

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R RA.1237-2
(01/2010)

**Protección del servicio de radioastronomía
contra las emisiones no deseadas,
provocadas por aplicaciones
de la modulación digital
de banda ancha**

Serie RA
Radio astronomía



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, 2017

© UIT 2017

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 RA.1237-2*

Protección del servicio de radioastronomía contra las emisiones no deseadas, provocadas por aplicaciones de la modulación digital de banda ancha

(Cuestión UIT-R 145/7)

(1997-2003-2010)

Cometido

La presente Recomendación versa sobre la protección del servicio de radioastronomía contra las emisiones no deseadas, generadas por aplicaciones de modulación digital de banda ancha. En el Anexo 1 se facilita información técnica, especialmente sobre los niveles de interferencia que causan los sistemas de satélites al servicio de radioastronomía. Se recomienda que se adopten todas las medidas posibles en la práctica para reducir las emisiones no deseadas de los sistemas que utilizan técnicas de modulación digital de banda ancha.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el servicio de radioastronomía y otros servicios pasivos continúan aportando contribuciones importantes y sustanciales a la ciencia;
- b) que los avances de la investigación en la radioastronomía dependen de forma crucial de la capacidad de efectuar observaciones con límites extremos de sensibilidad;
- c) que todos los servicios se beneficiarán de las medidas que reduzcan o eliminen las emisiones no deseadas en el espectro;
- d) que en la Resolución 739 (Rev.CMR-15) se define un procedimiento de consulta que debe seguirse cuando las emisiones no deseadas de enlaces descendentes del servicio espacial que funcionan en determinadas bandas rebasan el nivel de interferencia perjudicial en ciertas bandas del servicio de radioastronomía;
- e) que los transmisores, especialmente los de las estaciones espaciales, emplean cada vez más la técnica de modulación del espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS) y otras técnicas de modulación digital de banda ancha que pueden producir bandas laterales no deseadas hasta frecuencias muy alejadas de la frecuencia portadora, tal como se explica en el Anexo 1;
- f) que se han creado y se utilizan con éxito medios técnicos para filtrar las bandas laterales no deseadas;
- g) que se conocen técnicas de modulación digital eficaces desde el punto de vista de la utilización del espectro que producen niveles intrínsecamente reducidos de emisiones no deseadas y cuya idoneidad está demostrada;
- h) que desde el punto de vista del servicio que sufre interferencia en una banda distinta de la atribuida al servicio que produce las emisiones no deseadas, no hay en la práctica ninguna

* La Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones introdujo modificaciones redaccionales en esta Recomendación en 2017, de conformidad con la Resolución UIT-R 1.

diferencia entre la interferencia debida al dominio de emisión no esencial y la debida al dominio de emisión fuera de banda,

observando

a) que en el Informe UIT-R SM.2091 se dan ejemplos de sistemas de satélite que utilizan la modulación DSSS que pueden causar interferencia a las estaciones de radioastronomía,

recomienda

1 que en los sistemas que utilizan técnicas de modulación digital de banda ancha, se adopten todas las medidas posibles para reducir el nivel de las bandas laterales que caen fuera de la banda atribuida al servicio, habida cuenta de las pautas que se facilitan en el Anexo 1.

Anexo 1

Interferencia causada a la radioastronomía por emisiones no deseadas (no esenciales y fuera de banda) generadas por aplicaciones de modulación digital de banda ancha

1 Introducción

La experiencia demuestra que la mayor parte de la interferencia verdaderamente perjudicial para la radioastronomía tiene su origen en los transmisores de satélite. La mayor parte de dicha interferencia procede de emisiones no deseadas, es decir, la intermodulación y otros efectos no lineales, así como el ensanchamiento de las bandas laterales producido por las transmisiones digitales que en algunos casos superan muchas veces la anchura de banda atribuida fuera de la banda asignada al transmisor de satélite. Un observatorio que tenga un buen apantallamiento respecto a los transmisores terrenales no tiene protección contra las emisiones de satélite y los satélites no son accesibles para reajustar los filtros o aplicar otras técnicas de reducción. Por consiguiente, estas emisiones no deseadas procedentes de los satélites representan la amenaza más seria para el servicio de radioastronomía, especialmente en vista de la rápida expansión que se está produciendo en la utilización de satélites para fines diversos.

