVIL (salvo móvil aeronáutico) 5.316B 5.317A RADIODIFUSIÓN			793-805	793-805 FIJO MÓVIL NG158 NG159	Móvil terrestre para seguridad pública (9CR)
	5.293 5.309 5.311A		805-806	805-806 FIJO MÓVIL RADIODIFUSIÓN NG159	Comunicaciones inalámbricas (27) LPTV y traductor TV (74G)

Utilizando un analizador de espectro, un analizador de señal vectorial o un receptor de comprobación técnica, o un sistema de comprobación del espectro que incluya esta funcionalidad, el servicio de comprobación puede determinar la frecuencia central de la señal, la distancia en frecuencia entre portadoras adyacentes y el ancho de banda de la señal. La frecuencia debe cotejarse con el plan de frecuencias para asegurar que la señal está centrada en uno de los canales atribuidos. Además, debe verificarse si el ancho de banda de la señal cumple las normas de canalización de la banda de frecuencias de interés. La Fig. 1 muestra cómo pueden utilizarse los marcadores de pantalla para determinar la frecuencia central, el ancho de banda de la señal y la potencia medida a la entrada del receptor.

FIGURA 1

Ejemplo de presentación del espectro con marcadores



SM.1600-01

El Cuadro 2 proporciona un conjunto completo de métodos de análisis que puede emplear el servicio de comprobación para detectar señales y realizar una estimación de los parámetros externos de la señal. Muchos paquetes de software para análisis de señal pueden llevar a cabo operaciones matemáticas sobre datos temporales o espectrales o una serie de datos espectrales. Tales paquetes pueden usarse para efectuar estos tipos de estimaciones de los parámetros externos de la señal.

CUADRO 2

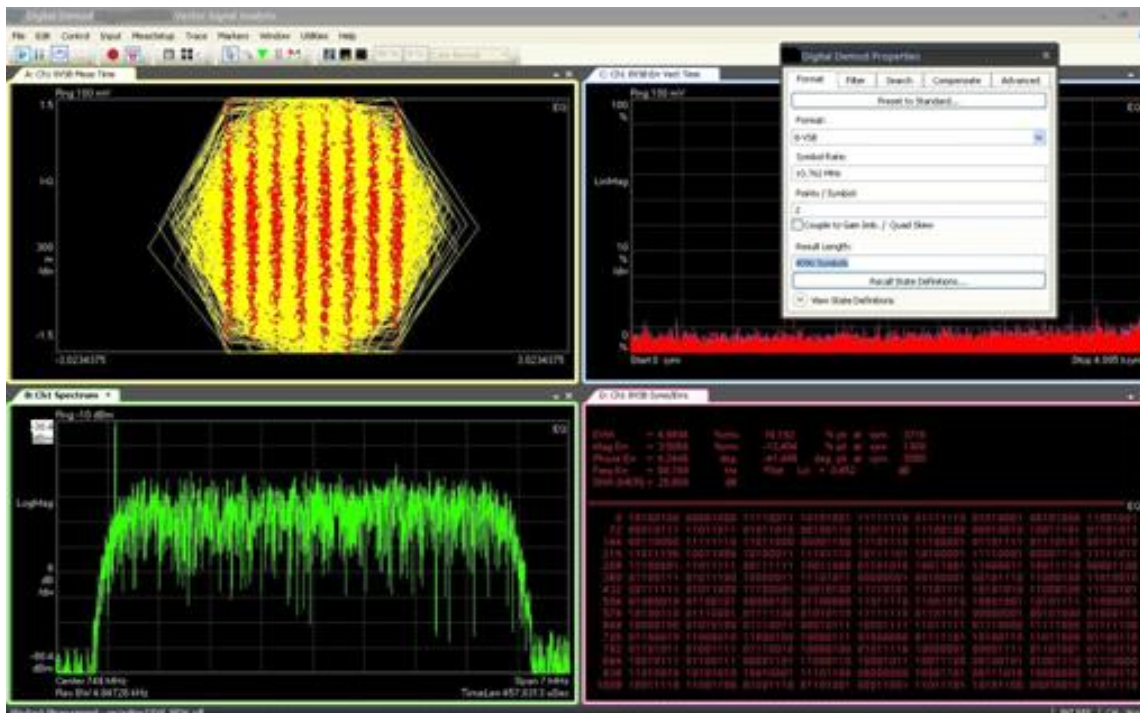
Métodos manuales para detectar señales y extraer parámetros externos

Parámetros que se miden	Herramientas de análisis	Tipo de modulación	Extremo radioeléctrico
Presencia de una señal de radiocomunicaciones	Correlación cruzada de la señal I-Q o de la amplitud instantánea A_i con la señal de referencia	Cualquier tipo de modulación pero especialmente para las señales AMDT, AMDC y DSSS conocidas	Cualquiera
	Densidad espectral de potencia	Cualquier tipo de modulación	S/N media y alta
	Autocorrelación y correlación cíclica	MDFO, SC-AMDF, SC-FDE	Cualquiera
	Análisis de correlación del espectro	Señales en DSSS y débiles desconocidas	Cualquiera
PRF o longitud de ráfaga	Análisis temporal de la amplitud de la señal	OOK, radar, IFF, otras señales de ráfagas	S/N media y alta
Frecuencia portadora Frecuencias subportadoras	Densidad espectral de potencia	Cualquier tipo de modulación	S/N media y alta
	Histograma de la frecuencia instantánea, F_i	MDF	S/N media y alta
	Valor medio de la frecuencia instantánea, F_i	MDF	S/N media y alta
	Espectro de la señal I-Q elevado a la potencia N (=M(MPM), 4 (MAQ) o 1/h para MIC)	MDP, MAQ, MIC	S/N positiva
	Análisis de correlación del espectro	Cualquier modulación lineal y específicamente MDA, MDP-2, MDP-4	Cualquiera
	Espectro del módulo de la señal elevado a la potencia 2 ó 4 con filtrado intenso	π /MDPD-2, π /DPD-4, MDPS	S/N positiva Cualquiera
Ancho de banda de la emisión y disposición de canales	Densidad espectral de potencia comparada con la máscara o la función de la línea límite	Cualquier tipo de modulación	S/N media y alta
Distancia en frecuencia entre subportadoras (desplazamiento para MDF)	Densidad espectral de potencia. Buscador de armónicos y/o marcadores de armónicos	MDF, MDFO, MDFOC	S/N media y alta
	Histograma de la frecuencia instantánea, F_i	FSK	S/N media y alta

Forma espectral: Otro método de identificación de la señal utilizando las características externas de la señal consiste en evaluar la forma o *signatura espectral*. La mayoría de los programas de software VSA cuentan con una biblioteca de demostración de las modernas señales digitales normalizadas. Estas demostraciones permiten al servicio de comprobación observar los parámetros externos (y en algunos casos internos) de la señal, incluida la forma espectral, la duración y otras características.

Ciertas emisiones tienen una característica peculiar a este tipo de transmisión, por ejemplo un tono piloto. Algunas transmisiones de televisión digital de alta definición tienen una señal piloto situada en el lado de bajas frecuencias de la señal. La presentación que aparece en la Fig. 2 ilustra una transmisión de televisión (canal 60 de EE.UU., 749 MHz) que utiliza el sistema ATSC. Obsérvese la traza en la parte inferior izquierda y la forma característica del espectro con la presencia de la señal piloto. Esta forma, combinada con la frecuencia central y el ancho de banda de la señal, proporciona una clara indicación del tipo de transmisión.

