

# MANUAL SOBRE RADIDASTRONOMÍA



E D I C I Ó N D E 2 O 1 3 OFICINA DE RADIOCOMUNICACIONES

# **Manual sobre**

# **Radioastronomía** Tercera Edición

EDICIÓN DE 2013 OFICINA DE RADIOCOMUNICACIONES

Foto de la portada: Seis antenas idénticas de 22 m integran la red de antenas compacta del telescopio de la CSIRO en Australia. Se trata de un telescopio de síntesis de rotación terrestre emplazado en el observatorio Paul Wild.

Autor: David Smyth.

#### © UIT 2015

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

# Introducción a la tercera edición por el Presidente del Grupo de Trabajo 7D del UIT-R (Radioastronomía)

Es para mí un gran honor y un privilegio, así como una gran satisfacción, presentar esta tercera edición del Manual sobre Radioastronomía.

Este Manual no pretende ser un libro de referencia sobre la radioastronomía, pues se concentra especialmente en los aspectos pertinentes a la coordinación de frecuencias, es decir, la gestión del espectro radioeléctrico a fin de reducir al mínimo las interferencias entre servicios de radiocomunicación. La radioastronomía no lleva aparejada la transmisión de ondas radioeléctricas en las bandas de frecuencias atribuidas a su explotación, y no puede, por tanto, causar interferencia perjudicial a otros servicios. Además, las señales cósmicas recibidas suelen ser extremadamente débiles, por lo que la transmisión de otros servicios puede interferir sobre dichas señales.

En los doce capítulos y cinco Apéndices de este Manual, se presenta al lector la radioastronomía como servicio de radiocomunicación a los efectos de la coordinación de frecuencias. Comienza con un preámbulo sobre la radioastronomía y la sociedad, en el que se bosquejan la misión y los beneficios de la radioastronomía para la sociedad, que suelen desbordar el ámbito de la astronomía. A continuación, este Manual trata de temas tales como las características de la radioastronomía, las bandas de frecuencias preferibles para llevar a cabo las observaciones, las aplicaciones especiales de la radioastronomía, su vulnerabilidad a la interferencia en radiofrecuencia (RFI) procedente de otros servicios, y los problemas asociados a la compartición del espectro radioeléctrico con otros servicios. En esta tercera edición del Manual se han incluido capítulos adicionales sobre técnicas para reducir los efectos de la RFI, sobre la creación de zonas de silencio radioeléctrico (RQZ) y sus características, sobre la búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI) y sobre la astronomía por radar desde la superficie terrestre. También se han incorporado nuevos Apéndices que explican la utilización de las unidades y la escala de dB en radioastronomía, y contienen una amplia lista de acrónimos.

Ya han pasado casi diez años desde la publicación de la segunda edición del Manual de Radioastronomía. En este tiempo, la UIT ha celebrado tres Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (la CMR-2003, la CMR-2007 y la CMR-2012), y se ha producido virtualmente una explosión en el desarrollo de los servicios de comunicación, de modo que los servicios inalámbricos ya están presentes en todos los ámbitos de nuestra sociedad multiconectada. Paralelamente, los avances tecnológicos de la radioastronomía han permitido realizar observaciones en bandas de frecuencia muy amplias que, a menudo, no están cubiertas por las atribuciones de la UIT. Estas novedades suponen un reto para la protección de la radioastronomía, por lo que es preciso explorar nuevos métodos de llevarla a cabo. Se están desarrollando continuamente nuevas técnicas para reducir la RFI, y se han definido RQZ para establecer emplazamientos únicos en el planeta donde la radioastronomía pueda desenvolverse con una interferencia mínima. Estos avances se han abordado en el seno de la UIT con nuevos y amplios Informes UIT-R.

La radioastronomía también opera ahora en bandas por encima de 275 GHz en el observatorio ALMA de América del Sur que comenzó sus operaciones en 2013. Estas bandas no están cubiertas por las atribuciones oficiales de la UIT, aunque la CMR-2012 aclaró la utilización de dichas bandas por los servicios pasivos sin excluir la posibilidad del desarrollo de servicios activos. Ciertos estudios han puesto de manifiesto que la compartición entre servicios sería relativamente fácil a estas frecuencias tan elevadas.

Inmediatamente antes de la CMR-2012, el Grupo de Trabajo 7D del UIT-R (GT 7D) comenzó a revisar el Manual, prosiguiendo esta labor durante dos años. El GT 7D es la sección de la Comisión de Estudio 7 (Servicios científicos) del UIT-R encargado de la radioastronomía, la SETI y la astronomía por radar. Además de llevar a cabo la necesaria revisión y ampliación del Manual, el GT 7D tuvo que repasar las Recomendaciones e Informes UIT-R pertinentes para la protección del servicio de radioastronomía. La tercera edición del Manual incorpora finalmente los resultados de la labor llevada a cabo por los miembros del Grupo de Trabajo.

Quisiera agradecer sus decididos esfuerzos a ese pequeño grupo de personas sin cuya participación el Manual no habría visto la luz. En particular, deseo manifestar mi agradecimiento a los siguientes miembros del GT 7D (por orden alfabético):

- Dr. W. Baan (Países Bajos), Dr. S. H. Chung (Corea), Dr. A. Clegg (Estados Unidos),
- Dr. M. Davis (Estados Unidos), Dr. T. Gergely (Estados Unidos), Dr. A. Jessner (Alemania),
- Dr. G. Langston (Estados Unidos), Dr. B. Lewis (Estados Unidos), Dr. H. Liszt (Estados Unidos),
- Dr. M. Ohishi (Japón), Dr. P. Thomasson (Reino Unido), Dr. W. van Driel (Francia).

Colaboraron también el Dr. J. Romney de EE.UU., que volvió a redactar amplias secciones sobre interferometría en línea de base muy larga (VLBI), el Dr. J. Lovell de Australia por la sección sobre la VLBI geodésica, y el Dr. K. Tapping (Canadá) por la revisión de las secciones sobre astronomía solar. La Secretaría del UIT-R ofreció una ayuda considerable, especialmente el Consejero de la Comisión de Estudio 7, Sr. Vadim Nozdrin, y la Secretaría encabezada por la Sra. Elizabeth Mostyn-Jones. Por último quisiera manifestar mi agradecimiento más sincero al Presidente de la Comisión de Estudio 7, Dr. Vincent Meens, y el Vicepresidente encargado de los Manuales, Dr. John Zuzek, por su continuo aliento y apoyo a lo largo de la ejecución de estos trabajos.

Reitero mi agradecimiento a todos los participantes y hago votos por el éxito de este Manual del UIT-R sobre radioastronomía.

Anastasios Tzioumis

Presidente del Grupo de Trabajo 7D del UIT-R

## PREFACIO

Este Manual sobre Radioastronomía ha sido preparado por expertos del Grupo de Trabajo 7D de la Comisión de Estudio 7 (Servicios científicos) del UIT-R, dirigidos por el Dr. A. Tzioumis (Australia), Presidente del Grupo de Trabajo 7D.

La radioastronomía desempeña un papel fundamental en el estudio de los problemas de la física fundamental y la cosmología. Muchos de los fenómenos considerados no pueden estudiarse en otras partes del espectro electromagnético, por ejemplo, la raya de emisión del hidrógeno atómico neutro; la radiación cósmica del fondo de microondas y su estructura angular, de enorme importancia en cosmología; las inmensas regiones de radiación de sincrotrón asociadas a las galaxias radioeléctricas; y las regiones de formación de estrellas ocultas por el polvo en las frecuencias ópticas. En las frecuencias radioeléctricas se puede lograr la mayor resolución angular y efectuar las mediciones más exactas de la posición angular y de las rayas espectrales, así como de sus desplazamientos Doppler. Por este motivo, la radioastronomía, lejos de ser un mero aditamento de los métodos ópticos tradicionales, desempeña un papel clave en la investigación de muchos campos de la astronomía y la astrofísica.

Aparte de eso, la radioastronomía, como cualquier ciencia fundamental, estimula el desarrollo de otras ramas. A la radioastronomía se debe el desarrollo de receptores de bajo ruido y de antenas que permiten utilizar un único elemento para capturar señales con polaridades diferentes. Los métodos desarrollados en la radioastronomía para combatir el eco radioeléctrico se utilizan actualmente con éxito en los sistemas de comunicaciones móviles de tipo Wi-Fi. Las bases teóricas de la radionavegación que se utilizan hoy en día en toda una serie de sistemas, se elaboraron y confirmaron su validez gracias a la radioastronomía. La necesidad de procesar ingentes cantidades de datos radioastronómicos ha dado lugar a una increíble mejora del procesamiento automatizado de datos y, en particular, al desarrollo de métodos para el procesamiento de datos en paralelo y de nuevos lenguajes de programación. En el campo de la medicina, se han derivado de la radioastronomía el diagnóstico por rayos X y la tomografía computerizada.

Todo lo anterior subraya la importancia del reconocimiento internacional del espectro utilizado por la radioastronomía y de la protección que debe otorgársele. Este Manual ofrece al lector una fuente de información muy útil para la gestión y utilización del espectro radioeléctrico de modo que se reduzca al mínimo la interferencia causada a este valioso servicio.

François Rancy Director de la Oficina de Radiocomunicaciones

# ÍNDICE

# Página

PREÁMBULO - La Radioastronomía y la Sociedad	1	
0.1 Introducción a la Astronomía	1	
0.2 El papel de la radioastronomía	1	
0.3 Valor económico y social		
0.3.1 Introducción		
0.3.2 Valor económico y social de la investigación radioastronómica		
0.4 Vigilancia de las ondas radioeléctricas solares		
0.4.1 Introducción		
0.4.2 Descripción general de la vigilancia de las ondas radioeléctricas solares.		
0.4.3 Repercusión y valor social		
0.5 Tendencias en la radioastronomía	12	
0.6 Conclusiones		
CAPÍTULO 1 - Introducción		
1.1 El Sector de Radiocomunicaciones y las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones		
1.2 El Reglamento de Radiocomunicaciones y las atribuciones de frecuencias		
1.3 La radioastronomía como servicio de radiocomunicación		
1.4 Problemas de la atribución de frecuencias a la radioastronomía		
REFERENCIAS		
CAPÍTULO 2 - Características del Servicio de Radioastronomía		
2.1 ELSRA		
2.2 Origen y naturaleza de las emisiones radioeléctricas cósmicas		
2.3 Radiación del continuum		
2.3.1 Variabilidad en el tiempo de la radiación del continuum		
2.3.2 Medición de la radiación del continuum.		
2.4 Radiación de las ravas espectrales		
2.4.1 Tipos de ravas espectrales		
2.4.2 Medición de las ravas espectrales		
2.5 Práctica moderna		
2.6 Conclusión		
REFERENCIAS		
CADÍTINO 3 Randas da fraguancias profaridas para las observacionas radioastronómicos 22		
3.1 Consideraciones generales		
3.1.1. Observaciones radioastronómicas en tierra		

		3.1.2 Observaciones radioastronómicas desde el espacio
	3.2	Bandas preferidas del continuum
		3.2.1 Observaciones a bajas frecuencias
		3.2.2 Observaciones del continuum en las bandas de alta frecuencia
	3.3	Bandas para la observación de las rayas espectrales
CAPÍ	TULC	04 - Vulnerabilidad de las observaciones radioastronómicas a la interferencia
	4.1	Introducción
	4.2	Consideraciones básicas para el cálculo de los niveles de interferencia
		4.2.1 Criterio del nivel perjudicial para la interferencia
		4.2.2 Diagrama de respuesta de la antena
		4.2.3 Tiempo de promediación (tiempo de integración)
		4.2.4 Porcentaje de tiempo perdido por la interferencia
4.3	4.3	Sensibilidad de los sistemas radioastronómicos y valores umbral de la interferencia perjudicial
		4.3.1 Consideraciones teóricas
		4.3.2 Cálculo de la sensibilidad y del nivel de la interferencia periudicial
	4.4	Respuesta de los interferómetros y redes de antenas a la interferencia radioeléctrica
	4.5	Púlsares
	4.6	Sensibilidades alcanzadas
	4.7	Examen de la interferencia
		4.7.1 Niveles de interferencia
		4.7.2. Interferencia procedente de fuentes astronómicas
		4.7.3 Consideraciones especiales relativas a los transmisores situados en satélites geoestacionarios.
		4.7.4 Filtrado.
		4.7.5 Niveles de interferencia capaces de dañar o saturar los receptores radioastronómicos
	18	Análisis de Monte Carlo
	4.0	Analisis de Monte Carlo
ANEX	XO 1 a	al CAPÍTULO 4
REFE	REN	CIAS
CAPÍ	TULC	O 5 - Compartición de las bandas de radioastronomía con otros servicios
	5.1	Observaciones generales
		5.1.1 Criterios de protección para el SRA
	5.2	Distancias de separación necesarias para la compartición con un único transmisor (véase la Recomendación UIT-R RA.1031)
	5.3	Compartición en el caso de visibilidad directa
	5.4	Compartición con servicios que utilizan transmisores terrenales
	5.5	Compartición con los servicios móviles
	5.6	Compartición en las bandas de radioastronomía por debajo de 40 GHz
		5.6.1 La banda 1 330-1 427 MHz
		5.6.2. La banda 4.800-5.000 MHz

5.6.3 Las bandas 22,01-22,21 y 22,21-22,5 GHz .....

Compartición en las bandas de radioastronomía por encima de 40 GHz.....

5.7.1 Compartición entre 60 y 275 GHz	69
5.7.2 Compartición por encima de 275 GHz	69
Compartición con las investigaciones en el espacio lejano	
Compartición en el tiempo	
5.9.1 Coordinación de la compartición de tiempos y frecuencias	
RENCIAS	
6 - Interferencia causada a la Radioastronomía por transmisores que funcionan bandas	en otras 75
Introducción	
6.1.1 Definiciones del RR	
6.1.2 Definiciones adicionales	
6.1.3 Mecanismos de la interferencia procedente de transmisores en otras bandas	
Límites de las emisiones no deseadas procedentes de servicios en activo	
6.2.1 Límites en el dominio de las emisiones no esenciales	
6.2.2 Límites en el dominio de las emisiones fuera de banda	
6.2.3 Límites de las emisiones no deseadas de los servicios activos para prot bandas de radioastronomía	teger las 79
Calidad de funcionamiento de los receptores de radioastronomía	
6.3.1 Filtrado de la interferencia en el límite de la banda	

Página

68

69

	5.9	Compartición en el tiempo	73
		5.9.1 Coordinación de la compartición de tiempos y frecuencias	73
	REFE	ERENCIAS	74
CAPÍ	TULO	6 - Interferencia causada a la Radioastronomía por transmisores que funcionan en otras bandas	75
	6.1	Introducción	75
		6.1.1 Definiciones del RR	75
		6.1.2 Definiciones adicionales	75
		6.1.3 Mecanismos de la interferencia procedente de transmisores en otras bandas	77
	6.2	Límites de las emisiones no deseadas procedentes de servicios en activo	77
		6.2.1 Límites en el dominio de las emisiones no esenciales	77
		6.2.2 Límites en el dominio de las emisiones fuera de banda	78
		6.2.3 Límites de las emisiones no deseadas de los servicios activos para proteger las bandas de radioastronomía	79
	6.3	Calidad de funcionamiento de los receptores de radioastronomía	80
		6.3.1 Filtrado de la interferencia en el límite de la banda	80
		6.3.2 Efectos no lineales e intermodulación	82
		6.3.3 Linealidad	83
		6.3.4 Filtrado y digitalización	83
	6.4	Interferencia procedente de los transmisores de servicios en otras bandas	84
		6.4.1 Servicios que pueden producir interferencia en la radioastronomía por los mecanismos de la banda adyacente y los armónicos	84
		6.4.2 Transición a la televisión digital y repercusión sobre la utilización sin protección de las bandas utilizadas para la radiodifusión de televisión terrenal por parte del servicio de radioastronomía.	85
		6.4.3 Interferencia procedente de transmisiones de satélites	89
	6.5	Emisiones no deseadas procedentes de la modulación en banda ancha	94
		6.5.1 Empleo de la modulación en banda ancha	94
		6.5.2 Conformación de impulsos para reducir las emisiones no deseadas	95
		6.5.3 Ejemplo de interferencia procedente de la modulación en banda ancha	95
		6.5.4 Ejemplo: Interferencia radioeléctrica producida por el sistema del SMS IRIDIUM (HIBLEO-2)	96
	6.6	Conclusiones	99
	REFE	ERENCIAS	99
CAPÍ	TULO	7 - Técnicas especiales, aplicaciones y emplazamientos de observación	100
	7.1	Introducción	100
	7.2	La VLBI, y en particular la VLBI espacial	100

5.7

5.8

		7.2.1 La VLBI espacial	101
		7.2.2 Aplicaciones geodésicas de la VLBI	104
	7.3	Radioastronomía desde el punto de Lagrange Sol-Tierra, L <sub>2</sub>	104
	7.4	Radioastronomía desde la zona oculta de la Luna	106
		7.4.1 La zona oculta de la Luna	107
		7.4.2 Gamas espectrales preferidas para las observaciones desde la Luna	107
		7.4.3 Reglamentación del uso de la zona oculta de la Luna	108
	7.5	Emplazamientos terrenales con baja absorción atmosférica	109
		7.5.1 La Antártida	109
		7.5.2 Cerro Chajnantor (Chile)	109
		7.5.3 Mauna Kea, Hawái	109
		7.5.4 Monte Graham, Arizona	109
	7.6	Observaciones de púlsares y aplicación como patrones de tiempo	109
		7.6.1 Los púlsares como relojes patrón	110
		7.6.2 Los púlsares como objetos de coordenadas de referencia	110
	7.7	Observaciones solares	111
	REFE	RENCIAS	112
			112
CAPI		8 - Reducción de la interferencia	113
	8.1	Introduccion - Objetivos	113
	8.2	Signatura de las fuentes de RFI y repercusion de estas	113
	8.3	Metodologias de reduccion de la RFI – capas de reduccion	114
	8.4	Metodos anticipativos – modificación del entorno de la RFI	115
	8.5	Predetección y posdetección	115
	8.6	Precorrelación	116
		8.6.1 Procesamiento digital en la antena.	116
		8.6.2 Supresión adaptable (temporal) del ruido	116
	~ -	8.6.3 Filtrado espacial y orientación de nulos	117
	8.7	En la correlación	117
	8.8	Poscorrelación – antes o durante la formación de imágenes	118
	8.9	Implementación en los telescopios – estrategia	118
	8.10	Conclusiones	119
CAPÍ	TULO	9 - Zonas de silencio radioeléctrico	121
	9.1	Introducción	121
		9.1.1 Definición y requisitos generales de una zona de silencio radioeléctrico	121
		9.1.2 Función de la reglamentación	121
	9.2	Consideraciones que han de tenerse en cuenta cuando se crea una RQZ	122
		9.2.1 Geográficas	122
		9.2.2 Frecuencia	122
		9.2.3 Repercusión de la RFI sobre las observaciones del SRA	122
	9.3	El entorno electromagnético	122
		9.3.1 Radiadores deliberados	123

# Página

9.3.2 Radiadores involuntarios	123
9.3.3 Propagación de las señales interferentes	124
9.4 Métodos de conseguir una RQZ	124
9.4.1 Métodos en el receptor	124
9.4.2 Métodos en el transmisor – gestión de la RQZ	125
9.5 Consecuencias del establecimiento de una RQZ	127
9.5.1 Mantenimiento de las RQZ	127
9.5.2 Consideraciones a largo plazo	128
CAPÍTULO 10 - Búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI) utilizando observaciones en	
radiofrecuencias	129
10.1 Introducción	129
10.2 Detectabilidad de las señales SETI	130
10.3 Intensidad de las señales	130
10.4 Sensibilidad del sistema receptor	131
10.4.1 Potencia detectable mínima de la señal	132
10.5 Dirección de puntería de la antena	134
10.6 Identificación de las señales y rechazo de la interferencia	136
10.7 Bandas que pueden seleccionarse para la búsqueda	136
CAPÍTULO 11 - Astronomía por radar con base en tierra	138
11.1 Introducción	138
11.2 Problemas de sensibilidad	141
11.3 Modos operacionales y necesidades de anchura de banda	141
11.4 Instalaciones de astronomía por radar	142
APÉNDICE 1 - Cuadro de bandas de frecuencias atribuidas a la radioastronomía	144
APÉNDICE 2 - Inscripción de las estaciones de radioastronomía	147
APÉNDICE 3 - Unidades utilizadas en la radioastronomía	148
APÉNDICE 4 - Utilización práctica de la escala de dB	151
APÉNDICE 5 - Lista de acrónimos	153

# PREÁMBULO

# La Radioastronomía y la Sociedad

#### 0.1 Introducción a la Astronomía

La Astronomía se plantea interrogantes sobre la formación, evolución, dinámica y demás características de los objetos más allá de la atmósfera terrestre, tales como el Sol, sus planetas, los cometas, las estrellas, las galaxias, la materia difusa del espacio y el propio Universo. Esta curiosidad busca respuesta a algunas de las preguntas más trascendentes que la humanidad puede plantearse, por ejemplo, «¿cómo empezó el Universo (si alguna vez empezó)?»; «¿qué tamaño tiene?»; «¿cuál es su antigüedad?», y «¿cómo terminará (si llega a terminar)?». Como ciencia que nos permite conocer el lugar del Universo donde nos encontramos junto con nuestro planeta, la astronomía desempeña un papel cultural vital para toda la humanidad. Descubrimientos modernos tales como los agujeros negros y los quásares, ya forman parte del lenguaje cotidiano.

Desde un punto de vista esencialmente práctico, la astronomía ha ofrecido importantes aportaciones al progreso humano tales como nuestro calendario y el sistema de cronometraje. La verdad es que una gran parte de las matemáticas de uso cotidiano, por ejemplo la trigonometría, los logaritmos y el cálculo, son frutos de la investigación astronómica, como también lo son muchos de los fundamentos de la estadística.

Los astrónomos realizan observaciones en todo el espectro electromagnético accesible, que se extiende mucho más allá de la región visual u «óptica». Cada gama de frecuencias ofrece su propia información y suele exigir su propia variedad de telescopios y detectores. Los radioastrónomos estudian los objetos que radian o absorben energía a frecuencias del espectro radioeléctrico: en la superficie terrestre, los estudios se realizan en cualquier emplazamiento en el que la atmósfera sea admisiblemente transparente en la gama de 13 MHz a 2 000 GHz.

Además de las importantes aportaciones a la propia astronomía, el servicio de radioastronomía (SRA) ha contribuido de modo fundamental a otros ámbitos de la ciencia y la tecnología con subproductos de su propia actividad. Por ejemplo, ha determinado la absorción atmosférica de las ondas radioeléctricas, que es de particular interés para las telecomunicaciones. Sus necesidades vanguardistas continúan inspirando el desarrollo de receptores de bajo ruido. De este modo, continúa contribuyendo a la base tecnológica sobre la que se han desarrollado otros servicios, tales como la industria de las comunicaciones por satélite. La gran necesidad de potencia computacional del SRA ha impulsado el desarrollo de muchos de los computadores electrónicos de las primeras generaciones, y la búsqueda de una mayor sensibilidad ha inspirado importantes contribuciones tanto para el diseño de sistemas de alimentación como para el de antenas orientables de gran tamaño. No cabe duda de que el deseo permanente de mejorar los instrumentos continúa impulsando el progreso en campos tan diversos como la electrónica, la ingeniería mecánica y la informática.

#### 0.2 El papel de la radioastronomía

Algunos componentes del Universo sólo pueden estudiarse por medio de sus firmas de radiofrecuencia. Esto es especialmente cierto para su componente material más abundante, el hidrógeno neutro (HI), que sólo se detecta por su raya espectral a 1 420 MHz. Hay que señalar que gracias al conocimiento de la distribución de HI en nuestra propia galaxia, la Vía Láctea (véase la Fig. 0.1), se consiguió determinar definitivamente el centro de la misma, cartografiar sus brazos en espiral y establecer nuestra propia posición remota en un brazo exterior de la espiral. Todos estos logros son aspectos fundamentales del entorno inmediato de la humanidad en la Galaxia. Las observaciones radioeléctricas fueron esenciales para complementar los trabajos ópticos anteriores, ya que el polvo interestelar oscurece el centro de la Galaxia en las longitudes de onda ópticas, mientras que los desplazamientos Doppler de la emisión del HI, fácilmente medibles, permiten determinar su distribución a lo largo de la visual. La determinación de la radiación del continuum de nuestra Galaxia, una vez conocida la posición exacta de su centro, demuestra su coincidencia con una fuente radioeléctrica muy potente que, como unos recientes trabajos en infrarrojo cercano (NIR) han demostrado, se trata de un agujero negro supermasivo. Éste es un ejemplo representativo de cómo la radioastronomía constituye al mismo tiempo una parte integral de la investigación astronómica en general y una fuente complementaria de datos para las observaciones realizadas en otras longitudes de onda del espectro electromagnético.

#### FIGURA 0.1

Plano central de nuestra Galaxia con el Centro Galáctico en medio. La imagen superior muestra la estructura del continuum radioeléctrico a 408 MHz. La imagen central muestra la emisión del hidrógeno neutral integrada a 1 420 MHz. La imagen inferior muestra la región central con luz óptica en la que pueden observarse las estructuras de polvo oscuro



Radio-Astro\_01

Las fotografías ópticas permiten identificar una multitud de galaxias en el espacio exterior a la nuestra. Como el HI es uno de sus componentes más abundantes, puede detectarse fácilmente en las galaxias próximas, gracias a lo cual puede estudiarse su velocidad de recesión y sus movimientos internos. Esto permite obtener su distribución tridimensional en el espacio y estimaciones precisas de sus masas. Aunque se utiliza instrumentación óptica y NIR para estudiar muchas de las propiedades de las galaxias, se necesitan técnicas radioeléctricas para estudiar la distribución del gas en su seno. En Fig. 0.2 se ilustra este extremo por contraste entre el tamaño de una galaxia cercana brillante, tal como aparece en una imagen óptica, y la estructura de mucho mayor tamaño que revela su HI. Sin embargo, las observaciones del monóxido de carbono (CO) a 115,271 GHz muestran exactamente el resultado opuesto, ya que el CO se concentra en la parte central. Esta diferencia de distribución entre el HI y el CO es consecuencia de la combustión nuclear del hidrógeno en el seno de las estrellas para formar elementos más pesados tales como C y O, que después se disipan hacia el espacio interestelar. La densidad de las estrellas es mayor en la zona central de las galaxias y lo mismo ocurre con sus subproductos.

#### FIGURA 0.2

La galaxia de cara NGC 6946 se muestra con luz visible (a la izquierda) y con la emisión de la raya de hidrógeno<sup>1</sup> (HI) neutro a 1 420 MHz (a la derecha), a la misma escala. La emisión de hidrógeno neutro muestra una estructura de brazos en espiral a gran escala que se extienden mucho más allá de la imagen óptica y revelan la dinámica de la galaxia. En muchos puntos (y especialmente en los «agujeros» de la distribución) las emanaciones de gas a alta velocidad están correlacionadas con la formación de estrellas en curso. Datos radioeléctricos facilitados por el telescopio radioeléctrico de síntesis de Westerbork (Países Bajos)



Radio-Astro\_02

Los primeros estudios del continuum del cielo en radiofrecuencia desvelaron muchas fuentes radioeléctricas, estableciéndose a continuación una competición por la búsqueda de sus identificaciones ópticas. Entre las mayores sorpresas se encuentra el descubrimiento de pares de fuentes radioeléctricas, la mayor parte de ellas equidistantes a ambos lados de una galaxia, lo que indica la existencia de enormes zonas de emisión radioeléctrica asociadas a ellas, aunque considerablemente separadas, como puede observarse en sus imágenes ópticas. Con la mejora de las técnicas de los instrumentos y los estudios realizados a frecuencias más altas, se puso de manifiesto que estas zonas de emisión son los restos de chorros altamente relativistas que emanan de los núcleos galácticos. Ésta es también una característica de los quásares, que actualmente se reconocen como agujeros negros supermasivos que acumulan masa en los centros de sus galaxias anfitrión. Los chorros relativistas, cuyo estudio suele exigir la utilización de técnicas radioeléctricas, son un tema recurrente en la astronomía moderna, dado que la física subyacente no se entiende por completo, y se presentan siempre que una masa está acumulándose activamente sobre un objeto denso, con independencia de que se trate de un agujero negro supermasivo, de un agujero negro de tamaño estelar, de una estrella de neutrones, o incluso del núcleo degenerado de una estrella normal.

Los radioastrónomos han ofrecido importantes aportaciones a nuestra comprensión del Universo como entidad. Esto comenzó con el descubrimiento en 1964 de la radiación cósmica del fondo de microondas (CMB, *cosmic microwave background*) casi isótropa, que obtuvo el Premio Nobel en 1978, segundo otorgado a los radioastrónomos. Las observaciones del continuum del cielo a frecuencias entre 30 y 300 GHz ponen de manifiesto que la CMB tiene una temperatura de brillo de 2,73 K. La CMB se atribuye a la radiación térmica del gas ionizado que llenó el Universo inmediatamente después de su nacimiento con el Big Bang; es decir, desde el instante en que el Universo se volvió opaco a la emisión radioeléctrica por primera vez. Se trata pues de la señal «fósil» más antigua observable. Gracias a este descubrimiento, el paradigma del Big Bang se convirtió en la descripción macroscópica aceptada de la historia de nuestro Universo, eliminando de la contienda el paradigma del Estado Estacionario. En 1992 un estudio de la CMB en todo el cielo realizado con instrumentos desde un satélite dio como resultado la detección de la firma Doppler del movimiento

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Boomsma, R., Oosterloo, T. A., Fraternali, F., Van Der Hulst, J. M., Sancisi, R., Astronomy and Astrophysics, 490, 555 (2008).

Tierra/Sol/Galaxia con respecto a la CMB y de la existencia de pequeñas variaciones puntuales (de un pequeño número de partes en 10<sup>-5</sup>) de su temperatura de brillo. El Premio Nobel de 2006 vino a reconocer estas excepcionales mediciones. Sin embargo, las mediciones de estructura débil en su intensidad, realizadas con instrumentos de mayor sensibilidad han introducido una nueva era de la cosmología de precisión al perfeccionar considerablemente los parámetros cosmológicos que describen el Universo y ofrecer una confirmación independiente de que su velocidad de expansión está acelerando, algo que no se preveía originalmente. Cabe esperar, pues, que las futuras misiones de satélites exploten las propiedades de polarización de la CMB.

Pasando de la escala muy grande a la muy pequeña, se predijo la existencia de las estrellas de neutrones en 1934, poco después del descubrimiento del neutrón. Su descubrimiento por observación en 1967 en forma de fuentes radioeléctricas pulsantes rápidas (púlsares) se reconoció con el Premio Nobel de 1974, primero obtenido por radioastrónomos. Una de las mayores oportunidades que brindan los púlsares es su papel como laboratorios de física fundamental. Un grupo particular de púlsares que rote muy rápidamente con periodos de milisegundos, puede servir de reloj de alta precisión. Algunos de éstos orbitan en torno a un compañero, y la combinación de un reloj preciso en una órbita cercana a un objeto compañero, ya sea una estrella de neutrones, una enana blanca o una estrella más normal, permite determinar órbitas de alta precisión y masas de púlsares, así como realizar amplios ensayos de muchas predicciones de la Relatividad General. La descripción que hace la Relatividad General de la evolución de la órbita del primer púlsar que se descubrió en un sistema estelar binario constituyó la *primera* demostración de la existencia predicha de la radiación de ondas gravitacionales, que obtuvo el Premio Nobel de 1993. En 1992 se identificó el primer planeta descubierto fuera del Sistema Solar gracias a su influencia en la solución de temporización de un púlsar.

La física detallada aplicable en el seno de una estrella de neutrones cambia con su masa, de modo que las ecuaciones utilizadas para describir su materia nuclear se complican conforme aumenta la masa del púlsar. La mayor parte de los púlsares tienen masas próximas al límite de Chandrasekhar de 1,4 masas solares. No es extraño, pues, que exista un gran interés en el descubrimiento de objetos de dos o más masas solares, ya que su mera existencia constriñe sus posibles ecuaciones de estado, puesto que se prevé que éstas sufran la influencia de la mezcla de formas extrañas de materia en sus núcleos. No existe ningún otro medio de ensayar la física aplicable. Análogamente, por observación de un conjunto raro de púlsares, los magnetares, pueden ensayarse físicas que de otro modo resultarían inaccesibles. Éstos tienen campos magnéticos ultraintensos, que desbordan la capacidad de generación de nuestros laboratorios. En un frente de investigación totalmente distinto, se está llevando a cabo a nivel mundial una extensa campaña para utilizar las observaciones de temporización de un conjunto de púlsares de milisegundos de todo el cielo con la esperanza de detectar directamente ondas gravitacionales en la gama de frecuencias de los nanohercios.

#### 0.3 Valor económico y social

#### 0.3.1 Introducción

Resulta difícil evaluar las ventajas económicas de utilizar el espectro de radiofrecuencias para la investigación científica y sus aplicaciones, por la simple cuantificación de sus costes y beneficios para compararlos con una utilización alternativa del espectro. También debe considerarse la repercusión económica de los subproductos de la radioastronomía. Las innovaciones técnicas de los radioastrónomos se han implementado en muchas aplicaciones que benefician a la sociedad en conjunto. Por ejemplo, se encuentran subproductos de la investigación sobre receptores de radioastronomía en equipos de telecomunicación especializados, así como en aplicaciones de consumidor de fabricación en serie. También son difíciles de estimar los beneficios económicos y sociales de los algoritmos de formación de imágenes médicas derivados originalmente de las técnicas de formación de las imágenes radioastronómicas (véase § 0.3.2.4).

#### 0.3.2 Valor económico y social de la investigación radioastronómica

El progreso de la radioastronomía depende de los adelantos que experimentan la tecnología de los receptores y la digital. Como norma general, la instrumentación radioastronómica utiliza la tecnología más avanzada, desempeñando los astrónomos un papel activo en la utilización de ésta hasta sus límites prácticos. En las siguientes subsecciones se presentan ejemplos de actividades de investigación radioastronómica que se han incorporado a aplicaciones que tienen otro valor social.

#### 0.3.2.1 Tecnología de la telecomunicación

#### Sistemas receptores

Los sistemas de la radioastronomía utilizan antenas de alta ganancia, receptores de bajo ruido y osciladores y multiplicadores de frecuencia de estado sólido. El desarrollo de amplificadores paramétricos, de amplificadores FET de GaAs enfriados criogénicamente, de amplificadores HEMT y de mezcladores SIS ha sido forzado por las exigencias de la radioastronomía o se debe a la influencia de ésta. Gracias a estos adelantos, los receptores funcionan en anchuras de banda extremadamente amplias y con temperaturas tan bajas como 2 K. Las temperaturas de ruido que se alcanzan a ciertas frecuencias ya se aproximan al límite cuántico técnicamente posible. Algunos de los sistemas de telecomunicación de espacio profundo más complejos utilizan estas tecnologías, ya que sus osciladores locales sincronizan la hora a niveles inferiores al picosegundo mediante patrones de frecuencia atómica. Estos patrones constituyen la espina dorsal de los relojes de los sistemas de navegación tanto terrenal como espacial.

#### Principio de homología

Un importante obstáculo para el diseño de antenas parabólicas orientables de muy gran tamaño con superficies reflectantes de precisión es la deformación gravitacional que modifica la forma de una antena cuando se traslada de una posición a la siguiente. Este problema se resolvió en 1967 recurriendo al principio de homología<sup>2</sup>. Una antena diseñada con arreglo a este principio se deforma suavemente bajo la fuerza gravitacional con arreglo a una secuencia de paraboloides y la consiguiente modificación de la posición focal. Basta con que el receptor y su dispositivo de alimentación sigan esta posición focal cambiante, para que se reduzcan al mínimo los efectos de la deformación gravitacional y la subsiguiente atenuación de la señal. Todas las antenas parabólicas reflectantes de gran tamaño utilizan actualmente la homología. Esto adquiere su máxima importancia cuando se trabaja con longitudes de onda milimétricas.

#### Tecnología de las antenas

Los radioastrónomos fueron los primeros en utilizar bocinas de alimentación de polarización circular. Posteriormente, los transmisores de los satélites han utilizado este adelanto técnico para transmitir ambas polarizaciones independientemente por la misma bocina de alimentación, con el consiguiente ahorro de masa y espacio en los módulos.

#### 0.3.2.2 Tecnología interferométrica

Los radioastrónomos desarrollaron la interferometría para obtener una mayor resolución angular y como técnica de formación de imágenes. Después la utilizaron para producir estudios digitalizados de píxel sencillo del cielo radioeléctrico. En el Capítulo 7 se describe esta técnica, que desde entonces ha cobrado gran importancia para la astronomía en todo el espectro electromagnético (EM), así como para las fibras ópticas, la metrología de ingeniería, la metrología óptica, la oceanografía, la sismología, la mecánica cuántica, la física nuclear y de partículas, la física de plasmas y la teledetección.

Además, los radioastrónomos fueron los primeros en desarrollar técnicas de reconstrucción y limpieza de imágenes para suprimir de éstas la mayor parte de los efectos instrumentales y medioambientales. Estos métodos se utilizan en el estudio del cielo tanto terrenal como por satélite, así como en el estudio de la Tierra por parte del Servicio de Exploración de la Tierra por Satélite (SETS).

En la última parte del siglo XX, se utilizaron ampliamente los sistemas interferométricos radioeléctricos para facilitar el aterrizaje automático de las aeronaves. Este tipo de sistemas se desarrolló inicialmente en un laboratorio de radioastronomía y a continuación se comercializó en todo el mundo. Actualmente se utiliza esta misma tecnología para localizar a los usuarios de los teléfonos móviles a fin de que los servicios de socorro puedan ofrecer una rápida respuesta en los lugares donde se han producido accidentes, así como para ofrecer servicios de ventas especializadas y otros relacionados con la posición. La red inalámbrica Wi-Fi es un ejemplo destacado de sistema operacional.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Von Hörner, S.: «Design of large steerable antennas», The Astronomical Journal, 72 (1967), 35.

#### Aplicaciones Wi-Fi

Uno de los problemas más importantes para el desarrollo de las conexiones inalámbricas entre terminales informáticos fueron las reflexiones, ya que tras la llegada de una transmisión a un receptor se suceden una serie de ecos. Esto era sobradamente conocido por los radioastrónomos que desarrollaron técnicas de procesamiento de la señal para superar problemas comparables provocados por las reflexiones en la atmósfera. Las redes de área local radioeléctricas envían sus datos a diferentes frecuencias; estas señales se recombinan en el receptor del mismo modo que en la radioastronomía.

#### Navegación

Desde hace años, la astronomía ha contribuido de manera importante a la navegación, tanto en tierra como en el espacio. Gracias al desarrollo de los sextantes radioeléctricos para la navegación marítima se pueden efectuar determinaciones precisas de la posición en días nublados y lluviosos. Una reciente aplicación de la interferometría radioeléctrica para la determinación de la posición de los teléfonos móviles en situaciones de emergencia por multilateración, se basa en la intensidad de la señal que se recibe en los mástiles de antena cercanos. Se localiza un objeto calculando exactamente la diferencia de tiempos de llegada (TDOA, *time difference of arrival*) de una señal emitida por un objeto a tres o más receptores. También puede utilizarse para localizar un receptor por medición de la TDOA de una señal transmitida por tres o más transmisores sincronizados.

#### 0.3.2.3 Tecnología de computación

Los radioastrónomos han desarrollado técnicas digitales de vanguardia para correlacionar y grabar los datos de los telescopios. A continuación se utilizan modernas redes de computadores de alta potencia (sistemas de procesamiento en paralelo) para procesar los enormes volúmenes de datos que recogen las redes de interferómetros. Como ejemplos de la moderna capacidad de procesamiento cabe citar la síntesis multihaz simultánea, la mitigación de la RFI en tiempo real y la reconstrucción de estructuras radioeléctricas complejas. El procesamiento de datos radioastronómicos para la correlación en tiempo real de los datos interferométricos que fluyen de las antenas repartidas por los cuatro continentes se está utilizando como prueba en el desarrollo de instalaciones de redes de datos de gran anchura de banda.

#### Lenguaje informático FORTH

Un conocido subproducto de la radioastronomía es el lenguaje informático FORTH (o Forth) desarrollado en el NRAO de EE.UU. a principios de los años 1970. La primera aplicación de Forth fue el control y procesamiento de datos para uno de los telescopios del NRAO. El lenguaje Forth se ha utilizado en muchas aplicaciones tales como los primeros computadores de bolsillo que llevaban los carteros de Federal Express y sigue utilizándose actualmente en sus formas evolucionadas. Entre otras aplicaciones también cabe citar el software de seguimiento de satélites y el software de simulación para el brazo de 50 pies de longitud y seis articulaciones, construido en Canadá, con el que va equipado la lanzadera espacial y que se ha utilizado en el despliegue de satélites y en operaciones de recuperación, así como para ayudar a los astronautas en las tareas de mantenimiento (por ejemplo, en la reparación y actualización del Telescopio Espacial Hubble)<sup>3</sup>.

#### 0.3.2.4 Tecnología médica

Los radioastrónomos fueron pioneros en las técnicas matemáticas de reconstrucción de imágenes bidimensionales a partir de exploraciones unidimensionales y en las de reconstrucción de imágenes tridimensionales a partir de exploraciones bidimensionales<sup>4</sup>. Estas técnicas de reconstrucción de imágenes se han incorporado a la CT (tomografía computerizada), a la PET (tomografía por emisión de positrones) y a la formación de imágenes por resonancia magnética. Las observaciones radioeléctricas de fuentes cósmicas distantes consisten esencialmente en mediciones de su temperatura; esta técnica se ha adaptado para utilizarla en las mediciones *no invasivas* de la temperatura de los tejidos humanos.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Para mayor información sobre el uso del Forth, véase p.ej.: <u>http://www.forth.com/index.html</u>.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Bracewell, R.N. and Riddle, A.C.: «Inversion of fan beam scans in radio astronomy», *Astrophys. Journal*, **150**, 427.

La CT es un método de formación de imágenes médicas en el que se utilizan computadores digitales para generar imágenes tridimensionales del interior de un cuerpo a partir de una gran serie de imágenes bidimensionales de rayos X tomadas en torno a un único eje de rotación.

Los tumores malignos aparecen en las imágenes de microondas del tejido profundo como regiones de temperatura anómala, lo que facilita su detección. La termografía de microondas se utiliza para detectar el cáncer de mama con una tasa de detección de verdaderos positivos del 96 %.

#### Cáncer de piel

Uno de los mayores problemas para los astrónomos que estudian las estrellas y las galaxias es conseguir extraer información significativa de un entramado de señales. Los radioastrónomos, que fueron los primeros astrónomos en manipular datos digitales, desarrollaron los algoritmos utilizados para seleccionar señales débiles de un fondo de «ruido» aleatorio. Estos algoritmos han ayudado a otros astrónomos a identificar miles de fuentes débiles de rayos X y a efectuar análisis cuantitativos de sus estructuras.

Estas técnicas son aplicables a muchas otras situaciones en las que los datos importantes están enmascarados por el ruido de fondo. Con la colaboración de médicos y el apoyo de la agencia espacial alemana, los científicos especializados en radiocomunicaciones desarrollaron un sistema para el reconocimiento temprano del cáncer de piel. Las pequeñas diferencias de color pueden facilitar la detección y medición del crecimiento irregular de células asociado al melanoma maligno, que es una forma especialmente virulenta de cáncer de piel.

#### Radiografía digital

La tecnología de formación de imágenes digitales también se adaptó para facilitar la medición de las emisiones de rayos X de las agrupaciones galácticas, que son importantes para que los astrofísicos desarrollen teorías relacionadas con la cosmología y la evolución temprana del Universo.

Esta técnica se ha utilizado posteriormente en el diseño de un sistema de radiografía digital para mejorar la eficiencia, flexibilidad y rentabilidad en los exámenes radiológicos hospitalarios. Gracias a ello se reducen los costes de explotación de los hospitales y las salas de urgencias ya que se elimina el gasto de las placas de rayos X y de otros procedimientos de adquisición de imágenes. Utilizando esta tecnología, se realizan los exámenes radiológicos de forma habitual, con la diferencia de que las imágenes corporales se almacenan en la memoria del computador en vez de en película. El doctor (y/o el paciente) puede contemplar las imágenes inmediatamente y transmitirlas fácilmente por Internet con toda fidelidad a especialistas desplazados.

#### 0.3.2.5 Patrones de tiempo y frecuencia

La comunidad de la interferometría con línea de base muy larga (VLBI, *very long baseline interferometry*) se vio obligada a desarrollar patrones de tiempo sumamente estables y precisos y métodos de transferencia de tiempos con niveles de incertidumbre de unas pocas partes en 10<sup>-16</sup> s. Estos sistemas se comercializaron más tarde y se utilizan actualmente para la navegación de los satélites, la comunicación espacial y la defensa. Todos los sistemas del servicio de radionavegación por satélite (SRNS) (GPS, Glonass y Galileo) tienen sus tiempos y coordenadas vinculados a la Tierra y al cosmos gracias a las actividades de mantenimiento del servicio VLBI internacional para la Geodesia y la Astrometría (IVS, *International VLBI Service*).

Los relojes de precisión fabricados por el hombre introdujeron la era moderna de la navegación segura. La búsqueda de relojes de mayor precisión y la determinación de la hora a partir de un conjunto de relojes atómicos sigue siendo competencia de la Oficina Internacional de la Hora. Sin embargo, la mejor verificación independiente de la estabilidad a largo plazo de los patrones horarios atómicos internacionales procede de las observaciones de la temporización de los púlsares de milisegundos por parte de los radioastrónomos. Éstas se realizan sobre una serie de púlsares de los más estables, tanto para reducir al mínimo los posibles efectos de cambios seculares en el contenido de electrones del medio interestelar a lo largo de la visual como para minimizar el posible comportamiento errático de alguno de los púlsares. También se verifica independientemente introduciendo en los parámetros orbitales del sistema observaciones de temporización de púlsares a sistemas estelares binarios.

#### 0.3.2.6 Observación de la Tierra

Se han adoptado métodos interferométricos de la radioastronomía para desarrollar técnicas de teledetección pasiva destinadas a la medición de la temperatura de la atmósfera terrestre, así como para la determinación de otras propiedades de la superficie tales como la distribución del vapor de agua, el contenido hídrico de las nubes, la precipitación y el nivel de impurezas tales como el monóxido de carbono.

La detección de incendios forestales a partir de su radiación de microondas térmicas obedece al mismo principio tecnológico.

#### 0.3.2.7 Geodesia

Aunque la técnica VLBI se desarrolló para recoger datos acerca de la estructura detallada y posición de las fuentes astronómicas, también se aplica a muchos otros fines. Por este motivo, las posiciones VLBI de los quásares distantes y las fuentes radioeléctricas, medidas con suma precisión, proporcionan el marco de referencia espacial más preciso de la humanidad. La utilización de fuentes celestiales como puntos de referencia permite a la VLBI terrenal medir los movimientos inherentes de los telescopios sobre la Tierra, tales como los provocados por la deriva continental o el movimiento de las placas tectónicas en las líneas de falla. Estas mediciones facilitan el cálculo de la probabilidad de terremotos. El servicio VLBI internacional para Geodesia y Astronomía (IVS) se instituyó para prestar servicios en apoyo de la investigación geodésica, geofísica y astrométrica y de sus actividades de explotación<sup>5</sup>. Las técnicas VLBI terrenales y el seguimiento Doppler de precisión también se utilizan en las misiones de navegación espacial de alta precisión en nuestro Sistema Solar. Gracias a ellas pudo calcularse con exactitud la posición de la sonda Huygens de la ESA durante su entrada a la atmósfera de Titán, la luna más grande de Saturno.

#### 0.3.2.8 Tecnología minera

Las técnicas de formación de imágenes expuestas en § 0.3.2.4 también pueden aplicarse directamente a los sondeos subterráneos en busca de petróleo y depósitos minerales. Los datos proporcionados por una red de sismómetros que efectúan mediciones tras una cadena de pequeñas explosiones superficiales se procesan de modo similar.

#### 0.3.2.9 Astronomía por radar

La astronomía por radar se diferencia de la radioastronomía en que conlleva tanto la *transmisión* como la *recepción* de ondas radioeléctricas. Una consecuencia de ello es que sus pérdidas de dispersión bidireccionales limitan su utilización al estudio de objetos en la vecindad solar. No obstante, se trata del único método que puede utilizarse para detectar desechos espaciales de pequeño tamaño. Una aplicación característica de la radioastronomía es la detección y el seguimiento de objetos próximos a la Tierra (NEO, *Near Earth Objects*) (meteoritos y asteroides), que se aproximen a la Tierra o que puedan chocar contra ella, y constituye el medio más completo de estudiarlos. En virtud de esta capacidad, la astronomía por radar es un servicio a escala planetaria de predicción y prevención de catástrofes. Además, con el radar pueden detectarse los desechos espaciales que se encuentren en órbita alrededor de la Tierra, lo que permite a los operadores de los satélites alejar sus vehículos espaciales de las zonas de posible colisión. Ésta es la única manera de estudiar la densidad de desechos espaciales de menos de 1 cm de tamaño, aproximadamente.

Las técnicas de formación de imágenes de la astronomía por radar (para el campo próximo) se utilizan con fines civiles y militares en los vehículos espaciales destinados a la captación de imágenes de objetos que se encuentren en órbita.

#### 0.4 Vigilancia de las ondas radioeléctricas solares

#### 0.4.1 Introducción

La vigilancia de las ondas radioeléctricas solares constituye una rama especializada de la radioastronomía que desempeña un papel activo en la investigación meteorológica espacial, facilita la elaboración de predicciones meteorológicas espaciales y proporciona alertas tempranas de erupciones solares que puedan repercutir en las actividades humanas. Nuestra susceptibilidad al comportamiento del Sol ha dado lugar al estudio de la

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Véase: <u>http://ivscc.gsfc.nasa.gov/html</u>

«Meteorología Espacial» como nueva disciplina en la que se estudian las condiciones en el espacio próximo a la Tierra mediante la medición de la radiación electromagnética y el estado del plasma solar. En las escalas temporales larga e intermedia, la repercusión de la variabilidad solar sobre el clima tiene la misma importancia que el vulcanismo y la actividad humana. En escalas temporales más breves, el papel de la meteorología espacial también es importante debido a las perturbaciones que los fenómenos solares, y en particular las eyecciones de masa coronal (CME, *coronal mass ejections*), pueden causar a nuestra infraestructura técnica espacial, terrestre y aérea. En la proximidad de un máximo solar, las CME se presentan como mínimo una vez al día.

Cuando se combinan los datos de los radioespectrógrafos situados en tierra con los datos complementarios de los satélites, se pueden obtener estimaciones de la masa, energía, velocidad y dirección de propagación de las eyecciones de masa coronal mucho antes de que alcancen la superficie terrestre. A partir de estas medidas puede deducirse la gravedad de las perturbaciones y su probable instante de llegada a la Tierra, facilitando de este modo la posibilidad de reducir los efectos adversos sobre una amplia diversidad de tecnologías humanas tales como las telecomunicaciones, los sistemas de navegación por satélite, las actividades espaciales (satélites, misiones tripuladas), la aviación y las redes de distribución de energía eléctrica. La actividad solar también provoca una degradación paulatina de los transformadores de potencia y es responsable de la corrosión de los oleoductos de larga distancia, además de generar muchos otros efectos adversos. La repercusión de una erupción solar cromosférica gigante, que es otro peligro natural menos frecuente y de carácter aleatorio, también puede ser grave. De no mitigarse los fenómenos de este tipo, pueden provocar perturbaciones importantes a nivel mundial debido a la dependencia tecnológica de nuestra sociedad. Un ejemplo ilustrativo ocurrió en marzo de 1989 cuando la repercusión de una gran erupción solar cromosférica tuvo un coste superior a 10<sup>9</sup> USD. Hoy en día, una erupción solar cromosférica gigante podría provocar daños mucho más costosos, salvo que se adoptasen las medidas oportunas antes de su llegada a la Tierra. Tanto es así que algunos cálculos estiman el coste probable de dicho evento entre 2 y  $3 \times 10^{12}$  USD, además de un periodo de recuperación comprendido entre 2 y 3 años, ya que muchos de los repuestos necesarios (por ejemplo, para la reparación de la red de distribución de energía eléctrica) son excesivamente caros como para conservar una reserva de ellos. Este riesgo incontrolable subraya el papel esencial de los sistemas de alerta temprana que dependen de las instalaciones de vigilancia solar continua entre las que se encuentran los radiotelescopios solares situados en tierra.

Existen muchas formas de vigilar la actividad solar, una de ellas consiste simplemente en contar las manchas solares. Las mediciones radioeléctricas tienen la ventaja de poder efectuarse automáticamente desde tierra, de necesitar poca intervención humana o ninguna, y de ser baratas. Además, es posible mantener la calibración de los datos, su calidad y su coherencia durante largos periodos de tiempo.

#### 0.4.2 Descripción general de la vigilancia de las ondas radioeléctricas solares

Las mediciones radioeléctricas del Sol proporcionan indicadores directos del nivel y naturaleza de la actividad solar. También pueden utilizarse como aproximaciones a otros parámetros difíciles o imposibles de medir con la precisión y la continuidad a largo plazo necesarias. Los monitores de flujo solar son radiotelescopios especialmente diseñados con antenas suficientemente pequeñas para «ver» la totalidad del disco solar con la misma sensibilidad y receptores con márgenes dinámicos lineales muy grandes, para medir con precisión el flujo solar.

Los estudios realizados han puesto de manifiesto que el flujo solar a 2,8 GHz (10,7 cm) está estrechamente correlacionado con los datos obtenidos por las plataformas espaciales referentes a los flujos de rayos X y UV, así como con ciertos parámetros del viento solar. Todos estos flujos energéticos desempeñan un papel directo en el calentamiento de las capas superiores de la atmósfera y, dado que las mediciones con base en el espacio sólo están disponibles desde los años 1990 y no se garantiza su continuidad a largo plazo, teniendo en cuenta la limitada vida útil de los satélites espaciales, se utiliza el índice de flujo a 2,8 GHz para predecir la resistencia atmosférica sobre los satélites y la repercusión sobre el mantenimiento de sus órbitas. Originalmente se eligió la frecuencia de 2,8 GHz «por casualidad», aunque en la componente de lenta variación, o S, de la emisión radioeléctrica del Sol existe una amplia cresta en la banda de ondas centimétricas, a una longitud de onda de 10 cm aproximadamente. Sin embargo, sólo se trata de una muestra de un continuum de emisión entre 0,5 y 10 GHz producido por varios procesos solares. Para comprender mejor las fuentes de esta emisión y mejorar las aproximaciones «climáticas» a largo plazo, es necesario medir el flujo a varias frecuencias. Con este fin,

se han proyectado nuevos monitores de flujo para Europa, América del Norte y Japón, aunque sólo pueden efectuarse mediciones absolutas en las bandas del SRA disponibles.

#### FIGURA 0.3





#### 0.4.3 Repercusión y valor social

Los campos temáticos a los que pueden contribuir los datos de flujo radioeléctrico solar se enmarcan en dos amplias categorías: medioambientales y técnicos/infraestructurales.

#### 0.4.3.1 Estudios/supervisión de aplicaciones medioambientales

La emisión radioeléctrica solar se utiliza como aproximación a todos los flujos de radiación de importancia medioambiental que afectan a la estructura vertical de la temperatura y otros parámetros de la atmósfera, a una altura superior a 80 km aproximadamente (es decir, la ionosfera). Estos parámetros se miden utilizando una diversidad de sensores medioambientales, aunque para disponer de un contexto de modelos es necesario cuantificar los factores solares determinantes. Por ejemplo, la densidad atmosférica por encima de los 100 km se modela utilizando como entrada (empírica) el flujo radioeléctrico solar a 2,8 GHz.

#### 0.4.3.2 Usos técnicos/infraestructurales

Algunas veces, las emisiones solares, especialmente en la banda de ondas métricas, son lo suficientemente intensas como para producir la degradación de los sistemas radioeléctricos (por ejemplo, las comunicaciones) al incrementar sus niveles de ruido.

#### Efectos sobre los satélites de los factores solares determinantes

Los satélites operan en un entorno poblado por partículas de alta energía que emanan del Sol. Éstas pueden degradar temporalmente, o dañar permanentemente, los circuitos electrónicos, como también puede hacerlo una acumulación de carga eléctrica en el vehículo espacial, que además puede generar mandatos fantasmas que perturben su funcionamiento. Los satélites en órbitas terrenas bajas también están sometidos a aumentos de resistencia atmosférica que pueden modificar su posición y aumentar la velocidad de degradación orbital. Para predecir el grado de calentamiento y expansión en la atmósfera superior y las consecuencias para las órbitas de los satélites, se utiliza un nivel general de actividad solar especificado mediante índices, tal como el flujo radioeléctrico solar a 2,8 GHz.

#### Efectos ionosféricos

Como el Sol genera la ionosfera, los cambios de actividad solar se traducen en alteraciones ionosféricas concomitantes que pueden dar lugar a un aumento de la capacidad de comunicación o provocar un apagón total que puede durar muchas horas si los rayos X solares aumentan significativamente el grado de ionización en la Región D. La ionosfera es un importante medio para las comunicaciones, por ello, la predicción de las condiciones ionosféricas también tiene mucha importancia: la UIT utiliza datos radioeléctricos para realizar el diagnóstico ionosférico de las condiciones vigentes y como ayuda para la predicción de su evolución probable a corto plazo.

La aviación comercial utiliza la banda de ondas decamétricas en sus rutas de larga distancia sobre los polos, dado que no existe infraestructura en la banda de ondas métricas en latitudes tan altas (>82°) y que el cinturón de satélites geosíncronos está próximo al horizonte. Como las perturbaciones ionosféricas son especialmente comunes y problemáticas en latitudes altas, es necesario efectuar mediciones radioeléctricas de la actividad solar para predecir las condiciones ionosféricas polares a fin de informar con la antelación suficiente a las compañías de aviación para que modifiquen sus planes de vuelo cuando sea necesario.

#### Efectos geomagnéticos sobre los sistemas de tierra

Las fluctuaciones del campo magnético terrestre, tanto rápidas como lentas, se generan por el cambio de velocidad y densidad del viento solar, y especialmente por el impacto del plasmoide eyectado durante las erupciones solares cromosféricas y las CME. Estas fluctuaciones inducen corrientes eléctricas en las estructuras de metal de gran longitud tales como las líneas de distribución de energía eléctrica, los oleoductos, los cables telefónicos y las vías de ferrocarril. Las corrientes inducidas en las líneas de distribución de energía eléctrica desplazan los puntos de funcionamiento de los transformadores, que, cuando funcionan a mucha carga, pueden provocar la saturación del núcleo y el sobrecalentamiento de los devanados. Además, las tormentas magnéticas intensas, como la del 13 de marzo de 1989, producen corrientes mucho más intensas que pueden provocar un fallo brusco del transformador, tal como ocurrió en Quebec (Canadá), donde la red de distribución de energía eléctrica quedó colapsada durante más de nueve horas. La repercusión económica de este fallo de la infraestructura como consecuencia de la pérdida de producción industrial fue del orden de 10<sup>9</sup> USD.

#### FIGURA 0.4

Transformador de una red de distribución de energía eléctrica quemado a raíz de la actividad solar del 13 de marzo de 1989



Radio-Astro\_04

Las corrientes inducidas en las vías férreas pueden interferir con los sistemas de señalización y los detectores de posición del tren. También pueden generar pequeñas diferencias de potencial a través de los defectos de homogeneidad en el metal de los oleoductos y a través de sus soldaduras, que pueden aumentar el ritmo de corrosión catódica.

Los oleoductos pueden tener una longitud de miles de kilómetros, a menudo en terrenos y climas inhóspitos, donde la inspección y el mantenimiento pueden resultar muy caros. Sin embargo, un fallo puede resultar aún más caro y tener graves consecuencias medioambientales. Por este motivo, es necesario contar con modelos de inspección y mantenimiento que se basen en la actividad geomagnética.

#### 0.5 Tendencias en la radioastronomía

Actualmente se manifiesta en la radioastronomía una tendencia hacia mayores sensibilidades a todas las frecuencias. Dado que los receptores actuales están alcanzando el límite cuántico a muchas frecuencias, se tiende a utilizar zonas colectoras más amplias y anchuras de banda de funcionamiento mayores. Se están actualizando los telescopios existentes con receptores de banda ancha (de 1 a 8 GHz dependiendo de la frecuencia) tanto para las observaciones del continuum como de las rayas espectrales. Se encuentran en marcha algunos proyectos internacionales para construir radiotelescopios de nueva generación con superficies colectoras significativamente mayores.

Como ejemplos cabe citar:

- 1) el proyecto de red de antenas de un kilómetro cuadrado (SKA, *square kilometer array*) con el que se pretende construir una red gigante de interferómetros radioeléctricos con una área colectora total de un kilómetro cuadrado y líneas de base de hasta 3 000 km funcionando en la gama de frecuencias de 100 MHz a 25 GHz;
- 2) la red de antenas de baja frecuencia (LOFAR, *low frequency array*) en los Países Bajos y países vecinos, que es una red de interferómetros radioeléctricos con una superficie colectora total de 100 000 m<sup>2</sup> y líneas de base de hasta 1 000 km funcionando en la gama de frecuencias de 30 a 250 MHz;
- 3) la gran red de antenas milimétricas/submilimétricas de Atacama (ALMA, *Atacama large millimeter/submillimeter Array*) con 64 antenas situadas en una llanura a 5 km de altitud en los Andes funcionando en la gama de frecuencias de 30 a 850 GHz.

#### 0.6 Conclusiones

Gracias a la radioastronomía se han descubierto fenómenos radioeléctricos totalmente nuevos e imprevistos, tales como la radiación cósmica del fondo de microondas, los gases y plasmas interestelares ionizados, los púlsares, los quásares y los agujeros negros. También ha permitido realizar muchas comprobaciones de validación de las teorías fundamentales de la física, tal como la Relatividad General, y ha servido de laboratorio para la física fundamental que de otro modo habría resultado imposible.

El espectro utilizado por el servicio de radioastronomía tiene un valor económico y social considerable, aunque es difícil cuantificar los beneficios que comporta, ya que éstos alcanzan a la sociedad en conjunto, suelen estar asociados a aplicaciones desarrolladas con otras tecnologías, suelen realizarse en periodos de tiempo muy dilatados, y por ello son muy difíciles de predecir. El SRA ha desarrollado tecnologías con aplicaciones de gran difusión en ámbitos tan diversos como el diagnóstico médico, las telecomunicaciones, los patrones de tiempo y frecuencia, la observación de la Tierra, la informática, la navegación, la geofísica y la minería.

Muchas de las actividades del SRA se organizan a nivel mundial, por lo que las cuestiones relacionadas con el espectro deben considerarse mundialmente, ya que las decisiones unilaterales pueden repercutir en la utilización de la frecuencia implicada y las posibles mediciones en todo el mundo.

La inestabilidad del campo magnético del Sol puede dar lugar a erupciones solares energéticas y desencadenar fenómenos de eyección de la masa coronal. Éstas son capaces de degradar directamente, o perjudicar, muchas de las tecnologías electrónicas y las infraestructuras terrestres con los consiguientes costes, que pueden resultar exorbitantes. La monitorización en tierra de la emisión solar de ondas radioeléctricas ha constituido un medio fiable, coherente y barato de vigilancia de la actividad solar durante más de 60 años. Se trata de una tecnología madura, sobradamente conocida, que proporciona alertas tempranas de fenómenos transitorios.

# CAPÍTULO 1

# Introducción

#### 1.1 El Sector de Radiocomunicaciones y las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones

El presente Manual trata fundamentalmente de los aspectos de la radioastronomía pertinentes a la coordinación de frecuencias, es decir, de la utilización del espectro radioeléctrico en forma reglamentada para evitar la interferencia por acuerdo mutuo entre los servicios radioeléctricos. En el ámbito internacional, la utilización del espectro está reglamentada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), organismo especializado de la Organización de las Naciones Unidas.

El Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R), que forma parte de la UIT, se creó el 1 de marzo de 1993 sustituyendo al Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones (CCIR) y a su Secretaría, que realizaban funciones similares hasta dicha fecha. El UIT-R comprende las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones, las Asambleas de Radiocomunicaciones, la Junta del Reglamento de Radiocomunicaciones, las Comisiones de Estudio de Radiocomunicaciones, el Grupo Asesor de Radiocomunicaciones y la Oficina de Radiocomunicaciones dirigida por un Director de elección.

El Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, que es la base de la utilización planeada del espectro, es el resultado de las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones, antes denominadas Conferencias Administrativas Mundiales de Radiocomunicaciones (CAMR), que se celebran a intervalos de varios años. En estas conferencias, el objetivo es introducir nuevos requisitos para la utilización del espectro de forma que, en la medida de lo posible, resulte mutuamente aceptable para los representantes de los países participantes. Los resultados de cada CMR adoptan la forma de un tratado del que son signatarias las administraciones participantes. Las CMR también elaboran un orden del día para la siguiente CMR, y Resoluciones que suelen incluir peticiones de estudios relacionados con los puntos del futuro orden del día para que los lleven a cabo las Comisiones de Estudio. Igual que sucede en la mayoría de los sectores del derecho internacional, el cumplimiento de los reglamentos es difícil y depende en gran medida de la buena voluntad de los participantes. Preceden a las CMR las Reuniones Preparatorias de la Conferencia (RPC) que elaboran informes sobre asuntos de índole técnica, de explotación y reglamentarios que deban ser considerados por la Conferencia.

La Asamblea de Radiocomunicaciones establece las Comisiones de Estudio de Radiocomunicaciones (CE) para estudiar las Cuestiones y preparar proyectos de Recomendaciones sobre los aspectos técnicos, operacionales y de procedimiento/reglamentarios relativos a las radiocomunicaciones. Las CE del UIT-R tratan de asuntos tales como las bandas de frecuencias preferidas para los distintos servicios, los niveles umbral de interferencia inadmisible, la compartición entre servicios, los límites deseados de las emisiones, etc. También ofrecen contribuciones al proyecto de Informe de la RPC sobre los puntos del orden del día de su competencia. Las CE se dividen además en Grupos de Trabajo (GT) y Grupos de Tareas Especiales (GTE) que se ocupan de aspectos concretos de los trabajos. En estos momentos (2013), la estructura de CE del UIT-R es la siguiente:

Comisión de Estudio 1 Gestión del espectro

Comisión de Estudio 3 Propagación de las ondas radioeléctricas

Comisión de Estudio 4 Servicios por satélite

Comisión de Estudio 5 Servicios terrenales

Comisión de Estudio 6 Servicios de radiodifusión

Comisión de Estudio 7 Servicios científicos

Además de las anteriores, el Comité de Coordinación de Vocabulario (CCV) y la Comisión Especial para Asuntos Reglamentarios y de Procedimiento (CEARP) tienen responsabilidad sobre asuntos comunes a todos los grupos.

Para más información sobre el UIT-R y detalles específicos de las CE y los GT, sus actividades y documentación, puede consultarse el sitio web del UIT-R: http://www.itu.int/es/ITU-R/Pages/default.aspx .

