

## RECOMENDACIÓN UIT-R P.619-1\*

**DATOS DE PROPAGACIÓN NECESARIOS PARA EVALUAR LA INTERFERENCIA  
ENTRE ESTACIONES EN EL ESPACIO Y ESTACIONES SOBRE  
LA SUPERFICIE DE LA TIERRA**

(Cuestión UIT-R 208/3)

(1986-1990-1992)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que para la evaluación adecuada de la interferencia entre estaciones en el espacio y estaciones en la superficie de la Tierra es necesario disponer de datos de propagación apropiados basados en factores atmosféricos y del terreno;
- b) que los datos disponibles hasta la fecha no permiten establecer métodos fiables de predicción que ofrezcan una precisión suficiente en todas las regiones del mundo;
- c) que existen, sin embargo, varios métodos que permiten obtener una precisión suficiente, en algunas regiones por lo menos,

*recomienda*

que, para calcular la interferencia entre estaciones en el espacio y estaciones situadas en la superficie de la Tierra, las administraciones utilicen los métodos de cálculo expuestos en el anexo 1 en relación con la propagación.

## ANEXO 1

## 1. Introducción

La interferencia entre estaciones terrenales y espaciales, entre estaciones espaciales de un mismo sistema y entre estaciones espaciales pertenecientes a sistemas distintos puede seguir muchos trayectos, a saber:

### 1.1 Interferencia entre estaciones espaciales y estaciones terrenas no pertenecientes a un mismo sistema

*Modo B1:* Transmisión desde una estación espacial perteneciente a un sistema espacial que provoca interferencia en la recepción de una estación terrena perteneciente a otro sistema espacial.

*Modo B2:* Transmisión desde una estación terrena perteneciente a un sistema espacial que provoca interferencia en la recepción de una estación espacial perteneciente a otro sistema espacial.

### 1.2 Interferencia entre estaciones espaciales y estaciones terrenales

*Modo C1:* Transmisión desde una estación espacial que provoca interferencia en la recepción de una estación terrenal.

*Modo C2:* Transmisión desde una estación terrenal que provoca interferencia en la recepción de una estación espacial.

Los tres mecanismos principales de degradación que dan lugar a estos trayectos de interferencia son los debidos a la propagación con cielo despejado, la dispersión por precipitación y la atenuación diferencial en trayectos Tierra-espacio adyacentes. A continuación se consideran estos mecanismos.

Los efectos de la ionosfera en la propagación Tierra-espacio se examinan en la Recomendación UIT-R P.531. Dichos efectos, que dependen de la frecuencia, incluyen centelleos (ecuatoriales, en latitudes medias y en latitudes elevadas), absorción (auroral, casquete polar), variaciones de la dirección de llegada, retardo de propagación, cambios de frecuencia y rotación de Faraday.

---

\* La Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2000 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

## 2. Propagación con cielo despejado

Hay un cierto número de mecanismos de degradación de la propagación que pueden dar lugar a variaciones en las pérdidas del trayecto en condiciones de cielo despejado. En general, los efectos individuales de estos mecanismos son más graves a medida que disminuye el ángulo de elevación del trayecto Tierra-espacio. Los efectos que presentan interés en la propagación con cielo despejado para valores bajos del ángulo de elevación del trayecto Tierra-espacio son los siguientes:

- absorción gaseosa,
- atenuación por nubes,
- atenuación en la capa de fusión,
- centelleos troposféricos,
- desvanecimiento de ángulo bajo,
- curvatura de los rayos,
- degradación de la ganancia de antena,
- desenfoque (o ensanchamiento del haz),
- propagación por conducto,
- reflexiones en el suelo o en los edificios.

En la Recomendación UIT-R P.452 aparecen procedimientos de predicción para determinar en los sistemas terrenales los efectos de la visibilidad directa, la difracción, la dispersión troposférica y la propagación por conducto mediante reflexión. Entre los efectos indicados anteriormente sólo los centelleos troposféricos, el desvanecimiento por ángulos bajos y la curvatura de los rayos dan lugar a distintos niveles de interferencia entre sistemas. En un sistema Tierra-espacio adecuadamente diseñado no deben aparecer reflexiones en el suelo; la predicción de la fase y la amplitud de las reflexiones en edificio normalmente sólo puede efectuarse utilizando modelos determinísticos y supone un conocimiento preciso del entorno urbano. Antes de establecer los diversos niveles de interferencia, es normal calcular la pérdida de transmisión básica,  $L_b$ , a lo largo de un trayecto de interferencia potencial.

