

RECOMENDACIÓN UIT-R P.530-7

**DATOS DE PROPAGACIÓN Y MÉTODOS DE PREDICCIÓN NECESARIOS PARA
EL DISEÑO DE SISTEMAS TERRENALES CON VISIBILIDAD DIRECTA**

(Cuestión UIT-R 204/3)

(1978-1982-1986-1990-1992-1994-1995-1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que para la planificación adecuada de los sistemas terrenales con visibilidad directa es necesario disponer de métodos de predicción y datos de propagación adecuados;
- b) que se han elaborado métodos que permiten predecir algunos de los parámetros de propagación más importantes que afectan a la planificación de sistemas terrenales con visibilidad directa;
- c) que, en la medida de lo posible, estos métodos se han verificado mediante datos de medidas disponibles y han demostrado una precisión compatible con la variabilidad natural de los fenómenos de propagación y adecuada para la mayoría de las aplicaciones actuales en la planificación de sistemas,

recomienda

1 que para la planificación de los sistemas terrenales con visibilidad directa se adopten los métodos de predicción y las técnicas indicadas en el Anexo 1, en las respectivas gamas de validez de los parámetros indicados.

ANEXO 1

1 Introducción

En el diseño de los sistemas de relevadores radioeléctricos con visibilidad directa deben tenerse en cuenta varios efectos vinculados con la propagación. Estos incluyen:

- desvanecimiento por difracción debida a la obstrucción del trayecto por obstáculos en condiciones de propagación adversas;
- atenuación debida a los gases atmosféricos;
- desvanecimiento debido a la propagación atmosférica por trayectos múltiples o a la dispersión del haz (conocida generalmente como desenfoque) asociados con la existencia de capas refractivas anormales;
- desvanecimiento debido a la propagación por los trayectos múltiples que se originan por reflexión en la superficie;
- atenuación debida a las precipitaciones o a otras partículas sólidas presentes en la atmósfera;
- variación del ángulo de llegada en el terminal receptor y del ángulo de salida en el terminal transmisor debida a la refracción;
- reducción de la discriminación por polarización cruzada en condiciones de propagación por trayectos múltiples o durante las precipitaciones;
- distorsión de la señal debida a desvanecimientos selectivos en frecuencia y a retardos durante la propagación por trayectos múltiples.

Uno de los objetivos de este Anexo es presentar de forma concisa y detallada métodos de predicción sencillos para los efectos de propagación que deben tenerse en cuenta en la mayoría de los enlaces fijos con visibilidad directa, así como indicaciones relativas a sus gamas de validez. Otro de sus objetivos es presentar otra información y otras técnicas que puedan recomendarse en la planificación de los sistemas terrenales con visibilidad directa.

Es posible que los métodos de predicción basados en las condiciones climáticas y topográficas correspondientes al territorio de una administración tengan más ventajas que los incluidos en este Anexo.

A excepción de la interferencia que aparece como consecuencia de la reducción de la discriminación por polarización cruzada, este Anexo trata únicamente de los efectos sobre la señal deseada. Aunque en el § 2.3.5 se examinan muy en general los efectos de la interferencia interna dentro de un sistema digital, el tema no se analiza en otros pasajes del presente texto. En otras Recomendaciones se tratan diversos aspectos de la interferencia a saber:

- en la Recomendación UIT-R P.452 la interferencia entre sistemas que afecta a otros enlaces terrenales y estaciones terrenas; y
- en la Recomendación UIT-R P.619 la interferencia entre sistemas que afecta a las estaciones espaciales.

Para optimizar la utilidad del presente anexo en la planificación y el diseño de los sistemas, la información se ordena de acuerdo con los efectos sobre la propagación que deben considerarse, en lugar de hacerlo respecto a los mecanismos físicos que producen los distintos efectos.

Cabe señalar que el término «mes más desfavorable» utilizado en la presente Recomendación es equivalente al término «cualquier mes» (véase la Recomendación UIT-R P.581).

2 Pérdida de propagación

La pérdida de propagación, para un trayecto terrenal con visibilidad directa, respecto a las pérdidas en el espacio libre (véase la Recomendación UIT-R P.525) es la suma de las contribuciones siguientes:

- atenuación debida a los gases atmosféricos,
- desvanecimiento por difracción debido a la obstrucción parcial o total del trayecto,
- desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples, la dispersión del haz y el centelleo,
- atenuación debida a la variación de los ángulos de llegada y de salida,
- atenuación debida a las precipitaciones,
- atenuación debida a las tormentas de arena y polvo.

Cada una de estas contribuciones tiene sus características propias en función de la frecuencia, la longitud del trayecto y la ubicación geográfica, y se describen en los puntos siguientes.

A veces interesa mejorar la propagación. En tales casos se considera en función de la pérdida de propagación asociada.

2.1 Atenuación debida a los gases atmosféricos

Para frecuencias superiores a unos 10 GHz siempre está presente una cierta atenuación debida a la absorción del oxígeno y del vapor de agua, por lo que debe incluirse en el cálculo de la pérdida total de propagación. La atenuación a lo largo de un trayecto de longitud d (km) viene dada por:

$$A_a = \gamma_a d \quad \text{dB} \quad (1)$$

La atenuación específica γ_a (dB/km) se obtiene de la Recomendación UIT-R P.676.

NOTA 1 – En trayectos largos, para frecuencias superiores a unos 20 GHz, puede ser conveniente tener en cuenta las estadísticas conocidas sobre la densidad del vapor de agua y la temperatura en las proximidades del trayecto. En la Recomendación UIT-R P.836 aparece información sobre la densidad del vapor de agua.