El Grupo de Trabajo 7D, que trata de la radioastronomía, es uno de los cuatro Grupos de Trabajo de la CE 7, Servicios científicos, del UIT-R que también comprende GT que tratan de operaciones espaciales, investigación espacial, teledetección pasiva y activa, meteorología, y señales horarias y patrones de frecuencia. En la labor del GT 7D, suelen incluirse junto a la radioastronomía, la búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI) y la astronomía por radar desde la superficie terrestre, así como la radioastronomía desde el espacio en el marco del servicio de investigación espacial.

Las reuniones internacionales de las Comisiones de Estudio y los Grupos de Trabajo se efectúan a intervalos periódicos, normalmente una o dos veces al año, con la asistencia de delegados de numerosos países. Los Grupos de Tareas Especiales se establecen por un periodo limitado a fin de realizar ciertas actividades concretas, reuniéndose a los intervalos fijados conforme a sus necesidades. Los métodos de trabajo de las Comisiones de Estudio y sus Grupos de Trabajo se describen pormenorizadamente en la Resolución 1 del UIT-R. En general, las CE y los GT responden a las Cuestiones oportunas que se les hayan asignado. Las Respuestas a estas Cuestiones suelen revestir la forma de Recomendaciones o Informes UIT-R.

Las Recomendaciones UIT-R proporcionan un conjunto de información técnica, operacional y de procedimiento/reglamentario acordado por las administraciones participantes. Esta información se utiliza también para ofrecer contribuciones elaboradas en respuesta a puntos específicos del orden del día de las CMR y muchos de los resultados de las Comisiones de Estudio quedan de este modo incorporados al Reglamento de Radiocomunicaciones. Aparte de esto, las Recomendaciones e Informes UIT-R suelen considerarse, por sí mismas, como directrices autorizadas para los usuarios del espectro. Esto es particularmente cierto para las Recomendaciones UIT-R que, aunque no tienen carácter obligatorio, son ampliamente respetadas y se revisan y publican periódicamente. La mayor parte de la documentación importante sobre radioastronomía que figura en las Recomendaciones e Informes de la Comisión de Estudio 7 constituye la base de este Manual.

### **1.2** El Reglamento de Radiocomunicaciones y las atribuciones de frecuencias

Las atribuciones internacionales de frecuencias se llevan a cabo en las CMR y afectan a los 40 servicios de radiocomunicaciones, aproximadamente, definidos en el Reglamento de Radiocomunicaciones. A la CMR asisten representantes de las más de 190 administraciones miembro de la UIT de todo el mundo, muchas compañías de telecomunicaciones y de tecnología de la información y organizaciones científicas e internacionales reconocidas. Sólo las administraciones miembro pueden presentar propuestas y tener el derecho a voto, aunque otras organizaciones pueden intentar influir en los resultados de los diversos puntos del orden del día por otros medios. Una descripción más completa del funcionamiento de las CMR y de la participación de los radioastrónomos en éstas, figura, por ejemplo, en Gergely [2002].

Para fines de atribución de espectro, el mundo se divide en tres regiones: la Región 1 comprende Europa, África y Asia septentrional; la Región 2 comprende América del Norte y América del Sur; la Región 3 comprende Asia meridional y Australasia. Para una banda de frecuencias específica, las atribuciones pueden ser distintas en las diferentes regiones. Las bandas suelen compartirse entre dos o más servicios. En términos generales, las atribuciones pueden serlo a título primario o secundario. Un servicio con una atribución a título primario puede causar interferencia a un servicio secundario, pero no se permite que un servicio a título secundario cause interferencia a un servicio con una atribución a título primario en la misma banda. Las atribuciones de frecuencias figuran en el Artículo **5** del Reglamento de Radiocomunicaciones. La mayor parte de ellas se recogen en un cuadro de atribuciones; sin embargo, aparecen atribuciones adicionales en las notas numeradas a dicho cuadro.

Los asuntos relacionados con las atribuciones son competencia de organismos gubernamentales que varían considerablemente de un país a otro. En muchos de éstos, la administración del espectro radioeléctrico forma parte de las tareas de organismos más importantes que puede incluir también sectores tales como los servicios postales y telefónicos, el transporte, el comercio, etc. Dichos organismos pueden desempeñar importantes funciones en la preparación de las posiciones nacionales defendidas en las CMR. Las administraciones que participan en los tratados de las CMR conservan los derechos soberanos sobre el espectro dentro de sus fronteras nacionales y pueden desviarse de la reglamentación internacional siempre que ello no cause interferencia perjudicial en los territorios de otras administraciones. Al establecer el Reglamento de

Radiocomunicaciones, muchas administraciones han reclamado excepciones en ciertas bandas a fin de atender a necesidades nacionales particulares.

#### 1.3 La radioastronomía como servicio de radiocomunicación

La radioastronomía se reconoció oficialmente por primera vez como servicio de radiocomunicación en la CAMR-59. En aquella época, bajo el patrocinio del Consejo Internacional de Uniones Científicas (CIUC), tres uniones científicas formaron un comité, el Comité Interuniones para la Atribución de Frecuencias a la Radioastronomía y la Ciencia Espacial (IUCAF), con objeto de representar la utilización científica del espectro radioeléctrico. Las tres organizaciones fundadoras fueron la Unión Astronómica Internacional (UAI), la Unión Radiocientífica Internacional (URSI) y el Comité de Investigaciones Espaciales (COSPAR); todas ellas miembros del IUCAF. El IUCAF participa en las CMR como organización internacional reconocida sin derecho a voto. Los radioastrónomos trabajan con sus organismos internacionales o con el IUCAF para que sus preocupaciones sean consideradas en el Sector de las Radiocomunicaciones o incluidas en el orden del día de una CMR. Además del IUCAF, los comités nacionales y regionales, por ejemplo, el Comité de Estados Unidos sobre Frecuencias Radioeléctricas (CORF, Committee on Radio Frequencies), el Comité Europeo para los Fundamentos Científicos en materia de Frecuencias de Radioastronomía (ESF-CRAF) y el Comité de Frecuencias para la Radioastronomía de la Región Asia-Pacífico (RAFCAP, Radio Astronomy Frequency Committee in Asia-Pacific) facilitan la participación unida de los radioastrónomos. La Figura 1 presenta alguna de las relaciones existentes entre los organismos que participan en el proceso de coordinación de frecuencias para la radioastronomía.

#### FIGURA 1.1



Relación entre los organismos internacionales participantes en la coordinación de frecuencias para el SRA

AR: Asamblea de Radiocomunicaciones CE 7: Comisión de estudio 7

Radio-Astro\_11

#### siendo (por orden alfabético):

CORF	Comité sobre Frecuencias Radioeléctric	as (Committee on Radio Frequencies
------	--	------------------------------------

COSPAR Comité de Investigaciones Espaciales (Committee on Space Research)

CRAF Comité sobre Frecuencias Radioastronómicas (Committee on Radio Astronomical Frequencies)

RAFCAP	Comité de Frecuencias para la radioastronomía de la Región Asia-Pacífico ( <i>Radio Astronomy Frequency Committee in the Asia-Pacific Region</i> )
UAI	Unión Astronómica Internacional
CIUC	Consejo Internacional para la Ciencia
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
IUCAF	Comité Interuniones para la atribución de frecuencias a la radioastronomía y la ciencia espacial ( <i>Inter-Union Commission for the Allocation of Frequencies for Radio Astronomy and Space Science</i> )
AR	Asamblea de Radiocomunicaciones
CE 7	Comisión de Estudio 7
URSI	Unión Radiocientífica Internacional (Union Radio-Scientifique Internationale)
CMR	Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones

En el Artículo 1, Sección 1 del Reglamento de Radiocomunicaciones, se define la radioastronomía como la astronomía basada en la recepción de ondas radioeléctricas de origen cósmico. En el cuadro de atribución de bandas de frecuencias, las bandas de frecuencias que ofrecen mayor protección a la radioastronomía son aquéllas en las que el servicio de radioastronomía tiene una atribución a título primario compartida únicamente con otros servicios pasivos (no transmisores). En el siguiente grado de protección se encuentran las bandas para las cuales el servicio de radioastronomía tiene una atribución a título primario, pero en la que comparte esta categoría con uno o más servicios activos (transmisores). Menos protección se concede en las bandas en las que la atribución a la radioastronomía se efectúa a título secundario.

En muchas bandas de frecuencias, la protección se efectúa mediante notas en el Reglamento de Radiocomunicaciones y no con una entrada directa en el cuadro de atribución de bandas de frecuencias. Las notas son de varios tipos. Para una banda atribuida exclusivamente a los servicios pasivos, la nota número **5.340** del RR señala que todas las emisiones están prohibidas en esa banda. Otras notas se utilizan cuando la radioastronomía tiene una atribución en sólo una parte de la banda que aparece en el cuadro. Una forma distinta de nota se utiliza para las bandas o parte de éstas que no se atribuyen a la radioastronomía, pero que sin embargo se utilizan para observaciones astrofísicas de importancia. Insta a las administraciones a que adopten todas las medidas posibles para proteger la radioastronomía al efectuar asignaciones de frecuencias a otros servicios. Aunque dichas notas no proporcionen protección legal, con frecuencia han demostrado ser útiles para la radioastronomía cuando se necesita la coordinación con otros servicios. En el Apéndice 1 del presente Manual se enuncian las bandas de frecuencias atribuidas al servicio de radioastronomía.

### 1.4 Problemas de la atribución de frecuencias a la radioastronomía

Varias son las características de la radioastronomía que la distinguen de la mayoría de los servicios que utilizan el espectro radioeléctrico. La radioastronomía es un servicio pasivo, interesado sólo en la recepción de datos. Algunos otros servicios, como el de exploración de la Tierra por satélite, utilizan también la detección pasiva.

Las señales de la radioastronomía son muy débiles, con densidades de flujo de potencia inferiores en muchos órdenes de magnitud (decenas de dB) a las utilizadas por la mayor parte de los servicios. Los sistemas receptores de alta sensibilidad que se necesitan en radioastronomía son muy vulnerables a la interferencia. Esta vulnerabilidad se ve agravada por la naturaleza de las señales cósmicas. La mayoría de las señales tienen forma de ruido aleatorio, sin ninguna modulación característica que permita diferenciarlas de otras señales. La compartición de las bandas de frecuencias con los servicios activos es difícil y sólo suele ser posible cuando no existe visibilidad directa entre la antena radioastronómica y el transmisor en la misma banda. Otro problema es el de las emisiones no deseadas producidas en una banda de radioastronomía por servicios activos que funcionan en otras bandas. Este problema se está agravando con la proliferación de la modulación digital en banda ancha, en banda ultraancha y la utilización de técnicas de ensanchamiento del espectro. La práctica extendida de utilizar dispositivos inalámbricos sin licencia, por ejemplo, teléfonos inteligentes, tabletas y ordenadores portátiles que pueden transportarse fácilmente o instalarse en la proximidad de un radiotelescopio, agrava aún más este problema. Esta amenaza potencial para la radioastronomía hace que la mera conservación

de las atribuciones resulte insuficiente para conseguir que las observaciones radioastronómicas estén exentas de interferencia.

Los radioastrónomos no siempre pueden elegir las frecuencias a su antojo. Muchas de las señales cósmicas que estudian adoptan la forma de rayas espectrales que cubren una gama de frecuencias limitada. Estas rayas se generan a frecuencias características asociadas a las transiciones de átomos o moléculas entre estados energéticos cuantificados. Por este motivo, las atribuciones para la observación de esas rayas deben efectuarse en determinadas frecuencias. Las atribuciones para muchas de las rayas más importantes se efectuaron en el pasado, cuando el espectro radioeléctrico era mucho menos utilizado por otros servicios. Siguen detectándose importantes rayas nuevas y muchas de ellas no se encuentran dentro de las bandas atribuidas. Para las rayas espectrales de galaxias distantes, una frecuencia observada que normalmente esté fuera de la banda de radioastronomía puede ser desplazada por efecto Doppler fuera de la banda debido a la amplitud de los movimientos de las galaxias en relación con la Tierra. Por consiguiente, prácticamente todas las partes del espectro radioeléctrico pueden tener interés científico. Sin embargo, las atribuciones a los servicios activos hacen que las observaciones en muchas frecuencias estén gravemente limitadas e incluso sean imposibles. En algunos casos puede minimizarse la interferencia eligiendo para los telescopios emplazamientos o momentos de observación apropiados. Sería conveniente efectuar atribuciones adicionales a la radioastronomía, aunque hay diversos motivos que dificultarán el poder lograrlo. En cada CMR se elabora un nuevo provecto de orden del día para la siguiente conferencia y un orden del día provisional para la siguiente. Por consiguiente, incluso en el caso más favorable, se requiere una gran antelación y un esfuerzo sostenido para que un punto se incluya en el orden del día de una conferencia. Las propuestas para futuros puntos del orden del día son presentadas por las administraciones que, como norma general, tienden a seleccionar aquéllas que, en su opinión, benefician a sus intereses nacionales más apremiantes, por lo que es posible que se otorgue mayor prioridad a otros servicios. Incluso cuando un punto del orden del día relacionado con la radioastronomía cuenta con el respaldo de las administraciones con interés en la ciencia, éstas son relativamente escasas en el marco de la UIT, donde la mayoría de las decisiones se alcanzan por consenso.

Teniendo en cuenta que los radioastrónomos tienen grandes dificultades para compartir las frecuencias con los servicios activos y no pueden elegir las frecuencias a su antojo, la radioastronomía no encaja fácilmente en este sistema de atribuciones y reglamentos. Sin embargo, los servicios pasivos son bien considerados porque la serie de bandas atribuidas a la radioastronomía ha permitido efectuar una serie de importantes descubrimientos científicos y continúa siendo vital para la existencia del servicio.

#### REFERENCIAS

Gergely, T. [2002] Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones en «Spectrum Management for Radio Astronomy; proceedings of the IUCAF summer school held at Green Bank, W. VA, 9-14 de junio de 2002, Eds. B.M. Lewis y D.T. Emerson, Charlottesville, VA.

# CAPÍTULO 2

# Características del Servicio de Radioastronomía

#### 2.1 El SRA

La radioastronomía y el SRA se definen en el Artículo 1, números 13 y 58 del RR como la astronomía basada en la recepción de las ondas radioeléctricas de origen cósmico. El conjunto de estas emisiones cósmicas constituye el ruido de fondo cósmico de la ingeniería de comunicaciones. Por tratarse de un servicio pasivo, la radioastronomía no entraña la transmisión de ondas radioeléctricas en las bandas que se le han atribuido, por lo que el empleo de tales bandas no ocasiona ninguna interferencia perjudicial en ningún otro servicio. Por otro lado, siendo las emisiones radioeléctricas cósmicas extremadamente débiles en comparación con la intensidad de las transmisiones artificiales, las observaciones radioastronómicas resultan muy vulnerables a la interferencia procedente de otros servicios radioeléctricos. Actualmente, la radioastronomía utiliza el espectro de ondas electromagnéticas en frecuencias comprendidas entre menos de 1 MHz y alrededor de 1 000 GHz, gama determinada principalmente por las limitaciones de la tecnología disponible. En principio, todo el espectro radioeléctrico tiene interés científico para el SRA.

La radioastronomía comenzó en 1932 cuando Karl G. Jansky descubrió la existencia de ondas radioeléctricas de origen extraterrestre [Jansky, 1935] y ahora está consolidada como rama importante de la astronomía de observación. Dentro del sistema solar, ha aumentado nuestro conocimiento del Sol (por ejemplo, los procesos físicos responsables de las emisiones radioeléctricas de los plasmas), de los planetas y del espacio interplanetario. A una escala superior, los estudios multifrecuencia de las fuentes cósmicas de emisión radioeléctrica proporcionan información sobre las nubes de gases interestelares y la formación de estrellas dentro de las mismas, sobre los campos magnéticos interestelares, sobre la estructura y evolución de las galaxias, y sobre los parámetros cosmológicos del Universo en conjunto. Por otra parte, las emisiones de rayas espectrales de átomos y moléculas en sus frecuencias naturales nos informan de la composición, movimientos y características físicas de las nubes de gases interestelares. Gran parte del conocimiento derivado de la radioastronomía es único y no podría obtenerse si no fuera a las longitudes de onda radioeléctricas. Así por ejemplo, el hidrógeno neutral atómico (HI), elemento primigenio del Universo, sólo es detectable mediante su raya radioeléctrica a 1 420 MHz y su distribución y movimiento sólo pueden estudiarse midiendo la intensidad y el desplazamiento Doppler de su radiación.

En el estudio de las fuentes radioeléctricas cósmicas, los radioastrónomos miden todas las propiedades de la radiación electromagnética, a saber, su intensidad, frecuencia, polarización, dirección (posición en el cielo) y las variaciones temporales de estos parámetros. La densidad de flujo de potencia de la emisión radioeléctrica cósmica en la Tierra suele ser pequeña. La mayor parte de las emisiones tienen las características del ruido aleatorio. Constituyen excepciones a esto a) las emisiones pulsadas con una periodicidad extremadamente regular procedentes de los púlsares; b) los centelleos interplanetarios y ionosféricos procedentes de fuentes radioeléctricas de pequeño diámetro; c) las ráfagas irregulares provenientes de algunas estrellas (en particular del Sol); d) las variaciones a escala de algunos meses de ciertas fuentes radioeléctricas, entre ellos los efectos relacionados con las ráfagas de rayos gamma; y e) las variaciones asociadas al planeta Júpiter. Los mejores momentos para la observación de las fuentes radioeléctricas están generalmente subordinados a fenómenos naturales, tales como la posición de la fuente en el cielo y la rotación terrestre. A diferencia de lo que sucede en los servicios activos (transmisores), los radioastrónomos no pueden modificar el carácter de la señal recibida ni su potencia de transmisión ni puede codificarse la señal para aumentar su detectabilidad. Para un examen de la radioastronomía, y en particular de la instrumentación, de sus principales resultados y de la interpretación astrofísica, véase Burke y Graham-Smith, 2002.

#### 2.2 Origen y naturaleza de las emisiones radioeléctricas cósmicas

Hay varios mecanismos de generación de la emisión radioeléctrica cósmica. La radiación térmica la emite cualquier cosa cuya temperatura supere el cero absoluto. La emiten en particular el plasma caliente, así como el gas neutral (nubes de gas interestelar, envolturas calientes de las estrellas, etc.) y los cuerpos sólidos.

Además, se cree que radiación cósmica del fondo de microondas es la radiación térmica residual del gas caliente en una etapa muy temprana del desarrollo del Universo. La emisión no térmica, por otra parte, es principalmente radiación por efecto sincrotrón generada por los electrones relativistas que giran en espiral dentro de un campo magnético. Esto incluye las emisiones máser por efecto giroscópico-sincrotrón y electrón-ciclotrón, así como las emisiones de ondas de plasma. Por último, la radiación de rayas espectrales surge de las transiciones entre los estados energéticos de los átomos y moléculas individuales.

En el dominio de la frecuencia, estos procesos dan lugar a radiación de dos tipos característicos, a saber, la radiación del continuum de banda ancha y la radiación de rayas espectrales de banda estrecha.

#### 2.3 Radiación del continuum

Hay una amplia diversidad de fuentes de emisión radioeléctrica que emiten radiación del continuum: esta emisión se extiende de forma relativamente suave a lo largo de la mayor parte del espectro radioeléctrico. En general, las fuentes no térmicas muestran una dependencia de la intensidad con la frecuencia diferente de las fuentes de emisión térmica, aunque esto puede deberse a las nubes de gas y polvo existentes entre la fuente y el observador. Las observaciones del continuum del cielo revelan la existencia de numerosas fuentes radioeléctricas discretas superpuestas a un fondo amplio. La componente de fondo casi isótropa con una temperatura de brillo de 2,73 K se atribuye a la radiación térmica procedente de la época en la que el gas en el Universo se hizo por primera vez opaco a la emisión radioeléctrica. La estructura angular tenue de esta emisión, medida en frecuencias comprendidas entre 30 y 300 GHz, ofrece información de la densidad cosmológica y de otros parámetros del Universo. Estas mediciones se han llevado a cabo con radiómetros a bordo de globos y satélites [Smoot et al., 1992; Bennet et al., 2003; Planck collaboration et al., 2011] y en emplazamientos terrenales con atmósfera seca [Pryke et al., 2002] para minimizar los efectos debidos a la atmósfera terrestre. El fondo radioeléctrico también presenta un borde de emisión intensa asociado al plano de nuestra Galaxia (la Vía Láctea) con un máximo pronunciado en la dirección del Centro Galáctico. En algunas direcciones aparecen puntas de emisión fuera de este plano. La radiación galáctica tener carácter no térmico, pero el borde que define el plano galáctico también contiene una contribución térmica procedente del gas no ionizado.

La emisión del continuum que se observa desde múltiples direcciones del cielo es el resultado de una combinación de diferentes mecanismos físicos: esto se ilustra mediante el espectro de la Fig. 2.1. Para obtener este espectro, es necesario que las observaciones se efectúen a varias frecuencias a fin de estimar la combinación de mecanismos de emisión que intervienen, determinando por tanto las condiciones físicas dentro de la fuente y en torno a ella.



La densidad espectral de flujo de potencia (defp) se representa en función de la frecuencia. La línea con crestas de la izquierda representa la emisión de plasma, la diagonal desde el extremo superior izquierdo al inferior derecho representa la emisión de sincrotón y la cresta de la derecha representa la emisión térmica. La línea gruesa representa el espectro observado. Las magnitudes relativas de las distintas componentes pueden variar ampliamente de una fuente a otra. Las bandas (hasta 10 GHz) atribuidas a la radioastronomía se indican en el borde superior del diagrama.

Radio-Astro\_21

La mayoría de las fuentes discretas localizadas fuera del plano térmico son extragalácticas. Se trata principalmente de fuentes no térmicas que se han identificado ópticamente con galaxias y objetos cuasi estelares (quásares) distribuidos por el cielo de forma más o menos aleatoria. Las observaciones radioeléctricas de dichas fuentes se han traducido a un modelo que consta de un núcleo galáctico activo (AGN, *active galactic nucleus*) con un objeto central masivo que puede ser un agujero negro, rodeado de un disco de acrecimiento con flujo entrante de gases y chorros salientes de partículas de alta energía que interaccionan con campos magnéticos para producir amplias regiones de emisión radioeléctrica. Por otra parte, la mayoría de los objetos situados a pocos grados del plano galáctico pertenecen a nuestra Galaxia e incluyen fuertes térmicas asociadas a regiones de hidrógeno ionizado (regiones HII), estrellas (entre ellas el Sol) y planetas, así como fuentes no térmicas asociadas a restos de supernovas (residuos en expansión de estrellas que han explotado). También se observan emisiones radioeléctricas procedentes de regiones HII y de restos de supernovas situados en galaxias cercanas.

La radiación no térmica observada procedente de fuentes extragalácticas y de fuentes del plano galáctico (entre ellas tanto el fondo como los restos de supernovas) suelen estar polarizadas linealmente. Esta radiación es de tipo sincrotrón, producida por electrones que giran (y que por consiguiente se aceleran) en campos magnéticos que están polarizados linealmente con una dirección de polarización intrínseca perpendicular a la del campo magnético. Por este motivo, la existencia de polarización en la emisión radioeléctrica cósmica sugiere la presencia de un importante orden en los campos magnéticos asociados. Los estudios de la radiación polarizada de los restos de supernovas han proporcionado conocimientos sobre la interacción de estos restos con los campos magnéticos interestelares que los rodean. Sin embargo, la dirección intrínseca de polarización suele diferir de la dirección observada porque experimenta una rotación Faraday producida por los electrones en los campos magnéticos restos situados entre la fuente de la radiación y la Tierra. Dado que la rotación Faraday varía de forma inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia, puede medirse utilizando observaciones de la polarización realizadas en una gama de frecuencias. Los estudios de la rotación Faraday constituyen por consiguiente un potente medio para la determinación de las densidades electrónicas y de los campos magnéticos presentes en el medio interestelar.

Hay varios fenómenos de interés astrofísico que sólo se observan a frecuencias de 30 MHz o inferiores, por ejemplo, la absorción de la emisión del continuum por el gas ionizado de nuestra Galaxia, la autoabsorción en las radiogalaxias y quásares y la emisión de baja frecuencia del plasma tenue de los grupos de galaxias.

#### 2.3.1 Variabilidad en el tiempo de la radiación del continuum

La variabilidad de la emisión del continuum con el tiempo es relativamente frecuente. Puede adoptar diferentes formas: ráfagas que duran entre varios nanosegundos y varias horas, una emisión pulsante con periodos de repetición que varían entre unos pocos milisegundos y varios segundos, produciéndose cambios no periódicos en intervalos de semanas o meses, e incluso variaciones sinusoidales periódicas.

Una fuente notable de erupciones de corta duración de energía radioeléctrica de muchos tipos es el Sol, cuyas ráfagas proporcionan información importante sobre los procesos de la física del plasma implicados [McLean and Labrum, 1985]. Estas ráfagas son más intensas a frecuencias inferiores a 300 MHz. Además, las ráfagas procedentes de las perturbaciones de la atmósfera solar pueden aumentar progresivamente de frecuencia durante su tiempo de vida. En otras estrellas se han detectado también fulguraciones ópticas radioeléctricas correlacionadas; además, el planeta Júpiter es una fuente de intensas erupciones que se observan esporádicamente en frecuencias inferiores a 30 MHz [Roberts, 1963].

Júpiter presenta una forma especial de variabilidad, además de la emisión térmica constante de su disco y las antedichas ráfagas, debido a que su magnetosfera tiene cinturones de van Allen que generan una emisión sincrotrón no térmica polarizada concentrada hacia el ecuador de los cinturones y muy rica en haces. Dado que el eje magnético de Júpiter no coincide con su eje de rotación, tanto la intensidad como la dirección de polarización de las emisiones no térmicas observadas en la Tierra varía sinusoidalmente con la rotación del planeta.

Las estrellas enanas blancas con campos magnéticos intensos suelen mostrar grandes erupciones en el régimen radioeléctrico a frecuencias de hasta varios GHz, lo que permite estudiar el plasma en su atmósfera.

La ionosfera terrestre y el medio interplanetario del Sistema Solar pueden causar el centelleo de la emisión radioeléctrica observada de fuentes de pequeño tamaño angular a una velocidad que puede ser de hasta varios hercios. Las características observadas en este centelleo proporcionan información sobre el tamaño de la fuente, así como sobre la heterogeneidad y los movimientos del medio interplanetario. Se ha observado que algunos púlsares centellean, aunque esto está provocado por el medio interestelar y no por el interplanetario.

La emisión radioeléctrica de ciertas fuentes, especialmente los quásares, varía en una escala temporal de semanas. La emisión radioeléctrica de fuentes identificadas ópticamente tales como las supernovas, las novas y las fuentes de rayos X, presenta variaciones abruptas en función de los cambios de brillo óptico.

Tal vez las fuentes más interesantes de radiación pulsada desde un punto de vista astrofísico sean los púlsares. Su emisión pulsada extremadamente regular se descubrió en 1967 [Hewish et al., 1968]. Los púlsares son estrellas compuestas de neutrones casi en su totalidad (es decir, de materia en un estado muy condensado) y la mayor parte de los conocidos están situados en nuestra galaxia con periodos de pulsación que oscilan entre 1 milisegundo y 8 segundos. Aunque el periodo de pulsación viene determinado por la rotación de la estrella, la duración del pulso, que depende del ángulo entre la línea de visibilidad con el observador y el eje de rotación de la estrella, suele ser un pequeño porcentaje del periodo de pulsos. Las emisiones de los púlsares suele observarse en la gama de frecuencias 30 MHz-3 GHz utilizando técnicas de promediación de pulsos: para definir los perfiles del pulso medio suelen necesitarse tiempos de integración de varias horas. Algunos púlsares tienen pulsos que están intrínsecamente polarizados linealmente. En su paso a través del medio interestelar hacia la Tierra, todos los pulsos se dispersan y su dirección de polarización se modifica por la rotación Faraday (véase § 2.3.2). Las mediciones de la dispersión junto con la rotación Faraday permiten determinar la densidad electrónica y la intensidad de campo magnético a lo largo de la visual. Análogamente, las mediciones del tiempo de llegada del impulso realizadas a lo largo de varios años permiten determinar las posiciones y los movimientos de los púlsares en el cielo (movimientos propios). Los datos sobre la estabilidad a largo plazo de los púlsares, particularmente los que tienen periodos de milisegundos, apoyan su utilización potencial como futuros relojes patrón para los servicios horarios (véase el Capítulo 7). Varios observadores de todo el mundo están colaborando para cronometrar un conjunto de púlsares de milisegundos con la expectativa de que este proyecto tan vanguardista les permita en última instancia detectar directamente la radiación de ondas gravitacionales.

Las intensidades del campo magnético en la superficie de los púlsares se estiman en el rango de  $10^4 - 10^9$  Tesla y, en los casos extremos de los magnetares, pueden incluso alcanzar 10<sup>10</sup> T. Este campo magnético tan intenso combinado con tan rápida rotación induce campos eléctricos de gran intensidad y crea un denso plasma relativista en torno a la estrella de neutrones que transporta una corriente de gran intensidad. La intensa emisión radioeléctrica coherente se ve como un subproducto de la disipación de energía en la magnetosfera, pero aunque es claramente detectable, comprende sólo una pequeñísima fracción (10<sup>-4</sup>-10<sup>-6</sup>) de la pérdida de energía global del plasma. Estas extraordinarias condiciones del campo electromagnético son totalmente distintas a las condiciones que se pueden encontrar en cualquier otro lugar del Universo y no se pueden conseguir en los laboratorios terrestres. Los púlsares constituyen un banco de pruebas ideal para la física en ese dominio y el mero hecho de que su proceso de emisión radioeléctrica siga sin ser bien comprendido tras más de cuarenta años, es prueba evidente de que queda mucho trabajo de investigación por hacer. Las emisiones radioeléctricas suelen observarse con mayor facilidad en la gama de frecuencias 30 MHz-1,5 GHz, pero muchas fuentes todavía tienen flujos medios de algunos centenares de  $\mu$ Jy (100 $\mu$ Jy = -300 dB(Wm<sup>-2</sup>Hz<sup>-1</sup>)) a 40 GHz y pueden detectarse mediante antenas grandes de hasta 90 GHz. Para definir el perfil del pulso medio, suelen utilizarse técnicas de promediación de pulsos enganchados en fase con tiempos de integración que van de minutos a horas. La sensibilidad de detección de un radiotelescopio para una emisión pulsada periódica con un pulso medio de *S<sub>min</sub>* viene dada por [Lorimer & Kramer, 2005]:

$$S_{\min} = \frac{kT_{sys}}{G\sqrt{n_p\Delta t \cdot \Delta \nu}} \sqrt{\frac{W}{P - W}}$$

Siendo *G* la ganancia de la antena,  $n_p$  el número de polarizaciones promediadas,  $\Delta t$  el tiempo de integración,  $\Delta v$  la anchura de banda observada, *P* el periodo del pulso y *W* la anchura de éste. Por consiguiente, para cualquier nivel de emisión promedio, el umbral de detección para los pulsos estrechos (W<<P) resulta proporcional a la raíz cuadrada del ciclo de trabajo  $\eta=W/P$ . Al mismo tiempo, el flujo de cresta es un factor de  $\eta^{-1}=P/W$  más intenso que el flujo medio. Por consiguiente, el umbral de detección para pulsos de cresta estrecha es proporcional a  $\eta^{-1/2}$ , aumentando para pulsos más estrechos de la misma intensidad promedio.
### FIGURA 2.2

#### Dispersión de los pulsos por el medio interestelar (banda-L)



La dispersión por el plasma interestelar muy tenue provoca una distorsión de los pulsos radioeléctricos de modo que los éstos llegan antes a las frecuencias altas que los mismos pulsos a frecuencias más bajas, siendo el retardo inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia. Debido a las largas distancias implicadas, el efecto es bastante intenso en la mayor parte de las bandas de frecuencias que distorsionarán los perfiles de los pulsos incluso en anchuras de banda de unos pocos MHz. La señal tiene que desdispersarse antes de que el perfil pueda detectarse.

Los impulsos radioeléctricos de algunas fuentes tienen polarización lineal. Cuando atraviesan el medio interestelar en dirección a la Tierra, los pulsos se dispersan, y su dirección y polarización se alteran por la rotación Faraday (véase § 2.3.2). Las mediciones combinadas de esta dispersión y de la rotación Faraday ofrecen información sobre las densidades electrónicas y los campos magnéticos a lo largo de la visual hacia el púlsar.

Las mediciones de los tiempos de llegada de los pulsos, realizadas a lo largo de varios años, ofrecen información sobre las posiciones y los movimientos de los púlsares en el cielo (movimientos propios) y de los movimientos orbitales de la estrella de neutrones si hay compañeros presentes. Los primeros planetas extrasolares se descubrieron en órbita alrededor de un púlsar. La extraordinaria estabilidad y predictibilidad de sus emisiones radioeléctricas pulsadas hace de los púlsares instrumentos idóneos para los ensayos de la relatividad general. La emisión de ondas gravitacionales por los púlsares en órbitas próximas a otras estrellas de neutrones y enanas blancas es una de las predicciones de la relatividad general que se ha confirmado gracias a la medición de lo tiempo de los pulsos. Se están realizando más ensayos de la relatividad general, así como comparaciones de sus predicciones en los tiempos de llegada de los pulsos procedentes de muchos púlsares repartidos por toda la esfera celestial. Esta metodología detectará posiblemente ondas gravitacionales de larga longitud de onda.

La precisión de los tiempos de los púlsares a largo plazo es actualmente del orden de 0,1 µs para las mejores fuentes y su estabilidad de temporización se aproxima a la de los mejores patrones horarios atómicos. La intrínseca estabilidad de temporización de los púlsares permite utilizar potencialmente estas fuentes como futuros relojes patrón para los servicios horarios (véase el Capítulo 7) y para la navegación autónoma de sondas por el espacio profundo.

#### Radioastronomía

La mayoría de los 2 000 púlsares, aproximadamente, detectados están situados en nuestra Galaxia. Las búsquedas de los púlsares las efectúan los observatorios radioeléctricos con muchos fines, siendo uno de ellos el de descubrir púlsares que orbiten en torno a otro objeto compacto tal como otra estrella de neutrones, un púlsar, o incluso un agujero negro. Estas búsquedas se efectúan por grabación del ruido radioeléctrico procedente de una posición particular y la posterior búsqueda de variaciones periódicas que oscilen entre milisegundos y varios segundos.

### Transitorios y variabilidad a corto plazo en los púlsares

En un púlsar, los perfiles de los pulsos varían de uno a otro, aunque el perfil medio permanezca inalterado durante muchos años y sea análogo a su «huella dactilar». Esta variación del pulso individual puede ser débil o fuerte y es diferente para cada objeto. En los casos más extremos, se observan los denominados pulsos radioeléctricos gigantes en los que el flujo de cresta puede superar el promedio en un factor de  $10^6 - 10^8$ .

### FIGURA 2.3

### Pulso radioeléctrico gigante del Púlsar del Cangrejo a 15,35 GHz [Jessner et al., 2010]

El flujo de cresta es 6 800 Jy (~9000 K para una antena de 100m). La duración total de la grabación representada es de 1,2  $\mu$ s.



Radio-Astro\_23

Los pulsos gigantes están fuertemente polarizados y su emisión de cresta se produce en escalas de tiempo inferiores al nanosegundo. Se cree que su mecanismo de emisión es una forma extrema de la emisión radioeléctrica ordinaria de los púlsares, aunque esto tampoco se entiende demasiado bien. Los radioastrónomos detectan y analizan pulsos gigantes utilizando grabadoras de transitorios con altas velocidades de muestreo y un mecanismo de activación que se dispara por señales intensas de corta duración que se destacan del ruido.

No todos los pulsos emitidos por los púlsares pueden detectarse todo el tiempo. El centelleo interestelar (semejante al parpadeo de las estrellas en el cielo nocturno, pero causado por la variabilidad del medio interestelar) modula su emisión radioeléctrica y, por tratarse de un efecto del plasma, también depende estrechamente de la frecuencia. El centelleo de los púlsares se estudia para comprender mejor la estructura y la distribución de densidad de los electrones en el medio interestelar en una diversidad de escalas de longitud.

Sin embargo, algunos púlsares emiten radiación con bastante irregularidad. Algunos de estos objetos pueden omitir algunos pulsos (nulos) de vez en cuando, pero en ciertos casos, el púlsar está en silencio durante muchos días antes de reiniciar repentinamente sus emisiones. Un caso extremo de este comportamiento se observa en

los radiotransitorios rotantes (RRATS, *rotating radio transients*), que son fuertes emisores, pero con estallidos aleatorios que sólo duran unos pocos segundos, pudiendo detectarse tal vez una o dos veces al día. Su detección y análisis exige una gran antena que funcione en una banda de ondas radioeléctricas que esté libre de interferencia esporádica pulsada.

### 2.3.2 Medición de la radiación del continuum

Para establecer la dependencia de la emisión del continuum respecto de la frecuencia, es necesario efectuar mediciones a varias frecuencias. Basta con llevarlas a cabo a intervalos de una octava, aproximadamente, ya que el espectro de la emisión del continuum suele ser regular, aunque para efectuar la medición de la dispersión del púlsar, la rotación de Faraday, así como para los espectros de autoabsorción, es conveniente que los intervalos estén menos separados. La sensibilidad de la medición aumenta cuando se utilizan grandes anchuras de banda fraccionarias en cada frecuencia, siendo el 10% conveniente y considerándose el 2% el mínimo. Las bandas SRA atribuidas para realizar mediciones del continuum se presentan en el Capítulo 3.

La mayoría de las observaciones de las fuentes radioeléctricas a frecuencias superiores a unos 100 MHz se realizan utilizando antenas de reflector parabólico «parábolas». Éstas pueden utilizarse aisladas o en redes de antenas. El factor limitativo en la utilización de telescopios radioeléctricos de una sola parábola es su resolución angular, que corresponde a la anchura del haz a potencia mitad. Sólo pueden cartografiar efectivamente estructuras del cielo que subtiendan ángulos de al menos varias anchuras de haz de la antena, por ejemplo, la emisión radioeléctrica procedente de la Vía Láctea, el Sol, la Luna y la procedente de algunas galaxias próximas. El procedimiento habitual consiste en dividir la zona a cartografiar en una serie de exploraciones ráster, separadas por no más de media anchura de haz, o en un entramado de puntos con una separación no superior a la mitad de la anchura del haz. Puede llevar mucho tiempo elaborar un mapa con la hipótesis implícita de que la fuente y el entorno en el que se efectúan las mediciones no cambian durante este tiempo. En general, el procedimiento de medición se organiza de modo que durante una exploración, el punto de observación está a una elevación constante. Gracias a ello, el efecto de la radiación del suelo en los lóbulos laterales permanece constante durante una exploración y puede suprimirse más fácilmente. Sin embargo, en muchos casos, los telescopios de una sola parábola tienen anchuras de haz mayores que las fuentes observadas. En estos casos las mediciones constan de una determinación de las propiedades (por ejemplo, intensidad, polarización) de la radiación procedente de la dirección de la fuente que se investiga, comparada con las de la radiación procedente de regiones próximas del cielo. Si es posible, se elabora el mapa de la zona circundante a la fuente, incluida ésta, de modo que puede estimarse el exceso de emisión sobre el fondo. Sin embargo, cuando no haya tiempo suficiente, se efectuarán las mediciones de la fuente acotando ésta, como se ilustra en la Fig. 2.4. En la mayor parte de los casos, las propiedades medidas no varían significativamente durante la observación, y pueden promediarse en el tiempo para cada dirección en el cielo. En la Fig. 2.5 se representan las variaciones a la salida del receptor en una escala de tiempo reducida. La contribución de la fuente a la radiación total recibida se calcula como S - (A + B + C + D) / 4, donde las letras representan los niveles de potencia promediados, recibidos en las correspondientes direcciones de puntería de la Fig. 2.4.

#### FIGURA 2.4

Direcciones de puntería normales para una medición con antena parabólica única



Procedimiento habitual empleado para medir una fuente que se encuentre en el haz de la antena, cuando éste se apunta hacia S. Cuando apunta hacia esta dirección, la antena «ve», además de la fuente, las emisiones procedentes del fondo del cielo, la emisión del suelo que captan los lóbulos laterales de la antena y las emisiones no deseadas cuyas propiedades pueden ser función de la dirección y del tiempo. Los puntos circundantes A, B, C y D son puntos próximos en el firmamento. Los círculos representan los niveles a - 10dB, o inferiores, del diagrama de radiación de la antena.

Radio-Astro\_24

### FIGURA 2.5

Ejemplo de salida del receptor en una observación con parábola única



Salida del receptor (en ordenadas) en función del tiempo (en abscisas) durante parte de una observación como la de la Fig. 2.4. La parte izquierda del registro corresponde a la posición B, la parte central a la posición S y la derecha a la posición D. En este registro, el tiempo de integración sólo es de unos pocos segundos. Posteriormente, los datos pueden promediarse a lo largo del tiempo empleado en cada posición, y los resultados de muchos conjuntos de direcciones de puntería pueden promediarse otra vez para alcanzar la relación *S/N* deseada.

Radio-Astro\_25

Una red de dos o más antenas utilizadas para conformar un mapa o como útil de formación de imágenes tiene un campo de conformación aproximadamente igual a la anchura del haz a media potencia de una de las antenas individuales que constituyen la red de antenas, y una resolución igual a la anchura del haz a media potencia de la red de antenas. Cada par de antenas de la red de antenas se comporta como un filtro espacial, que mide la amplitud de una componente de Fourier de la imagen. Si hay antenas suficientes en la red de antenas y están organizadas con arreglo a una configuración bidimensional, pueden determinarse en poco tiempo suficientes componentes de Fourier para producir una imagen a partir de una sola observación. Otras redes de antenas, tal como el telescopio radioeléctrico de síntesis del Dominion Radio Astrophysical Observatory de Canadá, son lineales, dependiendo por tanto de la rotación terrestre para explorar la fuente desde diferentes direcciones. A continuación se efectúan observaciones de doce horas de duración, aproximadamente, con separaciones de antena fijas, que pueden ampliarse con observaciones adicionales en un periodo posterior utilizando separaciones de antenas diferentes a fin de recopilar la información suficiente como para crear la imagen. Las antenas sólo se mueven a nuevas posiciones entre cada observación de doce horas. El haz de antena sintética de la red de antenas no se forma mientras no se hayan procesado los datos de toda la serie de observaciones sobre una fuente, momento en el que corresponde al tamaño del píxel de la imagen resultante. En la Fig. 2.6 se muestra un ejemplo de imagen sintética. Las observaciones de esta imagen radioeléctrica se llevaron a cabo a una frecuencia de 5 GHz con una red de antenas muy grande (VLA, very large array), la red de 27 antenas situadas en Nuevo México.

### FIGURA 2.6

### Ejemplo de imagen radioeléctrica



Imagen radioeléctrica obtenida del continuum a 5 GHz, procedente de observaciones con la VLA de 27 antenas. El objeto es la fuente radioeléctrica Casiopea A, resto de una supernova que explotó hace unos 300 años. El diámetro angular de la estructura principal es de 4 min de arco (aproximadamente 1/7 del diámetro de la Luna) y la resolución angular de 0,6 s de arco, aproximadamente. En la explosión de la supernova se expulsaron a gran velocidad las capas exteriores de una estrella masiva, pero fu eron frenadas por el gas interestelar y el material de expansión más lento procedente de capas más profundas de la estrella se está rompiendo, lo que produce estructuras de tipo burbuja. En las longitudes de onda ópticas, sólo son visibles algunos filamentos débiles con los telescopios de mayor tamaño. La imagen es cortesía de NRAO/AUI.

Radio-Astro\_26

El conocimiento de los mecanismos implicados en la generación de la emisión radioeléctrica se obtiene de la estructura detallada y la distribución espacial de la emisión radioeléctrica de las fuentes. Salvo en circunstancias especiales, en las que la fuente quede oculta por la Luna u otro planeta, la cartografía de alto detalle exige la utilización de redes de antenas ampliadas. Por ejemplo, un sistema con una resolución angular de unos pocos segundos de arco debe tener dimensiones de 100 000 longitudes de onda, aproximadamente. Por consiguiente, el detalle angular más alto en una escala de  $10^{-4}$  segundos de arco puede conseguirse utilizando la técnica VLBI, recurriendo a varias antenas situadas a miles de kilómetros de distancia. La resolución resultante supera como mínimo en un orden de magnitud la mejor resolución angular que puede conseguirse actualmente en cualquier otra parte del espectro electromagnético. Tal es así que el Sistema Internacional de Referencia Celeste, adoptado por la Unión Astronómica Internacional para efectuar mediciones de la posición, se define por las posiciones de arco utilizando observaciones VLBI [Ma *et al.*, 1998]. Dado que todas las antenas de una red VLBI deben funcionar a la misma frecuencia y que las antenas individuales puede estar en países distintos o en una órbita terrestre, es necesario proteger las bandas de frecuencias de la radioastronomía a nivel mundial.

# 2.4 Radiación de las rayas espectrales

La radiación de las rayas espectrales de las nubes de gas interestelar la generan los átomos y moléculas cuando ganan o pierden energía en las colisiones entre sí o las excitan estrellas próximas. Para una nube que contenga un átomo o molécula particular, esto se traduce en transiciones entre sus estados energéticos y la creación de una serie de rayas espectrales discretas. Las intensidades relativas, frecuencias y anchuras de las rayas vienen determinadas por condiciones físicas y dependen de los tipos de moléculas, su densidad, temperatura y distribución de velocidad. En ciertas circunstancias, la intensidad de la raya aumenta enormemente debido al efecto máser, que suele producirse en las regiones donde se forman estrellas, y en las envolventes circunestelares de las estrellas evolucionadas. También se observan rayas estelares cuando los átomos o moléculas de una nube absorben selectivamente radiación de una fuente del continuum de fondo observada a través de la nube.

Aunque la frecuencia intrínseca (en reposo) de una raya espectral viene definida por el átomo/molécula y transición específicos, la raya observada también está desplazada por efecto Doppler con arreglo a la velocidad radial del átomo/molécula, es decir, por su movimiento relativo al observador a lo largo de la visual. Para velocidades superiores, la frecuencia observada está desplazada significativamente con respecto al valor intrínseco, lo que puede a menudo situarse mucho más allá del límite inferior de frecuencia de una banda atribuida a la radioastronomía. Los desplazamientos por efecto Doppler en la raya HI de 1 420 MHz, en particular, nos han permitido explicar la estructura de brazos en espiral y la rotación tanto de nuestra Galaxia como de muchas galaxias externas.

# 2.4.1 Tipos de rayas espectrales

Los radioastrónomos observan varios tipos de rayas espectrales. Su primera detección fue la transición hiperfina del sentido del espín del hidrógeno atómico neutral (HI) en la proximidad de 1 420 MHz (longitud de onda 21 cm) efectuada en 1951 [Ewen and Purcell, 1951]. Este descubrimiento marcó un hito importante en la astronomía, ya que las posteriores observaciones de la misma en todo el cielo proporcionaron la primera imagen global de la verdadera estructura en espiral de nuestra propia Galaxia. Actualmente sabemos que el hidrógeno atómico neutral es abundante en la mayor parte de las galaxias, lo que confiere a esta raya espectral su importancia fundamental para el estudio del gas interestelar en las galaxias en general. Sin embargo, las grandes velocidades de recesión de las galaxias distantes hacen que la emisión de HI esté frecuentemente desplazada por efecto Doppler a frecuencias por debajo del límite inferior de la banda protegida para la radioastronomía 1 400 – 1427 MHz. Tal es así que la raya se ha observado en absorción a frecuencias tan bajas como 300 MHz.

La primera raya molecular (correspondiente al radical hidroxilo, OH, a 1,6 GHz) se detectó en 1963. Transcurrieron varios años antes de que se detectasen otras moléculas, pero desde entonces se han observado más de 10 000 transiciones procedentes de más de 125 moléculas interestelares distintas y sus isótopos. En Lovas [2004] figura una lista de transiciones detectadas en la gama de frecuencias 0,7 a 350 GHz. Siendo realistas, sólo puede otorgarse protección en el RR a una selección de estas rayas, aunque es conveniente otorgar protección a aquéllas que se consideren de gran importancia astrofísica (véase el Capítulo 3).

Las rayas moleculares aparecen en distintos tipos de nubes de gas interestelar: nubes difusas de baja densidad; nubes oscuras frías y aisladas que suelen contener moléculas que son inestables en la Tierra; y nubes moleculares densas gigantes que contienen regiones HII, estrellas jóvenes calientes y estrellas en proceso de formación. Estas nubes contienen una fracción sustancial de la masa total de nuestra Galaxia, aunque las moléculas sólo constituyen una fracción de su masa, ya que la mayor parte de ella sigue siendo hidrógeno atómico. Las rayas máser son un tipo especial de raya espectral que sólo está soportado por unas pocas moléculas. Se crean por amplificación de la radiación del continuum de fondo, son intensas en nuestra Galaxia, tienen una banda de frecuencias muy estrecha y suelen estar polarizadas. Tienen un interés particular debido a que pueden apuntar a regiones densas de las nubes donde se están formando estrellas, aunque algunas pueden asociarse a las envolventes ampliadas de estrellas evolucionadas. En algunas galaxias hay una emisión máser ultraluminosa de banda ancha (megamáser) cerca del núcleo. Los estudios de las rayas espectrales de nuestra Galaxia proporcionan información sobre las nubes moleculares, el proceso de la evolución estelar, la estructura en espiral de la Galaxia y su evolución química. Estas propiedades también se estudian actualmente en otras galaxias con las nuevas redes de antenas de mejor sensibilidad y mayor resolución angular. Los estudios de las galaxias más distantes conllevan por lo general las rayas espectrales de las especies más abundantes, hidrógeno y monóxido de carbono. La observación de las rayas moleculares de las fuentes astronómicas también ha conducido a la simulación en laboratorio de sus entornos, a fin de sintetizarlas: un ejemplo es la molécula de cadena de carbón HC7N, cianohexatrina, [Kroto et al., 1978]. Un interesante subproducto de los trabajos de este laboratorio fue el descubrimiento de la molécula esférica de carbón, C<sub>60</sub>, buckminsterfullereno [Kroto et al., 1985].

Las rayas de recombinación las emiten los átomos de hidrógeno, helio, carbono, etc., cuando sus electrones pasan de un estado energético superior a otro inferior. Este proceso suele tener lugar tras la recombinación de un ion y un electrón. Las primeras rayas de recombinación radioeléctrica fueron descubiertas en 1964 por astrónomos de la URSS [Sorotchenko *et al.*, 1964]. Las regiones gaseosas ionizadas y calientes generan muchas rayas de recombinación que se extienden por todo el espectro radioeléctrico [Lilley and Palmer, 1968]; algunas de éstas están situadas en bandas atribuidas al SRA para observaciones del continuum, mientras que unas pocas se encuentran en bandas SRA que fueron atribuidas originalmente para la observación específica de otras rayas, tales como HI u OH. La observación de la intensidad y forma de las rayas de recombinación permite determinar las condiciones físicas que dan lugar a ellas. Las más brillantes de estas rayas se originan a partir de las transiciones entre niveles de energía adyacentes de hidrógeno, siendo sus intensidades normalmente un pequeño porcentaje de la intensidad del continuum térmico.

## 2.4.2 Medición de las rayas espectrales

Los observadores de las rayas espectrales dividen la banda de paso del receptor en un gran número de canales de idéntica anchura, lo que suele conseguirse por procesamiento digital de la señal de frecuencia intermedia (FI). En la Fig. 2.7 se representa una salida característica de una observación con una sola parábola. Dado que la emisión de una raya espectral intrínsecamente estrecha de un átomo o molécula de una nube de gas cósmico siempre está ensanchada por efecto Doppler debido a los movimientos en el seno de la nube, puede utilizarse su intensidad y la gama de frecuencias para inferir los movimientos y la masa del material interior de la nube. Los datos espectrales no corregidos están distorsionados por la desviación con respecto a la homogeneidad de la banda de paso del receptor, por las ondas estacionarias en la red de antenas y su sistema de alimentación, y por la falta de uniformidad en el espectro de la radiación de fondo. Estos efectos se suprimen normalmente por repetición de la observación a una frecuencia central ligeramente diferente para eliminar los efectos de la pendiente y el rizo en la banda de paso y por repetición de la observación en posiciones cercanas en el cielo a fin de eliminar la emisión de fondo. En el caso de la emisión HI, que aparece por doquier en todo el cielo, la eliminación total de los efectos de la radiación recibida en los lóbulos laterales es difícil y exige un conocimiento detallado de todo el diagrama de la antena y cierto conocimiento de la distribución de gas cósmico interrogado involuntariamente por los lóbulos laterales.

### FIGURA 2.7

Ejemplo de un perfil de la raya espectral del hidrógeno neutro a la salida del receptor



La ordenada es la salida del receptor, que es proporcional a la temperatura de la antena, y la abscisa es el número del canal espectral. Las anchuras de banda de los canales se eligen de forma que sean apropiadas para la anchura de la raya espectral. El perfil de la raya espectral monofrecuencia que se muestra está ensanchado como consecuencia de los movimientos existentes en la nube del material emisor, a lo largo de la visual desde la antena. La línea de base inclinada es una combinación de ef ectos instrumentales y posiblemente de la radiación del fondo que se corrigen en la reducción de datos posterior.

Radio-Astro\_27

El perfil observado de la raya o variación de la intensidad en función de la frecuencia está desplazado por efecto Doppler respecto a la frecuencia natural en reposo por la velocidad radial de los átomos/moléculas relativa al observador. El movimiento turbulento en el seno de la nube amplía su perfil. Si la velocidad radial,  $v_r$ , es pequeña en comparación con la velocidad de la luz, c, su relación con el desplazamiento relativo en

frecuencia  $\frac{\Delta f}{f}$  vendrá dada por:

$$v_r = -c \frac{\Delta f}{f}$$

Obsérvese aquí que el signo de la velocidad es positivo para la recesión, lo que se traduce en un desplazamiento de frecuencia negativo, que es una disminución en la frecuencia que suele denominarse «desplazamiento al rojo». Dado que la rotación diferencial en el seno de nuestra galaxia impone un rango de  $\pm 300$  km/s sobre las velocidades radiales de los objetos galácticos, los datos de la velocidad proporcionan efectivamente una tercera dimensión a lo largo de la visual para suplementar la distribución prevista del material en el cielo. Además, la polarización de alguna emisión de rayas, tal como la emisión máser, puede informarnos acerca de los campos magnéticos en dichas nubes.

En el caso de una nube molecular, la intensidad del perfil a una frecuencia específica depende de la temperatura, la densidad de la columna y la profundidad óptica a dicha frecuencia. Estos parámetros suelen poder separarse si la raya contiene una estructura asociada a la división hiperfina de los niveles energéticos implicados en la transición; de lo contrario, estos parámetros podrán determinarse a partir de la comparación entre diferentes transiciones de la misma molécula. Esta última técnica es particularmente útil para suprimir las ambigüedades provocadas por una emisión ópticamente espesa gracias al estudio de una de sus modificaciones isotópicas interestelares menos abundantes, tal como el estudio de <sup>13</sup>CO en vez de of <sup>12</sup>CO.

Las rayas espectrales en el dominio radioeléctrico son particularmente idóneas para la medición precisa de los desplazamientos Doppler, ya que las radiofrecuencias pueden medirse fácilmente con gran precisión. Las mediciones Doppler de las fuentes máser de agua en órbita a 22 GHz, se combinaron con mediciones VLBI de gran resolución angular de sus posiciones para determinar directamente la distancia  $7,2 \pm 0,3$  Mpc<sup>6</sup> de la

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> 1 megaparsec (Mpc) =  $3,26 \times 10^6$  años luz.

galaxia NGC4258. Ésta fue la primera medición directa de la distancia a un objeto extragaláctico totalmente independiente de cualquier otra secuencia de mediciones astronómicas [Herrnstein *et al.*, 1999].

Cada canal del espectrómetro se corresponde con un rango específico de desplazamientos Doppler, por ello, cuando se utiliza una red de antenas para efectuar observaciones de las rayas espectrales, se crea una imagen independiente para cada canal. En muchos casos, el desplazamiento Doppler puede interpretarse como una distancia, lo que permite construir un cubo de datos en vez de un mapa de datos, constituyendo así una representación de la distribución del material de la fuente en un cubo de espacio.

Se necesitan muchas horas de observación para conseguir la sensibilidad necesaria para extraer conclusiones de interés astrofísico. La ausencia de interferencia perjudicial es necesaria en anchuras de banda suficientemente amplias como para incluir tanto las rayas desplazadas por efecto Doppler como las bandas de comparación que bordean la emisión de las rayas.

# 2.5 Práctica moderna

Los radioastrónomos se benefician de muchos adelantos técnicos, gracias a los cuales se incrementa progresivamente la frecuencia central de los receptores prácticos, disminuyen su temperatura de sistema y aumentan su anchura de banda. Se han universalizado los servidores digitales y la adquisición de datos se efectúa bajo control del ordenador. Esto facilita la realización de integraciones cortas, cuya salida puede inspeccionarse para investigar la existencia de RFI grave antes de promediarse para obtener la sensibilidad deseada. Los adelantos en caudal de datos y el coste de la memoria, cada vez más asequible, permiten salvar grandes conjuntos de datos para procesarlos en diferido mediante algoritmos aún más complejos. Uno de los mayores beneficiarios de muchos de estos adelantos son los astrónomos que efectúan observaciones VLBI. Hoy en día pueden utilizar simultáneamente telescopios emplazados tanto en América del Norte como en América del Sur, así como en Europa y Sudáfrica, para obtener los datos en tiempo real. La anchura de banda de esta clase de observaciones se ha duplicado varias veces en el último decenio, con la consiguiente ganancia de sensibilidad. En cambio, las observaciones VLBI ya se almacenaban anteriormente en cinta magnética, para reducirlas en los meses siguientes: los observadores de rayas espectrales de parábola única no han tenido que soportar esta cadencia tan lenta desde los años 1960.

Los adelantos técnicos han alterado el modo preferible de realizar observaciones del continuum. Actualmente suele ser mejor desplegar un espectrómetro digital que permita identificar una RFI grave y suprimirla de los espectros antes de obtener la medición del continuum. Análogamente, la mayor anchura de banda de los receptores actuales ha animado a efectuar observaciones fuera de las bandas atribuidas al SRA, a los observadores que tienen la suerte de disponer de modos de observación con cierta protección intrínseca frente a la RFI. Otros observadores obtienen datos astronómicamente válidos utilizando filtros de ranura (a veces del tipo superconductor a alta temperatura) para suprimir las intensas señales no deseadas adyacentes a la banda de paso elegida, así como para utilizar la elevada resolución espectral para poder aplicar técnicas de escisión a las características de banda estrecha antrópicas. Sin embargo, el SRA sigue necesitando bandas atribuidas tanto para poder calibrar con precisión los datos como para reducir al mínimo la ambigüedad introducida por la RFI en las observaciones de rayas espectrales.

# 2.6 Conclusión

La radioastronomía desempeña un papel esencial en la investigación de la física fundamental y la astronomía del Universo. Muchos de los fenómenos estudiados no son observables en otras partes del espectro electromagnético, como es el caso de la emisión de las rayas procedentes del hidrógeno atómico neutro, la radiación del fondo de microondas y su estructura angular, de importancia fundamental en la cosmología, las grandes regiones de emisión de sincrotrón asociadas a las galaxias radioeléctricas y las regiones de formación de estrellas oscurecidas por el polvo a las longitudes de ondas ópticas, por citar unos pocos. Además, el dominio radioeléctrico nos proporciona la mayor resolución angular alcanzable y las posiciones angulares más precisas, así como los desplazamientos por efecto Doppler más precisos. De este modo, la radioastronomía en vez de limitarse a ser una más de las tradicionales técnicas ópticas, desempeña el papel de principal descubridor en muchos campos de la astronomía y la astrofísica.

### REFERENCIAS

BENNET, C. et al. [2003] «The Microwave Anisotropy Probe (MAP) Mission», Astrophysical Journal, Vol 583 (1), p. 1–23.

BURKE, B. F. and GRAHAM-SMITH, F. [2002] *An introduction to radio astronomy*, 2<sup>a</sup> edición, Cambridge University Press.

EWEN, H. I. and PURCELL, E. M. [1951] Observations of a line in the galactic radio spectrum. *Nature*, Vol. 168, p. 356.

HERRNSTEIN, J. R., MORAN, J. M., GREENHILL, L. J., DIAMOND, P. J., INOUE, M., NAKAI, N., MITOSHI, M., HENKEL, C. and RIESS, A. [1999] A geometric distance to the galaxy NGC4258 from orbital motions in a nuclear gas disk. *Nature*, Vol. 158, p. 539.

HEWISH, A., BELL, S. J., PILKINGTON, J. D. H., SCOTT, P. F. and COLLINS, R. A. [1968] Observations of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, Vol. 217, p. 709-713.

JANSKY, K. G. [1935] A note on the source of interstellar interference. Proc. IRE. Vol. 23, p. 1158-1163.

JESSNER, A. *et al.* [2010] Giant pulses with nanosecond time resolution detected from the Crab pulsar at 8.5 and 15.1 GHz, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 524, id.A60

KROTO, H. W., KIRBY, C., WALTON, D. R. M., AVERY, L. W., BROTEN, N. W., MACLEOD, J. M. and OKA, T. [1978] The detection of cyanohexatriyne in Heiles's cloud 2. *Astrophys. J.*, Vol. 219, L133-L137.

KROTO, H. W., HEATH, J. R., OBRIEN, S. C., CURL, R. F. and SMALLEY, R. E. [1985] *C*<sub>60</sub>: Buckminsterfullerine. *Nature*, Vol. 318, p. 162-163.

LILLEY, A. E. and PALMER, P. [1968] Tables of radio frequency recombination lines. *Astrophys. J.*, Suppl. Series, Vol. 16, p. 143-174.

D. LORIMER, D. and KRAMER, M [2005]: Handbook of Pulsar Astronomy, CUP, Cambridge (U.K.).

LOVAS, F. J. [2004] Recommended rest frequencies for observed interstellar molecular microwave transitions – 2002 revision. *J. Phys. and Chem. Ref. Data.* Vol. 33, p. 117-335.

MA, C, ARIAS, E. F., FEY, A. L., GONTIER, A.-M., JACOBS, C. S., SOVERS, O. J., ARCHINAL, B. A. and CHARLOT, P. [1998] The international celestial reference frame as realized by very long baseline interferometry. *Astron. J.*, Vol. 116, p. 516-546.

MCLEAN, D. J. and LABRUM, N. R. [1985] *Studies of the sun at metre wavelengths*. Cambridge University Press.

Planck Collaboration et. al [2011] Planck early results. I. The Planck Mission, Astron. and Astrophys, Vol. 536, 1

PRYKE, C., HALVERSON, N. W., LEITCH, E. M., KOVAC, J., CARLSTROM, J. E., HOLZAPFEL, W. L. and DRAGOVAN, N. [2002] Cosmological parameter extraction from the first season of observations with the degree angular scale interferometer. *Astrophys. J.*, Vol. 568, p. 46-51.

ROBERTS, J. A. [1963] Radio emission from the planets. Planet and Space Sci., Vol. 11, p. 221.

SMOOT, G. F. and 27 co-authors [1992] Structure of the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophys. J.*, Vol. 396, L1-L5.

SOROTCHENKO, R. L., BORODZITCH, O. S., DRAVSKIKH, Z. V. and KOLBASSOV, V. A. [1964] Proc. of the XIIth General Assembly of the International Astronomical Union, Hamburgo (Alemania).

# CAPÍTULO 3

# Bandas de frecuencias preferidas para las observaciones radioastronómicas

# 3.1 Consideraciones generales

## 3.1.1 Observaciones radioastronómicas en tierra

La elección de una frecuencia para las observaciones radioastronómicas en tierra depende de los fenómenos que se hayan de observar y de la atmósfera de la Tierra (la troposfera y la ionosfera). La ionosfera afecta considerablemente a las observaciones en frecuencias situadas por debajo de 30 MHz; las mediciones realizadas sugieren que la frecuencia práctica más baja para observaciones en tierra es de 1,5 MHz aproximadamente (véase § 3.2.1); la mayoría de las observaciones se efectúan en frecuencias situadas por encima de 20 MHz aproximadamente. La troposfera influye en las observaciones por la absorción, sobre todo del oxígeno ( $O_2$ ) y del vapor de agua ( $H_2O$ ). La atenuación debida a la resonancia de estas moléculas se representa esquemáticamente en la Fig. 3.1. Los efectos de otros componentes atmosféricos, por ejemplo CO, NO y NO<sub>2</sub>, son despreciables. Aunque algunos de los primeros descubrimientos de la emisión radioeléctrica galáctica se hicieron a algunas decenas de megahercios (es decir, a longitudes de onda decamétricas), la radioastronomía ha progresado con carácter general hacia mediciones a frecuencias más elevadas.

Han contribuido a esa tendencia la elevada resolución angular alcanzable con las antenas parabólicas, el desarrollo de los preamplificadores de bajo ruido y la serie de descubrimientos efectuados a frecuencias superiores. Los radioastrónomos han sido pioneros en el uso de frecuencias superiores a 100 GHz y actualmente realizan observaciones en frecuencias que llegan a alcanzar los 1 000 GHz. La gran red de antenas milimétricas y submilimétricas de Atacama (ALMA) entró en servicio en 2010<sup>7</sup>. ALMA está situada en el desierto de Atacama, Chile, y puede efectuar observaciones en una gama de frecuencias entre 30 y 950 GHz, con una resolución espacial de hasta 0,01 segundos de arco. Se prevé que ALMA revele la estructura detallada de los lugares de formación de planetas, la formación y evolución de galaxias, la relación entre el Universo y el origen de la vida, y se adentre en otras fronteras de la astronomía.

Aparte de los nuevos resultados obtenidos en altas frecuencias, existen fenómenos de interés astrofísico que sólo se producen a frecuencias inferiores, por ejemplo, la absorción libre-libre en las regiones ionizadas de la Galaxia, la autoabsorción en las fuentes radioeléctricas extragalácticas y los mecanismos de emisión de baja frecuencia procedente de plasmas tenues en los grupos de galaxias.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> <u>http://www.almaobservatory.org/</u>

### FIGURA 3.1





### 3.1.2 Observaciones radioastronómicas desde el espacio

La observación desde el espacio es un campo bastante nuevo de la radioastronomía. Se han realizado varias observaciones radioastronómicas desde el espacio, por ejemplo, las efectuadas por COBE, SWAS, ODIN HALCA, WMAP y PLANCK.

Los satélites COBE, WMAP y PLANCK detectaron y cartografiaron la anisotropía de la radiación cósmica del fondo de microondas. La distribución de la radiación cósmica del fondo de microondas medida entre 30 y 857 GHz por el satélite PLANCK (véase la Fig. 3.2) permitió determinar la edad del Universo en 13 800 millones de años y establecer el siguiente hecho notable: los átomos ordinarios (también denominados bariones) sólo constituyen un 4,9% del Universo, la materia oscura (materia no integrada por átomos) es el 26,8% y la energía oscura, en forma de constante cosmológica, constituye el 68,3% del Universo, lo que provoca la aceleración de la velocidad de expansión del Universo.

Los satélites SWAS y ODIN observaron frecuencias superiores a 100 GHz y hasta unos 500 GHz a fin de medir las abundancias de  $H_2O$ ,  $O_2$  y otras rayas espectrales que son casi imposibles de observar desde la superficie terrestre.

