

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R SM.1753-1
(04/2010)

**Métodos para medir el
ruido radioeléctrico**

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	Radio astronomía
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, 2011

© UIT 2011

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.1753-1

Métodos para medir el ruido radioeléctrico

(2006-2010)

Cometido

Para efectuar mediciones del ruido radioeléctrico y obtener resultados de los diferentes sistemas de medición que sean exactos, reproducibles y comparables, es necesario contar con un método de medida uniforme e independiente de las frecuencias. En la presente Recomendación se señala un conjunto de procesos o pasos que habrá que integrar en un procedimiento de medición para obtener resultados comparables.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que debido a la introducción de muchos tipos de equipos eléctricos y electrónicos (que producen ruido radioeléctrico) y de redes de telecomunicaciones (por ejemplo, redes de banda ultraamplia (UWB), sistemas de telecomunicaciones por líneas de transporte y distribución de energía eléctrica (PLT) y ordenadores), podrían aumentar los niveles de ruido radioeléctrico especificados en la Recomendación UIT-R P.372;
- b) que, para realizar una gestión eficaz del espectro, las administraciones deben conocer exactamente los niveles de ruido;
- c) que es preciso armonizar los métodos de medición del ruido a fin de obtener resultados reproducibles que puedan compararse;
- d) que, para las mediciones del ruido, se necesitan una especificaciones mínimas de los equipos,

recomienda

- 1 que las mediciones del ruido radioeléctrico se efectúen como describe el Anexo 1.

Anexo 1**Métodos para medir el ruido radioeléctrico****1 Introducción**

Este Anexo describe los métodos para medir y evaluar el ruido radioeléctrico en el marco de aplicaciones prácticas de radiocomunicaciones.

2 Fuentes de ruido radioeléctrico

- radiación procedente de descargas del rayo (ruido atmosférico debido al rayo);
- la suma de radiación no intencionada procedente de maquinaria eléctrica, equipos eléctricos y electrónicos, líneas de transmisión de energía o sistemas de encendido de motores de combustión interna (ruido artificial);
- emisiones procedentes de hidrometeoros y de gases atmosféricos;

- la superficie u otros obstáculos situados dentro del haz de antena;
- la radiación procedente de fuentes radioeléctricas cósmicas.

Si bien no es probable que el ruido debido a causas naturales varíe significativamente a lo largo de amplios periodos de tiempo, el ruido artificial (MMN, *man-made noise*) a menudo es el que predomina en algunas partes del espectro radioeléctrico y su intensidad puede cambiar al aumentar la densidad de utilización de dispositivos eléctricos y electrónicos, con la introducción de nuevos tipos de dispositivos y con las modificaciones introducidas en las medidas destinadas a mejorar la compatibilidad electromagnética. Por consiguiente, el ruido artificial es el tipo de ruido que interesa fundamentalmente cuando se llevan a cabo mediciones de ruido radioeléctrico.

CUADRO 1

**Predominio de las fuentes de ruido radioeléctrico
según la gama de frecuencias**

Fuente de ruido	Gama de frecuencias
Ruido atmosférico debido al rayo	9 kHz a 30 MHz
Ruido cósmico	4 MHz a 100 MHz
Ruido artificial	9 kHz a 1 GHz
Emisiones procedentes de gases atmosféricos, etc.	Por encima de 10 GHz

3 Componentes del ruido radioeléctrico

Utilizando la definición que aparece en la Recomendación UIT-R P.372, el ruido radioeléctrico es la combinación de emisiones procedentes de múltiples fuentes cuyo origen no son los transmisores de radiocomunicaciones. Si en un emplazamiento de medición determinado no predomina una fuente de ruido única, la característica del ruido radioeléctrico normalmente presenta una distribución de amplitud normal y puede considerarse un ruido blanco gaussiano.

Sin embargo, teniendo en cuenta la elevada densidad de dispositivos emisores de ruido, especialmente en las ciudades y en las zonas residenciales, es virtualmente imposible encontrar un emplazamiento que no esté, al menos temporalmente, dominado por el ruido o las emisiones procedentes de una sola fuente. Estas fuentes a menudo emiten impulsos o portadoras únicas. Como los equipos de radiocomunicaciones tienen que funcionar en dichos entornos, no es realista excluir estas componentes de las mediciones del ruido radioeléctrico.

CUADRO 2

Componentes del ruido radioeléctrico

Componente del ruido	Propiedades	Fuentes (ejemplos)
Ruido blanco gaussiano ⁽¹⁾ (WGN)	Vectores electromagnéticos no correlados. Anchura de banda igual o mayor que la anchura de banda del receptor. El nivel espectral de potencia aumenta de forma lineal con la anchura de banda	Ordenadores, redes de comunicaciones por líneas de transporte y distribución de energía eléctrica, redes informáticas cableadas, ruido cósmico

CUADRO 2 (*Fin*)

Componente del ruido	Propiedades	Fuentes (ejemplos)
Ruido impulsivo (IN)	<p>Vectores electromagnéticos correlados.</p> <p>Anchura de banda mayor que la anchura de banda del receptor.</p> <p>El nivel espectral de potencia crece como el cuadrado de la anchura de banda</p>	Chispas de encendido, rayos, cebadores de lámparas de gas, ordenadores, dispositivos de banda ultraamplia
Ruido de portadora única (SCN)	<p>Una o más rayas espectrales distintas.</p> <p>Anchura de banda más reducida que la anchura de banda del receptor.</p> <p>Nivel espectral de potencia independiente de la anchura de banda</p>	Redes informáticas cableadas, ordenadores, fuentes de alimentación en modo conmutado

⁽¹⁾ En este Anexo a la Recomendación UIT-R SM.1753, se considera que el WGN representa una señal de ruido continuo con una densidad espectral de potencia casi plana en las gamas de frecuencias en torno a la anchura de banda de medición.

Si bien la componente de WGN queda suficientemente caracterizada por el valor eficaz, esto es mucho más difícil para el IN. Los modernos servicios de comunicaciones digitales casi siempre aplican un sistema de corrección de errores, lo que los hace más inmunes especialmente contra el ruido impulsivo. No obstante, cuando se alcanzan ciertos valores de duración del impulso y de tasa de repetición de impulsos, el IN puede interferir de forma significativa en el funcionamiento de dichos servicios.

Por tanto, conviene medir el ruido radioeléctrico de forma que no sólo se determine el nivel de IN sino también se proporcione cierta información sobre la distribución estadística de los parámetros del impulso.

El ruido de portadora única (SCN) sólo se detecta como tal cuando procede de una sola fuente situada en las proximidades del emplazamiento de medición. Múltiples fuentes que emiten portadoras únicas se combinan rápidamente para constituir un espectro similar al del ruido a medida que aumenta su número. La Recomendación UIT-R P.372 define el ruido radioeléctrico como la combinación de radiación no intencionada procedente de varias fuentes y excluye específicamente las emisiones procedentes de fuentes únicas identificables. Por consiguiente, es necesario seleccionar los emplazamientos de medición y/o las frecuencias no dominadas por las emisiones procedentes de estas fuentes únicas, lo que hace innecesario seguir considerando el SCN en el contexto de las mediciones del ruido artificial (MMN).

4 Parámetros fundamentales

Los procedimientos de medición aquí descritos producirán resultados para los siguientes parámetros del ruido radioeléctrico:

WGN:

- Nivel eficaz, presentado como un solo valor o como medianas horarias a lo largo del día.

IN:

- Nivel de cresta, presentado como una distribución.
- Duraciones del impulso/ráfaga, presentadas como una distribución.
- Periodo del impulso/ráfaga, presentado como una distribución.

5 Principios de medición

La componente de ruido blanco gaussiano (WGN) puede medirse utilizando un detector de valor eficaz. Este método de medición se conoce como «método del valor eficaz». Utilizando la reducción del 20% descrita en el § 10.3, es posible obtener el valor eficaz del ruido directamente a partir de una exploración de frecuencia, aun cuando algunas de las frecuencias estén ocupadas por señales deseadas.

Sin embargo, el IN sólo puede medirse mediante un muestreo rápido de los valores momentáneos de la amplitud de RF. Estos valores se almacenan para una evaluación fuera de línea a fin de obtener los parámetros del impulso. La medición se realiza preferentemente en una sola frecuencia que esté libre de señales deseadas y portadoras continuas. El máximo tiempo entre dos muestras consecutivas es:

$$T_s \leq \frac{1}{2 * RBW} \quad (1)$$

donde:

T_s : tiempo entre dos muestras consecutivas

RBW : anchura de banda del filtro utilizado para la medición.

Este método de medición se conoce con el nombre de «método de muestreo de datos en bruto».

6 Tipo de medición

Determinar el nivel y las características del MMN verdadero, incluido el IN, para todas las gamas de frecuencia puede llevar mucho tiempo al ser una tarea de medición muy compleja. Sin embargo, cuando sólo interesa la componente del WGN, o únicamente deben investigarse ciertas gamas de frecuencias, las mediciones pueden simplificarse notablemente sin perder información importante o disminuir la precisión. Por esta razón, al realizar las mediciones de ruido radioeléctrico se recomienda utilizar las tres metodologías distintas siguientes:

Tipo A: Sólo WGN. Este tipo de medición proporciona únicamente los niveles de WGN, ignorando el IN. Requiere únicamente realizar mediciones del nivel eficaz restante en una frecuencia «libre». Puede aplicarse tanto el método del valor eficaz como el del muestreo de datos en bruto. La evaluación de los datos es relativamente sencilla.

Tipo B: WGN e IN. Con este tipo de medición se obtienen los niveles de WGN y las características de los parámetros de IN importantes del ruido radioeléctrico. Requiere un muestreo de datos rápido (método de muestreo de datos en bruto). La evaluación de los datos es más compleja y exige un amplio postprocesamiento, que generalmente sólo puede realizarse por medio de ordenadores.

Tipo C: WGN, IN y separación del MMN. Además del nivel de WGN y las características del IN, este tipo de medición separa en gran medida el MMN y el IN del ruido atmosférico, lo cual reviste gran importancia en la gama de frecuencias de ondas decamétricas. El proceso de medición es igual a la medición de Tipo B, pero debe llevarse a cabo en dos emplazamientos distintos y los equipos en estos emplazamientos deben estar sincronizados en el tiempo.

La selección del tipo de medición adecuado depende de los requisitos, de la categoría medioambiental y de la gama de frecuencias. Si los resultados de las mediciones son de uso general, se subraya el tipo recomendado.

CUADRO 3

Tipos de medición recomendados

Gama de frecuencias	Mediciones en exteriores	Mediciones en interiores
9 kHz – 300 kHz (ondas kilométricas)	A, B	A, B
300 kHz – 3 MHz (ondas hectométricas)	A, B, C	A, B
3 MHz – 30 MHz (ondas decamétricas)	A, B, C	A, B
30 MHz – 300 MHz (ondas métricas)	A, B	A, B
300 MHz – 3 GHz (ondas decimétricas)	A, B	A, B
> 3 GHz (ondas centimétricas)	A	A

7 Especificaciones de los equipos

7.1 Receptor y preamplificador

El receptor de medición debe ser un receptor de medición transportable normalizado o un analizador de espectro y cualquier preamplificador adicional que se utilice, tal como un LNA, debe presentar un bajo factor de ruido del equipo junto con una elevada estabilidad de la ganancia, lo cual es esencial para la calidad de las mediciones del ruido.

A fin de garantizar una precisión en la medición aceptable es preciso mantener el ruido medido al menos 10 dB por encima del ruido de fondo del equipo si se emplea un detector de valor eficaz. Un amplificador de bajo nivel de ruido externo (LNA) puede ayudar a conseguir este objetivo. Es fundamental para frecuencias > 20 MHz.

Debe tomarse la precaución de utilizar un receptor de medición con un sistema de corrección de errores incorporado que debe aplicarse a los resultados cuando se miden relaciones S/N bajas. Si esta corrección del ruido es conmutable, puede activarse. No obstante, en este caso no es aplicable ninguna corrección adicional como la descrita en el § 10.2.

