

RECOMENDACIÓN UIT-R RA.1630-0*, **

Características técnicas y operacionales de los sistemas astronómicos situados en tierra para ser utilizadas en los estudios de compartición con servicios activos entre 10 THz y 1 000 THz***

(2003)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que durante siglos se ha utilizado el espectro entre 400 THz y 750 THz para efectuar observaciones astronómicas y que sólo en los últimos 30 años ha sido posible explorar exhaustivamente todo el espectro entre 10 THz y 1 000 THz, gracias a los avances tecnológicos;
- b) que las observaciones entre 10 THz y 1 000 THz proporcionan datos indispensables para dar respuesta a cuestiones fundamentales de la astronomía que quedarían sin resolver si sólo se pudiese realizar observaciones astronómicas por debajo de 275 GHz;
- c) que el espectro entre 10 THz y 1 000 THz se utiliza tanto en la investigación astronómica como en muchas otras aplicaciones;
- d) que la tecnología de la observación astronómica, en el espectro comprendido entre 10 THz y 1 000 THz, se encuentra en permanente evolución;
- e) que las observaciones astronómicas desde tierra en el espectro visible, entre 400 THz y 750 THz, también las realizan rutinariamente los astrónomos aficionados;
- f) que las frecuencias entre 10 THz y 1 000 THz se utilizan hoy en día en los enlaces de datos, dispositivos de medición de distancia y otros sistemas activos situados en plataformas terrestres y espaciales, y que con la rapidez de expansión y proliferación de estos sistemas aumenta la probabilidad de interferencia entre los sistemas activos y pasivos;
- g) que muchas aplicaciones de los sistemas activos y pasivos que funcionan entre 10 THz y 1 000 THz son muy semejantes a las utilizadas en frecuencias inferiores del espectro electromagnético;
- h) que si bien hay diferencias notables entre las tecnologías utilizadas en esta parte del espectro y las que se utilizan en frecuencias inferiores (por ejemplo, recuento de fotones frente a integración de potencia en el tiempo), no es menos cierto que hay muchas semejanzas (por ejemplo, ambas se utilizan en las observaciones del continuum y de las líneas espectrales);
- j) que es oportuno estudiar el tipo de medidas de protección y las consideraciones de compartición necesarias para que los telescopios astronómicos situados en tierra puedan continuar funcionando sin interferencia,

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Unión Astronómica Internacional (UAI) y de la Unión Radiocientífica Internacional (URSI).

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

*** 1 THz = 1 000 GHz.

reconociendo

a) que en el UIT-R no se ha estudiado la utilización del espectro ni su compartición entre 10 THz y 1 000 THz,

recomienda

1 que los astrónomos tengan en cuenta la posibilidad de interferencia procedente de los transmisores que funcionan entre 10 THz y 1 000 THz para la elección de los emplazamientos de los observatorios y el diseño de la instrumentación;

2 que los astrónomos faciliten a las Comisiones de Estudio de Radiocomunicaciones la oportuna información sobre los últimos avances tecnológicos relativos a las observaciones astronómicas desde tierra en las frecuencias comprendidas entre 10 THz y 1 000 THz;

3 que los estudios de la interferencia en los sistemas astronómicos que funcionan a frecuencias comprendidas entre 10 THz y 1 000 THz tengan en cuenta los parámetros técnicos y operacionales contemplados en los Anexos 1 y 2.

Anexo 1

1 Introducción

Los telescopios situados en tierra pueden observar una gran diversidad de objetos del Universo a frecuencias inferiores a 275 GHz así como en el espectro comprendido entre 10 THz y 1 000 THz (30 μm a 0,3 μm). Las mediciones efectuadas en distintos dominios de la frecuencia suelen proporcionar información sobre las propiedades físicas (tales como la temperatura, la densidad y la distribución espacial) de diversos estados de los distintos componentes (como estrellas, gas y polvo) que integran los objetos observados, así como sobre los campos magnéticos locales. En general, cuanto mayor es el intervalo de frecuencias cubierto por las observaciones, mayor es el detalle de la información sobre las condiciones físicas locales que puede obtenerse. Por otra parte, determinados tipos de objetos cósmicos pueden estudiarse únicamente, o más adecuadamente, a frecuencias inferiores a 275 GHz o bien en el espectro entre 10 THz y 1 000 THz (30 μm a 0,3 μm).

La comunidad astronómica ha estado efectuando observaciones con telescopios en la banda de frecuencias comprendida entre 400 THz y 750 THz (0,75 μm y 0,4 μm) aproximadamente, durante unos 400 años. En los últimos 30 años con la llegada de las tecnologías de detección se han ampliado las bandas disponibles para la investigación astronómica al espectro comprendido entre 10 THz y 1 000 THz (30 μm a 0,3 μm). Los astrónomos suelen denominar «infrarrojos» a las frecuencias comprendidas entre 10 THz y 300 THz (30 μm y 1 μm), mientras que el espectro comprendido entre 300 THz y 1 000 THz (1 μm y 0,3 μm) se conoce generalmente como «óptico». El espectro entre 10 THz y 1 000 THz es idóneo para los estudios de las emisiones térmicas cósmicas y de las de un gran número de líneas espectrales de átomos y moléculas. Durante los últimos 30 años, los astrónomos han sido testigos de la aparición de adelantos tecnológicos que permiten la detección de determinadas señales que antes sólo era posible desde plataformas orbitales. Los astrónomos aficionados a su vez, efectúan observaciones en el espectro comprendido entre 400 THz y 750 THz (0,75 μm y 0,4 μm).

Los propios países por un lado y los consorcios internacionales por otro están realizando grandes inversiones en la construcción de observatorios dotados de grandes espejos (antenas) de hasta 10 m de diámetro e incluso mayores, que junto con los detectores modernos, llegarán a alcanzar

sensibilidades sin precedente. Del mismo modo, la llegada de láseres fiables y asequibles ha provocado una revolución en las aplicaciones activas, entre las que se encuentran los enlaces de comunicaciones de banda ancha de gran capacidad espacio-espacio, Tierra-espacio, espacio-Tierra y los enlaces de datos terrenales, el radar y otros dispositivos de medición de distancias.

