

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R SM.1880-2
(09/2017)

Mediciones y evaluación de la ocupación del espectro

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. 1880-2

Medición y evaluación de la ocupación del espectro

(2011-2015-2017)

Cometido

Aunque las mediciones automáticas de la ocupación del espectro nunca sustituirán completamente a las observaciones manuales, siguen siendo muy adecuadas en la mayoría de los casos. La ocupación de canales de frecuencia así como la ocupación de las bandas de frecuencias debe tener un cierto nivel de precisión para que puedan compararse o fusionarse si es necesario. Utilizando la técnica y los métodos adecuados es posible lograr un empleo más eficaz de los equipos existentes.

Palabras clave

Hora cargada, mediciones de la ocupación del espectro, ocupación del canal de frecuencias, tiempo de iteración

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el aumento constante de la demanda de servicios de radiocomunicaciones exige la utilización más eficaz del espectro de radiofrecuencias;
- b) que una buena gestión del espectro sólo puede hacerse de manera satisfactoria si se informa adecuadamente a los gestores del espectro sobre la utilización actual del espectro y las tendencias de su demanda;
- c) que los resultados de las mediciones de ocupación del espectro ofrecen información importante sobre:
 - asignación y adjudicación de frecuencias;
 - verificación de quejas relativas al bloqueo de canales;
 - determinación del grado de eficacia de la utilización del espectro;
- d) que la información obtenida de las bases de datos sobre las frecuencias asignadas no muestra el grado de utilización de cada canal de frecuencias;
- e) que algunas administraciones asignan la misma frecuencia a más de un usuario para su utilización compartida;
- f) que es conveniente comparar los resultados de las mediciones realizadas por distintos países en las zonas fronterizas o, por ejemplo, en bandas de los servicios móviles aeronáuticos o marítimos;
- g) que las administraciones emplean actualmente equipos de comprobación técnica automática, incluidos los métodos para el análisis de grabaciones, y puede evaluarse un cierto número de parámetros de considerable valor para permitir una utilización más eficaz del espectro;
- h) que al diseñar un sistema automatizado de recogida de datos sobre ocupación para utilizarlos en la gestión del espectro es necesario determinar qué parámetros van a medirse, la relación entre estos parámetros y la periodicidad con que deben realizarse las mediciones para garantizar que los datos son estadísticamente significativos;

i) que deben armonizarse los procedimientos y técnicas de medición para facilitar el intercambio de los resultados de las mediciones entre los distintos países;

j) que la integración o combinación con éxito de los datos de comprobación técnica no sólo depende del formato en que éstos se almacenan sino también de las condiciones técnicas y ambientales existentes en el momento de su recopilación,

reconociendo

a) que en los distintos países se usan varios principios y métodos de medición de la ocupación del espectro;

b) que existe un método en particular para recoger con gran precisión datos sobre la ocupación de los canales de frecuencia y que tales datos normalmente constituyen la base para determinar la ocupación real de las bandas de frecuencias,

recomienda

1 que se utilicen las técnicas y los procedimientos de medición descritos en los Anexos 1 y 2 para realizar las mediciones de la ocupación de los canales de frecuencia;

2 que se utilicen el Informe UIT-R SM.2256 y el Manual de comprobación técnica del espectro de la UIT en vigor como guía para realizar las mediciones de ocupación del espectro y que los equipos satisfagan los requisitos mencionados en dicho Manual;

3 que con arreglo a la Recomendación UIT-R SM.1809 se utilice un formato de datos común, consistente en un fichero ASCII por líneas obtenido del formato de datos para la comprobación técnica radioeléctrica (RMDF, *radio monitoring data format*).

Anexo 1

1 Introducción

En el Anexo 1 se describen las mediciones de la ocupación de canal de frecuencias llevadas a cabo normalmente con un receptor o un analizador de espectro. Se almacena la intensidad de la señal de cada paso de frecuencia. Por medio de tratamiento ulterior, se determina el porcentaje de tiempo en el que la señal está por encima de un cierto nivel umbral. En el Informe UIT-R SM.2256 (Anexo 1) se presenta un ejemplo de procedimiento de ese tratamiento ulterior. Diferentes usuarios de un canal producen a menudo distintos valores de intensidad de campo en el receptor. Esto permite calcular y presentar la ocupación por parte de diferentes usuarios.

2 Definiciones

Medición de la ocupación de canal de frecuencia: Mediciones de canales, no necesariamente separados por la misma distancia de canal, y posiblemente dispersos a lo largo de varias bandas de frecuencias, para determinar si un canal está ocupado o no. El objetivo es medir, en el menor tiempo posible, tantos canales como se pueda.

Tiempo de iteración: Tiempo utilizado para visitar todos los canales que deben ser medidos (estén o no ocupados) y retornar al primer canal.

Tiempo de observación: Tiempo que necesita el sistema para efectuar todas las mediciones necesarias en un canal. Esto incluye todo tiempo adicional de procesado, tal como cuando se almacenan los resultados en memoria o en disco.

Máximo número de canales: Máximo número de canales que pueden ser visitados en el tiempo de iteración.

Longitud de transmisión: Longitud media de la duración de las distintas transmisiones radioeléctricas.

Tiempo de integración: Intervalo de tiempo durante el cual se realiza una estimación de la ocupación. Suele ser de 5 ó 15 min.

Duración de la comprobación técnica: Tiempo total durante el cual las mediciones de ocupación son efectuadas.

Nivel de umbral preseleccionado para la medición: Si se recibe una señal con una intensidad superior al nivel umbral, se considera que el canal está ocupado.

Hora cargada: El mayor nivel de ocupación de un canal en un periodo de 60 min.

3 Requisitos

3.1 Equipo

Un sistema adecuado capaz de medir la ocupación de los canales de frecuencia mediante el registro de bandas de frecuencias consistirá en un receptor radioeléctrico o analizador de espectro, una antena adecuada, un cable, un PC/controlador con adaptador de interfaz, adquisición apropiada y software de procesamiento posterior.

