

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.1013*

Bandas de frecuencias preferidas para la investigación del espacio lejano en la gama de 40-120 GHz

(Cuestión UIT-R 133/7)

(1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las frecuencias más adecuadas para las telecomunicaciones entre la Tierra y los vehículos espaciales en el espacio lejano vienen determinadas, en parte, por los fenómenos atmosféricos y de propagación interplanetaria;
- b) que la tecnología también influye en la elección de las frecuencias preferidas;
- c) que durante los periodos de condiciones atmosféricas adversas deben satisfacerse los requisitos de fiabilidad de las telecomunicaciones;
- d) que los vehículos espaciales situados en distintas coordenadas celestes pueden utilizar la misma frecuencia, pero que vehículos espaciales distintos situados en las proximidades de las mismas coordenadas y dentro de la anchura de haz de la antena de la estación terrena exigirán normalmente frecuencias distintas;
- e) que es práctico y conveniente incorporar funciones de seguimiento y teledirigida en el mismo enlace espacio-Tierra y funciones de telemando y seguimiento en el mismo enlace Tierra-espacio;
- f) que para efectuar un seguimiento Doppler de precisión, se necesita un par de frecuencias coherentemente relacionadas para los trayectos Tierra-espacio y espacio-Tierra;
- g) que para realizar una calibración más precisa de los efectos de las partículas cargadas sobre la velocidad de propagación, es necesaria la utilización simultánea de enlaces con frecuencias coherentes en dos o más bandas muy separadas;
- h) que los enlaces de señales vocales y de vídeo asociados a los vehículos espaciales tripulados en espacio lejano podrían utilizar bandas de frecuencias atribuidas a las funciones de teledirigida, telemando y seguimiento;
- j) que se han establecido las gamas de frecuencias preferidas indicadas en el Anexo 1;
- k) que la viabilidad de atribuciones de banda para la investigación del espacio lejano depende, entre otras cosas, de la compartición con otros servicios,

* La Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2003 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

recomienda

- 1 que entre 40 y 120 GHz se seleccionen las atribuciones de banda para la investigación del espacio lejano a partir de las gamas de frecuencias preferidas que figuran en el Cuadro 1 del Anexo 1;
- 2 que se tengan en cuenta los requisitos de anchura de banda de la Recomendación UIT-R SA.1015;
- 3 que se considere la posibilidad de compartición con otros servicios (véase la Recomendación UIT-R SA.1016).

Anexo 1**Selección de bandas de frecuencias preferidas para la investigación del espacio lejano en la gama de 40-120 GHz****1 Introducción**

El comportamiento de los enlaces entre estaciones terrenas y estaciones en el espacio lejano resulta afectado por la atmósfera de la Tierra. La atenuación y la emisión de la atmósfera limitan normalmente las telecomunicaciones con el espacio lejano. Sin embargo, hay algunas bandas de frecuencias donde la atenuación atmosférica es lo suficientemente baja como para permitir el establecimiento de enlaces entre estaciones terrenas y estaciones en el espacio lejano. Además, existen ciertas bandas que serían particularmente adecuadas para los enlaces entre estaciones retransmisoras en órbita terrestre y estaciones situadas en el espacio lejano.

El presente Anexo considera la selección de las bandas de frecuencias preferidas para telecomunicaciones en espacio lejano en la gama de 40-120 GHz. La Recomendación UIT-R SA.1012 trata de la selección de bandas en la gama de 1-40 GHz preferidas para la investigación del espacio lejano.

1.1 Ventajas de las frecuencias más elevadas

Las frecuencias radioeléctricas por encima de 40 GHz presentan ventajas para las telecomunicaciones con el espacio lejano como son un mejor funcionamiento de los enlaces, mayor anchura de banda, menor número de errores en las mediciones que dependen de la velocidad de propagación y posibilidad de protección contra las interferencias terrenales.