FIGURA 2
Presentación del VSA que ilustra una forma espectral característica



SM.1600-02

Si se precisa más información sobre la señal para realizar una identificación positiva, será necesario examinar los parámetros internos de la señal.

3.2 Evaluar las características internas de la señal

Tras la evaluación de los parámetros externos de la señal como se describe en el paso 1, el siguiente paso en la identificación de la señal digital es analizar las características en el dominio del tiempo (o internas) de la señal de interés. Se necesitará un VSA o un receptor de comprobación técnica (o un adecuado analizador de espectro) capaz de efectuar un registro de I/Q. Los parámetros internos de la señal incluyen:

- El formato de modulación (es decir, MDP-4, MAQ, GMSK, MDF, MDP).
- La velocidad de símbolos, que a veces se denomina velocidad en baudios.

a) *Realización del registro de I/Q:*

- Se fija la frecuencia central: El VSA o el receptor de comprobación técnica debe centrarse en la frecuencia donde va a aparecer la señal.
- Se fija el barrido de frecuencias para el registro: El barrido de frecuencias de la adquisición debe fijarse de manera que incluya toda la señal, pero no debe ser tan amplia como para que invada un canal adyacente. El VSA o la pantalla del receptor de comprobación técnica puede utilizarse para medir la frecuencia central y el ancho de banda de la señal. Ya están disponibles en la actualidad VSA, receptores de comprobación y osciloscopios capaces de grabar incluso las señales de comunicación más amplias (excepto algunos sistemas de banda ultra ancha (UWB)).

Para señales de banda estrecha, el operador debe utilizar un ajuste apropiado del ancho de banda, B. La magnitud de los valores adecuados de B es:

B = 100 Hz a 4 kHz (emisiones de ancho de banda telegráfica o telefónica).

B = 15 a 45 kHz (emisiones de ancho de banda media).

El registro de señales de ancho de banda más elevado exige ADC más sofisticados u osciloscopios digitales con procesadores de señal. Se recomienda utilizar un sistema con los siguientes componentes:

- un receptor analógico o uno digital con una frecuencia central ajustable con gran precisión, una gama muy dinámica y un control de ganancia ajustable (50 a 60 dB);
- filtros, convertidores a banda base, convertidores analógico a digital y registradores que proporcionen:
 - una magnitud de 14 bits o superior;
 - 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.

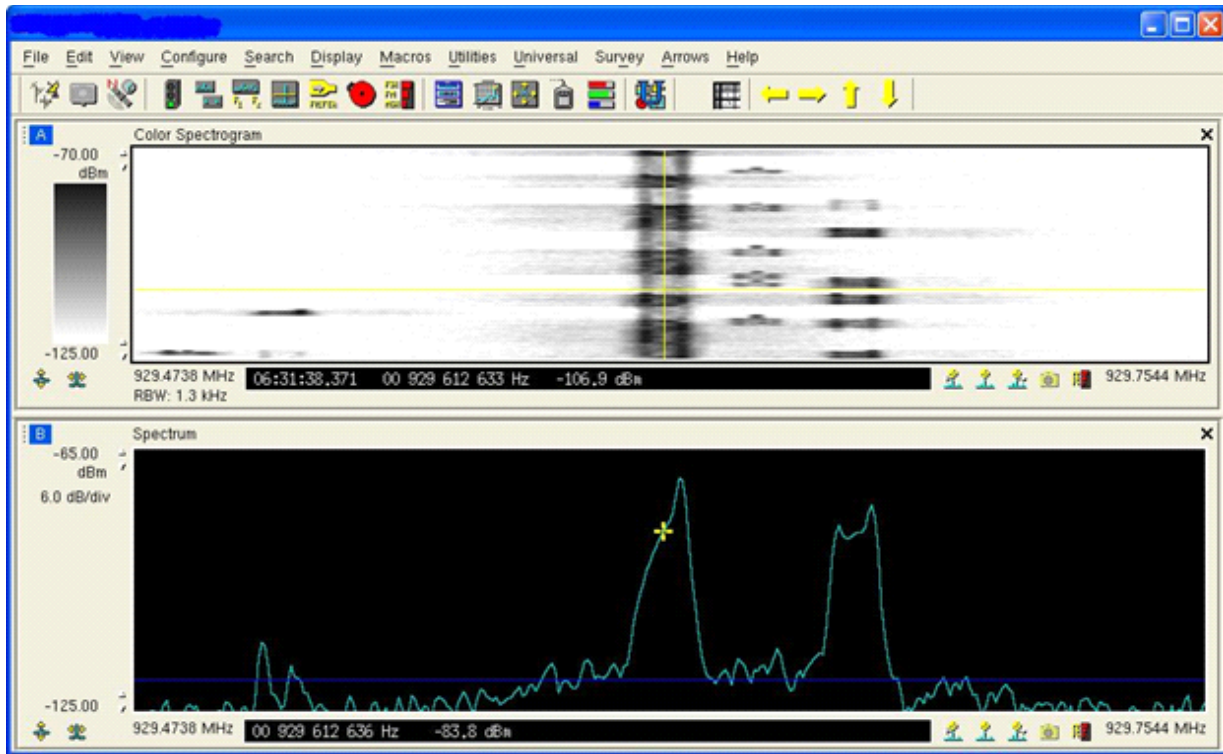
La mayor parte de las modernas señales de comunicaciones digitales tienen anchos de banda de la señal inferiores a 20 MHz, aunque hay algunas excepciones².

- Se fija la duración del registro: Normalmente sólo será preciso un registro de corta duración (menos de un segundo) para determinar el formato de modulación y la velocidad de símbolos de la señal. Los VSA y los receptores de comprobación técnica cuentan con una memoria de registro de señal fija, de manera que las adquisiciones más amplias llenarán la memoria de adquisición en un plazo de tiempo más breve que el necesario para la adquisición de las señales estrechas. Si es necesario, el usuario puede observar la duración de la señal en un VSA para asegurar la longitud adecuada del registro y hacer el mejor uso posible de la memoria de adquisición.
- Las duraciones de la señal pueden observarse utilizando un espectrograma o una presentación de cascada. Este tipo de monitor espectral muestra las características de frecuencia, potencia y tiempo en una pantalla (véanse las Figs. 3 y 4). La potencia de la señal se representa cambiando el color o la escala de grises como se indica en la barra de color del lado izquierdo del monitor. A medida que transcurre el tiempo, el monitor se desplaza de abajo a arriba y la traza espectral se muestra debajo del espectrograma.

² Por ejemplo, las normas de comunicaciones para WLAN (802.11ac y 802.11ad) en aplicaciones de corto alcance requieren anchuras de banda desde 160 MHz hasta más de 2 GHz.

FIGURA 3

Ejemplo de espectrograma con presentación del espectro

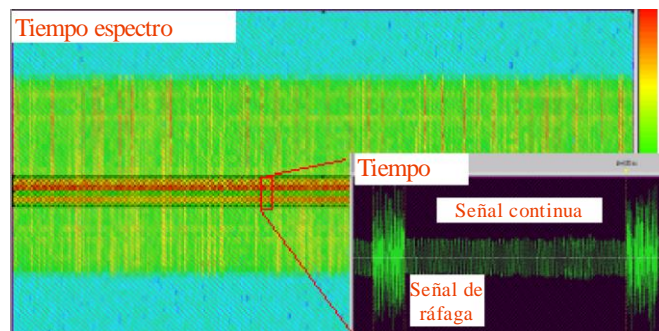


SM.1600-03

El software de análisis de la señal material puede utilizarse para crear una presentación visual del tiempo y el espectro que ayudará al servicio de comprobación a comprender el entorno de la señal a la frecuencia de interés y a determinar la adecuada fijación de la duración cuando se hagan registros de I/Q. Deben seguirse las apropiadas técnicas de separación de las señales cofrecuencia para garantizar un análisis eficaz de las características internas de la señal.