2 Emisiones no esenciales y fuera de banda debidas a la modulación digital

La modulación digital, y en especial la modulación de DSSS puede dar lugar a grandes bandas laterales. La definición de estas bandas laterales como emisiones no esenciales o emisiones fuera de banda, se hace en los números 1.144 a 1.146 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR). La emisión fuera de banda es el resultado del proceso de modulación, al igual que las bandas laterales de espectro ensanchado, pero se define como la que cae *inmediatamente* fuera de la anchura de banda necesaria. Ello se interpreta habitualmente en el sentido de que la gama de frecuencias de las emisiones fuera de banda es varias veces mayor que la anchura de banda necesaria. Las emisiones no esenciales caen fuera de la anchura de banda necesaria y pueden reducirse sin afectar la correspondiente transmisión de información, condiciones ambas que se aplican también a las bandas laterales de la modulación de espectro ensanchado. Este tipo de bandas laterales puede dar lugar a interferencias graves en una banda adyacente o en una más separada en frecuencia.

Principalmente a los efectos de aclarar las definiciones, se ha elaborado el concepto de dominios para emisiones no deseadas (véanse los números 1.146A y 1.146B).

3 Niveles de interferencia para la radioastronomía

En la Recomendación UIT-R RA.769 figuran estudios sobre los niveles de señal interferente que resultan perjudiciales para la radioastronomía. Estos niveles se expresan en la forma de potencia recibida a la entrada de la antena, densidad de flujo de potencia (dfp) y densidad espectral de flujo de potencia (defp) en la antena de radioastronomía, y se calculan para una serie representativa de bandas de radioastronomía situadas en todo el espectro. Los niveles de interferencia especificados de esta manera se aplican en general a un gran número de servicios activos que pueden causar interferencia a la radioastronomía.

El Apéndice 3 al RR especifica límites de las emisiones no esenciales en términos de la potencia aplicada a la entrada de la línea de transmisión de una antena. Ahora bien, al definir estos límites no se tuvo presente la protección de los servicios pasivos, por lo que en ciertos casos son insuficientes para proteger el servicio de radioastronomía (SRA). Por otra parte, para interpretar dichos límites en términos de interferencia a la radioastronomía es necesario conocer los detalles de la antena transmisora de cada fuente potencial de interferencia, así como las pérdidas del trayecto entre dichas antenas transmisoras y cualquier antena de radioastronomía. Además, las limitaciones de este tipo son inadecuadas en el caso de redes de antenas activas, en las que no hay un único puerto de salida de transmisor. Este tipo de consideraciones hace pensar que sería mejor especificar los límites de emisión en términos de la potencia radiada isótropa equivalente (p.i.r.e.) en dirección de un observatorio radioastronómico.

Como ejemplo de la utilización de la p.i.r.e., considérese el caso de un transmisor de un satélite geoestacionario. Como todo satélite de este tipo es visible sobre el horizonte en una gran zona de la Tierra, es probable que presente lóbulos laterales en dirección de uno o más observatorios. No obstante, la huella del enlace descendente puede cubrir una zona relativamente pequeña de la Tierra en la que puede no haber ningún observatorio radioastronómico. Así pues, el diseñador del sistema de satélite puede tratar de reducir las respuestas de los lóbulos laterales como primera medida para evitar la interferencia a la radioastronomía. Ello sería posible si se especificasen los límites de interferencia perjudicial en términos de la p.i.r.e. en dirección de un observatorio. No obstante, si los límites se especifican en términos de la potencia a la entrada de la línea de transmisión de la antena, como actualmente es el caso en el Apéndice 3 al RR, es necesario suponer, como caso más desfavorable, que toda la ganancia de la antena transmisora está dirigida hacia un observatorio. Dichos límites pueden ser mucho más difíciles de cumplir. Se ve, pues, que los valores de p.i.r.e. en dirección de una antena de radioastronomía resultan más adecuados para especificar los límites de las emisiones no deseadas para proteger la radioastronomía. Esta conclusión se aplica igualmente a cualquier otro tipo de transmisión, incluidas las de transmisores en tierra. Los valores de p.i.r.e. pueden obtenerse a partir de los valores de dfp o de defp de la Recomendación UIT-R RA.769 si se conocen las pérdidas de propagación.