1.1.1 Mejora del comportamiento del enlace

Para una potencia transmitida fija, la potencia recibida a través de un enlace en el espacio libre entre antenas perfectas de abertura fija varía en proporción directa con el cuadrado de la frecuencia. Un ejemplo práctico de este hecho es el caso de un trayecto entre un vehículo espacial en el espacio lejano y un satélite retransmisor en órbita sobre la atmósfera de la Tierra. Si la tecnología no limita la elección de frecuencias en la gama considerada, la frecuencia más elevada de esta gama proporcionará el comportamiento óptimo del enlace.

Para transmisiones a través de la atmósfera, existen ciertas bandas por encima de 40 GHz donde la atenuación atmosférica es lo suficientemente baja como para permitir el establecimiento de comunicaciones.

Los enlaces en frecuencias más elevadas funcionan mejor y pueden utilizarse en operaciones de control, teledata y radiometría. Ello también permitiría utilizar antenas y transmisores más pequeños y ligeros en el vehículo espacial.

1.1.2 Mediciones más precisas de los retardos de fase y de grupo

La navegación precisa de las sondas en el espacio lejano depende entre otras cosas, de la determinación de su posición y velocidad mediante mediciones de los retardos de fase y de grupo de las señales recibidas. En estas mediciones influye la velocidad de propagación a lo largo del trayecto de transmisión. La velocidad de propagación es función de la densidad de partículas cargadas a lo largo del trayecto. El efecto de estas partículas varía inversamente con el cuadrado de la frecuencia y, por consiguiente, son preferibles las frecuencias más elevadas para mediciones relacionadas con la navegación y de otra naturaleza.

1.1.3 Protección contra las interferencias terrenales

Puede que sea conveniente utilizar una estación a bordo de un satélite geoestacionario para retransmitir las señales hacia las sondas del espacio lejano y desde éstas. Los enlaces entre dicha estación y las sondas no sufrirían las perturbaciones de la atmósfera. Estos enlaces podrían protegerse también de las interferencias terrenales eligiendo frecuencias para las que la atmósfera es relativamente opaca a las señales radioeléctricas. Estas frecuencias pueden encontrarse en la gama de 40-120 GHz.

1.1.4 A las frecuencias más elevadas, normalmente es posible proporcionar atribuciones de banda más ancha. Tales atribuciones pueden acomodar transmisiones con anchura de banda mayor. Esta mayor anchura de banda permite utilizar esquemas de codificación más complejos con lo que puede reducirse la proporción de errores en los datos así como la susceptibilidad a la interferencia.

1.2 Bases para la elección de frecuencias

La elección de las frecuencias preferidas se basa en el comportamiento del enlace y en las características de propagación y del equipo. En los tres puntos siguientes del presente anexo, se examinan los factores que influyen sobre la elección de frecuencias. Algunos de estos factores proporcionan la información necesaria para calcular un índice del comportamiento del enlace. Este índice puede expresarse como P_r/N_0 , es decir la relación entre la potencia total recibida y la densidad espectral de ruido para un conjunto determinado de condiciones de propagación y parámetros del equipo.

2 Características de la propagación interplanetaria que dependen de la frecuencia

Las características de la propagación interplanetaria determinan el comportamiento de los enlaces entre una sonda en el espacio lejano y un satélite de retransmisión situado fuera de la atmósfera de la Tierra. Estas características, también afectan al comportamiento de los enlaces entre las estaciones terrenas y el espacio lejano.

2.1 Atenuación

La absorción gaseosa o la dispersión por partículas de polvo fuera de las atmósferas planetarias atenuarán la señal menos de 0,1 dB en la gama 40-120 GHz, cuando el trayecto de propagación se limite a nuestro sistema solar. Por consiguiente, la atenuación producida por el espacio interplanetario puede considerarse despreciable en la elección de las bandas de frecuencias preferidas.

2.2 Temperatura de ruido del cielo

La temperatura de ruido del cielo experimentada por un satélite de retransmisión estará determinada por el ruido de fondo cósmico (3 K) y el ruido cuántico, como puede verse en la curva A de la Fig. 1, salvo cuando penetre en la antena el ruido procedente de la Tierra, de otros planetas o del Sol. En la Recomendación UIT-R P.372 se examinan los efectos de estas fuentes de ruido.