Los requisitos del sistema de medición aparecen en el Cuadro 4, que no describe un nuevo conjunto de receptores de medición o especificaciones del LNA sino que sólo señala los requisitos adicionales o específicos necesarios para el receptor y el LNA utilizados en las mediciones de ruido. Además, las denominaciones de la banda de frecuencias se basan en la implementación práctica de un sistema de medición de ruido y no se refieren a un sistema de recepción específico.

CUADRO 4

Requisitos del sistema de medición del ruido (receptor/LNA)

Función	Gama de frecuencias		
	9 kHz – 30 MHz	30-500 MHz	0.5-3 GHz
Entrada (entrada de antena) ROE	50 Ω , nominal < 1,5		
Interruptor de 3 ^{er} orden	≥ 20 dBm (> 3 MHz)	≥ 10 dBm	≥ 0 dBm
Interruptor de 2 ^o orden	≥ 60 dBm (> 3 MHz)	≥ 50 dBm	≥ 40 dBm
Preselección	Conjunto de filtros de banda de suboctava o filtro de seguimiento	Filtro de seguimiento o fijo Filtro paso bajo/paso alto	
Factor de ruido total	≤ 15 dB (> 2 MHz)	≤ 2 dB ⁽¹⁾ (> 20 MHz)	≤ 2 dB ⁽¹⁾
Rechazo de FI	> 80 dB	> 90 dB	> 100 dB
Rechazo de imagen	> 80 dB	> 90 dB	> 100 dB
Ganancia del LNA	≤ 18 dB	≤ 25 dB	≤ 25 dB
Estabilidad de ganancia del LNA	$\leq 0,7$ dB a 20-30°C		
Uniformidad de la ganancia del LNA en la gama de frecuencias de interés	< 0,4 dB	< 0,4 dB	< 0,5 dB
CAG	No debe aplicarse CAG a los resultados de la medición		
Compatibilidad electromagnética del montaje de medición incluidos los ordenadores y la interfaz	Toda la interferencia producida y recibida por el montaje de medición debe estar > 10 dB por debajo del ruido medio que va a medirse		

⁽¹⁾ Este factor de ruido se aplica al LNA.

Cuando se emplea un LNA, la combinación de receptor y LNA debe satisfacer los requisitos señalados en el Cuadro 4. El factor de ruido del sistema de la combinación está dominado por el factor de ruido del LNA.

Debe tomarse la precaución de no sobrecargar el receptor o el LNA. Hay que aplicar un filtro paso banda externo para impedir esta sobrecarga. Por debajo de 30 MHz, las señales con el mayor nivel de entrada proceden de estaciones de radiodifusión. La atenuación del filtro paso banda a través de las bandas de radiodifusión debe ser al menos de 20 dB.

Hay que conocer con precisión la selectividad en FI entre 6 dB y 60 dB para calcular la anchura de banda de ruido equivalente cuando deban compararse mediciones efectuadas con distintos filtros de FI. Si se especifica, la anchura de banda del ruido puede extraerse de las especificaciones del receptor. Se trata de la anchura de banda de un filtro rectangular (teórico) que deja pasar la misma potencia de ruido que el filtro del receptor o del analizador.

7.2 Antenas

De conformidad con la Recomendación UIT-R P.372, el nivel de ruido se expresa como factor de ruido (en dB por encima del ruido térmico) en vez de como intensidad de campo. Este factor de ruido se referencia, por definición, a una antena «sin pérdidas». Con respecto a las fuentes de ruido uniformemente distribuidas en el plano horizontal o que se reciben bajo un ángulo vertical relativamente pequeño, la aproximación más ajustada a una antena sin pérdidas es un dipolo sintonizado vertical. Por consiguiente, se recomienda utilizar dicho dipolo para las mediciones del ruido por encima de 30 MHz.

Por debajo de 30 MHz, los dipolos verticales no son prácticos puesto que su tamaño es demasiado grande. Además, sólo son ideales si están lo suficientemente alejados del suelo, lo cual puede ser difícil de lograr. Por tanto, la Recomendación UIT-R P.372 utiliza un monopolo vertical corto situado sobre un suelo conductor perfecto como antena de referencia para frecuencias inferiores a 30 MHz. Se recomienda emplear como antena de medición un monopolo vertical corto con una altura inferior a una décima parte de la longitud de onda. Sin embargo, este monopolo corto debe estar eléctricamente adaptado a la impedancia de entrada del receptor (normalmente 50 Ω). Esta adaptación generalmente se realiza utilizando elementos activos. Es importante no incluir en la antena ninguna amplificación adicional pues ello haría que dicha antena estuviese sujeta a sobrecargas causadas por señales de radiodifusión de gran intensidad.

Aplicando el modelo según el cual las fuentes de ruido se reciben uniformemente desde todos los ángulos, no es necesario corregir la posible directividad de la antena de medición. Incluso las antenas más directivas, como las Yagi, sólo logran la ganancia en la dirección preferida suprimiendo las señales correspondientes que llegan de otras direcciones, de forma que la ganancia media para el entorno de ruido es cero. Por consiguiente, es posible utilizar antenas directivas para realizar las mediciones cuando cabe esperar que el ruido esté uniformemente distribuido, siempre que dichas antenas estén adaptadas.

Para calcular el factor de ruido externo es necesario conocer el factor de antena que puede utilizarse a fin de determinar la intensidad de campo a partir de la tensión de antena medida. A menudo, esta cifra viene dada por el fabricante, pero deben considerarse detenidamente los siguientes puntos:

- Si la antena es directiva, el factor de antena comunicado por el fabricante sólo se aplica a la dirección del haz principal. No obstante, para calcular la intensidad de campo del ruido únicamente debe emplearse el factor de antena medio¹ de las señales procedentes de cualquier dirección.
- Especialmente a bajas frecuencias es importante que se satisfagan las condiciones bajo las cuales ha indicado el fabricante el factor de antena. Parámetros tales como la distancia de la antena al suelo, las obstrucciones en las proximidades inmediatas de la antena y las tomas de tierra pueden alterar de forma significativa el valor del factor de antena.

Cuando se desconoce el factor de antena, también puede medirse utilizando una antena de referencia con un factor de antena conocido, pero siguen aplicándose las anteriores condiciones. Una manera práctica de determinar el factor de antena consiste en comparar los niveles de la medición y la antena de referencia para un gran número de emisiones procedentes de direcciones aleatorias y promediar a continuación los resultados para cada banda de frecuencias.

¹ Cuando las fuentes de ruido están uniformemente distribuidas, la potencia del ruido recibida por una antena de medición directiva y por la antena isótropa teórica será la misma. Por consiguiente, en este contexto el factor de antena medio se obtiene aplicando una corrección adecuada a la ganancia de antena en la dirección específica.

Con respecto a las antenas de referencia en la Recomendación UIT-R P.372 y para adaptarlas a situaciones reales de recepción, el punto de alimentación de la antena de referencia debe estar en el suelo o próximo al mismo para frecuencias de hasta 60 MHz, y al menos a 5 m por encima del suelo para frecuencias superiores.

8 Análisis de incertidumbre

El resultado final de la medición debe reflejar un valor real que pueda reproducirse incluso cuando se utilice otro montaje de medición distinto. No sólo es necesario conocer la precisión media sino también los límites dentro de los cuales pueden variar los valores. Para cada medición debe realizarse un balance de incertidumbre que contenga todos los elementos que puedan influir en la incertidumbre total. Puede encontrarse información al respecto, por ejemplo, en la publicación de la ISO «*Guide to the expression of uncertainty in measurements*».

9 Proceso de medición

9.1 Selección de los emplazamientos de medición

Incluso en una sola frecuencia, el nivel de ruido radioeléctrico, especialmente cuando viene determinado por el MMN, varía dependiendo de la hora y del emplazamiento. En bandas de frecuencias por debajo de 30 MHz, los niveles de ruido suelen variar con el tiempo debido fundamentalmente a las condiciones de propagación. En consecuencia, por regla general es preciso realizar múltiples mediciones en distintos emplazamientos. La Recomendación UIT-R P.372 define cuatro categorías de emplazamiento distintas. Para reflejar las diferencias resultantes en el nivel de MMN, deben seleccionarse los lugares de medición de acuerdo con estas categorías. Sin embargo, para obtener una evaluación más detallada se recomienda clasificar las mediciones del ruido en las siguientes categorías:

CUADRO 5

Criterios de selección para emplazamientos de medición en exteriores

Categoría	Definición
Rural remota	No hay civilización evidente ni edificios ni tráfico ni instalaciones eléctricas en un radio de 5 km
Rural	Campo abierto con intensa actividad agrícola, densidad de edificios < 1/ha, sin carreteras principales ni ferrocarril electrificado
Residencial	Aldeas y zonas puramente residenciales sin actividad comercial o industrial. Sin ferrocarril electrificado, sin carreteras principales y sin líneas o instalaciones aéreas de alta tensión en un radio de 1 km
Urbana	Gran densidad de edificios residenciales, incluidas tiendas y actividades comerciales o industriales de poca envergadura. Sin ferrocarril electrificado, carreteras principales y líneas o instalaciones aéreas de alta tensión en un radio de 500 m
Ciudad	Gran densidad de edificios y oficinas comerciales e industriales. En las proximidades puede haber carreteras principales y ferrocarriles, pero no en gran cantidad
Zona industrial	Zonas con gran densidad de fábricas e industria pesada
Ferrocarril	Emplazamientos donde predominan las grandes líneas de ferrocarril electrificadas
Carretera	Emplazamientos donde predomina el tráfico rodado; por ejemplo, autopistas

Los resultados de la medición deben evaluarse separadamente para cada categoría de emplazamiento. A fin de lograr una descripción estadística razonable sobre el nivel de ruido radioeléctrico, las mediciones deben efectuarse al menos en 10 emplazamientos por cada categoría.

Todos los emplazamientos de medición a los que se ha hecho referencia deben estar en el exterior. Para estimar el nivel de ruido radioeléctrico medio procedente de múltiples fuentes interiores, los resultados de las mediciones tomadas en exteriores pueden reducirse un valor equivalente a la atenuación esperada del edificio para las frecuencias respectivas.

La experiencia demuestra, no obstante, que los niveles de ruido en interiores tienden a ser incluso superiores a los medidos en exteriores. Ello se debe al predominio de unas pocas fuentes de ruido procedentes del interior del edificio cuando se realiza la medición. Si va a estudiarse este entorno, las categorías de emplazamientos del Cuadro 5 no son aplicables puesto que no importa si el edificio se encuentra en una ciudad, en una zona residencial o en una zona rural. En su lugar, se recomienda utilizar las diversas categorías de edificios señaladas en el Cuadro 6.

Cabe señalar que con las mediciones en interiores siempre se obtiene la suma de ruido e interferencia procedentes de fuentes únicas. En la mayoría de los casos, las emisiones producidas por una sola fuente situada en el interior de la casa serán las que predominen. De acuerdo con las actuales definiciones de la Recomendación UIT-R P.372, estas emisiones no son MMN. Sin embargo, los servicios de radiocomunicaciones deben hacer frente a señales no deseadas, tanto si es ruido como si es interferencia, para funcionar adecuadamente. En consecuencia, por razones prácticas, puede ser conveniente medir la suma de ambos.