Otras características pueden incluir un GPS para la explotación móvil/nómada de la estación, un módem de comunicaciones para el control remoto y el intercambio de datos, un método de calibración del sistema para las mediciones de intensidad de campo detectable, conmutadores de antena, filtros y atenuadores para bandas múltiples y/o entornos expuestos a intensos campos electromagnéticos.

3.2 Consideraciones sobre el emplazamiento

El emplazamiento debe elegirse de forma que la intensidad de señal esperada de las emisiones de interés se encuentre por encima del nivel umbral previsto. La relación entre estos dos parámetros definirá una zona dentro de la cual la medición realizada es pertinente para cualquier estación que funcione por encima de unos ciertos niveles de potencia radiada aparente (p.r.a.) o de potencia isotropa radiada equivalente (p.i.r.e.).

La intensidad de señal prevista puede evaluarse considerando las estaciones que cuentan con licencia en la región y su perfil de emisión así como utilizando un software de simulación. El umbral puede estimarse considerando la sensibilidad del sistema (ruido de fondo) o por mediciones previas llevadas a cabo en condiciones similares con los mismos equipos y configuración.

Si no se dispone de información preliminar, puede efectuarse un estudio de los diversos emplazamientos posibles utilizando equipos portátiles. Ello es especialmente importante si la ubicación de los equipos es de carácter definitivo y no es fácil efectuar futuras reubicaciones.

Lo más conveniente es que los resultados de las mediciones vayan acompañados de un informe de los análisis realizados para seleccionar el emplazamiento, indicando la zona y los emisores que deben considerarse.

3.3 Parámetros relativos al tiempo

Existe una fuerte correlación entre el tiempo de observación, el número de canales, la longitud media de la transmisión y la duración de la comprobación técnica.

El *tiempo de iteración* depende directamente del tiempo de observación y del número de canales. El *tiempo de tratamiento* (transferencia de datos entre el receptor y el controlador) también afecta al tiempo de iteración, debiendo mantenerse lo más breve posible.

$$\text{Tiempo de iteración} = (\text{Tiempo de observación} \times \text{Número de canales}) + \text{Tiempo de tratamiento}$$

El *tiempo de observación por canal* depende de la velocidad de barrido del equipo de comprobación técnica. Para poder mantener un tiempo de iteración razonablemente corto, con equipo relativamente lento, el número de canales medido debe ser reducido.

Siempre que se aplique la ecuación anterior a los analizadores de espectro, cuando la RBW se fija a un valor igual a la anchura de banda del canal, puede considerarse que el número de canales es el número de sectores¹ por barrido y el tiempo de observación como el tiempo de reposo por sector.

En los analizadores de transformada rápida de Fourier (FFT) sigue aplicándose este principio, especialmente si el número de canales a explorar es mayor que el tamaño de la FFT y aún se está realizando un barrido. Sin embargo, en este caso el número de canales explorados debe dividirse por el número de canales evaluados en cada FFT sencilla.

El sistema de comprobación técnica debe poder realizar barridos a una velocidad aceptable para detectar transmisiones cortas.

Existen fundamentalmente dos métodos distintos para obtener cifras sobre la ocupación de canal:

- a) Capturar todas las transmisiones en la banda observada. Este método exige un máximo tiempo de iteración que es la mitad del mínimo tiempo de activación o desactivación de cualquier transmisión en la banda, tomando entre ambos valores el menor. Este método proporciona una precisión independiente del resultado de la ocupación y puede permitir una duración de la comprobación técnica más corta.
- b) Método estadístico: especialmente cuando se consideran ráfagas de sistemas digitales, el mínimo tiempo de transmisión puede ser demasiado pequeño para la aplicación práctica del principio anterior. No obstante, si el tiempo de comprobación técnica es suficientemente largo como para proporcionar suficiente número de muestras, el resultado de la ocupación será correcto incluso con tiempos de iteración más largos porque la probabilidad estadística de captar una transmisión comparada con la probabilidad de perderla es la misma que el ciclo activo de la propia transmisión. Sin embargo, la precisión del método estadístico depende del valor de la ocupación como se describe a continuación.

La *duración de la comprobación técnica* es una combinación del tiempo de iteración, de los valores típicos de las longitudes de la transmisión esperadas, del número de canales que deben explorarse y de la precisión deseada de los resultados.

La duración de la comprobación técnica debe ser lo suficientemente larga como para permitir comprobar todas las emisiones pertinentes. Si no se conoce ningún patrón de distribución temporal, las evaluaciones iniciales deben considerar al menos 24 horas o periodos múltiplos de 24 horas. Una semana de comprobación técnica proporciona la diferencia de ocupación en los distintos días de la semana y la ocupación durante el fin de semana. Siete periodos de 24 horas a lo largo de un periodo de tiempo mayor (por ejemplo, un año) proporciona una información de ocupación más fiable.

¹ Sectores («bins») en estadística se refiere a grupos (o categorías o clases) de datos que caen dentro de una gama de valores.

3.4 Precisión, nivel de confianza estadística y número necesario de muestras

Desde un punto de vista estadístico, el resultado de la medición de la ocupación del espectro es una estimación o valor estadístico, por lo que tiene atributos de precisión y fiabilidad. La precisión refleja el control de los errores, midiendo normalmente la precisión relativa o el error relativo, así como el error absoluto. La fiabilidad indica la confianza que se tiene en el resultado, indicando su nivel de confianza. La medición en sí puede considerarse como un proceso de muestreo dentro de una población dada y el análisis de los resultados consiste básicamente en un proceso de estimación de la población a partir de un número limitado de muestras.