La instrumentación astronómica que funciona en el espectro comprendido entre 10 THz y 1 000 THz (30 μm a 0,3 μm) es extremadamente sensible a la interferencia, pudiendo incluso quemarse los detectores por captar señales de demasiada intensidad. No obstante, la elevada directividad de sistemas activos tales como los sistemas de telecomunicaciones que utilizan láser funcionando en frecuencias entre 20 THz y 375 THz (15 μm y 0,8 μm), junto con las propiedades de propagación de las ondas en este intervalo de frecuencias dan pie a la posibilidad de manifestaciones de la interferencia hasta ahora desconocidas, aunque también es cierto que hay un gran abanico de opciones para evitar la interferencia y compartir las bandas. Para llevar a cabo los estudios de evitación de la interferencia y de compartición de las bandas en este intervalo de frecuencias se necesitará conocer las características técnicas y operacionales de los receptores astronómicos y de los sistemas de telescopios.

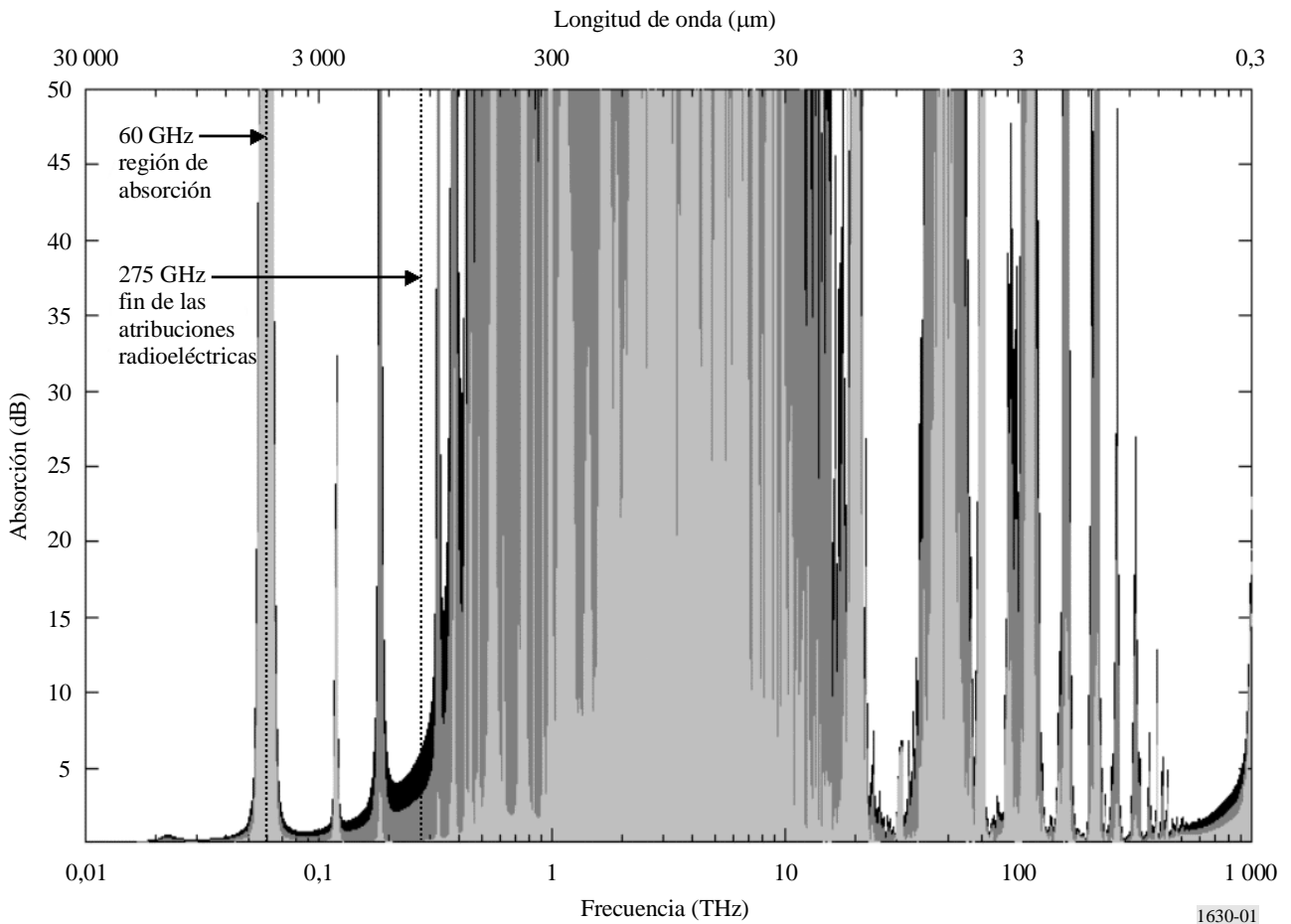
2 Bandas de interés

Debido a las limitaciones atmosféricas, la mayor parte de las observaciones astronómicas desde tierra por encima del límite superior de 1 THz mencionado en la disposición número 5.565 del Reglamento de Radiocomunicaciones tienen lugar en el intervalo espectral comprendido entre 100 THz y 1 000 THz. La Fig. 1 ilustra la relación entre la transmitancia de la atmósfera y la frecuencia en tres trayectos cenitales. La zona sombreada en gris claro representa un emplazamiento de gran calidad con aire seco situado a 5 km por encima del nivel del mar. La zona en gris oscuro muestra la absorción atmosférica adicional que tendría lugar en un emplazamiento situado 2 km por encima del nivel del mar (por ejemplo, Kitt Peak). Las regiones en negro muestran la repercusión adicional de la atmósfera correspondiente a un emplazamiento situado a nivel del mar. Todos los trayectos utilizan los perfiles de temperatura y presión de la Recomendación UIT-R P.835. La absorción por debajo de 1 THz se calcula con la Recomendación UIT-R P.676. La Figura muestra claramente que la atmósfera es opaca a la energía electromagnética en casi todas las frecuencias entre 1 THz y 10 THz, salvo en determinados emplazamientos astronómicos de gran altitud. Por encima de 10 THz, la transparencia de la atmósfera resulta muy conveniente para las observaciones de energía cósmica desde la superficie de la Tierra. Por encima de 1 000 THz la atmósfera vuelve de nuevo a ser opaca.