### 2.1 Pérdida básica de transmisión

La pérdida básica de transmisión  $L_b$  puede expresarse por:

$$L_b = 92,5 + 20 \log f + 20 \log d + A_g + A_D - G_S \quad \text{dB} \quad (1)$$

donde:

- $f$ : frecuencia (GHz)
- $d$ : longitud del trayecto (km)
- $A_g$ : atenuación (dB) debida a los gases atmosféricos
- $A_D$ : atenuación (dB) debida al ensanchamiento del haz
- $G_S$ : «ganancia» debida al centelleo (dB).

La atenuación debida a los gases atmosféricos,  $A_g$ , se describe en la Recomendación UIT-R P.676. Es función de la densidad de vapor de agua en la superficie,  $\rho$ , del radio ficticio de la Tierra,  $R_e = 10^6 (157 - \Delta N)^{-1}$ , y depende ligeramente de la temperatura del aire en la superficie.

Se han calculado valores estacionales y anuales de densidad del vapor de agua en la superficie terrestre que se reproducen en las Figs. 1 a 5 de la Recomendación UIT-R P.836. En una primera aproximación puede suponerse que las estadísticas de las variaciones temporales de  $\rho$  obedecen a una distribución gaussiana con una desviación típica  $\sigma$  igual aproximadamente a 0,25 veces el valor medio de  $\rho$ . Por ejemplo, la humedad absoluta que probablemente se excedería durante el 99% del tiempo sería  $1 - (0,25 \times 2,4) = 0,4$  veces el valor medio. Análogamente, el valor excedido durante el 99,99% del tiempo sería  $1 - (0,25 \times 3,8) = 0,05$  veces el valor medio.

$\Delta N$  es el decrecimiento medio (gradiente) del cóndice de refracción en una capa de 1 km de espesor a partir de la superficie. En las figs. 3 a 6 de la Recomendación UIT-R P.453 se incluyen los mapas mundiales de los valores medios mensuales de  $\Delta N$ .

La ganancia debida al centelleo,  $G_S$ , es función de la frecuencia, del diámetro de la antena de la estación terrena, del ángulo de elevación y del clima local y puede calcularse a partir de la intensidad prevista de centelleo troposférico.

La aplicación de los métodos de predicción de la Recomendación UIT-R P.530 indica que, en unas cuantas regiones del mundo, los efectos combinados de un fuerte desvanecimiento uniforme con cielo despejado y del desvanecimiento por trayectos múltiples sobre la señal deseada (con profundidades de desvanecimiento del orden de 25 dB) pueden ser al menos tan importantes a unos 23 GHz como la atenuación causada por la lluvia, incluso en trayectos de longitud tan corta como 10 km. Se trata de regiones en las que prevalecen los conductos pero que tienen también un clima hidrometeorológico moderado (es decir, zonas desérticas, cálidas o árticas). Casi todas las demás regiones donde prevalecen los conductos son regiones húmedas, donde también se produce una fuerte atenuación por la lluvia, que predominaría en el desvanecimiento de la señal deseada con márgenes aproximados de 25 dB. East Anglia, en el Reino Unido, es una zona en latitudes templadas dentro de la cual se sabe que el desvanecimiento por trayectos múltiples de la señal deseada al nivel de 25 dB, se produce durante el mismo porcentaje de tiempo que la atenuación causada por la lluvia en un trayecto de 10 km.

## 2.2 Centelleo troposférico

En la Recomendación UIT-R P.618 aparece un método de predicción del centelleo troposférico aplicable a ángulos de elevación superiores o iguales a  $4^\circ$ . Este procedimiento permite calcular la intensidad del centelleo y la distribución acumulativa del desvanecimiento efectivo. El centelleo troposférico también da lugar a incrementos en el nivel de la señal que producirían valores de pérdida de transmisión inferiores a los de espacio libre. Pueden aparecer niveles significativos de centelleo troposférico durante porcentajes de tiempo notablemente superiores al 1% al año. Para trayectos con ángulo de elevación muy bajo, las modificaciones a pequeña escala en el índice de refracción junto con el movimiento ondulatorio de la atmósfera pueden originar fuertes desvanecimientos por ángulo bajo.