FIGURA 4

Diagrama de tiempo y espectro (frecuencia/amplitud en el eje Y y el tiempo en el eje X)



SM.1600-04

- Activación del registro: Si la señal tiene un ciclo de trabajo reducido, puede utilizarse un activador de magnitud de FI para iniciar el registro. Este activador es una característica típica en los VSA y en los receptores de comprobación técnica. Permite al usuario especificar el nivel de potencia de RF predetectada recibida a la que se iniciará el registro de I/Q. Ajustar correctamente el nivel de activación es importante y requiere algún conocimiento del comportamiento del nivel de la señal y del ruido en la frecuencia de interés. Si se fija el nivel a un valor demasiado bajo puede que se active el registro por un impulso de ruido que aparezca en el interior del barrido de frecuencias de registro. Si se ajusta el nivel a un valor demasiado alto se perderá la señal deseada. Si la señal de interés tiene forma de ráfagas o es de breve duración, debe utilizarse una memoria ADC o memoria de retardo para iniciar efectivamente el registro antes del instante del activador y finalizar después de que desaparezca la señal o tras una duración adecuada del registro.
- Verificación de la forma de onda registrada: El software VSA permite al usuario observar inmediatamente la señal registrada para garantizar que se utilizó la adecuada frecuencia central, el barrido de frecuencias registrado, duración y activación.

b) Ideas sobre las características internas de la señal

Tras realizar con éxito el registro de I/Q, el usuario puede «reproducir» la señal a través de una serie de paquetes de software para determinar las características internas de la señal. Los VSA y los receptores de comprobación técnica de distintos fabricantes registran los datos de I/Q en bruto con su propio encabezamiento patentado que contiene información sobre la señal tal como la frecuencia central, el barrido de frecuencias de registro, la velocidad de muestreo, la fecha y hora, etc. La estructura de datos normalmente se publica en los manuales técnicos y puede resultar de utilidad cuando se establece el software de identificación de la señal o de reconocimiento de la modulación.

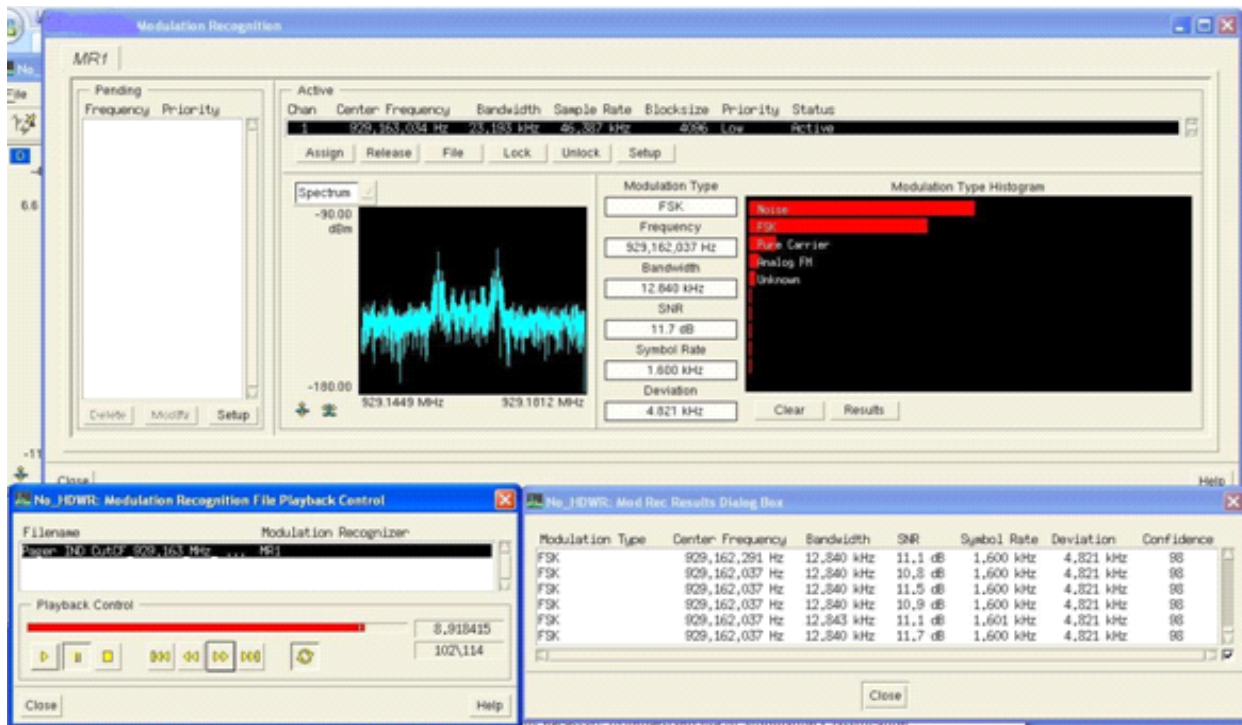
Para llevar a cabo adecuadamente una medición de las características internas de la señal, debe fijarse el software para procesar correctamente el registro. Los ajustes necesarios en el software incluyen normalmente:

- la frecuencia central;
- la velocidad de muestreo o el ancho de banda de la señal;
- el filtrado del canal adyacente;
- la detección de ráfagas;
- el tamaño del bloque: este parámetro determinará cuantos datos I/Q se analizarán para obtener un resultado de la modulación. Por ejemplo, si la muestra I/Q es de 16 kbytes y el tamaño del bloque se fija en 2 kbytes, el software de reconocimiento de la modulación estimará el tipo de modulación y la velocidad de símbolos 8 (ocho) veces cuando se ejecute a través del fichero. Si la señal sólo está presente en una pequeña parte del fichero, es posible que sólo con una o dos mediciones se obtenga la información útil.

En la Fig. 5, se ha realizado un registro de I/Q y se ha aplicado a un paquete de software de reconocimiento de la modulación mostrando una MDF no lineal. El tamaño de bloque utilizado para cada medición es de 4 k (o 4 096) y hay un total de 114 bloques en este registro de I/Q (como puede verse en la ventana de la parte inferior izquierda). Se utilizó un retardo de memoria para que el registro comenzase antes de la activación de la señal. Como resultado, las primeras 61 mediciones se clasificaron como ruido o portadora pura. El proceso se detuvo cuando la señal apareció la primera vez y se clasificó como MDF a 1 600 baudios, como puede observarse.

FIGURA 5

Ejemplo de software de reconocimiento de modulación



SM.1600-05

Tras procesar una mayoría del registro de I/Q, el número de resultados de la medición de MDF con una velocidad de símbolos de 1 600 crece hasta un porcentaje significativo. Ello queda en evidencia por el histograma de los resultados de la modulación (gráfico de barra roja) que figura en la ventana superior derecha. También puede observarse que se han procesado 102 bloques del registro.