En la práctica, para denominar el resultado de la recopilación y el procesamiento de los datos se emplea la abreviatura *SO*, pero no se trata en sí de un valor verdadero. Aun cuando, durante el tiempo de integración, el equipo de comprobación técnica sólo facilita un pequeño número de muestras de datos, el cálculo de la estimación de la ocupación arrojará una serie de valores que caracterizan en mayor o menor grado la ocupación del canal radioeléctrico. Sin embargo, esos valores corresponderán al verdadero valor de ocupación (*SO*) sólo después de mediarse en un gran número de tiempos de integración, pues las evaluaciones individuales pueden diferir considerablemente del *SO*.

Por otra parte, gracias al control informático es posible recopilar un gran número de muestras, más de las necesarias para determinar la ocupación con la precisión exigida. Hay un número de muestras óptimo por encima del cual la adición de más datos no mejorará significativamente los resultados. El número de muestras óptimo necesario es un tema abordado en el Informe UIT-R SM.2256.

No existe relación lineal entre precisión y tiempo de iteración. En el caso de medición de 100 canales con tiempo de iteración de 1 s, que es un valor práctico, se puede aumentar el número de canales a 1 000, con un tiempo de iteración de 10 canales sin afectar demasiado al nivel de confianza ni a la precisión.

Hay una relación lineal entre la ocupación y el número de muestras requerido para lograr el nivel de confianza deseado. Cuanto más baja sea la ocupación más muestras se necesitarán.

El Cuadro 1 compara el muestreo independiente que es el caso más sencillo utilizando el teorema central del límite y el muestreo dependiente utilizando una cadena de Markov de primer orden, que difieren poco con respecto a modelos matemáticos mucho más complicados.

CUADRO 1

Número de muestras dependientes e independientes necesarias para conseguir 10% de precisión relativa y 95% de nivel de confianza en diversos porcentajes de ocupación (para un periodo de muestreo de 1 s)

Ocupación (%)	Cantidad necesaria de muestras independientes	Cantidad necesaria de muestras dependientes	Horas de muestreo necesarias
6,67	5 368	16 641	4,6
10	3 461	10 730	3,0
15	2 117	6 563	1,8
20	1 535	4 759	1,3
30	849	2 632	0,72
40	573	1 777	0,5
50	381	1 182	0,32
60	253	785	0,22
70	162	502	0,15

La calidad de las mediciones también puede caracterizarse por la precisión absoluta, Δ_{SO} , que determina la magnitud del margen de desviación de las estimaciones con respecto al valor verdadero SO que se considera permisible; y por la confianza (nivel de confianza), que indica la probabilidad mínima con que las estimaciones de ocupación deben coincidir con el intervalo entre $(SO - \Delta_{SO})$ a $(SO + \Delta_{SO})$, denominado intervalo de confianza. En ocasiones resulta más conveniente fijar los límites del intervalo de confianza como $SO \cdot (1 \pm \delta_{SO})$, donde $\delta_{SO} = \Delta_{SO} / SO$ es el error de evaluación relativo máximo permisible.

Para que las mediciones sean lo suficientemente precisas y fiables utilizando de manera económica los recursos informáticos, se ha de tener en cuenta lo siguiente.

La precisión y fiabilidad de las estimaciones de ocupación están determinadas no sólo por el número de muestras obtenidas durante el *tiempo de integración*, sino también por la naturaleza de las señales observadas en el canal radioeléctrico. Los requisitos más estrictos en lo que respecta al número de muestras acumuladas y velocidad operativa del equipo de comprobación técnica entran en juego en el caso de los canales radioeléctricos donde predominan las señales impulsivas cuya duración es inferior a la milésima parte del *tiempo de integración*. Este tipo de señal analizada también es característica cuando se mide la ocupación de la banda de frecuencias. En el caso de los canales con señales impulsivas, el número de muestras necesario para realizar mediciones precisas y fiables está determinado, siendo todos los demás parámetros idénticos, por el nivel real de ocupación del canal, como puede verse en el Cuadro 2.

CUADRO 2

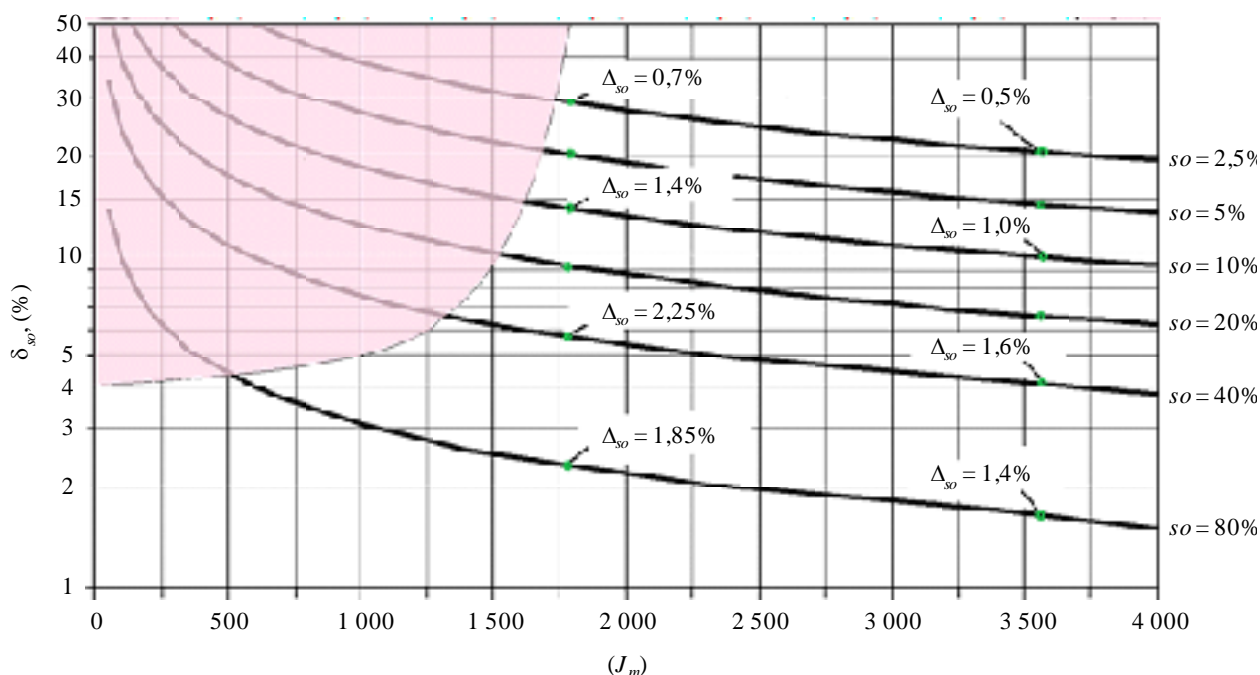
Número de muestras necesario para lograr un error relativo, δ_{SO} , máximo del 10% o un error absoluto, Δ_{SO} , del 1% con un nivel de confianza del 95%