La temperatura del ruido del cielo experimentada por un vehículo espacial será superior a la que indica la curva A porque la Tierra estará por lo general dentro del lóbulo principal de la antena de un vehículo espacial dirigida hacia el satélite retransmisor. La temperatura de cuerpo negro de la Tierra contribuirá a la temperatura de ruido del sistema de recepción. Por ejemplo, para un vehículo espacial situado a 4×10^7 de la Tierra (distancia mínima a Venus), la Tierra subtende un ángulo de $0,018^\circ$. Si la antena del vehículo espacial tiene una anchura de haz mínima de $0,15^\circ$ limitada por el control de la precisión de puntería, la Tierra puede ocupar menos del 1,5% del lóbulo principal de la antena. El efecto de la temperatura de cuerpo negro de la Tierra es duplicar (aproximadamente) la temperatura de ruido del cielo efectiva. Esa temperatura resulta pequeña en comparación con la temperatura de ruido de 600-1500 K de un sistema receptor de un vehículo espacial típico. (En la gama de frecuencias 40-120 GHz la temperatura de cuerpo negro varía entre 210 y 290 K, en función de la frecuencia y la longitud del punto de proyección del vehículo espacial sobre la Tierra.)

Un satélite retransmisor puede utilizar un receptor con una temperatura de ruido notablemente inferior a 600 K pero ello no afectaría significativamente la selección de las bandas de frecuencias preferidas en la gama considerada.

En esta gama de frecuencias, la temperatura de ruido experimentada por una antena que apunta en dirección del Sol es de 6000 K. Normalmente debe evitarse este gran incremento en la temperatura de ruido del sistema, que puede influir en el desarrollo cronológico y en el diseño de algunas misiones y experimentos en el espacio lejano.

2.3 Velocidad de propagación

Las partículas cargadas a lo largo del trayecto de comunicación producen cambios en la velocidad de propagación. La Fig. 5 de la Recomendación UIT-R SA.1012 muestra un ejemplo de error en la medición de la distancia en función de la frecuencia y del ángulo que forman el trayecto del rayo y una línea que une la estación terrena y la superficie del Sol. Aunque las curvas de la figura no incluyen frecuencias por encima de 32 GHz, la tendencia a la disminución de errores continúa a medida que las frecuencias toman valores más elevados. Se deduce de ello que para la determinación de distancias con la mayor exactitud posible es conveniente elegir frecuencias altas.

