

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.1012*

Bandas de frecuencias preferidas para la investigación del espacio lejano en la gama de 1-40 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 situados en el espacio lejano vienen determinadas, en parte, por los fenómenos atmosféricos y de propagación interplanetaria;
- b) que la tecnología también influye en la selección de las frecuencias preferidas;
- c) que en 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 una estación terrena requerirán normalmente frecuencias distintas;
- e) que es práctico y conveniente incorporar funciones de seguimiento y teledata en el mismo enlace espacio-Tierra y funciones de telemando y seguimiento en el mismo enlace Tierra-espacio;
- f) que para realizar un seguimiento Doppler de precisión, es necesario utilizar un par de frecuencias coherentemente relacionadas para los trayectos Tierra-espacio y espacio-Tierra;
- g) que para efectuar una calibración más precisa de los efectos de las partículas cargadas sobre la velocidad de propagación, se necesita la utilización simultánea de enlaces con frecuencias coherentes en dos o más bandas muy separadas;
- h) que los enlaces de señal vocal y de vídeo asociados con los vehículos tripulados en el espacio lejano podrían utilizar bandas de frecuencias atribuidas a las funciones de teledata, telemando y seguimiento;
- j) que se han determinado las gamas de frecuencias preferidas indicadas en el Anexo 1;
- k) que la viabilidad de las atribuciones de banda a 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 1 y 40 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 3;
- 2 que se tengan en cuenta tanto el contenido del § 6 del Anexo 1 como los requisitos de anchura de banda que figuran en 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 1-40 GHz****1 Introducción**

El comportamiento del enlace de telecomunicaciones, las características de los equipos y los requisitos de la misión determinan las bandas de frecuencias preferidas para la investigación del espacio lejano. El presente Anexo realiza un análisis para la selección de estas bandas. En la Recomendación UIT-R SA.1014 aparece información sobre los requisitos generales de la misión y consideraciones sobre los equipos; la Recomendación UIT-R SA.1015 trata sobre las anchuras de banda necesarias.

El objeto de identificar las bandas de frecuencias preferidas es proporcionar bases técnicas para la atribución de bandas, a partir de las cuales el diseñador pueda seleccionar las frecuencias de explotación más adecuadas a las necesidades de una misión.

2 Criterios para la selección de bandas de frecuencias preferidas

Para cada función de telecomunicación, por ejemplo, telediagnóstico de mantenimiento y científica, telediagnóstico, seguimiento y radiociencia, hay una banda de frecuencias o un conjunto de bandas de frecuencias que proporcionan la mejor calidad de funcionamiento. La calidad óptima puede expresarse en términos de proporción de errores mínima, precisión máxima en las mediciones, máxima velocidad de datos, máxima fiabilidad del enlace o una combinación de estos parámetros. La calidad óptima que puede obtenerse en un momento determinado con un sistema concreto depende de las características de la propagación radioeléctrica.

Un índice adecuado de la calidad óptima es la relación entre la potencia de la señal recibida y la densidad espectral de potencia de ruido, P_r/N_0 . La banda de frecuencias que permite obtener el valor más elevado de P_r/N_0 para un sistema y unas condiciones de propagación determinados se define como la banda de frecuencias preferida.

En este Anexo, el análisis de la variación de P_r/N_0 en función de la frecuencia está de acuerdo con lo dispuesto en la Recomendación UIT-R SA.1017. De los datos resultantes pueden determinarse las gamas de frecuencias que proporcionan el comportamiento óptimo en las condiciones supuestas.

3 Características de los equipos relativas al análisis del comportamiento del enlace

3.1 Consideraciones relativas a la antena

Las estaciones terrenas para la investigación del espacio lejano utilizan normalmente grandes antenas parabólicas orientables, muy costosas y que no se construyen con frecuencia. El diseñador de una misión normalmente no tiene libertad para considerar una gama amplia de diámetros de antena de estaciones terrenas cuando selecciona las frecuencias. Por ello, en el análisis se considera que la antena de la estación terrena tiene un diámetro fijo. La ganancia y la anchura de haz de esta antena son función de la frecuencia.

Para las estaciones espaciales, el diseñador puede considerar una amplia variedad de tipos y tamaños de antena. El análisis contempla dos casos: una antena reflectora parabólica de diámetro fijo y cuya anchura de haz y ganancia son función de la frecuencia y una antena cuya anchura de haz (ganancia) no varía con la frecuencia.