Ocupación del canal, %	Error relativo requerido $\delta_{SO} = 10\%$		Error absoluto requerido $\Delta_{SO} = 1\%$	
	Magnitud de error absoluto resultante, %	Número necesario de muestras independientes	Magnitud de error absoluto resultante, %	Número necesario de muestras independientes
1	0,1	38 047	100,0	380
2	0,2	18 832	50,0	753
3	0,3	12 426	33,3	1 118
4	0,4	9 224	25,0	1 476
5	0,5	7 302	20,0	1 826
10	1,0	3 461	10,0	3 461
15	1,5	2 117	6,7	4 900
20	2,0	1 535	5,0	6 149
30	3,0	849	3,3	8 071
40	4,0	573	2,5	9 224
50	5,0	381	2,0	9 608
60	6,0	253	1,7	9 224
70	7,0	162	1,4	8 071
80	8,0	96	1,3	6 149
90	9,0	43	1,1	3 459

Los errores de medición para los distintos valores de ocupación y el número variable de muestras de datos procesadas pueden estimarse con el gráfico de la Fig. 1. Los puntos verdes en las curvas indican los valores de error absoluto para determinados números de muestras, en particular para 1 600 y 3 600. En la parte superior izquierda del gráfico puede verse una zona sombreada no recomendable, es decir, que no se recomienda estimar la ocupación con un número tan pequeño de muestras debido al aumento inaceptable del error. Puede encontrarse información más detallada al respecto en el Anexo 1 al Informe UIT-R SM.2256.

No obstante, si se observan señales largas en el canal radioeléctrico, el número de muestras necesario dependerá principalmente del número medio de señales observadas durante el tiempo de integración y en general será muy inferior a cuando se observan señales impulsivas. Pueden encontrarse en el Anexo 1 al Informe UIT-R SM.2256 sugerencias sobre la evaluación de la ocupación de canales con señales largas.

FIGURA 1
 Dependencia del error relativo de las estimaciones de ocupación (δ_{so} , %) del número de muestras acumuladas (J_m) con un nivel de confianza del 95% en canales con señales impulsivas



SM.1880-01

3.5 Consideración sobre las mediciones de la ocupación

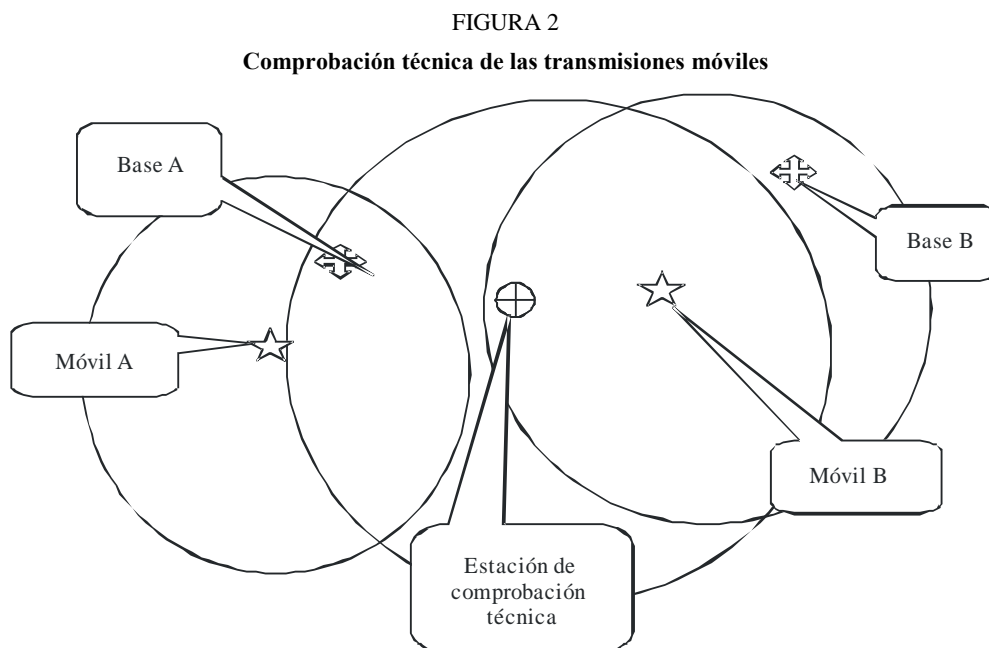
3.5.1 Identificación de la emisión

Un simple registro del nivel no permite discriminar entre emisiones deseadas y no deseadas o detectar la existencia de más de un usuario funcionando en una sola frecuencia dentro de la zona de cobertura del sistema de comprobación técnica. Todas las emisiones, si se encuentran por encima de un valor umbral escogido, se consideran normalmente canales ocupados.

Utilizando software moderno en tiempo real y software de postprocesamiento puede discriminarse entre los diferentes usuarios teniendo en cuenta informaciones tales como la intensidad de campo o la dirección de llegada al receptor, la información de código selectiva y las características de modulación.