2.4 Centelleo

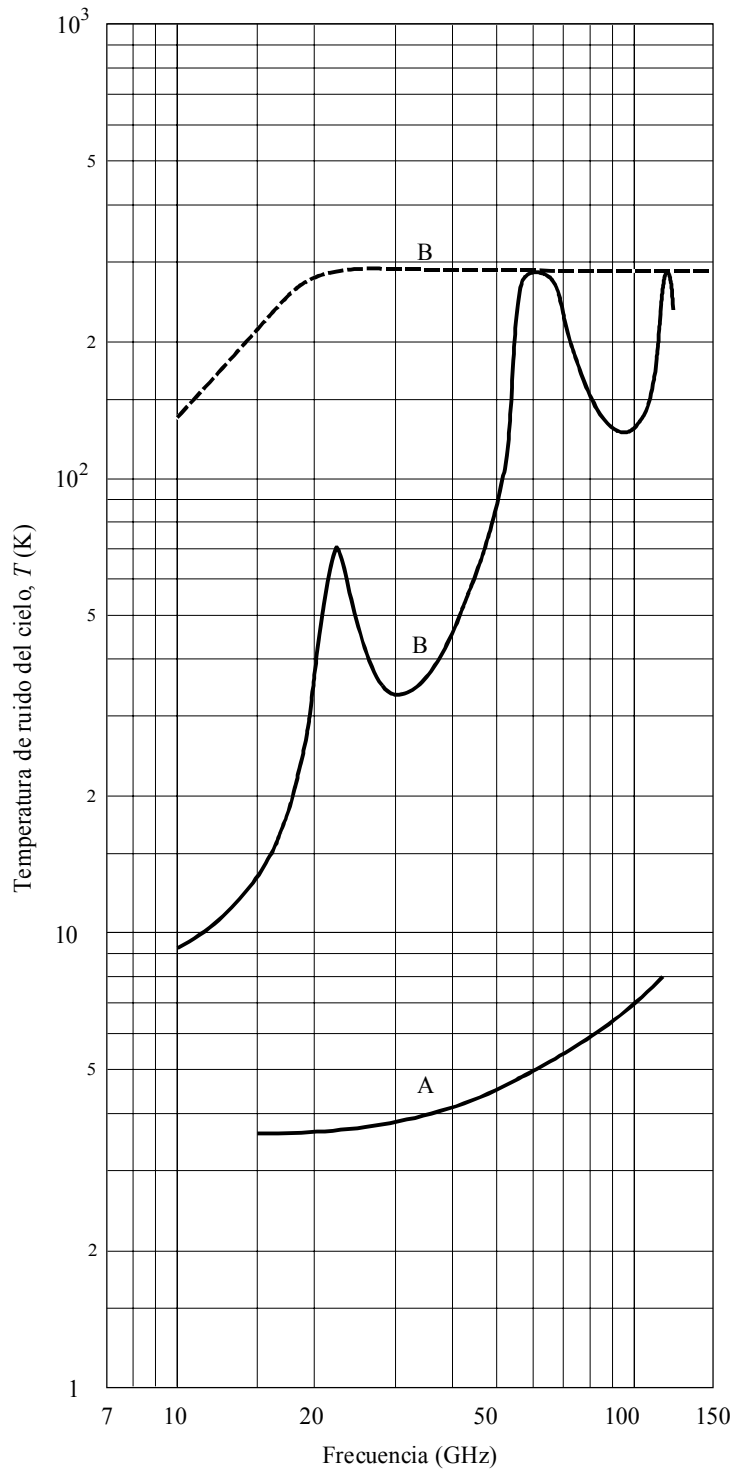
El centelleo de amplitud y de fase por efecto del plasma solar puede reducir la calidad de funcionamiento del enlace en trayectos de rayos próximos al Sol. La magnitud del centelleo disminuye cuando aumenta la frecuencia.

3 Características de propagación a través de una atmósfera que dependen de la frecuencia

Los anteriores factores de propagación interplanetaria afectan a los enlaces entre el espacio lejano y una estación retransmisora geostacionaria. En el caso de enlaces entre el espacio lejano y la Tierra, la atmósfera desempeña un papel predominante en la elección de las frecuencias preferidas en la gama de 40-120 GHz.

Las atmósferas planetarias pueden afectar a los trayectos rasantes o que penetran en ella.

FIGURA 1
Temperatura de ruido del cielo



Curvas A: Vista por la estación en el espacio lejano

B: Vista por la estación terrena con un ángulo de elevación de la antena de 30°

- Atmósfera gaseosa
- - - - - Combinación de atmósfera gaseosa y lluvia excedida durante el 0,001% del tiempo (55 mm/h, clima hidrometeorológico J)

D01

3.1 Atenuación

3.1.1 Atenuación producida por la atmósfera de la Tierra

La atenuación de las señales que pasan a través de la ionosfera de la Tierra es insignificante en frecuencias superiores a 40 GHz, pero la atmósfera neutra desempeña un papel fundamental en estas frecuencias. La atenuación en la transmisión a través de la atmósfera se representa en la Fig. 2 (véase también la Recomendación UIT-R P.676). Por encima de 40 GHz, la atenuación mínima de los enlaces entre la Tierra y el vehículo espacial se obtendría en frecuencias próximas a 90 GHz.