El caso del diámetro fijo puede aplicarse en la gama de frecuencias considerada si el diámetro es lo suficientemente pequeño (la anchura de haz a la frecuencia más elevada es lo suficientemente amplio) como para que la precisión de puntería de la antena no limite la anchura de haz mínima.

El caso de anchura de haz fija (ganancia fija) aparece cuando la precisión de puntería de la antena determina la anchura de haz mínima o cuando la antena debe ofrecer una cobertura muy amplia para permitir las comunicaciones independientemente de la actitud de la estación espacial. Una antena omnidireccional constituye un ejemplo del caso de anchura de haz fija.

En análisis del enlace del presente Anexo se ha supuesto que una antena de diámetro fijo para una estación espacial presenta una eficacia del 60% y una ganancia directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia. Para el caso de la anchura de haz fija (ganancia fija), se supone una ganancia de 0 dBi, independiente de la frecuencia.

La ganancia de antena de la estación terrena utilizada en el análisis se ha tomado de la Recomendación UIT-R SA.1014.

3.2 Potencia del transmisor

En los transmisores de estación espacial, la potencia de salida de radiofrecuencia depende del nivel de potencia primaria que puede suministrar el vehículo espacial y viene limitada por la eficacia del transmisor. En las estaciones terrenas estas limitaciones son mucho menos significativas.

En el análisis del comportamiento del enlace que presenta este Anexo, se ha considerado que la potencia del transmisor es independiente de la frecuencia.

3.3 Temperatura de ruido del equipo receptor

La temperatura de ruido del sistema receptor de una estación espacial viene determinada por el preamplificador de entrada y el filtro de preselección asociado. La contribución al ruido de las pérdidas del alimentador de la antena es relativamente poco importante. La temperatura de ruido de la estación espacial utilizada en este Anexo es representativa de la tecnología actual empleando dispositivos de estado sólido no refrigerados.

En las estaciones terrenas no existen limitaciones importantes en cuanto al tamaño, peso o complejidad, y el receptor debe ser lo más sensible posible. Normalmente se utilizan preamplificadores MASER con refrigeración criogénica. En el análisis del enlace realizado en este Anexo se han supuesto las temperaturas de ruido de estación terrena indicadas en la Recomendación UIT-R SA.1014.

4 Consideraciones relativas a la propagación

Para el análisis de la calidad del enlace es preciso hacer suposiciones sobre las condiciones de propagación. Una suposición crítica es la intensidad de las precipitaciones y la atenuación resultante. En los sistemas de recepción de bajo nivel de ruido que suelen utilizarse en la investigación del espacio lejano, especialmente en los receptores de estación terrena, incluso un pequeño aumento de la atenuación debido a la lluvia provoca una reducción muy significativa de la relación P_r/N_0 . Ello se debe a que el aumento del ruido del cielo es varias veces mayor que la temperatura de ruido del receptor y, por consiguiente, es el factor que más influye en la temperatura de ruido total del sistema.

El análisis efectuado en el presente Anexo supone una intensidad de precipitaciones de 10 mm/hr (cantidad rebasada el 0,1% del tiempo en una estación terrena próxima a Madrid, España).

Aunque esta intensidad de precipitaciones produce únicamente 1 dB de atenuación si se compara con el caso de cielo despejado a 8,4 GHz y un ángulo de elevación de 30°, provoca una degradación de 5,8 dB en la relación P_r/N_0 de la transmisión espacio-Tierra. Como resultado de la sensibilidad de la calidad del sistema (P_r/N_0) a pequeños cambios en la atenuación a lo largo del trayecto de propagación, en las curvas de calidad que figuran más adelante hay una fuerte influencia de la intensidad de precipitaciones supuesta.

5 Resultados del análisis de la calidad del enlace

La variación de P_r/N_0 que aparece en las Figs. 1 a 4 se ha determinado por el método descrito en la Recomendación UIT-R SA.1017 suponiendo el siguiente conjunto de características de equipo y condiciones de explotación:

Distancia de la comunicación:	8×10^8 km
Diámetro de la antena de estación terrena:	70 m
Potencia del transmisor de la estación terrena:	100 kW
Diámetro de la antena de la estación espacial:	3,7 m
Potencia del transmisor de la estación espacial:	25 W