3.5.2 Comprobación técnica de las transmisiones móviles

Puede que una unidad móvil deseada (Móvil A) se encuentre mucho más alejada del sitio de comprobación técnica que de la propia base del usuario (Base A). Como consecuencia, la intensidad de señal recibida puede ser menor que el valor umbral fijado para la comprobación técnica, aunque lo suficientemente fuerte como para ser utilizado en la base predestinada (véase la Fig. 2).



SM.1880-02

A la inversa, una unidad móvil de un usuario en canal común fuera de la zona (Móvil B), puede ser recibida en el sitio de la comprobación técnica pero no escuchada en la base principal de los usuarios.

Cualquiera de las situaciones anteriores puede dar lugar a resultados erróneos ya que puede que los resultados de la ocupación no sean representativos de toda la red móvil sino sólo de la región cubierta por la estación de comprobación técnica.

3.5.3 Propagación

Las condiciones de propagación deben ser también consideradas cuando se fijan los niveles umbral de los receptores, y la propagación deberá comprobarse técnicamente durante el periodo de medición.

3.6 Presentación y análisis de los datos recopilados

Los resultados pueden ser almacenados cada 5, 15, 30 ó 60 min, según se requiera. A partir de estos datos es posible generar presentaciones basadas en cuadros, gráficas textuales, gráficos de línea/barra y mapas. Una vez extraída la información deseada pueden descartarse estos datos muestreados en bruto.

El sistema de presentación debe, como mínimo, incluir el sitio de localización de la comprobación técnica, la fecha y periodo de comprobación, la frecuencia, el tipo de usuario(s), el nivel umbral utilizado, la ocupación en la hora cargada y el periodo de iteración.

3.6.1 Ejemplo representativo de intensidad de campo utilizada para discriminar diferentes usuarios

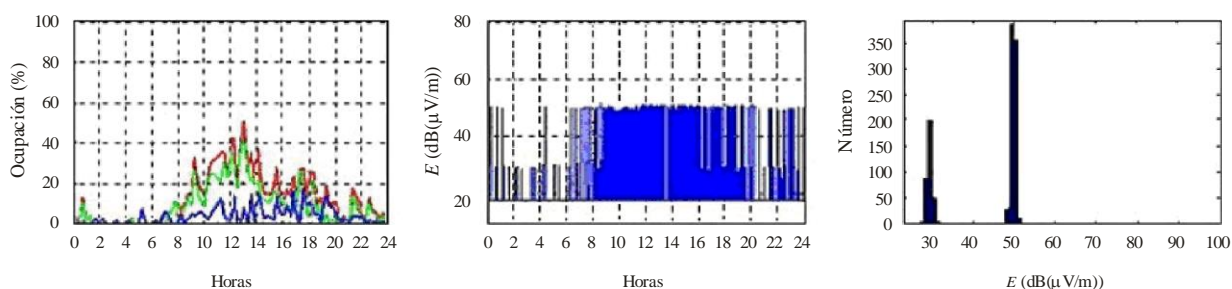
Si se registra la intensidad de campo, se puede extraer información adicional de la medición. El gráfico izquierdo de la Fig. 3 es un modo usual de presentar la ocupación con una resolución de 15 min, normalmente con sólo una curva. La curva roja de la izquierda representa la ocupación total generada por todos los usuarios en ese canal. La curva verde es la ocupación originada por la estación cuya señal se recibe con un valor de 49 dB(μ V/m) (véase el gráfico de la derecha), y la curva azul es la ocupación generada por el resto de usuarios; en este caso el segundo usuario cuya señal se recibe con un valor de unos 29 dB(μ V/m).

El gráfico del medio representa los niveles recibidos a lo largo del tiempo. Sólo se evalúan los niveles recibidos por encima del nivel umbral (en este caso: 20 dB(μ V/m)).

El gráfico de la derecha muestra la distribución estadística de los niveles de intensidad de campo recibida. En este ejemplo el valor 49 dB(μ V/m) se midió unas 380 veces en un periodo de 24 horas, 50 dB(μ V/m) unas 350 veces, etc.

FIGURA 3

Tratamiento mejorado de los datos sobre ocupación



SM.1880-03

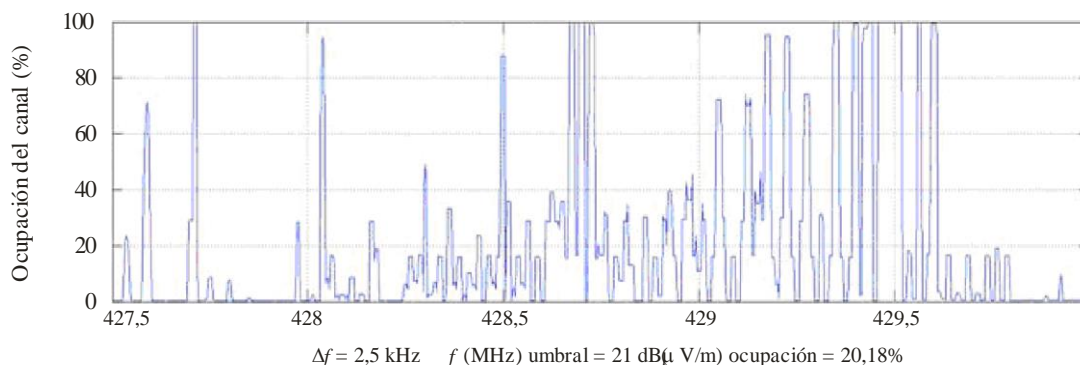
3.6.2 Representación de la ocupación de la banda de frecuencias por porcentajes

En lugar de presentar únicamente la ocupación de cada canal individual, también debe presentarse la ocupación de la banda de frecuencias medida completa.

En la Fig. 4 se muestra la ocupación media durante 24 h de cada paso de frecuencia.