Al final del registro, los 114 bloques de datos han sido procesados y la señal ya no es visible en la ventana del monitor. El resultado de la medición vuelve al ruido, pero se dispone de información suficiente como para concluir que la señal es MDF, 1 600 baudios con una desviación de 4,821 kHz y una S/N de unos 11 dB. Este fichero se procesó un bloque cada vez realizando el registro manualmente. Esta técnica permite un mayor control del proceso de análisis y mejora la probabilidad de identificar la modulación de una señal de corta duración.

El Cuadro 3 presenta información adicional sobre métodos para extraer los parámetros internos de la señal haciendo uso de operaciones matemáticas cuando no se dispone en el comercio de un software de análisis de la señal o este software no es adecuado para tratar la señal de interés.

CUADRO 3

Método manual para extraer los parámetros internos de la señal

Parámetros que van a medirse	Herramientas de análisis	Tipo de modulación	Tipo de entorno radioeléctrico
Modulación – Velocidad de la modulación asíncrona o síncrona (velocidad de símbolos)	Espectro de amplitud instantánea, A_i	MDP (filtrada o no) MIC sin filtrar o tras un fuerte filtrado MAQ (filtrada o no)	S/N media y alta
	Espectro de la frecuencia instantánea, F_i elevado a la potencia N ($N = 2$ (2MDF), 4 (4MDF))	MDF (sin filtrar)	Sólo ideal: S/N alta. Sin trayecto múltiple
	Espectro de cruce por cero en la frecuencia instantánea, F_i	MDF (filtrada o no) MDP, MAQ, MDM	Sólo ideal: S/N alta. Sin trayecto múltiple
	Espectro del módulo de la señal elevado a la potencia N ($= 2$ ó 4 o ...) tras un fuerte filtrado en frecuencia	MDP, MAQ (filtrada o no) MDF (filtrada o no)	S/N positiva
	Espectro de la señal elevado a la potencia N ($N = 1/h$)	MIC (filtrada o no)	S/N positiva
	Espectro de señal elevado a la potencia N	$\pi/2$ MDP-2D, $\pi/4$ MDP-4D, MDP-4S	S/N positiva
	Autocorrelación y autocorrelación cíclica	MDFO, SC-AMDF, SC-FDE	Cualquiera
	Análisis de correlación del espectro	MDP, MAQ, MDA, MDP-4S, $\pi/2$ MDP-2D, $\pi/4$ MDP-4D	Cualquiera
	Espectro de la transformada de la ondícula de Harr	MDF	Cualquiera, especialmente canales de trayectos múltiples complejos

CUADRO 3 (Fin)

Método manual para extraer los parámetros internos de la señal

Parámetros que van a medirse	Herramientas de análisis	Tipo de modulación	Tipo de entorno radioeléctrico
Número de estados (tipo de modulación)	Diagrama constelación/diagrama vector en asociación con ecualización ciega (es decir, algoritmo de módulo constante (CMA), Beneviste Goursat)	Cualquier modulación lineal y principalmente MDP, MAQ, MDA	S/N media y alta Canales de trayectos múltiples complejos
	Espectro elevado a la potencia N ($N = 2$, MDP-4S y $\pi/2$ MDP-2D; $N = 4$, $\pi/4$ MDP-4D)	MDP-4S, $\pi/2$ MDP-2D, $\pi/4$ MDP-4D	S/N positiva
	Densidad espectral de potencia con resolución precisa	MDFO, MDFOC, multiplexación	S/N media y alta
	Histograma de la frecuencia instantánea, F_i	MDF	S/N media y alta
Número de subportadoras o tonos	Densidad espectral de potencia	Cualquier modulación	S/N media y alta
	Histograma de la frecuencia instantánea, F_i	MDF	S/N media y alta
Sincronización de símbolos	Diagrama de ojos I/Q, diagrama vectorial $A_i F_i \Phi_i$	MDP y MAQ filtrada o no	S/N media y alta
	Diagrama de ojos I/Q, representación del histograma de frecuencias $A_i F_i \Phi_i, F_i$	MDF filtrada o no	S/N media y alta
	Diagrama de la constelación, histograma de frecuencia F_i y fase Φ_i	MIC filtrada o no	S/N media y alta
	Autocorrelación cíclica	MDFO, CS-AMDF, SC-FDE	Cualquiera
	Correlación cruzada con señales conocidas	AMDT, AMDC Varias MDFO y SC-AMDF y SC-FDE	Cualquiera

Estos métodos deben asociarse con representaciones adecuadas de la señal tras las diversas transformaciones que sufre para extraer y validar sus características.

c) *Utilización de plantillas de señales en el análisis de la señal y el software VSA*

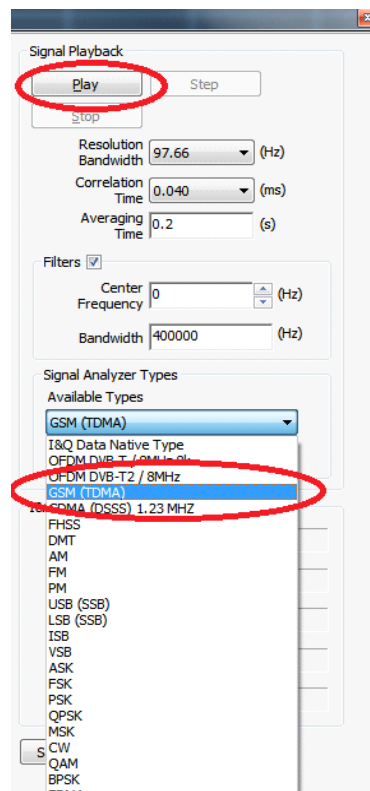
Una plantilla de señales es una lista o conjunto de medidas que hay que efectuar (como las descritas en la sección anterior) junto con los resultados esperados para una señal específica. Aplicar una plantilla de señales es otro método del proceso de identificación.

El VSA y otras herramientas de software de señal utilizan la plantilla para realizar la serie de medidas y señalar el resultado esperado en el diagrama resultante. Estos diagramas pueden utilizarse para hacer concordar los resultados previstos con los resultados reales medidos para el formato de señal seleccionado. Si los resultados medidos son comparables, se puede declarar una concordancia. De lo contrario, puede aplicarse un tipo de señal diferente de la biblioteca.

Este procedimiento se ilustra en el ejemplo siguiente (basado en un sistema GSM de la Región 2). En este ejemplo, la señal se encuentra en la banda de la estación base a la móvil celular (enlace descendente) de 879,6 MHz y el objetivo es verificar que se trata de una señal GSM dentro del ancho de banda de 200 kHz. El operador del VSA selecciona el tipo de señal «GSM» de la lista de plantillas de la biblioteca. La pantalla del VSA se configura automáticamente para el análisis GSM con marcadores etiquetados en los valores previstos del análisis de una señal GSM, a saber, una velocidad de símbolos de 270,833 kmuestras/s y una duración de trama de 577 μ s, como se muestra en la Fig. 6. Se promedia en el tiempo para mejorar la visibilidad de las características esperadas.