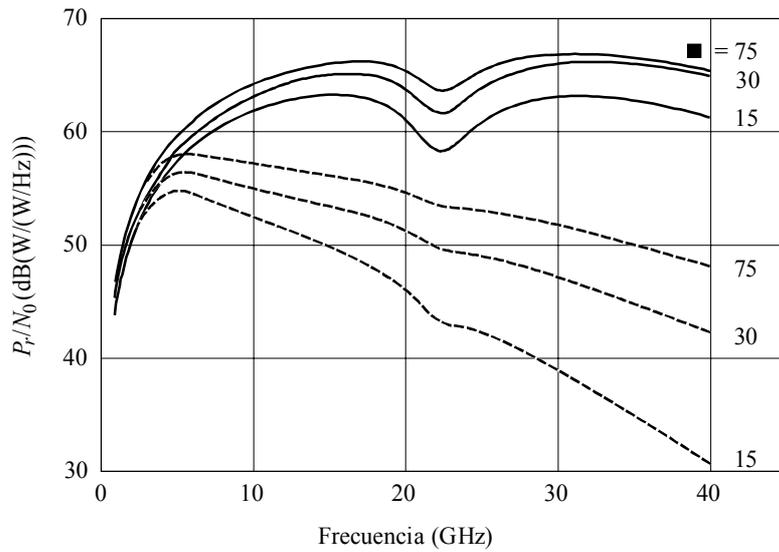
Las características más significativas de las curvas de calidad son la ubicación de los máximos y los efectos del ángulo de elevación y de las condiciones meteorológicas. Los valores absolutos de P_r/N_0 dependen de los parámetros del enlace supuestos. Si se efectúan hipótesis distintas sobre el alcance de la comunicación, las características de antenas y la potencia del transmisor cambiarían los valores absolutos pero no se alteraría la forma de las curvas.

Las Figuras muestran las curvas para tiempo despejado y lluvioso y para ángulos de elevación de la antena de la estación terrena de 15°, 30° y 75° por encima del horizonte. Las Figs. 1a), 2a), 3a) y 4a) reflejan las limitaciones impuestas por un equipo típico de estaciones terrenas y de espacio lejano.

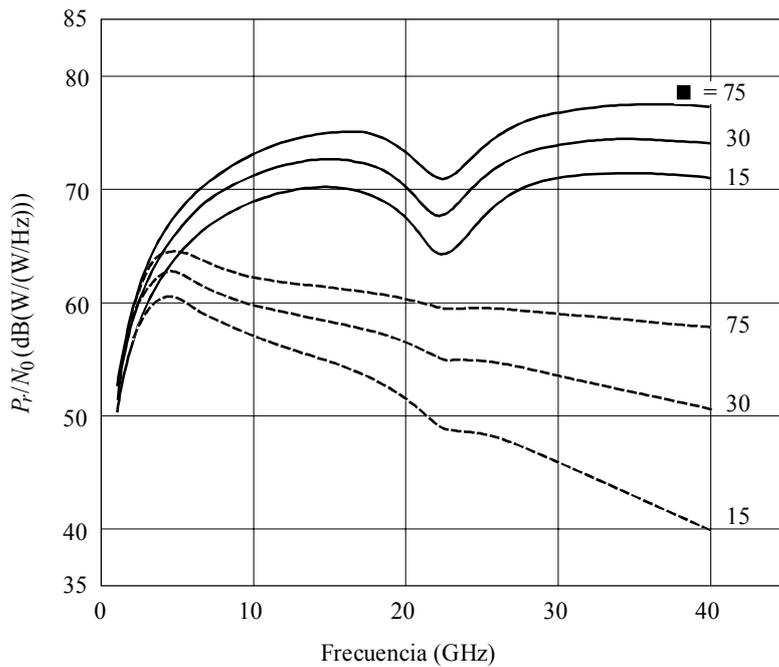
En las Figs. 1b), 2b), 3b) y 4b) se ha supuesto la utilización de antenas perfectas y receptores sin ruido. Estas curvas ilustran la calidad obtenible limitada únicamente por fenómenos naturales. La comparación de las curvas en cada Fig. a) y b) demuestra la posibilidad de obtener una calidad global del enlace superior a la que podría obtenerse mejorando la tecnología de los equipos.

En los Cuadros 1 y 2 aparecen las gamas de frecuencias óptimas para la configuración de antena y condiciones meteorológicas indicadas. El criterio para elegir la gama de frecuencias ha sido que la calidad del enlace (P_r/N_0) no se desvíe más de 1 dB de la máxima disponible.

