

RECOMENDACIÓN UIT-R RA.769-2

Criterios de protección para las mediciones radioastronómicas

(Cuestión UIT-R 145/7)

(1992-1995-2003)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que muchos de los adelantos astronómicos más fundamentales realizados en los últimos cinco decenios (por ejemplo, el descubrimiento de radiogalaxias, cuásares y púlsares, la medición directa de hidrógeno neutro, la medición directa de distancias de ciertas galaxias externas y el establecimiento de un marco de referencia de posición con una exactitud de hasta $\sim 20 \mu\text{s}$ de arco) han sido logrados a través de la radioastronomía, y que se prevé que las observaciones radioastronómicas continuarán haciendo contribuciones fundamentales a nuestro conocimiento del Universo, ya que proporcionan la única manera de investigar algunos fenómenos cósmicos;
- b) que el desarrollo de la radioastronomía ha originado también importantes adelantos tecnológicos, en particular en las técnicas de recepción y de imágenes, ha mejorado el conocimiento de las limitaciones fundamentales del ruido radioeléctrico, de gran importancia para la radio-comunicación, y que promete otros resultados importantes;
- c) que los radioastrónomos han efectuado observaciones astronómicas útiles desde la superficie de la Tierra en todas las ventanas atmosféricas disponibles desde 2 MHz hasta 1 000 GHz, y superiores;
- d) que la técnica de la radioastronomía espacial, que utiliza radiotelescopios en plataformas espaciales, proporciona acceso a todo el espectro radioeléctrico por encima de 10 kHz, incluidas las partes del espectro no accesibles desde la Tierra debido a la absorción atmosférica;
- e) que para el progreso de la radioastronomía y las mediciones asociadas es esencial la protección contra la interferencia;
- f) que las observaciones radioastronómicas son efectuadas principalmente con antenas o conjuntos de antenas de alta ganancia, para proporcionar la más alta resolución angular posible, y en consecuencia, la interferencia de haz principal no tiene que ser considerada en la mayoría de las situaciones, salvo cuando existe la posibilidad de daño al receptor;
- g) que la mayor parte de la interferencia que produce degradación de los datos astronómicos se recibe a través de los lóbulos laterales lejanos del telescopio;
- h) que la sensibilidad del equipo de recepción en radioastronomía, no cesa de aumentar regularmente, en particular en longitudes de ondas milimétricas, y que es muy superior a la de los equipos de telecomunicación y de radar;
- j) que las observaciones radioastronómicas típicas requieren tiempos de integración del orden de unos minutos a horas, pero que las observaciones sensibles, particularmente de rayas espectrales, pueden requerir periodos de registro más largos, algunas veces de hasta varios días;

- k) que algunas transmisiones desde vehículos espaciales pueden provocar problemas de interferencia a la radioastronomía, que no pueden ser evitados con la elección del emplazamiento del observatorio, ni mediante protección local;
- l) que las transmisiones terrenales reflejadas en la Luna, en aeronaves y, eventualmente, en satélites artificiales pueden causar interferencias perjudiciales a la radioastronomía;
- m) que ciertos tipos de observaciones interferométricas de alta resolución espacial exigen la recepción simultánea, en la misma frecuencia radioeléctrica, por sistemas receptores muy separados, que pueden estar situados en países o en continentes distintos, o en plataformas espaciales;
- n) que las condiciones de propagación en frecuencias por debajo de unos 40 MHz son tales que un transmisor que funciona en cualquier parte de la Tierra pudiera causar interferencia en perjuicio de la radioastronomía;
- o) que la asignación de frecuencia apropiada, en el plano nacional más bien que internacional, permite lograr cierto grado de protección;
- p) que las CMR han mejorado las atribuciones de frecuencias a la radioastronomía, en particular por encima de 71 GHz, pero que para la protección en otras bandas, especialmente en las compartidas con otros servicios radioeléctricos, se puede necesitar aún una planificación cuidadosa;
- q) que se han desarrollado los criterios técnicos respecto a la interferencia perjudicial para el servicio de radioastronomía (SRA), los cuales se indican en los Cuadros 1, 2 y 3,