La atenuación específica producida por la lluvia cuando su intensidad es superior a unos cuantos milímetros por hora, es mayor que la de los gases atmosféricos y aumenta de forma monótona con la frecuencia en la gama que nos interesa. La intensidad de la lluvia durante el 0,01% del tiempo en una zona hidrometeorológica mediana es superior a 30 mm/h (véase la Recomendación UIT-R P.837). La atenuación en la gama de 40-120 GHz cuando la lluvia tiene esa intensidad es tan alta (Recomendación UIT-R P.838) que las comunicaciones entre la Tierra y el vehículo espacial en el espacio lejano generalmente ya no son posibles y no se la tendrá en cuenta al determinar las frecuencias preferidas.

En los enlaces satélite de retransmisión-vehículo espacial, los trayectos de propagación con visibilidad directa se verán obstruidos a veces por la interposición de la Tierra o parte de su atmósfera. Visto desde un satélite geostacionario, el disco de la Tierra (sin incluir la atmósfera) subtende un ángulo sólido de $17,34^\circ$. Si la atmósfera desde la superficie de la Tierra hasta una altitud de 100 km fuese opaca a las ondas radioeléctricas, el ángulo de ocultación aumentaría en $0,27^\circ$. El efecto de la atenuación atmosférica sobre el ángulo de ocultación es tan pequeño que este factor no influye en la elección de las bandas de frecuencias preferidas.

El objetivo de proteger los trayectos entre sondas en el espacio lejano y un satélite de la Tierra contra las interferencias terrenales puede lograrse aprovechando la elevada atenuación atmosférica en las regiones de 60 GHz y 119 GHz (véase la Recomendación UIT-R P.838). Las rayas de absorción del oxígeno molecular a esas frecuencias son la causa de la elevada atenuación que se observa en la Fig. 2.

3.1.2 Atenuación producida por las atmósferas de otros planetas

Desde el punto de vista de la atenuación, la naturaleza de las atmósferas de otros planetas no influye en la elección de las frecuencias de comunicación en la gama 40-120 GHz. Ello no quiere decir que las atmósferas de otros planetas no contengan en esta gama de frecuencias rayas espectrales de interés científico, como por ejemplo, la del amoníaco.

3.2 Temperatura de ruido del cielo en las estaciones terrenas

La temperatura de ruido del cielo vista desde una estación terrena es función de la frecuencia, del ángulo de elevación y de las condiciones atmosféricas (véase la Recomendación UIT-R P.372). Las curvas B de la Fig. 1 representan la temperatura de ruido del cielo con tiempo despejado y con lluvia intensa.