El satélite HALCA se combinó con radiotelescopios en tierra para llevar a cabo los primeros experimentos de VLBI espacial en 1,4, 1,6 y 5 GHz. Como no hay absorción atmosférica, la radioastronomía desde el espacio es muy importante para efectuar observaciones en gamas de frecuencias en las que las observaciones en tierra no sean viables.

### FIGURA 3.2



Imagen detallada de todo el cielo correspondiente al Universo primigenio, a partir de 15,5 meses de datos del satélite PLANCK

Imagen detallada de todo el cielo correspondiente al Universo primigenio creada a partir de 15,5 meses de datos del satélite PLANCK. Esta imagen revela fluctuaciones térmicas de 13 770 millones de años de antigüedad (que se muestran como diferencias de color) que corresponden a las semillas que crecieron hasta convertirse en galaxias. La señal de nuestra Galaxia se restó utilizando los datos multifrecuencia. Esta imagen muestra una gama de temperaturas de  $\pm$  500 µK.

Fuente: ESA y la Planck Collaboration<sup>8</sup>

# 3.2 Bandas preferidas del continuum

Uno de los objetivos de las observaciones del continuum en radioastronomía consiste en definir la variación en frecuencia de la radiación con suficiente detalle para poder extraer conclusiones sobre los mecanismos físicos responsable de la misma. Para estos fines suelen ser adecuado efectuar observaciones en cada octava del espectro, aunque pueden necesitarse separaciones menores en ciertas circunstancias. La elección de las bandas de frecuencias debe extenderse desde la frecuencia más baja a la frecuencia más alta en la que suelen ser posibles las observaciones desde tierra, o sea, desde alrededor de 10 MHz a 1000 GHz.

En el Capítulo 4 se indica que, en lo que atañe a las observaciones del continuum, la señal mínima detectable es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la anchura de banda. Por consiguiente, en ausencia de interferencia, el empleo de la máxima anchura de banda utilizable logra una mayor sensibilidad y un aumento de la eficacia de utilización de los principales instrumentos astronómicos. En el caso de las observaciones sensibles se considera que el 2% es una anchura de banda mínima y el 10% la deseable.

En el Cuadro 3.1 se enumeran las bandas atribuidas al SRA por debajo de 275 GHz, que son las preferibles para las observaciones del continuum (véase asimismo el Cuadro 3 de la Recomendación UIT-R RA.314).

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> <u>http://www.esa.int/Planck</u>

### CUADRO 3.1

Bandas de frecuencias (MHz)	Anchura de banda (%)	Banda de frecuencias (GHz)	Anchura de banda (%)			
13,360-13,410	0,37	10,6-10,7	0,94			
25,550-25,670	0,49	0,49 15,35-15,4				
37,5-38,25	1,98	22,21-22,50	1,30			
73-74,6 <sup>(1)</sup>	2,17	23,6-24,0	1,68			
150,05-153 <sup>(2)</sup>	1,95	31,33-31,8	1,58			
322-328,6	2,03	42,5-43,5	2,33			
406,1-410	0,96	76-116	41,67			
608-614 <sup>(3)</sup>	0,98	123-158,5	25,22			
1 400-1 427	1,91	164-167	1,81			
1 660-1 670	0,60	200-231,5	14,60			
2 655-2 700	1,68	241-248	2,87			
4 800-5 000	4,08	250-275	9,52			

# Bandas de frecuencias atribuidas al SRA por debajo de 275 GHz, preferibles para las observaciones del continuum

<sup>(1)</sup> Atribución (a título primario) en la Región 2, protección recomendada en las Regiones 1 y 3.

<sup>(2)</sup> Atribución (a título primario) en la Región 1, Australia e India.

<sup>(3)</sup> Atribución (a título primario) en la Región 2, la Zona Africana de Radiodifusión (606-614 MHz), China (606-614 MHz) e India. En la Región 1 (con la excepción de la Zona Africana de Radiodifusión) y en la Región 3, esta banda está atribuida a título secundario.

El grado de protección otorgado a la radioastronomía no es igual en todas las bandas y en algunos casos resulta insuficiente para que los radioastrónomos puedan utilizarlas al máximo. Algunas bandas están compartidas con servicios (transmisores) activos; en el Capítulo 5 se presentan algunos problemas de compartición a título de ejemplo.

Si existe una protección adecuada, algunas de las bandas enumeradas en el Cuadro 3.1 satisfarán los requisitos mínimos (anchura de banda del 2%) para la cobertura de frecuencias. Sin embargo, conviene señalar que en el caso de las bandas más ampliamente utilizadas en la región de bajas frecuencias (por debajo de 76 GHz), sólo la banda de 1 414 MHz se acerca al criterio de la anchura de banda mínima. La situación es totalmente distinta en la región de frecuencias por encima de 76 GHz, ya que las atribuciones al SRA se ampliaron en la CMR-2000 y cuatro de las bandas superan el 10% de la anchura.

# 3.2.1 Observaciones a bajas frecuencias

Las observaciones radioastronómicas en frecuencias inferiores a 50 MHz se enfrentan a problemas inexistentes en las frecuencias más altas. Hay pocos instrumentos que proporcionen una alta resolución angular: las antenas deben estar separadas varios kilómetros para obtener una resolución superior a un grado. Un pequeño número de laboratorios radioastronómicos de baja frecuencia han desarrollado interferómetros para superar los problemas de resolución espacial. Por debajo de 13 MHz no hay bandas atribuidas al servicio de radioastronomía y debido a que las comunicaciones mundiales, tal como el servicio de radiodifusión, utilizan ampliamente las bajas frecuencias para la propagación por reflexión ionosférica, es extremadamente difícil hallar en la Tierra emplazamientos de radioastronomía aislados de señales interferentes. Las observaciones en baja frecuencia se ven afectadas por la ionosfera terrestre, que varía con la hora del día, la época del año y la actividad solar. Las observaciones sólo pueden ser fructíferas si la densidad electrónica de la región F es lo suficientemente baja como para permitir la penetración de la ionosfera, y está relativamente libre de irregularidades en una escala kilométrica para minimizar la distorsión del haz de la antena provocada por efecto del centelleo. Las escasas observaciones efectuadas desde la Tierra por debajo de 10 MHz se han realizado en

Tasmania que, en lo que respecta a la restricción ionosférica y a la ausencia de interferencia, es un emplazamiento ventajoso. Las observaciones allí efectuadas en los primeros años 60 permiten pensar que 1,5 MHz es un límite práctico para las mediciones radioastronómicas con base en tierra.

## 3.2.2 Observaciones del continuum en las bandas de alta frecuencia

A frecuencias por encima de 20 GHz, la necesidad de evitar los máximos de absorción atmosférica debidos al oxígeno (O<sub>2</sub>) y al vapor de agua (H<sub>2</sub>O), determina la selección de las bandas. Las bandas de frecuencias para las observaciones del continuum deben elegirse dentro de los mínimos de absorción atmosférica, cerca de 30, 90, 150, 240, 410, 470, 670 y 850 GHz. De este modo, a pesar de las restricciones de la elección, se dispone de intervalos de muestreo apropiados. En la actualidad, las bandas de radioastronomía están atribuidas solamente hasta una frecuencia de 275 GHz; la política adoptada de incluir frecuencias de rayas espectrales importantes determinó la elección de gamas de frecuencias en muchas bandas, en particular en altas frecuencias. Hay que señalar que las bandas 275-323 GHz, 327-371 GHz, 388-424 GHz, 426-442 GHz, 453-510 GHz, 623-711 GHz, 795-909 GHz y 926-945 GHz se han identificado para ser utilizadas por las administraciones para el servicio de radioastronomía. En el siglo XXI, es cada vez mayor la demanda de los servicios activos para utilizar bandas de frecuencias más altas para las comunicaciones en banda ancha. La CMR-12 adoptó la revisión de la nota **5.565**, que establece que «todas las frecuencias en la gama 1 000-3 000 GHz pueden ser utilizadas por los servicios activos y pasivos».

El Informe UIT-R RA.2189 presenta los resultados del estudio sobre compartición de frecuencias entre 275 y 3 000 GHz y concluye que la compartición entre los servicios de radioastronomía y los activos en la gama 275-3 000 GHz no es problemática, basándose en los siguientes motivos:

En el suelo, suponiendo condiciones próximas a las del caso más desfavorable, un enlace terrenal en la gama 275-1 000 GHz tendría que estar a gran altitud funcionando a la máxima potencia disponible con una gran parábola apuntando directamente a un telescopio para producir una señal en el mismo que pudiera tener un efecto perjudicial sobre la observación radioastronómica. Por encima de los 1 000 GHz, el interferente tendría que estar a menos de un kilómetro de distancia funcionando a la máxima potencia y apuntando directamente al telescopio para superar los umbrales de interferencia; lo más probable sería que un enlace situado a tan poca distancia estuviera controlado por el propio observatorio radioeléctrico o estuviera sujeto a coordinación local oficiosa con el observatorio afectado.

En el caso de interferencia procedente de transmisores a bordo de aeronaves, la pequeña anchura de haz del interferente y el elevado nivel de la atenuación atmosférica del trayecto oblicuo exigirían que el avión volase directamente sobre el radiotelescopio para crear interferencia. Una única pasada desde un transmisor a 275 GHz y volando a 7 000 m o más por encima del observatorio no superaría el nivel de interferencia establecido en la Recomendación UIT-R RA.769. Las desviaciones de aproximadamente 1/5 km del rumbo del aeroplano podrían dar lugar a que no se observase ninguna interferencia.

En el caso de la interferencia procedente de satélites, los factores en competencia del tamaño del haz proyectado, la velocidad relativa y pérdida en el espacio libre se combinan para producir un diferencial relativamente constante por encima de los niveles de umbral de interferencia de la Recomendación UIT-R RA.769 extrapolados. Suponiendo que no existen pérdidas adicionales debidas a la atenuación atmosférica, así como que el satélite pase directamente sobre el telescopio, el nivel promedio de señal durante una integración de 2 000 segundos es de 18 o más dB por debajo del umbral de interferencia. Incluso los niveles de señal de los satélites geoestacionarios se prevé que no sean suficientes para producir interferencia.

# 3.3 Bandas para la observación de las rayas espectrales

La observación de las rayas espectrales debe efectuarse a frecuencias específicas definidas por la emisión espectral de los átomos o moléculas de interés. En los Cuadros 3.2 y 3.3 se muestran las rayas que se consideran de mayor importancia astrofísica por debajo de 1 000 GHz (véanse también los Cuadros 1 y 2 de la Recomendación UIT-R RA.314). Asimismo, la Recomendación UIT-R RA.1860, Bandas de frecuencia preferidas para las mediciones de radioastronomía en la gama 1-3 THz, contiene una lista muy larga de rayas espectrales entre 1 000 y 3 000 GHz de la máxima importancia astrofísica. Se basan en una recomendación de la Unión Astronómica Internacional (UAI) y fueron seleccionadas entre las miles de rayas detectadas o

predichas en el espectro de microondas<sup>9</sup>. Las listas de las rayas más importantes se actualizan periódicamente en la UAI, y las revisiones se incorporan a las Actas de la UAI, así como a las Recomendaciones UIT-R RA.314 y RA.1860.

Las anchuras de banda necesarias para las observaciones de las rayas de los Cuadros 3.2 y 3.3 están determinadas por los desplazamientos de las frecuencias en reposo de las rayas por efecto Doppler, como consecuencia de la velocidad radial de la región emisora con respecto a la del observador en la Tierra. Para la mayoría de las moléculas, la gama de velocidades es de  $\pm 300$  km/s, teniendo en cuenta las velocidades radiales de las rayas espectrales que se producen dentro de nuestra Galaxia. Esto equivale a un desplazamiento por efecto Doppler de  $\pm 0,1\%$  de la frecuencia en reposo. Sin embargo, se están observando redes espectrales en un número creciente de las emisiones procedentes de otras galaxias, y se han ampliado las bandas mínimas propuestas para algunas rayas de los cuadros hasta frecuencias inferiores, con objeto de acomodar las velocidades de recesión superiores de esas galaxias. Ya se han detectado muchas rayas en galaxias exteriores. Por este motivo, las bandas mínimas propuestas tendrán que ser convenientemente modificadas en futuras revisiones de las listas.

Muchas de las rayas enunciadas en el Cuadro 3.2 se recogen en el Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias del Reglamento de Radiocomunicaciones como de interés para el SRA. En algunos casos, la anchura de banda reconocida es por lo menos igual a la indicada en el Cuadro 3.2, pero la categoría de la atribución es inferior a la de título primario y se le otorga escasa protección. Esto es particularmente cierto a longitudes de onda mayores, ya que la apertura del lóbulo lateral isótropo,  $\lambda^2/4\pi$ , aumenta de 10 mm<sup>2</sup> a 30 GHz a 10<sup>5</sup> m<sup>2</sup> a 300 MHz. En el caso de algunas rayas espectrales observadas en las emisiones procedentes de galaxias distantes, por ejemplo OH (1 612, 1720 MHz), CH (3 263, 3 335 y 3 349 MHz), H<sub>2</sub>CO (4 830 MHz) y H<sub>2</sub>O (22,235 GHz), las anchuras de banda atribuidas resultan insuficientes. La mayoría de las miles de rayas espectrales detectables, no incluidas en el Cuadro 3.2, no tienen protección en absoluto. Con la creciente utilización del espectro por los servicios activos, la observación de muchas de estas rayas puede finalmente resultar imposible. Éste es en particular el caso de las rayas situadas en las bandas atribuidas a servicios con transmisiones procedentes de satélites, o cerca de ellas.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Splatalogue – Database for Astronomical Spectroscopy <u>http://splatalogue.net/;</u> the Cologne Database for Molecular Spectroscopy <u>http://www.astro.uni-koeln.de/cdms;</u> NIST Recommended Rest Frequencies for Observed Interstellar Molecular Microwave Transitions <u>http://physics.nist.gov/cgi-bin/micro/table5/start.pl</u>

# CUADRO 3.2

# Rayas de radiofrecuencia de la máxima importancia para la radioastronomía a frecuencias por debajo de 275 GHz

Sustancia	Frecuencia en reposo	Notas <sup>(1)</sup>	
Deuterio (DI)	327,384 MHz	327,0-327,7 MHz	
Hidrógeno (HI)	1 420,406 MHz	1 370,0-1 427,0 MHz	(2), (3)
Radical hidroxilo (OH)	1 612,231 MHz	1 606,8-1 613,8 MHz	(4)
Radical hidroxilo (OH)	1 665.402 MHz	1 659,8-1 667,1 MHz	(4)
Radical hidroxilo (OH)	1 667,359 MHz	1 661,8-1 669,0 MHz	(4)
Radical hidroxilo (OH)	1 720,530 MHz	1 714,8-1 722,2 MHz	(3), (4)
Metiladina (CH)	3 263.794 MHz	3 252.9-3 267.1 MHz	(3), (4)
Metiladina (CH)	3 335,481 MHz	3 324,4-3 338,8 MHz	(3), (4)
Metiladina (CH)	3 349,193 MHz	3 338,0-3 352,5 MHz	(3), (4)
Formaldehído (H <sub>2</sub> CO)	4 829,660 MHz	4 813,6-4 834,5 MHz	(3), (4)
Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	6 668.518 MHz	6 661.8-6 675.2 MHz	(3)
Helio $({}^{3}\text{He}^{+})$	8 665.650 MHz	8 657.0-8 674.3 MHz	(3), (6)
Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	12.178 GHz	12.17-12.19 GHz	(3), (6)
Formaldehído (H <sub>2</sub> CO)	14.488 GHz	14.44-14.50 GHz	(3), (4)
Ciclopropenilideno ( $C_2H_2$ )	18.343 GHz	18.28-18.36 GHz	(3), (4), (6)
Vapor de agua $(H_2O)$	22.235 GHz	22.16-22.26 GHz	(3), (4)
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	23.694 GHz	23.61-23.71 GHz	(4)
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	23.723 GHz	23.64-23.74 GHz	(4)
Amoniaco (NH <sub>2</sub> )	23 870 GHz	23.79-23.89 GHz	(4)
Monóxido sulfúrico (SO)	30,002 GHz	29,97-30,03 GHz	(6)
Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	36,169 GHz	36,13-36,21 GHz	(6)
Monóxido de silicio (SiO)	42,519 GHz	42,47-42,57 GHz	(3)
Monóxido de silicio (SiO)	42,821 GHz	42,77-42,86 GHz	
Monóxido de silicio (SiO)	43,122 GHz	43,07-43,17 GHz	
Monóxido de silicio (SiO)	43,424 GHz	43,37-43,47 GHz	
Monosulfuro bicarbónico (CCS)	45,379 GHz	45,33-45,44 GHz	(6)
Monosulfuro de carbono (CS)	48,991 GHz	48,94-49,04 GHz	
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	61,1 GHz	56,31-63,06 GHz	(5), (6), (7)
Agua de deuterio (HDO)	80,578 GHz	80,50-80,66 GHz	
Ciclopropenilideno (C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> )	85,339 GHz	85,05-85,42 GHz	
Monóxido de silicio (SiO)	86,243 GHz	86,16-86,33 GHz	
Formilio (H <sup>13</sup> CO <sup>+</sup> )	86,754 GHz	86,66-86,84 GHz	
Monóxido de silicio (SiO)	86,847 GHz	86,76-86,93 GHz	
Radical etinilo (C <sub>2</sub> H)	87,3 GHz	87,21-87,39 GHz	(5)
Cianuro de hidrógeno (HCN)	88,632 GHz	88,34-88,72 GHz	(4)
Formilio (HCO <sup>+</sup> )	89,189 GHz	88,89-89,28 GHz	(4)
Cianuro de hidrógeno (HNC)	90,664 GHz	90,57-90,76 GHz	
Diazenilio (N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> )	93,174 GHz	93,07-93,27 GHz	
Monosulfuro de carbono (CS)	97,981 GHz	97,65- 98,08 GHz	(4)
Monóxido sulfúrico (SO)	99,300 GHz	99,98-100,18 GHz	
Metilacetileno (CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H)	102,5 GHz	102,39-102,60 GHz	(5)
Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	107,014 GHz	106,91-107,12 GHz	
Monóxido de carbono (C <sup>18</sup> O)	109,782 GHz	109,67-109,89 GHz	
Monóxido de carbono ( <sup>13</sup> CO)	110,201 GHz	109,83-110,31 GHz	(4)
Monóxido de carbono (C <sup>17</sup> O)	112,359 GHz	112,25-112,47 GHz	(6)
Radical ciano (CN)	113,5 GHz	113,39-113,61 GHz	(5)

CUADRO 3.2	(fin)
------------	-------

Sustancia	Frecuencia en reposo	Banda mínima propuesta	Notas <sup>(1)</sup>
Agua de deuterio (HDO)	80,578 GHz	80,50-80,66 GHz	
Ciclopropenilideno (C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> )	85,339 GHz	85,05-85,42 GHz	
Monóxido de silicio (SiO)	86,243 GHz	86,16-86,33 GHz	
Formilio (H <sup>13</sup> CO <sup>+</sup> )	86,754 GHz	86,66-86,84 GHz	
Monóxido de silicio (SiO)	86,847 GHz	86,76-86,93 GHz	
Radical etinilo (C <sub>2</sub> H)	87,3 GHz	87,21-87,39 GHz	(5)
Cianuro de hidrógeno (HCN)	88,632 GHz	88,34-88,72 GHz	(4)
Formilio (HCO <sup>+</sup> )	89,189 GHz	88,89-89,28 GHz	(4)
Cianuro de hidrógeno (HNC)	90,664 GHz	90,57-90,76 GHz	
Diazenilio (N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> )	93,174 GHz	93,07-93,27 GHz	
Monosulfuro de carbono (CS)	97,981 GHz	97,65- 98,08 GHz	(4)
Monóxido sulfúrico (SO)	99,300 GHz	99,98-100,18 GHz	
Metilacetileno (CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H)	102,5 GHz	102,39-102,60 GHz	(5)
Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	107,014 GHz	106,91-107,12 GHz	
Monóxido de carbono (C <sup>18</sup> O)	109,782 GHz	109,67-109,89 GHz	
Monóxido de carbono (13CO)	110,201 GHz	109,83-110,31 GHz	(4)
Monóxido de carbono (C <sup>17</sup> O)	112,359 GHz	112,25-112,47 GHz	(6)
Radical ciano (CN)	113,5 GHz	113,39-113,61 GHz	(5)
Monóxido de carbono (CO)	115,271 GHz	114,88-115,39 GHz	(4)
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	118,750 GHz	118,63-118,87 GHz	(7)
Formaldehído (H <sub>2</sub> <sup>13</sup> CO)	137,450 GHz	137,31-137,59 GHz	(6)
Formaldehído (H <sub>2</sub> CO)	140,840 GHz	140,69-140,98 GHz	
Monosulfuro de carbono (CS)	146,969 GHz	146,82-147,12 GHz	
Monóxido nítrico (NO)	150,4 GHz	149,95-150,85 GHz	(5)
Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	156,602 GHz	156,45-156,76 GHz	
Vapor de agua (H <sub>2</sub> O)	183,310 GHz	183,12-183,50 GHz	
Monóxido de carbono (C <sup>18</sup> O)	219,560 GHz	219,34-219,78 GHz	
Monóxido de carbono (13CO)	220,399 GHz	219,67-220,62 GHz	(4)
Radical ciano (CN)	226,6 GHz	226,37-226,83 GHz	(5)
Radical ciano (CN)	226,8 GHz	226,57-227,03 GHz	(5)
Monóxido de carbono (CO)	230,538 GHz	229,77-230,77 GHz	(4)
Monosulfuro de carbono (CS)	244,953 GHz	244,72-245,20 GHz	(6)
Monóxido nítrico (NO)	250,6 GHz	250,35-250,85 GHz	(5)
Radical etinilo (C <sub>2</sub> H)	262,0 GHz	261,74-262,26 GHz	(5)
Cianuro de hidrógeno (HCN)	265,886 GHz	265,62-266,15 GHz	
Formilio (HCO <sup>+</sup> )	267,557 GHz	267,29-267,83 GHz	
Isocianuro de hidrógeno (HNC)	271,981 GHz	271,71-272,25 GHz	

 $^{(1)}$  A menos que se aplique la Nota  $^{(2)}$  o la Nota  $^{(4)}$ , los límites de la banda son las frecuencias con desplazamiento por efecto Doppler correspondientes a velocidades radiales de ± 300 km/s (de acuerdo con las rayas de radiación que aparecen en nuestra Galaxia).

<sup>(2)</sup> Se requiere una ampliación a frecuencias más bajas de la atribución de 1 400-1 427 MHz para poder incluir los mayores desplazamientos Doppler para HI observados en galaxias lejanas.

<sup>(3)</sup> La actual atribución internacional no es a título primario y/o no satisface las necesidades de la anchura de banda. Véase la información más detallada en el RR.

<sup>(4)</sup> Puesto que se están utilizando también estas rayas para observar en otras galaxias, las anchuras de banda indicadas incluyen desplazamientos por efecto Doppler correspondientes a velocidades radiales de hasta 1 000 km/s. Cabe señalar que se ha observado HI en frecuencias desplazadas 500 MHz hacia el rojo, mientras que se han detectado algunas rayas de las moléculas más abundantes en galaxias con velocidades de hasta 50 000 km/s, lo que corresponde a una reducción de frecuencia de hasta 17%.

<sup>(5)</sup> Hay varias rayas muy cercanas entre sí asociadas a esta molécula. Las bandas indicadas son suficientemente anchas para permitir la observación de las seis rayas.

<sup>(6)</sup> Esta raya no cae en ninguna banda atribuida a la radioastronomía o mencionada en el Artículo 5 del RR como utilizada por ésta.

<sup>(7)</sup> Estas rayas sólo pueden obsevarse fuera de la atmósfera terrestre.

### TABLE 3.3

### Rayas de radiofrecuencia de máxima importancia para la radioastronomía a frecuencias entre 275 y 1 000 GHz

Sustancia	Frecuencia en reposo (GHz)	Notas <sup>(1)</sup>	
Diazenilio (N <sub>2</sub> H+)	279,511	279,23-279,79	
Monosulfuro de carbono (CS)	293,912	292,93-294,21	
Hidronio (H <sub>3</sub> O+)	307,192	306,88-307,50	
Agua de deuterio (HDO)	313,750	313,44-314,06	
Monóxido de carbono (C <sup>18</sup> O)	329,330	329,00-329,66	
Monóxido de carbono ( <sup>13</sup> CO)	330,587	330,25-330,92	
Monosulfuro de carbono (CS)	342.883	342,54-343,23	
Monóxido de carbono (CO)	345,796	345,45-346,14	
Cianuro de hidrógeno (HCN)	354.484	354.13-354.84	
Formilio (HCO+)	356,734	356.37-357.09	
$O_{x_1}(q_2)$	368 498	368,13-368,87	
Diazenilio (N <sub>2</sub> H+)	372.672	372, 30-373, 05	(2)
Vapor de agua $(H_2\Omega)$	380 197	379.81-380.58	(2)
Hidronio ( $H_2O_+$ )	388 459	388 07-388 85	
Monosulfuro de carbono (CS)	301,437	390 54-392 24	
$Ox(geno (O_2))$	424 763	424 34-425 19	
Monóvido de carbono ( $C^{18}O$ )	439.088	138 64-139 53	
Monóxido de carbono (C O)	440.765	440 22 441 21	
Monoxido de carbono (CO)	440,763	440,52-441,21	
Monoxido de carbono (CO)	461,041	400,57-401,51	
Agua de deuterio (HDO)	464,925	404,40-405,39	
Carbono (CI)	492,162	491,66-492,66	
Agua de deuterio (HDO)	509,292	508,78-509,80	(2)
Cianuro de hidrogeno (HCN)	531,716	529,94-532,25	(2)
Monosulfuro de carbono (CS)	538,689	536,89-539,23	(2)
Vapor de agua ( $H_2^{16}O$ )	547,676	547,13-548,22	(2)
Monóxido de carbono ( <sup>13</sup> CO)	550,926	549,09-551,48	(2)
Vapor de agua $(H_2O)$	556,936	556,37-557,50	(2)
Amoniaco ( <sup>15</sup> NH <sub>3</sub> )	572,113	571,54-572,69	(2)
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	572,498	571,92-573,07	(2)
Monóxido de carbono (CO)	576,268	574,35-576,84	(2)
Monosulfuro de carbono (CS)	587,616	587,03-588,20	(2)
Agua de deuterio (HDO)	599,927	599,33-600,53	(2)
Vapor de agua ( $H_2O$ )	620,700	620,08-621,32	(2)
Cloruro de hidrógeno (HCl)	625,040	624,27-625,67	
Cloruro de hidrógeno (HCl)	625,980	625,35-626,61	
Monosulfuro de carbono (CS)	636,532	634,41-637,17	
Monóxido de carbono ( <sup>13</sup> CO)	661,067	658,86-661,73	
Monóxido de carbono (CO)	691,473	690,78-692,17	
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	715,393	714,68-716,11	(2)
Monosulfuro de carbono (CS)	734,324	733,59-735,06	(2)
Vapor de agua ( $H_2O$ )	752,033	751,28-752,79	(2)
$Oxígeno (O_2)$	773,840	773,07-884,61	(2)
Cianuro de hidrógeno (HCN)	797,433	796,64-798,23	
Formilio (HCO+)	802,653	801,85-803,85	
Monóxido de carbono (CO)	806,652	805,85-807,46	
Carbono (CI)	809,350	808,54-810,16	
Monosulfuro de carbono (CS)	832,057	829,28-832,89	
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	834,146	833,31-834,98	
Monosulfuro de carbono (CS)	880,899	877,96-881,78	
Vapor de agua (H <sub>2</sub> O)	916,172	915,26-917,09	(2)
Monóxido de carbono (CO)	921,800	918,72-922,72	(2)
Monosulfuro de carbono (CS)	929,723	926,62-930.65	
Vapor de agua ( $H_2O$ )	970.315	969,34-971.29	(2)
Monosulfuro de carbono (CS)	978 529	977.55-979.51	(2)
Vapor de agua $(H_2O)$	987,927	986,94-988,92	(2)

 $^{(1)}$  Los límites de la banda son las frecuencias con desplazamiento Doppler correspondientes a las velocidades radiales de  $\pm$  300 km/s (lo que está en línea con la radiación de las rayas que se produce en nuestra galaxia).

<sup>(2)</sup> Estas rayas son observables únicamente fuera de la atmósfera terrestre.

# CAPÍTULO 4

# Vulnerabilidad de las observaciones radioastronómicas a la interferencia

# 4.1 Introducción

La radiación medida en radioastronomía tiene amplitudes que siguen, en casi todos los casos, una distribución de probabilidad gaussiana. Excepto en el caso de las emisiones de rayas espectrales de banda estrecha, tiene las mismas características estadísticas que la radiación del ruido térmico procedente de la Tierra o de su atmósfera, o del ruido generado en el propio receptor. Además, las emisiones radioeléctricas cósmicas son muy débiles. Las observaciones radioastronómicas, la relación *S/N* en las secciones de RF e IF del receptor se encuentra normalmente en la gama -20 dB a -60 dB, es decir, la potencia producida por la fuente de estudio es inferior en un factor comprendido entre  $10^{-2}$  to  $10^{-6}$  a la potencia de ruido no deseada procedente de la atmósfera, el suelo y los circuitos del receptor. En la mayoría de los sistemas de comunicación, la relación *S/N* correspondiente es del orden de una unidad o superior. Dada la debilidad de las señales radioastronómicas comparadas con las de otros servicios, las observaciones radioastronómicas resultan muy vulnerables a la interferencia radioeléctrica y, excepto en el caso de los púlsares y las señales cósmicas, no suelen tener una modulación característica que ayude a diferenciarlas del ruido o de muchas formas de señales interferentes.

El motivo de que las observaciones con una relación S/N muy baja puedan dar mediciones útiles radica en que, mientras que en otros servicios radioeléctricos la información suele venir en los cambios de las propiedades de la transmisión (es decir, de la modulación), en las mediciones radioastronómicas suele ir en el promedio de las propiedades de la señal. Cuando se mide la potencia de ruido total en las etapas IF del receptor utilizando un detector y se promedia la salida del detector durante muchos segundos, o muchas horas en algunos casos, quedan reducidas sobremanera las fluctuaciones estadísticas en los valores medios. Actualmente es posible detectar cambios fraccionarios en el nivel de ruido total del orden de  $10^{-8}$  del nivel promedio, y esto exige la promediación de por lo menos 10<sup>16</sup> muestras independientes. Un ejemplo de la elevada sensibilidad de las observaciones radioastronómicas es la cartografía de la estructura angular de la radiación de fondo cósmica efectuada por el satélite PLANCK (Planck Collaboration et al., 2011) que actualmente está funcionando en el punto de Lagrange Sol-Tierra L2 señalado en la Recomendación UIT-R RA.1417. Se han medido fluctuaciones del orden de  $10^{-6}$  de la temperatura de fondo de 2,8 K, que están 75 dB o más por debajo de la temperatura de ruido del sistema de los receptores situados en el satélite. La alta sensibilidad de tales observaciones se obtiene a expensas de la información sobre variaciones breves de cualquier característica de la señal, que se pierden en la promediación indispensable para reducir las fluctuaciones del ruido. El descubrimiento de estas fluctuaciones [Smoot et al 1992], que señala el origen de la estructura a gran escala en el Universo actual, obtuvo el Premio Nobel de Física de 2006, cuarto de dichos premios otorgado a las investigaciones radioastronómicas.

Como nota histórica, conviene señalar que el método de análisis de los niveles umbral de interferencia de este Capítulo tiene su origen en el Anexo del antiguo Informe CCIR 224-1 [Oslo, 1966]. Los niveles umbral de la interferencia contenidos en dicho Informe con las revisiones y añadidos posteriores, son la base de la coordinación de frecuencias en radioastronomía y figuran en el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R RA.769 y en los Cuadros 4.1 y 4.2 del presente Capítulo.

# 4.2 Consideraciones básicas para el cálculo de los niveles de interferencia

# 4.2.1 Criterio del nivel perjudicial para la interferencia

En la práctica, el aumento del nivel de potencia a la salida del receptor que provoca una señal interferente no es suficientemente constante para poder calibrarlo y restarlo de la potencia medida. Además de los cambios intrínsecos a la modulación de las transmisiones, las señales interferentes que se han propagado a larga distancia muestran grandes fluctuaciones de amplitud, provocadas por variaciones atmosféricas y otros factores que influyen en la pérdida de trayecto. Las señales procedentes de estaciones móviles a bordo de vehículos en movimiento, varían con el cambio de trayecto entre el transmisor y el radiotelescopio. Incluso si se mantiene constante la dfp interferente, el nivel de la potencia recibida varía porque el movimiento de seguimiento de la fuente realizado por el radiotelescopio presenta niveles cambiantes de lóbulos laterales en

la dirección del transmisor. En niveles bajos, la interferencia añade fluctuaciones que en general pueden no ser diferenciables de las resultantes del ruido del sistema o, en algunos casos, de la señal astronómica. No obstante, en general, las fluctuaciones de la salida del receptor debidas a la interferencia no se promedian al aumentar el tiempo de integración de la misma forma que el ruido puramente aleatorio.

Como criterio para la intensidad con la cual se considera perjudicial la señal interferente, se utiliza el nivel de las emisiones no deseadas que producen un aumento del 10% en los errores de medición, con respecto a los errores debidos sólo al ruido de sistema. En los cálculos de la interferencia, la práctica habitual consiste en suponer que ese nivel de interferencia es el mismo que el que produce en la señal de la salida del receptor un aumento del 10% del valor cuadrático medio (r.m.s.) de las fluctuaciones de salida debidas al ruido del sistema. Considérese una medición normal en la que la potencia recibida de una fuente radioeléctrica se mida tomando la diferencia a la salida del receptor, primero con la antena dirigida a la fuente y después desplazada para medir el nivel de fondo del cielo. Supóngase que se halla interferencia en el curso de la medición de la fuente radioeléctrica pero no al efectuar la medición de referencia del nivel de fondo o viceversa, como puede ocurrir en el caso de una señal intermitente de comunicación. Entonces, si la interferencia a la salida del receptor es el 10% del valor r.m.s. del nivel de ruido, el error total en la medición de la potencia procedente de la fuente aumentará hasta en un 10%. Se puede visualizar este efecto aumentando en 10% la longitud de las barras de error en las mediciones de la intensidad de una fuente radioeléctrica, que pueden representarse en función de algún otro parámetro astronómico. Véase también que, en ausencia de interferencia, un aumento del 10% en la incertidumbre r.m.s. de la medición es equivalente a una pérdida del 20% del tiempo de observación. En estas condiciones, es aún posible realizar mediciones útiles, pero los datos se degradan significativamente.

### 4.2.2 Diagrama de respuesta de la antena

Las observaciones radioastronómicas se efectúan habitualmente utilizando grandes antenas de alta ganancia o redes de antenas que proporcionen la sensibilidad y la resolución angular necesarias en el cielo. Los radiotelescopios pueden ser antenas únicas grandes o redes de muchas antenas. Al estar comprendida la anchura del haz normal entre unos cuantos segundos de arco y unos pocos grados, la probabilidad de que una fuente de interferencia se halle dentro del haz principal es tan pequeña que sólo hay que considerar la interferencia que entra por los lóbulos laterales. En la Recomendación UIT-R SA.509 – Diagrama de radiación de referencia de una antena de estación terrena de los servicios de investigación espacial y de radioastronomía, para uso en los cálculos de interferencia y en los procedimientos de coordinación, para frecuencias inferiores a 30 GHz, se recomienda un modelo para los lóbulos laterales de las antenas parabólicas grandes, desarrollado a partir de datos empíricos de varias antenas grandes. Es válido para antenas de un diámetro superior a 100 longitudes de onda, frecuencias comprendidas entre 2 GHz y 30 GHz y valores del ángulo,  $\varphi$ , con el eje del haz principal, superiores a 1°. La ganancia del lóbulo lateral varía en una escala angular del orden de  $\lambda/D$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda y D la anchura de la apertura de la antena. El modelo para la envolvente de la ganancia (G) de los lóbulos laterales viene dado por:

$$G = 32 - 25 \log \varphi \, dBi$$
 para 1° <  $\varphi$  < 47,8°  
(4.1)  
$$G = -10 \, dBi$$
 para 47,8° <  $\varphi$  < 180°

El efecto de una señal interferente depende sin duda del ángulo de incidencia respecto al eje del haz principal (eje de puntería) de la antena, pues la ganancia de los lóbulos laterales, representada por el modelo, varía entre +32 y -10 dB en función de dicho ángulo. No obstante § 4.3 es útil para calcular los niveles umbral de la interferencia perjudicial para un nivel del lóbulo lateral particular, y para éste se utiliza 0 dBi. En el modelo de lóbulos laterales de la ecuación (4.1) un valor de 0 dBi, es decir, el correspondiente a una ganancia igual a la de un radiador isótropo, se produce a 19,1° con respecto al haz principal. Véase que si se calcula el nivel umbral de la dfp o de la defp basado en la recepción con una ganancia del lóbulo lateral de 0 dBi, el umbral de la interferencia en el receptor de radioastronomía se rebasará si la interferencia se recibe por los lóbulos laterales con ganancias superiores a 0 dBi, o lo que es lo mismo, para valores de  $\varphi$  inferiores a 19,1° centrado en el eje del haz principal, la potencia recibida rebasará el criterio de interferencia perjudicial. El ángulo sólido de este cono medido en radianes,  $\Sigma$ , es igual a  $2\pi(1 - \cos \varphi)$ . Una medida aproximada de la probabilidad de que se reciba interferencia en el cono de 19,1° es igual a  $\Sigma$  dividido por los 2*B* estereorradianes sobre el

horizonte desde los que pueden recibirse señales interferentes. Para  $\varphi = 19,1^{\circ}, \Sigma/2B = 5,5\%$ . En diseños de antena más recientes, se ha propuesto un modelo de lóbulos laterales de tipo  $29 - 25 \log \varphi$  (véase por ejemplo, la Recomendación UIT-R S.580). Con este modelo, el valor de 0 dBi de φ es 14.5° y el valor correspondiente de  $\Sigma/2B$  es de 3.2%. En otro modelo de lóbulos laterales (véase la Recomendación UIT-R S.1428) se utiliza el modelo 34 – 30 log  $\phi$  para el cual el ángulo de 0 dBi es de 13,6° y el valor correspondiente de  $\Sigma/2B$  es de 2,8%. En la Recomendación UIT-R RA.1513 se especifica el límite superior del porcentaje de tiempo acumulado durante el que puede tolerarse que la interferencia supere el umbral perjudicial, del 5%, del cual no más del 2% puede proceder de cualquier red (véase § 4.2.4.). Los tres valores de  $\Sigma/2B$  examinados (5.5%, 3,2% y 2,8%) guardan una concordancia razonable con estas cifras y confirman la elección del nivel de lóbulos laterales de 0 dBi como adecuado para el cálculo de la dfp y la defp correspondientes al umbral perjudicial. En el caso particular de los satélites no OSG, la situación es dinámica, pues las posiciones de los satélites relativas al haz de la antena radioastronómica muestran amplias variaciones en la escala temporal de integración de 2 000 s. Un análisis de la interferencia en este caso exige la integración de la respuesta a lo largo de los niveles variables de los lóbulos laterales, por ejemplo, utilizando el concepto de densidad de flujo de potencia equivalente (dfpe) definido en el número 22.5C del RR. Además, suele ser necesario combinar las contribuciones al radiotelescopio de varios satélites de un sistema determinado. En dicho cálculo se propone que, mientras no se disponga de un modelo formulado específicamente para las antenas radioastronómicas, se utilice el diagrama de respuesta de las antenas de diámetro superior a 100  $\lambda$  de la Recomendación UIT-R S.1428 (véase el Anexo 1 de este Capítulo) para representar la antena radioastronómica.

El modelo de lóbulos laterales descrito más arriba se aplica a los paraboloides simétricos que se ven afectados por la dispersión de la radiación producida por la estructura de soporte del foco. Los niveles de los lóbulos laterales para los reflectores de alimentación excéntrica, con aperturas desbloqueadas, son normalmente de 10 a 15 dB inferiores a los del modelo. Sólo se han desarrollado algunas antenas con diseño de alimentación excéntrica para utilizarse en radioastronomía. Para antenas grandes los diseños simétricos son más económicos y también pueden ser preferibles para efectuar mediciones de la polarización.

## 4.2.3 Tiempo de promediación (tiempo de integración)

El proceso de promediación del tiempo para reducir las fluctuaciones del ruido se efectúa habitualmente en dos o más etapas. Los datos se promedian normalmente durante un periodo comprendido entre varias decenas de milisegundos y unas pocas decenas de segundos antes de ser grabados digitalmente. La primera etapa reduce el volumen de datos, pero permite eliminar más tarde sin graves pérdidas de datos, características tales como las ráfagas cortas de fuerte interferencia. Con frecuencia se efectúa una promediación posterior fuera de línea durante la subsiguiente reducción de datos. Por ejemplo, una observación puede consistir en mediciones repetidas en dos o más emplazamientos distintos del cielo, para comparar el nivel de potencia recibido de una fuente radioeléctrica (más la emisión de fondo del cielo) con la potencia procedente de una posición de referencia de fondo. Para cada posición se necesitan promedios separados. Pueden incluirse datos tomados en distintas sesiones de observación y el tiempo total de promediación puede durar decenas o cientos de horas [Owen and Morrison, 2009; Walter et al., 2012]. El límite suele venir determinado por el tiempo disponible en un radiotelescopio grande. Dicha promediación prolongada es necesaria cuando se buscan señales excepcionalmente débiles, siendo la práctica normal la promediación de muchos registros individuales del espectro de un punto del cielo. En los estudios de los umbrales de interferencia, la práctica habitual es utilizar 2 000 s como tiempo de promediación representativo. También suelen utilizarse tiempos de integración más largos, pudiendo tomarse 360 000 s (100 h) como representativo de las observaciones en tierra cuando se requiere una sensibilidad muy alta. Dado que la sensibilidad de la observación varía con la raíz cuadrada del tiempo de promediación, la diferencia entre 2 000 s y 360 000 s corresponde a una diferencia de 11,3 dB en la sensibilidad a las señales astronómicas y a la interferencia. También hay ciertas observaciones de fenómenos variables en el tiempo, por ejemplo, las observaciones de ráfagas estelares o solares, y los centelleos interplanetarios en los que pueden ser adecuados periodos de tiempo mucho más cortos.

## 4.2.4 Porcentaje de tiempo perdido por la interferencia

En muchos casos, la interferencia tiene un carácter esporádico, por ejemplo la procedente de las señales de comunicaciones móviles, o muestra grandes variaciones de intensidad con el tiempo como resultado de las condiciones de propagación. Al determinar si dichas señales son perjudiciales para las observaciones radioastronómicas es necesario especificar un porcentaje de tiempo máximo durante el que pueda tolerarse la

interferencia perjudicial. Para la mayoría de los servicios, dicho porcentaje de tiempo figura en las diversas Recomendaciones y generalmente varía entre el 0,01% para las comunicaciones en las que esté en juego la seguridad de la vida humana y diversos porcentajes para los servicios en los que intervenga un tipo de recopilación de datos que pueda ser repetitiva. En el caso de la radioastronomía, una pérdida neta del 5% procedente de todas las fuentes es la cifra máxima admisible. En muchas de las observaciones radioastronómicas puede aparecer interferencia procedente de diversas fuentes en las bandas de frecuencias próximas, por este motivo, la máxima pérdida de tiempo admisible provocada por cualquier otro servicio es del 2%. Estas cifras se especifican en la Recomendación UIT-R RA.1513 y son fundamentales en los cálculos de Monte Carlo para determinar la forma de limitar las fuentes esporádicas de interferencia (véase § 4.8).

# 4.3 Sensibilidad de los sistemas radioastronómicos y valores umbral de la interferencia perjudicial

### 4.3.1 Consideraciones teóricas

En radioastronomía se mide la sensibilidad de una observación por el aumento del nivel de potencia a la entrada del receptor que produce un cambio en la salida de éste igual al valor cuadrático medio de las fluctuaciones del ruido. La salida del detector del receptor es función de la potencia total a la entrada del receptor. La potencia total a la entrada consta de la potencia de la señal deseada y la potencia del ruido no deseado (por ejemplo, el ruido térmico y el del receptor). Ambas contribuciones están provocadas por procesos aleatorios y no pueden distinguirse entre sí cualitativamente. Sin embargo, ambas señales tienen un nivel medio de potencia y, si pueden determinarse con precisión suficiente esos niveles, podrá detectarse la presencia de la señal deseada. (Se supone que la ganancia y otros parámetros del sistema receptor permanecen constantes durante la observación). El promedio estadístico de una variable aleatoria estacionaria, como la potencia de ruido, P, puede determinarse con una precisión inversamente proporcional a la raíz cuadrada del número de muestras independientes, N, siendo la desviación típica de este promedio esta

$$\Delta P \approx \frac{P}{\sqrt{N}} \tag{4.2}$$

Los parámetros  $\Delta P$  y *P* pueden definirse en términos de la potencia de ruido en la anchura de banda del receptor o de la densidad espectral de potencia (W/Hz). En el análisis que sigue se indica la densidad espectral de potencia. La desviación típica,  $\Delta P$ , también es un valor cuadrático medio (r.m.s.). Observando un número suficiente de muestras, *N*, puede medirse con gran precisión la potencia del ruido radioeléctrico. Reduciendo las fluctuaciones de  $\Delta P$  a un valor inferior a la potencia de la señal deseada pueden detectarse señales muy débiles. Dentro de una banda de  $\Delta f$  de anchura, el receptor puede medir aproximadamente  $2\Delta f$  muestras independientes por segundo, y aumentando el periodo de promediación, *t*, (denominado también tiempo de integración), el valor de *N* puede hacerse muy grande. Es decir:

$$N \approx 2\Delta f t \tag{4.3}$$

y combinando esta relación con la ecuación (4.2),

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{K}{\sqrt{\Delta f t}} \tag{4.4}$$

siendo *K* un factor de proporcionalidad que depende de las características del equipo y de la técnica de observación [Kraus, 1966]. Para un sistema de potencia total básica (es decir, el que mide la potencia de ruido total producida por una antena) K = 1, valor que se adoptará aquí con carácter general. (Obsérvese, sin embargo, que en el caso de que el tiempo de observación se divida por igual entre la fuente y una posición de referencia, como se indica en § 4.2.1, el valor requerido de *t* es igual a la mitad del tiempo total de observación. El error del valor cuadrático medio de la diferencia entre las mediciones en la fuente y en la posición de referencia es igual al error de la medición en la fuente multiplicado por  $\sqrt{2}$ .)

La fluctuación del ruido en la densidad espectral de potencia,  $\Delta P$ , de la ecuación de sensibilidad (4.4), guarda relación con la sensibilidad total del sistema (fluctuaciones del ruido) expresada como fluctuación de la temperatura,  $\Delta T$ , por medio de la constante de Boltzmann, *k*:

$$\Delta P \approx k \Delta t \tag{4.5}$$

y la ecuación de sensibilidad se expresa del modo siguiente:

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f t}} \tag{4.6}$$

siendo:

$$T = T_A + T_R \tag{4.7}$$

T es la temperatura del sistema y es la suma de  $T_A$ , la temperatura de ruido de la antena resultante de las emisiones cósmicas, la atmósfera de la Tierra y la radiación procedente de la Tierra, y  $T_R$ , la temperatura de ruido del receptor.

### 4.3.2 Cálculo de la sensibilidad y del nivel de la interferencia perjudicial

Las ecuaciones (4.4) o (4.6) pueden utilizarse para calcular la sensibilidad y el nivel de interferencia de las observaciones radioastronómicas. Los resultados se recogen en los Cuadros 4.1 y 4.2, donde se ha considerado un tiempo de observación (o de integración) *t* de 2000 s, como se explica en § 4.2.3. La sensibilidad, expresada en unidades de temperatura o de densidad espectral de potencia, es el nivel necesario a la entrada del receptor para que aumente la señal de salida en una cantidad igual a las fluctuaciones del valor r.m.s. del ruido. En el Cuadro 4.1 (observaciones del continuum) para frecuencias por debajo de 71 GHz, se supone que  $\Delta f$  es la anchura de la banda atribuida a la radioastronomía. Por encima de esta frecuencia, se utiliza el valor de 8 GHz que es representativo de la frecuencia generalmente utilizada para las observaciones del continuum en esta gama. En el Cuadro 4.2 (observaciones de las rayas espectrales)  $\Delta f$  es la anchura de banda normal de un canal en un sistema de rayas espectrales. Los valores utilizados para  $\Delta f$  corresponden a una velocidad aproximada de 3 km/s, intermedia entre los valores utilizados corrientemente para las observaciones de las rayas espectrales de fuentes presentes en nuestra Galaxia y en galaxias externas. Véase que las últimas cinco filas de los Cuadros 4.1 y 4.2 son para frecuencias superiores a 275 GHz, en las que no existen atribuciones en el momento de redactar la presente edición del Manual. Esas frecuencias se eligen arbitrariamente y los umbrales perjudiciales correspondientes sólo pretenden ser estimaciones preliminares.

Los niveles de interferencia perjudicial de los Cuadros 4.1 y 4.2 se expresan como el nivel de interferencia que introduce en  $\Delta P$  (o  $\Delta T$ ) una componente igual al 10% de la fluctuación del valor r.m.s. del ruido del sistema, es decir:

$$\Delta P_H = 0.1 \ \Delta P \ \Delta f \tag{4.8}$$

En resumen, las columnas correspondientes de los Cuadros 4.1 y 4.2 pueden calcularse utilizando los métodos siguientes:

- $\Delta T$ , con las ecuaciones (4.6) y (4.7),
- $\Delta P$ , con la ecuación (4.5),
- $\Delta P_H$ , con la ecuación (4.8).

La interferencia puede expresarse también por la dfp que llega a la antena en la anchura de banda total, o como una densidad espectral de flujo de potencia  $S_H$  por 1 Hz de la anchura de banda<sup>10</sup>. Como se ha expuesto en § 4.2.2, los valores se indican para una antena cuya ganancia, en la dirección de llegada de la interferencia, sea

1 Jy =  $10^{-26}$  W/(m<sup>2</sup> · Hz), o sea, -260 dB(W/(m<sup>2</sup> · Hz)).

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Aquí se utiliza la terminología recomendada por el Sector de Radiocomunicaciones (Recomendación UIT-R V.574), según la cual la «densidad de flujo de potencia» se refiere a magnitudes expresadas en unidades de  $W/m^2$  y la densidad espectral de flujo de potencia se refiere a magnitudes como  $S_H$  expresadas en unidades de  $W/(m^2 \cdot Hz)$ . En radioastronomía, esta última magnitud se denomina «densidad de flujo», y se expresa en una unidad denominada jansky (Jy):

igual a la de una antena isótropa (antena cuya superficie efectiva es  $c^2/4\pi f^2$ , siendo *c* la velocidad de la luz y *f* la frecuencia). Los valores de  $S_H \Delta f$  (dB(W/m<sup>2</sup>)) se obtienen de  $\Delta P_H$  (dBW) añadiendo:

$$20 \log f - 158,5 \,\mathrm{dB}$$
 (4.9)

en donde *f* se expresa en Hz. Para obtener  $S_H$  basta con restar la cantidad 10 log  $\Delta f$  a fin de tener en cuenta la anchura de banda.  $S_H$  puede expresarse también como una sola ecuación del siguiente modo:

$$S_{H} = \frac{0.4 \,\pi k (T_{A} + T_{R}) f^{2}}{c^{2} \,\sqrt{\Delta f t}} \tag{4.10}$$

En la Fig. 4.1 se muestran gráficamente los niveles de interferencia para el SRA obtenidos en los Cuadros 4.1 y 4.2, donde  $S_H$  (dB(W/(m<sup>2</sup> · Hz))) se representa en función de la frecuencia. La curva del continuum no es uniforme porque las distintas bandas de frecuencias tienen diferentes anchuras.

La sensibilidad de un sistema receptor de radioastronomía a las radiaciones de banda ancha del continuum aumenta con la anchura de banda (ecuaciones (4.4) y (4.6)). El motivo es el siguiente: la potencia de ruido aumenta con la anchura de banda, pero lo mismo sucede con la señal, al estar constituida por ruido de banda ancha. La relación de potencia S/N en las etapas RF o IF antes del detector permanece constante, con independencia de la anchura de banda. Sin embargo, al aumentar la anchura de banda mejora la precisión de la determinación de los niveles de potencia (en un factor de la raíz cuadrada de la anchura de banda), y por tanto mejora la sensibilidad.

Las ecuaciones (4.4) y (4.6) parecen indicar que puede alcanzarse cualquier sensibilidad que se desee con una anchura de banda o un tiempo de observación suficientemente grandes. Sin embargo, en la práctica, hay factores distintos a los estadísticos descritos anteriormente que fijan un límite práctico a la sensibilidad de una observación radioastronómica. Entre esos otros efectos figuran, por ejemplo, la estabilidad del receptor y las fluctuaciones de la atenuación y en el trayecto de fase en la atmósfera terrestre. Los niveles de sensibilidad de los Cuadros 4.1 y 4.2 corresponden a unos valores de anchura de banda y de tiempo de integración para los que esos otros factores no suelen ser significativos. Sin embargo, conviene destacar que tales niveles de sensibilidad no representan límites fundamentales y que se sobrepasan habitualmente cuando los datos pueden integrarse en periodos de muchas horas.

### FIGURA 4.1



## Umbrales de interferencia en función de la frecuencia de los Cuadros 4.1 y 4.2

La Fig. 4.1 muestra los valores umbral de la densidad espectral de flujo de potencia para el continuum (cruces) y las rayas espectrales (círculos) de los Cuadros 4.1 y 4.2, en función de la frecuencia.

En el Informe UIT-R RA.2131 - Supplementary information on the detrimental threshold levels of interference to radio astronomy observations in Recommendation UIT-R RA.769, figuran los valores equivalentes de la intensidad del campo eléctrico correspondiente a las entradas de los Cuadros 4.1 a 4.3.

## 4.4 Respuesta de los interferómetros y redes de antenas a la interferencia radioeléctrica

La necesidad de una gran resolución angular en las observaciones radioastronómicas ha dado lugar al desarrollo de interferómetros y redes de antenas, que desempeñan una función cada vez más importante en los estudios de fuentes con dimensiones angulares iguales o inferiores a algunos minutos de arco. Un interferómetro alcanza habitualmente una resolución angular de unos  $\lambda/L$  radianes, siendo  $\lambda$  la longitud de onda y L la mayor separación prevista de las antenas, vista desde la fuente radioeléctrica. Hay dos efectos que reducen la respuesta a la interferencia de dichos instrumentos y están relacionados con la frecuencia de las oscilaciones marginales que se observan cuando se combinan las salidas de las dos antenas y con el hecho de que las componentes de la señal interferente recibidas por antenas diferentes y muy separadas sufran retardos relativos distintos antes de recombinarse. El tratamiento de estos efectos es más complicado que el de las antenas individuales mencionadas en § 4.3. En [Thompson, 1982] y [Thompson et al., 1986 y 2001] se analiza este problema. En términos generales, el efecto principal consiste en que el tiempo de integración efectivo durante el cual la interferencia afecta a la medición disminuye pasando del tiempo total de observación al tiempo medio de una oscilación marginal natural, que suele estar comprendido entre varios segundos para un sistema compacto con  $L \sim 1000 \lambda$  a menos de un milisegundo para los sistemas intercontinentales con  $L \sim 10^7 \lambda$ . Por consiguiente, con respecto a una sola antena radioastronómica, el interferómetro tiene un grado de inmunidad frente a las interferencias que aumenta con el tamaño de la red de antenas expresado en longitudes de onda.

#### FIGURA 4.2

- 49 -



# Umbrales de interferencia perjudicial para observaciones del continuum con varios tipos de sistemas de radiotelescopio

En la Fig. 4.2 se representan los umbrales perjudiciales calculados para algunas redes de antenas representativas en el modo de continuum. Los rombos corresponden a la VLA, la curva inferior a la configuración D (máxima separación de antenas igual a 1 km) y la curva superior a la configuración A (máxima separación de antenas igual a 36 km). Los cuadrados corresponden a la red de antenas MERLIN y los círculos abiertos a VLBI (Cuadro 4.3). Para la VLA del National Radio Astronomy Observatory, New Mexico (Estados Unidos), la separación de antenas alcanza 1 km en la configuración D y 36 km en la configuración A. Para la red de antenas MERLIN de Nuffield Radio Astronomy Laboratories, Jodrell Bank (Reino Unido), la separación alcanza los 218 km. Los resultados dependen de la separación entre antenas y por este motivo existen curvas independientes para las dos configuraciones VLA y para MERLIN. También se acepta la hipótesis de que el transmisor interferente es estacionario con respecto a la Tierra y que la potencia de la señal interferente recibida a través de los lóbulos laterales de la antena permanece constante durante la observación.

Frecuencia central <sup>(2)</sup>	Anchura de banda supuesta <sup>(3)</sup>	Temperatura mínima de ruido de la antena	Temperatura de ruido del recentor	Sensibilida (fluctuacion	d del sistema nes del ruido)	Niv	veles umbral de interfer	encia <sup>(1)</sup>
				Temperatura	Densidad espectral de potencia	Potencia de entrada	dfp	defp
f (MHz)	Δ <i>f</i> (MHz)	$T_A$ (K)	$T_R$ (K)	Δ <i>T</i> (mK)	$\Delta P$ (dB(W/Hz))	$\Delta P_{H}$ (dBW)	<i>S</i> <sub>ii</sub> ∆ <i>f</i> (dB(W/m²))	$S_H$ (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(9)	(2)	(8)	(6)
13 385	0.05	00005	60	2 000	<i>ccc</i>	-185	-201	-748
25,610	0.12	15 000	09 09	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
15375	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
31550	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	-274	-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
335 000	8 000	55	64	0,030	-274	-185	-113	-212
420 000	8 000	95	80	0,044	-272	-183	-109	-208
670 000	8 000	185	130	0,079	-270	-181	-103	-202
875 000	8 000	175	170	0,086	-269	-180	-100	-199
940 000	8 000	235	180	0,104	-268	-179	-98	-197
(1) Se ha supuesto u	tiempo de integración	de 2 000 s; cuando se utili	cen tiempos de integra	ación de 15 min, 1 h, 2 h	5 h o 10 h, deberán ajustar	se los valores pertinen	tes del Cuadro en +1,7, -	-1,3, -2,8, -4,8 o -6,3 dB
respectivamente.	Los niveles de intertere en 8.4.4 Para los trans	acia son los que se aplican : misores situados en la órhit	a las mediciones de la ra recestacionaria los	potencia total recibida po niveles necesitan ainstare	r una sola antena. Pueden se se en -15 dB (es decir son 1	sr adecuados otros mve 5 dR inferiores) tal co	tles menos estrictos para	otros tipos de mediciones,
<sup>(2)</sup> Esta Cuadro no ni	retende ser una lista cor	nnisoues situates en la vion polata da las bandas da rad	ta geocstactonata, 103 iosetronomís eino sis	mulos representativos a lo	largo dal acmantro. Los nól	culos da los nivalas da	interferencie se been et	La fractionaria control atta
Este Cuadio IIO p.	ciellue sel ulla lista col	ilpieta ue las validas ue fau	וטמצורטווטוווומ, צוווט כן כ	inpios representativos a re	o tatgo del especido. Los cal	an salavill sol an solino		i ia irecuencia cenual que

Niveles umbral de interferencia perjudicial para la observación radioastronómica del continuum

**CUADRO 4.1** 

Radioastronomia

se indica en la columna (1), aunque no todas las regiones tienen las mismas asignaciones.

- 50 -

~ ~	1 1
	CALADO -
_	-

ia <sup>(1)</sup>	defp	$S_H$	$(dB(W/(m^2 \cdot Hz)))$	(6)	-244	-239	-238	-237	-230	-221	-216	-215	-210	-209	-208	-204	-199	-197	-192	-189	-182	-179	-178
Niveles de interferenc	dfp	$S_{t}\Delta f$	(dB(W/m <sup>2</sup> ))	(8)	-204	-196	-194	-194	-183	-169	-162	-161	-153	-152	-148	-144	-139	-137	-132	-129	-122	-119	-118
	Potencia a la entrada	$\Delta P_{H}$	(dBW)	(2)	-215	-220	-220	-220	-218	-214	-210	-210	-207	-207	-209	-209	-207	-206	-204	-203	-200	-200	-199
l del sistema es del ruido)	Densidad espectral de potencia	$\Delta P$	(dB(W/Hz))	(9)	-245	-253	-253	-253	-255	-256	-254	-254	-254	-254	-259	-259	-257	-256	-254	-253	-250	-250	-249
Sensibilidad (fluctuacion	Temperatura	$\Delta T$	(mK)	(5)	22,3	3,48	3,48	3,48	2,20	1,73	2,91	2,91	2,84	3,00	0,94	0,98	1,41	1,68	2,66	3,91	7,04	7,71	9.28
Temperatura de ruido del receptor		$T_R$	(K)	(4)	60	10	10	10	10	15	30	30	65	65	30	30	43	50	64	80	130	170	180
Temperatura mínima de ruido de la antena		$T_A$	(K)	(3)	40	12	12	12	12	15	35	35	25	30	12	14	20	25	55	95	185	175	235
Anchura de banda supuesta del canal	de la raya espectral	$\Delta f$	(MHz)	(2)	10	20	20	20	50	150	250	250	500	500	$1\ 000$	1000	$1\ 000$	1000	1000	1000	1000	1000	1 000
Frecuencia central <sup>(2)</sup>		ſ	(MHz)	(1)	327	1 420	1 612	1 665	4 830	14500	22 200	23700	43 000	48000	88 600	150000	220 000	265000	335 000	420000	670 000	875 000	940 000

Niveles umbral de interferencia perjudicial para la observación radioastronómica de rayas espectrales

Γ

<sup>(1)</sup> Se ha supuesto un tiempo de integración de 2 000 s; cuando se utilicen tiempos de integración de 15 min, 1 h, 2 h, 5 h o 10 h, deberán ajustarse los valores pertinentes del Cuadro en +1,7, -1,3, -2,8, -4,8 ó -6,3 dB respectivamente. Los niveles umbral de interferencia 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, tal como se indica en § 4.4. Para los transmisores situados en la órbita OSG, los niveles necesitan ajustarse en -15 dB (es decir, son 15 dB inferiores), tal como se explica en § 4.7.3.

<sup>(2)</sup> Este Cuadro no pretende ser una lista completa de las bandas de rayas espectrales, sino ejemplos representativos en todo el espectro.

Descripción de las columnas de los Cuadros 4.1 y 4.2:

### Columna

- (1) Frecuencia central de la banda atribuida a la radioastronomía (Cuadro 4.1) o frecuencia nominal de la raya espectral (Cuadro 4.2).
- (2) Anchura de banda supuesta o atribuida (Cuadro 4.1) o anchura normal de canal supuesta utilizada en las observaciones de rayas espectrales (Cuadro 4.2).
- (3) La temperatura mínima del ruido de la antena incluye las contribuciones de la ionosfera, la atmósfera terrestre, la radiación procedente de la Tierra y la radiación de fondo galáctica y cósmica.
- (4) Temperatura de ruido del receptor representativa de un sistema de alta sensibilidad. Para frecuencias superiores a 1 GHz, los valores se aplican a receptores enfriados por medios criogénicos.
- (5) Sensibilidad total del sistema en milikelvins calculada a partir de la ecuación (4.6) 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) Igual que (5), pero expresada en términos de densidad espectral de potencia de ruido a partir de la ecuación  $\Delta P_s = k\Delta T$ , siendo  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  (J/K) (constante de Boltzmann). Los valores de  $\Delta P_s$  se expresan en decibelios.
- (7) Nivel de potencia a la entrada del receptor que se considera perjudicial para las observaciones de gran sensibilidad  $(\Delta P_H)$ . El criterio se expone en § 4.2.3 y el cálculo se expresa como  $\Delta P_H = 0,1 \Delta P \Delta f$ . Los valores de  $\Delta P_H$  se expresan en decibelios.
- (8) Dfp necesaria para producir un nivel de potencia  $\Delta P_H$  en un sistema receptor con una antena receptora isótropa. Los valores de  $S_H \Delta f$  se expresan en decibelios.
- (9) Defp necesaria para producir un nivel de potencia  $\Delta P_H$  en un sistema receptor con una antena receptora isótropa. Los valores de  $S_H$  se dan en decibelios. Para obtener los niveles de potencia correspondientes en una anchura de banda de referencia de 4 kHz o de 1 MHz, se añaden 36 dB o 60 dB respectivamente.

En la VLBI, donde las antenas están muy separadas, la probabilidad de que se produzca interferencia correlacionada es muy pequeña, y pueden no aplicarse normalmente las consideraciones anteriores (una excepción puede ser el caso de un satélite OSG visible simultáneamente desde más de una estación VLBI). En ese caso, el umbral de interferencia está determinado por el nivel en el que la interferencia comienza a degradar la medida de la correlación de las señales procedentes de las dos antenas. Para ese umbral puede utilizarse un nivel de interferencia igual al 1% de la potencia de ruido del sistema en el receptor [Thompson *et al.*, 1986 y 2001]. (Obsérvese que este nivel es muy superior al 10% de las fluctuaciones del ruido después de la detección y la integración, como sucede en el criterio para un sistema de potencia total en el funcionamiento de una sola antena). Los valores del umbral para la VLBI, basados en el criterio de la potencia de ruido del 1% y expresados como defp, son iguales a  $1,930 \times 10^{-23} (T_A + T_R) f^2$ , se expresan en decibelios en el Cuadro 4.3 y se representan gráficamente en la Fig. 4.2. Las temperaturas del sistema utilizadas son iguales a las que figuran en los Cuadros 4.1 y 4.2, incluyendo un factor de 1,4 para tener en cuenta los efectos de cuantificación del muestreo digital que se utiliza en la grabación de los datos. Los resultados no dependen de las separaciones detalladas de las antenas. En todos los casos se supone que la señal interferente se recibe en lóbulos laterales de ganancia 0 dBi. A efectos de comparación, los valores de las observaciones de potencia total (con una sola antena) del Cuadro 4.1 se representan por la curva inferior.

CUADRO	4.3
COLIDICO	1.5

Frecuencia central (MHz)	Nivel perjudicial (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)))
325,3	-217
611	-212
1 413,5	-211
2 695	-205
4 995	-200
8 400	-196
10 650	-193
15 375	-189
23 800	-183
43 000	-175
89 000	-172
150 000	-167
224 000	-162
270 000	-160

### Niveles umbral de la interferencia para las observaciones VLBI

Como orientación sobre la vulnerabilidad de los sistemas VLBI a la interferencia, conviene señalar que la Figura 4.1 muestra que los umbrales para la VLBI son 40 dB aproximadamente mayores que los sistemas de potencia total para observaciones del continuum en la misma frecuencia. La superficie comprendida entre la curva VLBI y la curva de potencia total abarca la gama de umbrales de interferencia para todos los tipos de radiotelescopios. Conviene señalar que el empleo de interferómetros y redes de antenas suele limitarse a los estudios de fuentes discretas de alto brillo con dimensiones angulares que no sean superiores a unos pocos minutos de arco para series de antenas como la VLA o a unas décimas de segundo de arco para la VLBI. Por consiguiente, los resultados de la potencia total indicados en los Cuadros 4.1 y 4.2 siguen siendo válidos para la protección general de la radioastronomía.