## 2.3 Desvanecimiento por ángulo bajo

Para ángulos de elevación inferiores a  $5^\circ$  y durante pequeños porcentajes de tiempo, pueden aparecer incrementos del nivel de la señal y desvanecimiento de la misma importantes. Mediciones realizadas a 7 GHz han puesto en evidencia que estos incrementos pueden alcanzar valores de hasta 6 dB para ángulos de elevación entre  $1^\circ$  y  $2^\circ$ , mientras que para trayectos con ángulo de elevación de  $3,3^\circ$  se han medido incrementos de nivel de hasta 8 dB y desvanecimientos de hasta 16 dB en condiciones de cielo despejado. Hasta el presente no existe ningún modelo recomendado para predecir estos niveles de desvanecimiento por ángulo bajo.

## 2.4 Curvatura de los rayos

La curvatura de los rayos viene causada por las variaciones en el índice de refracción a lo largo del trayecto. Esas variaciones normalmente sólo son significativas en dirección vertical, puesto que las capas inferiores de la atmósfera a una altitud determinada tienden a estar muy estratificadas. El haz principal de una antena no es infinitamente estrecho y, por consiguiente, los rayos de los bordes superior e inferior del haz sufren distinta curvatura debido a los diferentes ángulos de elevación del trayecto a través de las capas bajas de la atmósfera. En consecuencia, la curvatura del rayo diferencial dará lugar a un ensanchamiento del haz cuya representación en el plano vertical aparece en la fig. 1.

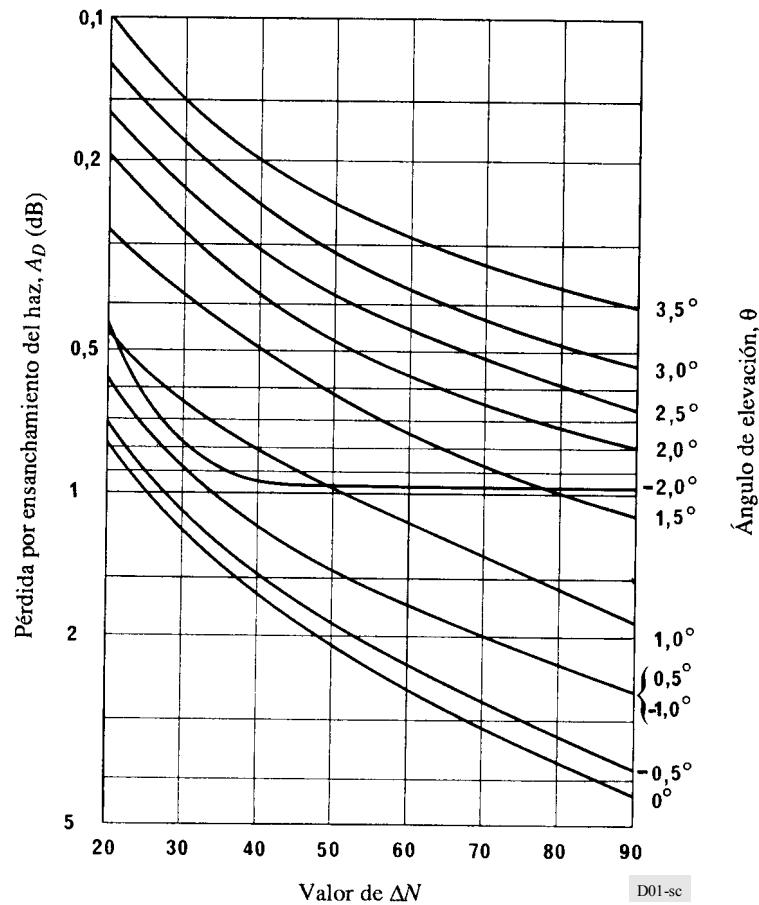
## 3. Dispersión por precipitación

Puede producirse interferencia cuando la energía procedente de uno de los sistemas sufre dispersión debida a la precipitación e incide en el haz de radiación de la antena de otro sistema. Esta situación sólo es significativa cuando los haces principales de ambos sistemas se intersectan en una parte de la atmósfera en la que pueden aparecer hidrometeoros. En esas condiciones, puede fijarse un volumen común en el que están presentes hidrometeoros durante periodos de tiempo apreciables y pueden aparecer aumentos de nivel de las señales no deseadas. Aunque dicha interferencia puede ser significativa, no es lo suficientemente grave como para que suponga una limitación al sistema y eligiendo cuidadosamente las geometrías del trayecto para reducir la probabilidad de aparición de volúmenes comunes, normalmente puede evitarse completamente.