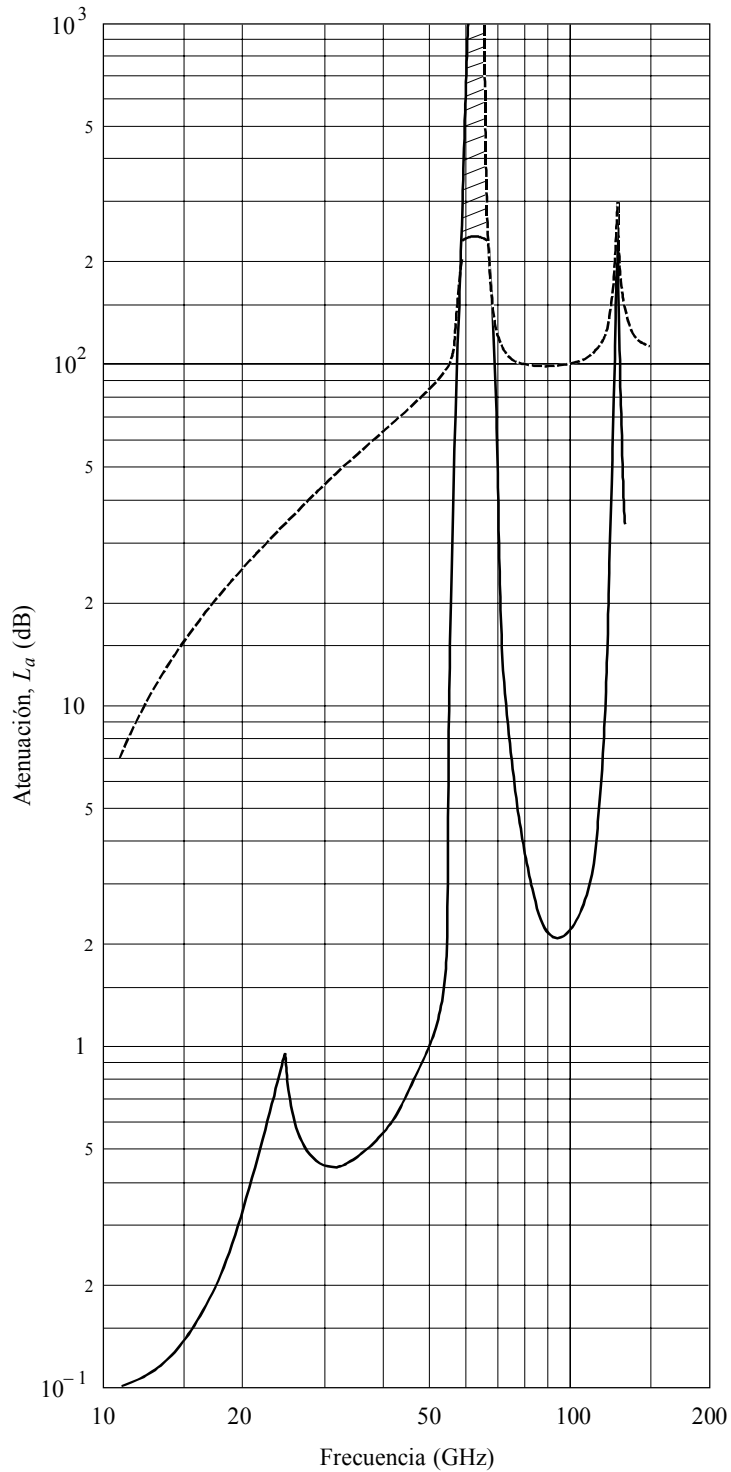
Cuando la antena de la estación terrena apunta cerca del Sol, aumenta la temperatura de ruido.

3.3 Centelleo

El centelleo de amplitud y fase por efecto de la atmósfera neutra se examina en la Recomendación UIT-R P.618. Los efectos aumentan con la frecuencia para una abertura fija de antena y a 100 GHz pueden provocar fluctuaciones en la amplitud de la señal entre 0,4 y 3,8 dB en el caso de una antena parabólica de 3,7 m de diámetro.

FIGURA 2

Atenuación producida por la atmósfera gaseosa y la lluvia para un ángulo de elevación de antena de 30° en una estación terrena



- Atmósfera gaseosa (vapor de agua en la superficie: $7,5 \text{ g/m}^3$)
- - - Combinación de atmósfera gaseosa y lluvia excedida durante el 0,001% del tiempo (55 mm/h, zona hidrometeorológica J)

D02

El centelleo causado por la ionosfera de la Tierra no influirá en la elección de frecuencias por encima de 40 GHz (véase la Recomendación UIT-R P.531), y lo mismo puede decirse por lo que respecta a las ionosferas planetarias. En algunas misiones, el centelleo causado por la corona solar podría afectar la elección de frecuencias.

4 Características del equipo que dependen de la frecuencia

Las características del equipo que determinan el comportamiento de los enlaces son la potencia de transmisión, el tamaño de la antena, la exactitud de su superficie, la precisión de puntería de la misma y la temperatura de ruido del receptor. Estas características normalmente dependen en cierta medida de la frecuencia. En la gama de frecuencias 40-120 GHz, para trayectos entre la Tierra y el espacio lejano, el efecto de la atmósfera en el comportamiento de los enlaces es tan acusado que las características del equipo que dependen de la frecuencia tienen poca influencia en la elección de las frecuencias preferidas.

Debido a limitaciones prácticas de los diplexores y los polarizadores de onda, la transmisión y recepción simultánea con una sola antena exige que las frecuencias de los enlaces ascendente y descendente se encuentren separadas aproximadamente entre el 8 y el 20%. Al elegir los pares de bandas entre las gamas indicadas en el Cuadro 1 debe tenerse en cuenta esta circunstancia.