La transmitancia de la región espectral entre 10 THz y 1 000 THz, se muestra en detalle en la Fig. 2 para estos tres trayectos cenitales. Se caracteriza por una serie de ventanas de visibilidad separadas por regiones de absorción estrechas aunque de gran intensidad. La transparencia de las ventanas de visibilidad individuales queda limitada por una fina estructura de múltiples líneas de absorción débil. Las líneas de absorción individuales se deben a la presencia de componentes gaseosos de la atmósfera incluidos entre otros: NH_3 , CO_2 , CO , CH_4 , NO_2 , NO , O_2 , O_3 , SO_2 , H_2O y diversos clorofluorocarbonos. Las Recomendaciones UIT-R vigentes en materia de propagación no contemplan actualmente algunos de estos gases, que son importantes para las observaciones astronómicas entre 10 THz y 1 000 THz. La intensidad de las líneas de absorción suele depender de la temperatura y de la presión. Debido a que la intensidad y la anchura de estas líneas es variable, las bandas de interés para los astrónomos de sistemas ópticos situados en tierra incluyen todo el espectro comprendido entre 10 THz y 1 000 THz.

FIGURA 1

Absorción (zona sombreada) de una atmósfera normal a lo largo de un trayecto vertical



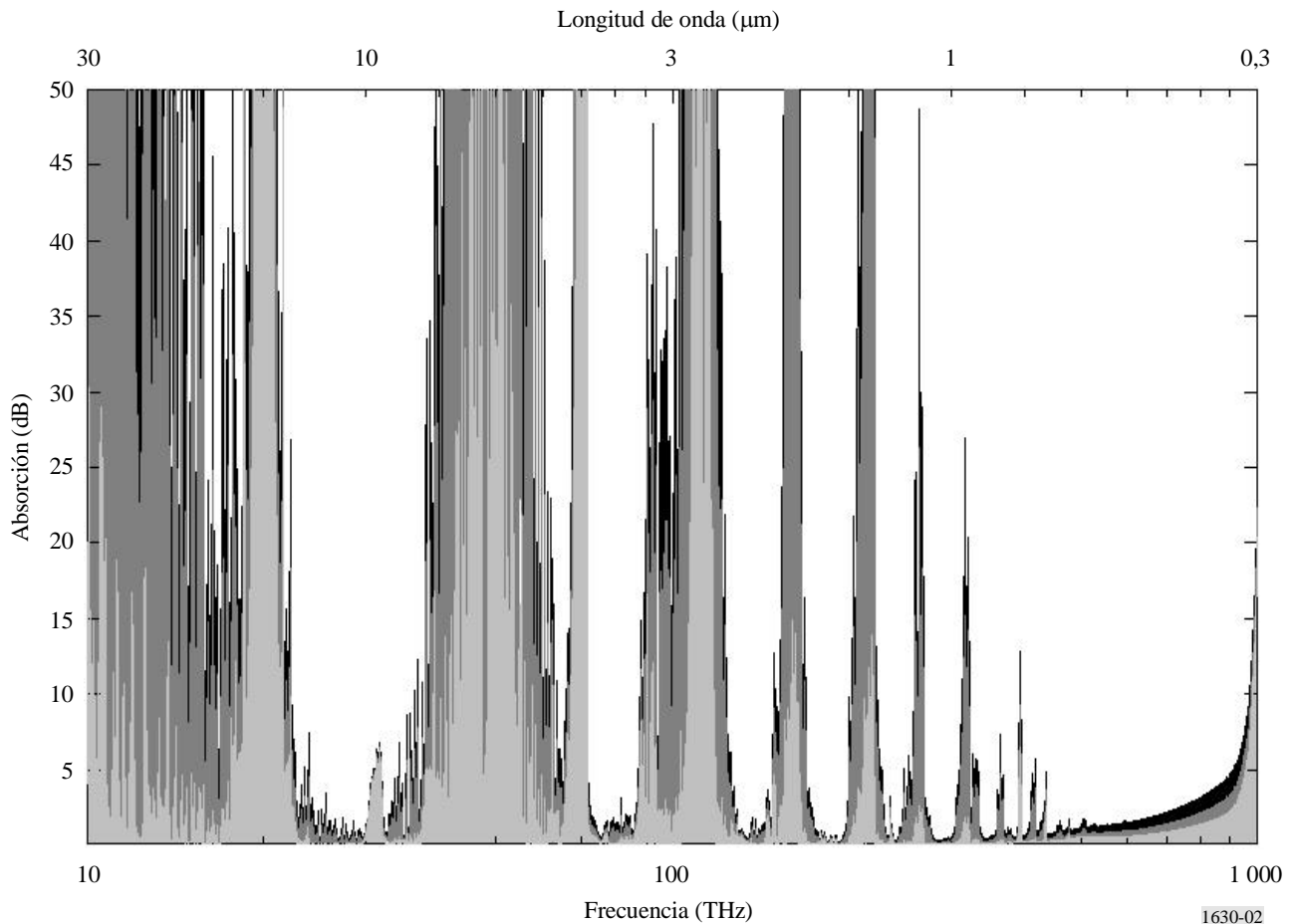
Se puede acceder a un espectro más amplio utilizando observatorios aéreos, tales como globos y aviones, dedicados a las observaciones astronómicas. Para ampliar el acceso a este importante espectro astronómico, se utilizan observatorios espaciales tales como el telescopio espacial Hubble.

3 Tipos de observaciones

Algunas de las observaciones efectuadas en el espectro correspondiente al intervalo de frecuencias 10 THz a 1 000 THz son semejantes a las efectuadas en bandas actualmente atribuidas al servicio de radioastronomía, a saber, la medición de la densidad espectral de flujo de potencia (defp) del continuum y de las propiedades de las líneas espectrales (línea defp, desviación Doppler y forma de las líneas). Una de las diferencias más importantes entre las observaciones astronómicas realizadas a frecuencias inferiores a 275 GHz y las efectuadas en el intervalo de frecuencias comprendido entre 10 THz y 1 000 THz es la facilidad, incomparablemente mayor, con la que pueden generarse imágenes directamente en esta última banda, tanto en el modo del continuum como en de las líneas espectrales. La disponibilidad y sensibilidad de los sistemas de detectores, de varios millones de píxeles cada uno de ellos, y de las cámaras fotográficas, hacen que esta técnica se utilice extensamente. Además, se suelen utilizar anchuras de banda mucho mayores.

