

RECOMENDACIÓN UIT-R RA.1237

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)

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 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 examina en el Anexo 1;
- e) que se han creado y se utilizan con éxito medios técnicos para filtrar las bandas laterales no deseadas;
- f) 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;
- g) que las definiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) no establecen una distinción clara o adecuada entre las componentes fuera de banda y no esenciales de las emisiones no deseadas;
- 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 diferencia entre la interferencia debida a una emisión no esencial y la debida a una emisión fuera de banda,

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;
- 2 que al establecer los límites de las emisiones no deseadas en las bandas en las que el servicio de radioastronomía tiene una atribución primaria, se observen los niveles umbral de interferencia especificados en la Recomendación UIT-R RA.769.

ANEXO 1

**Interferencia causada a la radioastronomía por emisiones no deseadas
(no esenciales y fuera de banda)****1 Introducción**

La experiencia de más de dos decenios muestra 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, efectos de intermodulación y extensiones de las bandas laterales producidas por las transmisiones digitales que en algunos casos superan en muchos megahercios 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. Los radioastrónomos consideran generalmente estas emisiones no deseadas procedentes de los satélites como la amenaza más seria para el servicio de radioastronomía, especialmente si se considera la actual expansión rápida de la utilización de satélites.

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

La modulación digital, y en especial la modulación de espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS) puede dar lugar a grandes bandas laterales. La definición de estas bandas laterales como emisiones no esenciales o emisiones fuera de banda, como se hace en el Artículo 1, números 138-140 del RR no queda completamente clara. 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, como se explica en el § 5.1.

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 forma de densidad de flujo de potencia (DFP) y densidad de flujo de potencia espectral (DFPE) 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. En el Cuadro 1 se resumen los resultados de la Recomendación UIT-R RA.769.

El Apéndice 8 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. 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. Por otra parte, 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 hacen 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 8 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 DFPE 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 con relación 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 dfpe, en vez de hacerlo como fracción de la emisión principal.

4 Interferencia procedente de satélites

Para los satélites, puede suponerse generalmente que hay un trayecto de transmisión de visibilidad directa, de forma que sólo hay que conocer la distancia al satélite para determinar las pérdidas del trayecto. El Cuadro 1 indica valores de DFP y de DFPE de telescopios radioastronómicos en tierra que, corresponden a los umbrales de interferencia de la Recomendación UIT-R RA.769 para las diversas bandas de radioastronomía. En los casos en que la Recomendación UIT-R RA.769 da valores para observaciones del continuum y de rayas espectrales, el valor del Cuadro 1 es el valor inferior del límite o el más adecuado para la utilización de la banda. Estos valores se basan en la recepción por los lóbulos laterales de 0 dBi de la antena de radioastronomía. Obsérvese que en el caso especial de los satélites geoestacionarios, los límites de interferencia para la radioastronomía son 15 dB inferiores a los valores del Cuadro 1, lo que permite realizar observaciones dentro de 5° de los satélites situados en la órbita geoestacionaria, como se explica en el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R RA.769.

Para un transmisor de un satélite, la distancia más corta a un observatorio se hace igual a la altura del satélite, h (m) sobre la superficie de la Tierra. El límite de p.i.r.e. (dBW) es igual a la DFP de la columna 2 del Cuadro 1, más el factor siguiente que tiene en cuenta las pérdidas por dispersión:

$$20 \log h + 11,0 \quad \text{dB} \quad (1)$$

De forma similar, el límite de p.i.r.e. (dB(W/Hz)) es igual a la suma de la DFPE de la columna 3 del Cuadro 1 más la expresión (1). Para un satélite en órbita aproximadamente circular, la expresión (1) puede también especificarse en términos del periodo orbital, t (s), y es igual a:

$$20 \log (2,161 \times 10^4 t^{2/3} - 6,378 \times 10^6) + 11,0 \quad \text{dB} \quad (2)$$

El cuadro 2 indica los valores del factor de pérdidas por dispersión dado por las expresiones (1) y (2) para diversos valores de h y t .

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 expresión (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.

Se han producido casos muy graves de interferencia por bandas laterales de espectro ensanchado de los satélites de radionavegación del sistema mundial de navegación por satélite (GLONASS) que funcionan en la banda 1 597-1 617 MHz e irradian un espectro representado muy aproximadamente por la expresión (3). Los satélites cuya emisión deseada cae bastante fuera de la banda 1 610,6-1 613,8 MHz causan intensas interferencias a la radioastronomía en dicha banda. También se han observado interferencias importantes de los satélites GLONASS en bandas de radioastronomía tan alejadas como la de 1 660-1 670 MHz. En el caso de las señales GLONASS, el espectro también muestra picos de frecuencia (es decir, componentes de banda estrecha) en los mínimos entre los lóbulos del diagrama de radiación. Ello se debe al funcionamiento no ideal del modulador, y puede ser especialmente perjudicial para las mediciones de radioastronomía de rayas espectrales estrechas. El sistema mundial de determinación de posición (GPS) que es algo similar utiliza satélites con transmisiones de espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS) centradas en 1 575,42 MHz. La segunda generación de satélites (GPS) causa mucha menos interferencia a la radioastronomía, a pesar de utilizar funciones de ensanchamiento con frecuencias discretas que son aproximadamente dos veces las de los satélites GLONASS. El motivo no es solamente la mayor separación de frecuencia respecto a las bandas de