CUADRO 1
Gamas de frecuencias preferidas y campos de utilización

Gama de frecuencias preferida (GHz)	Aplicación	Otras necesidades ⁽¹⁾
56-64	Satélite de retransmisión-espacio lejano y espacio lejano-satélite de retransmisión, protegido contra señales terrenales	Un par de bandas de 1 000 MHz de anchura dentro de la gama y con una separación entre el 8 y el 20%
80-100	Espacio lejano-Tierra y Tierra-espacio lejano	Un par de bandas de 1 000 MHz de anchura, dentro de la gama y con una separación entre el 8 y el 20%
98-110	Satélite de retransmisión-espacio lejano (para su uso en conexión con un enlace en la banda 117,7-119,8 GHz)	Anchura de banda de 1 000 MHz separada entre el 8 y el 20% de la banda en la gama 117,7-119,8 GHz
117,7-119,8	Espacio lejano-satélite de retransmisión, protegidos contra señales terrenales	Anchura de banda de 1 000 MHz

⁽¹⁾ El porcentaje de separación se refiere a un par de frecuencias, situadas en cada una de las dos bandas y no a la anchura de cada banda. Por ejemplo, si el extremo inferior de una banda es 56 GHz, el extremo inferior de la otra banda debe encontrarse entre 1,08 y 1,20 veces 56 GHz.

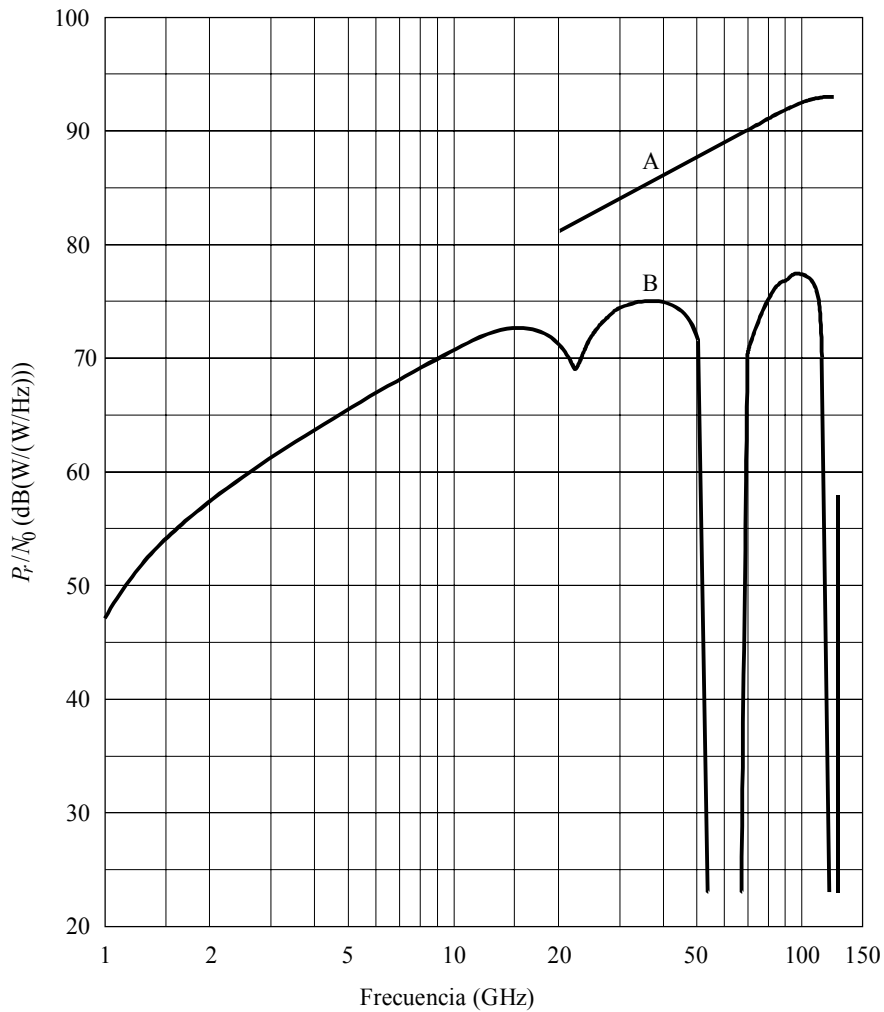
5 Ejemplo de análisis de comportamiento del enlace