FIGURA 4

Ocupación media durante 24 h



SM.1880-04

Como ejemplo, suponiendo que una banda de frecuencias puede explorarse en 1 000 pasos de 10 s, se dispone de 8 640 valores de intensidad de campo en cada paso durante un periodo de 24 horas. Si en este caso se rebasa 4 320 veces el nivel umbral en un canal/paso, la ocupación será del 50%. En el gráfico resultante, antes indicado, no queda información temporal y no hay indicación de cuándo se observó dicha ocupación del 50%. Esta limitación debe considerarse cuando se emplee este tipo de presentación.

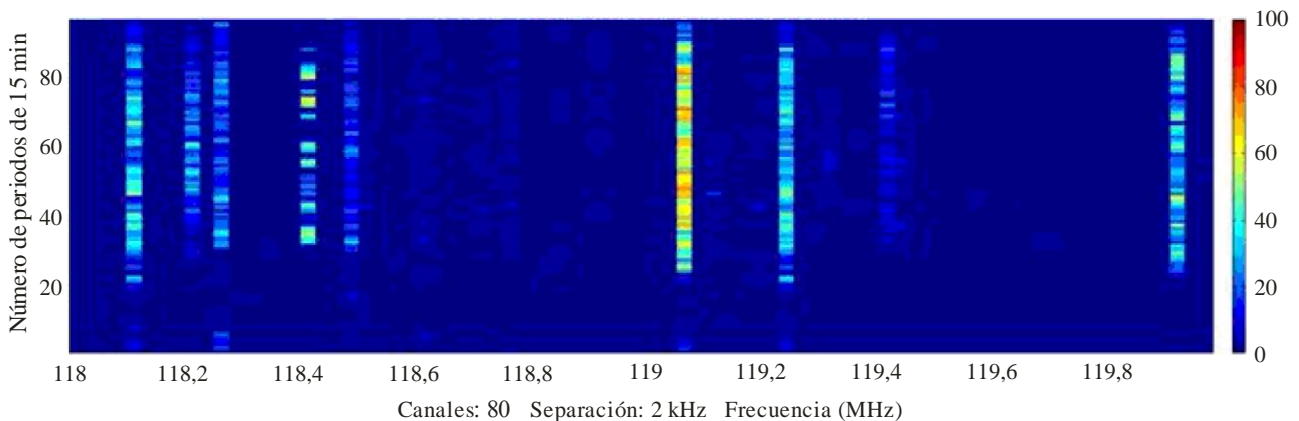
3.6.3 Representación de la ocupación de bandas de frecuencias por medio de colores

Con objeto de lograr una visión de conjunto rápida, puede expresarse la ocupación presentando un color por canal y por resolución escogida en el tiempo (normalmente 15 min). En la Fig. 5 se proporciona un ejemplo.

En esta presentación la información temporal todavía está disponible (96 valores/24 h). La barra de colores representa la ocupación (y no la intensidad de campo). El eje Y izquierdo da el tiempo, no en horas sino en 96 periodos de 15 min.

FIGURA 5

Ocupación de bandas de frecuencias por medio de colores (espectrograma)



Anexo 2

Determinación de las muestras necesarias para los distintos métodos de muestreo

1 Métodos de muestreo

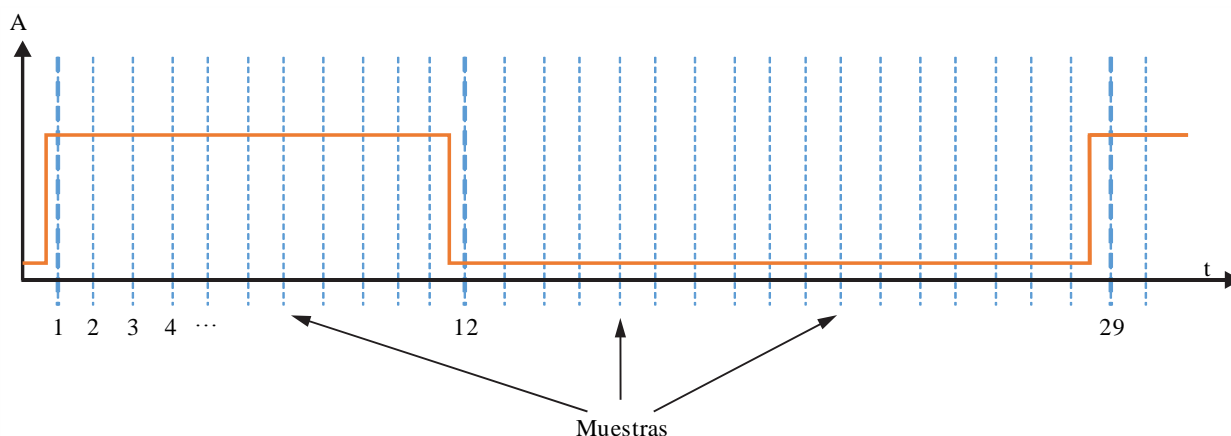
En la práctica el objetivo de las mediciones de la ocupación es lograr resultados precisos con un esfuerzo mínimo. Si se puede medir constantemente un canal de frecuencias durante todo el periodo de comprobación, el resultado obtenido para la ocupación relativa será absolutamente preciso. Sin embargo, de ese modo se generaría una cantidad innecesaria de datos y, por lo general, no se podrían comprobar múltiples canales al mismo tiempo con un mismo equipo. Así, por motivos prácticos se suelen tomar «instantáneas» (muestras) de la ocupación de un canal de frecuencias a intervalos más o menos regulares. Esos intervalos son el tiempo de iteración y el valor recíproco es la velocidad de muestreo. Evidentemente, cuanto mayor sea la velocidad de muestreo, más muestras se obtendrán y más preciso será el resultado obtenido. Matemáticamente puede demostrarse que, entre otros parámetros, el número mínimo de muestras necesario para lograr una precisión y un nivel de fiabilidad dados depende de que el muestreo sea «dependiente» o «independiente». La diferencia entre esos dos métodos de muestreo, en lo que respecta a la medición de la ocupación del canal, reside en si es posible detectar todas y cada una de las transmisiones en el canal o no. Esto se explica con los siguientes dos ejemplos, que también demuestran que, al tomar medidas de ocupación en la realidad, pueden darse ambos casos y en ocasiones resulta difícil determinar qué método de muestreo se aplica.