FIGURA 2

Absorción (zona sombreada) en un trayecto vertical de una atmósfera normal por encima de 10 THz



La recogida de los datos astronómicos en el intervalo de frecuencias comprendido entre 10 THz y 1 000 THz se realiza utilizando diversas técnicas de medición. Cada una de estas técnicas proporciona información única acerca de los objetos medidos. Los valores característicos de los parámetros utilizados tales como la anchura de banda, la sensibilidad del receptor, el tamaño del campo de observación y la resolución angular dependen, en la práctica, del tipo de medición efectuada.

Los tiempos de integración que se suelen utilizar varían considerablemente y oscilan entre 0,001 s y varias horas, dependiendo de la estabilidad de la atmósfera, del tipo de detector utilizado y de las características e intensidad de la emisión que se observa. Se suelen efectuar varias mediciones individuales con tiempos de integración cortos, que se graban digitalmente y se integran posteriormente para conseguir la sensibilidad correspondiente a un tiempo de integración largo.

3.1 Fotometría

La fotometría es el equivalente en alta frecuencia de las observaciones del continuum de las fuentes cósmicas de defp efectuadas en las bandas de radioastronomía por debajo de 275 GHz.

Las mediciones de la defp en el intervalo de frecuencias comprendido entre 10 THz y 1 000 THz suelen tener en cuenta todos los tipos de galaxias, estrellas, objetos del sistema solar y polvo entre las estrellas o en torno a ellas, en una diversidad de objetos repartidos por todo el Universo.

La fotometría es una técnica utilizada en todo el intervalo de frecuencias en cuestión, que utiliza bandas de frecuencias normales definidas por filtros insertados en el trayecto luminoso de los detectores. El Cuadro 3 contiene una relación de los filtros de banda ancha más utilizados en el intervalo de frecuencias comprendido entre 10 THz y 1 000 THz. En el Cuadro 2 se proporcionan ejemplos de los distintos tipos de detectores utilizados en los diversos intervalos de frecuencias. Entre estos detectores se pueden citar: los bolómetros y diversos detectores fotoconductores y fotovoltaicos para las bandas N y Q, los detectores InSb para las bandas J, H, K, L, y M y los dispositivos de acoplamiento de carga (CCD) para las bandas U, B, V, R e I. Asimismo se utilizan filtros de banda estrecha centrados en líneas espectrales de especial interés.

Las observaciones fotométricas se suelen calibrar por comparación con estrellas perfectamente caracterizadas.

3.2 Espectroscopia

La espectroscopia es el equivalente en alta frecuencia de las mediciones de líneas espectrales de las bandas de radioastronomía por debajo de 275 GHz. La abundancia de líneas espectrales a lo largo de todo el intervalo de frecuencias comprendido entre 10 THz y 1 000 THz, la mayor parte de las cuales corresponden a diversos estados de elementos y moléculas sin líneas a frecuencias inferiores a 275 GHz, otorga especial importancia a esta rama de la astronomía y subraya la importancia del acceso a este intervalo de frecuencias.

Las observaciones de las líneas espectrales se llevan a cabo para obtener, por ejemplo, la composición, química, propiedades físicas y dinámica de una gran diversidad de objetos, tales como las nubes interestelares, las galaxias individuales, los grupos y cúmulos de galaxias, así como la expansión global del Universo y sus desviaciones locales, la composición y origen de las estrellas y los campos magnéticos cósmicos.

El dispositivo dispersivo más utilizado en espectroscopia en el intervalo de frecuencias entre 10 THz y 1 000 THz es la retícula de difracción. Una retícula de difracción dispersa la energía recibida en función de su frecuencia. La energía dispersada se suele grabar mediante un detector electrónico, tal como un sistema de CCD, para crear un espectrograma.

En el extremo inferior de este intervalo de frecuencias se utilizan espectrómetros analógicos y asimismo, cada vez con más frecuencia, digitales. No obstante, dichos dispositivos no suelen ser fáciles de adquirir, salvo los receptores heterodinos que convierten las señales recibidas en otras de frecuencia inferior.

Así pues, se examina el espectro astronómico en busca de líneas características de elementos específicos. De encontrarse, se sabe que dichos elementos se encuentran presentes en el cuerpo cósmico o, en ciertos casos, en el espacio situado entre el cuerpo cósmico y el telescopio receptor. La espectroscopia realiza asimismo una gran contribución al estudio de los movimientos y de la dinámica de los objetos astronómicos. Midiendo la desviación Doppler de las líneas de las estrellas y del gas interestelar en las galaxias, por ejemplo, pueden determinarse los movimientos radiales a lo largo de la visual, a fin de estudiar, entre otros, su velocidad en el espacio y la dinámica interna de objetos extensos, como galaxias y nubes de gas interestelar.

La espectroscopia puede realizarse con varios niveles de resolución espectral. La resolución más baja es característica de una forma de fotometría que se realiza utilizando un espectrógrafo, que divide el espectro en unas pocas bandas de frecuencias con el único objeto de obtener una indicación de la distribución global de la energía espectral. En la espectroscopia de media y alta resolución, las líneas individuales y las bandas moleculares pueden examinarse en mayor detalle.

Gracias a los avances obtenidos en la sensibilidad de los sistemas de detectores y a la construcción de telescopios de muy gran tamaño, pueden llevarse a cabo estudios espectroscópicos de objetos cada vez más débiles y estudiar los espectros de los objetos más brillantes con un grado de detalle sin precedentes.

3.3 Generación de imágenes

En comparación con los dispositivos de generación directa de imágenes disponibles en el intervalo de frecuencias entre 10 THz y 1 000 THz los sistemas de receptores de radioastronomía de plano focal de varios elementos actualmente disponibles, utilizados en frecuencias inferiores a 275 GHz resultan bastante limitados en cuanto a número de elementos y resolución espacial.

En el intervalo de frecuencias entre 10 THz y 1 000 THz, la posibilidad de utilizar sistemas de plano focal de muchos elementos, facilita la obtención directa de imágenes. Estos sistemas de plano focal pueden consistir en CCD que proporcionan un mapa digital de brillo por píxel. Esta técnica ofrece considerables ventajas sobre el proceso fotográfico tradicional. Pueden obtenerse integraciones largas a partir de integraciones cortas acumuladas. Esto permite eliminar los píxeles y los cuadros degradados por la interferencia, aplicar diversas mejoras a la imagen y utilizar algoritmos de análisis. Los CCD actualmente disponibles para aplicaciones astronómicas están integrados por sistemas de $\sim 2\,000 \times 2\,000$ píxeles y algunos de ellos pueden montarse en el plano focal de un telescopio para crear dispositivos de generación de imágenes digitales con un campo de visión aun mayor.