# 4.5 Púlsares

Las características de los púlsares se describen en el Capítulo 2. En las observaciones de los púlsares se utiliza generalmente un sistema receptor de rayas espectrales, de forma que las señales de los distintos canales de frecuencia puedan alinearse en el tiempo para eliminar el efecto de la dispersión de frecuencia y a continuación combinarse. En las búsquedas de púlsares, los datos se graban y posteriormente se analizan utilizando una gama de valores de dispersión y una gama de valores de tiempos de repetición de impulsos. El efecto de la corrección de la dispersión sobre la interferencia que pueda existir es el de difuminar cualquier característica aguda en el tiempo, sin que ello afecte significativamente al nivel r.m.s. de la interferencia. Una vez hallados la dispersión y el tiempo de repetición, los impulsos pueden alinearse en el tiempo y promediarse para estudiar su forma y mejorar la precisión de la medición del tiempo. Al considerar la sensibilidad perjudicial de dichas observaciones, la anchura de banda es la total del receptor, pero el tiempo de integración efectivo es el tiempo durante el que está presente el impulso. De esta manera, el umbral de la interferencia perjudicial es el valor equivalente del continuum dividido por la raíz cuadrada de la fracción del tiempo en el que el impulso está presente. Esta fracción es la duración del impulso dividida por el intervalo de repetición y está comprendida entre varias unidades porcentuales y unas pocas decenas porcentuales. Así pues, los umbrales perjudiciales para las observaciones de los púlsares son superiores a sus valores equivalentes para el continuum del Cuadro 4.1 en 2-10 dB. Las observaciones de los púlsares se efectúan generalmente utilizando antenas grandes que también se emplean para las observaciones generales a potencia total por lo que no añaden restricciones especiales a los requisitos generales de protección contra la interferencia.

### 4.6 Sensibilidades alcanzadas

La sensibilidad que más preocupa a los radioastrónomos es la correspondiente a la radiación de fuentes situadas dentro del haz principal de una antena radioastronómica, más que en los lóbulos laterales, que se han considerado respecto a la interferencia. Esta afirmación se aplica a la antena única utilizada para mediciones de la potencia recibida total o a las distintas antenas de una red. Por ejemplo, una sola antena de un diámetro de 70 m que funcione a 5 GHz tendría una superficie efectiva de captación de unos 2 700 m<sup>2</sup> y una ganancia de 70 dB. Por consiguiente, la sensibilidad del haz principal en términos de dfp sería superior en 70 dB a la correspondiente a la radiación que reciben los lóbulos laterales de nivel isótropo. La columna 6 del Cuadro 4.1 indica que la sensibilidad en la entrada del receptor para una señal de intensidad igual al ruido del sistema es de  $2 \times 10^{-27}$  W/Hz (-267 dB(W/Hz)), de modo que para una superficie de captación de 2 700 m<sup>2</sup>, la defp correspondiente es:

$$2 \times 2 \times 10^{-27}/2700 = 1.5 \times 10^{-30} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{Hz})$$
 (4.11)

$$= -298.2 \text{ dB W/(m^2 \cdot \text{Hz})}$$
 (4.12)

en donde se incluye un factor de 2 en el numerador a la izquierda porque cualquier salida de una antena corresponde a la mitad de la potencia de una onda radioeléctrica aleatoriamente polarizada. Este es un ejemplo de una sensibilidad muy alta, superior en varios órdenes de magnitud a la que suele considerarse práctica en otros servicios radioeléctricos.

El Cuadro 4.4 ofrece ejemplos de observaciones muy sensibles del continuum y de rayas espectrales publicados en la literatura sobre radioastronomía. Para las observaciones con una sola antena se comparan con los niveles perjudiciales de los Cuadros 4.1 y 4.2, y para las redes de antenas, se comparan con valores de la Fig. 4.2 o calculados. Las mediciones astronómicas son muy inferiores a los niveles perjudiciales porque se efectúan en el haz principal de las antenas radioastronómicas, mientras que los niveles perjudiciales corresponden a la recepción en los lóbulos laterales, o sea, las diferencias se relacionan con la ganancia de las antenas. Estos resultados muestran que en los observatorios radioastronómicos se efectúan observaciones muy sensibles, lo que confirma la validez de los parámetros de los Cuadros 4.1 y 4.2 para los sistemas actuales.

### CUADRO 4.4

### Comparación entre los resultados de las observaciones y los niveles umbral de interferencia

Frecuencia (GHz)	Tipo de instrumento	Raya o continuum	Defp observada (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)))	Límite perjudicial (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz))) <sup>1</sup>	Referencias		
1.4	Red de antenas	Continuum	-309	[Owen & Morrison 2008]			
5,0	Red de antenas	Continuum	-308	-222	[Fomalont et al., 1991]		
1.42	Parábola única	Raya (HI)	-288	-239	[Lockman et al., 2011]		
37,3	Red de antenas	Raya (CO desplazado al rojo)	-295	-211	[Walter et al., 2012]		
93,2	Red de antenas	Raya (CO desplazado al rojo)	-289	-208	[Walter et al., 2012]		

<sup>(1)</sup> De los Cuadros 4.1 y 4.2 e interpolado de la Fig. 4.1

Cabe prever que continúe aumentando la sensibilidad de las observaciones radioastronómicas tanto a las señales cósmicas como a la interferencia, al disponerse de equipos receptores más sensibles. En frecuencias de hasta unos 100 MHz, la temperatura del receptor no contribuye mucho a la temperatura total del sistema (véase el Cuadro 4.1). En el extremo de frecuencias altas del espectro es probable que los perfeccionamientos de la tecnología del receptor tengan su máximo efecto. No obstante, los aumentos máximos de sensibilidad se lograrán probablemente mediante el desarrollo de antenas y sistemas de antena mayores de los que era posible realizar anteriormente.

# 4.7 Examen de la interferencia

# 4.7.1 Niveles de interferencia

Las señales interferentes en niveles de potencia comprendidos entre los umbrales perjudiciales que acaban de definirse y valores 10 dB superiores, aproximadamente, suelen ser las más perjudiciales para las observaciones radioastronómicas. Esto se debe a que son suficientemente intensas para producir errores en los datos, pero suficientemente débiles para que la presencia de interferencia no sea fácil de reconocer. La interferencia de 20 dB o más por encima de los valores umbral suele reconocerse con facilidad. En estos casos, las mediciones son casi siempre inútiles para la radioastronomía y los datos contaminados deben desecharse.

# 4.7.2 Interferencia procedente de fuentes astronómicas

Un número reducido de fuentes radioeléctricas astronómicas tienen la intensidad suficiente para interferir con las observaciones de gran sensibilidad. Sus densidades espectrales de flujo de potencia pueden superar a las del Cuadro 4.1. El ejemplo más claro es el Sol, que es una potente fuente de emisión. Teniendo en cuenta la interferencia solar, ciertas investigaciones sólo pueden realizarse de noche. Otros experimentos son factibles durante el día, excepto en los periodos de alta actividad solar. Las emisiones de las erupciones solares son especialmente fuertes en frecuencias situadas por debajo de unos 200 MHz. El Sol en reposo tiene un alto diámetro angular y una densidad de flujo constante y no suele plantear problemas.

Por debajo de 1 GHz, algunas otras fuentes radioeléctricas cósmicas superan las defp del Cuadro 4.1. Ahora bien, esas fuentes se hallan en posiciones conocidas con precisión y tienen una intensidad constante conocida que sólo varía lentamente con la frecuencia. En principio, y en la práctica, el radioastrónomo puede corregir sus efectos cuando realiza observaciones con la mayor sensibilidad posible. Por el contrario, la interferencia terrenal de bajo nivel tiene normalmente una posición, una densidad de flujo y un espectro desconocidos, y puede ser muy variable en el tiempo, de modo que, por lo general, no será posible corregir sus efectos sobre las observaciones salvo por la escisión de los datos inutilizables.

## 4.7.3 Consideraciones especiales relativas a los transmisores situados en satélites geoestacionarios

La interferencia procedente de transmisiones de satélites geoestacionarios es un caso de especial importancia. Conviene señalar primero que los radioastrónomos no pueden efectuar observaciones en presencia de señales de enlace descendente en la misma banda de frecuencias. Así pues, las consideraciones relativas a la interferencia procedente de satélites se refieren en general a emisiones no deseadas que se hallan dentro de las bandas de radioastronomía.

Teniendo en cuenta que los niveles de potencia de los Cuadros 4.1 y 4.2 se calculan para una ganancia de antena de 0 dBi, se producirá interferencia perjudicial cuando los lóbulos laterales de antena de ganancia superior a 0 dBi estén dirigidos hacia un transmisor que emita en los niveles indicados en los Cuadros 4.1 y 4.2. Para una antena radioastronómica con lóbulos laterales iguales a los de la antena de referencia definida en la ecuación (4.1), se producirá interferencia si la antena apunta a un ángulo de 19° o menos en la dirección del satélite que emite en esos niveles. Así pues, una serie de satélites análogos situados a intervalos en la órbita geoestacionaria impedirá las observaciones radioastronómicas de alta sensibilidad en una banda del cielo de 38° o más de anchura, centrada en la órbita. La pérdida de esa amplia extensión de cielo impone graves limitaciones a las observaciones radioastronómicas.

En la Fig. 4.3 se sugiere un criterio útil para la protección de la radioastronomía frente a las emisiones de los satélites geoestacionarios. Esta Figura muestra la proyección de la órbita geoestacionaria en coordenadas celestes vista desde las latitudes de algunos importantes observatorios de radioastronomía. Si fuera posible apuntar un radiotelescopio dentro de 5° de la órbita sin encontrar interferencia perjudicial, quedaría una banda de cielo de 10° de anchura indisponible para observaciones de alta sensibilidad. Ello supondría todavía una

pérdida grave para tal observatorio. Sin embargo, en el caso de una combinación de radiotelescopios emplazados en latitudes septentrionales y meridionales que funcionaran en las mismas frecuencias, estaría accesible todo el cielo. Por consiguiente, debe considerarse que un valor de 5° es la separación angular mínima entre el haz principal de la antena radioastronómica y la órbita geoestacionaria.

### FIGURA 4.3





En la respuesta de antena modelo de la ecuación (4.1), el nivel de los lóbulos laterales para un ángulo de 5° con respecto al haz principal es de 15 dBi. Por tanto, para evitar la interferencia perjudicial sobre un radiotelescopio apuntado dentro de 5° del transmisor, las emisiones de satélite dentro de las bandas de radioastronomía deben reducirse 15 dB por debajo de las dfp indicadas en los Cuadros 4.1 y 4.2. Cuando los satélites estén separados sólo unos pocos grados en la órbita, los niveles de p.i.r.e. procedentes de cada transmisor en la dirección de un observatorio deberán ser incluso inferiores, para cumplir el requisito de que la suma de las potencias de todas las señales interferentes recibidas esté 15 dB por debajo de  $\Delta P_H$  en los Cuadros 4.1 y 4.2.

Queda claro que puede obtenerse cierto grado de protección adicional frente a las emisiones de satélite reduciendo al mínimo el nivel de la ganancia de lóbulo lateral cerca del haz principal. Ésta debe ser una consideración importante en el diseño de las futuras antenas radioastronómicas.

## 4.7.4 Filtrado

Gracias a la utilización de filtros paso-banda, el receptor de radioastronomía rechaza la energía de la señal no deseada fuera de la banda observada. Pueden insertarse diversos filtros en distintas etapas del sistema de recepción para que no haya en ningún punto señales no deseadas suficientemente intensas que provoquen la pérdida de linealidad. Puede obtenerse una selectividad muy elevada utilizando filtros digitales, pero éstos deben ir precedidos de la amplificación suficiente para que las señales puedan digitalizarse. Puede necesitarse que la respuesta en los bordes de la banda sea tan baja como -100 dB respecto de la banda central, de modo que la anchura del filtro en los puntos de -3 dB puede ser inferior a la anchura completa de la banda asignada. Siendo relativamente bajas las frecuencias intermedias, normalmente entre 100 MHz y 10 GHz, es posible utilizar bordes de filtro relativamente agudos. La pendiente de los bordes de la respuesta del filtro depende del número de secciones de éste y de la respuesta diseñada. En el Capítulo 6 se tratan más a fondo estos puntos.

## 4.7.5 Niveles de interferencia capaces de dañar o saturar los receptores radioastronómicos

El Informe UIT-R RA.2188 – Power flux-density and e.i.r.p. levels potentially damaging to radio astronomy receivers, señala que para dañar o destruir la mayor parte de los receptores de radioastronomía basta con potencias de entrada del orden de 25 mW, aunque niveles de entrada mucho más débiles saturarían su ganancia. Existen varios escenarios que afectan a los radares existentes y pueden dar lugar a la entrada de estos niveles de potencia.

- Acoplamiento entre lóbulos principales. La elevada ganancia de las antenas radioastronómicas combinada con la elevada potencia y pequeños tamaños del haz de cobertura restringida de diversos radares de detección de referencia terrestre en órbita funcionando a frecuencias entre 1 y 94 GHz, representan esta posibilidad [Ref. GCFE], en el caso de que los lóbulos principales de ambos sistemas lleguen a solaparse. Aunque se prevé que este acoplamiento sea bastante infrecuente en sentido estadístico, las consecuencias de este encuentro para un operador de radioastronomía serían muy graves.
- Acoplamiento del lóbulo principal con un lóbulo secundario. Como señala la Recomendación UIT-R RA.1750 – Planificación mutua entre el servicio de exploración de la Tierra por satélite (activo) y el servicio de radioastronomía en las bandas de 94 GHz y 130 GHz, un receptor de radioastronomía se saturará siempre que la antena sobre la que esté montado quede iluminada directamente por un radar de detección de referencia terrestre de alta potencia en órbita, incluso para la recepción en un lóbulo lateral a 0 dBi de la antena radioastronómica. Además, el receptor de radioastronomía se saturará cuando el lóbulo principal de la antena radioastronómica quede iluminado por un lóbulo lateral de 0 dBi o incluso más débil procedente de un radar en órbita, siempre que la ganancia de la antena radioastronómica sea superior a la del radar en órbita.

Incluso transmisores bastante más modestos, como los radares en vehículos de 76-77 GHz y 77-81 GHz, descritos en la Recomendación UIT-R M.1452 – Radares de ondas milimétricas para evitar colisiones entre vehículos y sistemas de radiocomunicaciones para aplicaciones de sistemas de transporte inteligentes, pueden producir niveles de potencia capaces de provocar daños o saturación cuando operan en la proximidad de una antena radioastronómica, dada la alta ganancia y el pequeño tamaño de los haces de cobertura restringida que se acumulan a las frecuencias en las que operan.

## 4.8 Análisis de Monte Carlo

El análisis de Monte Carlo se utiliza ocasionalmente para estimar la fracción de tiempo durante la que una señal interferente rebasará el umbral perjudicial para la radioastronomía. Este procedimiento es útil en los casos en que el ángulo entre la dirección de la fuente interferente y el haz principal del radiotelescopio varíe rápidamente. La variación puede ser el resultado del movimiento de la fuente interferente, como en el caso de un satélite no OSG, y/o de la variación de la puntería del telescopio impuesta por el programa astronómico. El número y la distancia de las fuentes interferentes activas también pueden variar, como en el caso de la interferencia procedente de vehículos móviles en tierra. Con el método de Monte Carlo, se analiza un gran número de configuraciones de prueba y en cada una de ellas se elige aleatoriamente el valor del parámetro desconocido entre una serie de valores con la representación estadística adecuada para el parámetro en cuestión. Así pues, el análisis de Monte Carlo es un experimento estadístico compuesto de una serie de ensayos independientes. Todos los parámetros se seleccionan aleatoriamente en cada ensayo, conforme a distribuciones de probabilidad fijas que se hayan previsto. La fracción de los ensayos durante la que se rebasa el umbral de interferencia ofrece una indicación de la probabilidad de interferencia en una situación real. No obstante, si, por ejemplo, no llegase al 2% el porcentaje de los ensayos con una interferencia superior al umbral perjudicial, no podría afirmarse con certeza que la probabilidad de interferencia no superaría el 2%, aunque con un cierto grado de certeza podría deducirse un límite superior correspondiente de la probabilidad de interferencia. Estas relaciones se tratan brevemente a continuación, conforme al análisis de Ponsonby [2002]. Véase que en los casos en que la probabilidad de un evento sea pequeña, el método de Monte Carlo no será muy adecuado para su determinación precisa, porque se requiere un número muy grande de simulaciones para construir estadísticas significativas.

Considérese un análisis en el que haya N intentos y en n casos el resultado sea inaceptable, es decir, que la interferencia sobrepase el umbral perjudicial. Sea p la probabilidad de que un ensayo cualquiera dé un resultado inaceptable. El valor de p obtenido de los ensayos tiende hacia n/N a medida que N tienda a infinito. Para un

valor finito de N, la probabilidad de obtener n resultados inaceptables para un valor de p viene dada por la distribución de Bernoulli que es:

$$P_p(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{(N-n)}$$
(4.12)

Para interpretar el resultado de un análisis de Monte Carlo se necesita conocer  $P_n(p)$ , probabilidad de distribución de p para n resultados inaceptables en un número finito de ensayos. Se trata del problema inverso para cuya solución se necesita la integral siguiente que normaliza la distribución:

$$\frac{N!}{n!(N-n)!} \int_0^1 x^n (1-x)^{(N-n)} dx = \frac{1}{N+1}$$
(4.13)

La probabilidad inversa es entonces:

$$P_n(p) = \frac{(N+1)!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{(N-n)}$$
(4.14)

Supóngase que se requiera una certeza del 90% de que el valor verdadero de p no sea superior a un valor designado,  $p_{90}$ . Entonces,  $P_n(p)$  deberá satisfacer la ecuación integral:

$$\int_{0}^{p_{90}} P_n(p) \,\mathrm{d}p = 0.9 \tag{4.15}$$

Para una probabilidad del 2% de que el resultado sea inaceptable,  $p_{90} = 0,02$  y la ecuación (4.15) da soluciones para valores de *N* y *n* tales que pueda concluirse a partir de *N* ensayos que hay una certeza del 90% de que la probabilidad de un resultado inaceptable en cualquier ensayo no sobrepase el 2%. Para los diversos valores de *N*, el Cuadro 4.5 muestra valores de *n* que no deben rebasarse a fin de que, con una probabilidad del 90%, pueda llegarse a la conclusión de que la probabilidad de un resultado inaceptable en cualquier ensayo no rebase el 2%. Véase que cuando *N* es muy grande, *n/N* se aproxima al 2%. No obstante, para *N* = 390, se requiere un valor de *n/N* no superior al 1% para tener una certeza del 90% de que la probabilidad de un resultado inaceptable no sea mayor del 2%.

### CUADRO 4.5

Valores de *N* y *n* para una probabilidad no superior al 2% de que el resultado sea inaceptable, con una certeza del 90%

N	n	n/N (%)	рэо (%)
292	1	0,52	2,0
397	4	1,01	2,0
776	10	1,29	2,0
1 900	30	1,58	2,0
10 000	181	1,81	2,0
50 000	960	1,92	2,0
# ANEXO 1

# AL CAPÍTULO 4

# Modelo de lóbulos laterales de la Recomendación UIT-R S.1428

El modelo de ganancia de lóbulos laterales de la Recomendación UIT-R S.1428, para antenas de diámetro, D, superior a 100 longitudes de onda ( $\lambda$ ) es el siguiente:

$G(\varphi) = G_{max} - 2.5 \times 10^{-3} \{D\varphi/\lambda\}^2 \mathrm{dBi}$			para $0^{\circ} < \phi < \phi_m$
$G(\varphi) = G_1$	para	$\phi_m$	$< \phi < \phi_r$
$G(\varphi) = 29 - 25 \log(\varphi)$	φ) dBi	para	$\varphi_r < \varphi < 10^\circ$
$G(\varphi) = 34 - 30\log(\varphi)$	(φ) dBi	para	$10^{\circ} < \phi < 34, 1^{\circ}$
$G(\varphi) = -12 \text{ dBi}$	para	34,1°	$<\phi < 80^{\circ}$
$G(\varphi) = -7 \text{ dBi}$	para	80°	$<\phi < 120^{\circ}$
$G(\phi) = -12 \text{ dBi}$	para	120°	< \phi < 180°

siendo:

 $G_{max} = 10 \log{\{\eta(\pi D/\lambda)^2\}} dBi$ 

η: eficacia de la apertura para η = 0,7,  $G_{máx} = 20 \log{D/\lambda} + 8,4 \text{ dBi}$ 

 $G_1 = -1 + 15 \log\{D/\lambda\} dBi$ 

 $\varphi_m = \{20\lambda/D\}(G_{max} - G_1)^{1/2} \text{ grados}$ 

 $\varphi_r = 15,85 \{D/\lambda\}^{-0.6} \text{ grados}$ 

#### REFERENCIAS

- BARNBAUM, C. y BRADLEY, R. F. [1998] A new approach to interference excision in Radio Astronomy: real-time adaptive cancellation. Astron. J., Vol. 116, p. 2598-2614.
- CCIR [1966] Report 224-1. Documents of the XIth Plenary Assembly, ITU, Geneva, Vol. IV, p. 537-548.
- ELLINGSON, S. W. y CAZEMIER, W. [febrero de 2003] Efficient multibeam synthesis with interference nulling for large arrays. *IEEE Trans. Ant. Prop.*
- FOMALONT, E. B. *et al.* [1991] The micro-jansky radio source population at 5 GHz. *Astron. J.*, Vol. 102, p. 1258-1277.
- KRAUS, J. D. [1966] *Radio Astronomy*. McGraw Hill, New York, NY, 2<sup>a</sup> ed. 1986, Cygnus-Quasar Books, Powell, OH.
- LOCKMAN, F. J., FREE, N. L. and SHIELDS, J. C. [2012] The Neutral Hydrogen Bridge Between M31 and M33, *Astron. J.*, Vol. 144, p. 52 67.
- OWEN, F. and MORRISON, G. E., [2008] The Deep Swire Field I. 20 cm Continuum Radio Observations: A Crowded Sky, *Astron.*. J., Vol. 136, p. 1889-1900.
- PONSONBY, J. E. B. [10-14 de junio de 2002] On 2% by Monte Carlo, Proc. of IUCAF Summer School In Spectrum Management And Frequency Coordination, NRAO, Green Bank, West Virginia.
- Planck Collaboration et. al [2011] Planck early results. I. The Planck Mission, Astron. and Astrophys, Vol. 536, 1
- GCFE: información disponible en https://www.sfcgonline.org
- THOMPSON, A. R. [1982] The response of a radio-astronomy synthesis array to interfering signals, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-30, p. 450-456.
- THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. y SWENSON, G. W. Jr. [1986 y 2001] *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. John Wiley, New York, NY, reprinted by Krieger Press, Melbourne, FL., véase el Capítulo 14. 2ª ed., John Wiley, 2001, véase el Capítulo 15.
- WALTER, F. et al [2012] *Nature*, The intense starburst HDF 850.1 in a galaxy overdensity at z≈5.2 in the Hubble Deep Field, Vol. 486, p 233-238.

# CAPÍTULO 5

# Compartición de las bandas de radioastronomía con otros servicios

# 5.1 **Observaciones generales**

La mayoría de las bandas de radioastronomía están compartidas con servicios activos transmisores. Esa compartición es especialmente difícil para la radioastronomía, que es un servicio pasivo (receptor solamente) y muy sensible a la interferencia. Dadas las grandes distancias de las fuentes astronómicas, los niveles de la dfp de las emisiones objeto de investigación están situados a menudo a 100 dB o más por debajo de los de las transmisiones artificiales situadas cerca del observatorio. La intensidad y las características de las señales astronómicas están determinadas por las leyes naturales y escapan al control del radioastrónomo. Además, teniendo en cuenta la naturaleza experimental de la ciencia, el radioastrónomo es a menudo incapaz de saber por adelantado cuáles serán las características de las emisiones. Esos factores hacen que la radioastronomía sea especialmente vulnerable a la interferencia. La interferencia puede ser perjudicial no sólo si es fuerte y enmascara las señales astronómicas sino también si es débil. Un riesgo insidioso para la radioastronomía reside en la interferencia que está situada ligeramente por debajo del nivel de potencia en el que puede reconocerse en mediciones individuales y que se halla presente durante una amplia fracción del tiempo total. En tal caso, no habrá posibilidad de detectar qué interferencia se ha producido en el curso del experimento y los resultados subsiguientes podrían contener graves errores.

Los observatorios de radioastronomía suelen estar situados en lugares especialmente elegidos a fin de minimizar la interferencia causada por otros servicios. Generalmente, las ubicaciones están a una distancia considerable de las principales fuentes terrenales de interferencia y, cuando no están efectuando observaciones a longitudes de onda milimétricas, para las que es importante tener por debajo toda la atmósfera que sea posible, frecuentemente están apantalladas por un terreno bastante alto. Con esta protección para el observatorio y la protección que brinda la curvatura de la Tierra, es posible la compartición con transmisores terrenales cuando la potencia del transmisor sea baja y exista la separación geográfica suficiente. No obstante, con los sistemas tan sensibles que se utilizan en radioastronomía, suelen necesitarse grandes separaciones. Como se indica en § 5.3, esa compartición no es en general posible cuando el transmisor está en la línea de visión directa de la antena radioastronómica o de su bocina. Habitualmente es necesario que el transmisor esté situado por encima del horizonte, a distancias de 100 km o más. Los transmisores a bordo de aeronaves, vehículos espaciales, plataformas en estaciones situadas a gran altitud o globos pueden permanecer dentro de la línea de visibilidad directa del observatorio durante distancias muy grandes y se pierden las ventajas asociadas a la selección cuidadosa del emplazamiento del observatorio y a la atenuación debida a la curvatura de la Tierra. En ondas decamétricas (3-30 MHz), cualquier interferencia se propaga casi invariablemente por la ionosfera. En este caso, tampoco la selección del emplazamiento del observatorio y la curvatura de la Tierra proporcionan protección y en algunas circunstancias puede esperarse que haya interferencia de un transmisor en el mismo canal situado en cualquier punto de la Tierra.

Puede establecerse una distinción entre problemas locales, regionales y mundiales. Un problema local, como es la interferencia provocada por un transmisor situado cerca de un observatorio radioastronómico, habrá de resolverse a nivel local teniendo en cuenta factores tales como el apantallamiento del emplazamiento. Los problemas regionales tales como la interferencia provocada por transmisores de televisión habrán de abordarse a escala regional, teniendo en cuenta los planes nacionales de frecuencias y otros factores regionales, como son las condiciones distintas y las asignaciones de frecuencias en países cercanos geográficamente. Los problemas mundiales, como la interferencia provocada por transmisores a bordo de satélites, sólo pueden resolverse a nivel de la UIT. Cada tipo de problema de compartición exige su propio tipo de solución.

# 5.1.1 Criterios de protección para el SRA

Un importante criterio de protección para la radioastronomía es el nivel de potencia de la interferencia que se considera perjudicial. Como se indica en el Capítulo 4, el umbral de interferencia depende de la frecuencia de la observación y del tipo de medición que se pretenda llevar a cabo. También puede ser necesario tener en cuenta las características detalladas de la interferencia.

Un segundo criterio se refiere a la fracción del cielo para la cual deban protegerse las observaciones radioastronómicas. Para los agentes interferentes que operan desde la superficie terrestre se adopta un valor de 0 dBi para la ganancia de la antena radioastronómica en la dirección de la causa de la interferencia o en la dirección del horizonte en el caso de un transmisor distante. La adopción de este valor significa que las posibles fuentes de interferencia en los niveles de interferencia perjudicial de la Recomendación UIT-R RA.769 no provocarán interferencia perjudicial sobre las observaciones realizadas en ángulos de elevación superiores a 19° (basándose en el modelo de radiación señalado en la Recomendación UIT-R SA.509). Las observaciones efectuadas con menos de 19° de elevación sufrirán interferencia si las transmisiones procedentes de la fuente interferente (terrenal) se reciben por los lóbulos laterales con ganancias superiores a 0 dBi. En este caso, parte del firmamento resulta de hecho bloqueado para las observaciones radioastronómicas, tal como se explica en el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R RA.1513. De hecho, los radioastrónomos pueden estar preparados para aceptar esta restricción de la cobertura del firmamento, porque la rotación terrestre permitirá acceder a la mayoría de los objetos celestiales con un ángulo de elevación más favorable. No obstante, dicho bloqueo del cielo puede ser muy restrictivo para las observaciones de fuentes celestiales que hacen sólo una breve aparición sobre el horizonte (por ejemplo, las observaciones del centro galáctico desde latitudes muy septentrionales), o para las observaciones críticas en el tiempo. En el caso de la interferencia procedente de un vehículo espacial geoestacionario, conviene tener una ganancia de la radioastronomía de 12-15 dBi que permita efectuar las observaciones dentro de un ángulo de 5° de un satélite en la órbita geoestacionaria, tal como se indica en el Capítulo 4. La aplicación del concepto de bloqueo del firmamento a los casos de interferencia procedente de transmisores a bordo de aeronaves o de vehículos espaciales en órbita no geoestacionaria se describe en las Recomendaciones UIT-R S.1586 y UIT-R M.1583.

Un tercer criterio que debe considerarse es el porcentaje del tiempo durante el cual puede rebasarse un nivel umbral sin degradar gravemente el funcionamiento del servicio. Este criterio del porcentaje de tiempo y el aspecto correspondiente del bloqueo del cielo se consideran en la Recomendación UIT-R RA.1513 que especifica una pérdida combinada de datos del 5% debida a los transmisores de todos los servicios en cualquier banda de frecuencias atribuida al SRA con carácter primario, y de no más del 2% de pérdida de datos debida a los transmisores de cualquier servicio. Debe señalarse que el concepto de pérdida combinada de datos no está plenamente desarrollado aún y que se requieren nuevos estudios sobre el reparto de la interferencia entre las distintas redes y servicios. La Recomendación UIT-R RA.1513 especifica también que el porcentaje de pérdida de datos ha de determinarse como el porcentaje de los periodos de integración de 2000 s en los que el promedio de la defp en el radiotelescopio supere los niveles definidos en la Recomendación UIT-R RA.769 (suponiendo una ganancia de antena de 0 dBi). Los efectos de la interferencia periódica en escalas temporales del orden de segundos o inferiores requiere nuevos estudios.

Hay que poner de relieve que para ciertos tipos de observaciones, una proporción de fallos del 5% debida a la interferencia impone severas restricciones a los radioastrónomos. Para ciertas observaciones tales como las de un cometa, un ocultamiento por la Luna o la explosión de una supernova es deseable una alta probabilidad de éxito, debido a la dificultad o imposibilidad de repetirlas. Otros tipos de observación requieren mediciones simultáneas a distintas longitudes de onda y en varios emplazamientos, en cada uno de los cuales deben ser fructíferas para que el experimento en conjunto tenga éxito. Un ejemplo es el estudio de una nova en erupción coordinado en varias longitudes de onda. Se puede perjudicar seriamente al experimento si, debido a las interferencias, no pueden efectuarse las observaciones en cualquiera de los observatorios. Un observatorio que tenga dificultades de este tipo requerirá arreglos nacionales especiales para ciertas frecuencias y en ciertos momentos.

Otro efecto de la propagación que ha de tenerse en cuenta es la reflexión de la señal interferente. Es probable que las reflexiones procedentes de aeronaves provoquen interferencia en una banda compartida, incluso cuando el transmisor terrenal esté distante. También existe la posibilidad de interferencia por reflexión procedente de satélites de órbita baja. Un único cuerpo reflectante actuará sólo durante un breve periodo y el problema de la interferencia dependerá de la densidad del tráfico aéreo o espacial. Como resultado de las actividades espaciales se plantea el problema del alto número de objetos metálicos situados en órbita alrededor de la Tierra. En ciertos tipos de mediciones radioastronómicas en bandas compartidas, las reflexiones de las transmisiones terrenales por la Luna pueden provocar interferencia intensa.

Los criterios de protección considerados hasta ahora están todos relacionados con el umbral de potencia de la interferencia y el porcentaje de cielo y la fracción de tiempo de observación que se han de proteger; todos guardan relación directa con la compartición geográfica, esto es, la separación geográfica de dos servicios que

permite a ambos trabajar en la misma frecuencia y al mismo tiempo. En la compartición entre ciertos servicios se puede obtener una protección adicional mediante el uso de polarizaciones ortogonales. Esta técnica no es útil para proteger a la radioastronomía, ya que para muchas observaciones deben utilizarse ambas polarizaciones, y también debido a que la interferencia suele penetrar en el sistema radioastronómico por lóbulos laterales alejados de una antena de alta ganancia con características de polarización muy distintas a las del haz principal.

Conviene señalar que, excepto en raros casos, la compartición con el SRA sólo es posible mediante separaciones geográficas efectivas. Tal vez resulte viable la compartición limitada en el tiempo para efectuar observaciones especiales en un emplazamiento radioastronómico y puede evidentemente ser necesaria en algunas ocasiones, como se expone en § 5.9. En particular, ello puede ser útil en las bandas no atribuidas a la radioastronomía.

# 5.2 Distancias de separación necesarias para la compartición con un único transmisor (véase la Recomendación UIT-R RA.1031)

Para que la compartición geográfica tenga éxito, el transmisor interferente y el receptor interferido deben estar separados por una distancia tal que la interferencia no se considere perjudicial. Utilizando los criterios desarrollados en el Capítulo 4, la atenuación a esta distancia debe ser suficiente para reducir la señal interferente por debajo del nivel correspondiente indicado en la Recomendación UIT-R RA.769, durante todo el tiempo menos un porcentaje, *p*. El Apéndice 7 del RR define la pérdida de transmisión  $L_b(p)$ . Esta ecuación se indica a continuación con la adición de un término de atenuación atmosférica, *A*:

$$L_b(p) = P_t + G_t + G_r - P_r(p) - A$$
(5.1)

siendo:

- $L_b(p)$ : mínima pérdida de transmisión básica admisible (dB) durante el p% del tiempo; las pérdidas de transmisión reales deben superar este valor durante todo el tiempo salvo el p% del mismo
- $P_t$ : nivel de potencia transmitida (dBW) en la anchura de banda de referencia a la entrada de la antena
- *G<sub>t</sub>*: ganancia (dBi) de la antena transmisora en la dirección del receptor de radioastronomía
- $G_r$ : ganancia (dBi) de la antena radioastronómica en dirección del transmisor
- $P_r(p)$ : máxima potencia de interferencia admisible (dBW) en la anchura de banda de referencia que puede rebasarse durante no más del *p*% del tiempo a la entrada del receptor.
- *A*: factor de pérdida adicional debido a la absorción atmosférica.

Utilizando los criterios de protección del Capítulo 4 ( $G_r = 0$  dBi) la ecuación (5.1) adopta la forma siguiente:

$$L_{b}(p) = P_{t} + G_{t} - P_{r}(p) - A$$
(5.2)

donde  $P_r$  debe obtenerse de la columna 7 del Cuadro 4.1 o del Cuadro 4.2 del Capítulo 4.  $L_b(p)$  debe calcularse utilizando un modelo apropiado, como los de la amplia serie que figura en las Recomendaciones UIT-R P.452, UIT-R P.526 y UIT-R P.617.

La atenuación atmosférica aumenta rápidamente con la humedad y la frecuencia de observación. Por debajo de 15 GHz, la atenuación atmosférica cenital suele ser pequeña, < 0,1 dB, y puede ignorarse en la ecuación (5.2). Entre 15 y 115 GHz, la opacidad cenital en emplazamientos elevados y secos es moderada, < 1 dB, y ofrece sólo una pequeña protección contra la interferencia. Por encima de 115 GHz, la opacidad de la atmósfera varía con rapidez cerca de la frecuencia de resonancia de las moléculas de la atmósfera, y ofrece una protección importante contra la interferencia (véase § 5.7).

Para la transmisión con visibilidad directa, la pérdida de transmisión en el espacio libre no suele ser variable y el criterio de tiempo no es pertinente. En este caso,  $L_b$  tiene una expresión analítica simple y la ecuación (5.2) puede escribirse del siguiente modo:

#### Radioastronomía

$$20 \log(4\pi d) - 20 \log(\lambda) = P_t + G_t - P_r - A$$
(5.3)

siendo *d* es la distancia (m) entre el transmisor y el receptor y  $\lambda$  la longitud de onda (m).

En el anterior análisis,  $P_t$  es la potencia transmitida dentro de la anchura de banda  $B_r$  del receptor de radioastronomía. Si la potencia del transmisor  $P_T$  está distribuida en una anchura de banda  $B_t > B_r$  entonces:

$$P_t = P_T - 10 \log(B_t/B_r) + A \tag{5.4}$$

suponiendo que la potencia del transmisor tenga una densidad espectral uniforme.

# 5.3 Compartición en el caso de visibilidad directa

Es raramente posible que la radioastronomía comparta satisfactoriamente un espectro atribuido con cualquier otro servicio cuyos transmisores estén dentro de la distancia de visibilidad directa del observatorio. La Fig. 5.1 pone de manifiesto este hecho. La p.i.r.e. máxima que no causaría interferencia perjudicial al SRA se ha calculado utilizando las ecuaciones (5.3) y (5.4) para dos distancias. La distancia de 600 km es representativa de un transmisor terrenal situado a larga distancia en la visual, por ejemplo, un transmisor de aeronave en el horizonte a una altura de 20 km. La otra distancia corresponde a la órbita geoestacionaria por lo que es representativa de la distancia máxima de la mayoría de los transmisores de vehículos espaciales que no estén en misiones en el espacio lejano. En el caso del transmisor terrenal se han utilizado los niveles de interferencia umbral de la Recomendación UIT-R RA.769, Cuadro 1. Como se indica en § 4.7.3 se recomienda una protección adicional de 12-15 dB para el caso del transmisor en órbita geoespacial, a fin de permitir las observaciones dentro de 5° de un satélite en órbita. Las curvas se aplican en atmósfera seca y clara. En las frecuencias superiores a unos 50 GHz la absorción atmosférica puede ser de varias décimas de decibelios por kilómetro, dependiendo de la densidad del vapor de agua y de la compartición con transmisores de baja potencia a lo largo de líneas de visibilidad directa largas, puede ser posible en algunas circunstancias.

FIGURA 5.1



 $N_{ota}$  – Valores de la p.i.r.e. por encima de los cuales no es factible la compartición entre el servicio de radioastronomía y servicios activos con transmisores en visibilidad directa con respecto a un observatorio de radioastronomía. Se supone que la banda de paso del receptor radioastronómico es igual a la de la frecuencia atribuida al servicio de radioastronomía y que la p.i.r.e. es la potencia isótropa radiada equivalente en la banda. La curva A indica los resultados de un transmisor en órbita ge oestacionaria y la curva B los de un transmisor terrenal en visibilidad directa a 600 km.

Radio-Astro\_51

Se deduce claramente de la Fig. 5.1 que no parece probable la compartición con un transmisor terrenal situado dentro de la zona de visibilidad directa en frecuencias inferiores a 10 GHz, debido a las fuertes restricciones que ello impondría a la p.i.r.e. del transmisor. Incluso para frecuencias de hasta 40 GHz, la potencia del transmisor no debería ser superior a algunos milivatios ya que de lo contrario la antena transmisora tendría que proporcionar una elevada discriminación en la dirección del observatorio para que la compartición fuera posible. Para transmisores a bordo de vehículos espaciales que no están situados en el espacio lejano, con potencias normales superiores a 1 W, la compartición no será posible ni siquiera fuera de la zona de cobertura de la antena a bordo para frecuencias de hasta unos 20 GHz. Entre 20 GHz y 50 GHz, no es probable que sea posible la compartición dentro de la zona de cobertura de la antena espacial. Los transmisores de los satélites en órbita alturas inferiores a 6 400 km tendrían que limitarse a una p.i.r.e. situada entre las curvas A y B para que la compartición fuera factible.

En § 5.8 se describe un caso especial de compartición con vehículos en misiones en el espacio lejano.

# 5.4 Compartición con servicios que utilizan transmisores terrenales

El establecimiento de zonas de coordinación alrededor de los emplazamientos de radioastronomía proporciona un método para evitar la interferencia perjudicial procedente de transmisores terrenales de otros servicios que compartan una banda de radioastronomía. De las consideraciones anteriores se deduce claramente que la compartición sólo será factible en el caso de servicios cuyos transmisores estén más allá del horizonte. El criterio fundamental para definir una zona de coordinación es que la interferencia total procedente de todos los usuarios situados fuera de la misma, no supere el nivel medido en el observatorio de radioastronomía. Así pues, el tamaño de la zona de coordinación dependerá de distintos factores. Los tipos de mediciones que se efectúen en el observatorio de radioastronomía determinarán los correspondientes umbrales de interferencia

de la Recomendación UIT-R RA.769. El número y la distribución de los usuarios fuera de la zona, la p.i.r.e. de las transmisiones de usuario en dirección del observatorio de radioastronomía, la fracción de tiempo que estén en actividad y las características de propagación determinarán la dfp interferente en el emplazamiento radioastronómico. Las características de propagación dependen de factores tales como el perfil del terreno, la presencia de árboles y las condiciones atmosféricas. En § 5.2 se sugieren modelos de propagación apropiados.

Dados los numerosos factores implicados, los límites de la zona de coordinación tienen que establecerse por separado para cada emplazamiento de radioastronomía donde se requiera esa zona, teniendo en cuenta cualquier característica especial de las mediciones de radioastronomía y del servicio activo con el que comparta la banda. Conviene tener en cuenta que es probable que el tamaño de la zona de coordinación sea de 100 km o más. En el caso de muchos países pequeños, la zona de coordinación requerida puede extenderse más allá de las fronteras nacionales y adentrarse en países en los que las atribuciones de frecuencias son diferentes. Tal vez haya que aplicar consideraciones especiales al determinar las zonas de coordinación para proteger a la radioastronomía en los países pequeños.

La zona de coordinación define una región situada alrededor del observatorio fuera de la cual los usuarios del servicio activo pueden transmitir libremente sin causar interferencia perjudicial para las observaciones radioastronómicas. Para los usuarios situados dentro de la zona de coordinación deben encontrarse medios técnicos que eviten la interferencia perjudicial sobre el SRA. Esto podría implicar, por ejemplo, la elección cuidadosa del emplazamiento de un transmisor fijo para aprovechar el apantallamiento natural o el diseño de la antena transmisora con un nulo en la dirección del observatorio. En otros casos, tal vez la única solución técnica sea evitar cualquier transmisión en la banda de radioastronomía dentro de la zona de coordinación.

# 5.5 Compartición con los servicios móviles

En principio deben establecerse zonas de coordinación para proteger a los emplazamientos de radioastronomía frente a los transmisores móviles. En este caso, el usuario móvil debe tener algún medio de determinar cuándo ha entrado en una zona de coordinación y también algún medio para reducir la interferencia recibida en el observatorio radioastronómico hasta un nivel inferior al umbral de la interferencia. La Recomendación UIT-R M.1316 establece principios y una metodología para la compartición entre el SMS (Tierra-espacio) y el SRA en las bandas 1 610,6-1 613,8 MHz y 1 660-1 660,5 MHz, de acuerdo conun planteamiento de simulación de Monte Carlo. El método introduce, además de la zona de coordinación, una zona interior de exclusión en la que no puede transmitir ningún móvil, junto con una zona intermedia de restricción en la que puede haber algunas limitaciones al funcionamiento de los móviles. No obstante, la validez del planteamiento de Monte Carlo como base para la protección efectiva de la radioastronomía está aún pendiente de demostrarse en la práctica.

En el caso de los transmisores móviles en aeronaves, el tamaño de la zona de coordinación es mucho mayor que en los transmisores en tierra. Es probable que la aeronave permanezca en la línea de visibilidad directa de un observatorio radioastronómico durante grandes distancias, como se indica en § 5.3, y es también probable que la compartición resulte muy difícil. En general se necesitarán zonas de coordinación de muchos centenares de kilómetros, a menos que el observatorio radioastronómico esté excepcionalmente bien apantallado por un horizonte alto.

# 5.6 Compartición en las bandas de radioastronomía por debajo de 40 GHz

El Cuadro 5.1 muestra los resultados de los cálculos de coordinación efectuados en las bandas de radioastronomía compartidas por debajo de 40 GHz (tomados del Informe 696-2 del antiguo CCIR). El Cuadro ilustra la amplia gama de escenarios de compartición para el servicio de radioastronomía y las grandes distancias de separación requeridas. Se ha calculado para la mayoría de las bandas la distancia de separación necesaria para la compartición entre un transmisor hipotético y un receptor de radioastronomía, según se indica en las secciones anteriores. La distancia de separación que proporciona la pérdida básica necesaria de transmisión depende del mecanismo de propagación. Para frecuencias inferiores a 38 MHz predominan los efectos ionosféricos. En el caso de frecuencias superiores, la dispersión troposférica es fundamentalmente responsable de la interferencia durante el 10% del tiempo. Las distancias de separación para frecuencias de 74 MHz a 408 MHz se calcularon sin tener en cuenta los modelos más recientes (Recomendaciones UIT-R P.452, UIT-R P.526 y UIT-R P.617). Se calcula que las pérdidas de propagación pueden tener un error de 10 dB aproximadamente, del total de la pérdida de transmisión básica que es habitualmente de 220 dB. Esto significa a su vez que las distancias de separación pueden tener un error que es normalmente de 50-100 km, en comparación con los resultados obtenidos utilizando los modelos de propagación más recientes. Las distancias para frecuencias superiores a 408 MHz se calcularon utilizando la Recomendación UIT-R P.452-5. En todos los casos se ha supuesto una antena radioastronómica con una altura de 25 m. Los resultados no dependen excesivamente de este supuesto. Se dan los resultados para dos casos, uno en un emplazamiento con un ángulo de 1° con el horizonte y el otro en un emplazamiento bien protegido con un ángulo de 4° con el horizonte. Más adelante se exponen con más detalle algunas bandas de frecuencias particulares.

#### CUADRO 5.1

Parámetros de compartición y distancias de separación	
del Informe 696-2 del antiguo CCIR (1990)	

	Transmisor de interferencia supuesto						Receptor de radio-			Pérdida de transmisión	Distancia de separación	
Frecuencia (MHz)							astro	nonna su	puesto	requerida	<i>d</i> (1°)	<i>d</i> (4°)
(******)	Servicio	Pt (dBW)	Gt (dBi)	p.i.r.e. (dBW)	Bt (MHz)	N.°	C/LE	Pr (dBW)	Br (MHz)	L (dB)	(km)	(km)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
13	F			10	0,01	1	С	-185	0,05	195	>4000	>4000
25	F			10	0,01	1	С	-188	0,12	198	>4000	>4000
38	F	13	3	16	0,02	5	С	-190	0,50	213	930	700
74	F	15	10	25	0,03	7	С	-195	1,6	228	990	780
150	М	14	0	14	0,03	10	С	-199	2,95	223	820	600
327	М	14	0	14	0,03	15	С	-201	6,60	227	730	550
408	М	14	4	18	0,025	12	С	-203	3,9	232	760	560
610	В			40	6,0	1	С	-202	6,0	242	685	345
1 365	R	27	0	27	0,50	1	С	-205	27,0	232	440	155
	R	27	0	27	0,50	1	LE	-220	0,02	233	450	160
1 665	F	7	38	45	3,5	1	LE	-220	0,02	243	525	220
	F	7	0	7	3,5	1	LE	-220	0,02	205	155	< 100
	LMS(T-S)	-	_	0	0,004	1	LE	-220	0,02	220	290	< 100
	F	7	38	45	3,5	2	С	-207	10,0	252	630	305
	F	7	0	7	3,5	2	С	-207	10,0	214	230	< 100
2 700	F	10	0	10	10	1	С	-207	10,0	217	215	<100
4 830	F	10	44	54	40	1	С	-218	0,05	243	410	135
	F	10	0	10	40	1	С	-218	0,05	199	<100	< 100
5 000	F	10	44	54	40	1	С	-207	10,0	255	540	230
	F	10	0	10	40	1	С	-207	10,0	211	125	< 100
10 600	F	7	44	51	100	1	С	-202	100	253	430	155
	F	7	0	7	100	1	С	-202	100	209	<100	< 100
14 500	FS(T-S)	27	0	27	50	1	LE	-214	0,15	216	<100	< 100
22 200	F	-7	45	38	50	1	LE	-210	0,25	224	<100	< 100
31 000	F	-10	45	35	100	2	С	-192	500	227	< 100	< 100

(1) Frecuencia de la banda de radioastronomía.

(2) Servicio en el que funciona el transmisor (F: fijo, M: móvil, B: radiodifusión, R: radiolocalización, FS(T-S): fijo por satélite operando en el sentido Tierra-espacio y MTS(T-S): móvil terrestre por satélite (Tierra-espacio).

(3) Potencia del transmisor (dB con respecto a 1 W).

(4) Ganancia del transmisor en la dirección del observatorio de radioastronomía.

(5) p.i.r.e. del transmisor en la dirección del observatorio de radioastronomía.

(6) Anchura de banda de las emisiones de un solo transmisor.

(7) Número de transmisores que se supone que transmiten simultáneamente dentro de la banda de radioastronomía.

(8) Tipo de observación radioastronómica (C indica observaciones del continuum y LE indica observaciones de rayas espectrales).

(9) Umbral de interferencia perjudicial, tomado de la columna 7 de los Cuadros 4.1 y 4.2 del Capítulo 4, para observaciones del continuum y de las rayas espectrales, respectivamente.

(10) Anchura de banda de radioastronomía utilizada en el cálculo.

(11) Pérdida de transmisión requerida calculada mediante las ecuaciones (5.2) y (5.4).

(12) Distancia de separación requerida para evitar la interferencia perjudicial en las observaciones radioastronómicas en el caso de que el horizonte en el observatorio esté en un ángulo de elevación de 1°.

(13) Distancia de separación requerida para evitar la interferencia perjudicial en las observaciones radioastronómicas en el caso de que el horizonte en el observatorio esté en un ángulo de elevación de 4°.

# 5.6.1 La banda 1 330-1 427 MHz

La región del espectro de frecuencias en la proximidad de la raya espectral del hidrógeno, en una longitud de onda de 21 cm, es de gran importancia para la radioastronomía. La atribución en todo el mundo de la banda exclusivamente pasiva de 1 400-1 427 MHz a la radioastronomía para observaciones tanto de las rayas como del continuum ha sido un reconocimiento de esta importancia. A lo largo de los años han crecido en importancia las observaciones en la raya espectral del hidrógeno, desplazada por efecto Doppler a frecuencias inferiores. Este desplazamiento a frecuencias inferiores es el resultado de las grandes velocidades a las que las galaxias distantes se alejan de nuestra Galaxia. La importancia de las observaciones se reconoce en la nota número **5.149** del RR que confiere cierta protección a la radioastronomía en una banda situada por debajo de 1 400 MHz. En esta banda, la radiolocalización tiene carácter de servicio primario en las Regiones 2 y 3 y comparte la categoría primaria con los servicios fijo y móvil en la Región 1.

En esta banda, un radar terrestre con una potencia de cresta del impulso de 500 kW y una ganancia de antena de 34 dBi es un sistema normal de radiolocalización con fines aeronáuticos. Si el margen dinámico de un receptor de radioastronomía basta para aceptar la potencia de cresta del radar, el parámetro importante, en relación con la interferencia, es la potencia media en el receptor de radioastronomía durante su tiempo de integración. Para un radar que explora 360°, la p.i.r.e. media transmitida en la dirección del observatorio de radioastronomía es del orden de la potencia media del transmisor. La potencia real así transmitida depende del diagrama de la antena del radar y del tipo de exploración. Suponiendo que el radar tenga un ciclo de trabajo de 0,001, la potencia media será de 500 W. Para una observación de rayas espectrales se utiliza el Cuadro 2 de la Recomendación UIT-R RA.769 y el nivel de interferencia perjudicial será de -220 dBW en la banda de 20 kHz. Se supone que la potencia de salida del radar de 500 W está distribuida uniformemente sobre 0,5 MHz (un impulso de 2 µs). Esto reduce la potencia en un solo canal del receptor de radioastronomía en 10 log (500/20) = 14 dB. Entonces la pérdida de transmisión básica requerida será de 233 dB, lo que da distancias de separación de 450 y 160 km para elevaciones sobre el horizonte de 1° y 4° respectivamente; véase el Cuadro 5.1. Conviene notar que la potencia de cresta a la entrada del receptor es de -142 dBW cuando la interferencia media se encuentra justamente en el umbral perjudicial. Esto es, aproximadamente 15 dB por encima de la potencia de ruido del receptor en una banda de 0,5 MHz; en particular, si existe más de una señal de radar en la banda de paso del extremo de entrada del receptor, los efectos no lineales pueden invalidar el análisis en términos de potencia media.

# 5.6.2 La banda 4 800-5 000 MHz

La radioastronomía tiene en la banda de 4 800-4 990 MHz una atribución secundaria, mientras que los servicios fijo y móvil están atribuidos a título primario. Sin embargo, la nota número **5.149** del RR destaca las bandas de 4 825-4 835 MHz y 4 950-4 990 MHz para un tratamiento especial. La primera de estas bandas sirve para la observación de una raya espectral del formaldehído.

En la banda 4 990-5 000 MHz la radioastronomía comparte a título primario la banda con los servicios fijo y móvil (salvo móvil aeronáutico). El servicio fijo utiliza esta banda con sistemas de radioenlaces de baja potencia o de dispersión troposférica. Debido a la potencia media muy alta que utilizan estos últimos, la compartición con la radioastronomía es muy difícil. Los sistemas de radioenlaces con una potencia posiblemente de 10 W, una anchura de banda de 40 MHz en RF y una ganancia de antena de 44 dBi presentan problemas de compartición más sencillos. El Cuadro 5.1 da los resultados de dos casos de sistemas de radioenlaces, unos con una antena orientada directamente hacia el observatorio de radioastronomía y el otro con una antena apuntada lejos del observatorio (ganancia de 0 dBi en la dirección del observatorio).

# 5.6.3 Las bandas 22,01-22,21 y 22,21-22,5 GHz

En la primera de estas bandas la radioastronomía no tiene atribución, pero se insta a las administraciones a que protejan las observaciones radioastronómicas. En la segunda banda, la radioastronomía tiene una atribución a título primario. En ambas bandas la compartición se efectúa con los servicios fijo y móvil (salvo móvil aeronáutico). La banda contiene una importante raya espectral del vapor de agua en 22,235 GHz y se considera aquí la compartición con las observaciones de rayas espectrales. La raya espectral del agua puede producir una emisión máser potente («megamáser») procedente del entorno del agujero negro masivo situado en el centro de una galaxia activa y puede detectarse con grandes desplazamientos Doppler respecto a las frecuencias de reposo [Greenhill *et al.*, 2003]. El Cuadro 5.1 presenta los resultados del caso de una antena del servicio fijo que apunta hacia el observatorio radioastronómico.

# 5.7 Compartición en las bandas de radioastronomía por encima de 40 GHz

Existen atribuciones al SRA por encima de 40 GHz tanto para observaciones del continuum como de las rayas espectrales. Agunas de éstas se comparten con diversos servicios activos. Hasta fecha reciente había relativamente pocos sistemas activos funcionando por encima de 40 GHz y por ello se habían registrado pocos casos de interferencia para la radioastronomía. La situación está cambiando y se están efectuando estudios para diversas bandas de frecuencia, entre ellas la banda 42,5-43,5 GHz que está compartida entre el servicio de radioastronomía, el servicio fijo, el SFS (Tierra-espacio) y el servicio móvil (salvo móvil aeronáutico). En el servicio fijo se incluyen las aplicaciones del servicio fijo de gran densidad (véase la nota **5.547** del RR). La compartición con los servicios activos por encima de 40 GHz resultará más fácil que en las frecuencias inferiores por varias razones. Primero, en estas frecuencias se obtienen fácilmente directividades elevadas en transmisión con antenas de tamaño moderado; segundo, la atenuación atmosférica es superior en estas frecuencias; y tercero, la dispersión de las señales por la troposfera disminuye al aumentar la frecuencia.

# 5.7.1 Compartición entre 60 y 275 GHz

La Recomendación UIT-R RA.1272 examina la protección de las mediciones de radioastronomía por encima de 60 GHz contra la interferencia procedente del suelo. En estas frecuencias elevadas surgen dificultades de compartición especiales y particulares. Los receptores de bandas milimétricas de la radioastronomía se diseñan generalmente para abarcar toda la anchura de las ventanas atmosféricas (68-116 GHz, 130-170 GHz, 200-323 GHz, etc.), a fin de aprovechar la información que contienen múltiples rayas espectrales o lograr una anchura de banda elevada para las mediciones sensibles del continuum. Además, los mezcladores superconductor-aislante-superconductor empleados como primera etapa de los receptores heterodinos extremadamente sensibles son muy susceptibles a la saturación o incluso a la destrucción por las señales interferentes procedentes de cualquier punto en la banda que abarcan, mientras que no se dispone aún de tecnología de filtros de pocas pérdidas que les protejan. No obstante, el lado bueno es que sólo hay un número relativamente pequeño de observatorios de ondas milimétricas que hay que proteger en el mundo y éstos se han situado, cuando así ha sido posible, en emplazamientos distantes y aislados, a fin de aprovechar al máximo las condiciones atmosféricas extremadamente secas y los niveles reducidos de interferencia procedentes del suelo. Así pues, los observatorios de ondas milimétricas pueden protegerse de forma eficaz contra las transmisiones procedentes del suelo en todas las frecuencias superiores a 60 GHz por medio de zonas de coordinación de tamaño reducido, causando un perjuicio reducido a los servicios en tierra. La Recomendación UIT-R RA.1272 propugna el establecimiento de zonas de coordinación alrededor de los observatorios de ondas milimétricas para todas las frecuencias superiores a 60 GHz, cuando sea posible. La zona de coordinación tiene que definirse utilizando los umbrales de interferencia de la Recomendación UIT-R RA.769 y el procedimiento descrito en la Recomendación UIT-R RA.1031.

# 5.7.2 Compartición por encima de 275 GHz

Hay ciertas características en la gama de frecuencias 275-3 000 GHz que se combinan para reducir la probabilidad de interferencia entre el servicio de radioastronomía y servicios activos en esta gama. En la gama 275-3 000 GHz, la propagación a través de la atmósfera terrestre se ve intensamente afectada por la absorción debida a las moléculas atmosféricas. Las moléculas que más inciden en la absorción son la del oxígeno (O<sub>2</sub>) y la del vapor de agua (H<sub>2</sub>O). La absorción no resonante crea un continuum general de absorción que aumenta constantemente con la frecuencia, aunque aparecen valores de atenuación extraordinariamente grandes a frecuencias específicas correspondientes a la resonancia natural de las moléculas. A nivel del mar, el continuum general de absorción es de aproximadamente 5 dB/km a 275 GHz, 300 dB/km a 1 000 GHz y 4 000 dB/km a 3 000 GHz. A resonancias moleculares específicas en esta gama, la atenuación puede llegar a alcanzar los 550 000 dB/km. La atenuación disminuye con la altitud debido a la menor concentración de oxígeno y vapor de agua. En la Fig. 5.2 se representa la atenuación en dB/km a diferentes altitudes: a nivel del mar, a 1 000 m y a 3 000 m. Los parámetros utilizados en el cálculo de estas curvas figuran en el Informe UIT-R RA.2189.

#### FIGURA 5.2



#### Atenuación atmosférica calculada sobre trayectos horizontales de 1 km a distintas altitudes, suponiendo las propiedades atmosféricas del Cuadro 1. Como referencia, también se dibujan las pérdidas en el espacio libre a lo largo de 1 km

En el Informe UIT-R RA.2189 se determinan las distancias más allá de las cuales una señal transmitida a frecuencias entre 275 y 1 000 GHz no rebasaría los umbrales de interferencia de la astronomía extrapolados de la recomendación UIT-R RA.769, con arreglo a las hipótesis próximas al caso más desfavorable.

Debido a que la absorción atmosférica es un factor de peso para los sistemas terrenales a frecuencias de THz, debe incluirse en el cálculo de la pérdida de trayecto entre un transmisor y un receptor. Por el mismo motivo, los observatorios astronómicos que efectúan observaciones en esta gama están situados principalmente en las cumbres de las altas montañas. A una frecuencia de 275 GHz y 3 000 m de altitud, la velocidad de absorción de referencia es de 1 dB/km aproximadamente, y la atenuación atmosférica sobrepasa las pérdidas en el espacio libre para distancias superiores a 186 km aproximadamente. A una frecuencia de 1 000 GHz, la velocidad de absorción es de 100 dB/km aproximadamente, y la atenuación atmosférica sobrepasa la pérdida en el espacio libre para distancias superiores a 1,6 km aproximadamente; las cifras correspondientes a 3 000 GHz son de 1 000 dB/km aproximadamente, y la distancia a la que la atenuación supera las pérdidas en el espacio libre es de 150 m aproximadamente. La conclusión es que para frecuencias por encima de 1 000 GHz, aproximadamente, la absorción atmosférica es normalmente un factor más significativo que la dispersión geométrica (pérdida en el espacio libre).

La pequeñez del tamaño de los haces de la antena también contribuye a reducir las posibilidades de interferencia accidental. A frecuencias por encima de 275 GHz, las anchuras de haz son muy pequeñas, incluso para parábolas pequeñas. Por ejemplo, una parábola de 30 cm de diámetro (del tamaño de un plato de vajilla, aproximadamente) creará un haz de tan sólo 0,28° a una frecuencia de 275 GHz, suponiendo que el 75% del diámetro de la parábola está iluminado por la bocina de alimentación. Conforme disminuya el tamaño del haz al aumentar la frecuencia, las anchuras de haz a frecuencias por encima de 275 GHz serán aún menores.

Actualmente, la potencia de RF generada a estas frecuencias en la mayor parte de los sistemas en la práctica, es pequeña.

Un escenario terrenal «próximo al caso más desfavorable» para la interferencia sobre el servicio de radioastronomía desde un sistema activo en la gama de 275-3 000 GHz sería el de un transmisor que funcionara a la máxima potencia de RF disponible, alimentando una antena transmisora relativamente grande orientada directamente hacia un radiotelescopio, encontrándose tanto el transmisor como el telescopio a gran altura. Para simular este escenario y determinar la distancia a la que la presencia del transmisor podría resultar problemática para el radiotelescopio, se supondrá que tanto el radiotelescopio como el transmisor se encuentran a 3 000 m de altitud, que el transmisor está funcionando a una potencia que disminuye desde 2,75 dBm a 275 GHz hasta -20 dBm a 3 000 GHz y que la antena transmisora tiene un diámetro de 30 cm y está iluminada con una eficiencia del 75%. Con arreglo a estas hipótesis, puede calcularse la distancia, tal como se define en la Recomendación UIT-R RA.769 con la adición de un factor de absorción atmosférica como en la Fig. 5.2, a la que se produciría la interferencia. Estos resultados se dibujan en la Fig. 5.3 para 275-1 000 GHz y en la Fig. 5.4 para 1 000-3 000 GHz.

#### FIGURA 5.3

Distancia a partir de la cual una señal transmitida a frecuencias entre 275 y 1 000 GHz no superaría los umbrales de interferencia radioastronómica extrapolados de la Recomendación UIT -R RA.769, bajo hipótesis próximas al caso más desfavorable



#### FIGURA 5.4





La conclusión es que para frecuencias en la gama 1 000-3 000 GHz, un transmisor terrenal tendría que estar en la vecindad inmediata de un telescopio para causar interferencia, suponiendo un escenario correspondiente al caso más desfavorable tanto para el transmisor como para el telescopio situados en la cima de una montaña alta y seca. A baja elevación, la atenuación es muy superior y la distancia de la interferencia se reduce aún más, pero los radiotelescopios que funcionan en esta gama de frecuencias no estarían emplazados en dichas zonas.

Las fuentes de interferencia sobre los radiotelescopios a bordo de aeronaves, son transitorias debido al movimiento de los aviones con respecto al radiotelescopio. Esto es especialmente cierto para las frecuencias en la gama 1 000-3 000 GHz debido a que la gran absorción atmosférica de un trayecto oblicuo limita la posibilidad de interferencia solamente cuando el avión se encuentra directamente encima y su antena está orientada directamente al suelo. Debido a que el avión se desplaza con mucha rapidez con respecto al suelo, y que el haz en la gama de THz es muy estrecho, la interferencia tendrá una duración muy breve. Aunque la interferencia procedente de un transmisor THz que funcione a bordo de un helicóptero a gran altura sobrevolando directamente un radiotelescopio podría, posiblemente, superar el nivel umbral de la interferencia perjudicial extrapolado de la Recomendación UIT-R RA.769, la posibilidad de que se presente este escenario, al menos sin coordinación previa, es remota en el mejor de los casos. Por consiguiente, la interferencia provocada por sistemas a bordo de aeronaves sobre un observatorio radioastronómico también es improbable. Gracias a la combinación del pequeño tamaño del haz, el rápido movimiento y las pérdidas del espacio libre, la posibilidad de interferencia sobre un radiotelescopio procedente de satélites no OSG es extremadamente pequeña.

Por consiguiente, se puede concluir que salvo que las limitaciones de la generación de potencia en RF cambien drásticamente, la compartición entre los servicios de radioastronomía y otros servicios activos en la gama 275-3 000 GHz no debe constituir un problema.

# 5.8 Compartición con las investigaciones en el espacio lejano

Las bandas atribuidas a las transmisiones de investigación en el espacio lejano (espacio-Tierra) en 2,3 y 8,4 GHz son utilizadas habitualmente para las observaciones de VLBI, en la radioastronomía y en la geodesia (estudio de las placas tectónicas). El espacio lejano se define en el RR como la región del espacio situada más allá de  $2 \times 10^6$  km de la Tierra. Las misiones en el espacio lejano comprenden la exploración de planetas, asteroides y el viento solar. Los parámetros normales para las transmisiones espacio-Tierra procedentes de vehículos en el espacio lejano son de 20 W para la potencia del transmisor y de 4 m para el diámetro de la antena, lo que proporciona una ganancia de 36 dBi a 2,3 GHz o 47 dBi a 8,4 GHz. A la distancia de  $2 \times 10^6$  km de la Tierra, los niveles terrenales correspondientes de dfp son de -148 dB(W/m<sup>2</sup>) a 2,3 GHz y de -137 dB(W/m<sup>2</sup>) a 8,4 GHz. Por referencia al Capítulo 4 queda claro que esos niveles superan los umbrales de interferencia para las mediciones de potencia total de radioastronomía. Sin embargo, los niveles de dfp están por debajo de los umbrales de interferencia para las mediciones de VLBI. La experiencia obtenida hasta la fecha confirma que, en el caso especial de las mediciones de VLBI, es factible la compartición entre la radioastronomía y las comunicaciones procedentes del espacio lejano.

Para un vehículo espacial con los mismos parámetros del transmisor, se necesitará una distancia de separación de  $6 \times 10^7$  km para evitar la interferencia perjudicial en las mediciones de potencia total de radioastronomía. A título comparativo puede señalarse que el planeta Venus, el más cercano, está a una distancia de  $4 \times 10^7$  km en su más próximo acercamiento. En términos de los umbrales de interferencia del Capítulo 4, las señales procedentes de un vehículo espacial situado en las partes más cercanas del espacio lejano pueden causar interferencia perjudicial en los radiotelescopios que comparten la misma banda, mientras que los vehículos espaciales en misiones dirigidas a planetas alejados causarán muy poca interferencia (y las direcciones de dichos vehículos espaciales interferentes serán bien conocidas). Obsérvese que se supone aquí que las señales de los vehículos espaciales se recibirán por lóbulos laterales del radiotelescopio con una ganancia no superior a 0 dBi.