CUADRO 6

Criterios de selección para los emplazamientos de medición en interiores

Categoría	Definición
Doméstico	Casa o apartamento dotado de los electrodomésticos y dispositivos electrónicos habituales para uso privado
Oficina	Dispositivos eléctricos y electrónicos para uso comercial, equipos de TI y de telecomunicaciones; por ejemplo, ordenadores, impresoras, redes de área local
Centro comercial	Locales con tiendas y supermercados
Estación de ferrocarril	Principales estaciones ferroviarias situadas en el interior de plataformas cubiertas
Terminal de aeropuerto	Principales aeropuertos, interior del edificio de la terminal
Fábrica	Interior de edificios de fábricas con gran cantidad de maquinaria eléctrica
Hospital	Emplazamientos con gran cantidad de instrumentos médicos

9.2 Selección de frecuencias

Es posible realizar mediciones en una sola frecuencia (canal) o en una cierta banda de frecuencias (por ejemplo, 100 kHz). Estas observaciones pueden hacerse automáticamente y los resultados pueden procesarse de acuerdo con un protocolo previamente definido.

En la banda de frecuencias de ondas decamétricas es virtualmente imposible encontrar una frecuencia que no curse emisiones deseadas durante todo el periodo de medición de 24 horas. La forma más sencilla de encontrar una frecuencia o banda de frecuencias adecuada es utilizar la información extraída de las mediciones de prueba o los datos históricos. No obstante, no está garantizado que todas las muestras de medición puedan utilizarse debido a la ocupación imprevista que podría aparecer durante el intervalo de medición real. Por tanto, en vez de elegir una frecuencia o una banda de frecuencias fija, es conveniente realizar una exploración de la banda de interés a fin de determinar el nivel de WGN. La frecuencia con el nivel más bajo en la gama de exploración debe medirse a continuación en modo de frecuencia única durante un tiempo de al menos 0,5 s para determinar el nivel de IN. Especialmente en la gama de frecuencias por debajo de 30 MHz con ocupación variable a lo largo del día se recomienda repetir esta selección de frecuencia antes de cada medición.

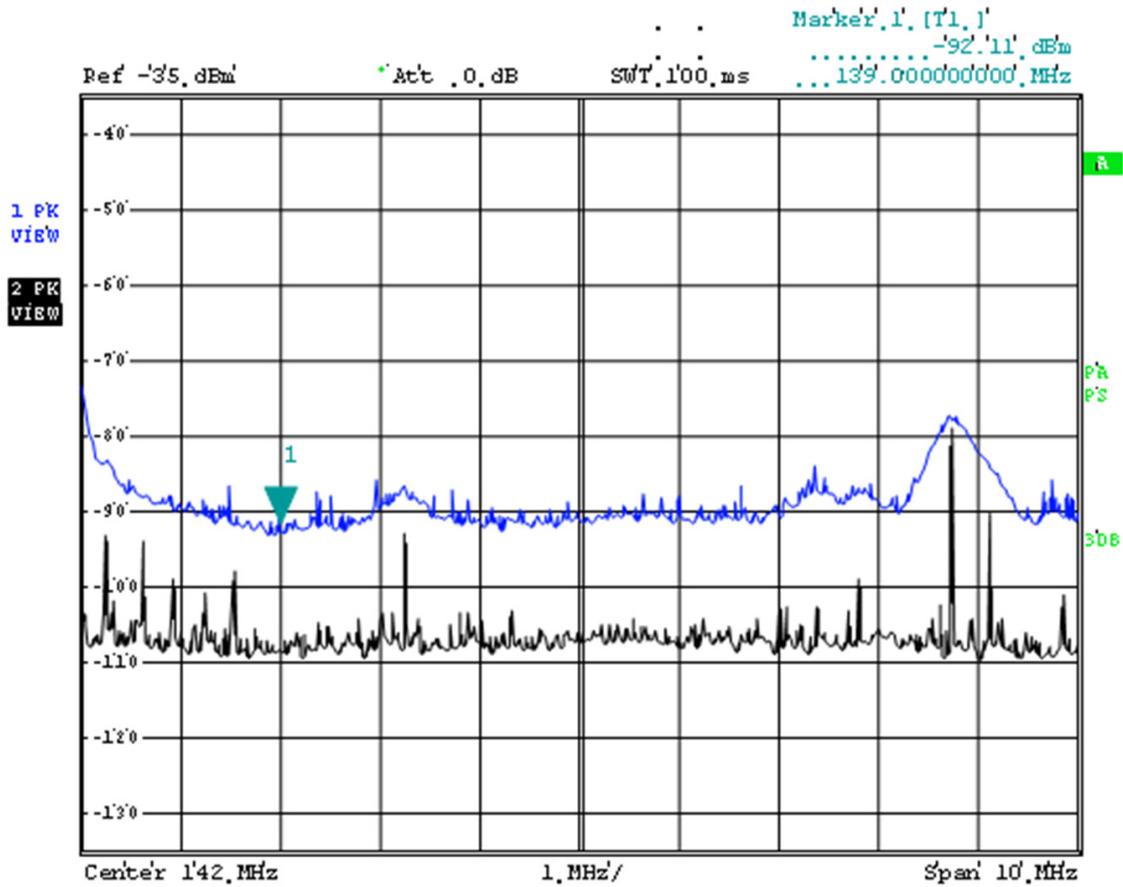
En la gama de frecuencias por encima de 30 MHz, las emisiones deseadas normalmente proceden de fuentes nacionales y se conoce la ocupación. En este caso, puede utilizarse una frecuencia fija sin asignación activa.

El ejemplo de la Fig. 1 muestra el espectro en torno a 142 MHz con unas pocas emisiones a las frecuencias de usuario y registra la traza máxima con dos anchuras de banda de resolución (RBW) distintas (traza superior: 300 kHz, traza inferior: 10 kHz). La frecuencia marcada se selecciona para las mediciones de ruido puesto que se supone que está libre de emisiones y se encuentra lo suficientemente alejada de los canales utilizados.

Especialmente cuando se realizan mediciones automáticas autónomas y selección de frecuencias, no puede suponerse siempre que la frecuencia seleccionada contiene sólo ruido. La selección de una banda de frecuencia que consista principalmente en ruido de fondo con una distribución de amplitud gaussiana mejora la precisión de la medición del nivel de potencia de ruido. La forma más fiable de comprobar si una frecuencia o una banda de frecuencias contienen únicamente WGN es aplicar el concepto matemático de descomposición del valor singular (SVD). Este método supone la construcción de una matriz de autocorrelación estimada a partir de la señal recibida y la evaluación posterior de los resultados obtenidos aplicando la SVD a la matriz de autocorrelación estimada.

FIGURA 1

Selección de una sola frecuencia



SM.1753-01

La forma más práctica de seleccionar una frecuencia o una banda de frecuencias adecuada es encontrar en primer lugar una banda candidata explorando la gama de frecuencias deseadas e identificando la frecuencia o la banda de frecuencias con el nivel más bajo. La posibilidad de utilizar esta banda de frecuencias o esta frecuencia puede verificarse aplicando el proceso SVD. Si dicho proceso pone en evidencia que la exploración contiene principalmente WGN, puede emplearse la medición. De no ser así, debe seleccionarse una frecuencia o una banda de frecuencias alternativa.

En el Apéndice 1 se describen los detalles del método SVD.

9.3 Ajustes del analizador/receptor

Los ajustes recomendados de los equipos figuran en el Cuadro 7:

CUADRO 7

Ajustes del analizador/receptor

Tiempo de medición	Es conveniente obtener un resultado cada 10 a 30 s. Para las mediciones de WGN con un detector de valor eficaz es útil emplear un tiempo de barrido o un tiempo de exploración de 10 a 20 s. Para el muestreo de datos en bruto es adecuado realizar una exploración de al menos 0,5 s de duración cada 10 a 30 s. Durante la exploración, las amplitudes de la muestra deben tomarse a una velocidad muy rápida (la frecuencia de muestreo debe ser al menos de 1/RBW)
Gama de frecuencias	La gama de frecuencias de observación depende enteramente de la utilización de la banda de frecuencias elegida; esta banda puede dividirse incluso en subbandas o en frecuencias, dependiendo de la banda de frecuencias
Anchura de banda de resolución (RBW)	Si se utiliza la banda de frecuencias explorada, la anchura de banda del filtro aplicado depende de la amplitud de frecuencia dividida por la resolución requerida. El principio de muestreo en bruto exige una RBW que sea la mitad de la frecuencia de muestreo. El factor de forma del filtro debe determinarse de tal forma que sea posible comparar los resultados de las mediciones realizadas con distintos receptores. En el Cuadro 8 aparecen los valores recomendados para la RBW
Detector	Para las mediciones de WGN es necesario utilizar un detector de valor eficaz; cualquier otro detector es inapropiado. Algunos fabricantes también denominan a este dispositivo detector de valor medio. Es importante que el detector promedie la potencia y no la tensión. Estos detectores se basan generalmente en un muestreador en el que la velocidad de muestreo se basa a su vez en la anchura de banda del filtro. El valor eficaz de la potencia se calcula a partir de estas muestras a lo largo de un periodo definido de tiempo. Este periodo de tiempo es el periodo de medición. Cuando se emplea un detector de valor eficaz sin muestreo, el tiempo de integración de este detector debe ser $10/2B_N$ (kHz) si se espera una incertidumbre del 1%. Por consiguiente, si la anchura de banda del ruido B_N es 500 kHz, el mínimo tiempo de integración debe ser 10 s. Debe prestarse especial atención cuando se utilizan receptores de una generación anterior. Si los valores medidos son inferiores a 10 dB por encima del ruido de fondo del equipo, este detector requiere una calibración determinada. El principio de datos en bruto exige la utilización de un detector de muestras porque el procesamiento que incluye los cálculos del valor eficaz se realiza posteriormente
Atenuador	3 dB Se recomienda aplicar un atenuador externo entre la antena y el LNA para ajustar una impedancia de entrada del receptor/LNA con objeto de garantizar una baja incertidumbre en la medición. Si puede asegurarse que la antena se adapta exactamente a la impedancia de entrada del LNA no es necesaria la atenuación adicional
Preselector	Activado (si es conmutable)

CUADRO 8

Anchuras de banda de medición

Gama de frecuencias	RBW para la medición de Tipo A (sólo WGN)	RBW para mediciones de Tipo B y C (WGN e IN)
300 kHz – 30 MHz	100 Hz	10 kHz
30 MHz – 450 MHz	1 kHz	100 kHz
450 MHz – 1 GHz	1 kHz	300 kHz
1 GHz – 3 GHz	10 kHz	5 MHz
> 3 GHz	10 kHz	10 MHz

En este contexto, la RBW es la anchura de banda de ruido equivalente de la anchura de banda a 3 dB nominal.

Utilizando unas RBW mayores, como indica el Cuadro 8, se obtiene un mayor volumen de datos que deben procesarse debido a que es necesaria una mayor velocidad de muestreo. Sin embargo, el IN puede determinarse más claramente. Si se llevan a cabo las mediciones de los Tipos B y C, se recomienda utilizar una anchura de banda más estrecha para medir el WGN y una anchura de banda mayor para la medición del IN únicamente.

9.4 Periodo de medición

El periodo de medición debe elegirse considerando el instante en el que cabe esperar cambios significativos en el ruido medido. Por ejemplo, para incluir las diferencias diurnas y nocturnas de la propagación en ondas decamétricas y si se emplean equipos de forma temporal, el periodo de medición normalizada debe ser de 24 horas. Para tener en cuenta la variación debida a los periodos estacionales, las mediciones en ondas decamétricas pueden repetirse un cierto número de veces cada año. En frecuencias por encima de 30 MHz, se recomienda un mínimo periodo de observación de 10 horas durante las horas de funcionamiento diurnas.

9.5 Separación del ruido artificial y el ruido atmosférico (medición de Tipo C únicamente)

Por debajo de 30 MHz, partes significativas de la componente del IN pueden proceder del ruido atmosférico, como el producido por los rayos. Si las mediciones tienen por objeto determinar sólo el MMN, el ruido atmosférico debe sustraerse del resultado de la medición. Sin embargo, esto sólo es posible para el IN. A fin de identificar el origen del IN es necesario medir en dos emplazamientos distintos al mismo tiempo:

- en el emplazamiento de la medición; y
- en el emplazamiento de referencia.