También hay que señalar que para los cálculos de interferencia deben conocerse los niveles de las emisiones no deseadas en términos absolutos, más bien que en decibelios respecto a la transmisión principal. En muchos casos, la emisión no deseada está muy apartada en frecuencia de la transmisión principal, y el servicio que sufre interferencia y la transmisión principal ocupan bandas atribuidas distintas. Por tanto, es lógico especificar los límites en unidades absolutas de potencia, sea de dfp o de defp, en vez de hacerlo como fracción de la emisión principal.

4 Interferencia procedente de satélites

La interferencia causada a una estación SRA puede tener su origen en enlaces descendentes del servicio por satélite (órbita de los satélites geoestacionarios) o no OSG (órbita de los satélites no geoestacionarios). En el primer caso, la interferencia no varía según la ubicación, mientras que en el segundo la potencia interferente varía con el tiempo y su ubicación en el cielo. Por lo tanto, los dos casos se han de tratar por separado.

En las bandas donde predominan las observaciones del continuum, la anchura de banda utilizada para calcular el umbral de interferencia perjudicial es la anchura de la banda atribuida al SRA (a partir del Cuadro 1 de la Recomendación UIT-R RA.769). En las bandas donde predominan las observaciones de líneas espectrales, la anchura de banda del canal utilizada para calcular los niveles umbral de interferencia es la anchura de banda supuesta del canal de la línea espectral del receptor RSA (a partir del Cuadro 2 de la Recomendación UIT-R RA.769).

4.1 Emisiones no deseadas procedentes de sistemas de satélites OSG (enlace descendente)

La dfp de las emisiones no deseadas puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$dfp_{emisiones\ no\ deseadas} = \int_{f_1}^{f_2} \frac{P(f) \cdot g(f)}{SL \cdot ATM(f)} df \quad (1)$$

siendo:

$dfp_{emisiones\ no\ deseadas}$: dfp en la estación del SRA (W/m^2);

f_1, f_2 : extremo inferior y superior, respectivamente, de la anchura de banda de referencia del SRA (Hz);

$p(f)$: densidad de potencia de las emisiones no deseadas en el colector de la antena de transmisión (W/Hz);

$g(f)$: ganancia de la antena transmisora en la dirección del emplazamiento de radioastronomía;

SL : α pérdida geométrica (dB);

$ATM(f)$: absorción atmosférica en la banda $f_1 - f_2$ en función de la frecuencia.

Cabe señalar que la densidad de potencia de la señal transmitida, la ganancia del subsistema de antena y la absorción atmosférica varían con la frecuencia y, por consiguiente, se representan en función de la frecuencia. La dfp de las emisiones no deseadas total en el emplazamiento de la estación del SRA es la integral de esas funciones, como se observa en la expresión anterior, a lo largo de la frecuencia de la banda pasante del receptor. En los casos donde la densidad de potencia de la emisión no deseada, la ganancia de antena y la absorción atmosférica son constantes en toda la anchura de banda del receptor del servicio pasivo, la expresión anterior se puede simplificar de la siguiente manera:

$$dfp_{emisiones\ no\ deseadas} = \frac{P \cdot g}{SL \cdot ATM} (f_2 - f_1) \quad (2)$$

En los casos en que la banda activa es adyacente a la banda pasiva, puede suponerse que la ganancia de la antena transmisora permanece constante en la banda de transmisión y en la banda del servicio pasivo. Sin embargo, esto no suele ser así, especialmente cuando la banda del servicio pasivo está por debajo de la frecuencia de corte de la red de alimentación del guíaondas en el subsistema de antena.