FIGURA 1
Calidad del enlace espacio-Tierra, P_r/N_0



a) Calidad obtenible en el enlace, limitada por las características de los equipos y los fenómenos de propagación naturales

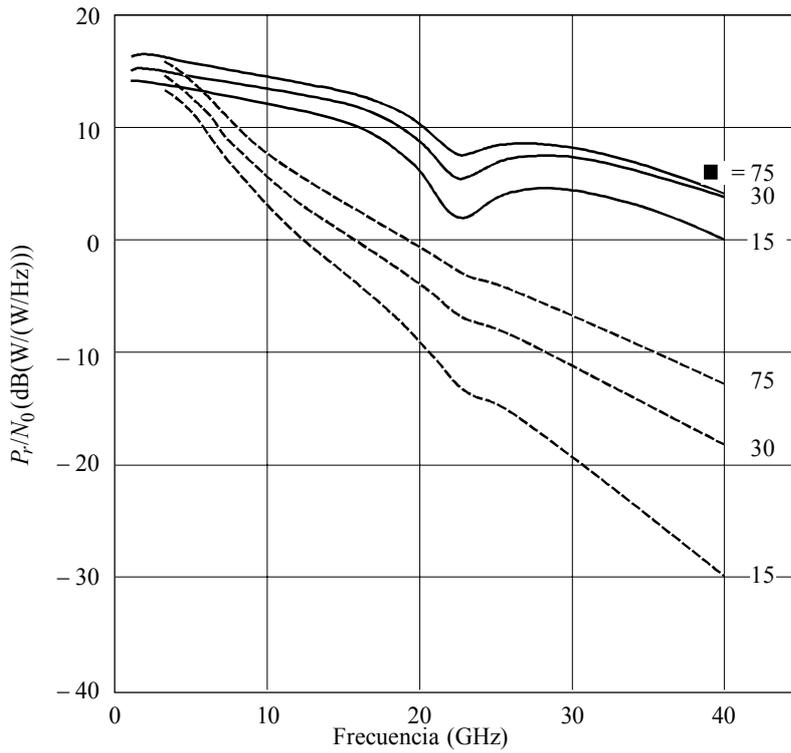


b) Calidad ideal del enlace, limitada solamente por fenómenos naturales

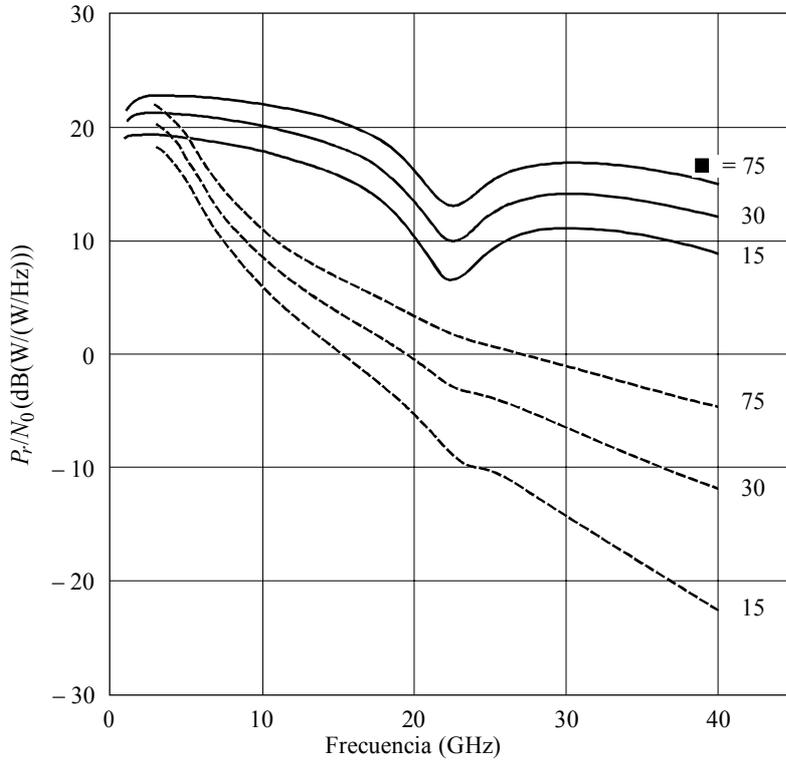
Antenas de estación terrena y de estación espacial de diámetro fijo

- Cielo despejado, 7,5 g/m³ de vapor de agua
- - - - - Atmósfera y lluvia, 10 mm/h
- Ángulo de elevación (grados) de la antena de la estación terrena