La distancia entre ambos emplazamientos debe ser superior al alcance de las emisiones de MMN típicas pero deben estar lo suficientemente cerca como para suponer las mismas condiciones de propagación por onda ionosférica (la distancia recomendada es de 500 m a 10 km).

Los equipos de medición en ambos emplazamientos deben estar exactamente sincronizados en el tiempo (máxima desviación: 100 ms). A continuación se indican dos formas de lograr esta sincronización exacta:

- Conmutando periódicamente el receptor de medición a una señal horaria normalizada (por ejemplo, DCF77).
- Utilizando la señal horaria procedente de un receptor GPS adosado.

La hora transmitida puede utilizarse para ajustar el reloj interno del procesador o también puede calcularse la separación entre el reloj del procesador y la hora real transmitida utilizándola para corregir la marca de tiempo que debe almacenarse con cada exploración de medición.

Mediante estas marcas de tiempo cada exploración puede compararse posteriormente con la exploración respectiva en el otro emplazamiento. Si una señal aparece en ambos emplazamientos de medición se supone que es ruido atmosférico o una emisión deseada recibida a través de onda ionosférica y se elimina de los resultados antes de proseguir el procesamiento. Las señales que sólo se reciben en el emplazamiento de medición se supone que son MMN procedente de fuentes cercanas.

9.6 Recopilación de datos y postprocesamiento

9.6.1 Mediciones del WGN con el detector de valor eficaz (medición de Tipo A)

Un analizador de espectro explora una banda de frecuencias en un número de etapas (segmentos de frecuencia). Un número normal de segmentos en los modernos analizadores de espectro es entre 500-10 000. Si el tiempo de exploración es, por ejemplo, de 10 s los resultados de las mediciones conforman una base de datos (matriz) de $500 \times 8\,600$ a $10\,000 \times 8\,600$ muestras de mediciones por día. Para poder excluir ciertas partes de la medición y aplicar distintos métodos estadísticos, esta base de datos debe procesarse posteriormente mediante un software especializado.

9.6.2 Mediciones de WGN + IN con muestreo de datos en bruto (mediciones de los Tipos A, B y C)

Para permitir una completa evaluación de los impulsos sería necesario muestrear tan rápidamente que cada uno de los impulsos fuese capturado al menos una vez. Sin embargo, ello exigiría el almacenamiento de un gran volumen de datos. Para una evaluación estadística, no es necesaria una observación continua de la gama de frecuencias. En vez de ello, el estudio puede dividirse en exploraciones individuales (de una frecuencia o una banda). Una exploración debe durar al menos 0,5 s, periodo durante el cual el nivel momentáneo de la señal se captura lo más rápidamente posible ($T_s \leq 1/RBW$). A continuación, puede introducirse una pausa de unos pocos segundos durante la cual no se mide nada, hasta que se inicia la siguiente exploración. Este método produce muchos millones de muestras por cada exploración que deben ser estadísticamente evaluadas por un software especializado.

10 Procesamiento de datos

10.1 Consideraciones generales

El Cuadro 9 presenta las distintas etapas de procesamiento para los diferentes principios de medición.

CUADRO 9

Etapas de procesamiento

Etapa de procesamiento	Medición valor eficaz – WGN	Muestreo de datos en bruto
Corrección del ruido del equipo	x	x
Determinación del nivel de WGN utilizando el «método del 20%»	x	
Validación del valor de corte del 20%	x	
Trazado de la distribución de probabilidad de las amplitudes (APD) de las muestras de datos en bruto		x
Cálculo de F_a	x	x
Separación de las muestras de IN del WGN		Opcional
Combinación de los trenes de impulsos para constituir ráfagas		Opcional
Separación de los impulsos de MMN del ruido atmosférico		Opcional
Cálculo de la distribución de los parámetros del impulso		Opcional

10.2 Corrección del ruido del equipo

Las señales medidas son, de hecho, señales superpuestas al ruido del propio equipo. Para determinar la diferencia entre el ruido externo y el ruido del equipo puede efectuarse una medición manual con objeto de introducir la corrección como sigue:

- utilizando un detector de valor eficaz en una frecuencia «libre» en ese momento, se mide el nivel del WGN;
- se sustituye la antena con una carga de 50Ω y se mide la suma del ruido del sistema y el ruido térmico de la carga, utilizando los mismos ajustes que antes.

Si la diferencia entre los resultados de las mediciones a) y b) es K dB o más, no es necesario introducir ninguna corrección adicional para el equipo. Si es inferior, el ruido del equipo obtenido de la medición b) debe sustraerse linealmente de todos los valores de ruido externo:

$$p_{WGN} = p_a - \frac{f-1}{f} p_b \quad (2)$$

donde:

p_a : nivel de ruido obtenido en la medición a), en unidades lineales

p_b : nivel de ruido obtenido en la medición b), en unidades lineales

f : factor de ruido del equipo.

El coeficiente K puede calcularse como sigue:

$$K(\text{dB}) = 10 \log \frac{11(f-1)}{f} \quad (3)$$

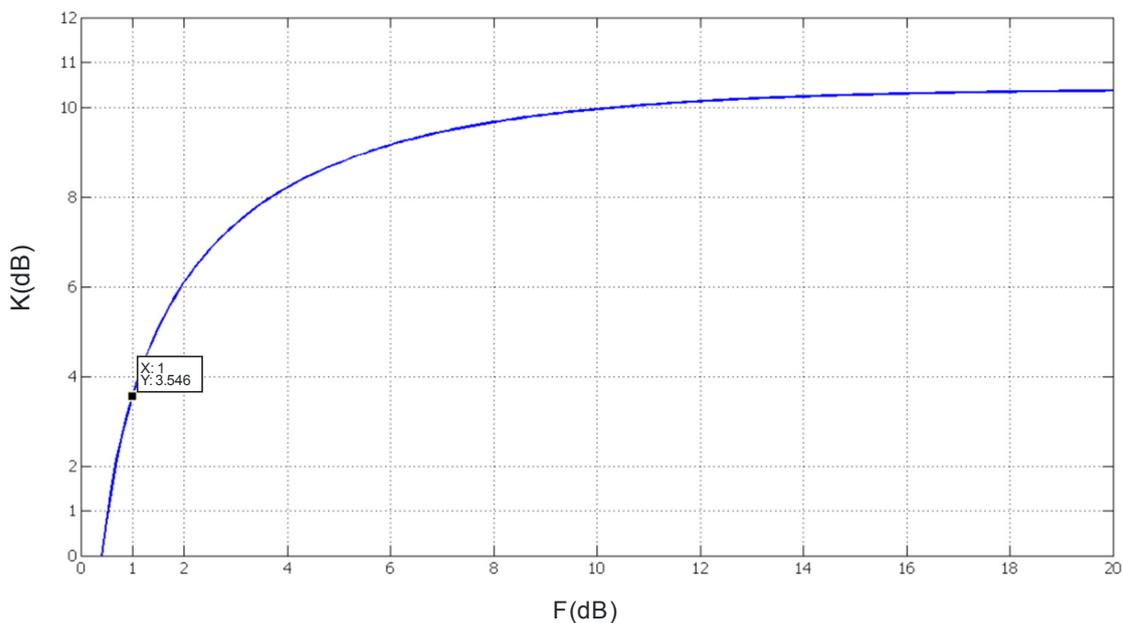
Las especificaciones del equipo normalmente indican un factor de ruido F . Como se trata del factor de ruido expresado en decibelios, el factor de ruido f puede calcularse como sigue:

$$f = 10^{\left(\frac{F}{10}\right)} \quad (4)$$

La curva representada en la Fig. 2 proporciona el valor de K en función del factor de ruido.

FIGURA 2

Umbral para la corrección del ruido del equipo



SM.1753-02

10.3 Determinación del nivel de WGN utilizando el «método del 20%» (medición únicamente del valor eficaz del WGN)

Especialmente por debajo de 30 MHz no puede suponerse que la frecuencia (o gama de frecuencias) de medición se encuentre libre durante todo el periodo de medición. Por lo tanto se recomienda realizar una exploración a lo largo de una pequeña gama de frecuencias en vez de medir en una sola frecuencia. Las ocupaciones no deseadas pueden eliminarse de los resultados utilizando únicamente las muestras con los niveles del 20% más bajo y descartar el otro 80%. Sin embargo, de esta forma también se suprimen algunas muestras que contienen ruido y, en consecuencia, se obtienen unos niveles de ruido demasiado bajos a menos que se aplique una corrección. Dicha corrección necesaria se determina conectando una fuente de ruido blanco al receptor, tomando algunas muestras de medición y determinando el nivel eficaz medio de todas las muestras (el 100%). A continuación se recorta el 80% superior y se calcula el nivel eficaz medio de las muestras del 20% más bajas. La corrección que debe aplicarse es la diferencia entre ambos niveles eficaces medios (100% y 20%).

10.4 Validación del valor de corte del 20% (medición únicamente del valor eficaz del WGN)

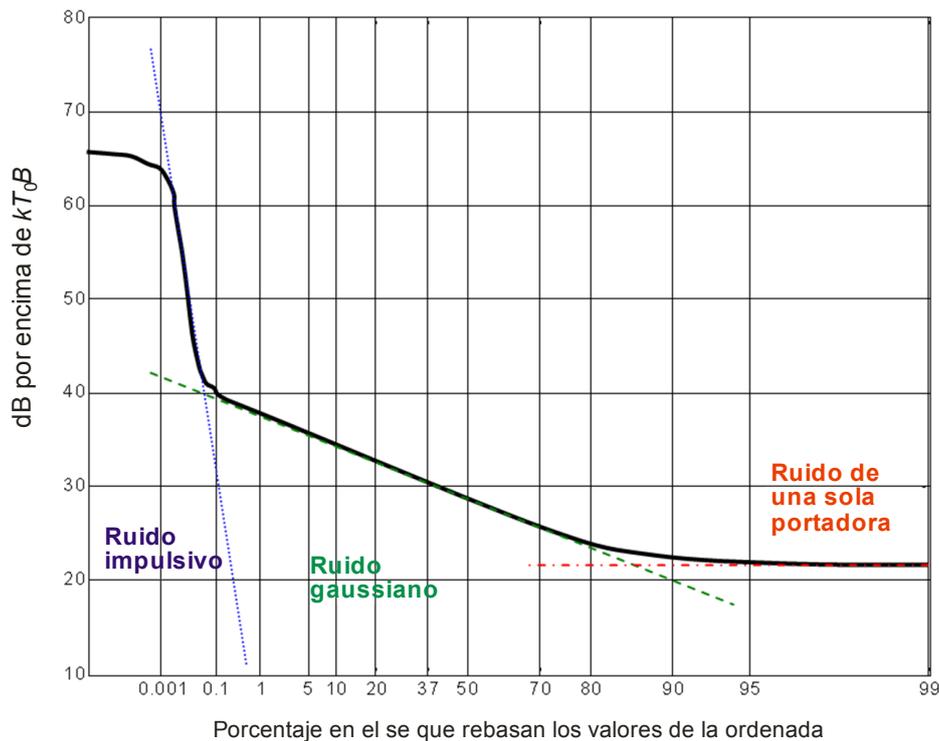
En ondas decamétricas, el 20% de los valores más bajos es un valor práctico para determinar el nivel de ruido. Para otras gamas de frecuencia debe verificarse si este valor del 20% es correcto o hay que cambiarse a otro valor. En el Apéndice 2 se describen algunos métodos para validar el valor de corte.

10.5 Trazado de la APD (muestreo de datos en bruto únicamente)

Si se utiliza muestreo de datos en bruto para determinar el WGN, el nivel eficaz puede obtenerse teóricamente mediante promediación lineal de los niveles de potencia de todas las muestra medidas en un cierto tiempo (de integración). No obstante, esto es correcto únicamente si durante la medición sólo estaba presente el WGN. Especialmente en ondas decamétricas, esta hipótesis generalmente no se da. En estos casos, el nivel eficaz del WGN puede calcularse trazando los datos en bruto en el denominado gráfico de «Distribución de probabilidad de las amplitudes»: Dicho gráfico representa el porcentaje de muestras de medición que rebasan una cierta amplitud (véase la Fig. 3).