recomienda

- 1** que se inste a los radioastrónomos a elegir ubicaciones lo más exentas posible de interferencias;
- 2** que las administraciones se encarguen de asegurar la máxima protección posible a las frecuencias y sitios utilizados por los radioastrónomos en sus propios países y en los países vecinos y que al planificar sistemas globales, tengan muy en cuenta los niveles de interferencia perjudicial indicados en el Anexo 1;
- 3** que las administraciones, al encargarse de asegurar la protección de ciertas observaciones radioastronómicas, tomen todo género de medidas para reducir la amplitud de las radiaciones armónicas y de otras emisiones no esenciales que caigan en las bandas de frecuencias que han de protegerse para la radioastronomía al mínimo absoluto. Particularmente de las emisiones provenientes de aeronaves, estaciones situadas en plataformas a gran altitud, vehículos espaciales y globos;
- 4** que al proponer atribuciones de frecuencias, las administraciones tengan en cuenta que para el SRA compartir frecuencias con otros servicios es muy difícil cuando los transmisores y los observatorios mantienen visibilidad directa. Por encima de 40 MHz, es posible la compartición de frecuencias con otros servicios cuando no hay visibilidad directa entre los transmisores y los observatorios, pero puede ser necesaria la coordinación, especialmente si los transmisores son de gran potencia.

Anexo 1

Sensibilidad de los sistemas de radioastronomía

1 Consideraciones generales e hipótesis necesarias para el cálculo de niveles de interferencia

1.1 Criterio de interferencia de nivel perjudicial

La sensibilidad de una observación en radioastronomía se puede definir como la variación mínima del nivel de potencia ΔP en el nivel de potencia P , a la entrada del radiómetro, que puede ser detectada y medida. La ecuación de la sensibilidad es:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{\Delta f_0 t}} \quad (1)$$

donde:

P y ΔP : densidad de potencia espectral del ruido

Δf_0 : anchura de banda

t : tiempo de integración. P y ΔP en la ecuación (1) pueden ser expresados en unidades de temperatura mediante la constante de Boltzmann, k :

$$\Delta P = k \Delta T; \quad \text{asimismo} \quad P = k T \quad (2)$$

Así, es posible expresar la ecuación de sensibilidad del modo siguiente:

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f_0 t}} \quad (3)$$

donde:

$$T = T_A + T_R$$

Este resultado se aplica para una polarización del radiotelescopio. T es la suma de T_A (contribución del fondo cósmico, la atmósfera terrestre y la radiación terrestre en la temperatura de ruido de la antena) y T_R (temperatura de ruido del receptor). Las ecuaciones (1) o (3) se pueden utilizar para estimar los niveles de sensibilidad y de interferencia perjudicial para observaciones radioastronómicas. Los resultados se enumeran en los Cuadros 1 y 2. Se ha supuesto un tiempo de observación (o de integración), t , de 2000 s, y los niveles de interferencia perjudicial, ΔP_H , de los Cuadros 1 y 2 se expresan como la potencia de interferencia dentro de la anchura de banda, Δf , que introduce un error del 10% en la medición de ΔP (o ΔT), es decir:

$$\Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f \quad (4)$$

En resumen, cada una de las columnas de los Cuadros 1 y 2 puede calcularse utilizando los métodos siguientes:

- ΔT , mediante la ecuación (3),
- ΔP , mediante la ecuación (2),
- ΔP_H , mediante la ecuación (4).

La interferencia perjudicial puede expresarse también por la dfp que llega a la antena en el ancho de banda total, o como una dfp espectral S_H por 1 Hz. Se dan los valores para una antena cuya ganancia, en la dirección de llegada de la interferencia es igual a la de una antena isotrópica (antena cuya superficie efectiva es de $c^2/4\pi f^2$, siendo c la velocidad de la luz y f la frecuencia). La ganancia de un radiador isótropo, 0 dBi, se usa como un valor representativo general para el nivel de lóbulo lateral, como se indica en el § 1.3.

Los valores de $S_H \Delta f$ (dB(W/m²)) se obtienen agregando a ΔP_H la cantidad:

$$20 \log f - 158,5 \quad \text{dB} \quad (5)$$

donde f (Hz). Para obtener S_H , basta con restar la cantidad de $10 \log \Delta f$ (Hz), a fin de tener en cuenta la anchura de banda.