1.1 Muestreo dependiente

En el ejemplo que se utiliza aquí se supone un canal de frecuencias analógico donde la longitud media de las transmisiones (y también de las pausas entre ellas) es del orden de segundos. Es lo que puede denominarse un canal con «señales largas». Los equipos de comprobación técnica rápidos modernos pueden medir miles de canales por segundo. Por tanto, si se miden 100 canales de frecuencias al mismo tiempo, el tiempo de iteración en cada canal será de 100 ms. Esto implica que se detectarán todas las transmisiones en cada uno de los 10 canales. De hecho, se realizará un sobremuestreo, porque una transmisión de 1 s de longitud se capturará 10 veces.

FIGURA 6

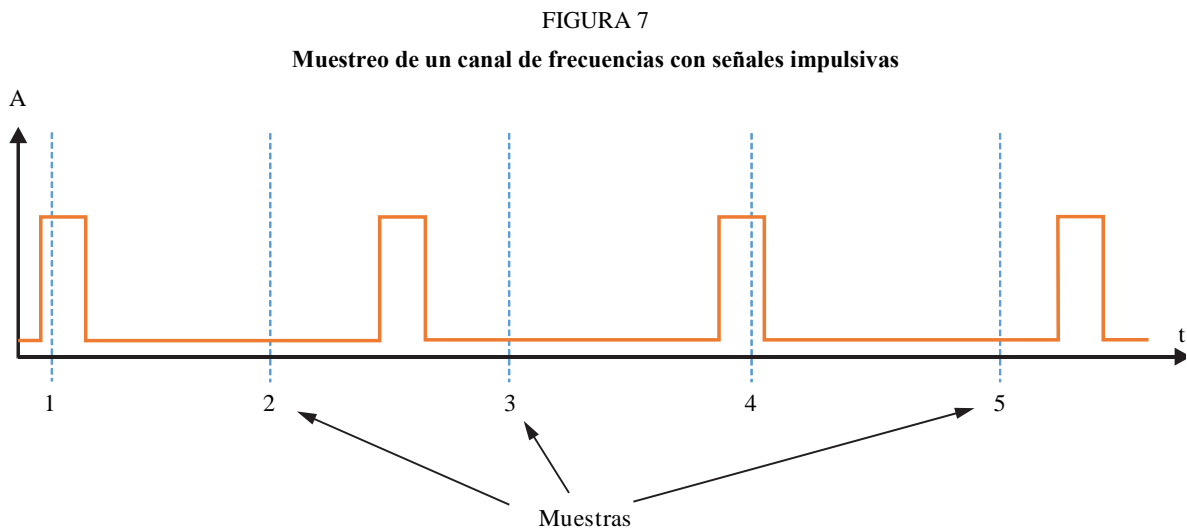
Muestreo de un canal de frecuencias con señales largas



En el ejemplo de la Fig. 6, sólo en las muestras 1, 12 y 29 se detecta un cambio de estado (de ocupado a no ocupado o viceversa), por lo que su valor es distinto del de las muestras anteriores. Las otras 27 muestras tienen el mismo estado que sus predecesoras. En términos estadísticos, la probabilidad de que una muestra tenga el mismo estado que la muestra precedente es mucho mayor que la de detectar un cambio de estado. Por ende, el valor de una muestra depende del valor de la muestra anterior.

1.2 Muestreo independiente

En el ejemplo utilizado para el muestreo independiente se supone un canal con señales digitales impulsivas. Hasta cuando se utilizan receptores de comprobación técnica rápidos, las ráfagas suelen ser mucho más cortas que el tiempo de iteración, por lo que no es posible detectar cada una de las ráfagas (transmisiones) en cada canal. Las ráfagas generalmente sólo se detectan gracias a la suerte.



Como el muestreo no suele estar sincronizado con la velocidad de las ráfagas, las muestras de la Fig. 7 detectan una ráfaga o una pausa de manera estadísticamente aleatoria. La probabilidad de que cada muestra coincida con el canal ocupado sólo depende de la temporización de la señal misma, pero no del estado de la muestra anterior. Es lo que se denomina «muestreo independiente».

2 Cálculo del número mínimo de muestras necesario

La ocupación de transmisión de un canal seleccionado se define como un proceso aleatorio de dos estados. El primer estado se denomina «ocupado» y se define como el caso en que, durante la observación, la intensidad de la señal en el receptor de comprobación está por encima de un umbral determinado.

El evento complementario se da cuando la intensidad de la señal está por debajo de ese umbral. Como el estado del canal es aleatorio, no es posible predecir su estado en un intervalo de medida dado. Sin embargo, su estado puede describirse en términos de una ley de probabilidad [1].

Considérese un proceso aleatorio con dos valores: $X(t) = 1$, si la señal en el instante t está por encima del umbral y $X(t) = 0$, en caso contrario [1].

Pongamos que $X(n) = x_i$, de manera que la secuencia de mediciones, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, está representada por una secuencia de 0 y 1, donde 1 implica que la intensidad detectada en el canal está por encima del umbral y 0 significa que la intensidad detectada en el canal no supera ese umbral. Aquí x_i es una muestra de $X(t)$ independientemente de cuál sea el intervalo de tiempo.

Desde un punto de vista estadístico, el resultado de la medición de la ocupación del espectro es una estimación o valor estadístico, por lo que tiene atributos de precisión y fiabilidad. Como ya se ha mencionado, el principal problema de la medición de la ocupación es cómo obtener suficiente información con un menor esfuerzo y un determinado nivel de fiabilidad, por lo que la precisión relativa y el nivel de fiabilidad son elementos cruciales.