# 5.9 Compartición en el tiempo

Dada la naturaleza de los fenómenos observados en radioastronomía, sólo en condiciones especiales será factible establecer programas de compartición en el tiempo entre la radioastronomía y los servicios activos que operen en la misma banda de frecuencias. Además, los usuarios que proporcionan un servicio a clientes tal vez estén poco dispuestos a adoptar la compartición en el tiempo o no les resulte factible. La compartición en el tiempo puede a veces ser posible en principio, pero en la práctica las dificultades asociadas con la misma son operativas más que técnicas.

Sin embargo, debe ser factible la compartición limitada en el tiempo para permitir observaciones en el emplazamiento de radioastronomía e incluso resultar necesaria en ocasiones. El caso especial de la supresión del receptor para poder efectuar observaciones en presencia de transmisores de radar se ha examinado ya en el capítulo precedente. Es más corriente que la ciencia suela necesitar que los radioastrónomos observen fuera de las bandas de frecuencias atribuidas a su servicio, y en tales casos la compartición en el tiempo con los servicios activos puede ser la única opción disponible. La Recomendación UIT-R RA.314 reconoce ese hecho e insta a pedir a las administraciones a que ayuden a coordinar las observaciones experimentales de rayas espectrales en bandas atribuidas a la radioastronomía.

# 5.9.1 Coordinación de la compartición de tiempos y frecuencias

Los radiotelescopios modernos son capaces de realizar observaciones en una amplísima gama de frecuencias. Los telescopios suelen estar sobreutilizados, el tiempo de utilización del telescopio es caro y hay una dura competencia por el tiempo de observación. Por este motivo, los radioastrónomos necesitan operar sus telescopios del modo más eficiente a su alcance. Esto exige, en la medida de lo posible, que adapten la frecuencia de observación a las mejores condiciones atmosféricas existentes en todo momento, por lo que algunos observatorios radioastronómicos han adoptado una programación dinámica. Por ejemplo, el Green Bank Telescope (GBT) del National Radio Astronomy Observatory de EE.UU. es capaz de efectuar observaciones en la gama 1-100 GHz. Sin embargo, las observaciones a las frecuencias más elevadas sólo pueden llevarse a cabo en ciertos momentos de los meses invernales, en condiciones atmosféricas extremadamente secas, y es conveniente aprovechar esos momentos en la medida de lo posible. El radiotelescopio alemán del Instituto Max-Planck en Bonn, cubre una gama de frecuencias similar.

Debido a la multiplicidad de canales utilizados por algunos de los servicios activos, la coordinación horaria, incluso en escalas de tiempo de corta duración, puede ser posible en ciertos casos. Puede suceder que los observatorios tengan que coordinar su programación con los servicios activos que funcionan en las bandas de interés y es posible que, en algunos casos, dichos servicios conmuten a canales que no causen interferencias sobre las observaciones radioastronómicas. Se reconoce que, especialmente cuando los radioastrónomos deseen efectuar observaciones fuera de las bandas que les han sido atribuidas, estos acuerdos deben ser equitativos para todas las partes, y es necesario que se implementen para cada caso en particular. Cabe señalar que los efectos de la propagación varían intensamente con la frecuencia, de modo que algunas veces los períodos de pérdida de datos pueden reducirse mediante reprogramación dinámica.

# REFERENCIAS

CCIR [1990] Informe 696-2 – Viabilidad de la compartición de frecuencias entre la radioastronomía y otros servicios. Doc. de la XVII Asamblea Plenaria, Düsseldorf, 1990, Anexo al Vol. II, p. 568-584.

GREENHILL, L. J., KNODRATKO, P. T., LOVELL, J. E. J., KUIPER, T. B. H., MORAN, J. M., JAUNCEY, D. L. y BAINES, G. P. [2003] *Astrophys. J. (Letters)*, Vol. 582, L11-L14.

# CAPÍTULO 6

# Interferencia causada a la Radioastronomía por transmisores que funcionan en otras bandas

# 6.1 Introducción

Las emisiones radioeléctricas cósmicas detectadas y medidas por los radiotelescopios son mucho más débiles que las señales que utilizan los servicios activos (transmisores). Para medir dichas señales débiles, los receptores utilizados en las observaciones radioastronómicas son generalmente los más sensibles que pueden lograrse con la tecnología radioeléctrica actual y la anchura de banda accesible. Debido a la debilidad de las señales y a las sensibilidades de los receptores, las observaciones radioastronómicas son extremadamente vulnerables a la interferencia; ésta puede proceder incluso de transmisores que no comparten la misma banda. Dicha interferencia es el resultado de los efectos del extremo de la banda, los armónicos de los transmisores, los efectos de intermodulación, etc. En los Capítulos 4 y 5 se indican los niveles de umbral de interferencia para las observaciones radioastronómicas, los criterios de protección y las limitaciones con las que es factible la compartición con otros servicios.

Los niveles de las señales hallados en las bandas adyacentes o las de los servicios activos varían ampliamente con la naturaleza del servicio. Además, las denominaciones de los servicios son de carácter muy general y cualquiera puede comprender varios tipos distintos de equipo transmisor. Es probable que se hallen los máximos niveles de la señal de cresta en las bandas diseñadas para la radiolocalización y la radionavegación aeronáutica, ya que pueden incluir radares de alta potencia en aeronaves. Las dfp medias de esas señales en observatorios relativamente aislados superan  $-100 \text{ dB}(W/m^2)$ . La televisión en ondas decimétricas produce también señales de nivel muy alto.

# 6.1.1 Definiciones del RR

En el examen de la interferencia procedente de transmisores en otras bandas son útiles las siguientes definiciones tomadas en el Artículo 1, Sección VI del RR.

Anchura de banda necesaria (número **1.152** del RR): Para una *clase de emisión* dada, anchura de la banda de frecuencias estrictamente suficiente para asegurar la transmisión de la información a la velocidad y con la calidad requeridas en condiciones especificadas.

*Emisión fuera de banda* (número **1.144** del RR): *Emisión* en una o varias frecuencias situadas inmediatamente fuera de la *anchura de banda necesaria*, resultante del proceso de modulación, excluyendo *las emisiones no esenciales*.

*Emisión no esencial* (número **1.145** del RR): *Emisión* en una o varias frecuencias situadas fuera de la *anchura de banda necesaria*, cuyo nivel puede reducirse sin influir en la transmisión de la información correspondiente. Las emisiones armónicas, las emisiones parásitas, los productos de intermodulación y los productos de conversión de frecuencia están comprendidos en las emisiones no esenciales, pero están excluidas las *emisiones fuera de banda*.

*Emisiones no deseadas* (número **1.146** del RR): Conjunto de las *emisiones no esenciales* y de las *emisiones fuera de banda*.

# 6.1.2 Definiciones adicionales

En algunos casos particulares se producen algunas excepciones y modificaciones de las definiciones de § 6.1.1. Por ejemplo, la Recomendación UIT-R SM.1541 contiene las definiciones indicadas a continuación: *Dominio no esencial*<sup>11</sup> (de una emisión): gama de frecuencias más allá del dominio fuera de banda (OoB) en la que generalmente predominan las emisiones no esenciales.

*Dominio fuera de banda*<sup>1</sup> (de una emisión): gama de frecuencias externa e inmediatamente adyacente a la anchura de banda necesaria pero excluyendo el dominio no esencial, en la que generalmente predominan las emisiones fuera de banda.

*Emisiones en el dominio fuera de banda*: cualquier emisión fuera de la anchura de banda necesaria que se produzca en una gama de frecuencias que disten de la frecuencia de emisión menos del 250% de la anchura de banda necesaria será, en general, considerada como una emisión en el dominio fuera de banda. No obstante, esta separación de frecuencia puede ser función del tipo de modulación, de la máxima velocidad de símbolos en el caso de modulación digital, del tipo de transmisor y de factores asociados a la coordinación de frecuencias. Así por ejemplo, en el caso de algunos sistemas digitales de banda ancha o con modulación de impulsos, la separación de frecuencia puede diferir del factor del 250%.

*Emisiones en el dominio no esencial*: para los fines de esta Recomendación, se consideran emisiones en el dominio no esencial, en general, a todas aquellas emisiones, incluidos los productos de intermodulación, los productos de conversión y las emisiones parásitas, que se producen a frecuencias separadas de la frecuencia central de emisión en el 250% o más de la anchura de banda necesaria de la emisión. Sin embargo, esta separación de frecuencia puede ser función del tipo de modulación, de la máxima velocidad de símbolos en el caso de modulación digital, del tipo de transmisor y de factores asociados a la coordinación de frecuencias. Por ejemplo, en el caso de algunos sistemas digitales de banda ancha o con modulación de impulsos, puede ser necesario que la separación de frecuencia difiera del factor del 250%.

En el caso de transmisores o transpondedores multicanal o multiportadora, en los que se pueden transmitir simultáneamente varias portadoras desde un amplificador final de salida, o desde una antena activa, la frecuencia central de la emisión es el centro de la anchura de banda asignada de la estación o bien de la anchura de banda a-3 dB del transmisor/transpondedor, tomando la menor de las dos anchuras de banda.

*Emisión fuera de banda/no esencial*: la distinción entre las emisiones fuera de banda y no esenciales suele efectuarse en términos de la frecuencia, como se indica a continuación (véase la Recomendación UIT-R SM.329-9). Conforme a los principios indicados en el Apéndice 3 del RR, el dominio no esencial consta generalmente de frecuencias separadas respecto a la frecuencia central de la emisión en 250% o más de la anchura de banda necesaria de la emisión. No obstante, esta separación de frecuencias puede depender del tipo de modulación utilizada, de la velocidad binaria máxima en el caso de la modulación digital, del tipo de transmisor y de factores de coordinación de frecuencias. Por ejemplo, en el caso de algunos sistemas digitales de banda ancha o con modulación de impulsos, la separación de frecuencias puede tener que diferir del factor  $\pm 250\%$ . Como el RR prohíbe a todo servicio radioeléctrico causar interferencia perjudicial fuera de su banda atribuida, las frecuencias del transmisor deben determinarse de forma que las emisiones fuera de banda no causen interferencia perjudicial fuera de la banda atribuida, conforme al número 4.5 del RR.

De forma alternativa, el  $\pm 250\%$  puede aplicarse a la separación de canales, en lugar de a la anchura de banda necesaria. A modo de ejemplo, para la coordinación de frecuencias del servicio fijo digital, la Recomendación UIT-R F.1191 recomienda la utilización del valor  $\pm 250\%$  de la separación de canales de la disposición pertinente de canales de radiofrecuencia como separación entre los dominios fuera de banda y no esencial.

En el caso de anchura de banda muy estrecha o amplia, este método para determinar el dominio no esencial puede no ser apropiado y la Recomendación UIT-R SM.1539 ofrece nuevas pautas.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Los términos «dominio fuera de banda» y «dominio no esencial» se han introducido a fin de eliminar algunas inconsistencias que actualmente existen entre, por una parte, las definiciones de los términos «emisiones fuera de banda» y «emisiones no esenciales» que figuran en el Artículo 1 del RR y, por otra, la utilización que realmente se hace de dichos términos en el Apéndice 3 del RR (**Rev.CMR-12**). Los límites fuera de banda y los límites no esenciales se aplican a todas las emisiones no deseadas en el dominio fuera de banda y el domino no esencial, respectivamente.

# 6.1.3 Mecanismos de la interferencia procedente de transmisores en otras bandas

La interferencia en el límite de la banda, esto es, la interferencia procedente de un transmisor situado en una banda adyacente, puede deberse a tres mecanismos:

- Las bandas laterales de modulación pueden caer dentro de la banda de radioastronomía cuando el espectro transmitido procedente de un transmisor de una banda adyacente no desciende bruscamente en el borde de la banda.
- Dos o más señales intensas que actúan sobre un elemento no lineal pueden generar frecuencias de batido de la forma  $(mf_1 \pm nf_2)$ , en donde  $f_1$  y  $f_2$  son las frecuencias transmitidas y m y n son números enteros. El entero (m + n) se denomina orden de la intermodulación. El elemento no lineal puede hallarse en la salida de un transmisor, en las etapas de entrada del receptor de radioastronomía o en un objeto cercano, como es el empalme oxidado en una torre o la valla en una zona alta, en la que los campos eléctricos sean intensos.
- El receptor de radioastronomía puede responder a las señales de una banda adyacente si la sensibilidad del receptor a las frecuencias situadas fuera de la banda de radioastronomía no es suficientemente baja.

La interferencia procedente de transmisores en bandas más ampliamente separada procedente de una banda de radioastronomía puede deberse a los siguientes mecanismos:

- Es probable que se generen armónicos de la frecuencia atribuida del transmisor, que pueden emitirse en un nivel que cause interferencia a la radioastronomía.
- La intermodulación entre dos señales que están bastante separadas en frecuencia puede generar una tercera frecuencia que está bien separada de cualquiera de las otras dos.
- El empleo de las técnicas de modulación de banda ancha y de espectro ensanchado puede originar bandas laterales espectrales amplias, que si no se filtran en la salida del transmisor causarán una interferencia intensa.

La intermodulación en las etapas de entrada del receptor y el rechazo insuficiente de las señales fuera de los bordes de la banda de radioastronomía resultan de un diseño del receptor inadecuado. Los receptores de radioastronomía deben contener un filtrado suficiente en las etapas de entrada para rechazar las señales que puedan causar intermodulación. Asimismo, deben estar diseñados con filtros IF capaces de proporcionar el rechazo necesario en los bordes de la banda de radioastronomía, que pueden ser de hasta –100 dB en relación con la banda central.

En general, la atribución de bandas adyacentes a las bandas de radioastronomía a servicios que utilizan transmisores de alta potencia puede plantear problemas técnicos difíciles y costosos. Algunos de los mecanismos de interacción, como son los relativos a los armónicos o las bandas laterales de modulación, dependen fuertemente de las características del transmisor y deben ser examinados por separado por los distintos servicios. Las transmisiones procedentes de satélites de aeronaves constituyen un problema especial para la radioastronomía porque corrientemente existen condiciones de propagación en visibilidad directa. Los servicios tales como los de radiodeterminación por satélite y los de radiocomunicación digitales que utilizan técnicas de modulación en banda ancha y de espectro ensanchado, procedentes de satélites, son ejemplos que han resultado especialmente perturbadores para la radioastronomía.

# 6.2 Límites de las emisiones no deseadas procedentes de servicios en activo

# 6.2.1 Límites en el dominio de las emisiones no esenciales

Los límites de las emisiones no esenciales figuran en el Apéndice 3 del RR y también en la Recomendación UIT-R SM.329 (Serie de gestión del espectro) que especifica diversas categorías, las cuales son:

- Los límites de categoría A son los valores de atenuación utilizados para calcular los niveles máximos admitidos de potencia de emisión en el dominio no esencial. El Apéndice 3 del RR se deriva a partir de límites de la categoría A.
- Los límites de la categoría B son un ejemplo de límites de emisiones no esenciales más estrictos que los de la categoría A. Se basan en los límites definidos y adoptados en Europa y que utilizan otros países.

- Los límites de la categoría C son un ejemplo de límites de emisiones no esenciales más estrictos que los de la categoría A. Se basan en límites definidos y adoptados en Estados Unidos de América y Canadá y que utilizan otros países.
- Los límites de la Categoría D son un ejemplo de límites de emisiones no esenciales más estrictos que los de la categoría A. Se basan en límites definidos y adoptados en Japón y que utilizan otros países.
- Los límites de la Categoría Z son límites de radiación del ITE que especifica el Comité Internacional Especial de Perturbaciones Radioeléctricas (CISPR).

Los límites se expresan en términos de nivel máximo de potencia de la emisión no esencial, en dB, por debajo de la potencia aplicada a la línea de transmisión de la antena.

Para los servicios terrenales, los límites de la categoría A que son los que más inquietan a los astrónomos, indican una atenuación mínima de  $43 + 10 \log P$  dBc, o 70 dBc, de los dos el menos estricto, donde *P* es la potencia media aplicada a la línea de transmisión. La emisión no esencial en este caso se mide en una anchura de banda de referencia de 100 kHz para frecuencias de 100 kHz, para frecuencias de 30 MHz a 1 GHz y de 1 MHz para frecuencias por encima de 1 GHz.

En los servicios espaciales, los límites de la categoría A especifican  $43 + 10 \log P \, dBc$ , o 60 dBc, el menos estricto de los dos. No obstante, para los servicios espaciales, se especifica que la anchura de banda de referencia en la que se mide la emisión no esencial es de 4 kHz, lo que se traduce en una densidad espectral de potencia menos estricta que la de los servicios terrenales en 14 dB (10 log(4/100) dB) para frecuencias de 30 MHz a 1 GHz, y en 24 dB (10 log(4/1000) dB) para frecuencias por encima de 1 GHz.

Como ejemplo de los efectos de las emisiones no esenciales procedentes de los servicios espaciales, un satélite a una distancia de h metros sobre una estación de radioastronomía puede producir una densidad de flujo de potencia espectral no esencial de  $-79 - 10 \log (4\pi h^2) + G_{SAT} dB(W(m^{-2} Hz^{-1}))$ , donde  $G_{SAT}$  es la ganancia de la antena del satélite en la dirección del observatorio radioeléctrico a la frecuencia de la emisión no esencial. Para estimar valores de la densidad espectral de flujo de potencia espectral no esencial en las frecuencias de las bandas de radioastronomía en el caso de un satélite en órbita geoestacionaria se utiliza  $h = 6.39 \times 10^6$  m y arbitrariamente se toman valores de  $G_{SAT}$  correspondientes a una apertura de 1 m<sup>2</sup> de la antena del satélite. Se toma una ganancia máxima de 40 dB para la cual el diámetro de la traza del haz es de 1 400 km. Los valores resultantes de la densidad de flujo de potencia espectral se representan mediante la curva de trazos de la Figura 6.1. A continuación, como ejemplo de satélite en órbita baja de la Tierra (LEO) se toma h = 800 km y de nuevo  $G_{SAT}$  correspondiente a una apertura de 1 m<sup>2</sup> con un valor máximo de 20 dB, para el que el diámetro de la traza del haz es de unos 300 km, lo cual es casi una huella tan pequeña como la que se podría generalmente utilizar. Los valores resultantes se representan mediante la curva continua de la Fig. 6.1 en la que los valores del umbral de referencia para las observaciones del continuum de radioastronomía, indicados en la Recomendación UIT-R RA.769, se representan mediante cruces. Las curvas de la densidad de flujo de potencia espectral de la Fig. 6.2 muestran valores del caso más desfavorable, pues se ha supuesto que toda la ganancia de la antena del satélite se produce en la dirección de la estación de radioastronomía. Además, por simplicidad, se han utilizado distancias a un satélite situado en el cenit y se han dejado de lado la atenuación atmosférica y otros efectos pequeños similares. Aun así, la medida en que los niveles permitidos de la densidad de flujo de potencia espectral rebasan los umbrales perjudiciales, es decir, 20-50 dB, indica claramente que, en general, los límites de las emisiones no esenciales quedan lejos de proteger la radioastronomía. Para los servicios terrenales, los límites de la densidad de flujo de potencia espectral no esencial por encima de 1 GHz son 24 dB más estrictos que para los servicios especiales, debido a las distintas anchuras de banda de referencia. Las distancias de los transmisores terrenales suelen ser inferiores a las de los transmisores de los servicios espaciales, aunque el apantallamiento del terreno puede otorgar una protección sustancial. Para las transmisiones con visibilidad directa, los límites de las emisiones no esenciales no consiguen tampoco llegar a proteger la radioastronomía en la mayoría de los casos. La Recomendación UIT-R SM.329 que afecta a los límites de las emisiones no esenciales, también enumera los umbrales de la interferencia en la radioastronomía (en el Anexo 3 de la Recomendación), pero no es obligatoria la protección de estos límites, y se considera como algo que debe ser examinado para casos individuales cuando surja un nuevo sistema.

#### 6.2.2 Límites en el dominio de las emisiones fuera de banda

Los límites de las emisiones fuera de banda figuran en la Recomendación UIT-R SM.1541. Brevemente, esta Recomendación da máscaras de emisión para múltiples servicios que muestran los límites en la región desde

los extremos de la banda necesaria hasta los extremos de la región de las emisiones no esenciales. Estos límites son menos estrictos que los de las emisiones no esenciales, pero desbordan estos últimos en la separación entre emisiones fuera de banda y no esenciales. Una vez más, los límites no están pensados para proteger la radioastronomía y la coordinación debe considerarse caso a caso.

# 6.2.3 Límites de las emisiones no deseadas de los servicios activos para proteger las bandas de radioastronomía

Con una serie de notas del RR se pretende proteger el servicio de radioastronomía contra las emisiones no deseadas de los servicios activos (véase por ejemplo, el número **5.208A** del RR). En muchas CMR, se han desarrollado notas adicionales con las que se otorga una protección adicional al servicio de radioastronomía contra los servicios activos existentes y nuevos.

La nota **5.443B** del RR se refiere a la protección contra las emisiones no deseadas del servicio de radionavegación por satélite (espacio-Tierra) con funcionamiento en la banda 5010-5030 MHz:

«**5.443B** … Para no causar interferencia al sistema de aterrizaje por microondas que funciona por encima de 5 030 MHz, la densidad de flujo de potencia combinada producida en la superficie de la Tierra en la banda 5 030-5 150 MHz por todas las estaciones espaciales de cualquier sistema de radionavegación por satélite (espacio-Tierra) que funciona en la banda 5 010-5 030 MHz no debe rebasar el nivel de -124,5 dB (W/m<sup>2</sup>) en un ancho de banda de 150 kHz. Para no causar interferencia perjudicial al servicio de radioastronomía en la banda 4 990-5 000 MHz, los sistemas del servicio de radionavegación por satélite que funcionan en la banda 5 010-5 030 MHz deberán cumplir los límites aplicables a la banda 4 990-5 000 MHz, definidos en la Resolución **741 (Rev.CMR-12)**. (CMR-12)»

Las notas **5.511A** y **5.511F** del RR se refieren a la protección contra las emisiones no deseadas del servicio móvil por satélite (espacio-Tierra) con funcionamiento en 15,43-15,63 GHz:

«**5.511A** ... Para proteger al servicio de radioastronomía en la banda 15,35-15,4 GHz, la densidad de flujo de potencia combinada radiada en la banda 15,35-15,4 GHz por todas las estaciones espaciales de cualquier sistema de enlaces de conexión (espacio-Tierra) de un sistema de satélites no geoestacionarios del servicio móvil por satélite que funcione en la banda 15,43-15,63 GHz no deberá rebasar –156 dB(W/m<sup>2</sup>) en una anchura de banda de 50 MHz, en el emplazamiento de cualquier observatorio de radioastronomía durante más del 2% del tiempo. (CMR-2000)».

#### FIGURA 6.1

# Defp en tierra correspondiente a los límites de las emisiones no esenciales para satélites



La curva continua y la curva de trazos muestran los valores posibles a nivel del suelo de la defp procedente de satélites LEO y de órbita geoestacionaria, respetivamente, que radian en el límite de las emisiones no esenciales para vehículos espaciales. Para más información véase el párrafo anterior. Las cruces muestran los valores umbral de la interferencia

Radio-Astro\_61

### 6.3 Calidad de funcionamiento de los receptores de radioastronomía

# 6.3.1 Filtrado de la interferencia en el límite de la banda

Para calcular la potencia de entrada efectiva *P* recibida en un receptor de radioastronomía procedente de señales de la banda adyacente se ha de conocer con cierta precisión la respuesta en el extremo de la banda del receptor. Por ejemplo, considérese el límite superior de frecuencia de la banda de la Fig. 6.2, en la que  $-a_0$  dB es el nivel en el que se ha reducido la ganancia relativa del radiómetro en el límite de la banda y -k dB/MHz es la pendiente de la respuesta del receptor en dicho punto.

#### FIGURA 6.2

#### Característica de la banda de paso del receptor diseñada para adaptarse a una banda de radioastronomía



Supóngase que dentro de la banda de radioastronomía, cualquier señal interferente sea igual al umbral de interferencia del Cuadro 4.1, pero que fuera del límite de la banda se halle una interferencia en forma de densidad espectral uniforme de flujo de potencia  $S W/(m^2 \cdot Hz)$ . Si *A* es la superficie de captación de la antena radioastronómica en dirección de la señal interferente y  $f_0$  es la frecuencia del límite de la banda, la potencia de interferencia recibida vendrá dada por:

$$P = AS \int_{f_0}^{\infty} 10^{-[a_0 + 10^{-6}k(f - f_0)/10} \,\mathrm{d}f = 4.34 \times 10^{-a_0/10} \,AS/k \tag{6.1}$$

El límite infinito de la integral se justifica en la práctica siempre que la interferencia se extienda suficientemente más allá del límite de la banda.

Los niveles máximos tolerables de interferencia del Cuadro 4.1 se hallan en la gama de  $10^{-17}$  a  $10^{-21}$  W para las anchuras de banda normales en frecuencias superiores a 1 GHz. Para una señal continua en la que  $S = 2 \times 10^{-13}$  W/(m<sup>2</sup> · Hz) (normal en una señal de radioenlace) y un valor de *A* de  $10^{-3}$  m<sup>2</sup> (ganancia isótropa a 3 GHz aproximadamente), no se superará el nivel de  $10^{-21}$  W si, por ejemplo, la respuesta en el límite de la banda,  $a_0$ , es de 102 dB y la pendiente, *k*, es de 50 dB/MHz. El valor de *k* es menos decisivo que el de  $a_0$ , y para k = 10 dB/MHz se recibe el mismo nivel de potencia que con  $a_0 = 109$  dB. Así pues, la respuesta de un receptor de radioastronomía en frecuencias situadas en la gama de los GHz debe ser de -100 a -110 dB en el límite de la banda se halla en la dirección en la que la respuesta del telescopio es superior a 0 dBi. Obsérvese que, en la práctica, el espectro del servicio de la banda adyacente no puede cortarse bruscamente en el límite de la banda, pero debe descender hacia el límite para no sobrepasar el nivel perjudicial dentro de la banda de radioastronomía. Aunque el caso examinado es una simplificación, proporciona una indicación útil de la respuesta requerida en el límite de la banda. Se facilitan algunos ejemplos adicionales en el Cuadro 6.1, en el que se supone una respuesta isótropa de la antena radioastronómica.

#### CUADRO 6.1

Servicio	Distancia supuesta del transmisor (km)	Niveles normales de las señales medias en el observatorio	Respuesta necesaria del receptor en los bordes de la banda (dB)		
Satélite de radiodifusión (densidad de flujo permitida)	36 000	$5 \times 10^{-18} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{Hz})$	-56 a -63		
Transmisor de radioenlace normal	60	$2 \times 10^{-13} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{Hz})$	-102 a -109		
Radar en aeronave (potencia media de 10 W)	10 300	10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> 10 <sup>-11</sup> W/m <sup>2</sup>	-100 -70		

#### Ejemplos de la respuesta requerida en el límite de la banda en radioastronomía

Para señales de impulso de radar, el efecto de la interferencia de un ciclo de servicio reducido en un receptor de radioastronomía depende del tipo de observación que se realice y puede a veces no ser superior a la causada por una señal continua del mismo nivel de potencia media. Para una respuesta en el límite de la banda en el receptor de radioastronomía por debajo de 100 dB y una superficie de captación, *A*, de  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>, la potencia media recibida no pasará de  $10^{-21}$  W para niveles de dfp media inferiores a  $10^{-13}$  W/m<sup>2</sup>. Ello corresponde a densidades de dfp de cresta de alrededor de  $10^{-9}$  a  $10^{-10}$  W/m<sup>2</sup>. Así pues, la respuesta de -100 dB en el límite de la banda puede permitir el funcionamiento en presencia de señales radar intensas. Por otro lado, pueden ser importantes los efectos de sobrecarga durante los impulsos y conducir a efectos de intermodulación en las fases de entrada del receptor, según se describe más adelante.

Para obtener una reducción de la respuesta en los límites de la banda de 100 dB en relación con el centro de la banda, la anchura del filtro en los puntos de -3 dB debe ser inferior a la anchura de la banda atribuida de radioastronomía. Teniendo en cuenta que las frecuencias intermedias son relativamente bajas, situadas habitualmente entre 100 MHz y 1 GHz, es posible la selectividad en una pendiente relativamente fuerte. La pendiente de los límites de la respuesta en el filtro depende del número de secciones de filtro y de la respuesta diseñada. Por ejemplo, se considera que un filtro que proporciona una anchura de banda de -3 dB en el 75% de la anchura de banda de -100 dB es muy empinado. Aumentar la pendiente de la respuesta en los bordes de la banda de paso requiere elevar el número de secciones del filtro, lo que a su vez hace más difícil la alineación del filtro y aumenta la variación de fase con la temperatura. Así pues, el filtrado no siempre proporciona una solución fácil del problema de la interferencia en el límite de la banda. La reducción de la anchura de banda utilizable en una banda de radioastronomía es particularmente grave para las observaciones de rayas espectrales, pues normalmente se necesita toda la anchura de la banda para observar derivas de la frecuencia de la raya y el ensanchamiento de ésta, como resultado de los desplazamientos Doppler y otros efectos. Los bancos de filtros digitales polifásicos pueden proporcionar el filtrado estable de borde abrupto necesario, son inmunes a la variación de temperaturas y están convirtiéndose en la norma para los espectrómetros modernos.

# 6.3.2 Efectos no lineales e intermodulación

Dos o más señales, presentes simultáneamente en la entrada del receptor pero que caigan fuera de la banda de paso del receptor, pueden, debido a la no linealidad en las fases iniciales, dar lugar a una señal dentro de la banda de paso del receptor. El efecto más importante que probablemente se producirá es una intermodulación de tercer orden en la cual las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ , cerca del borde de la banda de paso, generen una componente  $(2f_1 - f_2)$  o  $(2f_2 - f_1)$  dentro de la banda de paso.

Las características de intermodulación de un amplificador dado se describen convenientemente en función de un punto de intercepción de intermodulación de dos tonos y tercer orden. Ese punto de intercepción es aquel en el que, en una representación gráfica log-log de la potencia de salida respecto a la potencia de entrada, se cruzan las dos líneas rectas que representan la respuesta deseada del amplificador y la respuesta de intermodulación. El nivel de la potencia de entrada en ese punto es  $I_{IM}$ , para el que se utilizará un valor de -40 dBW como representativo del amplificador transistorizado de bajo ruido con una ganancia de unos 30 dB.

Una señal interferente efectiva de potencia  $\Delta P_H$  puede resultar de la intermodulación de señales fuera de banda de potencia  $P_{IM}$  dada por la fórmula:

$$P_{IM} = (2I_{IM} + \Delta P_H)/3 \qquad \text{dBW}$$
(6.2)

Adoptando los valores de  $\Delta P_H$  del Cuadro 4.1 y suponiendo una ganancia de 0 dBi para la antena receptora, pueden deducirse los correspondientes valores de la dfp,  $S_{IM}$ . En el Cuadro 6.2 se dan los valores correspondientes a algunas bandas de radioastronomía con atribuciones primarias, utilizando el valor  $I_{IM}$  antes citado. Si la dfp en frecuencias cercanas a las bandas de radioastronomía pasa de esos niveles, los productos de intermodulación resultantes rebasarán los umbrales de interferencia del Cuadro 4.1. En dicho caso será necesario un filtro en la entrada del receptor. Ese filtrado puede dar una disminución de la sensibilidad debido a la pérdida de inserción, que, en la entrada del receptor, se suma a la temperatura de ruido del sistema. Sin embargo, las recientes mejoras de los filtros, que comprenden el uso de materiales de superconducción, hacen que el filtrado de entrada sea más factible en los receptores de radioastronomía. Se está explorando la alternativa de distribución de la ganancia del amplificador de entrada y filtrado.

#### CUADRO 6.2

#### Valores normales de la potencia recibida y la dfp para dos señales de igual intensidad que pueden causar interferencia por intermodulación en el umbral perjudicial

Frecuencia central de la banda de radioastronomía (MHz)	<i>P<sub>IM</sub></i> (dBW)	<i>SIM</i> (dB(W/m <sup>2</sup> ))
325,3	-94	-82
1 413,5	-95	-71
4 995	-96	-60
10650	-94	-52
15 375	-94	-49
23 800	-92	-43
43 000	-90	-36

# 6.3.3 Linealidad

A fin de evitar los problemas examinados en § 6.3.2, los receptores de radiotelescopio se diseñan generalmente para mantener la potencia total interior a la banda de paso por debajo del nivel del 1% de compresión en cualquier punto de la cadena de pasos de amplificación, filtros, etc., desde la antena hasta la salida del receptor. Un receptor que funcione en el punto de compresión del 1% en presencia de señales intensas justamente al exterior de la banda de radioastronomía, podría dar lugar a productos de intermodulación de bajo nivel dentro de la banda de radioastronomía. Además, es preferible una característica de receptor próxima a la lineal, porque simplifica la calibración de la potencia de funcionamiento y el nivel de la potencia en el que se produce la compresión del 1%, particularmente en presencia de un nivel de interferencia variable en el tiempo. El nivel de potencia en cualquier punto del receptor varía con la puntería de la antena y el nivel de interferencia, y generalmente el sistema se diseña para evitar que el margen caiga a 0 dB. Si un término cuadrático predomina en la característica de respuesta, el punto de compresión de ganancia del 1% está normalmente 16 dB por debajo del punto de compresión de 1 dB y es 26 dB inferior al nivel de intercepción de tercer orden.

# 6.3.4 Filtrado y digitalización

La tendencia hacia la no linealidad de los sistemas de elevada ganancia puede controlarse parcialmente mediante la utilización de filtros sucesivamente más estrechos en el trayecto de la señal. El filtrado puede producirse en múltiples etapas del receptor de radioastronomía e incluye filtros analógicos y digitales. Todo

paso analógico determinado tiene que aportar únicamente la supresión suficiente para proteger la linealidad de los pasos amplificadores que le siguen. Se pueden definir los parámetros siguientes para el paso *i* de la cadena de la señal:

-  $G_i(f)$ : relación de la ganancia en potencia  $P_{out}(f)/P_{in}(f)$  del paso, *i*, en función de la frecuencia f

- 
$$N_i$$
: factor de ruido

- 
$$P_{Nli}$$
: potencia total integrada a lo largo de la frecuencia a la entrada del paso, *i*, para la cual la no linealidad en el paso daría lugar a una compresión de ganancia del 1%.

La condición para evitar la no linealidad, por ejemplo, dentro del quinto paso es:

$$\int P_{in}(f) G_1(f) G_2(f) G_3(f) G_4(f) df + k T \int \{ [N_1(f) - 1] G_1(f) G_2(f) G_3(f) G_4(f) + [N_2(f) - 1] G_2(f) G_3(f) G_4(f) \} df < P_5$$
(6.3)

donde  $P_{in}(f)$  es la potencia a la entrada procedente de la antena, k es la constante de Boltzmann, T = 290 K, y se ha supuesto que la ganancia de los dos primeros pasos es suficientemente grande como para poder ignorar la contribución al ruido de los pasos posteriores.

En la mayoría de los receptores de radioastronomía utilizados con una antena única, las señales se procesan en un autocorrelador para dar el espectro de la potencia total. En el caso de una red de antenas, las señales se procesan mediante un sistema transcorrelador. En cualquiera de los casos, la señal de FI se digitaliza y el procesamiento posterior se efectúa digitalmente. Se requiere un filtro analógico antisolapamiento a la entrada del convertidor analógico/digital (A/D) para establecer los cortes de frecuencia del espectro de FI, de forma que pueda realizarse el muestreo al doble de la anchura de banda de la señal, según requiere el criterio de muestreo de Nyquist. Si se evita la no linealidad en el sistema analógico y el solape en la conversión A/D, los filtros siguientes pueden insertarse digitalmente antes de los pasos de autocorrelador o de transcorrelador. Las señales interferentes con los umbrales perjudiciales de la Recomendación UIT-R RA.769 (y de los Cuadros 4.1 y 4.2) se traducen en niveles de señal en el sistema de FI que están aproximadamente entre 40 y 80 dB por debajo del nivel al que hay peligro de no linealidad. De esta manera, las señales que rebasan estos niveles en algunas decenas de decibelios pueden rechazarse adecuadamente mediante filtros digitales si caen fuera de la banda de radioastronomía. Los filtros digitales de tipo de respuesta de impulsos finita pueden dar cortes muy agudos en los extremos de la banda y junto con los filtros analógicos de los pasos anteriores se puede lograr un rechazo superior a 100 dB. Los filtros polifásicos en los que se aplica una convolución a la señal de FI con una aproximación digital de una función de sincronismo, son especialmente eficaces y se están utilizando de forma habitual. Así pues, generalmente es posible diseñar receptores de radioastronomía con los que se rechace la interferencia que cae fuera de la banda de radioastronomía.

# 6.4 Interferencia procedente de los transmisores de servicios en otras bandas

Las Recomendaciones UIT-R RA.517 – Protección del servicio de radioastronomía contra los transmisores que funcionan en bandas adyacentes y UIT-R RA.611 – Protección del servicio de radioastronomía contra las emisiones no esenciales, enumeran algunos de los casos en que los transmisores que funcionan en bandas adyacentes o no adyacentes pueden causar interferencia a la radioastronomía.

# 6.4.1 Servicios que pueden producir interferencia en la radioastronomía por los mecanismos de la banda adyacente y los armónicos

Los servicios de mayor actividad que funcionan en las bandas adyacentes a las de radioastronomía, o en frecuencias que son subarmónicos de las frecuencias de radioastronomía, son posibles fuentes de interferencia para la radioastronomía. Sin embargo, la probabilidad de que cualquier servicio cause ese tipo de interferencia depende sobremanera de la naturaleza de las transmisiones. Por ejemplo, las transmisiones de los servicios fijo y móvil (salvo móvil aeronáutico), rara vez han planteado problemas. Los servicios que más probablemente causarán interferencia por efectos de intermodulación y armónicos comprenden los de elevada potencia de salida, como es la televisión en ondas decimétricas. Asimismo, los servicios que utilizan transmisiones procedentes de satélites pueden causar problemas graves debido a la propagación en visibilidad directa y obligar a reducir al mínimo el peso del satélite, con lo cual la instalación de filtros es difícil y costosa. Las técnicas que producen un amplio espectro de bandas laterales, como es la del espectro ensanchado de secuencia directa son las de mayor potencial de infringir problemas graves a la radioastronomía.

# 6.4.2 Transición a la televisión digital y repercusión sobre la utilización sin protección de las bandas utilizadas para la radiodifusión de televisión terrenal por parte del servicio de radioastronomía

La televisión se ha convertido en una forma fundamental de comunicación en todas las regiones del mundo. Su utilidad como fuente de noticias, entretenimiento e información de emergencia ha sido patente desde sus comienzos hace más de 60 años. La radiodifusión de televisión terrenal que actualmente ofrece cobertura a una población mundial del orden de miles de millones constituye uno de los usos más ubicuos del espectro radioeléctrico.

El servicio de radioastronomía no comparte atribución alguna con la radiodifusión de televisión terrenal; no obstante, estas emisiones suelen ocupar espectro de suma importancia para la astrofísica en baja frecuencia y para la observación del hidrógeno neutro (HI) desplazado al rojo que proviene de las primeras etapas de la formación del Universo. Hasta la fecha, los radioastrónomos han utilizado las bandas de televisión para efectuar observaciones, de conformidad con el número **4.4** del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR).

En estos momentos, muchos países están efectuando la transición de las normas de radiodifusión de televisión analógica a la digital, y algunos de ellos también están revisando las atribuciones a la radiodifusión para recuperar el espectro que se prevé quede libre constituyendo el denominado «dividendo digital». Cabe esperar que algunos factores de la transición digital mermen la capacidad que tienen los radioastrónomos de utilizar las bandas de radiodifusión de la televisión terrenal para observaciones que actualmente se realizan sin protección (véase la Fig. 6.3). Algunos factores pueden mejorar la capacidad de efectuar observaciones pasivas en las bandas de televisión.

En las secciones siguientes se resumen los planes para la transición a la televisión digital de varios países del mundo en los que los actuales programas de radioastronomía operan dentro de las bandas utilizadas para la radiodifusión de televisión terrenal y en países de importancia estratégica para las futuras estaciones de radioastronomía que actualmente son objeto de diseño y desarrollo y que pretenden utilizar dichas bandas. Se expone la repercusión sobre la utilización de las bandas de radiodifusión de televisión para la radioastronomía de las reglas de servicio para la televisión digital.

#### FIGURA 6.3

Ejemplo de la repercusión de las señales de televisión digital comparada con las de la televisión analógica. Los espectros se obtuvieron en un emplazamiento radioastronómico durante un breve período de propagación considerablemente mejorada. Las señales de televisión se originaron a una distancia aproximada de 290 km



Radio-Astro\_63

La señal digital de 181-188 MHz «llena» el espectro de forma mucho más ostensible que las señales de televisión analógica que ocupan 174-181, 188-195 y 195-202 MHz, cuyos espectros se concentran en las portadoras discretas de vídeo, crominancia y audio.

#### 6.4.2.1 Australia

El Gobierno de Australia ha anunciado un programa para la transición de las transmisiones analógicas a las digitales. Se ha proyectado la entrada en funcionamiento de la televisión digital dentro de las bandas de servicios de radiodifusión atribuidas existentes en las bandas de ondas III (174-230 MHz), IV (526-582 MHz) y V (582-820 MHz). Se han proyectado los servicios de radiodifusión de la televisión terrenal de Australia en un ráster de canal de 7 MHz tanto en las bandas de ondas métricas como en las de ondas decimétricas. Los servicios digitales de Australia se han planificado normalmente con una p.r.a. de 6 dB menos que la misma banda de los servicios de televisión analógicos.

En Australia no existen atribuciones a la radioastronomía en dichas bandas, por lo que los radiotelescopios están emplazados en zonas menos pobladas para minimizar el riesgo de interferencia procedente de diversos sistemas de radiocomunicación, entre ellos la radiodifusión. Actualmente, el radiotelescopio Parkes efectúa observaciones en la banda 700-764 MHz sin protección frente a las interferencias. El telescopio Pathfinder de la red de antenas de 1 km<sup>2</sup> (SKA, *Square Kilometre Array*) de Australia (ASKAP) proyectado para entrar en funcionamiento a partir de 2013, tendrá una gama de frecuencias de explotación de 700 a 1 800 MHz. Además, Australia es uno de los emplazamientos posibles para el SKA.

#### 6.4.2.2 Brasil

En Brasil, el apagón de todos los sistemas analógicos de transmisión de televisión de radiodifusión terrenal está planificado para el 29 de junio de 2016. Tras la transición, todas las transmisiones se efectuarán exclusivamente en la gama de frecuencias 470-806 MHz de la banda de ondas decimétricas.

# 6.4.2.3 Japón

En Japón, todas las transmisiones de televisión de radiodifusión terrenal se han migrado a tecnología digital. Cada canal de televisión tiene una anchura de 6 MHz, y todos ellos se encuentran ahora en la gama 470-710 MHz de la banda de ondas decimétricas. Sólo existe una estación radioastronómica (Hiraiso) que tiene un receptor que cubre entre 500 y 2 500 MHz. No obstante, en Japón, no existe una banda atribuida al servicio de radioastronomía en la gama de frecuencias comprendida entre 470 y 710 MHz. Por consiguiente, la estación de Hiraiso podría efectuar observaciones en la banda entre 470 y 710 MHz de conformidad con el número **4.4** del RR.

# 6.4.2.4 Estados Unidos

En Estados Unidos, todas las transmisiones de televisión de radiodifusión de servicio completo se migraron a la norma digital del Comité de Sistemas Avanzados de Televisión (ATSC, *Advanced Television Systems Committee*) el 12 de junio de 2009 o antes. En la Fig. 6.4 se muestra el espectro de televisión de radiodifusión tras la transición digital. En esta Figura se incluyen la amplitud de frecuencia y el correspondiente desplazamiento al rojo para la raya espectral de hidrógeno, z(HI) de 1 420 MHz, para cada uno de los canales.

#### FIGURA 6.4



#### Canales de televisión de EE.UU. tras la transición a la televisión digital

Radio-Astro\_64

A raíz de la transición, 18 canales de televisión (52-69) con un total de 108 MHz de espectro (698-806 MHz) ya no se utilizarán para la radiodifusión de televisión ordinaria. Esta gama se ha reatribuido a título primario a los servicios fijo y móvil y se utilizará en la siguiente generación de sistemas inalámbricos para la radiodifusión directa a los terminales inalámbricos de vídeo de enlace de ida únicamente y para los sistemas de comunicaciones de seguridad ciudadana. El canal 37 de televisión (608-614 MHz) sigue estando atribuido a título primario al servicio de radioastronomía en vez de a la radiodifusión, y se comparte con los dispositivos de telemedida médica y de telemando médico de baja potencia que funcionan en la misma banda.

En comparación con el cuadro de atribuciones de la televisión analógica, habrá bastantes menos emisoras de televisión digital que ocupen la parte inferior de la banda de ondas métricas que antes de la transición. En conjunto, esto mejora la posibilidad de utilizar la gama 54-72 MHz y 76-88 MHz para las observaciones radioastronómicas sin protección, aunque ello depende específicamente de que haya emisoras en los canales 2-6 próximas a una determinada estación radioastronómica.

La potencia total de transmisión necesaria para los sistemas de televisión digital es ligeramente inferior a la que exigía la anterior cobertura de televisión analógica, en un factor de dos (banda de ondas métricas) y cinco (banda de ondas decimétricas) aproximadamente. Además, los límites para las emisiones no deseadas de las estaciones de televisión digital están mejor definidos. A partir de 6 MHz del borde de la banda, la atenuación debe ser de 110 dB como mínimo.

En la Fig. 6.5 se compara directamente la señal NTSC analógica y la correspondiente señal digital ATSC transmitida por la misma estación desde la misma torre utilizando canales de televisión adyacentes.

#### FIGURA 6.5

# Comparación directa de los espectros NTSC analógico (a la derecha) y su equivalente digital ATSC (a la izquierda), transmitidos por la misma estación desde la misma torre en el mismo instante



Radio-Astro\_65

Aunque la potencia de la señal digital es ligeramente inferior a la de su correspondiente analógica, esta última se concentra marcadamente en las portadoras de las tres componentes. En más del 94% del espectro, la densidad espectral de potencia digital supera a la de la señal analógica en un factor de hasta 1 100 (> 30 dB). Por este motivo, se prevé que una vez completada la transición a la televisión digital, la señal digital de una determinada emisora de televisión supondrá un reto mayor para la utilización oportunista de la banda por parte de la radioastronomía en comparación con el precursor analógico de la emisora. Ilustrando este extremo, en la Fig. 6.6 se compara la estimación de la separación necesaria de las señales de televisión analógica y digital para satisfacer los niveles de interferencia perjudicial obtenidos de la Recomendación UIT-R RA.769.

#### FIGURA 6.6



Distancia mínima de separación entre estaciones de televisión digital y analógica para satisfacer los objetivos de interferencia de la radioastronomía bajo las hipótesis dadas

Radio-Astro 66

Los datos sobre la televisión digital proceden del Informe UIT-R RA.2195 que contiene información más detallada al respecto.

#### 6.4.3 Interferencia procedente de transmisiones de satélites

Las transmisiones de satélite pueden llegar a causar interferencia grave al servicio de radioastronomía. Mientras que las fuentes de interferencia terrenales se encuentran generalmente en la región de los lóbulos laterales exteriores de la antena de radiotelescopio y posiblemente se atenúan más mediante la topografía de los alrededores del observatorio radioeléctrico, la interferencia procedente de los transmisores de satélite se recibirá probablemente a través de los lóbulos laterales interiores que tienen una ganancia considerablemente superior. El carácter de la interferencia depende del tipo de transmisor y del servicio que presta el sistema, tanto si los satélites están en órbita geoestacionaria como no geoestacionaria, y del número de satélites del sistema en consideración que se encuentran sobre el horizonte del observatorio radioeléctrico. Debe señalarse que los problemas de interferencia asociados a las transmisiones procedentes de satélite se aplican también en gran medida a las transmisiones procedentes de aeronaves.

#### 6.4.3.1 Satélites geoestacionarios

Desde la mayoría de los radiotelescopios actualmente en funcionamiento pueden verse múltiples satélites geoestacionarios que ocupan el cinturón de dichos satélites a lo largo del cielo. El radio de la órbita geosíncrona es aproximadamente 6,6 veces el radio de la Tierra. A dicha distancia, un satélite puede iluminar un tercio de la superficie de la Tierra, y en consecuencia a muchos radiotelescopios, con señales de visibilidad directa. La Fig. 4.3 muestra la posición del cinturón de los satélites geoestacionarios en coordenadas celestiales visto desde las latitudes de algunos de los principales observatorios de radioastronomía. Los planes para el desarrollo de algunos servicios activos apuntan hacia un número grande de satélites geoestacionarios. Dicha serie de posibles fuentes de interferencia que pueda recibirse por los lóbulos laterales interiores del diagrama de antena de un radiotelescopio puede presentar un problema de interferencia singular a los radioastrónomos.

La Recomendación UIT-R RA.769 da los umbrales perjudiciales de interferencia para la radioastronomía. Se enumeran allí los niveles para cada banda de radioastronomía de la potencia de entrada al receptor que bastan

para causar interferencia perjudicial. También se enumera las dfp  $(dB(W/m^2))$  que causan interferencia perjudicial calculándola con la hipótesis de que la ganancia del radiotelescopio es 0 dBi en la dirección de la fuente interferente. Dicha ganancia es apropiada para la consideración de las fuentes terrenales de interferencia que se limitan a la vecindad del horizonte. Para el caso de las fuentes geoestacionarias, la situación es diferente.

Si suponemos que la antena radioastronómica tiene las características de lóbulos laterales de la Recomendación UIT-R SA.509, la ganancia de los lóbulos laterales cae a 0 dBi a 19° respecto al eje del haz principal. Para una antena de este tipo, el nivel de la interferencia perjudicial se rebasará si el haz principal apunta dentro de 19° de un satélite que produzca en la anchura de banda de radioastronomía una densidad de flujo de potencia en el observatorio igual al umbral perjudicial de la Recomendación UIT-R RA.769. Una serie de satélites separados a intervalos de unos 30° a lo largo de la órbita de los satélites geoestacionarios que irradien interferencia con este nivel darán lugar a una zona de anchura aproximada de 38° centrada en la órbita en la cual se impediría la observación de radioastronomía libre de interferencia perjudicial. La anchura de esta zona de exclusión aumentaría con el número de satélites interferentes en la órbita y, en principio, podría abarcar todo el firmamento. El número efectivo de satélites interferentes dependerá de si las señales de interferencia están orientadas por las antenas de transmisión de los satélites o tienen una radiación más amplia. Es probable que la emisión fuera de banda que no esté muy separada de la frecuencia del transmisor del satélite esté dirigida por las antenas en una forma similar a las de las señales deseadas. Las emisiones no deseadas, tales como los armónicos, están separadas más ampliamente en frecuencia y pueden radiarse más ampliamente, pero deben ser más fácilmente retiradas mediante el filtrado en el transmisor.

Una solución al problema de la interferencia procedente de satélites geoestacionarios implica evidentemente un compromiso entre la superficie celeste perdida para las observaciones radioastronómicas y la dificultad de suprimir las emisiones no deseadas procedentes de transmisores de satélite. El examen de la Fig. 4.3 muestra que la posición de la órbita geoestacionaria en el cielo, vista desde la Tierra, cambia aproximadamente en 10° al pasar de los observatorios de un hemisferio a los del otro. Así pues, si las observaciones pueden efectuarse dentro de 5° de la órbita geoestacionaria, cada posición en el cielo puede observarse desde un observatorio existente por lo menos, siempre que esté convenientemente equipado para la observación en cuestión. En el Capítulo 4 se señala la conveniencia de reducir las emisiones no esenciales para poder realizar las observaciones radioastronómicas dentro de 5° de la órbita geoestacionaria.

Ese examen de la radiación procedente de satélites geoestacionarios se basa en el supuesto de que las órbitas están situadas en el plano ecuatorial de la Tierra. Sin embargo, para los fines de la coordinación de frecuencias, una definición reciente de los satélites geoestacionarios incluye a todos los satélites geosíncronos con ángulos de inclinación inferiores a 15°. El efecto de la inclinación de la órbita sobre la coordinación de frecuencias para la radioastronomía dependerá de la distribución de los ángulos de inclinación para aquellos satélites que son posibles fuentes de interferencia.

# 6.4.3.2 Satélites no geoestacionarios

El potencial de interferencia perjudicial procedente de los satélites LEO no geoestacionarios se agrava mediante su funcionamiento en gran número, lo que hace posible que muchos de ellos estén simultáneamente sobre el horizonte en un observatorio, y con visibilidad directa de la antena del radiotelescopio. Ello conduce a una estación en la que dicha antena puede recibir emisiones no deseadas de los LEO no geoestacionarios visibles a través de los lóbulos laterales interiores y exteriores del haz de la antena y también a través del haz principal. El problema de interferencia se complica por el cambio continuo de las direcciones de llegada de las señales interferentes y por la necesidad de que la antena del radiotelescopio siga a la fuente celeste que se está observando. Las entradas múltiples de señales intensas pueden llevar el punto de funcionamiento del receptor hacia una región no lineal, lo que se traduce en la generación de productos de intermodulación.

El efecto de las emisiones no deseadas producidas en los emplazamientos de radioastronomía por una constelación de satélites en órbitas (bajas) no geoestacionarias puede determinarse utilizando la metodología de la dfpe descrita en un proyecto de nueva Recomendación UIT-R S.1586 – Cálculo de los niveles de emisión no deseada producidos por un sistema del servicio fijo por satélite no geoestacionario en localización de radioastronomía o en la Recomendación UIT-R M.1583 – Cálculos de la interferencia entre los sistemas no geoestacionarios del servicio móvil por satélite o del servicio de radionavegación por satélite y los emplazamientos de los telescopios de radioastronomía, y las ganancias de la antena que figuran en el Anexo 1 al Capítulo 4.

Estas Recomendaciones pueden utilizarse para determinar el porcentaje de pérdida de datos durante las observaciones efectuadas en un emplazamiento de radioastronomía particular debido a la interferencia procedente de un sistema de satélites determinado. El porcentaje máximo aceptable de pérdidas de datos se define en la Recomendación UIT-R RA.1513.

# 6.4.3.2.1 Ejemplo de emisiones no deseadas procedentes del servicio fijo por satélite

La banda 10,6-10,7 GHz está atribuida al SRA con carácter primario; la subbanda 10,68-10,7 GHz está atribuida con carácter exclusivo a los servicios pasivos (se aplica la nota **5.340** del RR en la que se enumeran diversas bandas dentro de las cuales están prohibidas todas las emisiones).

La banda se ha utilizado satisfactoriamente para la observación del continuum radioeléctrico de la emisión galáctica y extragaláctica, incluyendo las propiedades de la polarización, y para la investigación de los púlsares.

La banda 10,7-11,7 GHz está atribuida al SFS con carácter primario. La utilización de las bandas 10,7-10,95 GHz (espacio-Tierra) y 11,2-11,45 GHz (espacio-Tierra) por los sistemas del SFS geoestacionario se realiza conforme a las disposiciones del Artículo 10 del Apéndice **30B** del RR.

A continuación se describe un caso de interferencia causada al SRA en que interviene un sistema particular de satélite del SFS geoestacionario.

La Fig. 6.7 muestra los resultados de la medición de radioastronomía realizada en 10,6 GHz por el radiotelescopio de 100 m de Effelsberg, apuntando hacia 3C84, una de las fuentes radioeléctricas cósmicas de tipo puntual más intensas. Esta medición se efectuó antes de 1995. El tamaño del campo es  $30 \times 12$  minutos de arco y la densidad de flujo procedente de la fuente es de 20,5 Jy (~ -247 dB(W(m<sup>-2</sup> · Hz<sup>-1</sup>))). La estructura representa el haz principal y los lóbulos laterales próximos del radiotelescopio.

# FIGURA 6.7

Mapa de la fuente extragaláctica 3C84 en la banda 10,6-10,7 GHz con el radiotelescopio de 100 m de Effelsberg



Radio-Astro\_67

Posteriormente, en el año 1995, se puso en funcionamiento un satélite del SFS geoestacionario en una cierta posición orbital en la que habían estado funcionando ya otros satélites durante cierto tiempo. El satélite tiene una frecuencia central de transmisión inferior de 10,714 GHz y la anchura de banda del transpondedor es de 26 MHz. La fluctuación del ruido resultante generada por las emisiones del SFS no deseadas procedentes de la posición orbital en la banda adyacente de la SRA 10,6-10,7 GHz era tan intensa que enmascaró completamente toda señal astronómica.

La Fig. 6.8 muestra el mapa consecuente en el mismo campo de  $30 \times 12$  minutos de arco del firmamento de la Fig. 6.7, pero obtenido después de que el satélite entrase en funcionamiento en el año 1995, estando su posición orbital separada 10° respecto al campo representado del cielo. La fuente puntual muy intensa 3C84 queda borrada por el nivel de interferencia y ya no es distinguible claramente como fuente cósmica.

#### FIGURA 6.8

Mapa del mismo campo del cielo de la Fig. 6.7, pero con la interferencia recibida en el radiotelescopio de Effelsberg



Radio-Astro\_68

Para investigar este caso de interferencia, la estación de comprobación técnica de satélites de Leeheim de la German Regulatory Authority midió un espectro de las trasmisiones del SFS procedentes del satélite en la posición orbital indicada (véase la Fig. 6.8), a fin de determinar el nivel de las emisiones no deseadas que caían en la banda del SRA. No obstante, debe señalarse que la sensibilidad y la gama dinámica de la estación de comprobación no eran suficientes en aquella época para verificar la interferencia a los niveles indicados como criterio de protección para el SRA en la Recomendación UIT-R RA.769.

De la Fig. 6.9 puede verse que el extremo de 10,7 GHz de la atribución del SRA en la banda exclusiva pasiva, el nivel de la emisión no deseada medido es de  $-151 \text{ dB}(W/m^2)$  en una anchura de banda de referencia de 100 kHz. Esto corresponde a  $-201 \text{ dB}(W/(m^2 \cdot \text{Hz}))$ , mientras que la Recomendación UIT-R RA.769 da un nivel 39 dB inferior, de  $-240 \text{ dB}(W/(m^2 \cdot \text{Hz}))$ , como umbral de interferencia. Además, conviene aplicar límites que sean 12-15 dB más estrictos en el caso de satélites geoestacionarios, tal como se vio en § 4.7.3. Esta gran discrepancia se produce en el extremo superior de la banda 10,6-10,7 GHz y es inferior en el resto de la banda.

Desde el extremo de la banda de 10,7 GHz hasta aproximadamente 10,69 GHz, donde la señal interferente alcanza el nivel mínimo de ruido de la estación de comprobación de Leeheim (dfp aproximadamente  $-160 \text{ dB}(W/m^2)$ , la caída de la señal es de unos 10 dB cada 4 MHz. Si se supone que esta tasa de caída continúa hasta 10,6 GHz, la potencia total estimada que se emite desde la posición orbital en la banda 10,6-10,7 GHz es de  $-145,6 \text{ dB}(W/m^2)$ , lo que está 14,4 dB por encima del umbral de  $-160 \text{ dB}(W/m^2)$  de la Recomendación UIT-R RA.769 para esta banda. Así pues, toda la banda 10,6-10,7 GHz queda completamente inutilizable para las observaciones radioastronómicas, tal como se representa en la Fig. 6.8.

Este satélite del SFS se ha movido a una posición orbital de espera diferente y ya no afecta a las observaciones que se efectúan en el telescopio de Effelsberg.

#### FIGURA 6.9



# Medición de la interferencia del SFS geoestacionario efectuada en la estación de comprobación técnica de Leeheim (1995)

### 6.4.3.3 Casos posibles de interferencia por armónicos procedente de satélites

# 6.4.3.3.1 Radiación en el segundo armónico en la banda de 23,6-24,0 GHz procedente de satélites de radiodifusión

Un modo posible de interferencia a la radioastronomía es la radiación del segundo armónico procedente de satélites de radiodifusión que trabajan en la banda de 11,7-12,5 GHz. La gama de armónicos de 23,4-25,0 GHz incluye la banda exclusiva de servicios pasivos de 23,6-24,0 GHz. Para las Regiones 1 y 3, el Anexo 3 del Apéndice 30 del RR indica para la recepción individual una dfp mínima en la banda de 11,7-12,5 GHz de  $-103 \text{ dB}(\text{W/m}^2)$  en el borde de la zona de cobertura, y la dfp en el centro de la zona de cobertura sería normalmente de  $-100 \text{ dB}(\text{W/m}^2)$ . Estos valores de la dfp son aplicables a cada canal del SRS. La dfp total dentro de la banda de 11,8-12,0 GHz puede alcanzar un valor de  $-91 \text{ dB}(\text{W/m}^2)$ .

Según el Cuadro 4.1, la radioastronomía se ve afectada por la interferencia producida por señales superiores a  $-147 \text{ dB}(\text{W/m}^2)$  en una anchura de banda de 400 MHz en 24 GHz. Para una ganancia del lóbulo lateral de 0 dBi en la antena radioastronómica, la supresión requerida del segundo armónico es así de 56 dB lo que se puede conseguir con las técnicas de diseño establecidas.

# 6.4.3.3.2 Radiación en el segundo armónico cerca de 22,2 GHz procedente del SFS

Una situación análoga a la examinada en § 6.4.3.2.1 existe en la raya del vapor de agua para la radioastronomía en 22,2 GHz, pero las dfp permitidas en la Tierra de los transmisores del servicio fijo son inferiores a las del servicio de radiodifusión por satélite, con lo que los problemas de interferencia son a su vez menores. Esto se aplica también a las bandas de servicios pasivos en 15,35-15,4 GHz y 164-168 GHz, que contienen igualmente el segundo armónico de las frecuencias atribuidas para las transmisiones espacio-Tierra.

# 6.4.3.3.3 Radiación en el segundo armónico en la banda de 4990-5000 MHz procedente de la banda de radiodeterminación por satélite y móvil por satélite

La banda 2483,5-2500 MHz se ha atribuido a los servicios de radiodeterminación por satélite y móvil por satélite para las transmisiones de enlace descendente que van de los satélites a las unidades de usuario. Los segundos armónicos de tales transmisiones se extienden por la banda mundial de radioastronomía a título primario de 4990-5000 MHz (4950-5000 MHz en Argentina, Australia y Canadá). El umbral de interferencia para la radioastronomía en la banda de 4990-5000 MHz es de  $-171 \text{ dB}(W/m^2)$  según el Cuadro 4.1.

# 6.4.3.3.4 Radiación en el tercer armónico en la banda de 1 400-1 427 MHz procedente del servicio de meteorología por satélite

Algunos satélites meteorológicos utilizan la banda de 460-470 MHz para recoger datos de plataformas situadas en la Tierra y transmitirlos después a centros de compilación de datos. El tercer armónico de tales transmisiones superiores a 466 MHz cae dentro de la banda de 1 400-1 427 MHz de la radioastronomía. Para esas transmisiones se emplean potencias de hasta 40 W. En el supuesto de un satélite geoestacionario con una ganancia de 0 dBi en la antena transmisora en el tercer armónico, la dfp en el punto subsatelital de la Tierra es de  $-146 \text{ dB}/(\text{W/m}^2)$ . Para la recepción en los lóbulos laterales de 0 dBi de la antena radioastronómica, la supresión de armónicos debe ser al menos de -34 dB en relación con la intensidad de transmisión en la frecuencia fundamental.

# 6.5 Emisiones no deseadas procedentes de la modulación en banda ancha

Véase la 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.

# 6.5.1 Empleo de la modulación en banda ancha

En ciertos tipos de transmisiones, asociadas a menudo con la transmisión de datos digitales, se generan bandas laterales espectrales en una gama de frecuencias mucho más ancha que la utilizada para la recepción de tales señales. En particular, la técnica digital de modulación por desplazamiento de fase produce un espectro de potencia de la forma  $[sen(\pi x)/\pi x]^2$ , con máximos secundarios repetidos fuera de la banda deseada, que sólo disminuyen lentamente con la frecuencia. Aunque en general sólo se utiliza la frecuencia máxima central del espectro en la recepción por el servicio interesado, las bandas laterales se radian a veces sin un filtrado eficaz. La envolvente de las bandas laterales sin filtrar, por ejemplo, a 10 veces la anchura de banda a -3 dB a partir de la frecuencia central, se reduce sólo en 29 dB por debajo del nivel de la potencia en el máximo central. Si además la frecuencia de modulación de una transmisión con modulación por desplazamiento de fase binaria (MDP-2) es de 10 a 20 MHz, esas 10 anchuras de banda abarcarán varios centenares de MHz alrededor de la frecuencia asignada. Por ejemplo, supóngase un transmisor simple de MDP-2 sin filtrar con una frecuencia de modulación de 10 MHz centrada en 1615 MHz y una potencia de salida de 40 W que radia por una antena isótropa montada en una aeronave. A una distancia en visibilidad directa de 400 km desde un observatorio, las bandas laterales no deseadas darán un nivel de dfp en el máximo espectral en la banda de radioastronomía de 1 400-1 427 MHz, que estará a 48 dB por encima del umbral correspondiente indicado en el Cuadro 4.1. El nivel de las emisiones en las bandas de 1 610,6-1 613,8 MHz y 1 660-1 670 MHz, atribuidas también a la radioastronomía, sería apreciablemente mayor.

La MDP-2 se utiliza también en la modulación de espectro ensanchado de secuencia directa. Una característica común de la mayoría de las técnicas de espectro ensanchado consiste en la presencia de una señal de banda ancha con densidad espectral de potencia baja. Esta característica reduce la probabilidad de que tales transmisiones provoquen interferencia en los sistemas convencionales de comunicaciones en banda estrecha, en los que el único interés consiste en encontrar la modulación procedente de una señal. Por el contrario, en radioastronomía preocupa la medición precisa de la potencia recibida de fuentes naturales. Las ondas
radioeléctricas cósmicas tienen en general las características del ruido aleatorio y con frecuencia deben utilizarse anchuras de banda amplias del receptor para proporcionar la sensibilidad requerida. Por ello, a menudo no hay medio de establecer diferencias entre las señales de espectro ensanchado y las señales cósmicas. Los umbrales perjudiciales de la dfp para la interferencia en la radioastronomía indicados en el Capítulo 4 se aplican tanto a las emisiones no deseadas como intencionadas y a todos los tipos de modulación, incluidos los examinados más arriba.