1.2 Tiempo de integración

Las sensibilidades y los niveles de interferencia perjudicial calculados que figuran en los Cuadros 1 y 2 se basan en tiempos de integración de 2000 s. Los tiempos de integración realmente utilizados en observaciones astronómicas abarcan una amplia gama de valores. Las observaciones del continuum hechas con telescopios de una sola antena (por oposición a los sistemas interferométricos) están bien representadas por el tiempo de integración de 2000 s, típico de observaciones de buena calidad. Por otra parte, el tiempo de 2000 s es menos representativo de las observaciones de rayas espectrales. Las mejoras en la estabilidad de los receptores y el mayor empleo de espectrómetros de correlación han permitido una utilización más frecuente de tiempos de integración más largos requeridos para observar rayas espectrales débiles y son comunes las observaciones de rayas espectrales que duran varias horas. Un tiempo de integración más representativo para estas observaciones sería de 10 h. Para una integración de 10 h, el nivel de interferencia umbral es 6 dB más estricto que los valores indicados en el Cuadro 2. Hay también algunas observaciones de fenómenos de variación temporal, por ejemplo, las observaciones de púlsares, ráfagas estelares o solares y centelleos interplanetarios, para los cuales pueden ser adecuados periodos de tiempo mucho más cortos.

1.3 Diagrama de respuesta de la antena

La interferencia a la radioastronomía se recibe casi siempre a través de los lóbulos laterales de la antena, de modo que no hay que considerar la respuesta del haz principal a la interferencia.

El modelo de lóbulo lateral para grandes antenas paraboloideas en la gama de frecuencias de 2 a 30 GHz, contenido en la Recomendación UIT-R SA.509 es una buena aproximación de la respuesta de muchas antenas de radioastronomía y se adopta en esta Recomendación como la antena de referencia de radioastronomía. En este modelo, el nivel del lóbulo lateral disminuye en función de la distancia angular (grados) desde el eje del haz principal y es igual a $32 - 25 \log \phi$ (dBi) para $1^\circ < \phi < 48^\circ$. El efecto de una señal interferente depende claramente del ángulo de incidencia con respecto al eje del haz principal de la antena, pues la ganancia de lóbulo lateral, representada por el modelo, varía de 32 a -10 dBi en función de ese ángulo. Sin embargo, es útil calcular los niveles de umbral de la intensidad de interferencia para un valor particular de ganancia de lóbulo lateral, que hemos elegido como 0 dBi y utilizado en los Cuadros 1 a 3. Según el modelo, este nivel de lóbulo lateral ocurre en un ángulo de $19,05^\circ$ con respecto al eje del haz principal. Entonces una señal en el nivel de umbral perjudicial definido para una ganancia de lóbulo lateral de 0 dBi rebasará el criterio para el nivel perjudicial a la entrada del receptor si es incidente en la antena en un ángulo inferior a $19,05^\circ$. El ángulo sólido con un cono de radio angular $19,05^\circ$ es 0,344 sr, que equivale a 5,5% del

2π sr del cielo por encima del horizonte que un radiotelescopio es capaz de observar en cualquier momento dado. De este modo, si la probabilidad del ángulo de incidencia de interferencia se distribuye uniformemente en el cielo, aproximadamente el 5,5% de las señales interferentes serían incidentes dentro de $19,05^\circ$ del eje del haz principal de una antena apuntada hacia el cielo. Obsérvese también que el valor 5,5% concuerda con los niveles recomendados de pérdida de datos de observaciones radioastronómicas en porcentajes de tiempo, especificados en la Recomendación UIT-R RA.1513.

El caso particular de satélites en la órbita no OSG presenta una situación dinámica, es decir, la posición de los satélites con respecto al haz de la antena de radioastronomía muestra grandes cambios dentro de la escala del tiempo de integración de 2000 s. En este caso, el análisis de interferencia requiere integrar la respuesta por encima de los niveles de lóbulo lateral que varían, utilizando, por ejemplo, el concepto de dfp equivalente (dfpe) definido en el número 22.5C del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR). Además, suele ser necesario combinar las respuestas a un número de satélites dentro de un sistema particular. En estos cálculos, se sugiere utilizar el diagrama de respuesta de antena para antenas de diámetro mayor a 100λ de la Recomendación UIT-R S.1428 para representar la antena de radioastronomía, hasta que se disponga de un modelo basado específicamente en antenas de radioastronomía. Para un mayor análisis, véase el § 2.2.