2.2 Desvanecimiento por difracción

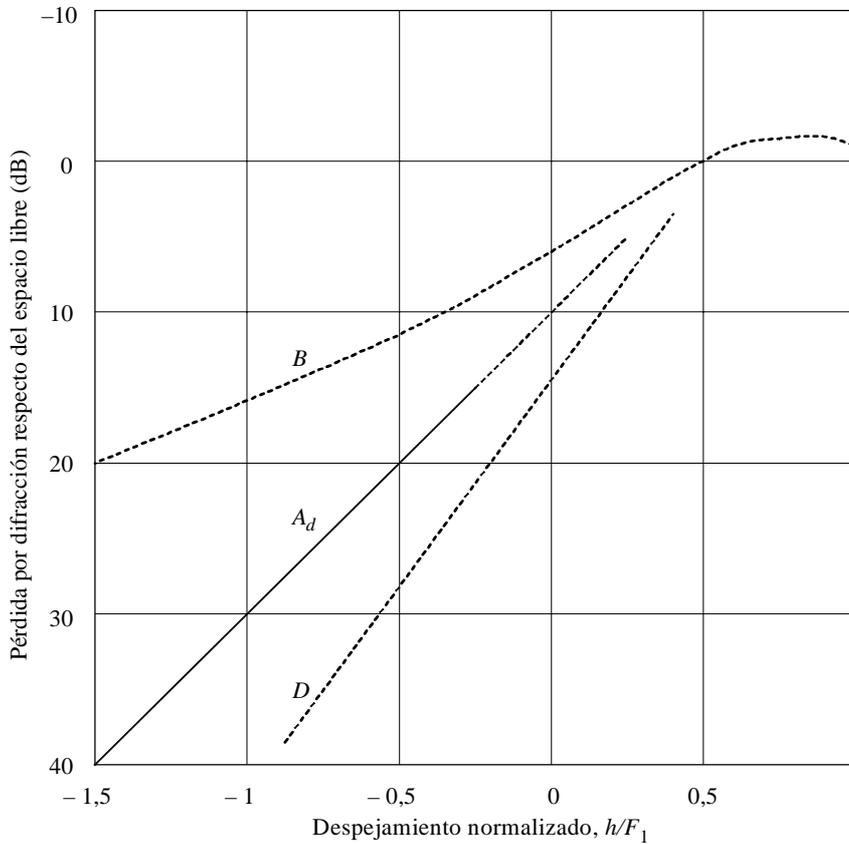
Las variaciones de las condiciones de refracción de la atmósfera pueden modificar el radio efectivo de la Tierra, es decir el factor k , con respecto a su valor mediano que es aproximadamente de 4/3 para una atmósfera normal (véase la Recomendación UIT-R P.310). Cuando la atmósfera es suficientemente subrefractiva (grandes valores positivos del gradiente del índice de refracción, valores reducidos del factor k), los rayos se curvan de forma que la Tierra obstruye el trayecto directo entre el transmisor y el receptor, lo que da lugar a un tipo de desvanecimiento llamado desvanecimiento por difracción. Este desvanecimiento es el factor que determina la altura de las antenas.

Las estadísticas del factor k para un punto pueden determinarse a partir de medidas o predicciones del gradiente del índice de refracción en los primeros 100 m de la atmósfera (véase la Recomendación UIT-R P.453 sobre los efectos de la refracción). Estos gradientes deben promediarse para obtener el valor efectivo de k correspondiente a la longitud del trayecto en cuestión, k_e . Los valores de k_e que se exceden durante el 99,9% del tiempo se examinan en el apartado siguiente en función de los criterios de trayecto despejado.

2.2.1 Pérdida por difracción en función del despejamiento del trayecto

La pérdida por difracción dependerá del tipo de terreno y de la vegetación. Para un determinado despejamiento del trayecto del rayo, la pérdida por difracción variará desde un valor mínimo en el caso de un obstáculo único en arista (filo de cuchillo) hasta un valor máximo en el caso de una tierra esférica lisa. En la Recomendación UIT-R P.526 se examinan métodos para el cálculo de la pérdida por difracción en esos dos casos y también en el de trayectos a través de terreno irregular. En la Fig. 1 se muestran esos límites superior e inferior de la pérdida por difracción.

FIGURA 1
Pérdida por difracción en el caso de existir obstáculos en trayectos radioeléctricos de microondas con visibilidad directa



- B*: curva teórica de pérdida por difracción en obstáculos en filo de cuchillo
- D*: curva teórica de pérdida sobre la tierra esférica lisa a 6,5 GHz y $k_e = 4/3$
- A_d : curva empírica de la pérdida por difracción basada en la ecuación (2) para terreno intermedio
- h : magnitud del despejamiento del trayecto radioeléctrico respecto de la superficie de la Tierra
- F_1 : radio de la primera zona de Fresnel

0530-01

Las pérdidas por difracción en un terreno medio pueden aproximarse, para pérdidas mayores de unos 15 dB, mediante la fórmula:

$$A_d = -20 h / F_1 + 10 \quad \text{dB} \quad (2)$$

en la que h es la altura (m) del obstáculo más importante del trayecto por encima de la trayectoria de éste (h es negativa si la parte superior del obstáculo en cuestión está por encima de la línea de visibilidad directa), y F_1 es el radio del primer elipsoide de Fresnel, indicado por:

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}} \quad \text{m} \quad (3)$$

donde:

f : frecuencia (GHz)

d : longitud del trayecto (km)

d_1 et d_2 : distancias (km) entre los terminales y la obstrucción del trayecto.

En la Fig. 1 se muestra también una curva, denominada A_d , basada en la ecuación (2). Esta curva, estrictamente válida para pérdidas superiores a 15 dB, se ha extrapolado hasta una pérdida de 6 dB para satisfacer la necesidad de los diseñadores de enlaces.

2.2.2 Criterios de planificación para el despejamiento del trayecto

En el pasado, el desvanecimiento por difracción de este tipo en frecuencias por encima de unos 2 GHz se aliviaba instalando antenas a altura suficiente para que, en condiciones de curvatura muy acentuada de los rayos, el receptor no se encontrase en la región de difracción cuando el radio efectivo de la Tierra es inferior a su valor normal. La teoría de la difracción indica que el trayecto directo entre el transmisor y el receptor debe estar libre de obstáculos, a partir de una altura por encima del suelo igual, como mínimo, al 60% del radio de la primera zona de Fresnel para que se cumplan las condiciones de propagación en el espacio libre. Últimamente, disponiendo de más información sobre este mecanismo y de los valores estadísticos de k_e , que se requieren para realizar predicciones estadísticas, algunas administraciones están instalando antenas a alturas que producirán algunas pequeñas interrupciones conocidas.