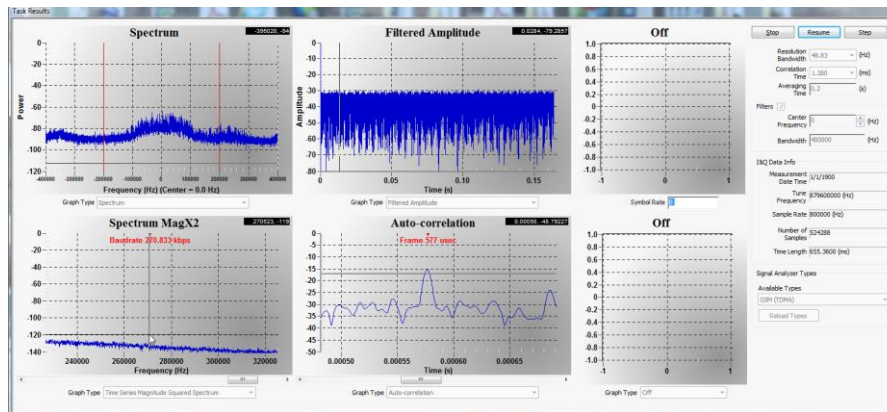
FIGURA 6

Configuración del VSA para el análisis GSM



Una vez pulsado el botón *Play*, las medidas de la señal se muestran como en la Fig. 7.

FIGURA 7
Resultados del análisis del enlace descendente GSM



SM.1600- 07

Tres ventanas del diagrama son las más relevantes para GSM:

- Gráfico del espectro del cuadrado de la magnitud (Spectrum Mag X2): Este gráfico (ampliado para la gama de frecuencias de interés) representa un FFT de la serie temporal I/Q (como muestra la Fig. 7 en «Spectrum 2nd Moment order 2»). Se observa una cresta en el espectro de la magnitud al cuadrado con un desplazamiento de aproximadamente 270 kHz, que corresponde con una velocidad de símbolos GSM de 270,833 kmuestras/s.
- Amplitud filtrada: Este gráfico muestra la amplitud de la señal filtrada logarítmicamente respecto del tiempo, en el que la señal parece desaparecer cada 600 microsegundos aproximadamente por un breve intervalo de tiempo. Esto corresponde al intervalo de tiempo GSM de 577 microsegundos. Esto se expondrá más claramente en el gráfico de autocorrelación.
- Autocorrelación: El gráfico de autocorrelación (también ampliado) se utiliza para buscar patrones que se repiten en el tiempo. En el caso de esta señal, se observa una cresta pronunciada cada 577 microsegundos aproximadamente. También se observan crestas subsiguientes en múltiplos de este valor, características éstas de la velocidad de tramas GSM.

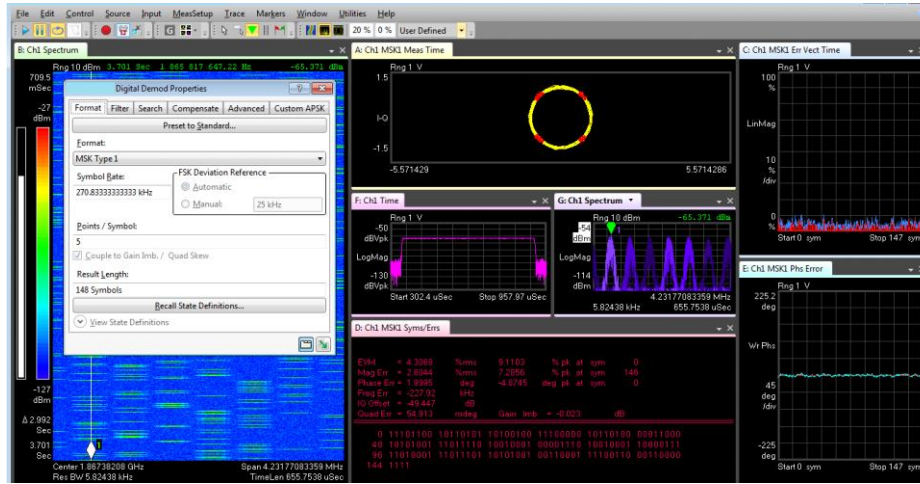
Tanto el gráfico del cuadrado del espectro como el de autocorrelación muestran crestas en los valores esperados, por lo que las características de la señal corresponden con las de GSM.

Muchos instrumentos VSA disponen de métodos para cargar plantillas de señales normalizadas que optimizan la configuración y la pantalla para el tipo de señal en concreto. Asimismo, estos instrumentos también permiten personalizar la configuración de formatos no normalizados y guardar dicha configuración con un nuevo nombre de fichero, para poder utilizarla después. Estos instrumentos VSA suelen permitir la creación de gráficos y pantallas personalizados con arreglo a funciones matemáticas, como las que figuran en el Cuadro 3.

En la Fig. 8 se muestra otro análisis GSM preconfigurado. En este caso, el registro de I/Q era de aproximadamente 4 MHz de ancho y se aplicó a la banda de estación móvil GSM a la estación base (enlace ascendente), por lo que había varios canales. Todas las señales en la banda se demodularon adecuadamente, como se observa en los diagramas de la pantalla de constelación, pequeño porcentaje de error EVM y una longitud de intervalo de tiempo adecuada. Este diagrama se creó cargando y reproduciendo el fichero I/Q en la plantilla GSM. No fue necesaria ninguna

configuración adicional, ni centrar o seleccionar nada. Ahora bien, muchos instrumentos VSA permiten centrar y volver a muestrear I/Q a fin de aislar una señal para analizarla.

FIGURA 8
Resultados del análisis del enlace ascendente GSM



SM.1600-08

En el § 4 (Resumen) de la presente Recomendación figura una lista de plantillas de VSA típicas para formatos de modulación y normas de comunicaciones analógicas y digitales. Las plantillas de señales VSA especifican adecuadamente el prefiltrado y promediado de datos, la asignación de tipos de gráfico a cada ventana de visualización y la configuración de marcadores para dichas ventanas a fin de indicar las crestas y las características previstas de la señal. Este método ofrece al operador una forma fácil de repetir e interpretar el análisis para la identificación de señales.

3.3 Utilización de un software de análisis de la señal para definirla con más detalle

Los dos primeros pasos han revelado las características básicas de la señal de interés:

- frecuencia central;
- ancho de banda de la señal;
- relación señal-ruido;
- duración;
- formato de modulación;
- velocidad de símbolos.

Normalmente esta información es adecuada para identificar positivamente el tipo de señal comparándola con los Cuadros de atribución de bandas de frecuencias publicados y las especificaciones técnicas de los sistemas de comunicaciones utilizados en la zona de interés. Si se necesita más evidencia sobre la señal de interés, puede que sea necesario realizar un análisis en profundidad o decodificar la señal.

El software de análisis de la señal vectorial cuenta con esquemas de decodificación para la mayoría de los formatos modernos de comunicaciones digitales. Estos algoritmos de demodulación y decodificación no procesan el registro de I/Q a su contenido original, sino que miden la calidad de la señal con respecto a un modelo ideal. Esto puede proporcionar evidencia adicional de que el registro de I/Q se ha identificado correctamente.