1.4 Anchura de banda

La ecuación (1) muestra que se obtienen observaciones de máxima sensibilidad cuando los radioastrónomos utilizan la mayor anchura de banda posible. En consecuencia, en el Cuadro 1 (observaciones del continuum), Δf se supone que sea la anchura de las bandas de radioastronomía atribuidas para frecuencias hasta 71 GHz. Por encima de 71 GHz se utiliza un valor de 8 GHz, que es una anchura de banda representativa utilizada generalmente entre los receptores de radioastronomía en esta gama. En el Cuadro 2 (observaciones de rayas espectrales) se usa una anchura de banda de canal Δf igual al desplazamiento Doppler correspondiente a 3 km/s de velocidad para entradas por debajo de 71 GHz. Este valor representa un compromiso entre la alta resolución espectral deseada y la sensibilidad. Hay un número muy grande de rayas importantes desde el punto de vista astrofísico por encima de 71 GHz, como se muestra en la Recomendación UIT RA.314, y sólo se dan algunos valores representativos para los niveles perjudiciales en el Cuadro 2 para la gama 71-275 GHz. La anchura de banda de canal utilizado para calcular los niveles perjudiciales por encima de 71 GHz es 1 000 kHz (1 MHz) en todos los casos. Este valor se ha elegido por motivos prácticos. Aunque es ligeramente mayor que la anchura de canal espectral habitual en los receptores de radioastronomía en estas frecuencias, se usa como la anchura de banda de referencia normalizado para servicios espaciales por encima de 15 GHz.

1.5 Temperatura de ruido del receptor y temperatura de la antena

Las temperaturas de ruido del receptor de los Cuadros 1 y 2 son representativas de los sistemas utilizados en radioastronomía. Para frecuencias por encima de 1 GHz éstos son amplificadores o mezcladores enfriados criogénicamente. El efecto del cuánto impone un límite más bajo teórico de hf/k a la temperatura de ruido de estos dispositivos, donde h y k son las constantes de Planck y de Boltzmann, respectivamente. Este límite es importante en frecuencias por encima de 100 GHz, donde equivale a 4,8 K. En la práctica, los mezcladores y amplificadores para bandas en 100 GHz y frecuencias más altas proporcionan temperaturas de ruido mayores que hf/k por un factor de cuatro aproximadamente. De este modo, para frecuencias por encima de 100 GHz, en los Cuadros 1 y 2 se utilizan temperaturas de ruido iguales a $4hf/k$.

Las temperaturas de antena en los Cuadros son también representativas de sistemas utilizados en la práctica radioastronómica. Incluyen los efectos de la ionosfera o atmósfera neutra, la captura en el suelo de lóbulos laterales resultantes de dispersión, pérdidas óhmicas y el fondo de microondas cósmico. En frecuencias por encima de 100 GHz, las atenuaciones atmosféricas debidas al vapor de agua en la atmósfera neutra adquieren gran importancia. Para estas frecuencias, los valores indicados son típicos de ubicaciones terrenales utilizadas para importantes instalaciones de radioastronomía de ondas milimétricas, tales como Mauna Kea, Hawai, o el Llano de Chajnantor en una elevación de 5000 m en Chile, que es el sitio elegido para un gran proyecto de sistemas de radioastronomía internacional para frecuencias en la gama 30 GHz a 1 THz.

2 Casos especiales

Los niveles indicados en los Cuadros 1 y 2 son aplicables a fuentes terrenales de señales interferentes. La dfp perjudicial y la dfp espectral mostrada en los Cuadros 1 y 2 suponen que la interferencia se recibe a través de un lóbulo lateral de 0 dBi, y debe ser considerada como el criterio de interferencia general para las observaciones radioastronómicas de alta sensibilidad, cuando la interferencia no entra en los lóbulos laterales cercanos.