FIGURA 3

Típica distribución de probabilidad de las amplitudes



SM.1753-03

El eje x del gráfico de la APD tiene una escala de Rayleigh. Con esta escala es fácil separar los distintos tipos de ruido: el ruido blanco aparece como una línea recta inclinada (en medio del gráfico). Puede demostrarse matemáticamente que el gradiente de esta línea es -10 cuando ambas escalas pasan a ser lineales. Ello significa que la línea cae 10 dB entre el 0,1%, 37%, 90% y 99%.

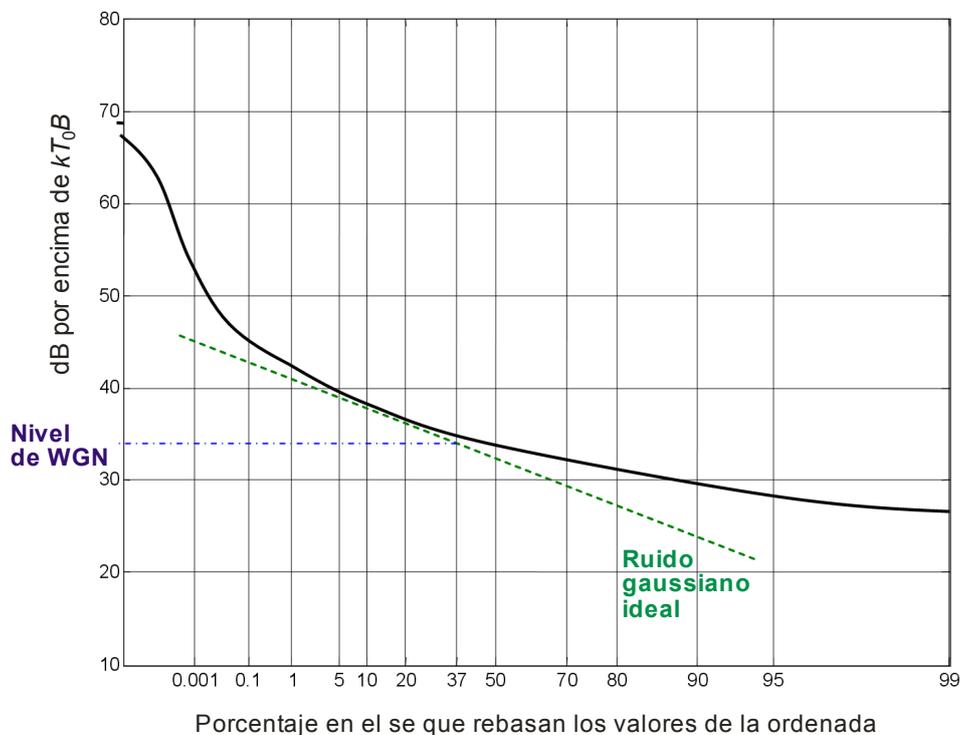
El borde ascendente de la izquierda indica ruido impulsivo, la disminución hacia la derecha se debe a portadoras únicas de fuentes próximas y al límite de indicación de nivel más bajo del receptor de medición.

Cuando no están presentes portadoras únicas o emisiones deseadas de banda estrecha, el nivel eficaz global es el valor en el punto donde la curva atraviesa el 37% en la abscisa.

Sin embargo, la presencia de portadoras y de emisiones deseadas no sólo produce un aumento hacia el extremo derecho de la APD sino también un incremento de toda la curva, incluido el valor del 37%, y da lugar a una curva cóncava en vez de una línea recta en la parte media del gráfico, como puede verse en la Fig. 4.

FIGURA 4

Gráfico de APD en presencia de portadoras y/o señales deseadas



SM.1753-04

En este caso, el nivel del WGN se determina trazando una línea recta con la pendiente del WGN ideal a la curva. El nivel eficaz del WGN se encuentra donde la tangente cruza el valor del 37% en la abscisa.

Para mejorar la precisión, los valores medidos a lo largo del tiempo pueden transformarse al dominio de la frecuencia aplicando la transformada de Fourier. Se construye un segundo gráfico de la APD a partir de los valores resultantes en el dominio de la frecuencia y también en este caso se traza una tangente en la parte media del gráfico. El nivel eficaz del WGN también es el valor del 37% del dominio de la frecuencia APD. Si durante las mediciones están presentes señales deseadas o portadoras únicas, sólo se traza uno de los dos gráficos de la APD, dependiendo de la naturaleza de las señales. El WGN global exacto es en ese caso el menor de los dos valores del 37%. Este

método de evaluación es especialmente necesario cuando las mediciones del ruido se realizan dentro de las bandas de frecuencias ocupadas por señales deseadas. Cuando se seleccionan las frecuencias de modo que no hay portadoras dominantes y emisiones deseadas, normalmente no es necesario aplicar la transformada rápida de Fourier.

10.6 Cálculo de F_a

De acuerdo con la Recomendación UIT-R P.372, el nivel de ruido se expresa como un factor de ruido de una antena sin pérdidas debido al ruido externo F_a en dB por encima del ruido térmico.

El ruido térmico puede calcularse como sigue:

$$P_0 = 10 \log(K * t * b) \quad (5)$$

donde:

K : constante de Boltzmann $1,38 * 10^{-23}$ (J/K)

t : temperatura ambiente (K)

b : anchura de banda equivalente de ruido del filtro de medición (Hz).

Para una temperatura de referencia t_0 de 290 K (17°C), P_0 toma el valor -174 dBm en una anchura de banda de 1 Hz.

El nivel de ruido medido es la suma del ruido externo y el ruido provocado por el sistema de medición, consistente principalmente en el ruido del receptor y, en caso de que se utilice un LNA, el ruido del LNA. El factor de ruido externo f_a puede calcularse mediante las ecuaciones de la Recomendación UIT-R P.372. En entornos de medición reales es realista suponer que la temperatura de todas las partes del sistema de medición es la misma. Además, puede fijarse a la temperatura de referencia t_0 de 17°C sin introducir un error considerable excepto en casos especiales con temperaturas extremas. Bajo estas hipótesis, la ecuación fundamental que puede emplearse para calcular f_a es:

$$f_a = f - f_c f_t f_r + 1 \quad (6)$$

donde:

f : factor de ruido total medido en unidades lineales (p_{med}/p_0)

f_c : factor de ruido asociado a la antena (potencia de salida/disponible a la entrada de la antena)

f_t : factor de ruido asociado a la línea de transmisión (potencia de salida/entrada del cable)

f_r : factor de ruido del sistema de recepción (receptor y LNS, si se utiliza).

Todos los parámetros que aparecen en minúscula se expresan en unidades lineales, no en dB. Para llegar a las unidades logarítmicas más comúnmente utilizadas cabe señalar que todos los parámetros son niveles de potencia, por consiguiente, para realizar la conversión se aplica la regla:

$$F_a \text{ (dB)} = 10 \log(f_a) \quad (7)$$

En algunas situaciones de medición prácticas pueden realizarse las siguientes hipótesis:

- La antena puede considerarse sin pérdidas ($f_c = 1$), especialmente cuando se emplean antenas adaptadas (por ejemplo dipolos sintonizados para frecuencias por encima de 30 MHz).
- Las pérdidas de la línea de transmisión pueden despreciarse ($f_t = 1$), especialmente en frecuencias inferiores a 30 MHz.
- El ruido del receptor puede despreciarse ($f_r = 1$), cuando la potencia de ruido medida se encuentra al menos 10 dB por encima del ruido del receptor (véase el § 10.2).

En estos casos la potencia de ruido medida es prácticamente igual a la potencia de ruido externo.

Cuando se mide en dBm, el factor de ruido F_a en dB puede calcularse como sigue:

$$F_a = P_n - P_0 \quad (8)$$

donde:

P_0 : potencial de ruido térmico (dBm)

P_n : potencial de ruido externo (dBm).

Para gamas de frecuencias por encima de 60 MHz, cuando se utiliza un dipolo vertical sintonizado, F_a puede calcularse evidentemente como se ha señalado antes. Sin embargo, para frecuencias más bajas, normalmente no es posible emplear una antena sin pérdidas.

En este caso, el factor de ruido externo puede determinarse aplicando el factor de antena medio (véase el § 7.2):

$$E = U + AF \quad \text{dB}(\mu\text{V}/\text{m}) \quad (9)$$

donde:

E : intensidad de campo en dB($\mu\text{V}/\text{m}$)

U : tensión del terminal antena dB(μV)

AF : factor de antena (dB)².

Cuando se conoce AF , puede calcularse F_a a partir del nivel de ruido medido, como sigue:

$$F_a = P + AF - 20 \log(f) - 10 \log(b) + 202,5 \quad \text{dB} \quad (10)$$

donde:

F_a : factor de ruido de antena debido al ruido externo (dB)

P : nivel eficaz del WGN (dBm)

AF : factor de antena (dB)

f : frecuencia de medición (MHz)

b : anchura de banda de medición (Hz).

La fórmula anterior se desarrolló utilizando la fórmula (7) de la Recomendación UIT-R P.372 para un monopolo vertical corto como antena de referencia, empleando igualmente la fórmula (9) anterior y suponiendo un sistema de medición con una impedancias de 50Ω y P (dBm) = U (dB(μV)) - 107 dB.

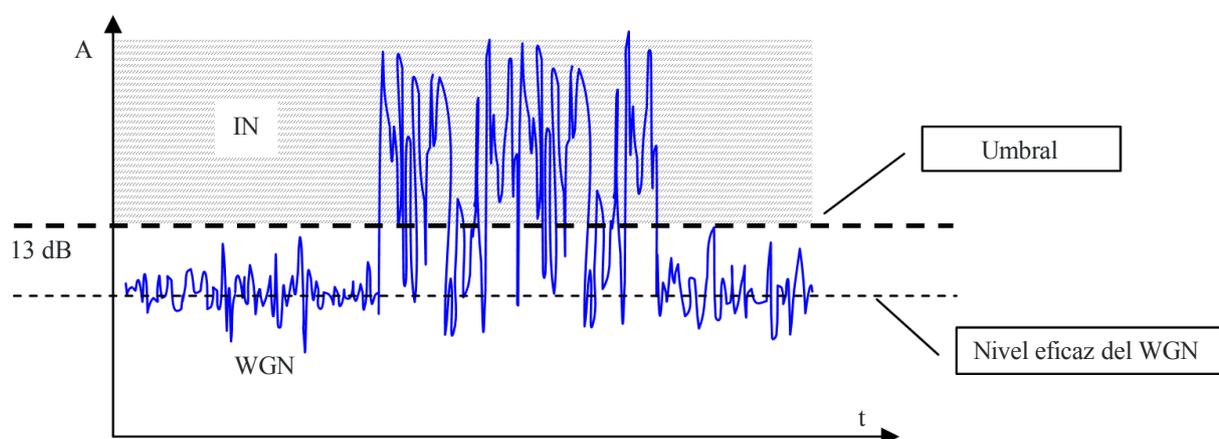
² El factor de antena normalmente se expresa como a y se da en DB. Esto es incorrecto desde el punto de vista dimensional pero refleja una práctica de ingeniería habitual.

10.7 Separación de las muestras del IN del WGN (mediciones de Tipos B y C únicamente)

La experiencia ha demostrado que el IN del WGN no se adapta adecuadamente a uno de los modelos descritos matemáticamente. Cuando se muestrea con suficiente rapidez. El WGN también puede presentar crestas de breve duración que sobrepasan significativamente el nivel medio. Para extraer únicamente las muestras originadas por el IN, debe aplicarse un umbral cuyo valor sea muy superior al de las crestas del WGN. Este umbral se fija a 13 dB por encima del nivel eficaz del WGN, puesto que se trata normalmente del factor de CRESTA habitual (diferencia entre el valor eficaz y el valor de cresta) para el WGN. Todas las muestras de medición por encima del umbral se tratan como si fuera IN.