radioastronomía, sino un mejor filtrado de las bandas laterales apartadas y la ausencia de picos de frecuencia de banda estrecha en el espectro. De las conversaciones entre la administración de GLONASS y el Comité Interuniones para la atribución de frecuencias a la radioastronomía y a la ciencia espacial (IUCAF) han surgido planes para eliminar la interferencia causada por GLONASS a la radioastronomía alejando las frecuencias necesarias respecto de la banda de radioastronomía, combinado con filtrados adicionales en los satélites, y ya se han dado los primeros pasos para mejorar la situación. No obstante, el problema de GLONASS constituye una clara advertencia del peligro que entrañan para la radioastronomía las emisiones no filtradas de espectro ensanchado DSSS de los satélites.

CUADRO 1

**Niveles umbral de interferencia a las observaciones de la radioastronomía
en las bandas en que ésta tiene una atribución primaria**

Banda de radioastronomía	DFP (dB(W/m ²))	DFPE (dB(W/(m ² · Hz)))
13,36-13,41 MHz	-201	-248
25,55-25,67 MHz	-199	-249
73,0-74,6 MHz	-196	-258
150,05-153,0 MHz	-194	-259
322,0-328,6 MHz	-204	-258
406,1-410,0 MHz	-189	-255
608-614 MHz	-185	-253
1 400-1 427 MHz	-196	-255
1 610,6-1 613,8 MHz	-194	-238
1 660-1 670 MHz	-194	-251
2 690-2 700 MHz	-177	-247
4 990-5 000 MHz	-171	-241
10,6-10,7 GHz	-160	-240
15,35-15,4 GHz	-156	-233
22,21-22,5 GHz	-162	-233
23,6-24,0 GHz	-161	-233
31,3-31,8 GHz	-141	-228
42,5-43,5 GHz	-153	-227
86-92 GHz	-144	-222
105-116 GHz	-141	-222
164-168 GHz	-136	-216
182-185 GHz	-135	-216
217-231 GHz	-133	-215
265-275 GHz	-131	-213

CUADRO 2

Pérdidas de propagación espacio-Tierra

Altura del satélite, h (km)	Periodo orbital ⁽¹⁾ , t		Pérdidas por dispersión (dB)
	(s)	(h)	
250	5 371	1,49	119
500	5 678	1,58	125
750	5 990	1,66	128
1 000	6 308	1,75	131
2 000	7 633	2,12	137
5 000	12 081	3,36	145
10 000	20 865	5,80	151
20 000	42 646	11,8	157
35 800 ⁽²⁾	86 164	23,93	162

(1) De satélites en órbita circular.

(2) Satélite geostacionario (periodo igual a un día sideral). Obsérvese que para este caso la DFP o la DFPE admisibles han de reducirse en 15 dB para que puedan realizarse observaciones del servicio de radioastronomía dentro de 5° del satélite situado en la órbita geostacionaria (véase el § 2.1 del Anexo 1 a la Recomendación UIT-R RA.769).

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 ser posible 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.

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. Se prevé que en muchos de estos casos las transmisiones serán de DSSS. 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. El nuevo radiotelescopio gigante en ondas métricas de la India es un ejemplo de una instalación importante especialmente concebida para la investigación científica en esa esfera, y su capacidad se vería gravemente disminuida si se perdiesen las bandas mencionadas.

5.2 Modulación de fase de señales digitales

La transmisión de datos digitales con modulación MDP bifase (MDP-2) o MDP en cuadratura (MDP-4) produce un espectro de la misma forma senocadrática que el espectro ensanchado DS. En este caso, la variable T de la expresión (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 por la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones para examinar la atribución de frecuencias en ciertas partes del espectro (Málaga-Torremolinos, 1992) (CAMR-92) de la banda 1 452-1 492 MHz a la radiodifusión de sonido digital (DAB) constituye un ejemplo de otra forma de modulación digital de banda ancha que podría causar problemas en la radioastronomía. Utilizan esta banda tanto las transmisiones terrenales como las transmisiones por satélite. 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 multiplexión por división de frecuencia ortogonal codificada (COFDM) está formada por 1 536 portadoras individuales, cada una de ellas modulada por desplazamiento de fase en

cuadratura descentrada (MDP-4) y con un espectro de potencia tal como se describe en la expresión (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 dfpe 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 COFDM, diseñado de manera específica para que tolere el filtrado adicional. Si se utiliza alguna forma alternativa de modulación para la DAB en esta banda, las interferencias provocarían un grave problema.

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, a medida que se desarrollan los servicios móviles por satélite se prevé que las transmisiones de enlace ascendente de las estaciones en la banda 1 610-1 626,5 MHz entrarán en conflicto con la utilización por la radioastronomía de la banda 1 610,6-1 613,8 MHz. Como ambos servicios tienen atribuciones primarias en la banda 1 610,6-1 613,8 MHz, será 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.