2.1 Interferencia procedente de satélites en la OSG

La interferencia causada por satélites OSG es un caso de particular importancia. Como los niveles de potencia de los Cuadros 1 y 2 se calcularon basados en una ganancia de antena de 0 dBi se tropezará con interferencia perjudicial cuando una antena de referencia, como la descrita en la Recomendación UIT-R SA.509 esté apuntada dentro de los $19,05^\circ$ de un satélite transmitiendo en niveles correspondientes a los consignados en los Cuadros. Una serie de estos transmisores situados en torno a la OSG impediría observaciones de radioastronomía de elevada sensibilidad desde una banda celeste de $38,1^\circ$ de anchura y centrada en la órbita. La pérdida de una superficie celeste tan grande impondría severas restricciones a las observaciones de radioastronomía.

En general, no sería posible reducir las emisiones no deseadas procedentes de satélites hasta niveles inferiores al nivel perjudicial cuando el haz principal del radiotelescopio está apuntado directamente hacia el satélite. Se sugiere una solución viable observando la proyección de la OSG en las coordenadas celestes, vista desde las latitudes de una serie de observaciones radioastronómicas importantes (véase la Recomendación UIT-R RA.517). Si fuera posible apuntar un radiotelescopio dentro de los 5° de la OSG sin tropezar con interferencia perjudicial, para ese telescopio no se podría disponer de una banda celeste de 10° de anchura para observaciones de alta sensibilidad. Para un observatorio aislado ésta sería una gran pérdida. Sin embargo, para una combinación de radiotelescopios situados en latitudes septentrionales y meridionales, que funcionen a las mismas frecuencias, sería accesible todo el firmamento. Por tanto, debe considerarse que un valor de 5° es el requisito de separación angular mínima entre el haz principal de una antena de radioastronomía y la OSG.

En el modelo de respuesta de antena de la Recomendación UIT-R SA.509, el nivel de lóbulos laterales para un ángulo de 5° con respecto al haz principal es de 15 dBi. Por tanto, para evitar interferencia perjudicial a un radiotelescopio que cumple las características de lóbulo lateral de antena de la Recomendación UIT-R SA.509, apuntado dentro de los 5° del transmisor, es conveniente reducir las emisiones de satélite 15 dB por debajo de las dfp indicadas en los Cuadros 1 y 2. Cuando los satélites están separados sólo unos pocos grados en la OSG, los niveles de emisión procedentes de cada transmisor deben ser más pequeños todavía, para cumplir el requisito de que la suma de las potencias de todas las señales interferentes recibidas esté 15 dB por debajo de ΔP_H en los Cuadros 1 y 2.

Se reconoce que, en la práctica, no pueden obtenerse las limitaciones de las emisiones antes citadas, a fin de permitir la compartición de la misma banda de frecuencias entre la radioastronomía y las transmisiones de enlace descendente procedentes de satélites. Las limitaciones son, sin embargo, aplicables a emisiones no deseadas desde los transmisores de satélite que caen dentro de las bandas de radioastronomía enumeradas en los Cuadros 1 y 2. Estas limitaciones de las emisiones tienen repercusiones para los servicios espaciales responsables de la interferencia, que requiere una evaluación cuidadosa. Además, en el diseño de nuevas antenas de radioastronomía debe procurarse reducir al mínimo el nivel de ganancia de los lóbulos laterales próximos al haz principal, como medio importante de reducir la interferencia causada por transmisores situados en OSG.