Las técnicas fotográficas, introducidas en la astronomía poco después de la invención de la placa fotográfica, se limitan actualmente casi exclusivamente a las observaciones que requieren un número mayor de píxeles (mayor campo angular) que las que se pueden obtener por medio de cámaras CCD, ya que las placas fotográficas de mayor tamaño actualmente utilizadas tienen dimensiones que sobrepasan considerablemente las de las cámaras CCD operacionales de mayor tamaño.

3.4 Interferometría

A frecuencias inferiores a 275 GHz, las imágenes radioeléctricas se suelen producir por la medición de las componentes individuales de Fourier de la distribución del brillo, que se procesan a continuación para formar una imagen definitiva. En general, las diversas imperfecciones de la imagen asociadas a la apertura sintética, impiden alcanzar la representación perfecta deseada. Debido a las complejidades introducidas por las influencias atmosféricas de variación rápida en el intervalo de frecuencias entre 10 THz y 1 000 THz, la interferometría constituye una técnica totalmente nueva en este intervalo espectral. Normalmente, la resolución angular de un telescopio sencillo situado en tierra en el intervalo de frecuencias entre 10 THz y 1 000 THz, incluso el de espejos de 10 m de diámetro actualmente en explotación, queda limitada en la práctica por la turbulencia atmosférica, especialmente en el intervalo de frecuencias entre 100 THz y 1 000 THz.

La necesidad de disponer de resoluciones angulares superiores para estudiar determinados objetos en el intervalo de frecuencias entre 10 THz y 1 000 THz, como estrellas y galaxias activas, ha fomentado el uso cada vez más frecuente de la interferometría. Esta técnica totalmente novedosa, ha supuesto que se inviertan considerables esfuerzos en los desarrollos técnicos por lo que es posible que la interferometría llegue a ser tan importante en estas frecuencias como en las bandas actualmente atribuidas al servicio de radioastronomía. Los modos de observación interferométricos se están implementando actualmente en la mayor parte de los telescopios grandes que funcionan en el intervalo de frecuencias en cuestión.

Mediante la combinación coherente de las señales procedentes de dos o más telescopios separados a cierta distancia, puede aumentarse considerablemente la resolución angular reduciendo significativamente los efectos de la turbulencia atmosférica. Se pueden utilizar interferómetros ópticos para medir directamente el diámetro de los cuerpos cósmicos. Muchos telescopios, considerablemente separados, pueden llevar a cabo interferometría a lo largo de grandes líneas de base para proporcionar medidas con una precisión de hasta $2,8 \times 10^{-8}$ grados.

Hay ciertas mediciones interferométricas que tienen lugar en torno a 30 THz ($10 \mu\text{m}$) que se llevan a cabo utilizando detección heterodina. La aplicación de técnicas coherentes permite utilizar una anchura de banda mucho menor que puede mejorar la sensibilidad en determinadas circunstancias. La división de la energía medida entre varios telescopios no reduce la relación S/N del sistema heterodino como ocurriría con un sistema de detección directa. Los interferómetros heterodinados se suelen medir en bandas de varios GHz de amplitud. Esta anchura de banda es mucho menor que la observada en otros tipos de medidas.

4 Características técnicas de los detectores astronómicos

Los detectores utilizados en las observaciones astronómicas en el intervalo de frecuencias comprendido entre 10 THz y 1 000 THz se suelen especificar en unidades y medidas diferentes a los de los receptores de radioastronomía que funcionan por debajo de 275 GHz. Estas diferencias obedecen a razones de índole práctica y a la peculiaridad de las tecnologías utilizadas en la detección de energía en las bandas radioeléctricas y ópticas. Asimismo consideraciones de orden práctico, tales como las características ideales de los emplazamientos de las instalaciones y las fuentes de calibración, pueden ser distintas para los intervalos espectrales citados. Estas diferencias suponen a menudo cierta dificultad de aplicación de la terminología radioastronómica convencional a la astronomía en el intervalo de frecuencias entre 10 THz y 1 000 THz. Además, las unidades que se suelen utilizar para describir parámetros físicos semejantes pueden ser diferentes en los dos intervalos de frecuencias. El Cuadro 1 muestra una comparación entre las unidades habituales de la astronomía radioeléctrica y de la óptica.

CUADRO 1

Comparación entre las unidades habituales de los parámetros de la astronomía radioeléctrica y de la óptica

Parámetro	Unidades utilizadas en la radioastronomía por debajo de 275 GHz	Unidades utilizadas en la astronomía entre 10 THz y 1 000 THz	Conversión
Frecuencia	kHz, MHz, GHz, THz	cm^{-1}	$1/\text{cm} \sim 30 \text{ GHz}$
Longitud de onda	mm, cm, m	μm , nm, Å	$1 \text{ m} = 10^6 \mu\text{m} = 10^9 \text{ nm} = 10^{10} \text{ Å}$
defp	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$, $\text{dB}(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz}))$, Jy	Jy, magnitudes	$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$

4.1 Campo de visión y resolución angular

El tamaño del campo de visión está relacionado con el tamaño físico del detector y la longitud focal del telescopio, pudiendo determinarse por la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{180d}{\pi F} \quad (1)$$

siendo:

- θ : campo de visión (grados)
- d : diámetro del detector (m)
- F : longitud focal del telescopio (m).

En la práctica, el campo de visión de un telescopio puede reducirse por medio de un diafragma, por diversas razones (por ejemplo, por la calidad imperfecta de la imagen en las partes exteriores del campo de visión).