Este nivel de dfp tiene que compararse con los niveles umbral contenidos en la Recomendación UIT-R RA.769.

4.2 Emisiones no deseadas procedentes de sistemas de satélites no OSG (enlace descendente)

Para calcular la interferencia procedente de sistemas del servicio fijo por satélite (SFS) no OSG a estaciones en el SRA, además de efectuar el cálculo anterior para obtener la dfp de un determinado satélite, se debe utilizar el método que figura en la Recomendación UIT-R S.1586. Asimismo, para calcular la interferencia causada por los sistemas del servicio móvil por satélite (SMS) y del servicio de radionavegación por satélite (SRNS) no OSG a las estaciones del SRA, se debe utilizar el método indicado en la Recomendación UIT-R M.1583.

5 Emisiones no deseadas de satélites que afectan de forma particular a la radioastronomía

5.1 Espectro ensanchado de frecuencia directa

En ausencia de conformación por impulsos, este tipo de modulación produce un espectro de potencia que tiene la forma de una función senocuadrática de la frecuencia, con bandas laterales muy extensas. Si f es la frecuencia medida respecto a la portadora y T es el periodo básico de la función de ensanchamiento, la forma del espectro viene dada por:

$$(\text{sen}(\pi f T) / (\pi f T))^2 \quad (3)$$

Los niveles de potencia de cresta de las bandas laterales disminuyen en función de f^{-2} , es decir, sólo 6 dB por octava de f . En el caso más desfavorable, el espectro radiado responde a la ecuación (3) en una amplia gama de frecuencias y puede causar interferencias graves a la radioastronomía en frecuencias muy apartadas de la portadora. Sin embargo, en los sistemas que emplean dichas técnicas, generalmente los filtros de frecuencia intermedia del receptor sólo aceptan el máximo central del espectro transmitido, debido a lo cual las bandas laterales adicionales constituyen emisiones no deseadas. Esto no siempre es así en el caso de las señales del SRNS, para las que quizá sea necesario tener en cuenta los efectos de los lóbulos laterales en el proceso de correlación a fin de obtener una precisión suficiente en el emplazamiento de un determinado sistema (véase el Informe UIT-T SM.2091).

La eliminación de las bandas laterales no deseadas de espectro ensanchado próximas a la portadora por medio de filtros en la frecuencia portadora puede no resultar imposible si la portadora de espectro ensanchado está próxima a la banda de radioastronomía. Otra solución para reducir las bandas laterales no deseadas consiste en modificar el proceso de modulación a fin de atenuarlas. Se puede lograr una conformación precisa del espectro mediante técnicas modernas de procesamiento digital (por ejemplo, la modulación por desplazamiento mínimo y filtrado gaussiano) actuando al nivel de la banda de base de las señales de espectro ensanchado.

Para cumplir los niveles umbral de interferencia perjudicial al servicio de radioastronomía, los sistemas que emplean DSS tienen que reducir los niveles de los lóbulos laterales mediante una combinación de filtrado y conformación del espectro. Estas técnicas ya se han utilizado en todos los sistemas del SRNS operativos, aunque en algunos de estos sistemas quizá resulte necesario perfeccionar dichas técnicas en el futuro.