El procedimiento para calcular la dispersión debida a precipitación figura en la Recomendación UIT-R P.452.

FIGURA 1

Pérdida por ensanchamiento del haz en el caso de las ondas radioeléctricas que se propagan casi horizontalmente



Un problema importante en este contexto es la posible interferencia producida por un satélite de energía solar. Utilizando los datos disponibles sobre el posible contenido de armónicos, puede demostrarse que – aún en el 4° armónico – la señal interferente, a una distancia de 50 km de la célula de lluvia, puede ser comparable con el nivel de la señal recibida en el servicio fijo por satélite. En la frecuencia fundamental, sin embargo, la radiación directa causada por los lóbulos laterales del satélite de energía solar a la estación terrenal probablemente serán mayores que la señal debida a la dispersión causada por la precipitación.

#### 4. Atenuación diferencial en trayectos adyacentes

##### 4.1 Efectos de la lluvia

Si dos estaciones espaciales que funcionan en la misma frecuencia se hallan separadas entre sí por un ángulo pequeño, pueden producirse situaciones en las que la atenuación debida a la lluvia en el trayecto desde una estación espacial reduzca la señal lo suficientemente para permitir la interferencia desde una estación espacial vecina hasta la estación terrena receptora.

En este caso, es esencial considerar los efectos combinados de la atenuación producida por la lluvia de la señal deseada,  $A_c$ , y de la atenuación producida por la lluvia de la señal interferente,  $A_i$ .

Para los cálculos de interferencia deben utilizarse las distribuciones condicionales de  $\Delta A = A_c - A_i$  y  $A_c$ . Como base para establecer las estadísticas de la excedencia total para diversas regiones, en las cuales las estadísticas de atenuación en un solo trayecto son diferentes, las estadísticas excedidas durante el 1% del tiempo se han calculado en la condición de que  $0,5 \text{ dB} < A_c < A_m$ , donde  $A_m$  es la atenuación máxima admitida de la señal deseada. Se considera que la fórmula empírica:

$$\Delta A(1\%) = 0,036 (0,45 f + \operatorname{cosec} \theta) \cdot [\log_e (\varphi + 1) \cdot \log_e (A_m + 1)]^{1,15} \quad \text{dB} \quad (2)$$

donde:

$f$ : frecuencia (GHz):  $11 \leq f \leq 30$  GHz

$\theta$ : ángulo de elevación de la estación terrena (grados):  $5^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$

$\varphi$ : separación angular (grados) de los dos trayectos en acimut:  $0^\circ \leq \varphi \leq 10^\circ$

concuera bien con los datos en las gamas de valores de los parámetros observados.

Para determinar el porcentaje del tiempo durante el cual se excede un valor determinado de  $\Delta A$  para un valor dado de  $A_m$ , el valor de 1% debe multiplicarse por la probabilidad de que  $0,5 \text{ dB} < A_c < A_m$ . Este último valor puede obtenerse a partir de una distribución acumulativa medida o prevista para un solo trayecto (véase la Recomendación UIT-R P.618).

La ecuación (2) debe comprobarse para una gama mayor de frecuencias y ángulos de elevación. No obstante, los resultados obtenidos para una separación de acimutes relativamente grande ( $31,5^\circ$ ) parece, en general, estar de acuerdo con las previsiones de la ecuación (2). Basándose en ello, la atenuación diferencial causada por la lluvia a lo largo de trayectos Tierra-espacio separados no se considera como causa probable de interferencia inaceptable.

## 4.2 Efectos del centelleo

Las medidas realizadas con diversidad de alturas para un ángulo de elevación de  $3,3^\circ$  y una frecuencia de 11,198 GHz han demostrado que con una separación de 15,1 m se obtiene un centelleo sin correlación en ambas antenas. Eso supone que para que dos trayectos Tierra-espacio separados no estén correlados en lo referente al centelleo necesitan tener únicamente una diferencia en el ángulo de elevación del orden de  $0,1^\circ$  para un ángulo de elevación de  $3,3^\circ$ . Por consiguiente, los satélites que se encuentren muy cercanos, e incluso coubicados, pueden estar sometidos a centelleo sin correlar y deben tomarse las precauciones necesarias a la hora de evaluar la interferencia potencial entre dichos sistemas, en especial cuando se calcula el control de potencia del enlace ascendente.