FIGURA 2
Calidad del enlace espacio-Tierra, P_r/N_0



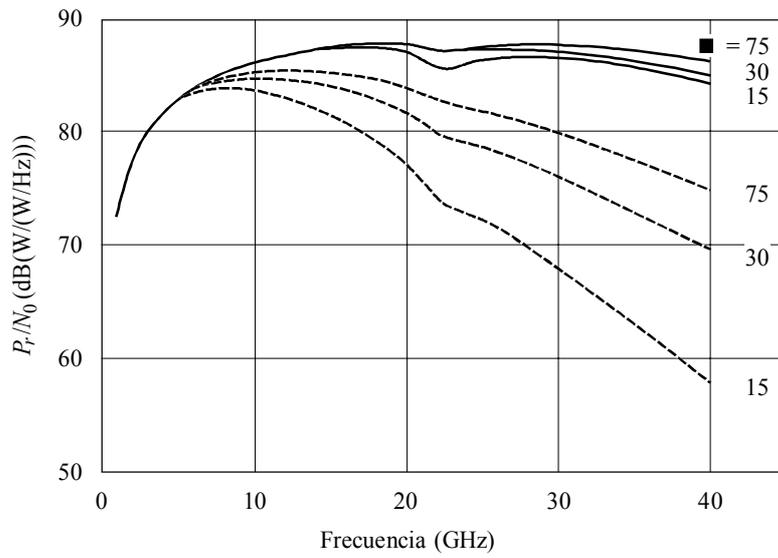
a) Calidad obtenible en el enlace, limitada por las características de los equipos y los fenómenos de propagación naturales



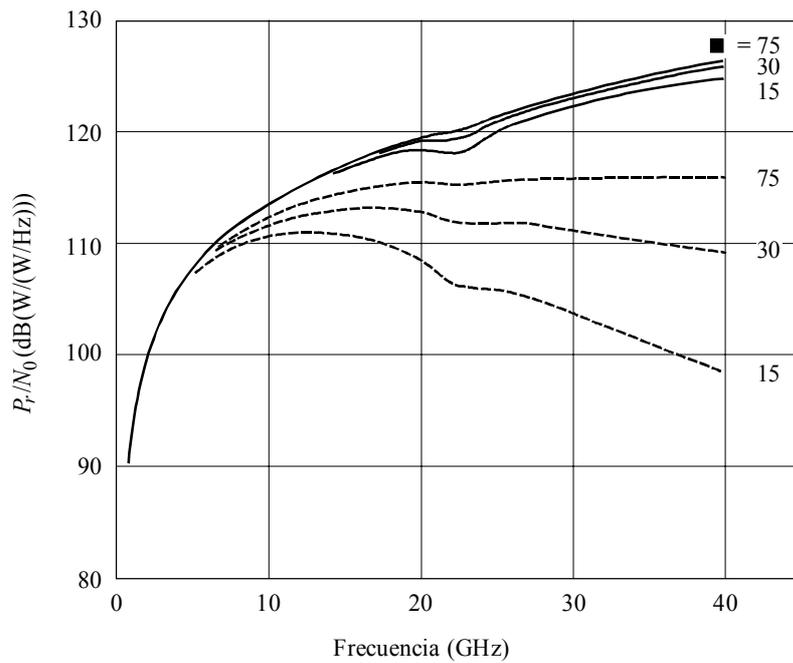
b) Calidad ideal del enlace, limitada solamente por fenómenos naturales
Antena de estación terrena de diámetro fijo, antena de estación espacial de ganancia fija

- Cielo despejado, 7,5 g/m³ de vapor de agua
- - - - - Atmósfera y lluvia, 10 mm/h
- Ángulo de elevación (grados) de la antena de la estación terrena

FIGURA 3
Calidad del enlace espacio-Tierra, P_r/N_0



a) Calidad obtenible en el enlace, limitada por las características de los equipos y los fenómenos de propagación naturales