#### 6.5.2 Conformación de impulsos para reducir las emisiones no deseadas

Los niveles de las emisiones no deseadas procedentes de la modulación digital pueden reducirse considerablemente mediante la conformación de impulsos, es decir, utilizando formas de impulsos con las que se evitan las transiciones agudas casi rectangulares de amplitud o de fase. Un teorema de la transformada de Fourier indica que si la forma del impulso en función del tiempo se hace impulsiva en la n-ésima derivada, el espectro de potencia de las bandas laterales cae con la inversa de la frecuencia elevada a la potencia 2n. En el caso de impulsos rectangulares en el dominio del tiempo, la función de conformación de impulsos se hace impulsiva en la primera derivada (n = 1) y las bandas laterales caen según una ley  $f^{-2}$ , como en la forma senocuadrática mencionada anteriormente. Como ejemplo de conformación de impulsos, considérese el caso de impulsos en el que las transiciones rectangulares de la amplitud unitaria se sustituyen por [1 + sen (x)]/2, donde x es lineal desde  $-\pi/2$  a  $\pi/2$  para las transiciones positivas y desde  $\pi/2$  a  $-\pi/2$  para las negativas. La forma de onda del impulso resultante se hace impulsiva en la tercera derivada y a partir de ahí el espectro de potencia cae como  $f^{-6}$ . [Ponsonby, 1994] ha demostrado este resultado. Así pues, por ejemplo, a una frecuencia en la que la envolvente del espectro de potencia haya caído a -20 dB con relación al máximo para impulsos rectangulares, habría caído a -60 dB con la conformación sinusoidal que acaba de describirse. Este resultado es muy útil, pues la gama espectral en la que las emisiones no deseadas inducidas por la modulación pueden ser perjudiciales para la radioastronomía se reduce considerablemente. Han de describirse otras numerosas formas prácticas de conformación de impulsos para reducir las emisiones no deseadas; por ejemplo, la modulación por desplazamiento mínimo con filtro gaussiano (GMSK) [Murota e Hirade, 1981; Otter, 1994].

La utilización de técnicas de modulación concebidas para minimizar las emisiones no deseadas puede ser eficaz únicamente si los pasos del amplificador de potencia siguientes al modulador son suficientemente lineales para evitar la generación de emisiones no deseadas como productos de intermodulación. Éste es un problema particular de las trasmisiones de satélite para las que los límites de la potencia eléctrica pueden conducir a la maximización de la eficacia del transmisor a expensas de la linealidad. En algunos satélites de comunicación, se utilizan diversos haces distintos para las trasmisiones del enlace descendente que permiten la reutilización de frecuencias. Los haces se forman mediante la puesta en fase adecuada de un gran número de elementos radiantes, cada uno de los cuales se excita con un amplificador de potencia separado. El filtrado de las señales no amplificadas para eliminar las emisiones no deseadas no siempre es práctico en dichos casos.

#### 6.5.3 Ejemplo de interferencia procedente de la modulación en banda ancha

La serie GLONASS de satélites de radiodeterminación [Daly, 1988; Ponsonby, 1991] ha sido una fuente de interferencia para las observaciones radioastronómicas en las bandas 1 610,6-1 613,8 y 1 660-1 670 MHz desde mediados de los años ochenta [Galt, 1990]. El sistema plenamente desplegado comprende 24 satélites situados en tres planos orbitales. Se preveía utilizar 24 canales de transmisión con frecuencias centrales espaciadas a intervalos de 0,5625 MHz desde 1 602,5625 MHz hasta 1 615,5 MHz. La interferencia viene producida por satélites con canales situados bastante fuera de las bandas de radioastronomía, como resultado de las bandas laterales debidas a la modulación de espectro ensanchado. Las bandas laterales presentan una estructura en su espectro de frecuencias que se repite a intervalos de 0,511 y 5,11 MHz, resultantes de las frecuencias de modulación de los códigos de alta y baja precisión, respectivamente. La estructura principal de las bandas laterales es la serie de máximos espaciados a 5,11 MHz y de picos estrechos en frecuencia que se producen en algunos de los nulos. Algunas de las crestas de los nulos pueden verse en frecuencias alejadas del canal de transmisión hasta la banda de radioastronomía de 1 660-1 670 MHz.

La administración GLONASS realizó una serie de pruebas en colaboración con el Comité IUCAF en noviembre de 1992. Los satélites que utilizaban canales de transmisión próximos a la banda de 1610,6-1613,8 MHz se desplazaron en frecuencia o desconectaron, en etapas. En la evaluación de los efectos de estas modificaciones del sistema GLONASS sobre la calidad de los datos astronómicos, participaron 15 observatorios repartidos por todo el mundo. La evaluación de los resultados constituyó la base de acuerdos

formales entre la administración GLONASS y el Comité IUCAF, y varios gobiernos nacionales, que describen una solución comprensible para el problema de la interferencia GLONASS en las bandas de la radioastronomía. Esta solución consistirá en:

- una reducción del número de canales radioeléctricos requeridos con utilización del mismo canal en satélites localizados en las antípodas;
- un desplazamiento en sentido descendente de las frecuencias de los canales asignados, alejándose de la banda de radioastronomía; y
- el empleo de filtrado por encima del primer nulo en el espectro de banda ancha del canal de frecuencia superior.

Conforme al acuerdo GLONASS-IUCAF no se ha lanzado ningún vehículo espacial con capacidad de frecuencia superior a 1 610 MHz, y todos tienen filtros fuera de banda; después de 1999, se han eliminado las emisiones principales en la banda de radioastronomía de 1 612 MHz. El acuerdo GLONASS-IUCAF se ha reconocido explícitamente en el Reglamento de Radiocomunicaciones, a saber, en el Cuadro 1-2 del Anexo 1 a la Resolución 739 (Rev.CMR-07), en el que se afirma: «La presente Resolución no es aplicable a las asignaciones actuales y futuras al sistema de radionavegación por satélite GLONASS/GLONASS-M en la banda 1 559-1 610 MHz, independientemente de la fecha de recepción de la correspondiente información de coordinación o notificación, según el caso. Así pues, la protección del servicio de radioastronomía en la banda 1 610,6-1 613,8 MHz queda garantizada y seguirá siendo conforme al acuerdo bilateral entre la Federación de Rusia, la administración notificante del sistema GLONASS/GLONASS-M, y la IUCAF, además de los ulteriores acuerdos bilaterales con otras administraciones».

#### 6.5.4 Ejemplo: Interferencia radioeléctrica producida por el sistema del SMS IRIDIUM (HIBLEO-2)

Esta sección procede del Informe ECC 171, en el que figuran amplios detalles de la metodología empleada y de las mediciones efectuadas.

#### 6.5.4.1 Operaciones del SRA en la banda 1 610,6-1 613,8 MHz

La banda 1 610,6-1 613,8 MHz está atribuida al servicio de radioastronomía a título primario y se utiliza para las observaciones de las rayas espectrales del radical hidroxilo (OH). La transición del OH a la frecuencia en reposo de 1 612 MHz es una de las rayas espectrales más importantes para el SRA, y como tal figura en la Recomendación UIT-R RA.314. El OH fue el primer radical cósmico que se detectó en frecuencias radioeléctricas (1963) y continúa siendo un potente instrumento de investigación. En su estado fundamental, la molécula OH produce cuatro rayas espectrales, a frecuencias de 1 612, 1 665, 1 667 y 1 720 MHz, aproximadamente, habiendo sido observadas todas ellas en la emisión y absorción en nuestra Galaxia, así como en galaxias externas. El estudio de las rayas del OH ofrece información sobre una amplia gama de fenómenos astronómicos, por ejemplo la formación de protoestrellas y la evolución de las estrellas. Para interpretar la mayor parte de las observaciones efectuadas sobre la molécula OH, es necesario medir la intensidad relativa de varias de estas rayas. La pérdida de la posibilidad de observar cualquiera de estas rayas impedirá el estudio de esta clase de fenómenos físicos.

#### 6.5.4.2 Descripción de la constelación IRIDIUM

El servicio móvil por satélite (Tierra-espacio) está atribuido en la banda **1610,0** – **1626,5** MHz y el servicio móvil por satélite (espacio-Tierra) tiene una atribución **a título secundario** en la banda **1613,8** – **1626,5** MHz. La nota **5.208B** estipula que la Resolución **739** (CMR-07) será de aplicación para los futuros sistemas proyectados para esta banda.

El sistema IRIDIUM emplea 66 satélites en órbita terrena baja (LEO) que dan soporte a comunicaciones usuario a usuario, usuario a pasarela y pasarela a pasarela. Los 66 satélites están distribuidos uniformemente en seis planos orbitales con una inclinación de 86,4°, con uno de reserva en órbita para cada plano orbital. Con la excepción de los planos 1 y 6, los planos orbitales son corrotatorios y mantienen una separación de 31,6°. El primer plano orbital y el último están separados 22° y forman una costura en la que los satélites rotan en sentido contrario. La órbita de los satélites se encuentra a una altitud de 780 km y el período orbital es de 100 min. 28 s., aproximadamente.

Las comunicaciones se efectúan en la banda 1618,25 – 1626,5 MHz con un equipo móvil especial en tierra y en el aire, y prestan un servicio de comunicaciones de ámbito mundial que alcanza a todos los puntos de nuestro planeta.

#### 6.5.4.3 Naturaleza y características de la interferencia de IRIDIUM

Las previsiones teóricas efectuadas en 1998 con la constelación Iridium (HIBLEO-2) en condiciones artificiales de plena carga se resumen en la Recomendación UIT-R SM.1633 (2003), Anexo 6:

#### «4.2 Cálculo del nivel de la interferencia

Las emisiones no deseadas en términos de densidad espectral de flujo de potencia combinada de transmisiones del satélite HIBLEO-2 en la banda 1 610,6-1 613,8 MHz han sido estimadas teóricamente entre -214 dB  $(W/(m^2/Hz))$  y -223 dB $(W/(m^2/Hz))$  en algunos emplazamientos de radioastronomía, en condiciones totalmente cargadas».

La interferencia de los satélites IRIDIUM en la banda 1 610,6 – 1613,8 MHz está causada por los productos de la intermodulación de 7° orden generados en el satélite y no por la sobrecarga de los receptores radioastronómicos. El análisis del espectro de la interferencia llevado a cabo en el telescopio de Effelsberg (informe del 01/03/2006) muestra que las dos portadoras fundamentales del Iridium a  $f_1 = 1618,25$  MHz y  $f_2= 1620,25$  MHz producen la interferencia observada en 1612,25 MHz, que corresponde a la relación de intermodulación  $f_1 - 3df = 4f_1 - 3f_2$  e indica un producto de intermodulación del 7° (=4 + 3) orden. No se observó evidencia alguna de productos de orden inferior a 1,61425 y 1,61625 GHz. Los amplificadores y mezcladores ordinarios producen un patrón de interferencia en el que la potencia de los productos de intermodulación disminuye al aumentar su orden. Estos bajos órdenes de intermodulación (3-5) se suprimen, evidentemente, al procesar la señal a bordo del satélite IRIDIUM mientras que siguen apareciendo productos de intermodulación de orden superior.

Los amplificadores de microondas y los receptores radioastronómicos tecnológicamente más avanzados disponen de puntos de intercepción del tercer orden (IIP<sub>3</sub>) desde -30 a -25 dBm. Una portadora principal de -178 dBm del satélite IRIDIUM (observada) no puede crear autointerferencia detectable en el frontal de un receptor radioastronómico. La intensidad de la interferencia permite una estimación de la intercepción del 7° orden para el transmisor del satélite de +19 dBW, aproximadamente, que se aproxima a la p.i.r.e. del satélite de +11 dBW. Esto parece indicar que el transmisor del satélite ha entrado en compresión y producirá fuertes emisiones fuera de banda a ambos lados de la banda del IRIDIUM. Para ciertas atribuciones de canales de transmisión, los productos de intermodulación del 7° orden caerán dentro de la banda del SRA.

#### 6.5.4.4 Mediciones y verificación

Un programa de ensayos llevado a cabo por HIBLEO-2 (Iridium) en colaboración con el Observatorio Nacional de Radioastronomía de Estados Unidos (NRAO, *National Radio Astronomy Observatory*) en 1998, midió valores de la defp entre -220 y -240 dB(W/(m<sup>2</sup>/Hz)) en estos emplazamientos. Este valor se refiere a los denominados canales vocales que se activan cuando se produce la comunicación. Además, se detectó que el sistema HIBLEO-2 radia señales de radiodifusión en todo momento. Los espectros de los canales de radiodifusión mostraron 9-10 crestas estrechas (de menos de 40 kHz de amplitud) dentro de la banda de radioastronomía. Los valores de cresta de la defp alcanzaron un promedio aparente de 227 dB(W/(m<sup>2</sup>/Hz)) en 90 ms. (Fuente: Recomendación UIT-R SM.1633 (2003) citada en el Informe ECC 171).

## 6.5.4.5 Mediciones efectuadas en la estación de comprobación técnica de Leeheim el 8 y 9 de junio de 2010

La Estación de Comprobación Técnica Radioespacial de Leeheim está situada a 35 km, aproximadamente, al suroeste de Frankfurt/Main. La Estación de Comprobación Técnica de Leeheim tiene varias antenas de satélite, entre ellas una antena de reflector parabólico de 12 m diseñada para cubrir la gama de frecuencias 1-13 GHz, con la que se efectuó la comprobación técnica. La alta precisión de su puntería angular permitió efectuar un seguimiento preciso de los satélites durante su desplazamiento.

La principal campaña de mediciones de Leeheim fue llevada a cabo conjuntamente por MPIfR, ASTRON y BNetzA con satélites Iridium el 8 y 9 de junio de 2010. Las mediciones se tomaron una vez por segundo en canales de 6,1 KHz en la gama 1 610,6-1 613,8 MHz sobre 28 pasadas de satélites de la constelación Iridium, efectuándose las observaciones entre las 08.30 y las 17.30 (hora local) durante esos dos días.

Se utilizó un filtro de banda rechazada delante del receptor para suprimir las intensas emisiones de los satélites en la banda 1 613,8 - 1 626,5 MHz a fin de evitar la falta de linealidad del sistema receptor cuando la antena efectuaba el seguimiento de un satélite activo.

Ese mismo día se efectuaron calibraciones sobre las fuentes radioeléctricas Cas-A y Cyg-A, utilizando la misma configuración que la de las mediciones de los satélites, y ofreciendo de este modo una calibración de densidad de flujo absoluta de todos los canales espectrométricos.

En la Fig. 6.10 se muestra un ejemplo característico de los espectros obtenidos. La interferencia observada en la banda del SRA tiene las mismas características de cresta que las informadas en SM.1633 que datan de 1998. Los valores de cresta de la emisión obtenidos en las mediciones efectuadas en la Estación de Comprobación Técnica de Leeheim son comparables a las previstas teóricamente para condiciones de plena carga, para las que -214 dB(W/m2/Hz) se traducen a 40 kJy.

#### FIGURA 6.10



Espectrograma calibrado (a la izquierda) y espectro promediado (a la derecha) de las emisiones no deseadas de IRIDIUM 97 en la banda 1610,6-1613,8 MHz

El análisis de las mediciones efectuadas en Leeheim puso de manifiesto que el tránsito de un solo satélite IRIDIUM genera interferencia a nivel del suelo que rebasa los umbrales ajustados de tiempo y anchura de banda de la Recomendación UIT-R RA.769 para la banda 1 610,6-1 613,8 MHz en más de 20 dB en cualquier escala temporal entre 1 segundo y 800 segundos. La pérdida de anchura de banda superó el 30% en todos los espectros de tránsito promediados (mediana del 76%) y tuvo que rechazarse al menos un 11% (con una mediana del 47%) de todos los espectros de 1 segundo debido a la contaminación espectral por las emisiones de fuera de banda del IRIDIUM. Las mediciones de Leeheim también confirman las conclusiones del informe de interferencia de Effelsberg de fecha 1 de marzo de 2006 anteriormente mencionado.

Debe señalarse que las mediciones llevadas a cabo por el NRAO sobre satélites individuales, en condiciones artificiales de plena carga, en 1998, mostraron resultados similares al de este análisis estático. Tras los ensayos llevados a cabo (en torno a 2003) por el NRAO para mejorar la compatibilidad con el SRA se introdujeron varias modificaciones en los parámetros de explotación del sistema Iridium.

El posterior análisis de la **DFPE** con arreglo a las instrucciones de la Recomendación UIT-R RA.1513, pusieron de manifiesto que la pérdida de datos variaba considerablemente a lo largo de la banda, con un valor del 93,2% para un tiempo de integración de 2 000 segundos. Para satisfacer el criterio del 2%, el nivel de potencia de la interferencia debe reducirse en 13 dB. La pérdida de datos a través del cielo para la frecuencia 1 613,7878 MHz en el borde superior de la banda de frecuencias del SRA es del 100% para un tiempo de integración de 2 000 segundos. Para satisfacer el criterio del 2%, el nivel de potencia de la interferencia debe reducirse en 20 dB. Para tiempos de integración cortos, como 30 segundos, se experimentó una variación del

4,7% en el límite inferior de la banda de frecuencias del SRA y del 43,5% en la proximidad del límite superior de la banda atribuida al SRA. Para satisfacer el criterio del 2%, el nivel de potencia de la interferencia debe reducirse en 11 dB.

En todas las etapas de las mediciones y en la formulación del informe de la ECC sobre el que se ha fundamentado esta sección, participaron representantes de IRIDIUM.

#### 6.6 Conclusiones

El examen de los problemas de la interferencia procedente de transmisores en la radioastronomía permite deducir varias conclusiones, entre las cuales tienen especial importancia las siguientes:

- Los receptores de radioastronomía exigen que se preste cuidadosa atención al filtrado en las fases de radiofrecuencia para reducir al mínimo los problemas de las bandas adyacentes, pero ello no suele ser difícil de lograr.
- Los transmisores que funcionan en bandas que no son adyacentes a las bandas de radioastronomía pueden provocar interferencia en ésta por medio de la radiación de armónicos, los productos de intermodulación y la modulación en banda ancha sin filtrar.
- Los transmisores en satélites o aeronaves pueden plantear problemas especiales porque en general existen condiciones de propagación en línea directa y porque la probabilidad de recepción en los lóbulos laterales situados cerca del haz principal (más que en los lóbulos laterales lejanos) es mayor que en el caso de las transmisiones terrenales.
- En general, la atribución de bandas adyacentes a las bandas de radioastronomía a servicios que utilizan transmisores terrenales de alta potencia o transmisores en satélites puede provocar dificultades y costosos problemas técnicos.
- Las emisiones de banda ancha procedentes de satélites, como son las señales que utilizan la modulación de espectro ensanchado en secuencia directa, pueden producir problemas especialmente graves para la radioastronomía, a no ser que esas emisiones estén convenientemente filtradas.

#### REFERENCIAS

- DALY, P. [1988] Aspects of the Soviet Union's Glonass satellite navigation system. J. of Navigation, Vol. 41, p. 186-198.
- GALT, J. [1990] Contamination from satellites. Nature, Vol. 345, p. 483.
- MUROTA, K e HIRADE, K. [1981] GMSK modulation for digital mobile radio telephony. *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-29, p. 1044-1050.
- OTTER, M. A. [junio de 1994] A comparison of QPSK, OQPSK, BPSK and GMSK modulation schemes. Report of the European Space Agency, European Space Operations Center, Darmstadt, Alemania.
- PONSONBY, J. E. B. [julio de 1991] Spectrum management and the impact of the GLONASS and GPS satellite systems on Radioastronomy. *J. of Navigation*, Vol. 44, p. 392-398.
- PONSONBY, J. E. B. [julio de 1994] Impact of the direct sequence spread spectrum signals from the Global Satellite Navigation System GLONASS on radio astronomy: problem and proposed solution. Proc. of the IEEE Spread Spectrum Symposium, Oulu, Finlandia.

## CAPÍTULO 7

- 100 -

## Técnicas especiales, aplicaciones y emplazamientos de observación

#### 7.1 Introducción

Este Capítulo trata de las técnicas y emplazamientos de observación que no se han tratado en las consideraciones de índole más general de los Capítulos precedentes. En particular, en ciertas aplicaciones de la radioastronomía interviene la observación en el espacio con una o más antenas, a lo que en ocasiones se denomina radioastronomía espacial. Entre los motivos por los que se requiere una antena en el espacio, se encuentran los siguientes:

- En VLBI, la correlación de las señales de las antenas terrenales y las señales de una antena en el espacio da líneas de base más largas y de ahí una resolución angular superior a la que puede lograrse utilizando únicamente antenas terrenales. El movimiento de la antena espacial en una órbita alrededor de la tierra imprime una variación de las direcciones de las líneas de base formadas con las antenas terrenales, lo que es importante para la composición de imágenes bidimensionales.
- Para la observación y la medición de la estructura de la radiación cósmica del fondo de microondas (CMB) en microondas, se precisa una sensibilidad muy elevada en frecuencias de unos 30 GHz y superiores. Es muy importante evitar la absorción atmosférica, y en particular las radiaciones de la intensidad resultante de las irregularidades de la atmósfera, especialmente para las mediciones con una sola antena (potencia total).
- Para frecuencias próximas a las de las rayas de absorción intensas del H<sub>2</sub>O y el O<sub>2</sub> en la atmósfera de la Tierra (véase la Fig. 3.1), se necesitan observaciones desde el espacio.
- Para las observaciones en frecuencias bajas en las que las ondas radioeléctricas no pueden penetrar la ionosfera o se atenúan mucho, también son necesarias las observaciones desde el espacio.

Los emplazamientos más importantes de las antenas espaciales para la radioastronomía son los siguientes:

- La órbita de la Tierra, especialmente útil para la VLBI (véase § 7.2)
- El punto de Lagrange Sol-Tierra L<sub>2</sub> (véase § 7.3) situada aproximadamente a  $1,5 \times 10^6$  km de la Tierra y que ofrece por ello cierta protección contra la interferencia terrenal.
- Las órbitas de arrastre de la Tierra en las que el satélite está próximo a la órbita de la Tierra alrededor del Sol, pero sigue a la Tierra a una distancia que suele ser de 10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup> km, ofreciendo también cierta protección contra la interferencia terrenal.
- La zona apantallada de la Luna (véase § 7.4) que ofrece la protección más eficaz contra la interferencia terrenal, pero que no se ha utilizado aún.

El punto L<sub>2</sub>, la zona oculta de la Luna y la mayoría de las órbitas terrenas planificadas se encuentran a una distancia de  $2 \times 10^6$  km que define el contorno entre el espacio próximo a la Tierra y el espacio lejano. Las órbitas de la Tierra y el punto L<sub>2</sub> se han utilizado en observaciones de la estructura de la radiación CMB. También se han utilizado emplazamientos terrenales escogidos con un vapor de agua atmosférico mínimo, el Polo Sur y el desierto de Atacama para las observaciones de la radiación CMB (véase § 7.5).

Otras técnicas especiales y aplicaciones examinadas en este capítulo incluyen las mediciones geodésicas utilizando la VLBI (véase § 7.2.2), la observación de los púlsares que tiene posibles aplicaciones en las señales horarias (véase § 7.6) y las observaciones del Sol y sus efectos en el clima del espacio (véase § 7.7).

#### 7.2 La VLBI, y en particular la VLBI espacial

La técnica de la VLBI implica la realización de observaciones simultáneas de una fuente radioeléctrica utilizando antenas separadas por largas distancias, situadas con frecuencia en distintos países o en la órbita terrestre. La resolución angular de las observaciones VLBI no está superada por ninguna otra técnica

astronómica utilizada en tierra. Las redes de antenas VLBI con líneas de base máximas próximas al diámetro terrestre pueden alcanzar una resolución angular de menos de 1 milisegundo de arco. Pueden conseguirse frecuencias de observación adaptadas con gran precisión en una red de antenas VLBI utilizando relojes atómicos de gran estabilidad para mantener la coherencia de fase sin un enlace de referencia en tiempo real. Cuando se utilizan máseres de hidrógeno como relojes, el tiempo de integración coherente sólo suele estar limitado por las variaciones diferenciales de la longitud del trayecto en la atmósfera y en la ionosfera. Sin embargo, en frecuencias altas, la estabilidad de los máseres  $(10^{-14})$  puede ser un factor limitante; por ejemplo, a 100 GHz, limitaría el tiempo de integración coherente a 1000 s. Los datos obtenidos en los emplazamientos de cada una de las antenas o bien se graban (actualmente en discos magnéticos) o se transmiten mediante redes de área extensa y alta velocidad. Las velocidades de los datos grabados o transmitidos dependen del objetivo científico y de los procedimientos de observación, así como de las facilidades técnicas disponibles. Las velocidades máximas utilizadas en la práctica actual se aproximan a 3 Gigabit/s, lo que constituye una nueva norma adoptada por la red de antenas de línea de base muy larga (VLBA, Very Long Baseline Array), instrumento VLBI especializado con 10 estaciones de observación distribuidas por todo el territorio de Estados Unidos. Una instalación de procesamiento central armoniza las señales reproducidas en el tiempo, lo que permite considerar el importante retardo de hasta 20 milisegundos correspondiente al tiempo de viaje de la luz, y combina todos los pares de señales para formar productos de correlación.

La resolución de la técnica VLBI permite a los radioastrónomos observar movimientos relativos de las condensaciones individuales de plasmas de alta energía que están siendo expulsados a velocidades relativistas por núcleos galácticos activos. Dentro de la Galaxia de la Vía Láctea, la VLBI puede medir distancias basadas en paralaje en todo el disco galáctico. Está en marcha un programa de observación intensa para estudiar la estructura espiral de la Galaxia con una precisión sin precedentes. La VLBI es un componente importante en la definición del marco de referencia celestial y del terrenal, y de los tiempos patrón, y tiene importantes aplicaciones en otros ámbitos que van desde el movimiento de las placas tectónicas terrestres hasta el posicionamiento angular de precisión de los vehículos espaciales distantes.

En § 4.4 se trata de la sensibilidad de la VLBI a la interferencia procedente de servicios activos y en § 5.8 se analiza la utilización de ciertas bandas de frecuencias.

#### 7.2.1 La VLBI espacial

La VLBI espacial aumenta la resolución de la técnica VLBI más allá de los límites impuestos por el tamaño de la Tierra, mediante la incorporación de una antena en una órbita alta en torno a la Tierra en la red de antenas de observación. En las siguientes subsecciones se analizan las misiones anteriores, las actuales y las proyectadas para el futuro (§ 7.2.1.1), las características instrumentales únicas de la VLBI espacial (§ 7.2.1.2) y en particular las exigencias técnicas para las frecuencias de comunicación (§ 7.2.1.3).

#### 7.2.1.1 Proyectos de VLBI espacial

En el Cuadro 7.1 se resumen los parámetros fundamentales de los proyectos de VLBI espacial descritos en esta sección. Las frecuencias mencionadas en el cuadro y la posterior exposición se refieren a las emisiones radioeléctricas recibidas de fuentes radioeléctricas cósmicas naturales.

#### CUADRO 7.1

Misiones de VLBI espacial

Misión / Experimento	Fechas	Parámetros orbitales	Diámetro de la antena	Bandas de observación [GHz]
Experimento TDRSS VLBI	1986 - 1988	Geosíncrono/ 38 000 km	4,9 m	2,271-2,285 15,35-15,43
VSOP / HALCA	1997 - 2003	Apogeo: 21 400 km Perigeo: 560 km Inclinación: 31°	8 m	1,60 - 1,73 4,7 - 5,0 22,0 - 22,3
Radioastron	2011 -	Apogeo: 280 000 – 353 000 km Perigeo: 7 100 – 81 500 km Inclinación: 5° – 85°	10 m	0,316 - 0,332 1,652 - 1,684 4,812 - 4,852 22,212 - 22,252
Millimetron	2019	Sol-Tierra punto L <sub>2</sub> , a $1,5 \times 10^6$ km de la Tierra	10 m	18-26, 31-45, 84-116, 211- 275, 602-720, 787-950
Larga red de antenas espaciales VLBI de longitud de onda milimétrica	2020	Apogeo: 60 000 km Perigeo: 1 200 km Inclinación: 28,5°	Antenas duales de 10 m	6 - 9 20 - 24 40 - 46

La viabilidad de la VLBI espacial logró demostrarse por primera vez en 1986 utilizando una antena de 4,9 m en un satélite del sistema TDRSS (*tracking and data-relay satellite system*, sistema de satélites de seguimiento y retransmisión de datos) de la NASA [Levy *et al.*, 1989]. El experimento inicial se realizó a 2,3 GHz. En 1988 se llevaron a cabo experimentos adicionales a 15 GHz con el mismo sistema de satélites.

Las primeras observaciones científicas con una antena en órbita y VLBI se llevaron a cabo en una misión del VSOP de Japón, es decir, del Programa de Observatorio Espacial VLBI [Hirabayashi et al., 1998], entre 1997 y 2003. El satélite HALCA se lanzó en 1996 en el marco de esa misión bajo los auspicios del Instituto del Espacio y la Ciencia Astronáutica (ISAS, actualmente parte de JAXA). El satélite HALCA iba equipado de una antena de 8 m y recorría una órbita excéntrica con un apogeo de 214 000 km y un periodo orbital de 6,3 h. Las bandas de frecuencia de funcionamiento estaban situadas en 1,6,5 y 22 GHz, pero esta última no se utilizó para efectuar observaciones rutinarias debido a la degradación de su calidad de funcionamiento. Las anchuras de banda mínimas sintetizadas fueron de 1,8 y 0,6 milisegundos de arco a 1,6 y 5 GHz, respectivamente. Se digitalizó una anchura de banda de señal total de 32 MHz y se transmitió a tierra mediante un enlace a 128 Mbit/s a 14,2 GHz. ISAS, la NASA y el NRAO proporcionaron una red dedicada de estaciones de telemedida desde tierra. Una amplia red de radiotelescopios situados en tierra participaron en las observaciones VSOP, coordinados por un consorcio internacional de amplitud mundial. La URSI ha establecido un grupo de trabajo sobre la VLBI a nivel mundial para tratar de la coordinación de las redes de antenas en tierra y abordar los problemas de compatibilidad para la adquisición y transferencia de datos. Los principales objetivos científicos del VSOP guardan relación con los núcleos galácticos activos, las regiones máser OH, los púlsares y las estrellas fulgurantes.

La misión rusa Radioastron está llevando a cabo actualmente VLBI espacial. La nave espacial Radioastron, con una antena de 10 m, fue desarrollada por el Centro Astroespacial del Instituto de Física Lebedev de la Academia Rusa de Ciencias y la Asociación Científica y de Producción Lavochkin. Fue lanzado en 2011 en una órbita altamente excéntrica cuyo apogeo máximo de 353 000 km alcanza prácticamente la distancia a la Luna. Se explotan las perturbaciones orbitales inducidas deliberadamente en la Luna para que provoquen cambios rápidos en los parámetros orbitales y pueda conseguirse una buena cobertura de la apertura en una rápida sucesión de direcciones en el cielo. Radioastron es la primera misión VLBI espacial en llevar a bordo un patrón de frecuencia de máser de hidrógeno. Funciona en las bandas de frecuencias a 0,32, 1,66, 4,8 y 22 GHz. La anchura de banda total de la señal de 32 MHz se digitaliza y se transfiere al suelo mediante un

enlace de 128 Mbit/s a 15 GHz. Hay varios radiotelescopios importantes en todo el mundo que se han incorporado a una red VLBI asociada con base en tierra. La misión Radioastron planteó recientemente propuestas sobre campos científicos clave, entre ellas, los núcleos galácticos activos, los agujeros negros supermasivos, los flujos relativistas, los máseres galácticos y extragalácticos, y los púlsares.

Millimetron es una propuesta del Centro Astroespacial del Instituto Físico Lebedev de la Academia de Ciencias de Rusia para un lanzamiento previsto en 2019. Transportaría una antena de 10 m y operaría en el punto de Lagrange Sol-Tierra L<sub>2</sub>, en bandas de observación entre 18 y 950 GHz. Entre los aspectos únicos de Millimetron no incorporados a misiones de VLBI espacial previas se encuentran una superficie de antena enfriada criogénicamente y el almacenamiento a bordo de los datos observados. Entre los objetivos científicos figuran la formación de estrellas y sistemas planetarios, las etapas relativistas de la evolución estelar, los agujeros negros supermasivos y la evolución galáctica y cosmológica. Este proyecto también contempla un asunto relativo a una parábola única importante, pero que no es objeto de esta exposición.

La red larga de antenas de VLBI espacial de longitud de onda milimétrica es la primera etapa de la red de VLBI espacial milimétrica aprobada para un estudio preliminar por el Comité del Proyecto de Ciencia Espacial de la Academia China de Ciencias, que prevé efectuar un lanzamiento en 2020. Cada uno de sus dos vehículos espaciales transportará una antena de 10 m en órbitas con un apogeo de 60 000 km en planos a un ángulo de 120° y efectuará observaciones en las bandas de 8, 22 y 43 GHz. El vehículo espacial llevará a bordo patrones de frecuencia de máser de hidrógeno y almacenamiento de datos. Un enlace de datos situado en tierra soportará la transmisión de datos a una velocidad de hasta 2 Gbit/s. Entre los objetivos científicos de la misión se encuentran los agujeros negros supermasivos, los megamáseres en discos de acumulación extragaláctica, los chorros en los núcleos galácticos activos y la evolución de las estrellas masivas.

#### 7.2.1.2 Características definitorias de la VLBI espacial y su reciente evolución

Hay varios aspectos de la técnica VLBI espacial que limitaban las capacidades de las primeras misiones y ahora están dando paso a una tecnología más avanzada. En particular, el máser de hidrógeno a bordo ha estado funcionando con éxito en la misión Radioastron y está proyectado para futuras misiones de Rusia y China. El sistema de transferencia de fase de ida y vuelta utilizado por el VSOP sigue siendo operativo, no obstante, y es posible que continúe utilizándose como reserva en el futuro.

Las restricciones impuestas a la determinación de la órbita de las primeras misiones también pueden suavizarse sustancialmente debido al aumento de los rangos de retardo del interferómetro y a la velocidad adicional soportados por los modernos correladores de software.

La capacidad de almacenar a bordo los datos observados para su posterior transmisión a la Tierra puede suponer una simplificación importante del soporte en tierra de la misión. Aunque el número de estaciones de telemedida necesarias en tierra puede llegar a reducirse a 1 en este modo tan operacional, se requiere una anchura de banda de transmisión más amplia que sea inversamente proporcional al ciclo de trabajo del enlace descendente. Además, muchos de los objetivos científicos de las misiones de VLBI espacial son estrechamente dependientes de la sensibilidad e imponen requisitos cada vez más estrictos a las anchuras de banda del enlace descendente de los datos.

Un problema que continúa afectando a la formación de imágenes de la VLBI espacial y que sigue aún sin resolver es que la técnica normal de autocalibración normal utilizada en el análisis de los datos VLBI no se ejecuta eficazmente en una red de antenas en la que una estación – la antena espacial – esté aislada geométricamente de todas las demás. Las antenas multiespaciales propuestas para la red de antenas de VLBI espacial de larga longitud de onda milimétrica pueden constituir un primer paso hacia la superación de esta limitación.

#### 7.2.1.3 Necesidades de frecuencias para el funcionamiento de la VLBI espacial

Las consideraciones de compartición de frecuencias asociadas a la VLBI espacial son más complejas que en la VLBI con base en tierra debido a la triple necesidad de enlaces de telemando, señales bidireccionales de transferencia de fase y la transmisión de datos espacio-Tierra de banda ancha. Todos necesitan protección frente a la interferencia perjudicial cuando caen dentro de las bandas de frecuencias utilizadas por otros sistemas de investigación espacial.

Las bandas de frecuencias utilizadas por las actuales misiones de VLBI espacial se encuentran dentro de las bandas de investigación espacial a 7,190-7,235 GHz (Tierra-espacio), 8,025-8,500 GHz (espacio-Tierra), 14-15,35 GHz (espacio-Tierra) y 14,5-15,35 GHz (Tierra-espacio). Las necesidades de anchura de banda de estas misiones pueden acomodarse dentro de estas atribuciones. No obstante, es probable que las futuras misiones exijan bandas con una anchura de varios GHz para los enlaces descendentes, y atribuciones de frecuencias por encima de 20 GHz. Las frecuencias para los enlaces descendentes de datos de banda ancha aún no se han seleccionado para las dos futuras misiones de VLBI espacial descritas al final de § 7.2.1.1. Hay otras atribuciones disponibles en las bandas 37-38 GHz (espacio-Tierra), 40-40,5 GHz (Tierra-espacio) y 74-84 GHz (espacio-Tierra).

Aunque ya no sea indispensable, un proceso de transferencia de fase de respaldo exigirá la planificación anticipada de enlaces adecuados. Los efectos de la propagación ionosférica y troposférica requieren frecuencias entre 7 GHz y 20 GHz. Las frecuencias de los enlaces ascendente y descendente deben estar lo más cerca posible, pero como no suelen ser idénticas es necesario establecer un modelo de atmósfera para compensar el efecto de los cambios en la longitud del trayecto.

En la Recomendación UIT-R SA.609 se enumeran los criterios de protección para los enlaces de telecomunicación de satélites de investigación cerca de la Tierra, tripulados o no. Son también apropiados para los enlaces de telemedida y temporización de los sistemas de VLBI espacial planeados. Los umbrales de interferencia perjudicial recomendados, que no han de sobrepasarse más del 0,1% del tiempo, son de -216 dB(W/Hz) en el receptor de la estación en Tierra y de -177 dB(W/Hz) en el receptor de satélite. Las bandas de frecuencia que han de utilizarse en los enlaces de comunicación de los proyectos de VLBI espacial planeados están atribuidas a numerosos servicios de radiocomunicación. Sin embargo, el examen de los niveles de posible interferencia en función de la posición orbital de los satélites muestra que es posible la compartición efectiva. En algunos casos se puede necesitar una cuidadosa coordinación.

#### 7.2.2 Aplicaciones geodésicas de la VLBI

La VLBI es una herramienta indispensable para la medición y vigilancia de la Tierra. En una red de antenas con distintos emplazamientos por todo el mundo y un sistema de fuentes radioeléctricas con posiciones determinadas con precisión, es posible determinar las distancias entre pares de antenas con una precisión de unos milímetros. La VLBI es la única técnica geodésica capaz de proporcionar un conjunto completo de parámetros de orientación de la Tierra (EOP, *Earth Orientation Parameters*: longitud del día y orientación del polo) que colocan a la Tierra con respecto al marco de referencia celestial (CRF, *Celestial Reference Frame*), descrito por un catálogo de quásares. Midiendo los EOP, la VLBI proporciona una orientación y escala absolutas para el marco de referencia terrenal (TRF, *Terrestrial Reference Frame*). Los EOP son indispensables para la navegación de los vehículos espaciales, pero cambian en escalas temporales breves y no son previsibles, de modo que exigen su medición periódica. Por ejemplo, la calibración de los datos de los satélites GPS no sería posible sin la VLBI. El Servicio VLBI Internacional (IVS) para la Geodesia y la Astrometría (Schuh and Behrend 2012) es el responsable de la misión del mantenimiento del CRF y de proporcionar mediciones periódicas de los EOP.

En los últimos años se ha formulado un plan para modernizar la red de telescopios que contribuyen al IVS a fin de alcanzar ciertos objetivos problemáticos, entre ellos, la precisión de 1 mm en posición y de 0,1 mm/y en velocidad [Petrachenko *et al.*, 2013]. Esta iniciativa, denominada Sistema de Observación Global VLBI2010 (VGOS) exige nuevos y pequeños telescopios de rápido movimiento y sistemas receptores de banda ancha. Ya se han construido algunos telescopios de nueva planta (por ejemplo, la red de antenas AuScope VLBI, Lovell *et al.*, 2013), mientras que otros se están construyendo o se han proyectado. Se exige que los receptores de banda ancha proporcionen la cobertura en frecuencia y la sensibilidad necesaria para alcanzar los objetivos del VGOS. Los observatorios grabarán cuatro bandas de polarización dual con una separación entre ellas de 1 GHz separadas entre 2 y 14 GHz.

#### 7.3 Radioastronomía desde el punto de Lagrange Sol-Tierra, L<sub>2</sub>

Existen cinco puntos especiales de libración (de Lagrange) en el campo gravitatorio del sistema Sol-Tierra, alrededor de los cuales se pueden establecer órbitas estables (halos) para los vehículos espaciales. Son posiciones útiles para establecer laboratorios permanentes en el espacio. Los puntos  $L_1$  y  $L_2$  están situados a lo largo de la línea Sol-Tierra, a distancias aproximadas de  $1,5 \times 10^6$  km a cada lado de la Tierra (véase la Fig. 7.1). El punto  $L_2$  está más alejado del Sol y, en este emplazamiento, el Sol, la Tierra y la Luna tienen

líneas de visibilidad directa separadas unos pocos grados entre sí. El diámetro de la órbita OSG alrededor de la Tierra subtiende un ángulo de 3,1° aproximadamente desde el punto L<sub>2</sub>, de forma que una antena con lóbulos laterales posteriores reducidos que apunte desde la Tierra puede quedar bien protegida contra la mayoría de los transmisores que se encuentren en las proximidades de la Tierra. Esta consideración y otras ventajas, tales como las de las condiciones favorables en el espacio para el mantenimiento de temperaturas físicas reducidas de la antena y del equipo receptor, han dado lugar a propuestas para situar una serie de misiones astronómicas en órbita alrededor del punto L<sub>2</sub>. Los datos preliminares de algunas de éstas se enumeran en el Cuadro 7.2. La protección del entorno electromagnético en las proximidades del punto L<sub>2</sub> es objeto de la Recomendación UIT-R RA.1417 que postula la protección de un volumen de espacio de 250 000 km de radio centrado en el punto L<sub>2</sub>, como zona de coordinación de emisión electromagnética reducida.

#### FIGURA 7.1





#### – 106 –

#### CUADRO 7.2

Misión/operador apertura	Tipo de misión modo de observación	Fechas de operación	Bandas de frecuencias de la observación (GHz)
MAP/NASA 1,4 m × 1,6 m	Formación de imágenes del continuum de la radiación cósmica del fondo de microondas con parábola única Continuum	2001-2009	18-96
PLANCK/ESA 1,5 m × 1,9 m	Formación de imágenes del continuum de la radiación cósmica del fondo de microondas con parábola única Continuum	2009-2012	$\begin{array}{c} 30 \pm 3 \\ 44 \pm 4,4 \\ 70 \pm 7 \\ 100 \pm 10 \\ 150 \pm 28 \\ 217 \pm 40 \\ 353 \pm 65,5 \\ 545 \pm 101 \\ 857 \pm 158,5 \end{array}$
Herschel/ESA 3,5 m	Radioastronomía de parábola única Raya espectral y continuum	2009 -2013	490-642 640-802 800-962 960-1 122 1 120-1 250 1 600-1 800 2 400-2 600
Millimetron/ ROSKOSMOS 12 m	Radioastronomía de parábola única e interferometría espacial de línea de base muy larga (sVLBI) Línea espectral y continuum	2015-2030	18-4 800
SPICA/JAXA 3,5 m	Radioastronomía de parábola única/línea espectral y continuum	2018	1 500-10 000

## Misiones de radioastronomía basadas en el espacio en funcionamiento o proyectadas para su operación cerca del punto de Lagrange Sol-Tierra, L<sub>2</sub>

#### 7.4 Radioastronomía desde la zona oculta de la Luna

El espectro electromagnético está ahora tan fuertemente utilizado en la Tierra que ha perdido gran parte de su valor para las investigaciones de radioastronomía. Ello no se debe sólo al aumento general de las radiocomunicaciones, en particular de las efectuadas con satélites de la Tierra, sino también al hecho de que en la radioastronomía se necesitan observaciones en nuevas frecuencias de rayas espectrales que no tienen protección en el RR, existiendo pocas esperanzas de que obtengan esa protección en el futuro.

La cara lejana de la Luna es tal vez el único emplazamiento accesible que queda en el que pueden efectuarse observaciones radioastronómicas en todo el espectro radioeléctrico sin interferencia. Sin embargo, las sondas en el espacio lejano, los satélites lunares, los conjuntos de instrumentos científicos y las estaciones de investigación en la superficie lunar tienen todavía la posibilidad de interferir en las observaciones y se les deben atribuir con cuidado las frecuencias, para evitar la interferencia a la radioastronomía en la zona oculta.

#### 7.4.1 La zona oculta de la Luna

La Luna tiene un periodo de rotación alrededor de su eje igual a su periodo de revolución alrededor de la Tierra, lo que significa que siempre mira la misma cara a la Tierra. Teniendo en cuenta que la órbita alrededor de la Tierra es ligeramente elíptica e inclinada, más de la mitad de la superficie de la Luna es visible para los observadores situados en la Tierra. La parte oculta de la superficie lunar está siempre protegida frente a las señales interferentes producidas en la Tierra o cerca de ella, véase la Fig. 7.2. La zona oculta de la superficie es aquélla situada a más de 23,2° más allá del limbo medio de la Luna, tal como se ve desde el centro de la Tierra. El número **22.22.1** del RR, define la zona oculta de la Luna como la superficie oculta junto con un volumen espacial adyacente que está protegido frente a la interferencia originada dentro de una distancia de 100 000 km a partir del centro de la Tierra.

#### FIGURA 7.2

#### Diagrama simplificado de la zona oculta de la Luna



#### 7.4.2 Gamas espectrales preferidas para las observaciones desde la Luna

Las observaciones radioastronómicas en frecuencias bajas pueden proporcionar importantes datos sobre la actividad solar, los rayos cósmicos y los campos magnéticos de nuestra Galaxia y sobre los espectros de baja frecuencia de fuentes radioeléctricas galácticas y extragalácticas discretas. Sin embargo, es muy difícil efectuar esas observaciones en la Tierra por debajo de unos 30 MHz, debido a la opacidad y las heterogeneidades de la ionosfera. Las observaciones por debajo de 20 MHz sólo son factibles en condiciones excepcionales, en emplazamientos especiales y en periodos limitados de tiempo (véase el Capítulo 3). Las interferencias radioeléctricas terrenales, tanto naturales como de origen humano, también afectan a las observaciones radioastronómicas en tales frecuencias. Por debajo de unos 500 kHz, la radiación auroral es la fuente predominante de ruido. Entre 1 y 30 MHz predominan las transmisiones de comunicaciones de largo alcance. De hecho, el espectro situado por debajo de 300 MHz está muy utilizado por los servicios activos. Teniendo en cuenta esas restricciones es importante que la zona oculta de la Luna, que no está afectada por efectos ionosféricos o emisiones artificiales quede reservada a las observaciones radioastronómicas en frecuencias puede reservada a las observaciones radioastronómicas en frecuencias bajas.

En frecuencias superiores, hasta unos 20 GHz, la radioastronomía en la Tierra está muy limitada por las emisiones de origen humano. Aunque muchas de las transiciones de rayas espectrales importantes desde el punto de vista astrofísico reciben cierta protección en el RR (véase el Capítulo 3) en general hay poca protección para las frecuencias desplazadas por el efecto Doppler asociadas a galaxias distantes de rojo desplazado. Por otra parte, se detectan todavía importantes transiciones y existen frecuencias que no están protegidas, por ejemplo, las rayas del metanol (CH<sub>3</sub>OH) a 6,7 GHz y 12,2 GHz y del ciclopropenilideno (C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>) a 18,3 GHz. Se ha detectado la raya de 1 420 MHz del hidrógeno atómico neutro en frecuencias desplazadas

por el efecto Doppler tan bajas como la de 323 MHz [Uson *et al.*, 1991], y debería pensarse en proteger la gama espectral completa por debajo de 1420 MHz.

En las frecuencias superiores a 20 GHz, las observaciones radioastronómicas efectuadas desde la superficie terrestre se ven obstaculizadas por la opacidad atmosférica debida a fuertes transiciones del H<sub>2</sub>O y el O<sub>2</sub> (véase el Capítulo 3). Aunque se han efectuado con éxito algunas observaciones en ventanas atmosféricas situadas entre las transiciones, resultan cada vez más difíciles al aumentar la frecuencia. La mayoría de las rayas moleculares están situadas en frecuencias altas y algunas no pueden observarse desde la Tierra. Para la radioastronomía, la ausencia de interferencia en las bandas de frecuencia oscurecidas por la atmósfera de la Tierra sería importante para los observatorios localizados en la zona oculta de la Luna. Aunque también podrían obtenerse con éxito observaciones en tales frecuencias en otros emplazamientos en el espacio.

#### 7.4.3 Reglamentación del uso de la zona oculta de la Luna

Teniendo en cuenta que todo el espectro de frecuencias en la zona oculta de la Luna está exento de radiaciones procedentes de las proximidades de la Tierra, la zona es un emplazamiento único para las observaciones científicas. En un futuro previsible serán posibles experimentos astronómicos y científicos de otro tipo efectuados desde la zona, por lo que es indispensable reglamentar las actividades de los servicios de radiocomunicaciones cuyas instalaciones puedan radiar en la zona. Deben tenerse en cuenta las necesidades de los satélites de la Tierra, las sondas en el espacio lejano y los transmisores que han de planearse para la zona oculta, teniendo en cuenta que es conveniente mantener la zona tan libre como sea posible de interferencia radioeléctrica, dado que por ello es de gran valor para las observaciones pasivas.

Los números **22.22** a **22.25** del RR, reconoce la necesidad de mantener la zona oculta como una superficie de grandes posibilidades para las observaciones de los servicios de radioastronomía y de investigaciones espaciales pasivas, y en consecuencia tan libre como sea posible de transmisiones.

La Recomendación UIT-R RA.479 pide que al planificar el uso del espectro radioeléctrico en la zona oculta de la Luna, tanto nacional como internacionalmente, se tenga en cuenta la necesidad de proporcionar observaciones radioastronómicas. Recomienda además que se conceda atención particular a las bandas de frecuencia en las que son difíciles o imposibles las observaciones desde la superficie terrestre y que el uso del espectro se ajuste a una serie de directrices preliminares. Según esas directrices, en la zona oculta debe estar disponible todo el espectro radioeléctrico para el uso por los servicios pasivos, excepto las bandas de frecuencia actualmente disponibles o atribuidas en el futuro:

- para apoyar las investigaciones espaciales efectuadas por el servicio de investigación espacial (SIE), el servicio de operaciones espaciales (SOE), el servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS) y el SRDS, y
- para las transmisiones de radiocomunicaciones y de investigaciones espaciales dentro de la zona.

Los servicios radioeléctricos espaciales con transmisores que funcionan a distancias superiores a 100 000 km de la Tierra necesitarán coordinar sus actividades con el SRA. La Recomendación final es que se proteja la radioastronomía frente a la interferencia perjudicial cuando funciona en la zona oculta de la Luna a frecuencias consideradas para el uso por estaciones espaciales activas y pasivas en la zona.

Pueden establecerse directrices para elegir las bandas de frecuencia que han de reservarse a la radioastronomía en la zona oculta de la Luna. Las transiciones de HI a 1 420 MHz, CO a 115 GHz y, en menor grado, OH a 1 612 MHz, 1 665 MHz, 1 667 MHz y 1 720 MHz aparecen sobre todo en los estudios de desplazamiento del rojo de galaxias distantes. Así pues, solamente para los estudios de HI y OH, la región espectral situada por debajo de unos 2 GHz debe mantenerse libre de emisiones. Para las observaciones de CO desplazado por el efecto Doppler, las regiones espectrales más importantes que se han de reservar son aquéllas en las que es alta la opacidad de la atmósfera de la Tierra. Conviene reservar bandas de frecuencia para muchas de las transiciones más importantes desde el punto de vista astrofísico, en particular aquellas que actualmente tienen escasa protección. Ello permitiría efectuar observaciones de VLBI incorporando una antena en la zona oculta. Estas frecuencias obtendrían la máxima protección frente a las emisiones no deseadas, en banda o fuera de banda (incluidas aquéllas procedentes de bandas relacionadas con armónicos). En las frecuencias superiores a 15 GHz, las regiones espectrales ocultas desde la Tierra por la atmósfera serían aceptables para los radioastrónomos. Podría reducirse el problema de la futura detección de las rayas espectrales en las bandas sin proteger si los sistemas de radiocomunicaciones y transmisiones de datos en la zona oculta tuvieran la

flexibilidad de frecuencias que les permita cambiar las bandas en el caso de que se efectuara un importante descubrimiento de rayas espectrales en una banda de transmisión.

#### 7.5 Emplazamientos terrenales con baja absorción atmosférica

Los emplazamientos con bajo contenido de vapor de agua atmosférico constituyen los mejores puntos de observación terrenal en las gamas de longitud de onda submilimétricas, es decir, en las frecuencias radioeléctricas por encima de 300 GHz. Para mayor información sobre los parámetros de los emplazamientos, adicionales a los consignados aquí, véase el Capítulo 13 de [Thompson *et al.*, 2001].

#### 7.5.1 La Antártida

La elevada altitud y el frío extremo de la plataforma Antártica dan lugar a una muy baja densidad de la columna de vapor de agua que hacen de aquélla el lugar mejor conocido de la Tierra para las observaciones astronómicas en la gama de frecuencias de 300-15 000 GHz (gama de longitudes de onda de 1-0,02 mm). Una ventaja adicional, correspondiente a las observaciones radioastronómicas en frecuencias bajas, consiste en que los satélites situados exactamente en la órbita OSG están por debajo del horizonte en ese emplazamiento. Ahora bien, la meseta de la Antártida es relativamente inaccesible y en la actualidad está poco desarrollada como emplazamiento de observatorio. Aunque de calidad de observación ligeramente disminuida en comparación con la meseta, el Polo Sur es el mejor emplazamiento de observatorio de alta frecuencia del mundo que es accesible actualmente. En este lugar, los telescopios pueden efectuar observaciones que son muy difíciles o imposibles en otros lugares, porque la atmósfera es transparente en la gama espectral antes señalada durante prácticamente todo el tiempo. La gran estabilidad de la opacidad atmosférica es especialmente ventajosa para las mediciones de aspectos de brillo reducido. Véase, no obstante, que suponiendo que los radiotelescopios pueden abarcar el firmamento hasta un ángulo de elevación de solamente unos 5°, la fracción de la esfera celeste que puede observarse desde el polo es únicamente la mitad de la observable desde emplazamientos de latitud inferior, tales como los de Cerro Chajnantor o Mauna Kea, señalados a continuación.

El telescopio de 10 m del Polo Sur efectúa observaciones a las frecuencias 95 – 350 GHz. También funciona en el Polo Sur el interferómetro DASI de 13 bocinas que efectúa observaciones en la gama de frecuencias 26-36 GHz [Leitch *et al.*, 2002].

#### 7.5.2 Cerro Chajnantor (Chile)

El desierto de Atacama en Chila en la proximidad del emplazamiento del telescopio ALMA a 67°45'11.4"W, -23°01'22" constituye un emplazamiento a 5 000 m de altura donde las condiciones atmosféricas para la radioastronomía son comparables a las del Polo Sur. ALMA es un complejo instrumento que consta de redes de antenas de 50x12m, 12x7 m, y 4x12 m que efectúan observaciones en la gama 30-950 GHz. Muy cerca se encuentran los telescopios de 12 m APEX y ASTE. También se encuentra en la misma zona el emplazamiento de otro instrumento concebido específicamente para medir la radiación cósmica del fondo de microondas, el generador de imágenes de fondo cósmico, que utiliza la misma gama que DASI, 26-36 GHz, pero cubre una gama complementaria de estructura angular [Padin *et al.*, 2001].

#### 7.5.3 Mauna Kea, Hawái

La cumbre del Mauna Kea en Hawái (155°28'18"W, +19°49'36") a una altitud de 4 080 m es el emplazamiento de la red de antenas submilimétricas de 10x6 m (SMA) [Moran, 1998], el CSO de 10 m y el JCMT de 15 m, que funcionan en la gama 180-900 GHz.

#### 7.5.4 Monte Graham, Arizona

En este emplazamiento a una altitud de 3 200 m (109°53'28,5" W, +32°42'05,8") se encuentra el SMT de 10 m que funciona a 200-700 GHz, y el gran telescopio óptico LBT de 2x8 m.

#### 7.6 Observaciones de púlsares y aplicación como patrones de tiempo

Los púlsares radioeléctricos se han trata ampliamente en el Capítulo 2.

Los periodos observados de impulsos van de unos segundos a milisegundos, habiéndose registrado un periodo de sólo 1,55 ms. El impulso principal, y a veces un débil impulso secundario, ocupan sólo una pequeña fracción del ciclo. En general, los ciclos de impulsos son notablemente regulares. Sin embargo, en algunos casos los

periodos sufren cambios repentinos. Además, algunos periodos presentan pequeñas variaciones a intervalos regulares, que indican que la estrella neutrónica forma parte de un sistema binario y está en órbita alrededor

regulares, que indican que la estrella neutrónica forma parte de un sistema binario y está en órbita alrededor de un compañero estelar de masa baja. Las mediciones del tiempo de llegada de los impulsos, que duran varios años, facilitan no sólo las posiciones precisas y los movimientos apropiados correspondientes (esto es, movimientos angulares a través del cielo) de los púlsares, sino también información acerca de la estabilidad a largo plazo de los periodos de los púlsares.

Sólo en el caso de algunos púlsares muy fuertes puede efectuarse la detección de púlsares únicos. Se ha observado entonces que la intensidad de los impulsos puede variar grandemente; se cree que una parte de la variación corresponde al centelleo causado por el medio interestelar por el que pasan los impulsos. En el caso de las radiaciones de los púlsares se utilizan técnicas de promediación de impulsos con tiempos de integración de hasta varias horas para definir un perfil medio de los impulsos. En general, la intensidad de la emisión de púlsares disminuye más rápidamente con el aumento de las frecuencias que la de la mayoría de las demás fuentes radioeléctricas.

#### 7.6.1 Los púlsares como relojes patrón

Se ha observado que en los púlsares con periodos de milisegundos, los periodos son muy estables. La derivada del periodo (variación del periodo con el tiempo) está en la gama de  $10^{-18}$  a  $10^{-20}$ , que es unos cuatro o cinco órdenes de magnitud menor que en otros púlsares. Los púlsares tienen alto interés astrofísico y varios observatorios en todo el mundo están realizando estudios de tales objetos. Se conocen alrededor de 100 púlsares de milisegundo.

Se están realizando observaciones de la temporización a largo plazo con púlsares de milisegundos; muestran que la estabilidad a largo plazo de los periodos de púlsares es al menos comparable a la conseguida actualmente con los patrones atómicos de frecuencias. Ello permite pensar en el empleo de tales púlsares para futuras observaciones exactas del tiempo. Esa opinión se ha visto reforzada por la detección reciente de un púlsar de milisegundos del hemisferio meridional con un brillo de dos órdenes de magnitud mayor que cualquier otro púlsar detectado de milisegundos. Su intensidad permite separar varios impulsos. Están en curso investigaciones para estudiar el uso de tales púlsares en el establecimiento de una futura escala de precisión del tiempo.

Antes de que los púlsares de milisegundos puedan utilizarse en la futura observación del tiempo (véase, por ejemplo, la Cuestión UIT-R 205/7, Informe UIT-R RA.2099) habrán de adoptarse varias decisiones. Estas se refieren a aspectos de observación tales como las bandas de frecuencia preferidas para las observaciones de púlsares (por ejemplo, se ha propuesto una banda ancha de 1 330-1 427 MHz), los niveles de señales no deseadas que causen interferencia perjudicial y la viabilidad de la compartición de frecuencias de las bandas de observación con otros servicios. Otros aspectos se refieren a la comparación de los datos de tiempo con la escala atómica de tiempo, la definición del tiempo de llegada de los impulsos, la evaluación de la precisión de medición de la temporización, los métodos de detección en presencia de interferencia y el procedimiento que ha de seguirse en la comparación de datos de tiempo a una escala atómica de tiempo.

#### 7.6.2 Los púlsares como objetos de coordenadas de referencia

A principios de este Capítulo se trataba de la aplicación VLBI de la red de astronomía como técnica que ofrece la resolución angular máxima, en particular, una VLBI espacial. Las dimensiones angulares de los púlsares son de sólo  $10^{-7}$  a  $10^{-10}$  s de arco. Se cree que la distribución del brillo de su magnetosfera no puede resolverse. Los propios púlsares pueden considerarse como puntos de coordenadas de referencia en el cielo. Mediante la situación en un momento del año se mide la posición del púlsar en el Marco Dinámico de Referencia con una precisión de 0,5 milisegundos de arco correspondientes a incertidumbres de 1  $\mu$ s en tiempo y 300 m en la órbita terrestre. Una precisión comparable puede lograrse mediante la VLBI intercontinental en la banda S (Kalyazin, Rusia – Kashima, Japón) [Sekido *et al.*, 1998]. Se obtienen datos VLBI de las coordenadas de los púlsares en el ICRF. Ello ofrece la posibilidad de ajustar el sistema de coordenadas del cielo con gran precisión. Las coordenadas de los púlsares obtenidas a partir de los datos VLBI pueden utilizarse como coordenadas independientes cuando se aplica un procedimiento de ajuste para hallar los parámetros del púlsar (período, derivadas temporales del período, coordenadas, movimiento propio y parámetros de Kepler para un sistema binario).

#### 7.7 **Observaciones solares**

Dado que la actividad solar puede afectar al funcionamiento de algunos servicios tales como la distribución de la energía eléctrica, se vigila en todo el mundo en varias regiones del espectro electromagnético. Como ejemplo puede citarse que, desde 1947, el Consejo Nacional de Investigaciones de Canadá ha efectuado mediciones diarias de la emisión radioeléctrica solar en una longitud de onda de 10,7 cm. Este programa, consistente en mediciones precisas de la densidad espectral de flujo de potencia total y del funcionamiento de un observador de las erupciones solares, ha proporcionado el registro cuantitativo más prolongado existente de la actividad solar. La medición, se especifica en unidades de flujo solar (1 sfu  $\equiv 10^{-22}$  Wm<sup>-2</sup>Hz<sup>-1</sup>), se suele denominar  $F_{10.7}$ y se utiliza en todo el mundo como índice primario de la actividad solar, no sólo la utiliza la comunidad de físicos en ciencias solares sino también otras organizaciones cuyas actividades pueden degradarse por efecto de la alta actividad solar y de las tormentas geomagnéticas concomitantes. También la utilizan las agencias espaciales para modelar la densidad de la atmósfera superior de la Tierra en los cálculos de las orbitales satelitales. Teniendo en cuenta que la emisión radioeléctrica solar en longitudes de ondas centimétricas está dominada por una contribución (la componente de variación lenta) producida en concentraciones de plasma apoyadas por campos magnéticos y por electrones térmicos en campos magnéticos, la intensidad de potencia de 10,7 cm guarda una fuerte correlación con el flujo magnético total. También tiene una buena correlación con otras mediciones de la actividad solar y se utiliza ampliamente como aproximación para cantidades tales como el número de manchas solares de Zúrich, la luminosidad solar y la intensidad UV integrada, que son difíciles de medir con la coherencia y la continuidad requeridas. En [Tapping, 2013] figura una exposición pormenorizada de F10.7.

Dada la intensidad de las emisiones solares y teniendo en cuenta que la mayoría de las mediciones de los últimos años se han efectuado en lugares bien apantallados, la interferencia perjudicial procedente de servicios activos no ha planteado problemas. Sin embargo, los usuarios principales de la información vigilada han señalado que cualquier pérdida de datos debida a fallos técnicos o interferencia debe ser inferior al 1% en un año dado.

En 1992 se completó un instrumento de observación del Sol más potente, el radioheliógrafo Nobeyama (Japón), que funciona diariamente en 17 GHz con una resolución angular solar de 10 segundos de arco y una resolución temporal elevada del orden de 20 ms. Se está estudiando un nuevo instrumento más versátil, el Frequency Agile Solar Array (FASR) [Bastian *et al.*, 1998] que tendrá capacidad para crear imágenes del Sol y de su atmósfera con resolución de segundos de arco, en una gama de frecuencias comprendida entre 0,1 y 30 GHz.

# - 112 -

#### REFERENCIAS

- BASTIAN, T. S., GARY, D. E., WHITE, S. M. y HURFORD, G. J. [1998] *Broadband imaging spectroscopy* with a solar-dedicated array. Proc. SPIE, Vol. 3357. Advanced technology MMW, radio, and terahertz telescopes. T. G. Phillips, ed. p. 609-619.
- D'ADDARIO, L. R. [1991] Time synchronization in orbiting VLBI. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-40, p. 584-590.
- HEWISH, A., BELL, S. J., PILKINGTON, J. D. H., SCOTT, P. F. y COLLINS, R. A. [1968] Observations of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, Vol. 217, p. 709-713.
- HIRABAYASHI, H. *et al.* (52 co-autores) [1998] Overview and initial results of the very long baseline interferometry space observatory programme. *Science*, Vol. 281, p. 1825-1829.
- LEITCH, E. M. et al. [2002] Experiment design and first season observations with the degree angular scale interferometer. Astrophys. J., Vol. 568, p. 28-37.
- LEVY, G. S. et al. (31 co-autores) [1989] VLBI using a telescope in Earth orbit. 1. The observations. Astrophys. J., Vol. 336, p. 1098.
- LOVELL, J. E. J., MCCALLUM, J. N., REID, P. B., MCCULLOCH, P. M., BAYNES, B. E., DICKEY, J. M., SHABALA, S. S., WATSON, C. S., TITOV, O., RUDDICK, R., TWILLEY, R., REYNOLDS, C., TINGAY, S. J., SHIELD, P., ADADA, R., ELLINGSEN, S. P., MORGAN, J. S., & BIGNALL, H. E. [2013], «The AuScope geodetic VLBI array», Journal of Geodesy 87 527-538.
- MORAN, J. M. [1998] *The submillimeter array*. Proc. Spie. Vol. 3357. Advanced technology MMW, radio, and terahertz telescopes. T. G. Phillips, ed., p. 208-219.
- PADIN, S. et al. [2001] First intrinsic anisotropy observations with the cosmic background imager. Astrophys. J. Lett., L1-L5.
- PETRACHENKO, WILLIAM, BEHREND, DIRK, HASE, HAYO, MA, CHOPO, NIELL, ARTHUR, SCHUH, HARALD, & WHITNEY, ALAN 2013, «The VLBI2010 Global Observing System (VGOS)» Asamblea General de la EGU celebrada del 7 al 12 de abril en Viena (Austria), id. EGU2013-12867, <u>http://adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA..1512867P</u>
- PRESTON, R. A., BURKE, B. F., DOXSEY, R., JORDAN, J. F., MORGAN, S. H., ROBERTS, D. H. y SHAPIRO, I. I. [1983] *Techniques d'interférométrie à très grande base*. F. Biraud, ed., Cepadues, Toulouse, Francia.
- SEKIDO, M., IMAE, M., HANADO, Yu., HAMA, S., KOYAMA, Y., KONDO, T., NAKAJIMA, J., KAWAI, E., KURIHARA, N., ILYASOV, Yu. P., ORESHKO, V. V. y RODIN, A. E. [1998] Pulsar VLBI experiment with Kashima (Japan) – Kalyazin (Russia) baseline. *New Astronomy Rev.* Vol. 43, p. 599-602.
- SCHUH, H. y BEHREND, D. [2012], «VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry». Journal of Geodynamics, 61, 68-80.
- TAPPING, K.F., «The 10.7cm solar radio flux (F<sub>10.7</sub>)», Space Weather, Volume 11, Issue 7, julio de 2013, páginas 394 a 406.
- THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. and SWENSON, G. W. [2001] *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. 2<sup>a</sup> ed. Wiley, Nueva York (Estados Unidos).
- USON, J. M., BAGRI, D. S. y CORNWELL, T. S. [1991] Radio detection of neutral hydrogen at redshift z = 3.4. *Phys. Rev. (Lett.)*, Vol. 67, p. 3328-3331.

## CAPÍTULO 8

### Reducción de la interferencia

En este Capítulo se abordan los problemas que plantea la reducción de interferencia de radiofrecuencia (RFI) en la radioastronomía. En el Informe UIT-R RA.2126 – Técnicas para reducir la interferencia de radiofrecuencia en el servicio de radioastronomía, se proporciona una amplia descripción y extensas referencias sobre esta cuestión.