Los avances en la tecnología de los detectores permiten que los astrónomos puedan observar regiones cada vez mayores del cielo, mejorando al mismo tiempo la resolución angular de sus observaciones. Estas mejoras se suelen efectuar mediante la utilización de sistemas de detectores con mayor superficie equivalente y menor tamaño de píxel. El campo de visión de los sistemas de detectores puede alcanzar frecuentemente los $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ aunque, dependiendo de la instrumentación y del telescopio, puede llegar a ser tan sólo de 10^{-4} grados de diámetro. Los mayores campos de visión actualmente disponibles tienen del orden de varios grados cuadrados. Se pueden utilizar varios detectores con un único telescopio para observar la energía procedente de una única fuente. Por otra parte, se pueden intercambiar detectores durante periodos de tan solo unos pocos minutos. Por consiguiente, la definición de un campo de visión único para un telescopio específico no es adecuada.

Otro parámetro de utilidad para los astrónomos es la resolución angular. La resolución angular de un telescopio es una medida de su capacidad de identificar objetos distintos que se encuentran muy próximos dentro de su campo de visión. La máxima resolución angular teóricamente alcanzable para una determinada apertura, suponiendo la perfección de los instrumentos de explotación y excluidos los efectos perniciosos de la atmósfera terrestre, es:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{3,974D} = \frac{75,49}{fD} \quad (2)$$

siendo:

- $\Delta\theta$: resolución angular (de arco)
- f : frecuencia (THz)
- λ : longitud de onda (μm)
- D : diámetro de la apertura principal (m).

Las resoluciones angulares teóricas de 10^{-5} grados son corrientes para una apertura sencilla.

No obstante, en la práctica, la resolución angular de un telescopio sencillo suele venir limitada por la turbulencia atmosférica. En la realidad, en los mejores emplazamientos de observación situados en tierra, es corriente alcanzar resoluciones angulares de 0,6 de arco aproximadamente sin necesidad de utilizar ópticas activas adaptables (véase el § 4.4) para estabilizar la imagen, mientras que la resolución angular teóricamente alcanzable en los telescopios de mayor tamaño, de 10 m de diámetro, funcionando a longitudes de onda ópticas (a la frecuencia de 600 THz) es tan solo de 10^{-2} de arco. Las mediciones que utilizan la técnica denominada interferometría (véase el § 3.4) pueden llegar a alcanzar una resolución angular de 10^{-5} de arco.

4.2 Sensibilidad

La ganancia del haz principal de la antena astronómica funcionando en el intervalo de frecuencias entre 10 THz y 1000 THz se puede calcular por medio de las mismas ecuaciones que las correspondientes al funcionamiento en la región por debajo del GHz. La utilización de pantallas de deflexión (baffling) en los telescopios astronómicos reduce los lóbulos laterales y la ganancia del lóbulo posterior hasta niveles insignificantes.

Hay varias tecnologías que permiten a los astrónomos detectar energía en el intervalo de frecuencias comprendido entre 10 THz y 1000 THz. El Cuadro 2 contiene una lista de ganancias y de rendimientos cuánticos correspondientes a varios detectores ópticos y tecnologías de sistemas de detectores corrientes.

CUADRO 2
Parámetros correspondientes a algunos sistemas y detectores
utilizados en las bandas ópticas

Dispositivo	Intervalo de frecuencias (THz)	Dimensión típica (10^{-3} m)	Tipo η	Tipo G	Material
Fotodiodo semiconductor	10-2000	0,1-250	0,7-1	1	Si, Ge, InSb, HgCdTe
Fotodiodo de avalancha	300-2000	0,1 (típico)-250	0,7-1	10^6	Si
Detector de banda de impurezas bloqueada	1-10	5-15	0,1-0,7	1	Si:As, Si:Sb, Si:Ga, Ge:Ga
Tubo fotomultiplicador	300-1000	5-25	0,1-0,5	10^6 - 10^8	Na ₂ KSb:Cs, GaAs:Cs-O, Cs ₃ Sb
Fotoconductor extrínseco	1-10	10-50	0,05-0,4	0,1-10	Si:As, Ge:Be, Ge:Ga, Ge:Sb
Detector heterodino	0-50	Amplificación y detección electrónicas			
CCD	60-2000	5-8	0,8-0,9	1	Si, InSb

Cada uno de estos tipos de detectores tiene una sensibilidad y rendimiento únicos, dependientes de la frecuencia, para detectar la energía. Funcionan convirtiendo la energía recibida en corriente eléctrica, de acuerdo con la fórmula:

$$I_R = \frac{\eta G e P_R}{h \nu} \quad (3)$$

siendo:

- I_R : corriente inducida en el detector (A)
- η : rendimiento cuántico
- G : ganancia
- e : carga del electrón ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
- P_R : potencia recibida en el detector (W)
- h : constante de Plank (J·s)
- ν : frecuencia (Hz).

El nivel de ruido, o corriente de oscuridad, de un detector puede tomar una gran diversidad de valores aunque suele ser inferior a 10 electrones/s. Este valor puede ser varios órdenes de magnitud superior en algunos sistemas pero 10 electrones/s es representativo de los instrumentos y mediciones de calidad. La cantidad de corriente indeseada en el detector viene dada por:

$$I_{oscuridad} = 1,6 \times 10^{-19} r \quad (4)$$

siendo:

$I_{oscuridad}$: corriente de oscuridad (A)

r : velocidad de los electrones de la corriente de oscuridad que pasan a través del detector (electrones/s).

4.3 El emplazamiento del telescopio

Los telescopios astronómicos que funcionan entre 10 THz y 1 000 THz se encuentran repartidos por todo el mundo. Los emplazamientos para los telescopios más grandes y sensibles se escogen principalmente por su estabilidad atmosférica, su escaso contenido de vapor de agua y el aislamiento de la energía indeseada en las bandas de interés (definidas en el § 2). Los emplazamientos óptimos suelen encontrarse a gran altura, a menudo 2 km como mínimo por encima del nivel del mar, lejos de zonas urbanas y en condiciones climáticas locales áridas. La gran altura es indispensable para reducir los efectos de la turbulencia asociada a la «capa límite» atmosférica. La minimización del espesor de las capas atmosféricas entre los telescopios y los cuerpos cósmicos a estudiar maximiza las bandas espectrales efectivamente disponibles (véanse las Figs. 1 y 2). Debido a que el número de emplazamientos de máxima calidad que hay en el mundo es pequeño, pueden llegar a colocarse hasta 20 telescopios en un único emplazamiento. Los criterios de preferencia de emplazamientos para las observaciones radioastronómicas en el intervalo de frecuencias comprendido entre 275 GHz y 1 000 GHz y para las observaciones en el intervalo de frecuencias comprendido entre 10 THz y 1 000 THz son bastante semejantes, motivo por el cual en algunos de los emplazamientos de observación de máxima calidad (tales como el emplazamiento Mauna Kea en Hawai y el de La Silla en Chile) hay telescopios radioeléctricos y telescopios ópticos. Algunos de los telescopios astronómicos avanzados actualmente en construcción o en explotación se sitúan en aviones o en el espacio. Los astrónomos aficionados, aunque prefieren los mismos emplazamientos de gran altura, pueden llevar a cabo sus observaciones en cualquier lugar de la superficie terrestre con buena visibilidad directa del cielo.