FIGURA 5

Separación del IN y del WGN



SM.1753-05

10.8 Combinación de los trenes de impulsos para constituir ráfagas (mediciones de Tipos B y C únicamente)

Al examinar la amplitud de RF de los impulsos reales en función del tiempo, puede observarse que la mayoría de los impulsos son de hecho una serie de crestas de breve duración o «trenes de impulsos». Como la medición de los niveles de impulsos para el MMN se centra en la posible interferencia de un impulso, es necesario integrar las crestas de un tren de impulsos en un solo evento que se denomina «ráfaga». La integración se realiza siempre que al menos el 50% de las muestras de medición se encuentren por encima del umbral.

La duración de cada ráfaga en un registro se calcula de forma que se satisfagan las siguientes condiciones para todos los impulsos recibidos a lo largo del registro completo:

- 1) la muestra que sigue directamente a un punto de inicio de ráfaga siempre rebasa el umbral, la muestra que sigue directamente a un punto de fin de ráfaga siempre cae por debajo del umbral;
- 2) al menos el 50% de las muestras entre el inicio y el fin de la ráfaga rebasan el umbral.

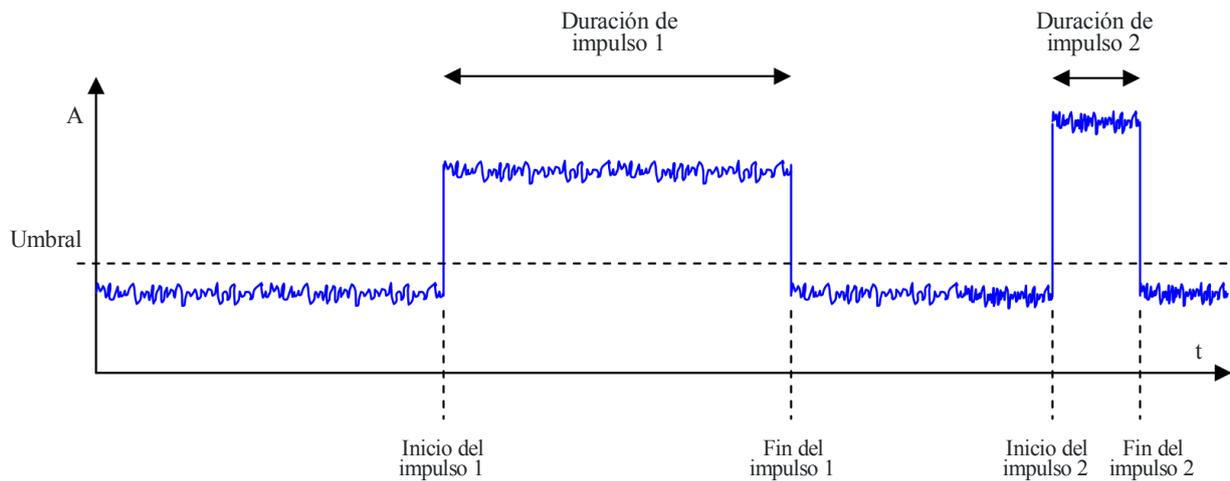
Durante un tiempo de al menos el 25% de la duración de la ráfaga, todas las muestras antes del inicio de la ráfaga y después del fin de la ráfaga caen por debajo del umbral.

La consecuencia de estas condiciones es que ciertas crestas en el interior de trenes de impulsos irregulares se combinan para constituir una sola ráfaga de larga duración.

Las siguiente Figuras muestran algunos ejemplos al respecto:

FIGURA 6

Determinación de los puntos de inicio y fin de ráfaga

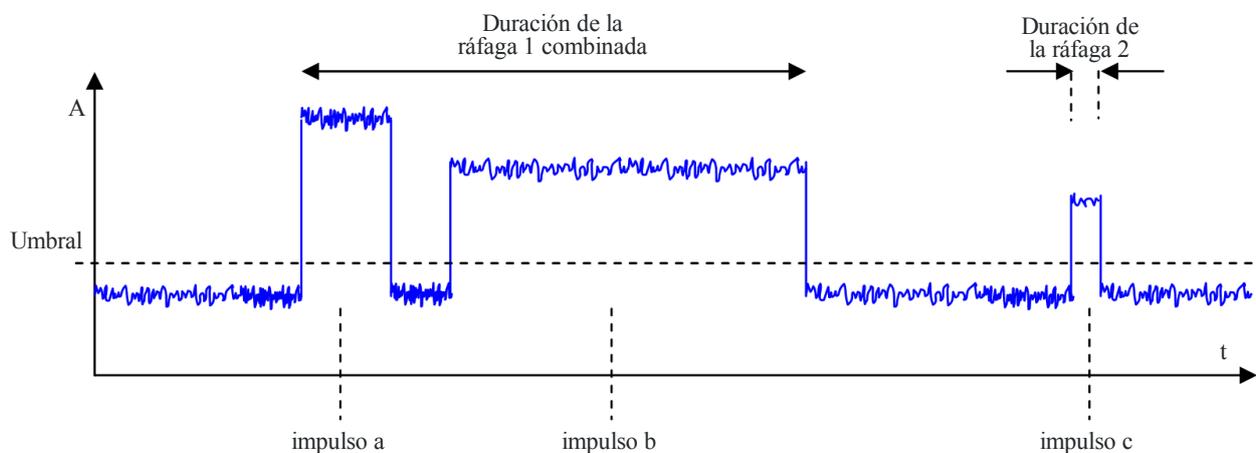


SM.1753-06

Contando a partir del centro del impulso 1 en la Fig. 6, el espacio entre el fin del impulso 1 y el inicio del impulso 2 supone más del 25% de la duración del impulso 1, por lo tanto la segunda cresta se interpreta como un impulso separado.

FIGURA 7

Combinación de impulsos



SM.1753-07

En la Fig. 7 se satisfacen las tres condiciones definidas anteriormente para el impulso a) a fin de considerarlo como una ráfaga completa. Sin embargo, para el impulso b) no se cumple la condición de que al menos el 25% de las muestras de medición frente al inicio del subimpulso deben caer por debajo del umbral, a menos que el impulso a) se incluya y se forme un impulso (ráfaga) combinado. El tiempo entre el final de esta ráfaga 1 y el inicio del impulso 3 es más del 25% de la duración de la ráfaga 1. Por consiguiente, el impulso c) no se incluye y se mantiene como impulso separado.

10.9 Separación de los impulsos de MMN del ruido atmosférico (medición de Tipo C únicamente)

Como se ha dicho anteriormente, esta separación sólo es posible si se aplica el método 3 con medición sincronizada en el tiempo en dos emplazamientos. El IN procedente del ruido atmosférico (principalmente tormentas) se recibirá tanto en el emplazamiento de medición como en el de recepción, por tanto el objetivo es detectar este tipo de señales en los resultados de la medición.

Como la sincronización en el tiempo del equipo de medición nunca será tan precisa como una muestra, debe determinarse en primer lugar la separación en tiempo exacta entre ambos emplazamientos. Ello se hace comparando entre sí los tiempos de inicio y final de todas las muestras de impulsos/ráfagas del emplazamiento de medición y de referencia y calculando un valor de correlación. A continuación, todas las muestras del emplazamiento de medición se desplazan en el tiempo una muestra y se calcula del valor de correlación nuevamente y así repetidamente. La posición con la correlación más elevada define el desplazamiento de tiempo exacto ente ambas mediciones. Se aplican los siguientes pasos de evaluación únicamente a las muestras que han sido medidas en ambos emplazamientos (duración del resultado útil).

Ejemplo: La máxima correlación se logra para un desplazamiento de +100 ms. aplicado al emplazamiento de referencia. El tiempo (exploración) de medición fue de 1 s. la duración del resultado útil es, entonces, de 0,1 a 1,0 s del emplazamiento de referencia y de 0 s a 0,9 s del emplazamiento de medición (véase la Fig. 8).

Dentro de la duración del resultado útil, se investigan las muestras de inicio de impulso/ráfaga: Si por cada impulso/ráfaga se producen con una tolerancia del 50% de la duración del impulso/ráfaga tanto en el emplazamiento de medición como en el de referencia, el impulso/ráfaga se suprime de los resultados pues se supone que se recibió a través de la onda ionosférica y, por tanto, lo más probable es que sea de carácter atmosférico. Si un punto de inicio de impulso/ráfaga se produce sólo en el emplazamiento de medición, se mantiene para el procesamiento del IN.

donde:

- W_g : densidad espectral en dB(μ V/MHz)
 U : tensión de ruido medida en una antena sin pérdidas dB(μ V)
 b : anchura de banda del ruido (MHz).

En el caso de que la antena no pueda considerarse sin pérdidas, debe aplicarse la corrección adecuada a la tensión de ruido medida de acuerdo con el § 10.6.

Sólo habrá un gráfico de distribución de IN por frecuencia y clase de emplazamiento, de acuerdo con los Cuadros 5 y 6.

10.10.2 Duración y periodo del impulso/ráfaga

Una vez identificadas las muestras del inicio y final del impulso/ráfaga, la duración de cada impulso/ráfaga se calcula como sigue:

$$N_1/f_s \quad (12)$$

donde:

- N_1 : número de muestras entre el inicio y el final del impulso/ráfaga
 f_s : frecuencia de muestreo.

El periodo del impulso/ráfaga se calcula como:

$$N_2/f_s \quad (13)$$

donde:

- N_2 : número de muestras entre puntos de inicio del impulso/ráfaga consecutivos
 f_s : frecuencia de muestreo.

10.10.3 Duración total del impulso/ráfaga

La duración total del impulso/ráfaga viene dada como porcentaje del tiempo de estudio total:

$$i = (N_i / N) * 100 \quad (14)$$

donde:

- N_i : número de muestras por encima del umbral de IN
 N : número total de muestras de medición.

11 Presentación de los resultados

11.1 Mediciones del WGN

Además de la presentación en términos de F_a , también es habitual expresar el nivel de ruido en forma de intensidad de campo, especialmente por debajo de 30 MHz. Para este tipo de presentación es necesario convertir la potencia de ruido medida utilizando la siguiente ecuación de la Recomendación UIT-R P.372:

$$E_n = F_a + 20 \log(f / \text{MHz}) + B + 95,5 \quad (15)$$

donde:

- F_a : factor de ruido debido al ruido externo ($F_a = 10 \log(f_a)$)
- f : frecuencia de medición (MHz)
- B : anchura de banda de medición del ruido equivalente en unidades logarítmicas ($B = 10 \log(b)$).

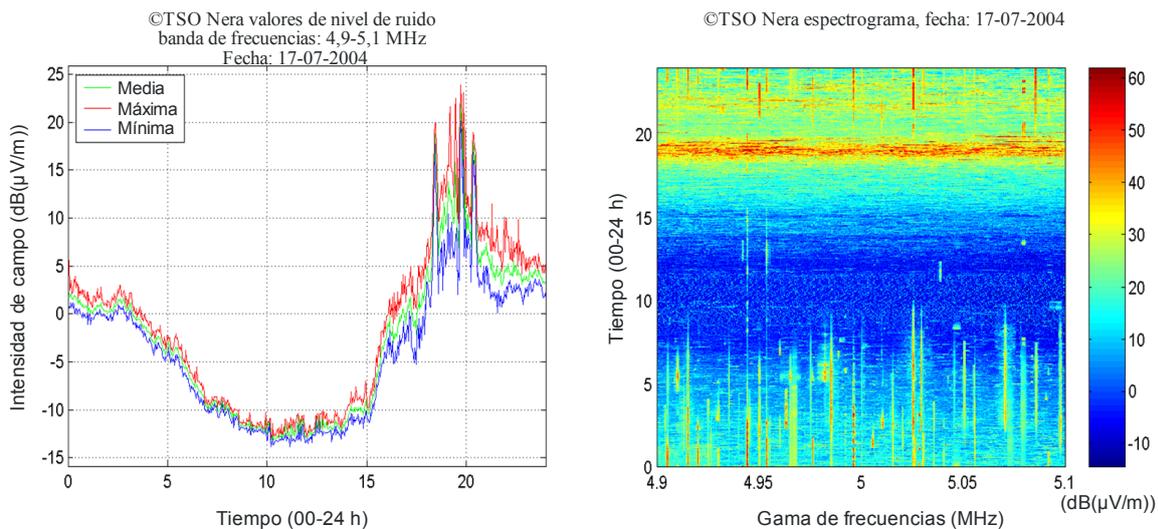
La ecuación (15) es válida para monopolos verticales cortos. En el caso de dipolos adaptados, el valor 95,5 debe sustituirse por 99,0.