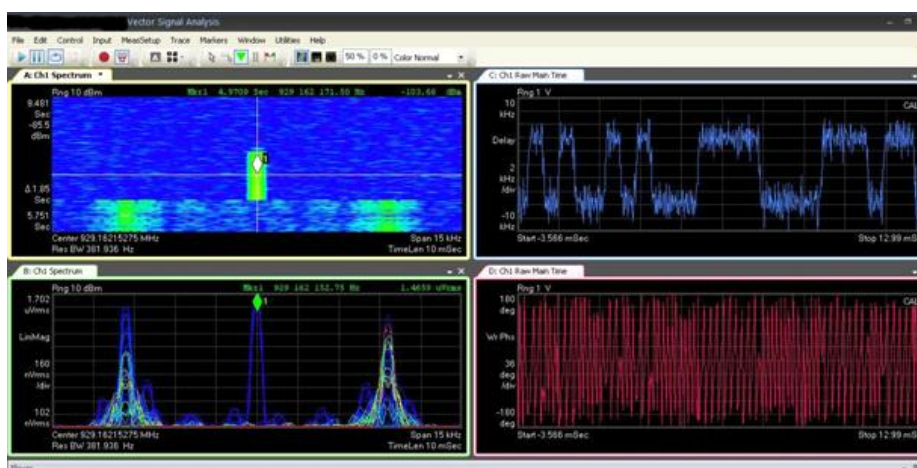
En caso de que se requiera identificación positiva de una transmisión específica, se necesitará un paquete de software de decodificación de la señal o técnicas de intercorrelación, autocorrelación o correlación cruzada. Se pueden encontrar en el mercado paquetes de decodificación comerciales que son útiles para algunos formatos de comunicación modernos, pero no para todos.

a) *Representación del registro de I/Q con software VSA*

El software VSA ofrece al usuario diferentes representaciones analíticas de la señal. En la Fig. 9 la misma señal utilizada anteriormente se muestra en el software VSA. La pantalla superior izquierda es un espectrograma y muestra el inicio de la señal, incluida la portadora y la primera parte de la señal modulada. La parte inferior izquierda es el espectro mostrado con persistencia digital, lo que permite al usuario observar las características de corta duración en el contexto de los aspectos más persistentes de una transmisión. La pantalla superior derecha muestra el retardo de grupo o la frecuencia en función del tiempo. Como se trata de una señal con modulación por desplazamiento de frecuencia, pueden observarse los símbolos individuales transmitidos. En la parte inferior derecha aparece representada la fase en función del tiempo, lo que es especialmente útil si la señal de interés está modulada en fase.

FIGURA 9

Software VSA – Una selección de ventanas de análisis de la señal



SM.1600-09

El lector debe observar que esta señal se recibió con un nivel de potencia muy bajo. La portadora se midió a un nivel de $-103,7$ dBm a la entrada del receptor. Como resultado, hay un ruido significativo presente en la traza superior derecha (que muestra la forma de onda FM). Como el software VSA funciona en un registro de los datos de I/Q, es posible realizar las mediciones utilizando la información de potencia de la señal, frecuencia y fase.

b) *Confirmación del reconocimiento e identificación demodulando el registro de I/Q con software VSA*

Se recomienda contar en la misma herramienta de análisis con una amplia selección de demoduladores digitales especializados en tipos de modulación no lineal y lineal, asociados con varios algoritmos de ecualización de canal y con gráficos y monitores que permitan evaluar la convergencia de la demodulación.

Continuando con los anteriores registros de I/Q, puede utilizarse la capacidad de demodulación digital del software VSA para validar el formato de modulación y la velocidad de símbolos de la señal de interés. Aplicando el software VSA en modo de demodulación digital, puede introducirse

el formato de modulación específico (MDF de 2 niveles) y la velocidad de símbolos (1 600) determinados en el paso anterior para validar los parámetros internos de la señal.

En la Fig. 10, que muestra el ejemplo de señal con MDF no lineal, la traza superior izquierda muestra un valor de I/Q (o polar) con 2 estados de frecuencia de la señal, el estado izquierdo (punto rojo) representa el símbolo «0» y el estado derecho representa el símbolo «1». Si se ha determinado correctamente el formato de modulación y la velocidad de símbolos, esta traza de I/Q debe ser muy estable y los puntos rojos (o estados) deben aparecer en los campos adecuados. Esta convergencia implica que se han seleccionado correctamente los valores de demodulación y se ha aplicado el adecuado filtrado y equalización.

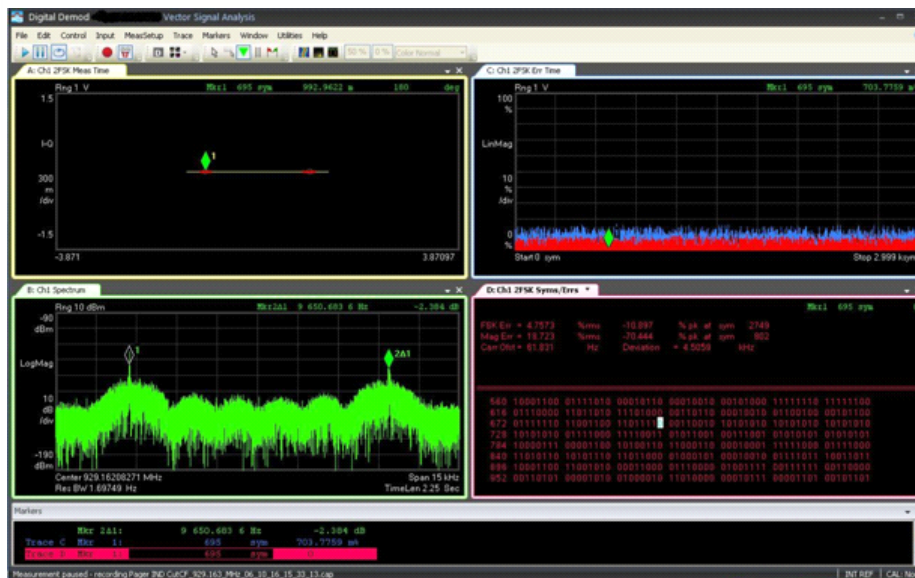
La traza inferior izquierda es un gráfico del espectro de la señal integrado a lo largo del número de símbolos demodulados; en este caso, se demodularon 3 000 símbolos. Este gráfico del espectro debe coincidir en gran medida con la señal observada inicialmente.

La traza superior derecha muestra la magnitud del vector error (EVM) para cada símbolo demodulado. La EVM puede visualizarse como un valor medio global o símbolo a símbolo. Todos los valores de error asociados a esta demodulación están por debajo del 1% de manera que con un alto grado de probabilidad los bits asociados a esta señal son buenos.

La traza inferior derecha es un resumen de los bits demodulados realmente y de los errores. Obsérvese que los marcadores en las cuatro pantallas están vinculados para mostrar el símbolo «0» asociado con el símbolo # 695 de 3 000. Estos marcadores se desplazan a lo largo del registro de I/Q para informar al usuario de que los ajustes de la demodulación son correctos.