4.4 La compensación atmosférica

La resolución angular de los telescopios de apertura simple de más de 1 m de diámetro con espejos o lentes fijos viene limitada en la práctica por la turbulencia atmosférica, incluso en los mejores emplazamientos de observación de gran altura. La resolución angular de los telescopios puede, no obstante, mejorarse con óptica adaptable o activa. En determinadas circunstancias esta mejora puede permitir que la calidad de funcionamiento del telescopio se aproxime al límite de difracción teórico (véase la ecuación (2)).

4.4.1 Óptica activa

Las deflexiones gravitacionales y los gradientes térmicos sobre la superficie de un espejo pueden producir mediciones imperfectas. La óptica activa es una técnica destinada a compensar estas distorsiones lentas variables en el tiempo y se incorpora de ordinario a los telescopios astronómicos de 4 m de diámetro o más.

4.4.2 Óptica adaptable

La óptica adaptable es una técnica destinada a compensar las fluctuaciones rápidas variables en el tiempo en la atmósfera que distorsiona las observaciones astronómicas. Las fluctuaciones contempladas por un sistema óptico adaptable suelen tener lugar a un ritmo que alcanza los 100 Hz. Pueden corregirse los errores de fase del frente de ondas recibido cuyo valor oscile entre 10^{-8} y 10^{-6} m.

La estrella guía láser (LGS, *laser guide star*) es un método frecuentemente utilizado consistente en aplicar la óptica adaptable a la corrección de las aberraciones atmosféricas. La LGS se crea haciendo que un láser se propague desde el suelo a lo largo de un trayecto dentro del campo de visión del telescopio y midiendo la energía devuelta. Las fluctuaciones debidas a la atmósfera medidas en la LGS pueden utilizarse para compensar las distorsiones atmosféricas de los blancos en cualquier punto del campo de visión del telescopio. Estas fluctuaciones sólo suelen ser útiles en la corrección de distorsiones atmosféricas con una pequeña separación angular de la LGS. Por consiguiente, a veces se utilizan varios láseres para corregir un campo de visión más amplio.

La versión más utilizada de LGS se enfoca sobre la capa de sodio en la alta mesosfera a 90 km, aproximadamente, por encima de la superficie terrestre. Estas capas se sintonizan a una frecuencia de 509,3 THz ($0,589 \mu\text{m}$) y hacen que los átomos de sodio se vuelvan fluorescentes. Los láseres utilizados para generar estrellas guía de sodio suelen transmitir con potencias medias de 10 a 25 W, aunque es técnicamente posible obtener potencias de hasta 1 kW. La óptica adaptable basada en estrellas guía de sodio suele estar asociada a las observaciones astronómicas realizadas a frecuencias por debajo de 400 THz (longitudes de onda superiores a $0,75 \mu\text{m}$). Otra forma de óptica adaptable, denominada tomografía atmosférica, utiliza láseres en el intervalo comprendido entre 833,3 THz y 857,1 THz ($0,35 \mu\text{m}$ a $0,36 \mu\text{m}$). La tomografía atmosférica se basa en la dispersión Rayleigh y en las mediciones efectuadas en un rango de altura más amplio que suelen encontrarse por debajo de la capa de sodio. Los requisitos de potencia típicos suelen estar entre 50 y 250 W.

5 Características técnicas de las instalaciones de observación

Las características técnicas y operacionales de las instalaciones astronómicas que funcionan en el intervalo de frecuencias entre 10 THz y 1 000 THz no son necesariamente las mismas que las de las instalaciones radioastronómicas que funcionan por debajo de 275 GHz. No obstante existen ciertas semejanzas entre ambas.

5.1 Horario de funcionamiento normal

Los momentos en que pueden efectuarse observaciones astronómicas desde tierra en el intervalo de frecuencias entre 10 THz y 1 000 THz vienen limitados en gran medida por las condiciones atmosféricas y por la posición del Sol. Para la mayor parte de las observaciones astronómicas en este intervalo de frecuencias, suele ser necesario disponer de condiciones atmosféricas favorables (en general, de cielos despejados) así como la ausencia del Sol del cielo visible, ya que su presencia aumenta considerablemente el brillo del cielo impidiendo detectar las fuentes más débiles. La salida y puesta del Sol provoca cambios en la temperatura de las capas de la atmósfera, provocando condiciones atmosféricas turbulentas y desfavorables para las observaciones astronómicas. El grado de inestabilidad atmosférica depende en gran manera de la estación y de los efectos de los microclimas por lo que puede contemplarse como una variable dependiente del emplazamiento.

Por este motivo, la mayor parte de las observaciones astronómicas, aunque no todas, en el intervalo de frecuencias en consideración, se efectúan tras el crepúsculo local y antes de la madrugada local. Durante el crepúsculo y el amanecer se llevan a cabo observaciones rutinarias de calibrado dirigidas

a determinadas posiciones del cielo. Ejemplos de observaciones astronómicas que se efectúan rutinariamente a plena luz del día son las observaciones del Sol en todo el intervalo de frecuencias considerado y las observaciones de fuentes relativamente brillantes distintas del Sol en el intervalo de frecuencias entre 10 THz y 30 THz. Ciertas observaciones de calibrado pueden efectuarse asimismo sobre el cielo durante el día.

5.2 Velocidad de giro del telescopio

La velocidad angular del telescopio astronómico que rastrea un objeto celestial por el cielo suele ser la velocidad rotacional de la Tierra que es de 0,25 grados/min, aproximadamente ($\approx 4,167 \times 10^{-3}$ grados/s), o valores que suelen aproximarse a éste para observaciones de objetos dentro del sistema solar (siendo los asteroides próximos a la Tierra los objetos rastreados que se mueven a mayor velocidad). Los telescopios suelen moverse a velocidades mucho mayores cuando se reorientan para observar otro objeto. No obstante, cuando se reorientan, la precisión de puntería suele reducirse hasta el extremo de no poder obtener datos útiles.