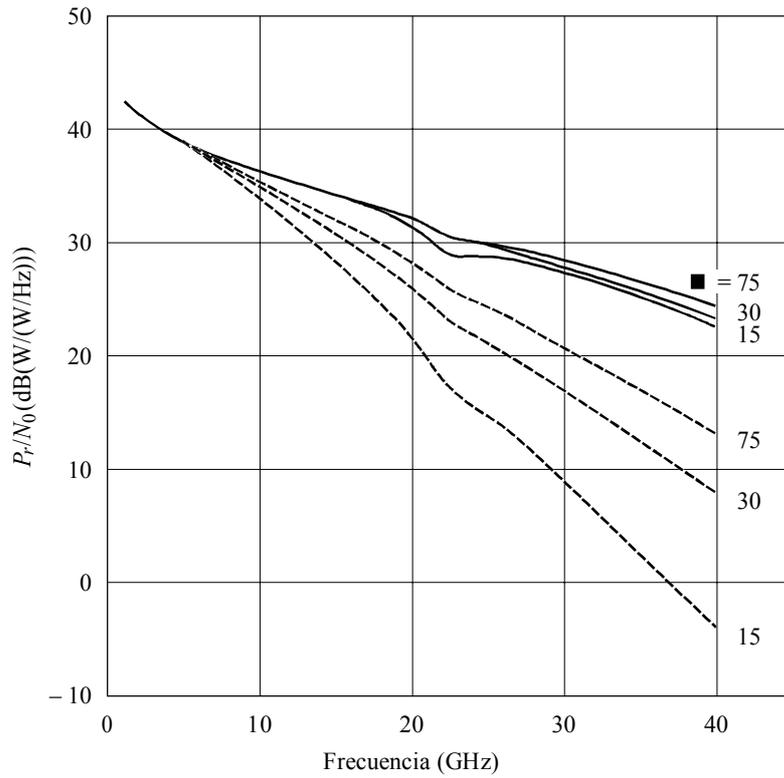


b) Calidad ideal del enlace, limitada solamente por fenómenos naturales

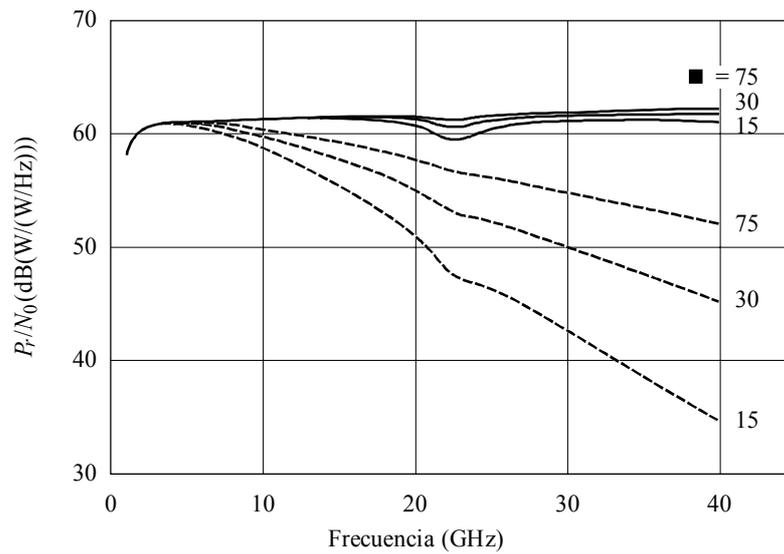
Antenas de estación terrena y de estación espacial de diámetro fijo

- Cielo despejado, 7,5 g/m³ de vapor de agua
- - - - - Atmósfera y lluvia, 10 mm/h
- Ángulo de elevación (grados) de la antena de la estación terrena

FIGURA 4
Calidad del enlace espacio-Tierra, P_r/N_0



a) Calidad obtenible en el enlace, limitada por las características de los equipos y los fenómenos de propagación naturales



b) Calidad ideal del enlace, limitada solamente por fenómenos naturales

Antena de estación terrena de diámetro fijo, antena de estación espacial de ganancia fija

- Cielo despejado, 7,5 g/m³ de vapor de agua
- - - - - Atmósfera y lluvia, 10 mm/h
- Ángulo de elevación (grados) de la antena de la estación terrena

CUADRO 1

Gamas de frecuencias preferidas: espacio-Tierra

Configuración de antena	Condiciones meteorológicas	Gama de frecuencias preferidas	
		Equipo ideal ⁽¹⁾	Equipo actual ⁽²⁾
Transmisor de diámetro fijo	Cielo despejado	11,5-19 GHz 28,5-40 GHz	12-20 GHz 26-39,5 GHz
Receptor de diámetro fijo	Lluvia	3 000-6 500 MHz	3 500-9 000 MHz
Transmisor de ganancia fija	Cielo despejado	1 000-9 500 MHz	1 000-6 500 MHz
Receptor de diámetro fijo	Lluvia	1 000-3 500 MHz	1 000-4 000 MHz

(1) Basándose en un análisis que considera únicamente fenómenos naturales.

(2) Basándose en un análisis que incluye los efectos de las características de los equipos.