FIGURA 10

Software VSA – Herramientas de la demodulación digital



SM.1600-10

3.4 Proceso del registro de I/Q

El último paso en el análisis y la identificación técnica de una señal digital desconocida debe realizarse de conformidad con las restricciones legales y éticas relativas al uso de la información. Con varios equipos y herramientas de software de señal es posible realizar la descodificación del registro de I/Q para extraer parte del contenido original. En este ejemplo, el mismo registro de I/Q

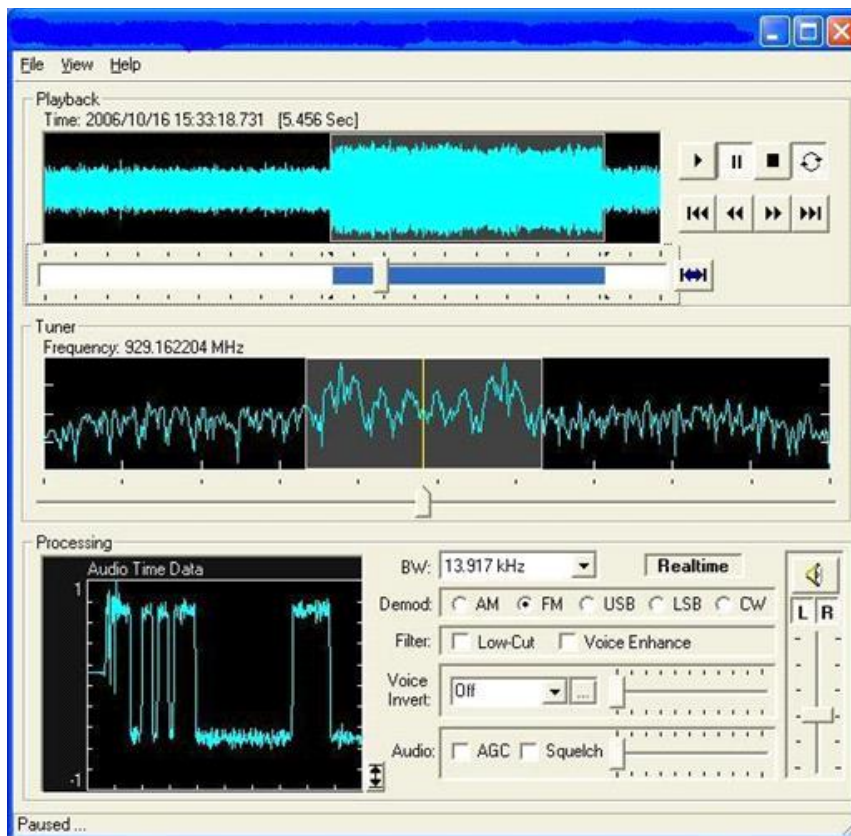
realizado puede procesarse con software de decodificación comercialmente disponible a fin de identificar positivamente la fuente de la transmisión.

a) *Procesamiento con software de demodulación de audio*

Algunos software de decodificación funcionan procesando la señal de audio creada al demodular la señal con formatos normalizados (MA, MF, U/LSB o CW). En este caso, se necesita un programa de software que pueda crear el audio. El programa mostrado en la Fig. 11 es un ejemplo. Este programa reproducirá un registro de I/Q y el audio de salida. Como el registro no ha sido previamente «detectado en AM o FM», el programa permite al usuario ajustar la frecuencia central y el ancho de banda del proceso de demodulación. Ello ofrece flexibilidad cuando se trabaja con algoritmos de decodificación que son muy sensibles a la frecuencia central y al ancho de banda de la señal de audio.

FIGURA 11

Ejemplo de software reproductor de audio



SM.1600-11

Otra ventaja de trabajar con registros de I/Q es que pueden emplearse diferentes esquemas de detección a fin de obtener el mejor audio para decodificación. Esta flexibilidad reduce la ansiedad de operador que está haciendo registros «sobre el terreno». Si la frecuencia central de la forma de onda I/Q registrada está descentrada, el registro puede volver a muestrearse y/o volver a centrarse (como muestra la Fig. 11) para obtener buenos resultados.

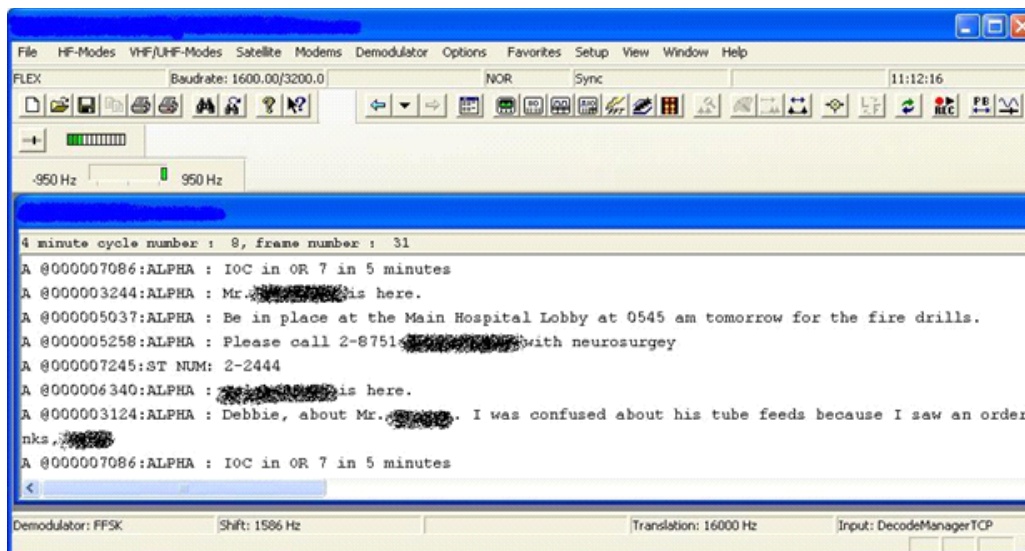
b) *Procesamiento con software de decodificación de la señal*

El software de decodificación de la señal aplicará el formato seleccionado para el registro y presenta los resultados en una ventana o los almacena en un fichero de texto. Se realizan normalmente varios ajustes para cada esquema de decodificación. Algunos de estos programas

incluyen «identificadores de señal» pero a menudo se trata de esquemas de modulación muy sencillos tales como MDF o MDP. En el siguiente ejemplo, el registro de I/Q se ha introducido en un esquema de decodificación y el formato se ha fijado a FLEX y POCSAG, dos señales de radio búsqueda comúnmente utilizadas. Estos formatos se eligieron basándose en la frecuencia central (929,162 MHz), el ancho de banda (12,5 kHz) – o las características externas de la señal y el formato de modulación (MDF) y la velocidad de símbolos (1 600) – o las características internas de la señal. POCSAG no produjo resultado de decodificación. A continuación, aparecen los resultados de la decodificación FLEX.

FIGURA 12

Ejemplo de software de decodificación disponible en el mercado



SM.1600-12

El contenido de información extraído de la emisión original permitirá al usuario identificar positivamente la fuente y tomar las medidas reglamentarias apropiadas con pruebas suficientes.

3.5 Métodos de correlación y otros métodos

Este punto describe algoritmos avanzados que puede emplear el servicio de comprobación para la identificación de la señal digital.

a) Métodos de correlación

Correlación cruzada: La correlación cruzada es una medida de la similitud de dos formas de onda en función de un retardo de tiempo aplicado a una de ellas. También se conoce como producto escalar deslizante o producto interno deslizante.

Autocorrelación: La autocorrelación es la correlación cruzada de una señal consigo misma. De manera informal se trata de la similitud entre observaciones en función de la separación temporal entre ellas. Es una herramienta matemática para encontrar patrones repetitivos, tales como la presencia de una señal periódica oculta por el ruido o identificar la frecuencia fundamental perdida en una señal indicada por sus frecuencias armónicas. A menudo se utiliza en el procesamiento de la señal para funciones de análisis o series de valores, tales como las señales en el dominio del tiempo.

El uso de estos algoritmos puede permitir la detección y el reconocimiento de secuencias periódicas integradas que pueden emplearse como la señal de referencia conocida en posteriores procesamientos.