#### 8.1 Introducción - Objetivos

La reducción de la interferencia en radioastronomía tiene por objeto disminuir o suprimir la repercusión de las señales procedentes de los servicios activos que surgen en las bandas de radioastronomía o fuera de ellas. La interferencia (casi) siempre provoca la pérdida de datos y de su calidad, lo que plantea un problema reglamentario si ocurre dentro de una banda atribuida al SRA, aunque no puede haber recurso a medidas reglamentarias por la pérdida de datos en las bandas no atribuidas al SRA. No hay duda de que la pérdida de datos se evitaría más acertadamente con la adopción de medidas reglamentarias que pudieran impedir la presencia de las señales de interferencia; la prevención es mucho mejor que la reducción. Los métodos de reducción, entre los que se encuentran los métodos anticipados para modificar el entorno de RFI local por medio de reglamentación, los métodos de predetección y posdetección, los diversos métodos de precorrelación y los métodos aplicados en la correlación y poscorrelación, pueden introducirse en diversos puntos del sistema de adquisición de datos. No obstante, cuanto antes se aborde un problema en la cadena de procesamiento, tanto mejor. La intervención temprana se traduce en una menor pérdida de datos, menos costes derivados y menos complejidad del sistema. La reducción de la interferencia es más fácil de conseguir cuando existe una relación interferencia/ruido (INR) significativa. Una RFI débil es más fácil de tratar en las últimas fases de la cadena de procesamiento, tras la integración de los datos, para que aumente la relación señal/ruido (SNR).

Por motivos de índole científica y de modernidad, los actuales sistemas del SRA funcionan con anchuras de banda cada vez mayores y con sensibilidades del sistema en aumento. Por este motivo, las observaciones suelen cubrir bandas atribuidas a servicios activos en los que el SRA no tiene protección. Por este motivo, es necesario disponer de técnicas de reducción de la RFI para obtener buenos datos astronómicos en las bandas no atribuidas.

Un importante problema que afecta al SRA por su funcionamiento en anchuras de banda cada vez mayores es el de la introducción de dispositivos de espectro ensanchado de banda ancha y baja potencia que funcionan sin licencia y se fabrican en serie. Es necesario disponer de soluciones creativas de reducción de la interferencia que permitan optimizar las operaciones del SRA. Otro problema para las operaciones radioastronómicas fuera de banda es el acceso dinámico al espectro (DSA) que permite a los sistemas funcionar en espectro vacío (espacios en blanco). Cabe esperar que los dispositivos de radiocomunicaciones inteligentes llenen cada vez más el espectro con una nueva forma de compartición del mismo. Es evidente que el funcionamiento en banda ancha del SRA depende del mismo principio de DSA que los nuevos dispositivos de radiocomunicaciones inteligentes que están apareciendo en el mercado.

#### 8.2 Signatura de las fuentes de RFI y repercusión de éstas

La repercusión actual de la interferencia sobre los datos obtenidos por los telescopios radioastronómicos depende de varios factores, el primero de los cuales es el tipo de radiotelescopio utilizado. Los telescopios de parábola única son los más vulnerables, ya que tienen poca discriminación direccional frente a la RFI entrante, lo que se traduce en que las señales astronómicas y las de la RFI se añaden coherentemente. Esto contrasta con la sensibilidad a la RFI de los telescopios incorporados a redes de antenas conectadas para la interferometría, donde la RFI entra parcialmente en el sistema de forma incoherente. En estas configuraciones, las líneas de base ampliadas sirven como filtro espacial que discriminan la RFI. Cada sistema interferométrico que utiliza técnicas de «supresión de flecos» tiene una capacidad de rechazo de la RFI dependiente de la línea de base, tanto más cuanto mayor sea ésta. Sin embargo, la calibración de cada estación de una red sigue estando afectada por la RFI local.

El segundo factor depende del tipo de observación realizada. Mientras que las mediciones del continuum pueden sacrificar ciertos intervalos de tiempo o bandas de frecuencias en el diagrama tiempo-frecuencia de una observación, la observación de una raya espectral se daña cuando la frecuencia y anchura de la RFI afecta directamente a la señal astronómica.

En tercer lugar, la repercusión de los datos depende del tipo de RFI. Hay que dilucidar si la RFI es variable en el tiempo (impulsiva), de banda estrecha o de banda ancha, y si existe una superposición de los diagramas de RFI. Las transmisiones directas (e indirectas) de redes terrenales que guardan relación con la densidad de población y el grado de bienestar económico de la comunidad local, ofrecen una señal de fondo persistente. Los satélites y los servicios aeronáuticos pueden generar componentes de RFI tanto transitorias como estacionarias. El emplazamiento de un observatorio próximo a los pasillos de tránsito aéreo puede dar lugar a la recepción de sus emisiones directas y a los reflejos de las señales terrenales, tales como las de los radares de los aeropuertos. La mayor parte de la RFI resulta del acoplamiento de los lóbulos laterales con servicios activos, aunque se puede producir un acoplamiento de lóbulo principal destructivo provocado por los satélites y los servicios, como puede ocurrir por ejemplo con el satélite Cloudsat a 94 GHz. Además de la RFI externa, hay que tener en cuenta la posibilidad de una RFI gratuita generada en el propio observatorio por los equipos informáticos y la electrónica existente en los emplazamientos: estas fuentes pueden identificarse y deben apantallarse adecuadamente.

En cuarto lugar, la variabilidad temporal de la RFI puede repercutir especialmente en las observaciones astronómicas críticas en el tiempo. La RFI variable, no repetitiva, que se presenta durante el estudio de transitorios y púlsares puede destruir observaciones críticas que son únicas e imposibles de repetir. También puede afectar a la secuenciación de los impulsos en el tiempo, así como a la calibración de datos crítica en el tiempo.

Por último, el entorno de la RFI ha cambiado con rapidez en los últimos años, con la introducción de nuevas aplicaciones de servicios y la desaparición de otras. La introducción de aplicaciones de banda ancha y espectro ensanchado para la radiodifusión y la comunicación, así como los dispositivos sin licencia que han hecho desaparecer las señales con crestas de alta potencia de otros tiempos sustituyéndolas por señales más amplias de baja potencia, generan señales que no son fáciles de suprimir de los datos del SRA. La intensificación de la utilización del espectro y del acceso dinámico al espectro modificará aún más el carácter del entorno de la RFI y exigirá cada vez más que la comunidad radioastronómica adapte sus planteamientos para reducir la repercusión de la RFI sobre sus datos.

#### 8.3 Metodologías de reducción de la RFI – capas de reducción

En las distintas etapas del proceso de adquisición de datos pueden utilizarse varios métodos de reducción de la RFI. El primer y más potente método consiste en controlar las señales RFI entrantes antes de que alcancen el receptor, modificando el entorno de la RFI local y regional. Como segunda capa, pueden aplicarse métodos de predetección en el propio sistema receptor, posiblemente en conexión con el servidor de toma de datos. Puede utilizarse una tercera capa consistente en la aplicación de métodos de escisión digital y supresión de la RFI antes de la correlación. Con la llegada de la correlación de software (SW), también pueden incorporarse estos métodos digitales al proceso de correlación. Una cuarta capa posible invocaría la aplicación de métodos digitales tras la correlación y tras la integración de los datos o el almacenamiento de los datos en memoria tampón. Por último, la quinta capa de reducción consiste en la manipulación (escisión y señalización) de los datos astronómicos recopilados para eliminar los efectos de las fuentes de RFI tanto conocidas como desconocidas.

La calidad de funcionamiento de todos estos métodos depende de la relación INR, es decir, de la intensidad relativa de la RFI o de la relación entre la varianza del ruido del sistema y la varianza de la RFI. La mayoría de los métodos sólo son eficaces cuando la RFI es claramente detectable entre los datos y sólo pueden suprimirse sus efectos hasta el nivel de ruido instantáneo. Un factor de calidad de estos métodos es la ganancia de procesamiento tras la supresión o reducción de la RFI dada por la relación entre la SNR (posterior) y la SNR (previa).

La calidad de funcionamiento de cualquiera de los métodos depende del nivel de supresión requerido, ya que cada capa de mitigación tiene sus propias limitaciones. La relación entre la anchura de banda ocupada por una señal astronómica y la de la RFI, representa aquí un importante papel. Es importante considerar la pérdida de la señal de interés (SOI) mientras se evalúan los resultados de la reducción, ya que esto varía con cada método.

Es evidente que la combinación de varios métodos tiene un efecto acumulativo, ya que cada capa de reducción funciona sobre el remanente de cualquier señal RFI tras la etapa de procesamiento anterior. Además, cada método aplicado puede introducir una medida de toxicidad, es decir, el daño infligido a los datos que se añade a la degradación incremental de la calidad de los datos. El daño total infligido a los datos, como medida de la pérdida de los datos resultantes del proceso de reducción (subsiguiente) se cuantifica mediante la relación entre la SNR (tras el procesamiento) y la SNR (en ausencia de RFI).

#### 8.4 Métodos anticipativos – modificación del entorno de la RFI

La coordinación con los usuarios activos y el recurso a la reglamentación nacional e internacional puede reducir la presencia de RFI en una estación radioastronómica, así como su repercusión sobre las observaciones. La mejora y fortalecimiento del marco reglamentario a nivel nacional, regional e internacional desempeña un importante papel en la protección de la utilización pasiva del espectro: se enumeran recursos en apoyo de este planteamiento en el presente Manual, en las Recomendaciones UIT-R, especialmente en la serie dedicada a la radioastronomía (RA), en la serie RA de Informes UIT-R y en el Manual del CRAF. Pueden utilizarse zonas de coordinación y zonas de silencio radioeléctrico para modificar el entorno RFI que generarían las fuentes terrenales de interferencia en el emplazamiento del telescopio. En muchos observatorios existen reglamentos locales y nacionales que impiden la instalación de transmisores en la inmediata proximidad (a menos de 2-6 km) de un observatorio. La coordinación a gran escala y las zonas de silencio se han implementado en algunos emplazamientos tales como la Zona de Silencio Radioeléctrico Nacional alrededor de Green Bank, West Virginia en EE.UU., la Zona de Coordinación de Puerto Rico en torno al observatorio de Arecibo, y la zona de coordinación establecida alrededor del observatorio de ALMA en el desierto de Atacama (Chile). Los entornos para nuevos telescopios tales como los dos emplazamientos previstos para la Red de Antenas de 1 km<sup>2</sup>, están siendo objeto de reglamentación con una previsora legislación nacional gracias a la cual podrán llevarse a cabo observaciones de la mayor sensibilidad en estos emplazamientos.

Dado que es mejor resolver los problemas potenciales de la RFI antes de su implementación, resulta importante identificar los transmisores tanto existentes como en proyecto que puedan afectar a las porciones del espectro radioeléctrico de interés para los observatorios, informándose de las modificaciones en los regímenes de licencias locales y reconociendo las tendencias en la utilización del espectro. La comprobación técnica del espectro también es una herramienta para determinar el porcentaje de pérdida de datos debido a la interferencia en las bandas pasivas.

La experiencia demuestra que los propios observatorios suelen ser fuentes importantes de RFI. El hardware de los equipos informáticos y las instalaciones electrónicas de los edificios pueden generar emisiones de armónicos y de banda ancha que penetren en el sistema de detección del telescopio. La detección y eliminación de estas fuentes constituyen una alta prioridad para cada observatorio. Los equipos electrónicos e informáticos pueden instalarse en armarios impermeables a la RFI y jaulas de Faraday. Análogamente, la reducción de la actividad humana (salas de control remoto) y las restricciones sobre la utilización local de ordenadores, contribuye a que un observatorio esté en «silencio radioeléctrico». Esta lista de cometidos forma parte de los preparativos necesarios para que un observatorio pueda llevar a cabo las observaciones más sensibles.

#### 8.5 Predetección y posdetección

Un método normal para eliminar la RFI del dominio de la frecuencia es instalar en el receptor un filtro pasobanda, pasoalto o pasobajo aunque provoque unas pérdidas de inserción y aumente sustancialmente la temperatura del sistema a frecuencias próximas al borde de la banda. La tecnología de filtros superconductores puede reducir significativamente la repercusión de estos filtros. El filtrado de las bandas SRA sirve para evitar los daños provocados por las intensas señales fuera de esas bandas. El filtrado también provoca pérdida de datos para las observaciones del continuum, aunque suele ser indispensable para poder llevar a cabo observaciones de rayas espectrales cuando se presenta la RFI a una frecuencia crítica de la banda de paso del receptor.

El proceso de blanqueo o supresión de la toma de datos, tal como detener la acumulación de datos en el correlador, puede utilizarse para conseguir la escisión en el dominio temporal. Este método se ha utilizado con éxito en señales impulsivas y periódicas. El observatorio de Arecibo implementó un sistema de blanqueo de radar de aeropuerto que detiene el procesamiento del correlador en sincronía con el período de los impulsos de radar durante una ventana de tiempo ajustada para abarcar los consiguientes artefactos del radar procedentes

del terreno y la dispersión multitrayecto. Los datos perdidos se cuentan como pérdida de tiempo de observación cuando se presenta esta variedad de RFI en una banda asignada al SRA.

Se ha dedicado una gran cantidad de investigación al diseño de receptores robustos con un elevado grado de linealidad, de modo que no se vean afectados por entornos con una gran RFI. Se puede efectuar observaciones de banda ancha cuando los sistemas receptores sean lo suficientemente lineales como para que no se produzca solapamiento ni se generen productos de intermodulación ni se sobrecarguen.

#### 8.6 Precorrelación

#### 8.6.1 Procesamiento digital en la antena

El procesamiento digital en tiempo real puede implementarse como parte del procesamiento en FI de los radiotelescopios (RT) de parábola única, como parte del procesamiento de la estación y/o el proceso de formación de lóbulos para los instrumentos de la red de antenas. Este rentable método funciona muy bien para la RFI impulsiva (transitoria) y exige un rápido muestreo de datos, así como la disponibilidad de ciclos de computación en cada una de las estaciones. La magnitud de la pérdida de datos se determina por la naturaleza transitoria de la RFI. La señalización y la escisión basada en FI en tiempo real minimiza la pérdida de datos provocada por el método de señalización-escisión al tratar únicamente los segmentos de tiempo y frecuencia infectados por la RFI, lo que no debe infligir daños colaterales a los intervalos vecinos de tiempo y frecuencia. Esto es distinto del proceso de poscorrelación, que es más vigoroso, ya que las muestras de datos integrados se utilizan para la señalización y escisión de la línea de base y la antena.

Se pueden aplicar umbrales en el dominio temporal y de la frecuencia cuando la RFI de los datos muestreados sea fuerte e identificable y la ocupación espectral de la RFI sea relativamente baja. Los umbrales se utilizaron originalmente para suprimir la RFI en el telescopio Ratan 600 y se han utilizado muchas más veces desde entonces. Una reciente aplicación realizada con éxito fue la del radiotelescopio de síntesis de Westerbork (WSRT), donde los datos de polarización dual a 20 MHz procedentes de cada uno de los catorce telescopios se procesaron en tiempo real. Este método de fijación de umbrales también se ha aplicado a los datos de los púlsares antes del pliegue por periodos.

En los métodos de filtrado subespacial se investiga una firma determinada en la componente de potencia de los datos de la RFI a fin de identificarla y suprimirla. Una aplicación particularmente útil es la búsqueda de características cicloestacionarias en los datos, que funciona muy bien para señales RFI moduladas digitalmente.

Otra forma de escisión subespacial explota el análisis de distribución de probabilidad de las señales. Dado que la contribución de la RFI modifica el espectro de potencia que pasa a tener una distribución no central (ji cuadrado) determinada por sus momentos más intensos, pueden suprimirse de los datos. Un enfoque similar es utilizar la curtosis (cuarto momento del espectro de potencia) para identificar la componente de RFI y suprimirla. Esto se ha utilizado en observaciones solares de parábola única y en el procesamiento de (post) correlación en un entorno de correlación de software. La utilización de filtros de mediana y el aprovechamiento de las propiedades de la mediana de un sistema multialimentación también explotan las propiedades estadísticas de los datos y son eficaces para la reducción en tiempo real de la RFI de los datos de las rayas espectrales.

Los métodos de reducción por precorrelación que conllevan la supresión de las muestras de datos provocan cambios en la calibración de ganancia de los datos. Esto exige una contabilización precisa para determinar el efecto sobre los datos y la pérdida de datos asociada. La sustitución de los datos afectados en el dominio de la frecuencia (o del tiempo) con una línea de base ajustada sólo afecta al valor cuadrático medio de los canales afectados.

#### 8.6.2 Supresión adaptable (temporal) del ruido

La supresión adaptable del ruido (ANC, *adaptive noise cancellation*) se utiliza frecuentemente en la tecnología de comunicación y la militar. El principio básico del filtrado temporal adaptable es aplicar a los datos de entrada la transformada rápida de Fourier (FFT), efectuar una operación de adaptación de los segmentos de frecuencias y a continuación regresar al dominio de la frecuencia mediante una FFT inversa. Este método, que se apoya en el filtrado de Wiener, funciona para señales interferentes con una INR importante, es decir, cuando la RFI predomina sobre el ruido del sistema. La supresión de la señal interferente puede ser aproximadamente

igual a su INR instantánea. Los filtros adaptables son eficaces cuando la información espectral no es importante, tal como en los estudios de los púlsares y del continuum. Este método también puede utilizarse eficazmente con redes de antenas de varias bocinas o planos focales sobre parábolas únicas (véase la sección siguiente). Una variación del filtrado adaptable consiste en quitar un canal de datos de referencia del canal de datos de la señal utilizando una copia de la propia RFI, por comparación entre las señales de la fuente activa más la RFI y la fuente inactiva más la RFI. En algunos de los sistemas de telescopios existentes, la copia de la RFI se toma de una antena auxiliar de referencia apuntada a su fuente. Sin embargo, cada fuente de RFI distinta requiere su propia antena.

La estimación paramétrica de las señales de RFI conocidas y su sustracción de los datos se ha aplicado con éxito a las transmisiones del satélite Glonass C/A explotando sus conocidas propiedades de modulación: se consiguió una supresión de señal de más de 20 dB sin tener que recurrir a antenas auxiliares. En una implementación reciente de las técnicas de filtrado adaptable se pretende suprimir la firma de las transmisiones L3 de un único satélite GPS en el observatorio de Arecibo.

#### 8.6.3 Filtrado espacial y orientación de nulos

Cada red de múltiples antenas tiene lóbulos laterales y nulos en su diagrama de radiación que pueden utilizarse para reducir las señales procedentes de fuentes de RFI localizadas. En general, un sistema adaptable que utilice un algoritmo de formación de haz requiere una alta INR y se limita a un pequeño número de objetivos de RFI a seguir durante una observación. Es necesario también que las fuentes de la RFI permanezcan estables y previsibles a lo largo de la observación. El filtrado espacial en el modo de formación de haz para un número limitado de fuentes de RFI no degrada, por lo general, la imagen generada por el haz principal.

Las técnicas de antenas inteligentes utilizan varios detectores en los sistemas de radar y comunicaciones y se utilizan para determinar la dirección de llegada y para implementar algoritmos de formación de haz. Análogamente, los telescopios de la nueva generación con múltiples sensores y visión directa de las fuentes de RFI identificadas (tal como la red de antenas de baja frecuencia (LOFAR) y la red de antenas de Murchison Widefield (MWA)) permiten optimizar el proceso de formación del haz para incorporar el filtrado espacial en tiempo real con control de nulos adaptable, de estas diversas fuentes de RFI. En una implementación práctica, se utilizaron cien antenas LOFAR para generar dos haces independientes, colocando un nulo permanente en una posición situada 15° por encima del horizonte. Las redes de antenas controladas por fase con múltiples sensores y bien calibradas ofrecen la posibilidad de orientar un nulo para efectuar un seguimiento de un satélite manteniendo al mismo tiempo un haz de alta ganancia sobre un campo objetivo, aunque la complejidad del procesamiento aumenta rápidamente cuando se trata de un sistema de varios satélites.

Para redes de antenas dispersas con líneas de base relativamente largas, puede efectuarse en primer lugar la correlación para sintetizar los haces posteriormente. Suponiendo que las fuentes de RFI estén localizadas, su supresión se conseguirá por procesamiento de breves intervalos de tiempo del tren de datos y la aplicación de una ponderación compleja durante el procesamiento de la imagen. La simulación por ordenador del filtrado espacial poscorrelación muestra que la limpieza con un haz corregido en cuanto a RFI puede resultar eficaz.

Los sistemas de redes de plano focal (FPA) y los receptores multihaz ofrecen nuevas oportunidades de filtrado espacial, ya que cada uno de los alimentadores componentes tiene una señal espacial independiente junto con la señal RFI común. Además, uno de los alimentadores del sistema multihaz puede utilizarse siempre como antena de referencia.

#### 8.7 En la correlación

Como parte del proceso de correlación, los datos digitalizados suelen integrarse sobre señales de tiempo que oscilan desde el tiempo de muestreo hasta segundos, lo que aumenta la INR de forma importante. Por consiguiente, una RFI persistente, aunque débil, que no pueda tratarse en tiempo real y los remanentes (espectrales) débiles de operaciones previas de reducción, quedan accesibles para su procesamiento. Por otra parte, las crestas significativas de una señal RFI variable pueden reducirse en intensidad gracias a esta integración. Para los instrumentos de la red de antenas, el filtrado espacial resultante del seguimiento (del fleco) del retardo de una fuente celestial también reduce la intensidad de la RFI terrenal en los datos resultantes de la correlación cruzada.

En este punto del proceso de toma de datos, pueden incorporarse protocolos anticoincidencia para identificar los componentes de RFI, así como el procesamiento de reducción digital y la utilización de los datos de la

antena de referencia. La nueva generación de correladores de software hace posible la integración de aplicaciones (con señalización basada en curtosis) antes y después de la correlación FX (Transformada de Fourier antes de multiplicación) y del apilamiento de protocolos. En el radiotelescopio LOFAR se lleva a cabo la reducción a diferentes etapas durante el procesamiento. Para instrumentos de parábola única, el procesamiento de la correlación de (varias) bandas únicas puede incorporar tanto la fijación de umbrales como métodos estadísticos y supresión de ruido con una antena de referencia.

El despliegue del procesamiento digital y la entrada de antenas de referencia durante la correlación de SW es equivalente al procesamiento de precorrelación en banda base bosquejado anteriormente. Por otra parte, su implementación en los servidores de hardware convencional (existentes) exige la adición tanto de hardware como de software especial.

#### 8.8 Poscorrelación – antes o durante la formación de imágenes

El procesamiento de poscorrelación tradicional consiste en la señalización y escisión, que requiere bastante tiempo y suele hacerse a mano. Debido a que esta operación se realiza sobre los datos integrados y correlacionados, la pérdida de datos resultante de la señalización puede resultar bastante importante, tanto más cuando pueden señalizarse intervalos temporales completos, líneas de base completas y/o antenas completas. Esto difiere de la señalización o escisión en FI basada en la antena en la que se señalizan pequeños subconjuntos, lo que se traduce intrínsecamente en una proporción más pequeña de pérdida de datos global.

El procesamiento en línea o fuera de línea de datos correlacionados (integrados) permite incorporar señalización y escisión automatizadas, ya que puede implementarse procesamiento estadístico o subespacial más sofisticado (véase § 8.6.1) para suprimir el componente de RFI sin mucha pérdida de datos asociada.

Tal es así que se ha implementado una antena de referencia en la etapa de poscorrelación para suprimir la señal de una fuente bien definida utilizando las relaciones de clausura disponibles.

Los instrumentos de la red de antenas utilizan técnicas de supresión de flecos y compensación del retardo durante las observaciones para mantener la velocidad de flecos de la posición de observación central a cero durante las observaciones. Gracias a ello, las componentes estacionaria (terrenal) y satelital de los datos se distinguen asimismo al recortar los flecos a mayor velocidad que las fuentes astronómicas, es decir, a la velocidad de supresión de flecos. Este movimiento (relativo) distinto permite la identificación y eliminación fuera de línea de las fuentes de RFI estacionarias tanto de los datos correlacionados como del plano de imagen sin provocar pérdida de datos. Un código que se aplicó en primer lugar al GMRT se acaba de incorporar al AIPS.

#### 8.9 Implementación en los telescopios – estrategia

El proceso de adquisición de datos de los observatorios radioastronómicos está evolucionando para dar respuesta al entorno tecnológico que cambia con rapidez. La conversión de señales analógicas a digitales tiene ahora lugar tan pronto como es posible en el esquema de manipulación de datos, lo que permite el procesamiento digital a lo largo de la mayor parte de la cadena de datos. La mayor capacidad permite el procesamiento de datos de mayor anchura de banda, con una mayor resolución en el tiempo y con mayor resolución en frecuencia (< kHz).

Muchos servidores actuales no permiten la implementación de la reducción en las primeras etapas de la cadena de manipulación de datos sin incurrir en modificaciones de hardware (radicales). Por contra, los servidores de nueva generación y la correlación de software facilitan estos esquemas en las diferentes etapas del procesamiento.

Como cada método de reducción exige un umbral de INR definido para su funcionamiento, la supresión de la mayor parte de la RFI exige la aplicación de métodos por capas para explotar la integración progresiva de los datos y su creciente INR. Cuando no existe ningún método que pueda suprimir la RFI por debajo del umbral de ruido que encuentra, los pasos de reducción posteriores pueden suprimir los restos de la RFI suprimida, así como la RFI débil que sólo se manifiesta tras la integración.

La implementación de antenas auxiliares para los instrumentos en red depende de la posibilidad de incorporar su salida al sistema de procesamiento, (y muy especialmente) en el correlador. Las antenas de referencia dirigidas suelen resolver el problema de fuentes de RFI particulares aunque son menos efectivas en un entorno complejo.

La intervención humana en el proceso de reducción de la RFI desempeña un importante papel en las operaciones en la práctica. De este modo, el procesamiento en línea y en tiempo real adaptable a una diversidad de firmas de RFI puede ser preferible a la utilización restrictiva de antenas de referencia y/o filtrado espacial para transmisores conocidos y fijos. Es probable que éste sea el caso hasta que pueda invocarse algún controlador de inteligencia artificial para guiar y dictar el esquema de reducción de la RFI.

Los interferómetros son menos vulnerables a la RFI. La supresión de flecos y la descorrelación por compensación del retardo permiten su supresión natural en las líneas de base más largas. Sin embargo, la RFI fuerte sigue añadiéndose al ruido del sistema y afectando a la calibración y visibilidades complejas de una estación. Las estaciones VLBI y las redes de sensores distribuidos pueden implementar la reducción en cada una de las estaciones para reducir la repercusión global de la RFI local sobre el sistema.

Para calibrar correctamente un sistema, es necesaria efectuar una contabilización precisa de todos los datos afectados a fin de obtener la ponderación correcta para la posterior autocalibración, limpieza y procedimientos de formación de imágenes.

En las futuras implementaciones de la reducción será necesario considerar métodos más complejos que los simples algoritmos de señalización y escisión de la RFI (curtosis u otros) que son los comúnmente utilizados en la actualidad. La utilización de métodos estadísticos con momentos superiores abre la posibilidad de suprimir los componentes de RFI sin afectar al resto de los datos; existen métodos que permiten la restauración parcial de los datos para reducir la pérdida de datos. Los sistemas de filtrado adaptable o de ensanchamiento del espectro pueden ser interesantes siempre que se conozcan sus esquemas de configuración digital.

#### 8.10 Conclusiones

El procesamiento de datos tanto en línea como fuera de línea se ha utilizado con éxito en la reducción del entorno de RFI de los observatorios radioastronómicos. Aunque cada vez es mayor la diversidad de alternativas satisfactorias de reducción, la elección del método depende estrechamente de las características de la RFI, del tipo de radiotelescopio y del tipo de observación efectuada. En particular, el procesamiento de datos en línea y en tiempo real puede resultar preferible en un entorno de RFI variable, mientras que la adopción de medidas especiales con la utilización de antenas de referencia y filtrado espacial puede resultar preferible para fuentes de RFI conocidas y fijas. Además de ello, la ausencia de implicación humana en el proceso de reducción puede hacer del proceso automatizado en línea una alternativa atractiva.

No existe ningún método universal de reducción de la RFI en los datos astronómicos. La supresión efectiva de la RFI depende de la INR y de sus características temporales y espectrales. Una evaluación cuantitativa del método utilizado no siempre es posible debido a que los algoritmos de reducción suelen corresponder a procesos no lineales que pueden afectar a las características del ruido y la calibración. La pérdida de datos total resultante de un método particular es un factor que orienta la evaluación del método de elección.

Tal vez sea necesario aplicar varios métodos para abordar un entorno de RFI más genérico. Sin embargo, la supresión de la RFI en cada paso de la reducción modifica las características de los datos y el efecto acumulativo de la reducción de la RFI no es lineal, sino más bien la suma de lo que es posible.

El coste del hardware de computación y de la digitalización de los datos está disminuyendo con rapidez, lo que ofrece nuevas oportunidades para implementar y automatizar los algoritmos de reducción de la RFI. Gracias a ello se pueden utilizar mayores anchuras de banda, una resolución temporal más elevada y una resolución espectral mayor en las observaciones astronómicas. Sin embargo, como consecuencia de que los volúmenes de datos sean cada vez mayores, se impondrá la necesidad de introducir tuberías de reducción de datos automatizada y algoritmos de reducción automática asociados.

Están llegando al mercado nuevas tecnologías de telecomunicación y radiodifusión, muchas de ellas en forma de dispositivos móviles sin licencia. Dada la imposibilidad de controlar su situación en permanente cambio, pronto afectarán a las operaciones de los observatorios. Es necesario investigar algoritmos que eliminen estas señales de los datos astronómicos. En particular, los dispositivos de espectro ensanchado (banda ultraancha) plantean un problema a los servicios pasivos, ya que sus esquemas de modulación digital se extienden hasta los límites de las atribuciones espectrales. Las estimaciones actuales indican que el número de dispositivos transmisores utilizados por cada persona va a experimentar un pronunciado crecimiento y que muchos de ellos utilizarán el acceso dinámico al espectro.

El espacio de descubrimiento para la radioastronomía viene determinado sobre todo por las características técnicas del sistema de observación y por factores limitantes tales como el entorno de RFI. Aunque los telescopios de nueva generación están instalados en los emplazamientos más vírgenes posibles, las instalaciones existentes deben coexistir con las condiciones locales. Para evitar que la RFI sea el factor limitante de las instalaciones existentes, debe otorgarse a la gestión del espectro una alta prioridad.

## CAPÍTULO 9

## Zonas de silencio radioeléctrico

#### 9.1 Introducción

Este Capítulo trata de la definición de una zona de silencio radioeléctrico (RQZ, *radio quiet zone*) y los problemas clave para su creación y mantenimiento. El Informe UIT-R RA.2259 – Characteristics of radio quiet zones (Características de las zonas de silencio radioeléctrico), contiene una descripción más completa y numerosos ejemplos.

#### 9.1.1 Definición y requisitos generales de una zona de silencio radioeléctrico

Debido a que las observaciones radioastronómicas realizadas desde la superficie terrestre son intrínsecamente sensibles a la interferencia radioeléctrica, deliberada o involuntaria, procedente de fuentes artificiales, algunas administraciones han implementado zonas de silencio radioeléctrico. Una RQZ se define aquí como cualquier zona geográfica reconocida en la que los procedimientos habituales de gestión del espectro se modifican con el fin específico de reducir o evitar la interferencia sobre los radiotelescopios, a fin de optimizar el entorno en el que se realizan las observaciones.

Varios son los procedimientos que pueden utilizarse y pueden aplicarse a determinadas bandas de frecuencias, a ciertos períodos de tiempo y/o a diversas clases de fuentes de interferencia. Los controles pueden ser de índole técnica, geográfica y/o reglamentaria. Por consiguiente, las diferentes definiciones y métodos de gestión de las RQZ se aplicarán a los diversos radiotelescopios, dependiendo de sus necesidades específicas.

La mayoría de las restricciones implementadas en las RQZ se limitan a los transmisores terrenales del servicio fijo, pero no afectan a las transmisiones aéreas ni a las realizadas a bordo de satélites. Esto obedece a que la interferencia que se origina en las fuentes móviles, especialmente en las aeronáuticas, suele ser de corta duración; la interferencia es fácil de identificar, mientras que la propia fuente de la interferencia suele desaparecer cuando ya ha sido identificada. Ninguna RQZ restringe las transmisiones de los satélites. El Informe UIT-R RA.2259 identifica la amplia gama de controles utilizados y presenta ejemplos de RQZ de todo el mundo.

Es importante hacer hincapié en que una RQZ no supone la completa ausencia de transmisiones radioeléctricas. Siempre será necesaria la coexistencia con una gama de dispositivos artificiales. Una RQZ puede incluir alternativas de notificación de otros usuarios y de negociación para la reducción de la interferencia. Por consiguiente, una RQZ es una zona intermedia en la que se prevé la implementación de mecanismos de protección de las observaciones radioastronómicas contra las interferencias perjudiciales en radiofrecuencia mediante estrategias de reducción y de reglamentación de los transmisores de radiofrecuencia eficaces.

#### 9.1.2 Función de la reglamentación

Los organismos reguladores de los gobiernos gestionan a nivel nacional los controles reglamentarios de las interferencias radioeléctricas locales. Un elemento central de la reglamentación nacional es un plan de espectro de radiofrecuencia en el que se identifique la atribución de las bandas de frecuencias a los servicios, entre ellas las bandas atribuidas a la radioastronomía. Estos planes nacionales del espectro se inspiran en el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT en la medida necesaria para evitar la interferencia perjudicial entre distintos países.

Respecto de las RQZ, los organismos reguladores nacionales pueden optar por implementar una diversidad de controles como los que se describen en el Informe UIT-R RA.2259, para ayudar a la resolución de los problemas de interferencia perjudicial que se plantean cuando no se respetan los reglamentos.

En el caso de interferencia entre administraciones nacionales diferentes, puede recurrirse a los procesos de ayuda de que dispone la UIT para resolver estos problemas. Es poco probable que esto sea relevante para las RQZ.

#### 9.2 Consideraciones que han de tenerse en cuenta cuando se crea una RQZ

#### 9.2.1 Geográficas

Además de colocar las estaciones radioastronómicas tan lejos como sea posible de las zonas de alta densidad de población, es conveniente situarlas en zonas que ofrezcan algún grado de apantallamiento natural del terreno. Algunos observatorios se benefician de que sus radiotelescopios estén rodeados de bosques de coníferas, que, gracias al contenido de humedad de sus agujas, pueden ofrecer protección adicional frente a la RFI procedente del horizonte, especialmente en frecuencias por encima de algunos GHz. Los observatorios emplazados en las cimas de montañas con visuales muy largas son especialmente problemáticos para la coordinación de las RQZ.

En uno de los modelos de RQZ no se permite la existencia de transmisor alguno en la zona de silencio, al menos, tal vez, sobre una gama específica de frecuencias que esté relacionada con el funcionamiento de un radiotelescopio. En otro modelo, se permite la existencia de los transmisores siempre que el nivel de la señal recibida en la estación radioastronómica no rebase un umbral de interferencia especificado, también en una determinada gama de frecuencias. Otras zonas de silencio pueden consistir en una combinación de los dos modelos anteriores, con un «anillo interior» en el que no se permita la existencia de transmisores y un «anillo exterior» en el que los posibles transmisores existentes deban satisfacer criterios de interferencia específicos. Algunas zonas de silencio radioeléctrico operan en la totalidad del espectro radioeléctrico.

Algunas de las interferencias más importantes para la radioastronomía son las generadas por las aeronaves. Debe examinarse la posibilidad de crear una zona nacional de exclusión aérea por encima de un observatorio. Esto reducirá, aunque no eliminará las fuentes de interferencia a bordo de aviones, debido a que el horizonte radioeléctrico de una aeronave a altitud de crucero puede aproximarse a los 400 km.

#### 9.2.2 Frecuencia

La gama de frecuencias de funcionamiento de una RQZ debe estar relacionada, evidentemente, con la protección del funcionamiento de los instrumentos astronómicos en la misma. Sólo hay que controlar las frecuencias precisas para proteger el funcionamiento de los instrumentos astronómicos presentes y en proyecto. Sin embargo, debido a las grandes anchuras de banda de los modernos receptores radioeléctricos y al deseo de efectuar un seguimiento del desplazamiento de las señales espectrales por efecto Doppler hasta las frecuencias más bajas de este Universo en expansión, resulta indispensable operar en amplias gamas de frecuencias. Es probable que una RQZ cubra las gamas de frecuencias utilizadas por muchos otros sistemas de radiocomunicación.

#### 9.2.3 Repercusión de la RFI sobre las observaciones del SRA

La repercusión de la RFI sobre las observaciones radioeléctricas varía considerablemente, desde un simple aumento del nivel de ruido, que puede reducirse, hasta niveles que pueden destruir los receptores de un radiotelescopio. Para que el SRA pueda funcionar, la RFI nunca debe ser tan intensa como para hacer que los amplificadores de los receptores entren en un funcionamiento no lineal. La RFI presente a niveles suficientemente bajos como para permitir la realización de observaciones radioeléctricas sigue necesitando algún tipo de reducción. La máxima ventaja de las RQZ radica en los niveles intrínsecamente bajos de RFI que además de proteger los receptores radioastronómicos permiten recurrir a técnicas de reducción más sencillas y fáciles. En los Capítulos 6 y 8 figura una exposición más amplia de la repercusión de la RFI sobre las observaciones del SRA.

#### 9.3 El entorno electromagnético

Existe una diversidad de fuentes de interferencia sobre la radioastronomía, cada una de las cuales puede exigir un tipo de control distinto.

Los problemas individuales de interferencia que plantean los transmisores sencillos pueden resolverse en la mayor parte de los casos mediante los procesos actuales de gestión del espectro. Sin embargo, con el creciente despliegue de dispositivos de comunicación móvil y de otros dispositivos electrónicos que emiten señales de forma deliberada o involuntaria, ha aumentado el nivel de ruido con el incremento del número de dispositivos. Es indispensable disponer de un programa que mida sistemáticamente el umbral de ruido y su variación en el

tiempo, para identificar los problemas antes de que se manifiesten y provoquen pérdidas de datos y de tiempo de observación significativos.

#### 9.3.1 Radiadores deliberados

Los radiadores deliberados son aquellos sistemas y dispositivos que producen emisiones de radiofrecuencia con fines de comunicación o detección; es decir, la transmisión de energía radioeléctrica es intrínseca a su funcionamiento. En general, esto quiere decir que la banda de frecuencias, anchura de banda, nivel de potencia transmitido, esquema de modulación y otros parámetros de explotación se conocen o pueden estimarse con cierta precisión. Los radiadores deliberados también operan, en general, en bandas de frecuencia estrechas a diferencia de los radiadores involuntarios y de los receptores radioastronómicos que cubren amplias bandas.

El UIT-R define un gran número de servicios radioeléctricos, entre ellos los sistemas terrenales (móvil aeronáutico, radionavegación aeronáutica, radioaficionados, radiodifusión, fijo, móvil terrestre, móvil marítimo, radionavegación marítima, ayuda a la meteorología, radiolocalización, radionavegación, patrones de frecuencia y tiempo) y sistemas de satélites (exploración de la Tierra por satélite, fijo por satélite, entre satélites, meteorológico por satélite, móvil por satélite, operaciones espaciales e investigación espacial).

Los dispositivos radioeléctricos con licencia son aquellos para los que el organismo regulador nacional ha autorizado su funcionamiento. Pueden obtener licencia a título individual, en cuyo caso el organismo regulador tiene conocimiento de su situación (o zona de funcionamiento), frecuencia, potencia, anchura de banda, modulación, altura de la antena y diagrama de radiación, y demás parámetros de la estación. Esto permite cierto control para una zona de silencio radioeléctrico por restricción o limitación de ciertos tipos de transmisores, por ejemplo, por banda de frecuencias o nivel de potencia. Además, muchas administraciones tienen una modalidad de concesión de licencias de espectro con arreglo a la cual los usuarios tienen derecho a una determinada banda de frecuencias en una determinada zona geográfica, tal vez durante un cierto período de tiempo. En virtud de las licencias de espectro, los usuarios pueden desplegar transmisores radioeléctricos que funcionen en la frecuencia nominal y en el ámbito geográfico deseado. Esto hace que el control de la zona de silencio radioeléctrico resulte más difícil que para los dispositivos de licencia individual descritos anteriormente, salvo que las condiciones de la licencia de espectro incluyan específicamente límites en la RQZ.

Los dispositivos con licencia de clase (o sin licencia) son aquellos que funcionan con arreglo a un acuerdo específico de licencia entre el usuario y el organismo regulador. Se restringen a determinadas bandas de frecuencias y los dispositivos están limitados en cuanto a potencia, anchura de banda y otros parámetros, en virtud de la reglamentación nacional. Suelen ser de baja potencia y a menudo móviles. Como ejemplos cabe citar los teléfonos inalámbricos, el Wi-Fi, las etiquetas de identificación en radiofrecuencia y el acceso a los vehículos sin llave. En general, se trata de dispositivos de gran consumo u otros utilizados por la industria en grandes despliegues. El control de los transmisores con licencia de clase para una RQZ resulta más difícil que para los dispositivos con licencia, ya que el emplazamiento de la instalación y otros parámetros no son conocidos para el organismo regulador nacional.

Los transmisores radioeléctricos a bordo de aeronaves también pueden provocar interferencias sobre los receptores radioastronómicos, como se ha expuesto anteriormente.

#### 9.3.2 Radiadores involuntarios

Los radiadores involuntarios producen ruido de radiofrecuencia como subproducto de su función principal. Su densidad espectral de potencia suele ser menor que la de los radiadores deliberados, aunque en bandas de frecuencias más amplias. La energía de radiofrecuencia emitida no está bien caracterizada en cuanto a nivel de potencia, frecuencia ni características estadísticas, y generalmente es una combinación de ruido de fondo con estadísticas gaussianas y ruido impulsivo de nivel superior aunque de menor probabilidad.

Los equipos para usos industriales y personales tienen la posibilidad de radiar interferencia radioeléctrica. Aunque individualmente los dispositivos puedan producir niveles de interferencia que no rebasen las normas establecidas, la emisión total puede ser lo suficientemente intensa como para crear un problema de interferencia para los observatorios radioeléctricos. Es probable que esta interferencia tenga un espectro semejante a un ruido de banda ancha sobre el que vengan superimpuestas señales de banda estrecha variables en el tiempo.

Los sistemas de encendido de los vehículos y de otros motores (abanicos, limpiaparabrisas, calefactores, etc.) también producen ruido de radiofrecuencia. Normalmente este ruido disminuye al aumentar la frecuencia, de

modo que las bandas por debajo de 1 GHz aproximadamente son las más afectadas. Muchos vehículos tienen sistemas de gestión computerizada del motor que también son potencialmente fuentes de interferencia.

La interferencia radioeléctrica procedente de las líneas de distribución de energía eléctrica puede generarse por las chispas, por las tensiones de línea de 70 kV y superiores, aproximadamente, y por las descargas por efecto corona. Últimamente se ha considerado la utilización de los sistemas de distribución de energía eléctrica como medio para la prestación de servicios de telecomunicación.

Los sistemas de telecomunicaciones por líneas de energía eléctrica (PLT, *power line telecommunications*) utilizan señales de radiofrecuencia de hasta 200 MHz aplicadas sobre los cables de distribución de energía eléctrica. Las señales PLT sobre estas líneas tienen el potencial de provocar interferencias en los servicios de radiocomunicación, entre ellos el servicio de radioastronomía. Debido a los efectos ionosféricos de la propagación en la banda de ondas decamétricas y a la acumulación de la radiación PLT, la implementación de los módems PLT, incluso cuando están lejos de los observatorios radioastronómicos, puede provocar interferencia perjudicial sobre las observaciones radioastronómicas.

Los dispositivos industriales, científicos y médicos (ICM) son aquéllos que utilizan la energía de radiofrecuencia con fines distintos a la comunicación. Como ejemplos cabe citar los hornos de microondas, la diatermia médica y los soldadores de RF. Para los fines de una RQZ, estos dispositivos son análogos a los que funcionan con una licencia de clase y suelen compartir las mismas bandas de frecuencias.

#### 9.3.3 Propagación de las señales interferentes

Al evaluar el potencial de interferencia de las fuentes descritas anteriormente sobre un emplazamiento radioastronómico, es necesario predecir la propagación de la señal RFI.

Es esencial distinguir entre la predicción de propagación para el diseño del sistema radioeléctrico y la realizada para el análisis de la interferencia. El diseño del sistema debe tener en cuenta la máxima pérdida (o un valor próximo) en un trayecto entre el transmisor y el receptor para conseguir la recepción de un nivel de potencia suficiente. El análisis de la interferencia, a su vez, debe calcular la pérdida mínima (o un valor próximo) en un trayecto entre el transmisor y el receptor interferido para evaluar el máximo nivel de potencia que es probable recibir. Esta distinción debe observarse cuando se haga uso de las Recomendaciones de la Comisión de Estudio 3 del UIT-R u otros métodos de predicción de la propagación.

Los principales mecanismos de propagación que afectan al nivel de interferencia procedente de una fuente de interferencia sobre el receptor de un radiotelescopio son las pérdidas en el espacio libre, la difracción sobre el terreno u otros obstáculos, la atenuación por gases atmosféricos y/o la precipitación, la propagación guiada y la dispersión o reflexión por los meteoros y las aeronaves que sobrevuelan el emplazamiento.

#### 9.4 Métodos de conseguir una RQZ

Puede implementarse una gama de métodos para conseguir una RQZ. Es conveniente clasificarlos en métodos que afectan al receptor y métodos que afectan al emplazamiento transmisor. Pueden utilizarse varios de estos métodos combinados, ya que la elección del método depende estrechamente de la frecuencia, el emplazamiento, el tipo de observación necesaria, la utilización del suelo en ese momento y otros factores.

#### 9.4.1 Métodos en el receptor

Para conseguir un entorno óptimo de radiofrecuencia en el que se efectúen las observaciones radioastronómicas, los observatorios de radioastronomía se aprovechan de los factores geográficos y su repercusión sobre la propagación de la señal de radiofrecuencia. Una elección inteligente de estos factores proporcionará una metodología que permita cumplir las necesidades de la RQZ.

La naturaleza de la propagación en radiofrecuencia es tal que la potencia de la interferencia disminuye al aumentar la distancia al transmisor. El planteamiento más básico consiste, pues, en elegir un emplazamiento geográfico que esté suficientemente alejado de los centros de población y del tráfico. Esto es ideal para nuevas instalaciones importantes, pero es posible que no sea práctico para todas las instalaciones de telescopios. Los emplazamientos en las cimas de las montañas suelen resultar útiles por su lejanía; además proporcionan un trayecto más corto a través de la atmósfera, lo que es especialmente ventajoso para altas frecuencias.

Siempre que sea posible, debe utilizarse el apantallamiento natural del emplazamiento. A diferencia del emplazamiento situado en la cima de una montaña, mencionado anteriormente, esta solución otorga preferencia

a los emplazamientos en valles rodeados de colinas o montañas y se suele escoger especialmente para las observaciones a baja frecuencia.

La ausencia de visibilidad directa entre las fuentes de la interferencia y la RQZ no garantiza un silencio absoluto, ya que las señales seguirán trayectos de difracción sobre el terreno o se reflejarán en estructuras grandes. El apantallamiento del emplazamiento puede ofrecer beneficios adicionales, especialmente a bajas frecuencias (por debajo de 1 GHz, aproximadamente). Debe estimarse el efecto de la difracción para las gamas de frecuencias de interés apoyándose en el conocimiento detallado del terreno local siempre que sea posible.

No obstante, en situaciones en las que el propio terreno pueda ofrecer una protección adecuada, ésta podría resultar inútil si en la cima de un monte próximo se levantase una gran estructura reflectora, tal como un aerogenerador.

#### 9.4.2 Métodos en el transmisor – gestión de la RQZ

El principal componente para la gestión de una RQZ es el control de los radiadores de las señales potencialmente interferentes sobre la zona, garantizando al mismo tiempo la prestación de los servicios de telecomunicación, entre otros, a pequeños núcleos de población dentro de la RQZ. Cuando se define la zona, es necesario prestar atención tanto a las necesidades de la instrumentación destinada a la misma en dicho momento como a las capacidades adicionales y a la instrumentación que pudiera añadirse durante la vida útil de la zona.

Una necesidad adicional es la de adecuar los procesos burocráticos para que se pueda gestionar la RQZ en una escala temporal de decenios, a fin de resolver los problemas planteados por el desarrollo industrial y comunitario y otros procesos naturales de gestión del suelo. Además, al definir la zona, no debe olvidarse la posibilidad de que aparezcan instrumentos totalmente nuevos y nuevas capacidades de observación.

#### 9.4.2.1 Control legislativo y reglamentario

La legislación puede proporcionar un marco reglamentario de control de las fuentes de RFI en la RQZ. Esto incluye la reglamentación de los transmisores radioeléctricos con licencia y sin licencia (o con licencia de clase) y otras actividades que puedan provocar interferencia.

En muchas RQZ se definen zonas de restricción y notificación en torno al emplazamiento. La zona restringida es aquélla en la que se restringe la utilización de dispositivos radioeléctricos. Esto puede limitarse a los transmisores que operen dentro de una banda de frecuencias o en bandas de frecuencias específicas. La gestión de la zona restringida puede realizarse mediante la actividad de concesión de licencias por parte del organismo regulador.

La zona de notificación es aquella en la que cualquier instalación radioeléctrica propuesta (en bandas de frecuencias específicas) debe notificarse al organismo regulador o al operador del telescopio. Este proceso de notificación da paso a un período de negociación en el que el operador del telescopio evalúa los efectos del transmisor radioeléctrico propuesto sobre las observaciones radioastronómicas e intenta encontrar una solución adecuada para ambas partes. Normalmente la zona de notificación es mucho más amplia que la zona restringida.

Por lo general, estos reglamentos sólo pueden aplicarse a dispositivos radioeléctricos con licencia y tiene escaso valor para el control de los dispositivos radioeléctricos sin licencia o de los radiadores involuntarios. A estos últimos, no obstante, no les suelen afectar las normas de reglamentación del espectro nacional y pueden controlarse mediante el desarrollo de la legislación local.

Es esencial señalar que la utilización de notificaciones y zonas de restricción conlleva una gestión permanente, dinámica y cooperativa de la RQZ durante la vida útil del observatorio radioastronómico. También obliga a que la implementación de RQZ proporcione tantas alternativas como sea posible (por ejemplo, en cuanto a bandas de frecuencias) en consideración de la posterior expansión de las capacidades del radiotelescopio.

También puede ampliarse el control reglamentario, en las zonas geográficas limitadas, para cubrir dispositivos radioeléctricos sin licencia o radiadores involuntarios. Dado que este tipo de dispositivos es generalmente de baja potencia, el límite geográfico no suele constituir una gran restricción. En la proximidad inmediata del emplazamiento del telescopio puede controlarse el acceso físico para garantizar que no se introduzcan en el recinto dispositivos transmisores.

El organismo regulador nacional, u otro organismo gubernamental competente, también puede aplicar la oportuna legislación para el control de ciertas clases de actividades en RQZ, por ejemplo, la industria pesada o las fábricas.

En el Cuadro 1 se muestran ejemplos de RQZ en diversos países y de los métodos de control o reglamentación que utilizan. En muchos casos, los métodos citados en el cuadro se aplican en gamas de frecuencias limitadas relacionadas con el funcionamiento de los instrumentos que se protegen.

#### CUADRO 9.1

#### Control en las RQZ de diversos países

RQZ/país	Control de los transmisores radioeléctricos con licencia	Control de los dispositivos radioeléctricos con licencia de clase	Control de las aeronaves	Control de los radiadores involuntarios
LMT/México	En un radio de 20 km – exclusión de otras radiocomunicaciones			
NRQZ/EE.UU.	Superficie de 34 000 km <sup>2</sup> – se exige a los transmisores fijos su coordinación			Controles sobre los equipos electrónicos en un radio de 10 millas
ALMA/Chile	Exclusión de transmisores en un entorno de 30 km; se exige coordinación en un entorno de 120 km			
Arecibo/Puerto Rico	Restricciones en un radio de 4 km; se exige coordinación para Puerto Rico y las islas vecinas	Restricciones en un radio de 4 km	Zona de exclusión aérea sobre el telescopio	Restricciones en un radio de 4 km
Varias/Australia	Zonas de notificación para efectuar la coordinación en un radio de 250 km		Zona de exclusión aérea sobre los telescopios	
MRO/Australia	Plan de bandas de frecuencias – el SRA tiene prioridad en un radio de 70 km; la zona de coordinación se extiende a 260 km	Licencias de clase – no se permiten interferencias en un radio de 70 km	Zona de exclusión aérea sobre el emplazamient o-to	Protocolo para equipos electrónicos utilizado por el SRA en un radio de 10 km
IRAM/España	Restricciones sobre los transmisores en un radio de 5 km; coordinación en un radio de 10 km			Separación mínima de 1 km con la industria, los ferrocarriles y las líneas de alta tensión
Itapetinga/Brasil	Zona de 4 km de diámetro sin nueva actividad urbana	Zona de 4 km de diámetro sin nueva actividad urbana		Zona de 4 km de diámetro sin nueva actividad urbana

RQZ/país	Control de los transmisores radioeléctricos con licencia	Control de los dispositivos radioeléctricos con licencia de clase	Control de las aeronaves	Control de los radiadores involuntarios
AGAA/Sudáfrica	Exclusión de transmisiones en un área de 140 km <sup>2</sup> , sólo servicios esenciales en un área de hasta 123 408 km <sup>2</sup>		Área central de 140 km <sup>2</sup> controlada hasta una altitud de 18 500 m	
Pushchino/Federació n de Rusia	Zona de 2 km de diámetro sin nueva actividad urbana	Control en una zona de 5 km de radio (ciudad de Pushchino)		Control del nivel de las interferencias previstas
Dominion RAO/Canadá	Adjudicación de licencias estrictamente controladas en un radio de 200 km	Nada hasta donde alcance la visual y restricciones en un radio de 4 km, lo que sea mayor	Había una zona de exclusión aérea, pero ha caducado	Ninguna actividad urbana nueva dentro de la visual y restringida en un radio de 4 km, lo que sea mayor
FAST/China	Sin transmisores en un radio de 5 km; coordinación en un radio de 75 km			

#### CUADRO 9.1 (fin)

#### 9.4.2.2 Tecnologías alternativas y diseño de la red

El organismo regulador nacional o el operador del telescopio pueden optar por proporcionar tecnologías alternativas a las que causan niveles perjudiciales de interferencia. Por ejemplo, la distribución de la televisión por cable en vez de por fibra óptica puede ser un sustitutivo adecuado de la radiodifusión. Una red radioeléctrica móvil puede sustituirse por otra a una banda de frecuencias más conveniente.

#### 9.5 Consecuencias del establecimiento de una RQZ

#### 9.5.1 Mantenimiento de las RQZ

Las RQZ exigen una labor considerable de mantenimiento tras su creación. Casi todo el peso recae en el operador de la instalación radioastronómica.

Una actividad que hay que apoyar es la vigilancia rutinaria del entorno radioeléctrico, y en particular de todos los equipos que vayan a ser instalados en el emplazamiento. Esta actividad se lleva a cabo frecuentemente con estaciones de vigilancia autónomas e instalaciones de ensayo que suelen estar separadas del propio radiotelescopio.

Otra actividad consiste en la identificación de las fuentes de la RFI que aparece en los datos del telescopio, pero que acaso no sea suficientemente fuerte para detectarla con las estaciones de comprobación técnica. El análisis de estos casos puede resultar muy difícil de llevar a cabo, ya que la anchura de banda, el seguimiento del efecto Doppler, el tiempo de integración y el diagrama de radiación de la antena del telescopio pueden no ser adecuados para identificar la frecuencia exacta, la variabilidad temporal o la posición de la fuente interferente. Además, algunas interferencias sólo se manifiestan mucho tiempo después de haber efectuado las observaciones, cuando el conjunto de datos completo puede tratarse por primera vez en toda su extensión. En cualquier caso, una vez identificada la RFI deben adoptarse medidas para reducir o eliminar la fuente que la provoca.

La mayor parte de los observatorios establecen zonas intermedias de RFI en los terrenos del observatorio, y aplican restricciones cada vez más estrictas sobre los equipos que pueden generar RFI conforme disminuye la distancia al equipo de radioastronomía. El personal de la zona de silencio radioeléctrico debe educar al resto

del personal y a los visitantes, y estar dispuesto a hacer cumplir las normas locales. Las consideraciones sobre las zonas de RFI deberían estar preparadas, a ser posible, incluso antes de la construcción del observatorio.

Es necesario que el personal de la zona de silencio radioeléctrico se encargue también de los casos de RFI procedente de fuentes situadas en el exterior de los terrenos del observatorio. Los transmisores sin autorización que en otro caso exigirían una licencia de explotación, pueden ser la situación más fácil de resolver por aplicación de la reglamentación nacional. El caso más difícil que se plantea en la administración de una RQZ es el de la RFI procedente de dispositivos sin licencia que se encuentren en el exterior de los terrenos del observatorio. La resolución de estas situaciones en las zonas de silencio existentes está resultando cada vez más problemática y no parece que vaya a encontrarse ninguna solución a corto plazo.

Una carga importante para las RQZ de gran tamaño puede ser la tramitación de las solicitudes de licencia para nuevos transmisores que se encuentren dentro de la zona de silencio. Algunas zonas de silencio pueden resultar fáciles de administrar si, simplemente, se impide la instalación de transmisores dentro de la zona de silencio. Otras zonas de silencio pueden establecer umbrales de interferencia perjudicial, en cuyo caso las propuestas de licencia deben analizarse cuidadosamente para ver si la señal transmitida sobrepasará los umbrales de interferencia establecidos en el observatorio.

Por último, los observatorios no deben subestimar la necesidad de que se lleven a cabo actividades de educación y divulgación al público para explicar la necesidad de la zona de silencio, y para que los usuarios del espectro sean conscientes de sus obligaciones con arreglo a las reglas de la zona de silencio.

#### 9.5.2 Consideraciones a largo plazo

En muchos casos, las RQZ se han diseñado considerando telescopios específicos. La evolución posterior más habitual del telescopio ha consistido en aumentar su utilidad para altas frecuencias mediante la actualización de su instrumentación. Más recientemente, se ha manifestado la tendencia hacia la coubicación de telescopios en emplazamientos en los que puedan satisfacerse adecuadamente sus fines, de modo que se puedan obtener economías de la infraestructura instalada y de la reglamentación, así como el acceso compartido a energía eléctrica, comunicaciones y carreteras.

Esto a su vez puede venir acompañado de una ampliación de la gama de frecuencias que deba protegerse para los instrumentos del emplazamiento en cuestión. Por ello, resulta aconsejable diseñar los parámetros de la RQZ con la mayor holgura posible, dadas las circunstancias.

Una vez acordada la RQZ, es obligada su vigencia durante un tiempo considerable. Esto parece indicar que su repercusión económica y la repercusión potencial en la futura distribución de población y el desarrollo en la zona afectada deben tenerse muy en cuenta durante el diseño de la RQZ.

Por último, debe preverse que continúe el ritmo de desarrollo técnico de la sociedad dando lugar a innovaciones que provoquen cambios en el entorno de CEM en torno a la RQZ. Aunque sea imposible de prever, esta tendencia subraya una vez más la necesidad de que el diseño de la RQZ sea tan amplio y robusto como sea posible.

- 129 -

## CAPÍTULO 10

## Búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI) utilizando observaciones en radiofrecuencias

#### 10.1 Introducción

Para la percepción de nuestro lugar en el universo es fundamental saber si la Tierra es el único planeta con la vida inteligente. Si la vida inteligente en la Tierra es realmente singular, entonces debe ser un fenómeno fortuito o la consecuencia única de la evolución del cosmos. Por otra parte, si la población de la Tierra es sólo una de una multitud de grupos inteligentes que pueblan nuestra Galaxia, la vida en la Tierra formaría parte de una serie de una gran diversidad evolutiva y posiblemente no sería única en su desarrollo y su civilización. El problema consiste en determinar si la vida en la Tierra es única o no.

Algunos científicos creen que la vida es corriente en nuestra Galaxia y que podría haber adoptado formas avanzadas que posean una capacidad de telecomunicación análoga o superior a la nuestra. Evidentemente, los detalles de las estaciones transmisoras (como son frecuencias, modulaciones, polarizaciones y emplazamientos) utilizadas por las civilizaciones extraterrestres, si existen, son desconocidos. Para buscar las señales procedentes de esas estaciones debe sondearse el Universo con el equipo receptor más sensible posible, buscando con cuidado y extensamente el espectro radioeléctrico para revelar signos de las señales producidas por otras civilizaciones.

El primer proyecto de emitir señales radioeléctricas al espacio data de 1899, con la labor de Tesla. Una transmisión especial de señales, que codificaba programas de la televisión estadounidense, efectuada en 1939, ha alcanzado actualmente a un millar de estrellas. La tentativa más ambiciosa de proporcionar a otras posibles civilizaciones detalles de la vida en la Tierra se produjo en 1974, con una transmisión, enviada desde el radiotelescopio de 1 000 pies de diámetro de Arecibo, Puerto Rico, describiendo nuestro sistema solar, la composición del ADN y nuestra especie.

Morrison y Cocconi [1959] fueron los primeros en señalar la posibilidad de recibir señales radioeléctricas procedentes de civilizaciones extraterrestres. Drake [1961] efectuó la primera búsqueda con microondas (Proyecto Ozma), utilizando un radiotelescopio de 25 m para las observaciones de dos estrellas separadas por unos 12 años luz. Desde entonces, científicos de varios países han realizado más de 99 búsquedas documentadas distintas (véase [Tarter, 2001]). Los científicos rusos dominaron este sector de actividades en el primer decenio. El primer libro ruso en el que se consideraban los problemas de la SETI fue escrito por I.S. Shklovsky en 1962. El libro se tradujo a muchos idiomas y tuvo una gran influencia en el desarrollo de la labor SETI en la URSS (actualmente: Federación de Rusia). Kardashev [1963] sugirió la posibilidad de hallar sociedades más avanzadas que la nuestra que habrían dominado la técnica de las radiocomunicaciones y sido capaces de producir una potencia de salida superior a 10<sup>26</sup> W para transmitir señales de banda ancha isótropas continuas. Se han efectuado múltiples investigaciones (véase [Troitsky et al., 1971]). Los avances en la tecnología informática y de comunicaciones han permitido efectuar búsquedas más sensibles y amplias. Algunos esfuerzos produjeron resultados que no pudieron explicarse. Por ejemplo, varias señales intrigantes registradas entre 1986 y 1989 en el curso del programa de Evaluación Extraterrenal en Megacanal (META) utilizando un radiotelescopio situado en la Universidad de Harvard, Estados Unidos de América (véase [Sagan y Horowitz, 1993]). La repetición reciente de observaciones con sensibilidad mucho mayor [Lazio et al., 2002] se opone a la teoría de que se trate de una clase de señales tecnológicas extraterrenales. En la actualidad, ninguno de estos experimentos proporcionó datos convincentes de señales procedentes de seres extraterrestres. Durante casi todo este tiempo, las actividades de búsqueda se han efectuado con una sensibilidad inapropiada y han cubierto sólo una pequeña fracción de las frecuencias, técnicas de modulación y direcciones posibles.

Oliver [1987], Bates [1988] y Drake y Sobel [1992] han facilitado información básica adicional sobre la búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI). Con la llegada de tecnologías relativamente baratas de cálculo y de tratamiento de señales digitales en los dos últimos decenios, se iniciaron investigaciones más amplias. En 1992, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de Estados Unidos de América lanzó un amplio proyecto, la Encuesta de microondas de alta resolución (HRMS), que comprendía algunos de los

mayores radiotelescopios de la Tierra y nuevo equipo receptor sensible de radiocomunicaciones. Aunque el proyecto de la NASA se canceló en 1993, el Instituto SETI norteamericano continuó la parte de «Investigación específica» de alta sensibilidad del HRMS como proyecto Phoenix.

El Instituto SETI y la Universidad de California, Berkeley, han construido el Sistema de Telescopio Allen (ATA) cuyo fin principal es realizar observaciones SETI continuas. El ATA tiene una superficie de recolección equivalente a una parábola de 40 m. La red de antenas tiene una temperatura de ruido de 40 K y una anchura de banda que abarcará toda la gama desde 0,5 GHz a 11,4 GHz. Genera múltiples haces con un campo de visión de 3° (a 1 GHz) que permitirá realizar una búsqueda SETI permanente y otras observaciones radioastronómicas. El sistema ATA plenamente orientable permite lograr tiempos de integración más largos que los que se utilizaban en las anteriores observaciones SETI. Los avances en la informática y en la tecnología de tratamiento de señales digitales puede mejorar también la sensibilidad intrínseca de los sistemas receptores SETI.

El ATA también sirve como prototipo de un telescopio mucho más grande, la red de antenas de un kilómetro cuadrado (SKA, Square Kilometer Array). Actualmente en su fase de diseño y prototipo, el desarrollo del SKA corre a cargo de un consorcio internacional de universidades e institutos de investigación. Si se obtiene la financiación internacional, el SKA tendrá una superficie de recolección 45 dB superior a la del ATA y más de 13 dB superior a la del telescopio de 305 m de Arecibo. Con la mayoría de los diseños que se están considerando se pueden constituir haces múltiples que ofrecen la posibilidad de realizar observaciones SETI continuas. Acoplado con sistemas de procesamiento de señal más potentes, el SKA permitirá efectuar una búsqueda del equivalente de la tecnología radioeléctrica terrenal a una distancia de hasta 1 000 años luz.

La posibilidad de detectar cualquier señal de microondas depende fuertemente de que haya un entorno radioeléctrico tranquilo en los emplazamientos en donde se efectúan las operaciones de radiobúsqueda. Por consiguiente, esos emplazamientos han de estar protegidos con la mayor amplitud posible frente a la interferencia radioeléctrica artificial. Aunque la tecnología moderna puede proporcionar cierta discriminación frente a las señales de origen humano, resulta a su vez inapropiada frente al aumento rápidamente creciente del espectro radioeléctrico para una amplia variedad de servicios y funciones de telecomunicaciones. A medida que el tiempo pasa disminuirán en consecuencia las probabilidades de la detección con éxito.

#### 10.2 Detectabilidad de las señales SETI

Suponiendo que las señales procedentes de civilizaciones extraterrestres lleguen a la Tierra, nuestra capacidad de detectarlas depende de varios factores:

- la intensidad de las señales que lleguen a la Tierra;
- la zona de captación y la eficacia de iluminación de la antena de radiobúsqueda;
- la sensibilidad y la flexibilidad de frecuencias del sistema receptor de la antena;
- la capacidad para orientar la antena en dirección de las señales;
- la habilidad para diferenciar la señal recibida del «ruido» debido a componentes del sistema receptor, fenómenos «naturales» de la Galaxia e interferencia de origen humano.

Las estrategias de orientación de la antena y la selección del tiempo de integración de la búsqueda y de otros parámetros de sistemas son importantes elementos del diseño de la búsqueda SETI. Se están realizando esfuerzos para desarrollar sistemas sensibles que abarquen una amplia gama de frecuencias y que sean capaces de apuntar simultáneamente a múltiples estrellas, observando el cielo (especialmente en el plano galáctico) y obteniendo imágenes de  $2\pi$  estereorradianes de una sola vez. Las posibles características de estos nuevos sistemas quedarán determinadas en gran medida por el entorno de interferencia.