A falta de un procedimiento general que permita obtener una cantidad previsible de pérdidas por difracción para diversos porcentajes de tiempo pequeños, y en consecuencia, de un criterio estadístico de despejamiento del trayecto, se recomienda utilizar los siguientes procedimientos en los climas templados y tropicales.

2.2.2.1 Configuraciones de antena sin diversidad

- Se determinan las alturas de antenas necesarias para obtener un valor mediano apropiado del factor k en el punto (véase el § 2.2; en ausencia de datos, utilícese $k = 4/3$) y un despejamiento del trayecto de $1,0 F_1$ por encima del obstáculo más alto (en climas templados y tropicales).
- Se obtiene el valor de k_e (99,9%) a partir de la Fig. 2, para la longitud del trayecto en cuestión.
- Se calculan las alturas de antena necesarias para el valor de k_e obtenido en el apartado b) y los siguientes radios de despejamiento de la zona de Fresnel:

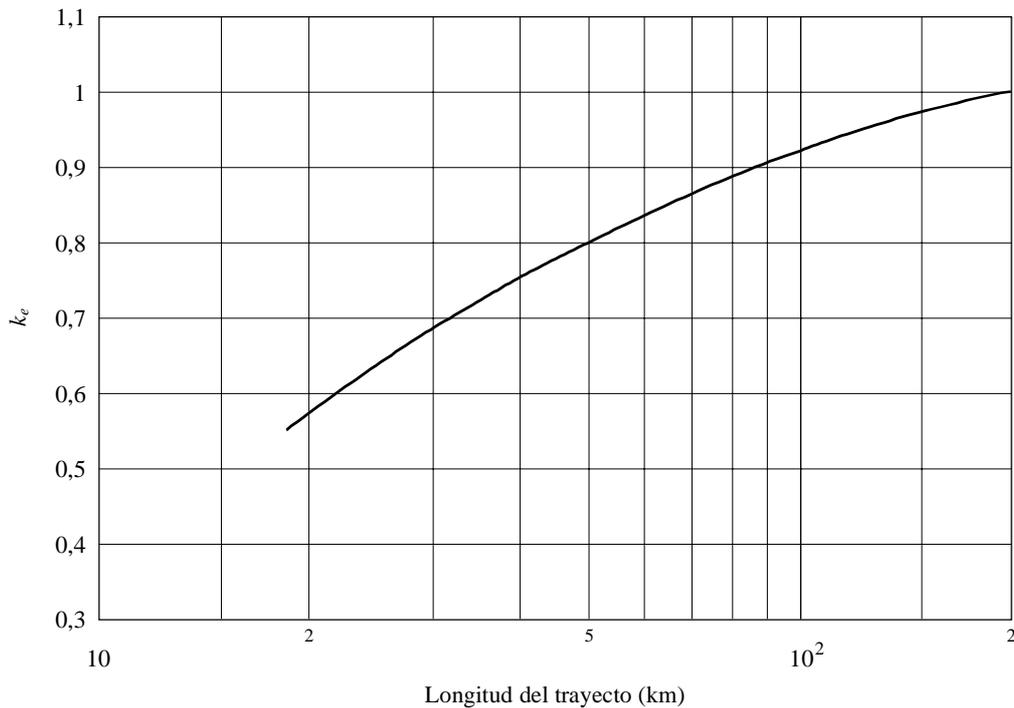
Clima templado	Clima tropical
0,0 F_1 (es decir, incidencia rasante) si sólo existe una obstrucción aislada del trayecto	0,6 F_1 para longitudes de trayecto superiores a unos 30 km
0,3 F_1 si la obstrucción del trayecto se extiende a lo largo de una parte de éste	

- Utilídense las mayores alturas de antena obtenidas en los apartados a) y c).

En los casos de incertidumbre sobre el tipo de clima, debe seguirse la regla de despejamiento más conservadora para climas tropicales o, al menos, una regla basada en los valores medios del despejamiento para climas templados y tropicales. En los pasos a) y c) anteriores puede que sea necesario utilizar las fracciones más pequeñas de F_1 para frecuencias inferiores a unos 2 GHz con objeto de evitar antenas de altura excesivamente elevada.

En el paso c) quizá haya que utilizar las fracciones más grandes de F_1 para frecuencias superiores a unos 10 GHz a fin de reducir el riesgo de difracción en condiciones subrefractivas.

FIGURA 2
 Valor de k_e excedido aproximadamente durante el 99,9% del mes más desfavorable
 (Clima templado continental)



0530-02

2.2.2.2 Configuraciones de dos antenas con diversidad en el espacio

a) Se calcula la altura de la antena más baja para el valor mediano adecuado del factor k (en ausencia de datos, utilícese $k = 4/3$) y los siguientes radios de despejamiento de la zona de Fresnel:

0,6 F_1 a 0,3 F_1 si la obstrucción del trayecto se extiende a lo largo de una parte de éste;

0,3 F_1 a 0,0 F_1 si existen uno o dos obstáculos aislados en el perfil del trayecto.

Para no tener que aumentar las alturas de los mástiles existentes, o si la frecuencia es inferior a 2 GHz, debe elegirse uno de los valores inferiores de las dos gamas indicadas anteriormente.

De forma alternativa, puede elegirse el despejamiento de la antena más baja para lograr unas pérdidas de difracción de aproximadamente 6 dB en condiciones normales de refracción (es decir, a mediodía) o alguna otra pérdida adecuada al margen de desvanecimiento del sistema, determinada por medidas de prueba. Estas medidas deben efectuarse durante varios días a fin de evitar condiciones de refracción anómalas.