La Fig. 3 muestra la calidad de funcionamiento de los enlaces en función de la frecuencia. La curva A corresponde a un trayecto en el espacio libre. La curva B incluye el efecto de la atmósfera de la Tierra. El índice de calidad P_r/N_0 (véase el § 1.2) se calculó basándose en los datos de las Figs. 1 y 2 y en los siguientes valores de los parámetros:

Distancia de comunicación:	8×10^8 km
Potencia del transmisor del vehículo espacial:	25 W
Antena del vehículo espacial:	3,7 m
Antena de la estación terrena:	64 m.

FIGURA 3

Índice de comportamiento del enlace (P_r/N_0) limitado únicamente por fenómenos naturales; dos antenas de diámetros determinados: 3,7 m en la estación en el espacio lejano y 64 m en la estación receptora



Curvas A: Espacio lejano-satélite

B: Espacio lejano-estación terrena

D03

Se supone que las antenas son ideales y con una ganancia proporcional al cuadrado de la frecuencia.

Estos valores se ofrecen únicamente a título de ejemplo y podrían utilizarse otros distintos. Se obtendrían resultados numéricos diferentes, pero la forma de las curvas de comportamiento y la selección de frecuencias correspondiente serían las mismas.

Comparando las curvas A y B puede observarse la ventaja que tiene para el comportamiento de los enlaces el hecho de utilizar frecuencias más elevadas cuando el trayecto está completamente en el espacio. Esta es la razón principal para establecer una estación retransmisora en un satélite de la Tierra.

La curva B muestra que las bandas de frecuencias en la gama 40-120 GHz pueden asegurar la transmisión a través de la atmósfera y la protección de los trayectos entre un satélite de retransmisión y las sondas del espacio lejano contra las señales terrenales.

6 Bandas de frecuencias preferidas

El Cuadro 1 muestra las bandas de frecuencias preferidas para la investigación en el espacio lejano en la gama 40-120 GHz. Se han seleccionado basándose en:

- la atenuación y las características de temperatura de ruido de la propagación a través de la atmósfera;
- la necesidad de proporcionar enlaces entre un satélite de retransmisión y una estación en el espacio lejano que estén protegidos contra las señales terrenales;
- la necesidad de que los enlaces permitan la comunicación entre una estación en el espacio lejano y un satélite de retransmisión o una estación terrena.

La posibilidad de compartición de la banda y las atribuciones existentes en el Reglamento de Radiocomunicaciones no constituyeron factores determinantes en la selección de las bandas. No se utilizaron las características de centelleo dependientes de la frecuencia y la velocidad de propagación para determinar las bandas de frecuencias preferidas. Estos factores podrían influir en la utilización de ciertas bandas atribuidas para misiones de investigación espacial particulares, pero se consideró que la calidad de funcionamiento de las comunicaciones era el factor principal en la elección de la banda preferida. Tampoco se ha tenido en cuenta en la elección de las bandas las características del equipo que varían con la frecuencia. Es probable que las bandas utilizables sigan siéndolo durante muchos años. La tecnología del equipo se desarrollará para utilizar de la mejor forma posible estas frecuencias, con las limitaciones inherentes a los fenómenos naturales.

En la zona de alta atenuación entre 56 y 64 GHz podrían acomodarse un par de enlaces (sonda-satélite de la Tierra y viceversa). Se necesita una separación en frecuencias comprendida entre el 8 y el 20%. La raya de absorción a 119 GHz es mucho más estrecha y debido a las necesidades de separación de frecuencias entre el 8 y el 20%, sólo uno de los enlaces del par podría gozar de la máxima protección. En este caso, tiene prioridad la protección del enlace entre el vehículo espacial y el satélite de retransmisión.