Anexo 2

A los efectos del cálculo de la gravedad de la interferencia en un receptor astronómico óptico situado en tierra, los parámetros que contienen los Cuadros 1, 2 y 4 deben considerarse representativos de los sistemas existentes. Los parámetros de los telescopios astronómicos y los parámetros de los detectores, incluidas las bandas de frecuencia utilizables, se recogen en cuadros separados debido a que los telescopios astronómicos son independientes de los detectores que llevan acoplados.

Los nombres asociados a los filtros espectrales han sido adoptados por la comunidad astronómica y su uso está generalizado. Las frecuencias centrales de cada filtro corresponden aproximadamente a las ventanas de visibilidad atmosférica que recoge el Cuadro 3.

CUADRO 3

Filtros de banda ancha de utilización más frecuente en la gama de 10 THz a 1 000 THz

Filtro	Q	N	M	L'	L	K	H
Frecuencia central (THz)	15	30	63	79	86	136	180
Longitud de onda (μm)	20,25	10,1	4,80	3,80	3,50	2,20	1,65
Anchura de banda (THz)	15,2	18,2	15,9	14,7	17,3	30,1	33,3
(μm)	6,50	5,70	1,20	0,70	0,70	0,48	0,30
Filtro	J	I _J	I _S	R	V	B	U
Frecuencia central (THz)	240	330	370	430	560	700	830
Longitud de onda (μm)	1,25	0,90	0,80	0,70	0,54	0,43	0,36
Anchura de banda (THz)	74,7	90,5	115,1	138,1	93,2	164,5	163,6
(μm)	0,38	0,24	0,24	0,22	0,09	0,10	0,07

Los telescopios astronómicos admiten una gran diversidad de tamaños y de longitudes focales. El Cuadro 4 contiene una relación de los parámetros pertinentes para evaluar la interferencia en los telescopios astronómicos.

CUADRO 4

Parámetros de algunos de los sistemas astronómicos más importantes situados en tierra que funcionan en la gama de 10 THz a 1 000 THz

Diámetro de la apertura (m)	Telescopio	Ubicación	Longitud focal (m)	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Altura (m)
10	Keck I	Mauna Kea, Hawai (Estados Unidos de América)	17,5 (f/1,75)	19,83	155,47	4 123
	Keck II					
9,2	Telescopio Hobby-Eberly (HET)	Mt Fowlkes, Texas (Estados Unidos de América)	13,08 (f/1,4)	30,67	104,02	2 072
8,3	Subaru	Mauna Kea, Hawai (Estados Unidos de América)	15 (f/1,8)	19,83	155,47	4 100
8,2 × 4	Telescopio de muy gran tamaño	Cerro Paranal (Chile)	14,8 (f/1,8)	-24,63	70,40	2 635
8,0	Géminis Norte	Mauna Kea, Hawai (Estados Unidos de América)	129,6 (f/16,2)	19,83	155,47	4 100
	Géminis Sur	Cerro Pachón (Chile)	129,6 (f/16,2)	-30,33	70,98	2 737
6,5	Telescopio de varios espejos (MMT)	Monte Hopkins, Arizona (Estados Unidos de América)	8,1 (f/1,25)	31,68	110,88	2 600
	Magellan I	La Serena (Chile)	8,1 (f/1,25)	-29,00	70,71	2 282
6,0	Telescopio Acimutal Bolshoi (BTA)	Zelenschuskaya (Federación de Rusia)	24 (f/4,0)	43,39	41,26	2 070
5,0	Hale	Palomar Mt, California (Estados Unidos de América)	16,5 (f/3,3)	33,35	116,87	1 900
4,2	Telescopio William Herschel (WHT)	Roque de los Muchachos (España)	10,5 (f/2,5)	28,45	17,52	2 350
4,0	Víctor M. Blanco	Cerro Tololo (Chile)	11,5 (f/2,9)	-30,17	70,82	2 200
4,0	Mayall	Kitt Peak, Arizona (Estados Unidos de América)	10,3 (f/2,7)	31,95	111,62	2 100
3,9	Telescopio Anglo-Australiano (AAT)	Siding Springs (Australia)	12,7 (f/3,3)	-31,28	210,93	1 164

CUADRO 4 (Fin)

Diámetro de la apertura (m)	Telescopio	Ubicación	Longitud focal (m)	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Altura (m)
3,8	Telescopio de infrarrojos del Reino Unido (UKIRT)	Mauna Kea, Hawai (Estados Unidos de América)	9,5 (f/2,5)	19,49	155,28	4 194
3,6	ESO 3,6 m	La Silla (Chile)	8,1 (f/2,2)	-29,15	70,44	2 400
	Canadá-Francia-Hawai (CFHT)	Mauna Kea, Hawai (Estados Unidos de América)	15,1 (f/4,2)	19,83	155,47	4 200
	Telescopio Nazionale Galileo (TNG)	Roque de los Muchachos (España)	38,5 (f/11,0)	28,45	17,52	2 350
3,5	WIYN	Kitt Peak, Arizona (Estados Unidos de América)	22 (f/6,3)	31,95	111,62	2 100
	ARC	Apache Point, Nuevo México (Estados Unidos de América)	6,1 (f/1,75)	32,78	105,82	2 788
	Calar Alto 3,5 m	Calar Alto (España)	12,2 (f/3,5)	37,22	2,55	2 168
3,0	Shane	Mt Hamilton, California (Estados Unidos de América)	15 (f/5)	37,35	121,63	1 300
	NASA IRTF	Mauna Kea, Hawai (Estados Unidos de América)	7,6 (f/2,3)	19,83	155,47	4 160
	NODO	Cloudcroft, Nuevo México (Estados Unidos de América)	4,5 (f/1,5)	32,98	105,73	2 758

NOTA 1 – El intervalo espectral observable en la mayor parte de las mediciones viene limitado por el detector. La mayor parte de los telescopios, aunque no todos, son capaces de llevar a cabo sus observaciones con diversos grados de calidad de funcionamiento en todas las ventanas atmosféricas de visibilidad.