En este caso alternativo, también puede calcularse la pérdida por difracción mediante la Fig. 1 o la ecuación (2).

b) Se calcula la altura de la antena más elevada utilizando el procedimiento para configuraciones con una sola antena indicado anteriormente.

c) Se verifica que la separación entre las dos antenas satisface las necesidades de diversidad en condiciones de desvanecimiento por trayectos múltiples. Si no se satisfacen dichas necesidades debe aumentarse de forma correspondiente la altura de la antena más elevada.

Este desvanecimiento, que se produce cuando el trayecto está total o parcialmente obstruido por el terreno en condiciones subrefractivas, es el factor que rige las alturas de antena.

2.3 Desvanecimiento y mejora debidos a la propagación por trayectos múltiples y mecanismos conexos

Para planificar enlaces de más de unos pocos kilómetros de longitud deben tenerse en cuenta tres mecanismos de desvanecimiento en condiciones de cielo despejado cuyo origen son las capas extremadamente refractivas de la atmósfera, a saber: dispersión del haz, desalineamiento de antena y propagación por trayectos múltiples en la superficie y

en la atmósfera. La mayoría de estos mecanismos pueden aparecer aislados o en combinación unos con otros (véase la Nota 1). Cuando la dispersión del haz de la señal directa se combina con una señal reflejada en la superficie dando lugar a desvanecimiento por trayectos múltiples se produce un tipo de desvanecimiento selectivo en frecuencia especialmente acusado. El desvanecimiento por centelleo debido a irregularidades en forma de turbulencias de pequeña intensidad en la atmósfera siempre está presente en estos mecanismos, pero en frecuencias inferiores a unos 40 GHz su efecto sobre la distribución de desvanecimiento global no es significativo.

NOTA 1 – El desacoplamiento de las antenas determina la anchura de haz mínima de las antenas que se debe elegir.

En el § 2.3.1 se da un método para predecir la distribución del desvanecimiento a una sola frecuencia (o de banda estrecha) para el mes más desfavorable medio en cualquier parte del mundo. Este método no utiliza el perfil de trayecto y se puede emplear para la planificación inicial, concesión de licencias o para fines de diseño. Existe un segundo método, indicado en el § 2.3.2, que sirve para todas las profundidades de desvanecimiento y emplea el procedimiento para desvanecimientos muy profundos, según convenga, y un procedimiento de interpolación cuando la profundidad del desvanecimiento es pequeña.

En el § 2.3.3 se ofrece un método para predecir la intensificación de la señal, en el que utiliza la profundidad de desvanecimiento que puede predecirse mediante las técnicas del § 2.3.1 como único parámetro de entrada. Por último, en el § 2.3.4 se da un método para convertir las distribuciones del mes más desfavorable medio en distribuciones para el año medio.

2.3.1 Método para porcentajes de tiempo pequeños

2.3.1.1 Para la ubicación del trayecto en cuestión, estímesese el factor geoclimático K para el mes más desfavorable medio a partir de los datos de desvanecimiento de la zona geográfica que interesa, si se dispone de ellos (véase el Apéndice 1).

Enlaces del interior: Si no se dispone de datos medidos para K , puede estimarse K para enlaces de zonas interiores (véase su definición en la Nota 1) a partir de la siguiente relación empírica con respecto a la variable climática p_L (es decir, el porcentaje de tiempo en el que el gradiente de refractividad en los 100 m más bajos de la atmósfera es menor que -100 unidades N/km durante el mes más desfavorable medio estimado; véase a continuación):

$$K = 5,0 \times 10^{-7} \times 10^{-0,1(C_0 - C_{Lat} - C_{Lon})} p_L^{1,5} \quad (4)$$

En la ecuación (4) el valor del coeficiente C_0 viene dado en el Cuadro 1 para tres gamas de altura de la más baja de las antenas transmisora y receptora y tres tipos de terreno (plano, ondulado o montañoso). En caso de que prevalezca incertidumbre en cuanto a decidir si el enlace debe clasificarse como un enlace en una zona plana u ondulada, ha de emplearse el valor medio de los coeficientes C_0 para estos dos tipos de zona. Asimismo, si reina incertidumbre en cuanto a decidir si el enlace debe clasificarse como un enlace en una zona ondulada o montañosa, debe aplicarse el valor medio de los coeficientes C_0 para ambos tipos de zona. Los enlaces que atraviesen llanuras en un extremo y montañas en el otro, deben clasificarse como enlaces en zonas onduladas. Para decidir si un trayecto parcialmente sobre una superficie de agua se encuentra en una zona predominantemente plana, ondulada o montañosa, la superficie de agua debe considerarse como terreno plano.

A efectos de planificación y en los casos en que el tipo de terreno se desconozca, deben emplearse los siguientes valores del coeficiente C_0 en la ecuación (4):

$C_0 = 1,7$ para la antena de menor altura en la gama de 0-400 m por encima del nivel medio del mar;

$C_0 = 4,2$ para la antena de menor altura en la gama de 400-700 m por encima del nivel medio del mar;

$C_0 = 8$ para la antena de menor altura situada a más de 700 m por encima del nivel medio del mar.

El coeficiente C_{Lat} de latitud ξ de la ecuación (4) viene dado por:

$$C_{Lat} = 0 \quad (\text{dB}) \quad \text{para } \xi \leq 53^\circ \text{ N o } ^\circ \text{S} \quad (5)$$

$$C_{Lat} = -53 + \xi \quad (\text{dB}) \quad \text{para } 53^\circ \text{ N ou } ^\circ \text{S} < \xi < 60^\circ \text{ N o } ^\circ \text{S} \quad (6)$$

$$C_{Lat} = 7 \quad (\text{dB}) \quad \text{para } \xi \geq 60^\circ \text{ N o } ^\circ \text{S} \quad (7)$$

y el coeficiente de longitud C_{Lon} , por:

$$C_{Lon} = 3 \quad (\text{dB}) \quad \text{para longitudes de Europa y África} \quad (8)$$

$$C_{Lon} = -3 \quad (\text{dB}) \quad \text{para longitudes de América del Norte y América del Sur} \quad (9)$$

$$C_{Lon} = 0 \quad (\text{dB}) \quad \text{para las demás longitudes} \quad (10)$$