2.2 Interferencia procedente de satélites no OSG

En el caso de satélites no OSG, y en particular para satélites en órbita terrestre baja, los sistemas suelen comprender constelaciones de muchos satélites individuales. Por tanto, la determinación de los niveles de interferencia requiere el análisis del efecto combinado de muchas señales, la mayoría de las cuales se reciben a través de los lóbulos laterales lejanos de la antena de radioastronomía. Por tanto, es conveniente un modelo de lóbulo lateral más detallado que el de la Recomendación UIT-R SA.509, y se propone que se utilice el modelo de la Recomendación UIT-R S.1428 hasta que se obtenga un modelo más representativo para las antenas de radioastronomía. El uso de este modelo propuesto para antenas con diámetro mayor que 100λ es generalmente apropiado para aplicaciones de radioastronomía. Se ha de señalar que no se puede aplicar la Nota 1 de la Recomendación UIT-R S.1428, que permite pasar por alto los componentes de polarización cruzada, porque las antenas de radioastronomía generalmente reciben señales en dos polarizaciones ortogonales simultáneamente. El movimiento de los satélites no OSG a través del cielo durante un periodo de integración de 2000 s requiere que el nivel de interferencia sea promediado en este periodo, es decir, la respuesta a cada satélite debe ser integrada según el satélite se mueve a través del diagrama de lóbulo lateral. Un sistema de análisis que incluye estos requisitos es el método de $dfpe$ descrito en el número 22.5C del RR. Los valores de $dfpe$ representan la dfp de una señal que entra a la antena a través del centro del haz principal que produciría un nivel equivalente de potencia de interferencia. Como los niveles umbral de interferencia perjudicial en los Cuadros 1 y 2 siguientes corresponden a la dfp recibida con una ganancia de antena de 0 dBi, es necesario compararlos con valores de $(dfpe + G_{mb})$, donde G_{mb} es la ganancia del haz principal, para determinar si la interferencia rebasa el nivel perjudicial. Recientemente se ha elaborado la Recomendación UIT-R S.1586, utilizando el método $dfpe$, para los cálculos de interferencia entre los telescopios de radioastronomía y los sistemas de satélite no OSG del SFS. Se elaboró también una Recomendación similar, la Recomendación UIT-R M.1583, para los cálculos de interferencia entre los telescopios de radioastronomía y los sistemas de satélites no OSG del SMS y del servicio de radionavegación por satélite. La aplicabilidad de los criterios de protección indicados en los Cuadros 1 y 2 se describe en la Recomendación UIT-R RA.1513.

2.3 Respuesta de los interferómetros y de los sistemas de antenas a la interferencia radioeléctrica

Hay dos efectos que reducen la respuesta a la interferencia y que están relacionados con la frecuencia de las franjas de interferencia que se observan cuando se combinan las salidas de las dos antenas y con el hecho de que las componentes de la señal interferente recibida por antenas distintas y muy separadas experimentarán retardos temporales relativos distintos antes de recombinarse. El tratamiento de estos efectos es más complicado que en el caso de las antenas sencillas del § 1. En términos generales, si la intensidad de la señal interferente recibida permanece constante, el efecto

es que se reduce por un factor aproximadamente igual al tiempo medio de un periodo de oscilación de la franja de interferencia dividido por el tiempo de promediación de los datos. Esto va típicamente desde algunos segundos para una formación de antenas compacta con separación proyectada máxima $L' \sim 10^3 \lambda$, siendo λ la longitud de onda, hasta menos de 1 ms para las formaciones intercontinentales con $L' \sim 10^7 \lambda$. Así pues, en comparación con un solo radiotelescopio, el interferómetro tiene un grado de inmunidad a la interferencia que, en condiciones de hipótesis razonables, aumenta con el tamaño del sistema de antenas expresado en longitudes de onda.

La inmunidad máxima a la interferencia se produce para los interferómetros y las formaciones de antenas en las que la separación de éstas es suficientemente grande, de forma que la probabilidad de aparición de interferencia correlacionada es muy pequeña (por ejemplo, para la interferometría de línea de base muy larga (VLBI)). En este caso, las consideraciones anteriores no son aplicables. El nivel de interferencia tolerable viene determinado por el requisito de que el nivel de potencia de la señal interferente no debe ser mayor del 1% de la potencia de ruido recibida, a fin de evitar errores graves en las mediciones de la amplitud de las señales cósmicas. En el Cuadro 3 figuran los niveles de interferencia perjudicial para las observaciones VLBI típicas, basados en los valores de T_A y T_R indicados en el Cuadro 1.

Hay que hacer hincapié en que la utilización de interferómetros y sistemas de antenas grandes se limita generalmente a los estudios de fuentes discretas de gran brillo, con dimensiones angulares no superiores a algunas décimas de segundo de arco para la VLBI. En el caso de estudios más generales de fuentes radioeléctricas, se aplican los resultados de los Cuadros 1 y 2 que son adecuados para la protección general de la radioastronomía.