En las gamas de frecuencias por debajo de 30 MHz, el ruido radioeléctrico varía significativamente a los largo de la hora del día. Por consiguiente, los resultados obtenidos deben presentarse para un periodo de 24 horas.

La Fig. 9 muestra un ejemplo de resultados de medición a 5 MHz (4,9-5,1 MHz). A la izquierda del gráfico aparecen los valores máximo, medio y mínimo a lo largo de las 24 horas y a la derecha el espectrograma que contiene todas las exploraciones a lo largo de las 24 horas.

FIGURA 9

Valores medio, máximo y mínimo y espectrograma durante un periodo de 24 horas



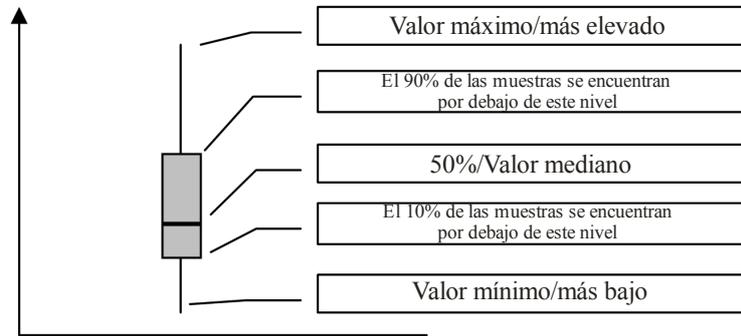
SM.1753-09

Los resultados también pueden integrarse en periodos de 1 hora y presentarse en forma tabular (una valor cada hora).

Una manera alternativa de presentar los resultados del WGN es mediante el denominado diagrama de caja. Para cada hora se calculan los valores máximo, del 90% superior, mediano, del 10% inferior y mínimo, y se presentan en un Cuadro.

FIGURA 10

Principio de un diagrama de caja



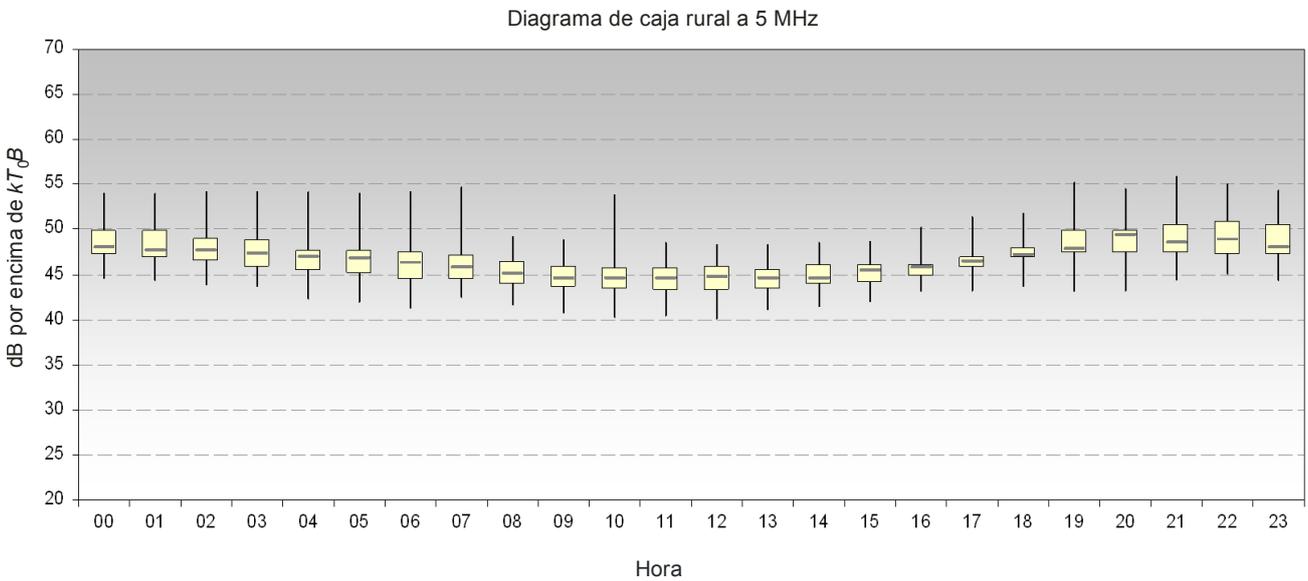
SM.1753-10

Este diagrama de caja es especialmente útil para presentar los resultados procedentes de múltiples mediciones en un solo diagrama.

La Fig. 11 muestra un diagrama de caja que resume los resultados de 23 mediciones realizadas en emplazamientos rurales.

FIGURA 11

Resultados del valor eficaz del WGN presentados como un diagrama de caja



SM.1753-11

11.2 Mediciones del IN

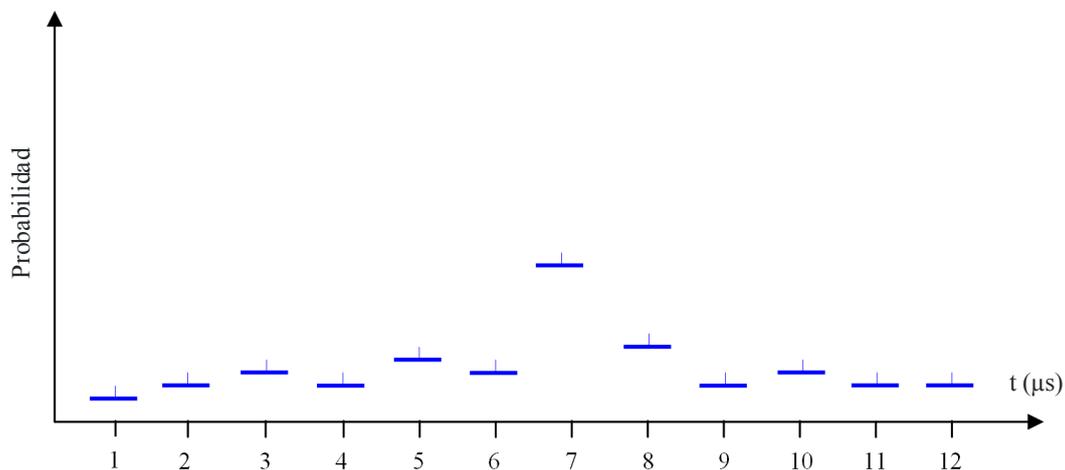
Las estadísticas del nivel del impulso/ráfaga se presentan mejor en forma de un gráfico de APD como el que ilustra la Fig. 3. Si todas las muestras de mediciones se incluyen en la APD (muestras de IN y de WGN), la cantidad relativa de impulsos puede obtenerse a partir del gráfico directamente leyendo el valor en el que el gráfico deja la línea recta a la izquierda. En el ejemplo de la Fig. 3, esto sucede en el 0,1%.

Sin embargo, puede extraerse información más detallada sobre la distribución del nivel de los impulsos de la APD producida únicamente por las muestras de IN y convertida en niveles de densidad (véase el § 10.10.1).

La distribución de la duración y el periodo del impulso/ráfaga puede presentarse más adecuadamente como un gráfico que indique la probabilidad relativa en función de la propia duración o el periodo, como puede verse en la Fig. 12.

FIGURA 12

Ejemplo de distribución de la duración del impulso/ráfaga



SM.1753-12

El ejemplo muestra que la mayoría de los impulsos tiene una duración de 7 μs.

La resolución en el tiempo de este gráfico es igual a la velocidad de muestreo.

12 Limitaciones

El método descrito para separar el IN del WGN y calcular sus valores fundamentales da lugar a los siguientes límites para los parámetros del IN:

CUADRO 10

Limitaciones para el IN medible

Parámetro	Valor
Nivel de IN más bajo	13 dB por encima del nivel del WGN
Duración del impulso más breve	1/frecuencia de muestreo
Duración del impulso más largo	Para mediciones con analizadores de espectro: tiempo de barrido Para mediciones continuas: tiempo de medición
Frecuencia de repetición de impulsos más baja	Para mediciones con analizadores de espectro: 1/tiempo de barrido Para mediciones continuas (por ejemplo FFT): 1/tiempo de adquisición
Frecuencia de repetición de impulsos más elevada	Frecuencia de muestreo/2

Apéndice 1

Verificación de la selección de frecuencia del WGN utilizando SVD

La SVD es un método analítico que sirve para determinar si el ruido medido es no gaussiano. En general, la SVD es una técnica de aproximación de matriz que filtra los valores cero y trabaja con los valores singulares de la matriz. Las matrices están relacionadas con las señales y la SVD separa de forma eficaz los datos de ruido de los datos de la señal.

La aplicación de la SVD para determinar el ruido gaussiano es un procedimiento de tres etapas:

Etapas: Utilizando los valores de señal medidos I y Q se forma un valor complejo $x(n)$ de longitud N , una secuencia de autocorrelación (ACS) realiza una estimación de la longitud de M y se construye, como se indica a continuación, una autocorrelación con dicha secuencia mediante los valores de señal medidos:

En primer lugar se determina el orden p del tamaño de la matriz de autocorrelación R_x . Este tamaño depende de las muestras de datos disponibles. Si se ha calculado una ACS de longitud M con N muestras medidas en una exploración, el tamaño de la matriz de autocorrelación es $(p + 1) \times (p + 1)$ donde $M = p + 1$. Puede emplearse un número tan bajo como $p = 19$, pero en principio un mayor valor de p da lugar a una mejor clasificación.

A continuación se construye la estimada \hat{R}_k de la matriz de autocorrelación (generalmente compleja):

$$\hat{R}_x = \begin{bmatrix} \hat{r}_x(0) & \hat{r}_x^*(1) & \hat{r}_x^*(2) & \cdots & \hat{r}_x^*(p) \\ \hat{r}_x(1) & \hat{r}_x^*(0) & \hat{r}_x^*(1) & \cdots & \hat{r}_x^*(p-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{r}_x(p) & \hat{r}_x^*(p-1) & \hat{r}_x^*(p-2) & \cdots & \hat{r}_x^*(0) \end{bmatrix} \in \mathbf{C}^{(p+1) \times (p+1)} \quad (16)$$

donde:

$$\hat{r}_x(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} x(n+m)x^*(n) \quad (17)$$

El * indica un valor conjugado. Obsérvese que como R_x es una matriz de autocorrelación, se utilizan $p+1$ valores únicos de la ACS para rellenar la matriz. Los valores únicos se construyen a partir de la ecuación (17). Cada uno de estos valores utiliza hasta N mediciones.

Etapa 2: En esta etapa, los valores singulares de la matriz de la ecuación (16) se evalúan mediante la aplicación de la SVD. A partir de la SVD de \hat{R}_x , se determinaba dos matrices unitarias auxiliares U , V y una matriz diagonal Σ del mismo tamaño:

$$\hat{R}_x = U\Sigma V^H \quad (18)$$

Hay $p+1$ valores singulares σ_k de la matriz Σ que son cero o positivos. Obsérvese que como Σ es una matriz diagonal, los valores singulares son simplemente los valores de la diagonal.