CUADRO 1

Valores del coeficiente C_0 en las ecuaciones (4) y (13) para las tres gamas de alturas de la antena más baja y tres tipos de terreno

Alturas de la antena más baja y tipo de terreno que atraviesa el enlace	C_0 (dB)
<i>Antena de poca altura (0-400 m) – Terreno plano:</i> Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja inferior a 400 m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente planas.	0
<i>Antena de poca altura (0-400 m) – Terreno ondulado:</i> Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja inferior a 400 m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente onduladas.	3,5
<i>Antena de altura media (400-700 m) – Terreno plano:</i> Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja en la gama de 400-700 m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente planas.	2,5
<i>Antena de altitud media (400-700 m) – Terreno ondulado:</i> Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja en la gama de 400-700 m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente onduladas.	6
<i>Antena de gran altura (>700 m) – Terreno plano:</i> Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja superior a 700 m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente planas.	5,5
<i>Antena de gran altura (>700 m) – Terreno ondulado:</i> Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja superior a 700 m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente montañosas.	8
<i>Antena de gran altura (>700 m) – Terreno montañoso:</i> Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja superior a 700 m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente montañosas.	10,5

El valor de la variable climática p_L de la ecuación (4) se estima tomando el valor más elevado de excedencia del gradiente de -100 unidades N/km de los mapas correspondientes a los cuatro meses representativos estacionalmente, a saber, febrero, mayo, agosto y noviembre, que se indican en las Figs. 7 a 10 de la Recomendación UIT-R P.453. Como excepción a esto hay que señalar que, para latitudes superiores a 60° N ó 60° S, sólo se deben utilizar los mapas correspondientes a mayo y agosto.

En algunos casos, quizá convenga obtener ampliaciones de los mapas de las Figs. 7 a 10 de la Recomendación UIT-R P.453 en las zonas del enlace en cuestión, y marcar con precisión el punto correspondiente al centro del enlace para obtener el valor de p_L . Puesto que los mapas están en una proyección de Mercator, deberá emplearse la siguiente relación para establecer de manera precisa la latitud ξ del punto central:

$$\Delta z_L = \Delta z \left[\frac{\ln [\operatorname{tg} (45^\circ + 0,5 \xi)] - \ln [\operatorname{tg} (45^\circ + 0,5 \xi_1)]}{\ln [\operatorname{tg} (45^\circ + 0,5 \xi_2)] - \ln [\operatorname{tg} (45^\circ + 0,5 \xi_1)]} \right] \quad (11)$$

En la fórmula anterior, Δz es la distancia (por ejemplo, en mm) entre las líneas de la cuadrícula de latitudes inferior y superior más cercanas a las latitudes ξ_1 y ξ_2 , respectivamente (por ejemplo, 30° y 45°); Δz_L es la distancia requerida (por ejemplo, en mm) entre la línea inferior de la cuadrícula de latitudes y el punto correspondiente al centro del enlace. La longitud del punto central se puede obtener mediante interpolación lineal.

Enlaces costeros sobre/cerca de masas de agua grandes: Si no se dispone de datos medidos para K en el caso de enlaces costeros (véase su definición en la Nota 2) sobre/cerca de masas de agua grandes (la definición de masas de agua grandes figura en la Nota 3), puede estimarse K a partir de:

$$K = \begin{cases} K_l (r_c) = 10^{(1 - r_c) \log K_i + r_c \log K_{cl}} & \text{para } K_{cl} \geq K_i \\ K_i & \text{para } K_{cl} < K_i \end{cases} \quad (12)$$

donde r_c es la fracción del perfil de trayecto cuya altitud por encima del nivel medio de la masa de agua en cuestión es inferior a 100 m y se encuentra dentro de una distancia de 50 km con respecto a su costa sin que exista un terreno con una elevación superior a 100 m que se interponga entre el trayecto y la costa, K_i viene dado por la expresión para K en la ecuación (4), y:

$$K_{cl} = 2,3 \times 10^{-4} \times 10^{-0,1C_0} - 0,011 |\xi| \quad (13)$$

donde C_0 figura en el Cuadro 1. Hay que señalar que la condición $K_{cl} < K_i$ en la ecuación (12) se cumple en unas cuantas regiones de latitud baja y media.

Enlaces costeros sobre/cerca de masas de agua medianas: Si no se dispone de datos medidos para K en el caso de enlaces costeros (véase su definición en la Nota 2) sobre/cerca de masas de agua medianas (la definición de masas de agua medianas figura en la Nota 3), puede estimarse K a partir de:

$$K = \begin{cases} K_m(r_c) = 10^{(1-r_c) \log K_i + r_c \log K_{cm}} & \text{para } K_{cm} \geq K_i \\ K_i & \text{para } K_{cm} < K_i \end{cases} \quad (14)$$

y:

$$K_{cm} = 10^{0,5 (\log K_i + \log K_{cl})} \quad (15)$$

donde K_{cl} viene dado por la ecuación (13). Se señala que la condición $K_{cm} < K_i$ de la ecuación (15) se cumple en unas pocas regiones a latitudes bajas y medias.

NOTA 1 – Enlaces del interior son aquellos en los que la totalidad del perfil de trayecto se halla por encima de 100 m de altitud (con respecto al nivel medio del mar) o dista más de 50 km de la línea costera más cercana, o en los que parte o la totalidad del perfil de trayecto se halla por debajo de 100 m de altitud en el caso de un enlace que dista, en su totalidad, más de 50 km de la línea costera, pero existe una porción de tierra elevada de altura superior a los 100 m que se interpone entre esa parte del enlace y la línea costera. Los enlaces que pasan sobre un río o lago pequeño se deben considerar normalmente como enlaces sobre tierra. Para los enlaces en una región en la que existen muchos lagos, véase la Nota 4.

NOTA 2 – Se puede considerar que el enlace atraviesa una zona costera si una fracción r_c del perfil de trayecto se halla a menos de 100 m por encima del nivel medio de una masa de agua mediana o grande y se encuentra dentro de una distancia de 50 km con respecto a su costa y si la altitud del terreno no es superior a 100 m entre esta fracción del perfil de trayecto y la costa.