CUADRO 1

Niveles umbrales de interferencia perjudicial para las observaciones radioastronómicas del continuum

Frecuencia central ⁽¹⁾ f_c (MHz)	Anchura de banda supuesta Δf (MHz)	Temperatura mínima de ruido de la antena T_A (K)	Temperatura de ruido del receptor T_R (K)	Sensibilidad del sistema ⁽²⁾ (fluctuaciones del ruido)		Niveles umbrales de interferencia ^{(2) (3)}		
				Temperatura ΔT (mK)	Densidad espectral de potencia ΔP (dB(W/Hz))	Potencia a la entrada ΔP_H (dBW)	dfp $S_H \Delta f$ (dB(W/m ²))	dfp espectral S_H (dB(W/(m ² · Hz)))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
13,385	0,05	50 000	60	5 000	-222	-185	-201	-248
25,610	0,12	15 000	60	972	-229	-188	-199	-249
73,8	1,6	750	60	14,3	-247	-195	-196	-258
151,525	2,95	150	60	2,73	-254	-199	-194	-259
325,3	6,6	40	60	0,87	-259	-201	-189	-258
408,05	3,9	25	60	0,96	-259	-203	-189	-255
611	6,0	20	60	0,73	-260	-202	-185	-253
1 413,5	27	12	10	0,095	-269	-205	-180	-255
1 665	10	12	10	0,16	-267	-207	-181	-251
2 695	10	12	10	0,16	-267	-207	-177	-247
4 995	10	12	10	0,16	-267	-207	-171	-241
10 650	100	12	10	0,049	-272	-202	-160	-240
15 375	50	15	15	0,095	-269	-202	-156	-233
22 355	290	35	30	0,085	-269	-195	-146	-231
23 800	400	15	30	0,050	-271	-195	-147	-233
31 550	500	18	65	0,083	-269	-192	-141	-228
43 000	1 000	25	65	0,064	-271	-191	-137	-227
89 000	8 000	12	30	0,011	-278	-189	-129	-228
150 000	8 000	14	30	0,011	-278	-189	-124	-223
224 000	8 000	20	43	0,016	-277	-188	-119	-218
270 000	8 000	25	50	0,019	-276	-187	-117	-216

⁽¹⁾ Los cálculos de los niveles de interferencia se basan en la frecuencia central indicada en esta columna, aunque no todas las regiones tienen las mismas asignaciones.

⁽²⁾ Se ha supuesto un tiempo de integración de 2 000 s; si se utilizan tiempos de integración de 15 min, 1 h, 2 h, 5 h ó 10 h, los valores correspondientes en el Cuadro deben modificarse en +1,7, -1,3, -2,8, -4,8 ó -6,3 dB, respectivamente.

⁽³⁾ Los niveles de interferencia indicados son los que se aplican a las mediciones de la potencia total recibida por una sola antena. Pueden ser adecuados otros niveles menos estrictos para otros tipos de mediciones, como se indica en el § 2.2. En los transmisores situados en la OSG, es conveniente que los niveles se ajusten a -15 dB, como se indica en el § 2.1.

CUADRO 2*

Niveles umbrales de interferencia perjudicial para las observaciones radioastronómicas de rayas espectrales

Frecuencia f (MHz)	Anchura de banda de canal supuesta de la raya espectral Δf (kHz)	Temperatura mínima de ruido de la antena T_A (K)	Temperatura de ruido del receptor T_R (K)	Sensibilidad del sistema ⁽¹⁾ (fluctuaciones del ruido)		Niveles umbrales de interferencia ^{(1) (2)}		
				Temperatura ΔT (mK)	Densidad espectral de potencia ΔP_S (dB(W/Hz))	Potencia a la entrada ΔP_H (dBW)	dfp $S_H \Delta f$ (dB(W/m ²))	dfp espectral S_H (dB(W/(m ² · Hz)))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
327	10	40	60	22,3	-245	-215	-204	-244
1 420	20	12	10	3,48	-253	-220	-196	-239
1 612	20	12	10	3,48	-253	-220	-194	-238
1 665	20	12	10	3,48	-253	-220	-194	-237
4 830	50	12	10	2,20	-255	-218	-183	-230
14 488	150	15	15	1,73	-256	-214	-169	-221
22 200	250	35	30	2,91	-254	-210	-162	-216
23 700	250	35	30	2,91	-254	-210	-161	-215
43 000	500	25	65	2,84	-254	-207	-153	-210
48 000	500	30	65	3,00	-254	-207	-152	-209
88 600	1 000	12	30	0,94	-259	-209	-148	-208
150 000	1 000	14	30	0,98	-259	-209	-144	-204
220 000	1 000	20	43	1,41	-257	-207	-139	-199
265 000	1 000	25	50	1,68	-256	-206	-137	-197