Etapa 3: Se trata de evaluar las cantidades basadas en los valores singulares como una métrica para decidir si el ruido es gaussiano. Específicamente, se calculan una métrica $v(k)$ y su índice k mediante la ecuación (19):

$$v(k) = \frac{\|\hat{R}_k^{(k)}\|_F}{\|\hat{R}_k\|_F} = \left[\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_k^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_{p+1}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

donde $\|\hat{R}_k\|_F$ es la norma de Frobenius de una matriz \hat{R}_k .

Téngase en cuenta que la norma de Frobenius corresponde a la norma de un vector que se obtiene apilando las columnas de la matriz una encima de otra.

La etapa final consiste en determinar el valor del índice de referencia k que satisface la igualdad $v(k) = 0,95$. Dependiendo del nivel de confianza requerido, pueden utilizarse otros valores distintos de 0,95. El nivel de confianza aumenta a medida que los valores se acercan a 1. Mediante experimentos se ha llegado a la conclusión de que el valor práctico recomendado debe ser 0,95.

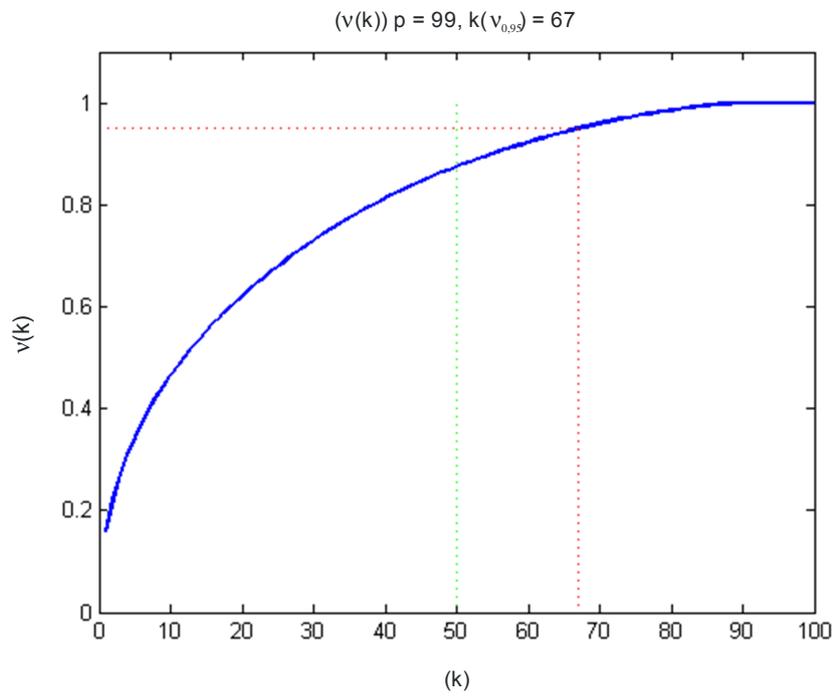
Si $k > \frac{p+1}{2}$, solamente existe el WGN en las muestra de medición, de no ser así existe(n) señal(es) más ruido.

El máximo valor posible de k es $p+1$. Obsérvese que a medida que k aumenta en la ecuación (19), $v(k)$ converge al valor 1. La Fig. 13 muestra un ejemplo de este gráfico para una señal que contiene únicamente muestras de ruido.

La Fig. 14 representa un ejemplo de una exploración que contiene ruido combinado con algunas portadoras débiles.

FIGURA 13

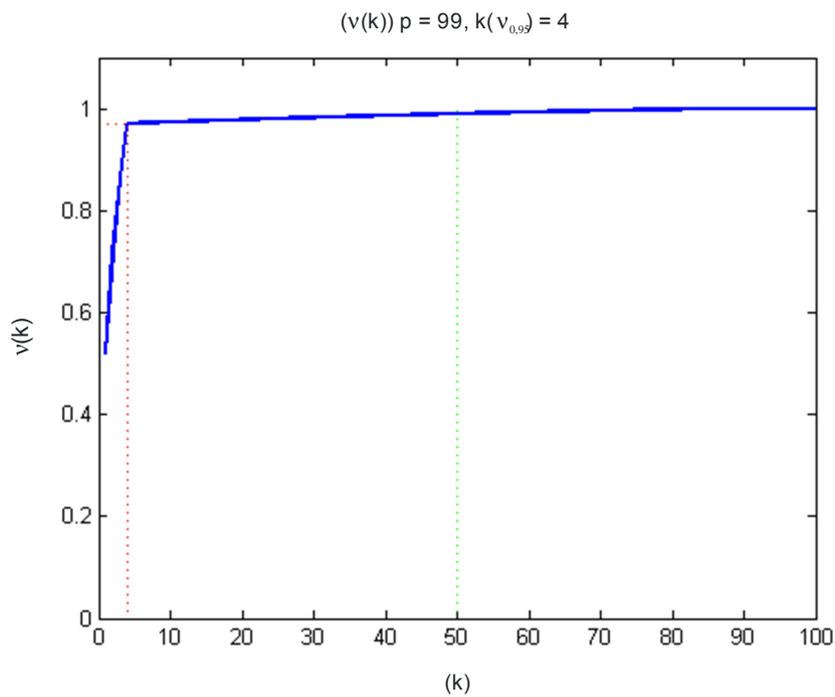
Gráfico de $v(k)$ para WGN



SM.1753-13

FIGURA 14

Gráfico de $v(k)$ para el de caso de cuatro multiportadoras
(la potencia de canal es -97 dBm)



SM.1753-14

Puede observarse que aunque la relación S/N de las portadora inyectadas es muy baja (la APD se representa virtualmente mediante una línea recta), la curva $v(k)$ muestra un comportamiento completamente distinto en comparación al caso en que sólo está presente el ruido. El método SVD es, por tanto, mucho más sensible que la simple evaluación de la APD.

El método también es aplicable a mediciones de valores reales.

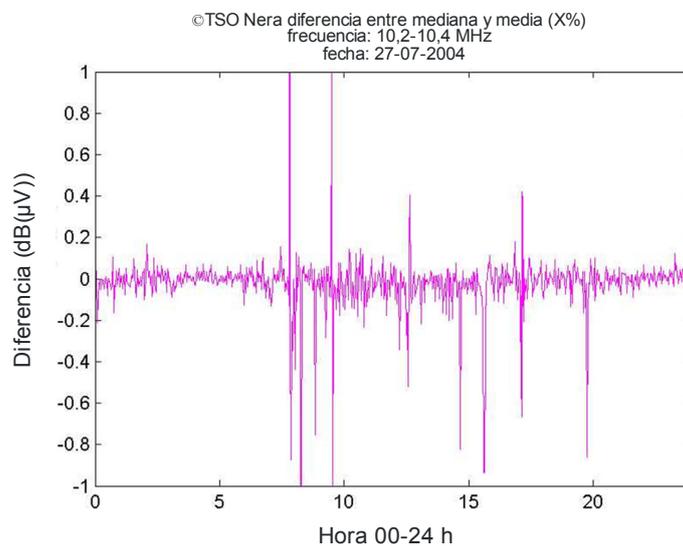
Apéndice 2

Verificación del valor de corte cuando se utilizan mediciones de valor eficaz directas

Se supone que el $X\%$ de los valores de medición de una exploración contienen sólo muestras de ruido. Si se excluye el porcentaje correcto de valores del proceso de evaluación, los valores mediano y medio de las muestras de ruido restantes deben ser iguales. Un prueba práctica consiste en trazar la diferencia entre el valor medio y el valor mediano, que evidentemente viene influenciada por señales diferentes al ruido.

FIGURA 15

Diferencia entre los valores medio y mediano (selección del 20%)



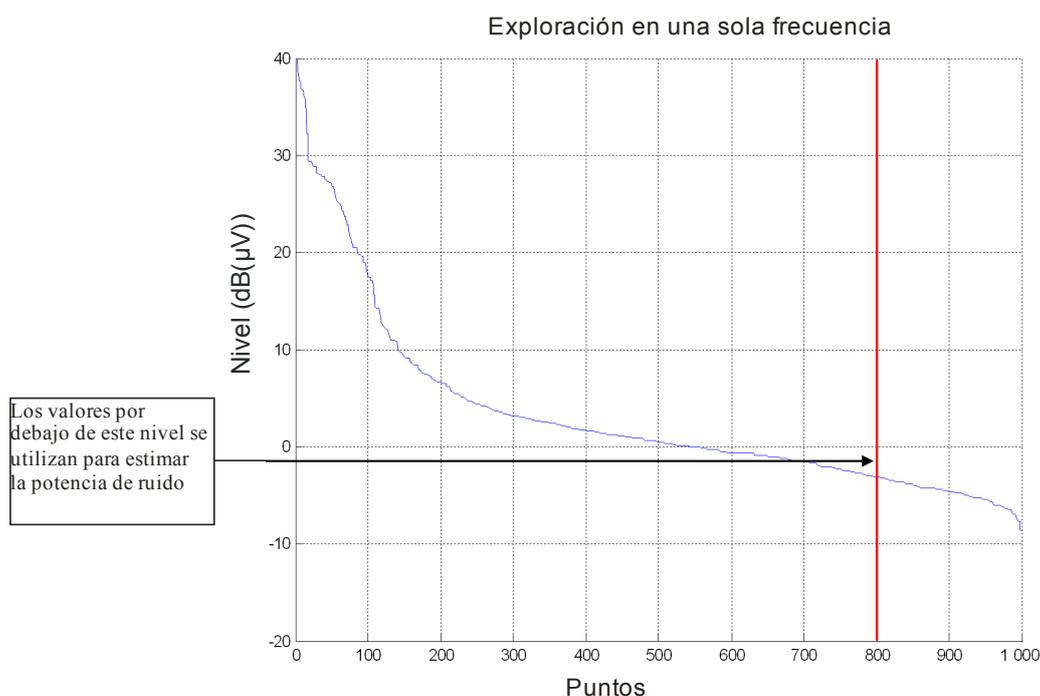
SM.1753-15

Como ejemplo, el gráfico de la Fig. 15 muestra la diferencia entre los valores medio y mediano con un porcentaje fijo del 20% para todas las exploraciones. El periodo de observación es de 24 horas (00.00 a 23.59). Entre las 07.00 horas y las 20.00 horas las tormentas hacen que la distribución de la selección del 20% tenga pendientes más acusadas y, por ello, haya mayores diferencias entre los valores mediano y medio.

Otra prueba podría consistir en trazar el número de muestras de medición de un cierto nivel en función de dicho nivel y verificar si la curva a la derecha del punto de corte «X%» es suave y tiene una pendiente pequeña. En la Fig. 16 aparece un ejemplo.

FIGURA 16

Exploración elegida aleatoriamente con valores seleccionados



SM.1753-16

El valor de corte seleccionado (línea vertical) es de 800 entre 1 000 muestras de medición, lo que corresponde al 20%. Puede observarse que en este ejemplo la selección del valor de corte no es crítica: podría haber sido elegido cualquier valor entre el 70% y el 10% (300 y 900 muestras) pues en esa gama la curva presenta una pendiente constante.

Ambos métodos exigen una cierta calibración *a priori*. Además, es necesario utilizar en la calibración un número significativo de muestras; por ejemplo, en este tipo de prueba no puede emplearse una sola muestra.

Referencias

Recomendación UIT-R P.372 – Ruido radioeléctrico.

Informe UIT-R SM.2055 – *Radio noise measurements*.

Informe UIT-R SM.2155 – Medición del ruido artificial en la gama de ondas decamétricas.

Informe UIT-R SM.2157 – Métodos de medición para los sistemas de telecomunicación de transmisión de datos a alta velocidad por líneas de transporte y distribución de energía eléctrica.