NOTA 3 – El tamaño de una masa de agua se puede decidir basándose en varios ejemplos conocidos: son masas de agua de tamaño medio la Bahía de Fundy (costa oriental de Canadá) y el estrecho de Georgia (costa occidental de Canadá), el Golfo de Finlandia y otras masas de agua de tamaño similar. Entre las grandes masas de agua se encuentra el Canal de la Mancha, el Mar del Norte, las grandes extensiones de los mares Bálticos y Mediterráneo, el Estrecho de Hudson y otras masas de agua de tamaño similar o mayor. En casos de incertidumbre sobre si el tamaño de la masa de agua en cuestión debe considerarse mediano o grande, deberá calcularse K mediante la siguiente fórmula:

$$K = 10^{(1-r_c) \log K_i + 0,5r_c (\log K_{cm} + \log K_{cl})} \quad (16)$$

NOTA 4 – Las regiones (que no incluyen zonas costeras) en las que existen muchos lagos en una superficie relativamente grande se piensa que se comportan en cierto modo como zonas costeras. La región de los lagos en el sur de Finlandia es el mejor ejemplo conocido. Hasta que dichas regiones se puedan definir mejor, deberá calcularse K mediante la siguiente fórmula:

$$K = 10^{0,5[(2-r_c) \log K_i + r_c \log K_{cm}]} \quad (17)$$

2.3.1.2 Desde las alturas de antena h_e y h_r ((m) sobre el nivel del mar o alguna otra altura de referencia), calcúlese la magnitud de la inclinación del trayecto $|\epsilon_p|$ (mrad) mediante la siguiente fórmula:

$$|\epsilon_p| = |h_r - h_e| / d \quad (18)$$

donde d es la longitud del trayecto (km).

2.3.1.3 Calcúlese el porcentaje de tiempo p_w durante el cual se rebasa la profundidad de desvanecimiento A (dB) durante el mes más desfavorable medio a partir de:

$$p_w = K d^{3,6} f^{0,89} (1 + |\epsilon_p|)^{-1,4} \times 10^{-A/10} \quad \% \quad (19)$$

donde f es la frecuencia (GHz).

Para predecir los porcentajes excedidos en el año medio en lugar del mes más desfavorable medio, véase el § 2.3.4.

NOTA 1 – La ecuación (19) se obtuvo a partir de los datos de desvanecimiento para trayectos con longitudes entre 7 y 95 km, frecuencias entre 2 y 37 GHz, inclinaciones del trayecto entre 0 y 24 mrad y ángulos rasantes entre 1 y 12 mrad. Las pruebas realizadas con otros conjuntos de datos para trayectos de hasta 237 km de longitud y frecuencias tan bajas como 500 MHz sugieren, sin embargo, que es válida para mayores gamas de longitudes del trayecto y de frecuencias. Los resultados de un análisis semiempírico indican que el límite de validez de la frecuencia inferior es inversamente proporcional a la longitud del trayecto. Una somera estimación de este límite de frecuencia inferior, $f_{mín}$, puede obtenerse a partir de la ecuación:

$$f_{mín} = 15 / d \quad \text{GHz} \quad (20)$$

2.3.2 Método para diversos porcentajes de tiempo

El método siguiente de predicción de la profundidad del desvanecimiento con diferentes porcentajes de tiempo combina un procedimiento empírico de interpolación entre la región de desvanecimiento profundo de la distribución y 0 dB, con el método del punto precedente.

a) Se utiliza el método del § 2.3.1, para calcular el porcentaje de tiempo p_w en que se rebasa una profundidad de desvanecimiento de 35 dB en la cola de la distribución (esto es, ecuación (19)).

b) Se calcula el valor de q'_a correspondiente a la profundidad de desvanecimiento $A = 35$ dB con el correspondiente valor de p_w obtenido en a), mediante la expresión:

$$q'_a = -20 \log_{10} \left[-\ln \left(\frac{100 - p_w}{100} \right) \right] / A \quad (21)$$

c) Se calcula el valor del parámetro q_t mediante la ecuación:

$$q_t = (q'_a - 2) / \left[\left(1 + 0,3 \times 10^{-A/20} \right) 10^{-0,016A} \right] - 4,3 \left(10^{-A/20} + A / 800 \right) \quad (22)$$

d) Si $q_t > 0$, se repiten los pasos a) a c) para $A = 25$ dB para obtener el valor definitivo de q_t .

e) Para $A > 25$ dB ó $A > 35$ dB, según proceda, se calcula el porcentaje de tiempo p_w en que se rebasa la profundidad de desvanecimiento A utilizando el método del § 2.3.1. Para $A < 25$ dB ó $A < 35$ dB, según proceda, se calcula el porcentaje de tiempo en que se rebasa A mediante la ecuación:

$$p_w = 100 \left[1 - \exp \left(-10^{-q_a A / 20} \right) \right] \quad \% \quad (23)$$

donde q_a es también una función de A dada por:

$$q_a = 2 + \left[1 + 0,3 \times 10^{-A/20} \right] \left[10^{-0,016A} \right] \left[q_t + 4,3 \left(10^{-A/20} + A / 800 \right) \right] \quad (24)$$

Aquí el valor del parámetro q_t es el obtenido con el paso c) o d) según proceda. Con q_t como parámetro, la Fig. 3 proporciona una familia de curvas que representa el método gráficamente.

Para la predicción de los porcentajes excedidos para el año medio en vez del mes más desfavorable medio, véase el § 2.3.4.