* Este Cuadro no pretende dar una lista completa de las bandas de rayas espectrales, sino ejemplos representativos en todo el espectro.

- (1) Se ha supuesto un tiempo de integración de 2 000 s; si se utilizan tiempos de integración de 15 min, 1 h, 2 h, 5 h o 10 h, los valores correspondientes en el Cuadro deben modificarse en +1,7, -1,3, -2,8, -4,8 ó -6,3 dB, respectivamente.
- (2) Los niveles de interferencia indicados son los que se aplican a las mediciones de la potencia total recibida por una sola antena. Pueden ser adecuados otros niveles menos estrictos para otros tipos de mediciones, como se indica en el § 2.2. En los transmisores situados en la OSG, es conveniente que los niveles se ajusten a -15 dB, como se indica en el § 2.1.

DESCRIPCIÓN DE LAS COLUMNAS DE LOS CUADROS 1 Y 2

Columna

- (1) Frecuencia central de la banda atribuida a la de radioastronomía (Cuadro 1) o frecuencia nominal de la raya espectral (Cuadro 2).
- (2) Anchura de banda supuesta o atribuida (Cuadro 1) o anchura de banda típica supuesta utilizada para las observaciones de las rayas espectrales (Cuadro 2).
- (3) La temperatura mínima de ruido de la antena incluye las contribuciones de la ionosfera, de la atmósfera terrestre y de la radiación procedente de la Tierra.
- (4) Temperatura de ruido del receptor representativa de un buen sistema radiométrico destinado a observaciones radioastronómicas de alta sensibilidad.
- (5) Sensibilidad total del sistema (mK) calculada a partir de la ecuación (1) teniendo en cuenta las temperaturas combinadas de ruido de la antena y del receptor, la anchura de banda indicada y un tiempo de integración de 2 000 s.
- (6) Como en (5), pero expresada en términos de densidad espectral de potencia de ruido a partir de la ecuación $\Delta P = k \Delta T$, donde $k = 1,38 \times 10^{-23}$ (J/K) (constante de Boltzmann). Los valores reales del Cuadro son la expresión logarítmica de ΔP .
- (7) Nivel de potencia a la entrada del receptor que se considera perjudicial para las observaciones de gran sensibilidad, ΔP_H . Se expresa como nivel de interferencia que introduce en la medición de ΔP un error no superior al 10%: $\Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f$. Los valores del Cuadro son la expresión logarítmica de ΔP_H .
- (8) dfp en el canal de la raya espectral necesaria para producir un nivel de potencia ΔP_H en un sistema receptor con una antena receptora isótropa. Los valores del Cuadro son la expresión logarítmica de $S_H \Delta f$.
- (9) dfp espectral necesaria para producir un nivel de potencia ΔP_H en un sistema receptor con una antena receptora isótropa. Los valores del Cuadro son la expresión logarítmica de S_H . Para obtener los correspondientes niveles de potencia en una anchura de banda de referencia de 4 kHz o 1 MHz, añádanse 36 dB o 60 dB, respectivamente.

CUADRO 3

Nivel de interferencia umbral para observaciones VLBI

Frecuencia central (MHz)	Nivel de interferencia umbral (dB(W/(m ² · Hz)))
325,3	-217
611	-212
1 413,5	-211
2 695	-205
4 995	-200
10 650	-193
15 375	-189
23 800	-183
43 000	-175
86 000	-172