Pueden surgir problemas de interferencia de satélites debido a grandes bandas laterales de espectro ensanchado u otras emisiones no deseadas como resultado de las atribuciones espacio-Tierra del servicio móvil por satélite en las bandas 137-138 MHz, 387-390 MHz y 400,15-401 MHz. Las

bandas de radioastronomía afectadas en este caso son 150,05-153 MHz, 322-328,6 MHz, 406,1-410 MHz y posiblemente 608-614 MHz. Las bandas de radioastronomía afectadas son algunas de las que se utilizan para la observación de las emisiones muy desplazadas hacia el rojo de la raya del hidrógeno neutro, que permiten investigar las regiones más lejanas del universo. Para dichos estudios, las bandas de radioastronomía por debajo de 1 400 MHz ofrecen una posibilidad excepcional y de la máxima importancia científica, y no pueden sustituirse por observaciones en otras bandas de frecuencias.

5.2 Modulación de fase de señales digitales

La transmisión de datos digitales con modulación MDP-2 o MDP-4 produce un espectro de la misma forma senocadrática que el espectro ensanchado DS. En este caso, la variable T de la ecuación (3) representa un periodo de bit si se utiliza MDP-2 y el doble del periodo de bit si se utiliza MDP-4. Para velocidades de datos elevadas, las bandas laterales pueden plantear los mismos problemas que las de espectro ensanchado. Pueden aplicarse las mismas soluciones, es decir, un filtrado o la atenuación de las bandas laterales en el proceso de modulación.

La atribución de la banda 1 452-1 492 MHz a la radiodifusión de audio digital (DAB) constituye un ejemplo de otra forma de modulación digital de banda ancha que podría causar problemas en la radioastronomía. Las bandas laterales de estas transmisiones que queden dentro de la banda de radioastronomía 1 400-1 427 MHz podrían superar el umbral de interferencia para la radioastronomía, de no ser suficientemente atenuadas. Una forma de modulación adoptada, la múltiplex por división en frecuencia ortogonal codificada (MDFOC) está formada por 1 536 portadoras individuales, cada una de ellas modulada en MDP-4 y con un espectro de potencia tal como se describe en la ecuación (3), con $T = 1,25$ ms. Cada uno de ellos es un canal de modulación digital de banda estrecha. Las portadoras guardan una separación de 1 kHz. El espectro de potencia compuesto resultante es plano en una banda de 1,54 MHz y cae abruptamente en aproximadamente 45 dB en el límite de la banda. El nivel de la banda lateral del extremo lejano cae aproximadamente como f^{-2} , donde f es la frecuencia medida desde el centro de la banda compuesta. Puede ser necesario un filtrado adicional para evitar que la defp única de la banda lateral no deseada agregada supere el umbral de interferencia de la radioastronomía. Este filtrado no es en absoluto nocivo para el funcionamiento del sistema MDFOC, diseñado de manera específica para que tolere el filtrado adicional. Si se utiliza alguna forma alternativa de modulación para la DAB en esta banda, podría producirse un problema de interferencia que se habrá de resolver mediante la coordinación entre la DAB terrenal y el servicio de radioastronomía.

6 Emisiones no esenciales y fuera de banda de transmisores terrenales

Las emisiones no esenciales y fuera de banda procedentes de transmisores terrenales son menos problemáticas para la radioastronomía que las de satélites o aeronaves, porque los observatorios de radioastronomía suelen estar situados en sitios apartados que se eligen para aprovechar el apantallamiento del terreno. No obstante, las transmisiones de enlace ascendente de las estaciones en la banda 1 610-1 626,5 MHz, por ejemplo, entrarán en conflicto con la utilización por la radioastronomía de la banda 1 610,6-1 613,8 MHz. Como el servicio de radioastronomía tiene una atribución primaria en la banda 1 610,6-1 613,8 MHz, que está también protegida por los números 5.364 y 5.372 del RR contra las emisiones no deseadas del SMS que funciona en la banda 1 610-1 626,5 MHz, es necesaria la coordinación. En los enlaces ascendentes de algunos sistemas se utilizarán transmisiones de DSSS, y, si no existiera coordinación, sus bandas laterales podrán producir interferencia, aun si el lóbulo central deseado del espectro emitido cae fuera de la banda de radioastronomía.