CUADRO 2

Gamas de frecuencias preferidas: Tierra-espacio

Configuración de antena	Condiciones meteorológicas	Gama de frecuencias preferidas	
		Equipo ideal ⁽¹⁾	Equipo actual ⁽²⁾
Transmisor de diámetro fijo	Cielo despejado	35-40 GHz	11,5-35,5 GHz
Receptor de diámetro fijo	Lluvia	11-22 GHz	6 000 MHz-16 GHz
Transmisor de diámetro fijo	Cielo despejado	2 000 MHz-40 GHz	1 000-2 000 MHz
Receptor de ganancia fija	Lluvia	1 500-9 500 MHz	1 000-2 000 MHz

(1) Basándose en un análisis que considera únicamente fenómenos naturales.

(2) Basándose en un análisis que incluye los efectos de las características de los equipos.

6 Selección de las bandas de frecuencias preferidas

En el Cuadro 3 figuran las gamas de frecuencias preferidas determinadas por el análisis de la calidad de funcionamiento del enlace y realizando las siguientes consideraciones adicionales.

6.1 Características del diplexor

Debido a los límites prácticos de los polarizadores de onda y diplexores, la transmisión y recepción simultánea con una sola antena exige que las frecuencias de los enlaces ascendente y descendente estén separadas aproximadamente entre el 8 y el 20%. Hay que tener en cuenta esta circunstancia cuando se elijan los pares de bandas entre las gamas indicadas en el Cuadro 3.

6.2 Anchura de banda del enlace y de la atribución

La anchura de banda necesaria para un enlace de telecomunicaciones particular y el número estimado de enlaces separados proporcionan una estimación de la atribución de anchura de banda necesaria. En la Recomendación UIT-R SA.1015 se examinan las necesidades de anchura de banda.

CUADRO 3

Gamas de frecuencias preferidas y su aplicación*

Gama de frecuencias (GHz)	Aplicación
1-2	Enlaces Tierra-espacio con antenas de vehículo espacial de gran abertura de haz y baja ganancia en condiciones de cielo despejado o lluvia. Se utiliza para funciones de enlace ascendente
1-4	Enlaces espacio-Tierra con antenas de vehículo espacial de gran abertura de haz y baja ganancia en condiciones de lluvia. Se utiliza para funciones de enlace descendente
1-6,5	Enlaces espacio-Tierra con antenas de vehículo espacial de gran abertura de haz y baja ganancia en condiciones de cielo despejado. Se utiliza para funciones de enlace descendente
3,5-9	Enlaces espacio-Tierra con antenas de vehículo espacial de alta ganancia en condiciones de lluvia. Se emplea para funciones de enlace descendente
6-16	Enlaces Tierra-espacio con antenas de vehículo espacial de alta ganancia en condiciones de lluvia. Se utiliza para funciones de enlace ascendente
11,5-35,5	Enlaces Tierra-espacio con antenas de vehículo espacial de alta ganancia en condiciones de cielo despejado. Se utiliza para funciones de enlace ascendente
26-40	Enlaces espacio-Tierra con antenas de vehículo espacial de alta ganancia en condiciones de cielo despejado. Se utiliza para funciones de enlace descendente

* Basado en un análisis que incluye el efecto de las características de los equipos y una antena de estación terrena con un ángulo de elevación de 30°.

7 Requisitos para varias atribuciones ampliamente separadas en el espectro

Para satisfacer requisitos de radiociencia y navegación de vehículos espaciales es preciso tener un conocimiento exacto de la velocidad de propagación. Para determinar dicha velocidad es necesario considerar el retardo de grupo provocado por partículas cargadas a lo largo del trayecto de transmisión. La medida del retardo de grupo se aplica únicamente al vehículo espacial en particular y en un instante determinado.

Si no se tiene en cuenta el retardo de grupo provocado por las partículas cargadas a lo largo del trayecto de propagación se introducirá un error en la medida de la distancia, como se indica más adelante.

Al pasar a través de un medio ionizado, la velocidad de fase de una señal radioeléctrica aumenta y la velocidad de grupo disminuye. El efecto es proporcional a la densidad de electrones integrada a lo largo del trayecto e inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia.

El proceso de medición de la distancia a un vehículo espacial por técnicas radioeléctricas se denomina radiodeterminación de alcance. Esta determinación se lleva a cabo normalmente midiendo el tiempo necesario para que una señal radioeléctrica se desplace desde una estación terrena al vehículo espacial y vuelva a la Tierra. Este tiempo incluye el retardo de grupo provocado por las partículas cargadas a lo largo del trayecto. Si no se tiene en cuenta dicho retardo de grupo, se introduce un error en la medida de la distancia.