Se utilizan normalmente para buscar una señal de larga duración para una característica corta conocida (como el preámbulo o el medioámbulo, la palabra de sincronización o el código piloto). En la práctica, estas características conocidas se modulan en el interior de las formas de onda digitales normalizadas y ofrecen un patrón que puede utilizarse para analizar unívocamente una señal de interés:

- Las palabras de sincronización se encuentran en muchas formas de onda continuas normalizadas (tales como la multiplicación por división de frecuencia (MDF) y el acceso múltiple por división de frecuencia (AMDF) que aparecen en muchos aparatos de radio, buscapersonas y PMR (NMT, TETRAPOL, etc.).
- Las secuencias de acondicionamiento aparecen en las formas de onda normalizadas de AMDT, tales como la forma de onda de varios celulares 2G y PMR (GSM, D-AMPS, TETRA, PHS).
- Los códigos PILOT o las palabras de sincronización aparecen en el AMDC normalizado o en las formas de onda AMDT/AMDC, etc. que a menudo se encuentran en los sistemas celulares 3G (3GPP/UMTS, 3GPP2/AMDC2000).
- Los símbolos PILOT o las subportadoras dispersas PILOT aparecen en las señales moduladas MDFO, MDFOA, MFDOC y CS-AMDF/SC-FDE que se encuentran muy a menudo en los sistemas de radiodifusión (DAB, DVB-T/H) y en los sistemas celulares 4G (3GPP/LTE).

La aplicación práctica de estas técnicas hace uso de ventanas deslizantes en el dominio del tiempo para determinar el instante de llegada de la señal y las técnicas de compensación del efecto Doppler para compensar el movimiento de la fuente de la señal. Generalmente, los métodos 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.

b) Otros métodos avanzados

Transformada de ondícula de Haar: «Con la ayuda de este esquema, pueden ser posibles la clasificación y el reconocimiento automáticos de la modulación de las señales de comunicaciones inalámbricas con parámetros desconocidos *a priori*. Las características especiales del proceso son la posibilidad de adaptarlo dinámicamente a casi todos los tipos de modulación y la capacidad de identificar. El esquema desarrollado, basado en la transformada de ondícula y en los parámetros estadísticos, se ha utilizado para identificar modulaciones MDP M-aria, MAQ M-aria, GMSK y MDF M-aria. Los resultados simulados demuestran que es posible la identificación de la modulación correcta a un límite inferior de 5 dB. El porcentaje de identificación se ha analizado basándose en la matriz de confusión³. Cuando la S/N se encuentra por encima de 5 dB, la probabilidad de detección del sistema propuesto es más de 0,968. El comportamiento del esquema propuesto se ha comparado con los métodos existentes y se ha observado que identificará todos los esquemas de modulación digital con un valor bajo de S/N.» (Véase la referencia [1].)

³ En el campo de la inteligencia artificial, una matriz de confusión es un esquema específico en forma de cuadro que permite visualizar el comportamiento de un algoritmo, normalmente uno de aprendizaje supervisado (si se trata de aprendizaje sin supervisar se denomina normalmente matriz de adaptación). Cada columna de la matriz representa las instancias de una clase prevista y cada fila representa las instancias de una clase real. El nombre procede del hecho de que facilita ver si el sistema está confundiendo dos clases (es decir, está etiquetando erróneamente una por otra). Fuera de la inteligencia artificial la matriz de confusión se denomina a menudo cuadro de contingencia o matriz de errores.

Análisis de correlación espectral: Muchas señales utilizadas en los sistemas de comunicación presentan periodicidades de sus parámetros estadísticos de segundo orden debido a operaciones tales como el muestreo, la modulación, la multiplexación y la codificación. Estas propiedades cicloestacionarias, que se denominan características de correlación espectral, pueden usarse para la detección y el reconocimiento de la señal. A fin de analizar las características cicloestacionarias de la señal, se emplean normalmente dos funciones principales:

- 1) la función de autocorrelación cíclica (CAF) se utiliza para el análisis en el dominio del tiempo; y
- 2) la función de correlación espectral (SCF), que presenta la correlación espectral y se obtiene a partir de la transformada de Fourier de la autocorrelación cíclica.

Pueden distinguirse diferentes tipos de señal (por ejemplo, MA, MDA, MDF, MDP, MDM, MDP-4) basándose en varios parámetros característicos de la SCF y la SCC. Este algoritmo también es eficaz en señales débiles y puede utilizarse para el análisis y la posible clasificación de señales desconocidas. (Véase la referencia [2].)

4 Resumen

Los ejemplos que aparecen en esta Recomendación sirven para ilustrar el proceso de identificación y el uso de herramientas informáticas disponibles en el mercado, así como técnicas para conocer con más detalles las señales digitales modernas. Los ejemplos de correlación ilustran las técnicas de procesamiento avanzadas que pueden utilizarse para la identificación de señales complejas.

La capacidad de efectuar registros de I/Q en los analizadores de señal vectoriales, las herramientas de análisis de señales vectoriales y los receptores de comprobación técnica se ha hecho más común en los últimos años. Las herramientas para el análisis de la señal, el reconocimiento de la modulación y la identificación de la señal también son ahora mucho más accesibles y asequibles económicamente. Estas herramientas permiten al servicio de comprobación aplicar más automatización a la detección, registro, análisis e identificación de las emisiones digitales de interés y reconocer y disminuir con más eficacia los problemas resultantes de la interferencia.

5 Referencias

5.1 Referencias sobre las herramientas de software

Esquemas de modulación normalmente soportados por el software VSA:

- MDF: nivel 2, 4, 8, 16 (incluido GSKF);
- MDM (incluido GMSK) Tipo 1, Tipo 2;
- MIC MDP-2;
- MDP-4, MDP-4O, MDP-4D, MDP-8D, MDP-4D $\pi/4$;
- MDP-8, MDP-8 $3\pi/8$ (EDGE), MDP-8D $\pi/8$;
- MAQ (codificación absoluta): 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024;
- MAQ (codificación diferencial con norma DVB): 16, 32, 64, 128, 256;
- MAQ estrella: 16, 32;
- MDPA: 16, 16 con DVB, 32, 32 con DVB, 64 VSB: 8, 16, MDPA personalizada.

Formatos normalizados de comunicaciones digitales soportados normalmente por el software VSA:

- celular: AMDC (base), AMDC (móvil), CDPD, EDGE, GSM, NADC, PDC, PHP (PHS), W-CDMA, LTE, LTE avanzado;
- red inalámbrica: Bluetooth™, HiperLAN1 (HBR), HiperLAN1 (LBR), IEEE 802.11b, ZigBee 868 MHz, ZigBee 915 MHz, ZigBee 2 450 MHz;
- vídeo digital: DTV8, DTV16, DVB16, DVB32, DVB64, DVB128, DVB256, DVB MDPA-16, DVB MDPA-32;
- otros: APCO 25, APCO-25 P2 (HCPM), APCO-25 P2 (MDP-4 HD), DECT, TETRA, VDL modo 3, MIL-STD 188-181C: CPM (Opción 21).

5.2 Documentos de referencias

- [1] PRAKASAM P. y MADHESWARAN M., Digital modulation identification model using wavelet transform and statistical parameters, *Journal of Computer Systems, Networks, and Communications* Volume 2008 (2008), Article ID 175236, 8 pagesdoi:10.1155/2008/175236
 - [2] HAO Hu, JUNDE Song, Signal Classification based on Spectral Correlation Analysis and SVM in Cognitive Radio, 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication and Yujing Wang, Dept. of Telecommunication Engineering, Xidian University
-