2.1 Muestreo independiente

También desde el punto de vista estadístico, la distribución independiente e idéntica de las muestras es, evidentemente, el caso más simple.

El concepto básico de este método consiste en tomar las muestras de x_i para estimar el verdadero valor de la ocupación del espectro (SO) durante el tiempo de integración.

La variable $X(n)$ obedece a la distribución de 0-1 con el parámetro ρ (probabilidad de que la intensidad detectada en el canal rebasa un determinado umbral), por lo que la función de densidad de la probabilidad de $X(n)$ se obtiene con la siguiente fórmula:

$$f(x, \rho) = \rho^x (1 - \rho)^{1-x} \quad x = 0, 1 \quad 0 < \rho < 1$$

Para medir la ocupación del espectro se utilizan ampliamente receptores o analizadores del espectro modernos. Gracias a su alta velocidad, generalmente se producirá una enorme cantidad de datos en un determinado tiempo de integración, que sirven precisamente de base para utilizar el teorema del límite central. Así, para x_i ,

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i - n\rho}{\sqrt{n\rho(1-\rho)}} = \frac{n\bar{X} - n\rho}{\sqrt{n\rho(1-\rho)}} \sim N(0,1)$$

donde \bar{X} es el valor medio de las muestras y también el resultado del cálculo de ocupación del espectro (SOCR).

El nivel de fiabilidad, P_{SOC} , se obtiene con la siguiente fórmula:

$$P_{SOC} = P\left\{-\mu_{\frac{\alpha}{2}} \leq \frac{n\bar{X} - n\rho}{\sqrt{n\rho(1-\rho)}} \leq \mu_{\frac{\alpha}{2}}\right\} = 1 - \alpha$$

donde $\mu_{\frac{\alpha}{2}}$ es el valor superior del nivel de importancia, α , de la distribución típica normal (con media = 0 y desviación típica = 1).

El nivel de fiabilidad se denota con $1 - \alpha$.

Para resolver ρ , $A \leq \rho \leq B$, siendo $[A, B]$ la estimación del intervalo de ρ .

El valor medio de las muestras, \bar{X} , con n barridos (mediciones) y m detecciones se obtiene con:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=0}^n X_i}{n} = \frac{m}{n}$$

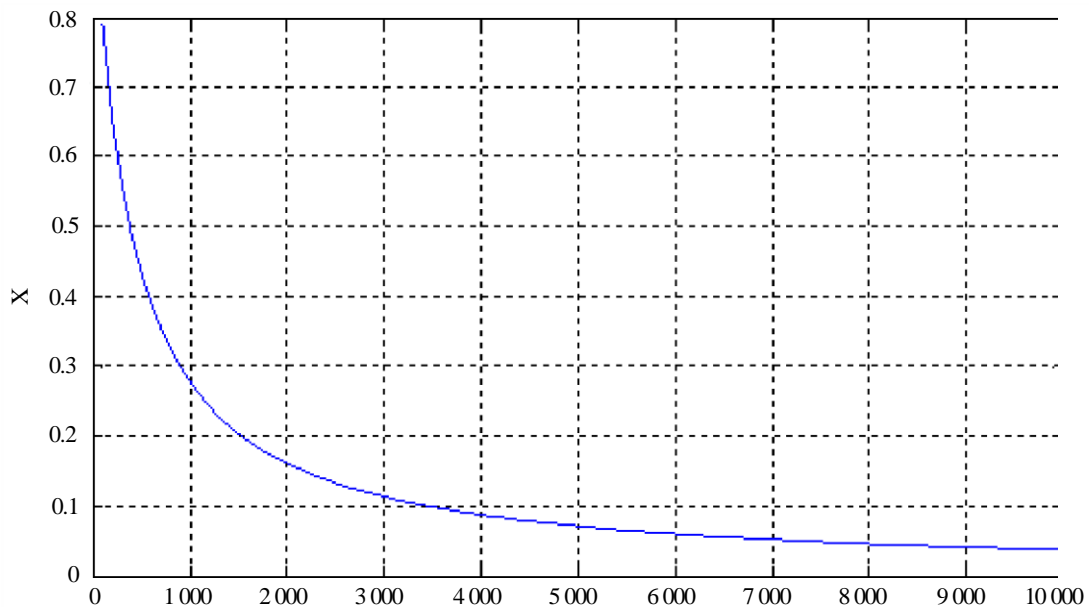
Por tanto, la precisión relativa de la ocupación es:

$$\delta_{so} = \frac{B-A}{2\bar{X}}$$

Para un ejemplo donde la precisión relativa sea del 10% y el nivel de fiabilidad del 95%, el número de muestras independientes necesarias con respecto a la diversa ocupación del espectro es el que se muestra en la Fig. 8.

FIGURA 8

Ocupación del espectro en función del número de muestras



SM.1880-08

2.2 Muestreo dependiente

En el caso del muestreo dependiente, la secuencia puede representarse como una cadena de Markov de primer orden. Aunque también pueden utilizarse modelos matemáticos más complicados, en los casos que interesan a la comprobación técnica, los resultados de esos modelos complejos difieren ligeramente de los resultados Markov de primer orden [1]. El número de muestras necesarias resultante para una precisión del 10% y un nivel de fiabilidad del 95% en diversos porcentajes de ocupación puede consultarse en el Cuadro 1 del Anexo 1 a la presente Recomendación. Puede verse que el número de muestras dependientes necesarias es unas tres veces superior al número de muestras independientes.

Referencias del Anexo 2

- [1] SPAULDING, A.D., HAGN, G.H. [agosto de 1977] – On the definition and estimation of spectrum occupancy. IEEE Trans. En EMC, Vol. EMC-19, No. 3, p. 269-280.