La fuente principal del retardo de grupo es la ionosfera de la Tierra. La propagación a través de la ionosfera se examina en la Recomendación UIT-R P.531. Una estimación del límite superior de este retardo es 0,25 μ s a 1 GHz y 0,62 ns a 20 GHz.

El plasma solar en el espacio interplanetario también puede causar retardo de grupo. Las mediciones efectuadas anteriormente en misiones de espacio lejano han proporcionado datos de

retardo de grupo de los que puede deducirse una fórmula aproximada para la densidad de electrones en función de la distancia al Sol:

$$N = 10^{12} \left[\frac{221}{r^6} + \frac{1,55}{r^{2,3}} \right]$$

donde:

- N : densidad de electrones (electrones/m³);
- r : distancia desde el centro del Sol, medida en radios del Sol (radio del Sol = $6,96 \times 10^8$ m).

El retardo de grupo de una señal radioeléctrica que atraviesa el espacio interplanetario viene dado por la fórmula:

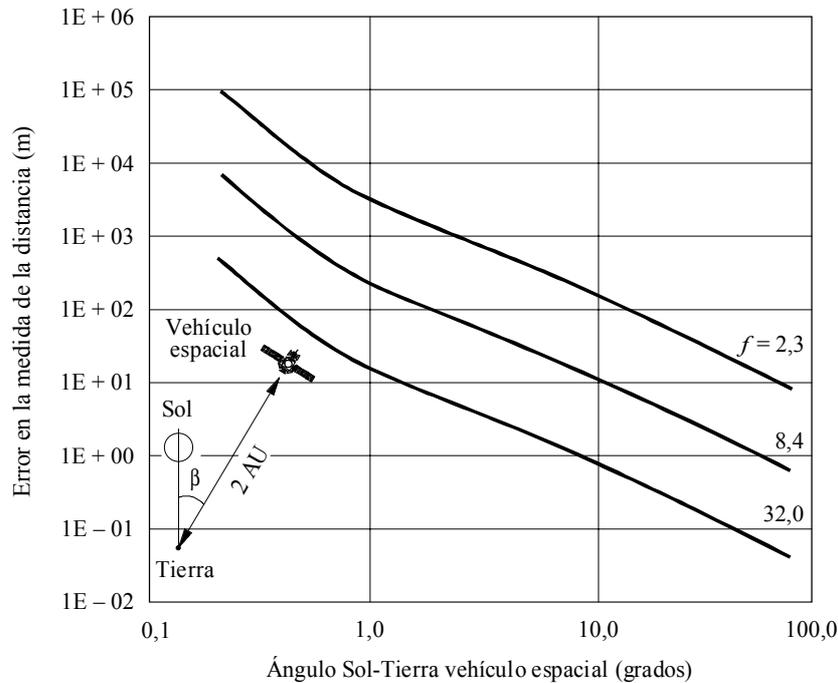
$$t = N_s \frac{1,34 \times 10^{-7}}{f^2}$$

donde:

- t : retardo de grupo provocado por partículas cargadas (s)
- f : frecuencia (Hz)
- N_s : número total de electrones por m² a lo largo del trayecto.

La Fig. 5 representa un ejemplo de errores en la medida de la distancia causados por el plasma solar. La figura se ha obtenido suponiendo un trayecto de 3×10^8 km, calculando el retardo de grupo en función de la frecuencia y del ángulo formado por el Sol, la Tierra y el vehículo espacial y multiplicando a continuación el retardo por la velocidad de la luz para obtener la distancia correspondiente.

FIGURA 5
Error en la medida de la distancia debido al retardo de grupo no corregido



f : Frecuencia (GHz)
 β : Ángulo Sol-Tierra-vehículo espacial
 Distancia Sol-Tierra = 1 AU
 1 AU = $1,5 \times 10^8$ km

La precisión necesaria en la medición del retardo de grupo puede exigir la utilización simultánea de enlaces en dos bandas distintas, preferentemente con una diferencia en frecuencias de al menos un factor de cuatro. El retardo de grupo entre los dos enlaces descendentes es distinto y esta diferencia puede utilizarse para calcular la corrección adecuada del retardo en cada enlace. Como ejemplo de la utilización de bandas separadas, puede emplearse un enlace ascendente cercano a 2 GHz con el fin de proporcionar una referencia de fase para enlaces descendentes simultáneos en las cercanías de 2 y 8 GHz. Un enlace descendente que funcione en frecuencias superiores a 20 GHz se encuentra relativamente libre de los efectos de partículas cargadas y puede proporcionar una referencia especialmente útil para la calibración de un enlace que funcione a frecuencia inferior.