#### **10.3** Intensidad de las señales

La intensidad de una señal extraterrestre en la superficie de la Tierra depende de la potencia transmitida y de las características del trayecto de propagación. Se desconoce la densidad de flujo de la señal que se ha de detectar. Sin embargo, la distancia que ha de recorrer la señal ha de ser grande y es de suponer que la intensidad de esas señales en la Tierra sea muy baja. Por consiguiente, la detección está limitada por la sensibilidad global del sistema de observación. Para varias distancias supuestas del transmisor, la Fig. 10.1 muestra la dfp de la señal recibida en la Tierra en función de la potencia transmisora.


#### FIGURA 10.1 dfp recibida en función de la p.i.r.e.

- 131 -

En el caso de un sistema de observación situado en la superficie de la Tierra, la atmósfera afecta a las señales radioeléctricas en algunas frecuencias. La lluvia hará disminuir la sensibilidad en frecuencias por encima de 10 GHz, pero las observaciones no son por lo general sensibles al tiempo y pueden utilizarse frecuencias inferiores durante condiciones atmosféricas adversas. En frecuencias inferiores a unos 30 MHz, la recepción está limitada por la ionosfera; en frecuencias superiores a unos 20 GHz, las señales entrantes están atenuadas por las moléculas presentes en la atmósfera (véase el Capítulo 3). El efecto de las señales depende del emplazamiento del observatorio. Para un observatorio situado fuera de la Tierra, en la Luna por ejemplo, las señales no se verán afectadas por los efectos atmosféricos y será accesible la totalidad del espectro radioeléctrico (véase el Capítulo 7).

# 10.4 Sensibilidad del sistema receptor

Las consideraciones de sensibilidad relativas a los sistemas receptores para la búsqueda SETI son análogas a las examinadas en anteriores Capítulos para las observaciones radioastronómicas. Para una antena de ganancia dada, la sensibilidad del sistema receptor depende de la temperatura de ruido del sistema, la anchura de banda instantánea seleccionada y el tiempo de integración dedicado a una determinada medición.

La temperatura de ruido del sistema está determinada por las características del equipo y por el ruido recibido por la antena. Este último ruido contiene contribuciones del cosmos, la atmósfera de la Tierra y la radiación procedente de la propia Tierra recibida por los lóbulos laterales de la antena. La primera contribución está determinada por las emisiones de ruido radioeléctrico de nuestra Galaxia, las fuentes extragalácticas (otras galaxias y objetos cuasiestelares) y el fondo universal de microondas (2,7 K). Esta contribución es elevada en frecuencias bajas, pero disminuye con el aumento de las frecuencias. Por otra parte, el ruido producido por la atmósfera aumenta considerablemente en frecuencias superiores a unos 20 GHz, debido sobre todo a las moléculas de  $H_2O$  y  $O_2$ .

En el caso de una señal continua, la relación S/N aumenta con la raíz cuadrada del tiempo de integración. El tiempo de integración efectivo está limitado por la duración y la estabilidad de frecuencia de la señal y por el tiempo de observación disponible.

La frecuencia de la señal entrante comprenderá un desplazamiento Doppler que depende de la velocidad relativa entre el transmisor (en el momento de la transmisión) y el sistema receptor terrenal. Ese desplazamiento varía con el tiempo, aunque sólo es debido a la variación diurna por la rotación de la Tierra sobre su eje y a la variación anual por la rotación de la Tierra alrededor del Sol. Esos movimientos dan un

ue varía con la dirección de la señal entrante. I

- 132 -

desplazamiento de frecuencia que varía con la dirección de la señal entrante. En el caso de una dirección dada puede calcularse el desplazamiento. Sin embargo, sería difícil determinar las variaciones de la velocidad del transmisor, que pueden producirse por ejemplo si el transmisor se halla en un planeta en órbita alrededor de una estrella, antes de la detección de la señal. Dadas esas consideraciones, la mejora de la relación señal/ruido resultante de un aumento del tiempo de integración dependerá de la capacidad de seguir la señal desplazada por el efecto Doppler. El seguimiento imperfecto, que da lugar al desplazamiento de la señal en los canales de frecuencias en el sistema de detección, reducirá el beneficio obtenido con un mayor periodo de integración.

El tiempo total requerido para un proyecto de búsqueda depende del número de antenas que apunten, del número de diferentes sistemas de frecuencias situados en cada dirección y del tiempo de integración por observación. Para un programa establecido de direcciones y frecuencias, el tiempo total disponible limita el tiempo de integración por observación y en consecuencia la sensibilidad de la búsqueda. El desarrollo de sistemas de antena multihaz tales como el ATA y el SKA con uno o más haces radiantes dedicados a las observaciones SETI pueden permitir tiempos de integración más largos y una mayor sensibilidad.

### 10.4.1 Potencia detectable mínima de la señal

Para una señal que se mantenga dentro del mismo canal de frecuencia del sistema de detección durante el tiempo de integración, la potencia mínima de la señal detectable por el receptor de búsqueda  $P_{min}$ , suponiendo una relación *S/N* igual a la unidad, está dada por [NASA, 1973]:

$$P_{min} = 10 \log \left[ \frac{k T}{t} \left( 1 + (1 + Bt)^{0.5} \right) \right]$$
 dBW (10.1)

siendo:

- *k*: constante de Boltzmann
- T: temperatura del sistema (K)
- *B*: anchura de banda del canal de frecuencia (Hz)
- *t*: tiempo de integración (s).

La Fig. 10.2 muestra la potencia detectable mínima de la señal,  $P_{min}$ , en función del tiempo de integración para varias anchuras de banda. Los puntos A y B de la Figura representan dos receptores de búsqueda posibles con las características indicadas en la leyenda.





#### Potencia detectable mínima de la señal para sistemas posibles

La Fig. 10.3 ilustra la relación entre la dfp recibida para las condiciones supuestas en la Fig. 10.1 en el caso de un programa actual SETI (línea horizontal fina) y un futuro programa SETI con el SKA (línea horizontal gruesa). El programa actual SETI, Proyecto Phoenix, utiliza una antena de 300 m con una eficacia del 70% referida a la apertura iluminada efectiva de 225 m, una temperatura de ruido del sistema de 40 K, una anchura del canal de 1 Hz y un tiempo de integración de 300 s. El futuro programa SETI con el SKA supone los mismos parámetros de la observación, incrementando únicamente la superficie de recolección en 13 dB. Se trata de una estimación prudente de la sensibilidad, pues es probable que sea posible lograr tiempos de integración de 1 000 s o superiores. Las combinaciones de p.i.r.e. y distancia que dan densidades de flujo detectables son las que se hallan por encima de las líneas horizontales, en el caso de los sistemas posibles apropiados.

#### FIGURA 10.3



#### Capacidad de detección de las señales para la p.i.r.e. supuesta del transmisor



anchura de banda 1 Hz, tiempo de integración 300 s SETI SKA: antena de 1 000 m, anchura de banda 1 Hz, tiempo de integración 300 s

D: distancia en años luz (1 año luz = 9,46 ×10<sup>15</sup>m)

**x** : Desde la órbita del satélite geoestacionario

: Desde la sonda Voyager en Neptuno

Radio-Astro\_103

Cuando la anchura de banda del canal de frecuencia no está limitada por el desplazamiento de frecuencia de la señal, se obtiene la mayor sensibilidad utilizando una anchura de banda que corresponde a la anchura espectral de la señal recibida. Sin embargo, esa anchura no se conoce con antelación. Si el receptor tiene un solo canal de frecuencia, un problema asociado consiste en que al reducir la anchura de banda del canal aumenta el tiempo necesario para buscar una determinada gama de frecuencias. Por ejemplo, para explorar en una gama que vaya de 1 a 2 GHz con un receptor de canal único, una anchura de banda de 1 Hz y un tiempo de integración de 10 s, se necesitarán 317 años. Por esta razón, las búsquedas amplias se efectúan ahora con receptores, denominados generalmente espectrómetros, que dividen una banda de frecuencias amplia en numerosos canales espectrales de banda estrecha. Actualmente los espectrómetros con 10<sup>9</sup> canales son económicamente viables.

### 10.5 Dirección de puntería de la antena

Conviene utilizar antenas con una gran superficie de captación (esto es, elevada ganancia) a fin de aumentar la sensibilidad de la búsqueda y, por ende, mejorar la probabilidad de detección. Sin embargo, en el caso de las antenas únicas, un aumento de la superficie de captación produce habitualmente una disminución de la apertura del haz de la antena y un incremento del número de posiciones necesarias para investigar una zona determinada del cielo. Ello significa que, en un tiempo de integración dado, habrá que aumentar el tiempo de búsqueda total. Aumentar la superficie de captación añadiendo antenas podría resolver el problema.

La estrategia de puntería de la antena es una característica fundamental de la búsqueda SETI. Existen dos opciones: búsquedas de objetivo determinado o exámenes generales del cielo. En la búsqueda de objetivo determinado, las antenas se apuntan a estrellas seleccionadas; existe aproximadamente un millar de estrellas análogas al Sol dentro de una distancia de 100 años luz de la Tierra. La vigilancia en tiempo real de las señales permite que una posible detección sea verificada por una antena de búsqueda o por otro instrumento de apoyo. Una señal procedente de un sistema tecnológico extraterrestre en órbita alrededor de una estrella objetivo desaparecería al desviar la antena del objetivo y volvería al apuntar de nuevo al objetivo. Teniendo en cuenta

que cada objetivo puede requerir mucho tiempo, el conjunto tiempo-frecuencia de señales del espectrómetro puede investigarse con señales de ondas cortas y en impulsos. La búsqueda puede incluso extenderse a los tipos de desplazamiento de la frecuencia.

El estudio de planetas exteriores al Sistema Solar ha proporcionado nuevos objetivos para la investigación SETI (Siemion 2013). Además, la constante mejora de las tecnologías de procesamiento de las señales digitales han permitido realizar búsquedas con anchuras de banda mucho mayores, y mejor resolución espectral. En la Fig. 10.4 se representa la gama espectral de búsqueda para señales de banda estrecha (< 5 Hz) en dirección a los planetas detectados.

#### FIGURA 10.4

# 1 000 **Banda GTB SETI** 100 l'emperatura de ruido (Kelvin) Transiciones rotacionales atmosféricas Ventana <mark>de mi</mark>croondas terrenales 10 21 cm 21 cm OH hiperfino H hiperfino Agujero de agua 1 10 100 1 000 0.1 1

#### Diagrama de la intensidad del fondo radioeléctrico en función de la frecuencia

Frecuencia (GHz)

En esta gráfica se muestran las contribuciones exteriores a la temperatura de sistema del receptor y se indican las gamas para el SETI. En la gama de frecuencias 1 a 10 GHz se encuentran tanto emisiones galácticas de baja intensidad como contribuciones de la atmósfera terrenal a la temperatura del sistema. Se muestra la gama de búsqueda de planetas del Telescopio Kepler de Green Bank cuya una anchuradebandaes 0,8 GHz. Autor de la Figura: A. Siemion (2013).

#### Radio-Astro\_104

Los exámenes generales del cielo en grandes volúmenes de espacio requieren mucho más tiempo, y el tiempo dedicado a cada dirección es más limitado. Pueden elaborarse estrategias específicas de exploración para discriminar entre las señales asociadas a objetos celestes y las asociadas a transmisores en órbita o de base en Tierra.

Un híbrido de estos dos conceptos es el sistema omnidireccional que utiliza múltiples elementos pequeños para su superficie de recolección y combina las salidas para apuntar todos los haces posibles en el cielo visible, simultáneamente. Esta red de antenas radioeléctrica tendrá una sensibilidad limitada a menos que el número de elementos sea muy grande, e impone retos enormes de cálculo que todavía no son abordables.

## 10.6 Identificación de las señales y rechazo de la interferencia

La mayoría de los investigadores suponen que las señales procedentes de una civilización extraterrestre serán de banda estrecha y tal vez varíen en intensidad con el tiempo. Un problema fundamental con el que se enfrenta la detección de tales señales es la capacidad de determinar si la señal no es el resultado de ruido «natural» o artificial.

En el caso del ruido aleatorio natural, las probabilidades relacionadas con la amplitud se conocen bien. La probabilidad de que una cresta de ruido supere el umbral de la señal de búsqueda puede ser finita, aunque esa cresta quede registrada como una posible detección extraterrenal. La tasa de esas falsas detecciones dependerá del nivel de umbral adoptado y puede calcularse para el caso del ruido «blanco» gaussiano. Al elevar el umbral para rebajar la tasa de falsas alarmas se reduce la sensibilidad del receptor. Varias antenas que trabajen en unísono disminuirán la tasa de falsas detecciones. Cuando estas antenas están separadas por grandes distancias, la interferencia terrenal pierde la correlación y se reduce considerablemente.

Las señales artificiales ocupan gran parte del espectro radioeléctrico, en particular en frecuencias bajas. Las estrategias de búsqueda deben incluir la capacidad de clasificar esas señales y de rechazarlas como posibles candidatos. El rechazo puede basarse en el conocimiento previo de las señales que probablemente afecten a un observatorio o en mediciones realizadas en la propia estación. El éxito en la exclusión de esas señales interferentes de la base de datos empleada para ulteriores análisis detallados es esencial para la viabilidad de una búsqueda adecuada.

El creciente uso del espectro de radiofrecuencias por las radiocomunicaciones y otros servicios dificultará la búsqueda de la SETI en el futuro. En particular la adición rápidamente creciente de satélites en la órbita OSG impedirá cada vez más la búsqueda en una superficie del cielo situada por encima del ecuador de la Tierra en numerosas frecuencias. Conviene señalar que, desde el punto de vista de la SETI, todas las emisiones eléctricas artificiales, autorizadas o no, representan una posibilidad de interferencia en radiofrecuencia. Dadas las crecientes demandas de espectro radioeléctrico, es evidente que la búsqueda de la SETI debe realizarse lo antes posible para reducir al mínimo el problema de la interferencia radioeléctrica.

# 10.7 Bandas que pueden seleccionarse para la búsqueda

No existe un conocimiento previo de las frecuencias y otras características de las señales que pueden detectarse procedentes de civilizaciones extraterrestres, y por ello no es realista cubrir todo el espectro radioeléctrico ni siquiera la parte disponible para los observatorios situados en la superficie de la Tierra. Por consiguiente, la selección debe basarse en los supuestos calculados, limitando las bandas de frecuencia en las que se efectúa la búsqueda.

El Informe 700-1 del ex-CCIR (Düsseldorf, 1990) examina la base para seleccionar determinadas bandas de frecuencia destinadas a la búsqueda. Un aspecto común de muchas de las bandas sugeridas es la asociación con frecuencias de fenómenos de aparición natural. El supuesto de base es que las civilizaciones extraterrestres pueden elegir la transmisión en frecuencias que son corrientes en toda la Galaxia o en algunos múltiplos de esas frecuencias comunes, suponiendo que otras civilizaciones estarán también al tanto de tales frecuencias y planearán sus sistemas receptores en consecuencia. Así pues, las bandas están relacionadas con frecuencias de rayas espectrales conocidas asociadas con los átomos y moléculas interestelares más abundantes: el hidrógeno atómico (HI) a 1 420 MHz, el radical hidroxilo (OH) a 1 612, 1 665, 1 667 y 1 720 MHz y el formaldehído (H<sub>2</sub>CO) a 4 830 MHz. La región comprendida entre las rayas del hidrógeno y del hidroxilo, denominada el «agujero del agua», ha sido favorecida estimando que las formas de vida basadas en el agua pueden considerar importante esa región espectral. Incluso se ha sugerido una banda que contiene una raya espectral de 203 GHz del positronio, el átomo artificial más ligero.

Varias bandas atribuidas a los servicios de radioastronomía están protegidas contra las emisiones artificiales, así como otras bandas atribuidas a la detección pasiva. Teniendo en cuenta que están protegidas frente a la interferencia y que en muchos casos contienen rayas espectrales que aparecen ampliamente en toda la Galaxia, esas bandas constituyen opciones adecuadas para utilizar en un programa SETI.

Hay muchos puntos de vista relativos a la elección de las bandas. Sin embargo, como no existe un conocimiento previo del carácter ni siquiera de la existencia de las señales extraterrestres, las búsquedas deben abarcar una gama de frecuencias tan amplia como sea posible.

#### REFERENCIAS

- BATES, D. [1988] Radio searches for extraterrestrial civilizations. *Quarterly J. of the Royal Astronom. Soc.*, Vol. 29, p. 307-311.
- COCCONI, G. y MORRISON, P. [1959] Searching for interstellar communications. Nature, 184, p. 844-846.
- DRAKE, F. D. [1961] Project Ozma. Physics Today, Vol. 14, p. 40-46.
- DRAKE, F. D. y SOBEL, D. [1992] Is anyone out there?: The Scientific Search for Extraterrestrial Intelligence. Delacorte Press, Nueva York (Estados Unidos)
- KARDASHEV, N. S. [1964] Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations. *Soviet Astronomy*, AJ, **8**, p. 217-221.
- LAZIO, T. J. W., TARTER, J. C. y BACKUS, P. R. [julio de 2002] The META Candidates Were Not Transmissions From Intrinsically Steady Sources. *Astronomical J.*, Vol. 124, p. 560-564.
- NASA [julio de 1973] Project Cyclops. Ames Research Center, Moffett Field, California (Estados Unidos), Informe CR 114445, Edición revisada, p. 243.
- OLIVER, B. M. [1987] The windows of SETI: frequency and time in the search for extraterrestrial intelligence. *The Planetary Report*, Vol. VII, **6**, p. 23-25.
- SAGAN, C. y HOROWITZ, P. [septiembre de 1993] Five Years Of Project META: An All-Sky Narrowband Radio Search For Extraterrestrial Signals. *Astrophysical J.*, Vol. 415, **218**, p. 218-235.
- TARTER, J. C. [2001] The Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI). Annual Rev. of Astronom. and Astrophys., Vol. 39, p. 511-548.
- TROITSKY, V. S., STARODUBTSEV, A. M., GERSHTEIN, L. L y RAKHLIN, V. L. [1971] The experience of the search for monochromatic radio emission from stars in the vicinity of the Sun at a frequency of 927 mc/s. *Astronomicheskii Zhurnal*, Vol. 48, p. 645-647.
- SIEMION, A. P. V, DEMOREST, P., KORPELA, E. MADDALENA, R., WERTHIMER, D., COBB, J., HOWARD, A.W., LANGSTON, G., LEBOFSKY, M, MARCY, G.W., TARTER, J., <u>A 1.1-1.9 GHz SETI Survey of the Kepler Field. I. A Search for Narrow-band Emission from Select Targets, Astrophysical. J., Vol. 767, p. 94</u>.
- SHKLOVSKII, I. S. y SAGAN, C. [1966] Intelligent life in the Universe, Holden-Day, Inc.

# CAPÍTULO 11

# Astronomía por radar con base en tierra

### 11.1 Introducción

La astronomía por radar tiene iguales necesidades que la radioastronomía, esto es, acceso a bandas exentas de interferencia en el espectro radioeléctrico. Difiere de la radioastronomía en que es un servicio activo tanto transmisor como receptor. Igualmente difiere en que en la actualidad hay sólo tres emplazamientos transmisores activos, uno en Puerto Rico, otro en California y un tercero en Crimea, que utilizan cinco bandas comprendidas entre 430 MHz y 8 GHz (véase el Cuadro 11.1). Dado que la recepción del eco de radar puede realizarse en una antena transmisora o en una antena auxiliar, existe aproximadamente el doble de emplazamientos receptores activos que de emplazamientos transmisores. Todas las antenas transmisoras y receptoras hoy en uso se emplean también para observaciones pasivas de radioastronomía o para comunicaciones con vehículos espaciales. Ha surgido un nuevo interés por las observaciones de radar de la corona solar y se discute sobre un sistema transmisor que funcione junto con el radiotelescopio de la red de antenas de frecuencia reducida (LOFAR) previsto. No se ha seleccionado una frecuencia, pero probablemente esté comprendida entre 15 MHz y 50 MHz.

La astronomía por radar comprende el uso de sistemas de radar con base en tierra para:

- estudiar las propiedades de reflexión de la longitud de onda radioeléctrica, el tamaño y los vectores de rotación de los cuerpos sólidos grandes y pequeños del sistema solar;
- medir los desplazamientos por efecto Doppler y los retrasos de tiempo para determinar las velocidades y distancias a fin de calcular los parámetros orbitales, especialmente los de los asteroides próximos a la Tierra que pueden suponer una amenaza futura para ésta;
- estudiar el medio interplanetario y la corona solar por sus efectos sobre las señales de radar que se propagan entre ellos y mediante el estudio de las reflexiones radar en la corona solar.

Las disciplinas conexas que tienen necesidades análogas a la astronomía por radar son el estudio de la ionosfera y la atmósfera de la Tierra utilizando radares de dispersión incoherente, estratosféricos y meteóricos.

La astronomía por radar tuvo su comienzo oficial en 1946 con la detección de los primeros ecos procedentes de la Luna, pero su iniciación real como subdisciplina de la astronomía se produjo en 1961 con la detección de ecos procedentes de Venus. Poco más tarde se produjo la detección de otros planetas de nuestro sistema solar, Mercurio y Marte. Los éxitos de esos primeros años comprendieron la determinación de los periodos de rotación de Venus y Mercurio y la multiplicación por cien de nuestros conocimientos de la unidad astronómica. En esos años se hizo especial hincapié en el desarrollo de las técnicas y el instrumental de observación. [Evans y Hagfors, 1968] han descrito el desarrollo inicial de las observaciones y el instrumental [Butrica, 1996] figura la historia original de la radioastronomía por radar.

En el segundo decenio de la astronomía por radar, iniciado en los primeros años setenta, se produjo un considerable aumento de la sensibilidad de los sistemas utilizados, con la instalación del radar de 2,38 GHz en la antena de Arecibo de 305 m de diámetro, recién cambiado de emplazamiento, y las mejoras introducidas en el sistema de 8,5 GHz de la antena de 64 m de la NASA/JPL Goldstone. Al mismo tiempo cesó el funcionamiento de los sistemas de radar planetario de Jodrell Bank y Haystack, dejando dos antenas en Estados Unidos de América y una en la entonces Unión Soviética (actualmente Ucrania) como únicos emplazamientos transmisores de astronomía planetaria por radar; esa situación persiste hasta ahora, como se indica en el Cuadro 11.1.

En los 20 años transcurridos entre 1972 y 1992, la astronomía por radar efectuó numerosas contribuciones a nuestro conocimiento del sistema solar (véase una revisión [Ostro, 2002]). Se observó que las partículas de los anillos de Saturno tenían un tamaño de varios centímetros o más, se descubrieron excepcionales propiedades de dispersión de los satélites galileanos helados de Júpiter, se obtuvieron imágenes del 40% de la superficie de Venus con una resolución de 2 km, se descubrieron depósitos de hielo en los polos de Mercurio, se midieron

las propiedades de reflexión de longitudes de onda radioeléctricas en docenas de asteroides de la franja principal y cercanos a la Tierra y en varios cometas y se obtuvieron imágenes de retraso Doppler de alta resolución en dos asteroides que se acercaban a la Tierra. En lo que respecta al instrumental se introdujo la interferometría por radar para resolver la ambigüedad Norte-Sur propia de las imágenes con retraso Doppler, se desarrollaron sistemas biestáticos, en particular entre la antena de Goldstone (transmisora) y la serie muy ancha de Nuevo México (receptora) y se utilizaron sistemas de codificación de longitud seudoinfinita para superar el problema de la sobredispersión al tomar imágenes de objetivos en rápida rotación.

A mediados de los noventa, se modificó la óptica del telescopio de Arecibo para utilizar un sistema subreflector doble gregoriano a fin de corregir la aberración esférica del telescopio. También se construyó una pantalla en el suelo de 15 m de altura alrededor del perímetro del reflector primario de 305 m a fin de apantallar los receptores contra la radiación del suelo. Estas modificaciones se tradujeron en un aumento significativo de la sensibilidad del telescopio a frecuencias por encima de 1,0 GHz y en una reducción de las temperaturas del sistema. Al combinarlas con una multiplicación por dos de la potencia del transmisor en banda S, hasta 1,0 MW, estas mejoras dieron lugar a un aumento de la sensibilidad del sistema de radar en banda S de Arecibo en un factor de 10 en el cenit y un factor de más de 20 en el ángulo cenital máximo del telescopio de 20°. Casi al mismo tiempo, la mejora de los klystrons produjo una pequeña mejora de la sensibilidad del sistema radar en banda X de Goldstone. El transmisor radar planetario en banda S de Goldstone se desmontó en 2001.

A lo largo de los últimos años, los sistemas mejorados de Arecibo y Goldstone se han utilizado ampliamente para estudios de los asteroides en la Tierra próxima (NEA) y en el cinturón principal, que han dado lugar al descubrimiento de NEA binarios. Se ha utilizado la estación de Arecibo para estudiar las superficies de Titán y Jápeto, satélites de Saturno, y para obtener imágenes de los anillos de este último. Se han obtenido imágenes de resolución superior de los depósitos de hielo en los polos de Mercurio, se han efectuado observaciones altimétricas de las regiones polares de la Luna y de los depósitos superficiales en la superficie de Venus, estudiados mediante un análisis de las propiedades de polarización de los ecos reflejados.

		Sist	tema de radar				Antena receptora au	uxiliar principal
Emplazamiento	Latitud	Longitud E	Frecuencia (GHz)	Potencia media del transmisor (kW)	Ganancia de antena	Temperatura de ruido del sistema (K)	Emplazamiento	Tipo de antena
Arecibo <sup>(1)</sup> Puerto Rico	18° 21'	-66° 45'	0,430	Impulsos 150 (medio) 2 500 (cresta)	61	55		
Arecibo <sup>(1)</sup> Puerto Rico	18° 21'	-66° 45'	2,380	1 000 onda continua	73,4	26	Green Bank, West Virginia, Estados Unidos de América Goldstone, California, Estados Unidos de América St. Croix a Hawaii, Estados Unidos de América	Parábola de 100 m Parábolas de 70 m y 34 m VLBA (parábola de 10 × 25 m)
Goldstone, California, Estados Unidos de América	35° 23'	-116° 51'	8,560	470 onda continua	73	14	Socorro, Nuevo México, Estados Unidos de América Green Bank, West Virginia <sup>(2)</sup> , Estados Unidos de América	VLA (parábolas de 27 × 25 m) Parábola de 100 m
Evpatoria, Crimea, Ucrania	45° 11'	33° 11'	5,01	150 onda continua	69	45	Effelsberg, Alemania Medicina, Italia	Parábola de 100 m Parábola de 32 m
(1) El telesconi	o de Areciho	niede anintar ha	asta 20° desde la	a vertical Los na	trámetros cor	resnonden a la an	itena aniintando al cenit	

El telescopio de Arecibo puede apuntar hasta 20° desde la vertical. Los parámetros corresponden a la antena apuntando al cenit.

Se prevé una gran utilización.

0

Capítulo 11

Instalaciones de astronomía por radar

CUADRO 11.1

Radioastronomía

#### 11.2 Problemas de sensibilidad

Para alcanzar sus objetivos, esto es, el estudio de los cuerpos grandes y pequeños de nuestro sistema solar, la astronomía por radar necesita grandes antenas, transmisores de alta potencia y amplificadores del terminal receptor de muy poco ruido. Esta necesidad está dictada por la dependencia inversa de cuarta potencia de la intensidad de la señal recibida respecto a la distancia. Para una antena con una ganancia hacia delante, *G*, equipada con un transmisores de radar planetario son de ondas continuas, ya que para prácticamente la totalidad de los objetos estudiados la sensibilidad global depende de la potencia transmitida media), la potencia *P* recibida por una antena con una superficie efectiva de captación *A* después de la reflexión de un objetivo con una sección  $\sigma$  transversal a una distancia *R* del radar, está dada por la fórmula:

$$P = \frac{P_T G \sigma A}{(4 \pi R^2)^2} \tag{11.1}$$

si, como es normalmente el caso, se utiliza la misma antena, para la transmisión y la recepción para una longitud de onda  $\lambda$ , se obtiene:

$$P = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{\left(4\pi\right)^3 R^4} \tag{11.2}$$

La sensibilidad global del radar depende de la relación entre la potencia de la señal recibida y la potencia de ruido resultante de las contribuciones de ruido adicionales procedentes del cielo (el fondo de microondas y, en frecuencias inferiores, la radiación no térmica procedente de la galaxia de la Vía Láctea), la atmósfera, la radiación en el suelo, los amplificadores del terminal receptor y, evidentemente, la interferencia. La suma de esas potencias de ruido se caracteriza normalmente mediante una temperatura de sistema,  $T_s$ , que guarda relación con la potencia de ruido,  $P_N$ , mediante  $P_N = k T_s B$ , en donde k es la constante de Boltzmann y B es la anchura de banda a la frecuencia correspondiente, normalmente el ensanchamiento Doppler. Las fluctuaciones r.m.s. del ruido vienen dadas por  $P_N (\tau B)^{-1/2}$ , donde  $\tau$  es el tiempo de integración.

Ignorando las propiedades del objetivo y otras constantes:

Sensibilidad 
$$\infty \frac{P_T GA}{T_S} (\tau/B)^{1/2}$$
 (11.3)

o, en el caso de que se utilice la misma antena para la transmisión y la recepción:

Sensibilidad 
$$\propto \frac{P_T G^2 \lambda^2}{T_S} (\tau/B)^{1/2}$$
 (11.4)

Así pues, las necesidades de la astronomía por radar son muy parecidas a las de la radioastronomía (antenas grandes, amplificadores de terminal receptor de escaso ruido y ausencia de señales interferentes), asociadas al uso de transmisores de gran potencia. Dado que la ganancia, *G*, es inversamente proporcional a  $\lambda^2$ , las ecuaciones (9.1) y (9.2) implican que cuanto más alta sea la frecuencia mayor será la sensibilidad.

### 11.3 Modos operacionales y necesidades de anchura de banda

Tanto las ondas continuas como las formas de onda moduladas se utilizan en astronomía por radar, dependiendo de la elección de la naturaleza del objeto objetivo y de los fines del experimento. En los experimentos con ondas continuas, en los que se transmite una señal monocromática, la señal reflejada está ensanchada por el efecto Doppler debido a la velocidad angular rotacional  $\Omega$  rad/s del objetivo, estando el ensanchamiento dado por la fórmula:

$$\Delta v = \frac{4a\Omega v_0}{c} \operatorname{sen} \theta \tag{11.5}$$

siendo:

- a: radio
- $v_0$ : frecuencia transmitida
- c: velocidad de la luz
- $\theta$ : ángulo entre el eje de rotación y la línea de visibilidad directa del radar.

Normalmente se transmite una onda de polarización circular y el examen del espectro de las señales reflejadas en los dos sentidos de la polarización circular recibida proporciona información respecto al albedo del radar (la relación de polarización que guarda conexión con la rugosidad de la superficie de escala de la longitud de onda), el periodo de rotación, etc. Si bien el cambio de frecuencia de la señal transmitida cada pocos segundos puede utilizarse para mejorar la detectabilidad de la señal recibida, las anchuras de banda totales utilizadas para la transmisión y recepción en el caso de las «ondas continuas» rara vez pasan de algunos decenios de kilohertzios.

Se utilizan imágenes bidimensionales (retraso Doppler) para representar gráficamente las propiedades de reflexión de la longitud de onda radioeléctrica en la superficie de los planetas de la Tierra, los asteroides y, es de esperar que en el futuro, los cometas. La modulación necesaria de la señal transmitida puede lograrse por modulación de impulsos, que es una combinación de dos. Algunos sistemas iniciales estaban sometidos a impulsos, pero todos los recientes usan la onda continua pues la sensibilidad depende normalmente de la potencia transmitida media y es más fácil y barato obtener potencias medias altas con transmisores de ondas continuas. Por ello, los sistemas modernos modulan en fase una señal de onda continua utilizando una modulación bifásica basada en los códigos de registro de desplazamiento máximo repetitivo de la longitud. Las propiedades de las funciones de autocorrelación de esos códigos hacen que sean ideales para aplicaciones de radar planetario. En la actualidad, el intervalo básico más breve utilizado de rutina para cambiar la fase entre dos estados separados por 180° es de 0,1 µs, correspondiente a una resolución de gama de 15 m. La anchura de banda del receptor necesaria cuando se utiliza un intervalo de cambio de 0,1 µs es de 20 MHz aproximadamente, que determina las necesidades actuales de la astronomía por radar. El desplazamiento por efecto Doppler debido al movimiento relativo del objetivo y de la tierra puede mover la banda receptora en relación con la frecuencia del transmisor hasta varios MHz. Es evidente que la fuerte interferencia situada justamente fuera de los límites de esa banda puede producir una importante degradación de la calidad de funcionamiento del receptor.

### 11.4 Instalaciones de astronomía por radar

Como servicio activo con estrictas necesidades de bandas exentas de interferencia en el espectro radioeléctrico, la astronomía por radar tiene iguales necesidades que la radioastronomía, pero sin el acceso a bandas protegidas. Hasta la fecha, se han elegido las frecuencias basándose en consideraciones tales como la disponibilidad de clistrones de alta potencia o, como sucede en el caso de la instalación de 8,5 GHz de Goldstone, en la necesidad de transmisores de alta potencia para otros fines, como son las comunicaciones con vehículos espaciales.

El Cuadro 11.1 presenta los sistemas actualmente utilizados para la astronomía planetaria por radar. Los dos más sensibles son el sistema de 8,5 GHz de la antena de 70 m, perteneciente a la red del espacio lejano de la NASA/JPL, emplazado en Goldstone (California), y el sistema de 2,4 GHz, situado en el sistema radioeléctrico/de radar de 305 m de Arecibo, emplazado en Puerto Rico y operado por SRI International, USRA y UMET, según un acuerdo de cooperación con la Fundación Nacional de Ciencias (NSF) de los Estados Unidos de América y apoyo de la NASA para el programa planetario.

#### REFERENCIAS

- BUTRICA, A. J. [1996] *To See the Unseen: A History of Planetary Radar Astronomy*. NASA SP-4218, NASA History Office.
- EVANS, J. V. y HAGFORS, T., Ed. [1968] Radar Astronomy, McGraw-Hill.
- OSTRO S. J. [2002] *Planetary radar astronomy. Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edition, Vol. 12, p. 295-327, Academic Press.

# Cuadro de bandas de frecuencias atribuidas a la radioastronomía

Columna 1: indica los límites de frecuencia de las bandas.

- Columna 2: indica si la atribución es a título primario (P) o secundario (S). Las bandas para los servicios pasivos se indican con (Pas); en estas bandas están prohibidas todas las transmisiones, con algunas excepciones nacionales. Otras atribuciones están compartidas con los servicios activos (transmisores).
- Columna 3: indica los casos en que la atribución está limitada a ciertas regiones, pero no da detalles completos sobre todas las excepciones nacionales, etc. Véanse esos detalles en la última edición del RR. También se indican algunas de las rayas importantes.

Véase, no obstante, que se conocen más de 10 000 rayas (ver § 2.4.1) y que por encima de 40 GHz hay numerosas rayas en todas las bandas.

Gamas de frecuencias (MHz)	Categoría	Observaciones
(1)	(2)	(3)
13,36-13,41	Р	
25,55-25,67	P (Pas)	
37,50-38,25	s	
73,00-74,60	Р	Región 2
150,05-153,00	Р	Región 1, Australia, India
225,00-235,00	8	China (Número 5.250 del RR)
322,00-328,60	Р	Raya del deuterio
406,10-410,00	Р	
606,00-608,00	Р	China y la zona africana de radiodifusión
608,00-614,00	Р	Región 2, China, India, y la zona africana de radiodifusión
	S	Regiones 1 (salvo la zona africana de radiodifusión) y 3
1 400,00-1 427,00	P (Pas)	Raya del hidrógeno
1 610,60-1 613,80	Р	Raya del OH
1 660,00-1 670,00	Р	Rayas del OH
1718,80-1722,20	8	Raya del OH
2655,00-2690,00	s	
2 690,00-2 700,00	P (Pas)	
4 800,00-4 990,00	8	Raya del H <sub>2</sub> CO; 4 825-4 835 MHz y 4 950-4 990 MHz son
		primarios en Argentina, Australia y Canadá (Número 5.443 del RR)
4 990,00-5 000,00	Р	

Gamas de frecuencias (MHz)	Categoría	Observaciones
(1)	(2)	(3)
10,60-10,68	Р	
10,68-10,70	P (Pas)	
14,47-14,50	S	Rayas del H <sub>2</sub> CO
15,35-15,40	P (Pas)	
22,21-22,50	Р	Rayas del H <sub>2</sub> O
23,60-24,00	P (Pas)	Rayas del NH <sub>3</sub>
31,30-31,50	P (Pas)	
31,50-31,80	Р	Pasivo (Pas) en la Región 2
42,50-43,50	Р	Rayas del SiO
48,94-49,04	Р	Raya del CS
76,00-77,50	Р	
77,50-79,00	S	
79,00-86,00	Р	
86,00-92,00	P (Pas)	Rayas del SiO
92,00-94,00	Р	Raya del N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>
94,00-94,10	S	
94,10-100,00	Р	Raya del CS
100,00-102,00	P (Pas)	
102,00-109,50	Р	
109,50-111,80	P (Pas)	Rayas del CO
111,80-114,25	Р	Raya del CO
114,25-116,00	P (Pas)	Raya del CO
123,00-130,00	S	
	Р	Corea (128-130 GHz, rayas SiO) Número 5.562D del RR
130,00-134,00	Р	
134,00-136,00		
136,00-148,50	Р	Raya del CS
148,50-151,50	P (Pas)	
151,50-158,50	Р	
164,00-167,00	P (Pas)	
171,00-171,60,	Р	Corea Número 5.562D del RR
172,20-172,80		
182,00-185,00	P (Pas)	Raya del H <sub>2</sub> O
200,00-209,00	P (Pas)	-
209,00-226,00	P	Rayas del CO
226,00-231,50	P (Pas)	Raya del CO
241,00-248,00	Р	Rayas del CS
248,00-250,00	s	
250,00-252,00	P (Pas)	
252,00-275,00	Р	Rayas del HCN, HCO <sup>+</sup>

Además de esas atribuciones, el número **5.149** del RR insta a las administraciones a tomar todas las medidas prácticamente posibles para proteger el servicio de radioastronomía contra la interferencia perjudicial en las siguientes bandas:

13 360-13 410 kHz,	4 950-4 990 MHz,	102-109,5 GHz,
25 550-25 670 kHz,	4 990-5 000 MHz,	111,8-114,25 GHz,
37,5-38,25 MHz,	6 650-6 675,2 MHz,	128,33-128,59 GHz,
73-74,6 MHz en las Regiones 1 y 3,	10,6-10,68 GHz,	129,23-129,49 GHz,
150,05-153 MHz en la Región 1,	14,47-14,5 GHz,	130-134 GHz,
322-328,6 MHz,	22,01-22,21 GHz,	136-148,5 GHz,
406,1-410 MHz,	22,21-22,5 GHz,	151,5-158,5 GHz,
608-614 MHz en las Regiones 1 y 3,	22,81-22,86 GHz,	168,59-168,93 GHz,
1 330-1 400 MHz,	23,07-23,12 GHz,	171,11-171,45 GHz,
1 610,6-1 613,8 MHz,	31,2-31,3 GHz,	172,31-172,65 GHz,
1 660-1 670 MHz,	31,5-31,8 GHz en las Regiones 1 y 3,	173,52-173,85 GHz,
1 718,8-1 722,2 MHz,	36,43-36,5 GHz,	195,75-196,15 GHz,
2 655-2 690 MHz,	42,5-43,5 GHz,	209-226 GHz,
3 260-3 267 MHz,	48,94-49,04 GHz,	241-250 GHz,
3 332-3 339 MHz,	76-86 GHz,	252-275 GHz
3 345,8-3 352,5 MHz,	92-94 GHz,	
4 825-4 835 MHz,	94,1-100 GHz,	

# A frecuencias por encima de 275 GHz, no existen atribuciones de bandas del UIT-R. Sin embargo, en la CMR-2012 se aprobó la siguiente disposición mediante el número 5.565 del RR:

**5.565** Se han identificado las siguientes bandas de frecuencias en la gama 275-1 000 GHz para que las administraciones las utilicen en aplicaciones de servicios pasivos:

- servicio de radioastronomía: 275-323 GHz, 327-371 GHz, 388-424 GHz, 426 442 GHz, 453 510 GHz, 623-711 GHz, 795-909 GHz y 926-945 GHz;
- servicio de exploración de la Tierra por satélite (pasivo) y servicio de investigación espacial (pasivo): 275-286 GHz, 296-306 GHz, 313-356 GHz, 361-365 GHz, 369-392 GHz, 397 399 GHz, 409-411 GHz, 416-434 GHz, 439 467 GHz, 477-502 GHz, 523-527 GHz, 538 581 GHz, 611 630 GHz, 634 654 GHz, 657-692 GHz, 713-718 GHz, 729-733 GHz, 750 754 GHz, 771 776 GHz, 823-846 GHz, 850-854 GHz, 857-862 GHz, 866-882 GHz, 905 928 GHz, 951-956 GHz, 968-973 GHz y 985-990 GHz.

La utilización de frecuencias de la gama 275-1 000 GHz por los servicios pasivos no excluye la utilización de esta gama por los servicios activos. Se insta a las administraciones que deseen poner a disposición las frecuencias en la gama 275-1 000 GHz para aplicaciones de los servicios activos a que adopten todas las medidas posibles para proteger los citados servicios pasivos contra la interferencia perjudicial hasta la fecha en que se establezca el Cuadro de atribución de frecuencias en la gama de frecuencias 275-1 000 GHz antes mencionada.

Todas las frecuencias en la gama 1 000-3 000 GHz pueden ser utilizadas por los servicios activos y pasivos. (CMR-12)

# Inscripción de las estaciones de radioastronomía

Es muy importante que las administraciones que explotan estaciones de radioastronomía las inscriban en la Oficina de Radiocomunicaciones (BR) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

La inscripción ofrece una serie de ventajas:

- Otorga protección contra la interferencia cocanal cuando las observaciones se realizan en bandas compartidas que se atribuyen al servicio de radioastronomía con carácter primario, especialmente cuando la protección transfronteriza es importante.
- Otorga la protección que ofrecen varias notas del Reglamento de Radiocomunicaciones a las estaciones de radioastronomía contra las emisiones no deseadas de los satélites. Por ejemplo, el número 5.511A dice:

« ... Para proteger al servicio de radioastronomía en la banda 15,35-15,4 GHz, la densidad de flujo de potencia combinada radiada en la banda 15,35-15,4 GHz por todas las estaciones espaciales de cualquier sistema de enlaces de conexión (espacio-Tierra) de un sistema de satélites no geoestacionarios del servicio móvil por satélite que funcione en la banda 15,43-15,63 GHz no deberá rebasar  $-156 \text{ dB}(\text{W/m}^2)$  en una anchura de banda de 50 MHz, en el emplazamiento de cualquier observatorio de radioastronomía durante más del 2% del tiempo.»

Al examinar la conformidad de un sistema de satélites con dicha nota, la BR considerará únicamente las estaciones de radioastronomía que estén inscritas. Su inscripción:

- permitirá que una estación de radioastronomía sea tenida en cuenta por los que planifican el establecimiento de nuevos transmisores en su proximidad. La inscripción internacional es particularmente importante cuando una estación está situada en las proximidades de una frontera nacional y puede ser necesaria o conveniente la coordinación bilateral o multilateral.
- establecerá prioridad cronológica para la estación inscrita. Al inscribirse, las estaciones de radioastronomía que efectúan sus observaciones en ciertas bandas (por ejemplo, la de 15,35-15,4 GHz) pueden reclamar la protección contra las emisiones no deseadas de los sistemas de satélite notificados para un funcionamiento en las bandas adyacentes o próximas en fecha posterior.

El registro de las estaciones de radioastronomía debe efectuarse a través de la autoridad de telecomunicaciones de las administraciones nacionales. Las características de la estación de radioastronomía que deben facilitarse se describen en el Anexo 2, Apéndice **4** del Reglamento de Radiocomunicaciones.

Partes del RR, y en particular los parámetros necesarios para la inscripción de una estación de radioastronomía pueden ser modificados en cada CMR. Por ejemplo, la CMR-03 añadió varios parámetros nuevos a los necesarios para inscribir una estación de radioastronomía (tales como el ángulo mínimo de elevación con el que un radiotelescopio puede realizar sus observaciones, necesario para calcular la densidad de flujo de potencia combinada de las estaciones espaciales en un sistema de satélites no geoestacionarios a la que se refiere el número **5.511A**). Debe consultarse la versión más reciente del RR antes de inscribir una estación específica.

La mayoría de las estaciones de radioastronomía efectúan observaciones en gamas de espectro que son más anchas que las atribuidas a la radioastronomía. Cuando se inscriban estaciones de radioastronomía, hay que tener cuidado en desglosar las gamas de frecuencias de observación en aquellos tramos que estén atribuidos a la radioastronomía a título primario y aquellos que no, ya que la protección de la estación se aplica únicamente en las bandas primarias de la radioastronomía. Por ejemplo, si una estación explota un receptor que abarca la gama 15-16 GHz, la estación debe inscribirse en tres bandas de frecuencias:

- 15,00-15,35 GHz en la que no hay protección;
- 15,35-15,40 GHz en la que se aplica el número **5.511A** y
- 15,40-16,00 GHz en la que no se aplica la protección.

Si se inscribe la banda 15,00-16,00 GHz como una sola entidad, no se ofrecerá protección en ningún tramo de ésta. La inscripción de gamas de espectro que no reciban protección puede seguir siendo útil con fines de planificación y coordinación.

# Unidades utilizadas en la radioastronomía

Los radioastrónomos utilizan varias unidades y especificaciones que son distintas de las utilizadas en la mayor parte de los demás servicios. El objeto de este apéndice es ofrecer una traducción del lenguaje utilizado por los radioastrónomos al utilizado por otros servicios, especialmente en lo que se refiere a la intensidad de la señal y a la ganancia de la antena.

### Intensidad de la señal

Los radioastrónomos especifican la intensidad de la señal en unidades de janskys (cuya abreviatura es Jy). Esta unidad recibe su nombre de Karl Jansky, descubridor de las señales radioeléctricas cósmicas. El Jy es una unidad de potencia por unidad de superficie por unidad de anchura de banda (es decir, densidad de flujo espectral de potencia):

$$1 \text{ Jy} \equiv 10^{-26} \text{ W/(m^2 Hz)}$$

Varios son los factores que obligan a los radioastrónomos a expresar la intensidad de la señal en Jy:

- Las señales radioastronómicas son muy débiles y por ello el valor de los Jy es muy pequeño.
- Los radioastrónomos utilizan una diversidad de antenas diferentes con distintas superficies colectoras. Para poder comparar las intensidades de señal medidas en las distintas antenas, el Jy expresa la intensidad de señal por unidad de superficie de la antena receptora. Gracias a la normalización por unidad de superficie por unidad de anchura de banda, el Jy permite comparar directamente las intensidades de señal medidas entre los diferentes radiotelescopios.
- Muchas señales radioastronómicas son de banda ancha (por ejemplo, las emisiones térmicas de un gas caliente), por lo que la potencia recibida depende de la anchura de banda total del receptor. El Jy lo tiene en cuenta expresando la intensidad de la señal por unidad de anchura de banda.

Muchos servicios de radiocomunicación sólo expresan la intensidad de la señal en términos de potencia. Una unidad común es el dBm o decibelios por encima de 1 mW. El dBm es una unidad logarítmica que resulta útil gracias que puede expresar muchos órdenes de magnitud de intensidad de las señales radioeléctricas terrenales, sobre todo porque el dBm puede utilizarse para expresar potencia tanto transmitida como recibida, lo que puede variar en 200 dB o más. En cambio, las intensidades de señal en la radioastronomía no varían en un intervalo tan amplio – una fuente de 1 Jy es muy intensa y las sensibilidades normales de los radiotelescopios descienden al nivel del microjansky ( $\mu$ Jy) o tan sólo de un intervalo total de 60 dB.

Aunque el Jy (densidad espectral de flujo de potencia) y el dBm (potencia) son dos unidades distintas, pueden compararse en determinadas hipótesis. Un Jy se convierte a potencia multiplicando por la anchura de banda del receptor y la superficie colectora eficaz de la antena. La siguiente tabla permite comparar ambos suponiendo una anchura de banda propia de algunas señales terrenales comunes y que el área colectora de la antena corresponde al área colectora isótropa,  $\lambda^2/4\pi$ :

Potencia (en mW) = Densidad de flujo espectral de potencia (en Jy) \*  $10^{-26}$  W/(m<sup>2</sup> Hz) \* 1000 mW/W \* anchura de banda (Hz) \* [Longitud de onda (m)]<sup>2</sup> ÷  $4\pi$ 

Potencia (dBm) =  $10 * \log_{10}$ [Potencia (mW)]

Tipo de señal	Anchura de banda	Frecuencia/Longitud de onda	dBm correspondientes a 1 Jy
Móvil terrestre	12,5 kHz	450 MHz/0,67 m	1 Jy = -204 dBm
GSM	200 kHz	1 800 MHz/0,17 m	1 Jy = -204 dBm
DVB-T	8 MHz	500 MHz/0,6 m	1 Jy = -176 dBm
LTE	10 MHz	2 655 MHz/0,11 m	1 Jy = -190 dBm
Wi-Fi	40 MHz	5 300 MHz/0,06 m	1 Jy = -190 dBm

- 149 -

Para comprender mejor el significado de estos números, hay que aclarar que la sensibilidad del terminal GSM de referencia es -111 dBm (según las especificaciones GSM), por consiguiente, una señal de 1 Jy está 93 dB por debajo del límite de sensibilidad GSM, mientras que una señal de 1 µJy está aproximadamente 153 dB por debajo del límite de la sensibilidad GSM. Un radiotelescopio puede ser más sensible que un receptor GSM en más de 15 órdenes de magnitud.

Un radioastrónomo que intente convertir la intensidad de la señal terrenal en su equivalente en Jy puede encontrar ocasionalmente intensidades de señal expresadas en microvoltios por metro ( $\mu$ V/m), o en su equivalente en decibelios, dB( $\mu$ V/m)<sup>12</sup>. Se trata simplemente de una medida de la intensidad del campo eléctrico (E), por lo que puede utilizarse la Ley de Ohm para convertir E a una potencia equivalente: P(W/m<sup>2</sup>) = E<sup>2</sup>/Z<sub>0</sub>, siendo Z<sub>0</sub> = 377 Ω la impedancia del espacio libre. Las intensidades del campo eléctrico (en vez de la potencia) se suelen encontrar en los trabajos sobre CEM, por ejemplo, en las normas para los dispositivos sin licencia de la Federal Communications Commission de EE.UU. Sin excesivas complicaciones algebraicas, se pueden efectuar las conversiones siguientes:

$$\begin{split} P(mW) &= 1,9x10^{-8} * [E(\mu V/m)]^2 * [f(MHz)]^{-2} \\ P(dBm) &= -77,2 + E[dB(\mu V/m)] - 20*log_{10}[f(MHz)] \end{split}$$

Esta conversión también figura en el informe UIT-R RA.2131 en el que se facilitan los umbrales de protección para las observaciones del SRA en términos de sus equivalentes de campo eléctrico.

#### Las antenas

Los radioastrónomos suelen convertir la densidad de flujo de potencia o la densidad espectral de flujo de potencia (medidas, ambas, de la potencia o de la densidad espectral de potencia por unidad de superficie) en potencia total. Por consiguiente, la superficie colectora eficaz de la antena es una expresión más útil de la calidad de funcionamiento de la antena que su ganancia. La superficie colectora eficaz de la antena  $A_e$  es una combinación de la superficie geométrica colectora  $A_g$  (en el caso de que se haya definido) y la eficiencia de apertura  $\eta_a$ :  $A_e = \eta_a A_g$ . Una expresión común de la ganancia de una antena radioastronómica es el aumento de temperatura del receptor (en Kelvin) atribuible a la captura de potencia en una sola polarización procedente de una fuente de densidad de flujo total (F) de 1 Jy. Éste se denomina ganancia de la antena (G) en K/Jy. Para efectuar la conversión entre  $A_e$  y G:

$$\frac{1}{2}FA_{e} = k_{\rm B}\Delta T_{\rm K}$$
$$A_{e}({\rm m}^{2}) = \frac{2k_{\rm B}\Delta T_{\rm K}}{10^{-26}F_{\rm Iy}} = 2760 \ G({\rm K/Jy})$$

siendo k<sub>B</sub> la constante de Boltzmann.

Los servicios de radiocomunicación especifican normalmente la calidad de funcionamiento básica de la antena mediante una expresión diferente de la ganancia de la antena: la cantidad por la cual la intensidad de la señal a la salida de la antena aumenta (o disminuye) con respecto a la intensidad de la señal que se obtendría a la

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Obsérvese que dB( $\mu$ V/m) = 20\*log10( $\mu$ V/m), y no 10\* log10( $\mu$ V/m), debido a que se trata de un valor de campo eléctrico y no de un valor de potencia.

salida de una antena de referencia normalizada, suponiendo que la señal estuviera en el lóbulo principal de la antena de referencia. La antena de referencia más común es la antena isótropa. La zona colectora eficaz A<sub>e</sub> de una antena isótropa viene dada por  $\lambda^2/4\pi = 7162/[f(MHz)]^2$ , por consiguiente, la zona colectora eficaz de una antena con una ganancia lineal de G (con respecto a la isótropa) viene dada por Ae = G(isótropa) \* 7162/[f(MHz)]^2. Igualando la zona eficaz basada en G (K/Jy) con la basada en la ganancia lineal relativa a la isótropa:

$$G(\text{isótropa})\frac{7162}{f_{\text{MHz}}^2} = 2760 \ G(\text{K/Jy})$$
$$G(\text{isótropa}) = 0.4 \ f_{\text{MHz}}^2 \ G(\text{K/Jy})$$

En unidades logarítmicas:

$$G(dBi) = -4 + 20\log_{10}(f_{MHz}) + 10\log_{10}[G(K/Jy)]$$

A su vez:

$$G(K/Jy) = 2.5 f_{MHz}^{-2} 10^{G(dBi)/10}$$

En el siguiente cuadro se presentan algunos ejemplos de ganancias de antena, expresadas en ambas unidades:

Antena	Frecuencia (MHz)	G (K/Jy)	Ganancia (dBi)	A <sub>e</sub> (m <sup>2</sup> )
Estación de base celular	1 800	2,5x10 <sup>-5</sup>	15	0,07
Observatorio de Medicina, Italia	1 400	0,12	50	331
Observatorio de Arecibo, Puerto Rico	1 400	11	69	30 360

# Utilización práctica de la escala de dB

El decibelio (dB) es una unidad logarítmica que indica la relación de una magnitud física (normalmente de una potencia o intensidad) con respecto a un nivel de referencia específico o supuesto. Una relación en decibelios es diez veces el logaritmo decimal de la relación de dos magnitudes de potencia (según la definición del IEEE). Un decibelio es un décimo de bel, unidad, esta última, rara vez utilizada a la que se dio ese nombre en honor de Alexander Graham Bell.

El decibelio se utiliza en una amplia diversidad de mediciones en ciencia e ingeniería, fundamentalmente en acústica, electrónica y teoría de control. En el campo de la electrónica, se suelen expresar en decibelios la ganancia de los amplificadores, la atenuación de las señales y la relación señal/ruido. El decibelio tiene varias ventajas, entre ellas la capacidad de representar convenientemente números muy grandes o muy pequeños, y la posibilidad de realizar multiplicaciones de relaciones con una sencilla suma o resta.

(Lo anterior se basa en un artículo mucho más extenso de Wikipedia que puede consultarse para utilizar, por ejemplo, dBm y dBW, relaciones en milivatios y vatios).

### Utilización del dB para una precisión del 1%

La mayoría de nosotros conocemos la escala logarítmica de los decibelios:

Factor	dB
1/1000	-30
1/100	-20
1/10	-10
1	0
10	10
100	20
1000	30
Etc.	

sin embargo, pocos saben que 11 dB es  $4\pi$  y que 14 dB es un factor de 25, ambos con una precisión del 1%.

Un par de coincidencias numéricas, 3 dB  $\approx$  2 y 5 dB  $\approx$   $\pi$ , permiten obtener el siguiente cuadro con una precisión del 1%:

Factor	dB	Error
1	0	0
1,25	1	0,7%
π/2	2	0,9%
2	3	-0,2%
2,5	4	0,5%
π	5	0,7%
4	6	-0,5%
5	7	0,2%
2π	8	0,4%
8	9	-0,7%
10	10	0
4π	11	0,2%
16	12	0,95%
20	13	-0,2%
25	14	0,5%
Etc.		

Este cuadro es bastante fácil de memorizar y permite efectuar cálculos rápidos con un margen de error del 1%.

### Otras escalas logarítmicas

El neper, unidad de relaciones logarítmicas alternativo, utiliza el logaritmo natural (de base e).

Los decibelios y los neperios no son las primeras escalas logarítmicas. Los astrónomos han utilizado 'magnitudes' desde la antigüedad, para definir la mínima diferencia de brillo de las estrellas, fácilmente distinguible a simple vista. En los tiempos modernos esto se ha definido de modo que una diferencia de +5 magnitudes corresponda a una reducción del brillo en un factor de 100. Por ello, la magnitud +1 coincide exactamente con -4 dB.

# Lista de acrónimos

A/D	Analógico a digital
AIPS	Sistema de procesamiento de imágenes astronómicas (Astronomical Image Processing System)
ALMA	Gran red de antenas milimétricas/submilimétricas de Atacama (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)
ANC	Supresión de ruido adaptable (Adaptive Noise Cancellation)
ASTRO	Telescopio submilimétrico y observatorio remoto de la Antártida (Antarctic Sub-millimetre Telescope and Remote Observatory)
ATA	Red de telescopios Allen (Allen Telescope Array)
BIMA	Asociación Berkeley-Illinois-Maryland (Berkeley-Illinois-Maryland Association)
BNetzA	Agencia Federal de Redes (Bundesnetzagentur)
BPL	Banda ancha sobre líneas de distribución de energía eléctrica (Broadband over Powerlines)
MDP-2	Modulación por desplazamiento de fase bivalente
BR	Oficina de Radiocomunicaciones (Bureau des radiocommunications)
SRS	Servicio de radiodifusión por satélite
CARA	Centro de investigación astrofísica de la Antártida (Center for Astrophysical Research in Antarctica)
CARMA	Red combinada para investigación en astronomía de ondas milimétricas ( <i>Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy</i> )
CCIR	Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones
CCV	Comité de Coordinación de Vocabulario
CISPR	Comité Especial Internacional sobre Interferencia Radioeléctrica (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques)
СМВ	Radiación cósmica del fondo de microondas (the Cosmic Microwave Background)
СМЕ	Eyección de masa coronal (Coronal Mass Ejection)
CORF	Comité sobre Radiofrecuencias de la Academia Nacional de Ciencias ( <i>Committee on Radio Frequencies of the National Academy of Sciences</i> )
COSPAR	Comité sobre Investigación Espacial (Committee on Space Research)
RPC	Reunión Preparatoria de la Conferencia
CRAF	Comité de Frecuencias de Radio Astronomía (Committee on Radio Astronomy Frequencies)
CRF	Marco de referencia celestial (Celestial Reference Frame)
СТ	Topografía computerizada (Computed Tomography)
CW	Onda continua (Continuous Wave)
dB	Decibelio
ADN	Ácido desoxirribonucleico
DVB-T	Radiodifusión de vídeo digital-terrenal (Digital Video Broadcasting - Terrestrial)
SETS	Servicio de exploración de la Tierra por satélite

p.i.r.e.	Potencia radiada isótropa efectiva o potencia radiada isótropa equivalente
СЕМ	Compatibilidad electromagnética
EOP	Parámetro de orientación de la Tierra (Earth Orientation Parameter)
dfpe	Densidad de flujo de potencia equivalente
ESA	Agencia Espacial Europea (European Space Agency)
UE	Unión Europea
FET	Transistor de efecto campo (Field Effect Transistor)
FFT	Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)
FPA	Red de elementos de plano focal (Focal plane array)
SFS	Servicio fijo por satélite
FX	Transformada de Fourier antes de multiplicación
FET GaAs	Transistor de efecto campo de arseniuro de galio (Gallium Arsenide Field Effect Transistors)
GBT	Telescopio de Green Bank (Green Bank Telescope)
GHz	Gigahercio (= 1 000 000 000 Hercios)
GMRT	Radiotelescopio gigante de ondas métricas (Giant Metrewave Radio Telescope)
MDMG	Modulación por desplazamiento mínimo gausiano
GNSS	Sistema de satélites de navegación mundial (Global Navigation Satellite System)
GPS	Sistema mundial de determinación de la posición (Global Positioning System)
GSM	Sistema mundial para comunicaciones móviles (Global System for Mobile Communications)
OSG	Órbita geoestacionaria (Geo-Stationary Orbit)
HI	Hidrógeno neutro
HII	Hidrógeno ionizado
НЕМТ	Transistor de alta movilidad electrónica (High Electron Mobility Transistor)
HF	Banda de ondas decamétricas (High Frequency)
UAI	Unión Astronómica Internacional
CIUS	Consejo Internacional de Uniones Científicas (Conseil International des Unions Scientifiques)
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, Inc. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.)
FI	Frecuencia Intermedia
INR	Relación interferencia/ruido (Interference to Noise Ratio)
ISAS	Instituto de Ciencias Espaciales y Aeronáuticas (Institute of Space and Astronautical Science)
ICM	(aplicaciones) industriales, científicas y médicas (Industrial, Scientific and Medical)
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UIT-R	Sector de Radiocomunicaciones de la UIT
UIT-T	Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT
IUCAF	Comité Interuniones para la Atribución de Frecuencias a la Radioastronomía y la Ciencia Espacial (Inter-Union Commission for the Allocation of Frequencies for Radio Astronomy and Space Science)
IVS	Servicio Internacional VLBI para Geodesia y Astronomía (International VLBI Service for Geodesy and Astronomy)
JAXA	Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (Japan Aerospace Exploration Agency)

JPL	Laboratorio de propulsión a chorro (Jet Propulsion Laboratory)
Jy	Jansky (= 1 x $10^{-26}$ W/m <sup>2</sup> /Hz = -260 dB(W/m <sup>2</sup> /Hz)))
kHz	Kilohercio (= 1 000 Hertz)
LAN	Red de área local (Local Area Network)
LEO	Órbita terrena baja (Low Earth Orbit)
LOFAR	Red de elementos de baja frecuencia (Low Frequency Array)
LoS	Visibilidad directa (Line of Sight)
LTE	Evolución a largo plazo (Long Term Evolution)
MHz	Megahercio (= 1 000 000 Hercios)
MPIfR	Max Planck Institut für Radioastronomie
SMS	Servicio móvil por satélite
MWA	Red de antenas de Murchison Widefield (Murchison Widefield Array)
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (National Aeronautics and Space Administration)
NDACC	Red para la detección del cambio de composición de la atmósfera (Network for Detection of Atmospheric Composition Change)
NEA	Asteroide próximo a la Tierra (Near Earth Asteroid)
NEO	Objeto próximo a la Tierra (Near Earth Object)
NIR	Próximo al infrarrojo (Near Infrared)
NRAO	Observatorio Radioastronómico Nacional (National Radio Astronomy Observatory)
NRC	Consejo de Investigación Nacional (National Research Council)
NSF	Fundación Nacional de la Ciencia (EE.UU.) (National Science Foundation (USA))
OoB	Fuera de banda (Out-of-Band)
OVRO	Radioobservatorio de Owens Valley (Owens Valley Radio Observatory)
pc	parsec(= $3,09x10^{16}$ m = $3.26$ años luz)
PET	Tomografía por emisión de positrones (Positron Emission Tomography)
dfp	Densidad de flujo de potencia
PLC	Comunicaciones por línea de distribución de energía eléctrica (Power Line Communications)
PLT	Telecomunicaciones por línea de distribución de energía eléctrica (Power Line Telecommunications)
MDP	Modulación por desplazamiento de fase
AR	Asamblea de Radiocomunicaciones
RAFCAP	Comité de Frecuencias de la Radioastronomía en la Región Asia-Pacífico (the Radio Astronomy Frequency Committee in the Asia-Pacific Region)
GAR	Grupo Asesor de Radiocomunicaciones
SRA	Servicio de Radioastronomía
RF	Radiofrecuencia
RFI	Interferencia en radiofrecuencia (Radio Frequency Interference)
SRL	Servicio de radiolocalización
rms	Valor cuadrático medio (Root Mean Square)
SRNS	Servicio de radionavegación por satélite

RQZ	Zona de silencio radioeléctrico (Radio Quiet Zone)
RR	Reglamento de Radiocomunicaciones
RRB	Junta del Reglamento de Radiocomunicaciones (Radio Regulations Board)
CEARP	Comisión Especial para Asuntos Reglamentarios y de Procedimiento (Special Committee for Regulatory and Procedural Matters)
SETI	Búsqueda de inteligencia extraterrestre (Search for ExtraTerrestrial Intelligence)
GCFE	Grupo de Coordinación de Frecuencias Espaciales
CE	Comisión de Estudio (Study Group)
SIS	Superconductor aislante superconductor (Superconductor Insulator Superconductor)
SKA	Red de antenas de 1 km <sup>2</sup> (Square Kilometer Array)
SMA	Red de antenas submilimétricas (the Submillimeter Array)
SNR	Relación señal/ruido (=S/N) (Signal to Noise Ratio)
SNR	Resto de supernova (Supernova Remnant)
SOE	Servicio de Operaciones Espaciales
defp	Densidad espectral de flujo de potencia
SRI	Instituto de Investigación de Stanford (Stanford Research Institute)
SIE	Servicio de Investigación Espacial (Space Research Service)
THz	Terahercio (= 1 000 000 000 hercios)
TRF	Marco de referencia terrenal (the Terrestrial Reference Frame)
UHF	Banda de ondas decimétricas (Ultra High Frequency)
UMET	Universidad Metropolitana (Universidad Metropolitana)
URSI	Unión Radiocientífica Internacional (Union Radio-scientifique International)
USRA	Asociación de Universidades de Investigación Espacial (Universities Space Research Association)
UWB	Banda ultraancha (Ultra-Wide Band)
VHF	Banda de ondas métricas (Very High Frequency)
VLA	Red de antenas muy grande (Very Large Array)
VLBA	Red de antenas de línea de base muy grande (Very Long Baseline Array)
VLBI	Interferometría de línea de base muy grande (Very Long Baseline Interferometry)
VSOP	Programa del observatorio espacial VLBI (VLBI Space Observatory Programme)
CAMR	Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones
Wi-Fi	Fidelidad inalámbrica (Wireless Fidelity)
WMAP	Sonda anisótropa de microondas Wilkinson (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)
GT	Grupo de Trabajo
CMR	Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones
WSRT	Radiotelescopio de síntesis de Westerbork (the Westerbork Synthesis Radio Telescope)

Unión Internacional de Telecomunicaciones División de Ventas y Comercialización Place des Nations CH-1211 Ginebra 20 Suiza Fax: +41 22 730 5194 Tel.: +41 22 730 6141 E-mail: sales@itu.int Web: www.itu.int/publications



Impreso en Suiza Ginebra, 2015 Derechos de las fotografías: ATCA David Smyth