2.3.3 Método de predicción de la intensificación

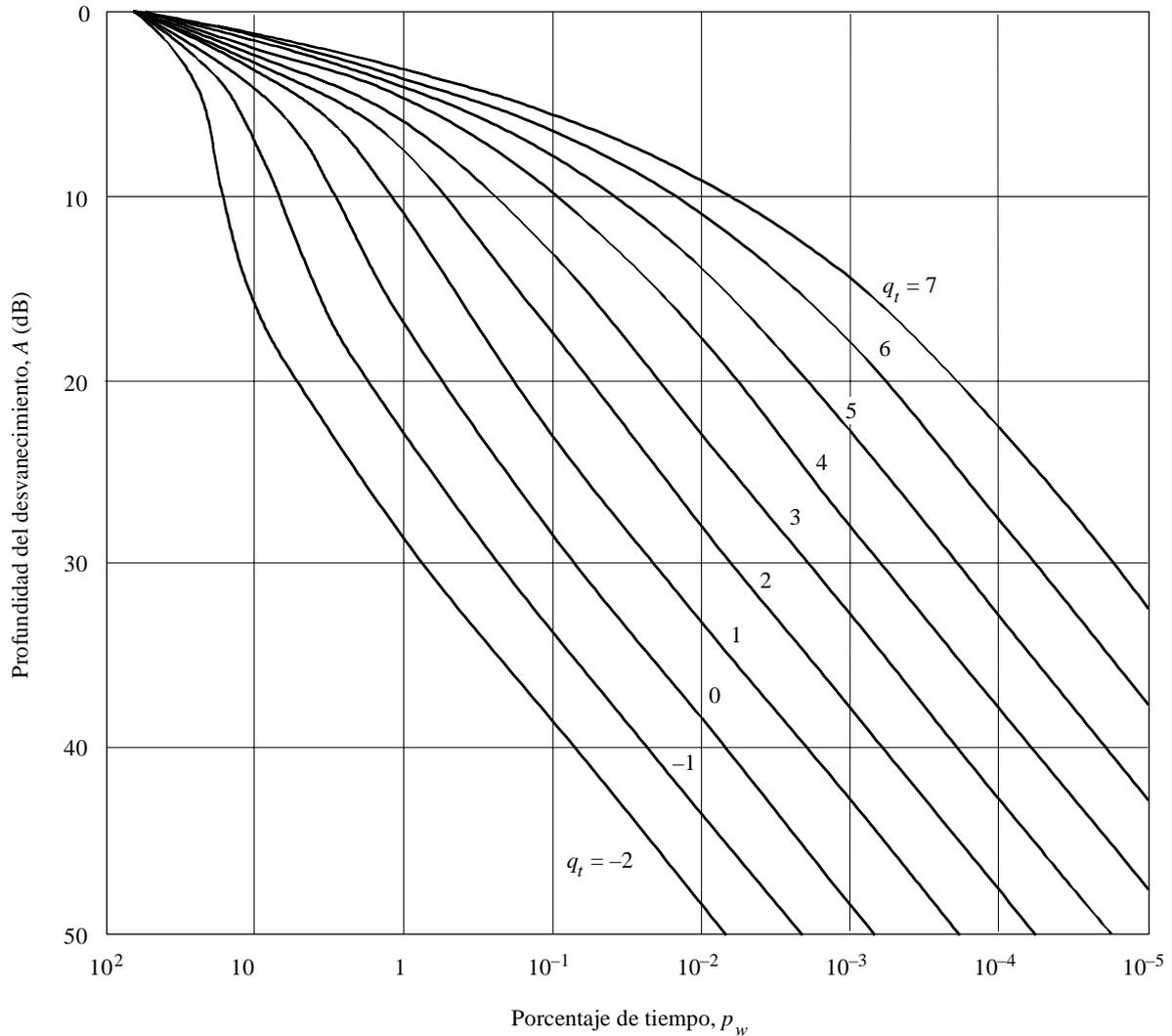
Se observan intensificaciones de gran magnitud durante las mismas condiciones generales de propagación por conductos frecuentes, resultantes en desvanecimientos debidos a la propagación por trayectos múltiples. Para la predicción de la intensificación superior a 10 dB durante el mes más desfavorable medio se utilizará:

$$p_w = 100 - 10^{(-1,7 + 0,2 A_{0,01} - E) / 3,5} \quad \% \quad \text{para } E > 10 \text{ dB} \quad (25)$$

siendo E el valor de la intensificación no excedido durante un $p\%$ de tiempo y $A_{0,01}$ la profundidad de desvanecimiento acusado predicha mediante la ecuación (19) excedida durante un $p_w = 0,01\%$ de tiempo.

FIGURA 3

Porcentaje del tiempo en que se excede la profundidad del desvanecimiento en un mes medio más desfavorable para valores de q_t (de la ecuación (24)) en la gama de -2 a 7



0530-03

La intensificación comprendida entre 10 y 0 dB se calcula aplicando el siguiente procedimiento paso a paso:

- Cálculo del porcentaje de tiempo p'_w con una intensificación menor o igual a 10 dB ($E' = 10$) mediante la ecuación (25).
- Cálculo de q'_e aplicando:

$$q'_e = -\frac{20}{E'} \left(\log_{10} \left[-\ln \left(1 - \frac{100 - p'_w}{58,21} \right) \right] \right) \quad (26)$$

- Cálculo del parámetro q_s mediante:

$$q_s = 2,05 q'_e - 20,3 \quad (27)$$

- Cálculo de q_e para la E deseada aplicando:

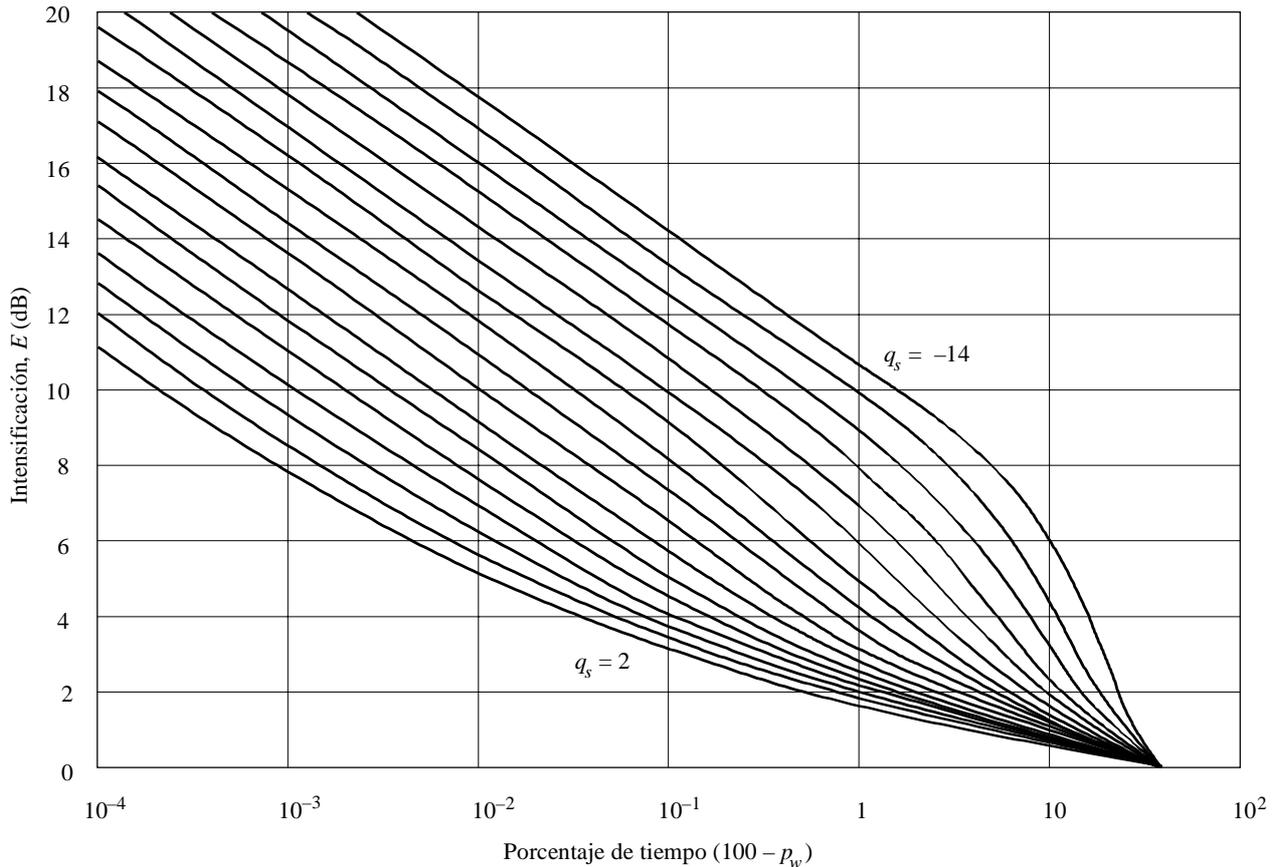
$$q_e = 8 + \left[1 + 0,3 \times 10^{-E/20} \right] \left[10^{-0,7 E/20} \right] \left[q_s + 12 \left(10^{-E/20} + E/800 \right) \right] \quad (28)$$

e) Obtención del porcentaje de tiempo en que la intensificación E (dB) no es excedida mediante:

$$p_w = 100 - 58,21 \left[1 - \exp\left(-10^{-q_s} q_e E / 20\right) \right] \quad (29)$$

El conjunto de curvas de la Fig. 4 con q_s como parámetro proporciona una representación apropiada del método.

FIGURA 4
Predicción de la intensificación para diversos porcentajes de tiempo, con q_s (de la ecuación (28)) en la gama de -14 a 2



0530-04

Para la predicción de los porcentajes excedidos para el año medio en vez del mes más desfavorable medio, véase el § 2.3.4.

2.3.4 Conversión de distribuciones para el mes más desfavorable medio en otras para el año medio

Las distribuciones de desvanecimiento y de intensificación para el mes más desfavorable medio obtenidas con los métodos indicados en los § 2.3.1 a 2.3.3 se pueden convertir en distribuciones para el año medio empleando el siguiente procedimiento:

- a) Se calcula el porcentaje de tiempo p_w en que se rebasa una profundidad de desvanecimiento A en la gran cola de distribución para el mes más desfavorable medio, con la ecuación (19).
- b) Se calcula el factor de conversión geoclimático logarítmico ΔG mediante la siguiente expresión:

$$\Delta G = 10,5 - 5,6 \log (1,1 \pm |\cos 2\xi|^{0,7}) - 2,7 \log d + 1,7 \log (1 + |\epsilon_p|) \quad \text{dB} \quad (30)$$

siendo $\Delta G \leq 10,8$ dB. En la ecuación (30) se emplea el signo positivo para $\xi \leq 45^\circ$ y el signo negativo para $\xi > 45^\circ$; y donde:

- ξ : latitud ($^\circ$ N o $^\circ$ S)
 d : longitud del trayecto (km)
 $|\varepsilon_p|$: magnitud de la inclinación del trayecto (calculada con la ecuación (18)).

c) Se calcula el porcentaje de tiempo p en que se rebasa una profundidad de desvanecimiento A en la gran cola de distribución de la profundidad de desvanecimiento para el año medio, mediante las siguiente expresión:

$$p = 10^{-\Delta G/10} p_w \quad \% \quad (31)$$

d) Si se requiere la gama de desvanecimiento rasante de la distribución (es decir, $A < 25$ dB o $A < 35$ dB, según corresponda), se debe seguir el método indicado en el § 2.3.2, reemplazando p_w por p .

e) Si se requiere predecir la distribución de la intensificación para el año medio, debe seguirse el método del § 2.3.3, donde $A_{0,01}$ es ahora la profundidad de desvanecimiento rebasada en el 0,01% del tiempo en el año medio. Se obtiene primero p_w invirtiendo la ecuación (31) y utilizando un valor de $p = 0,01\%$. Se obtiene entonces la profundidad de desvanecimiento $A_{0,01}$ rebasada durante el 0,01% del tiempo en el año medio invirtiendo la ecuación (19) y empleando p en lugar de p_w .

2.3.5 Predicción de la interrupción de la transmisión (véase la Nota 1)

En el diseño de un enlace digital, se calcula la probabilidad de la interrupción de la transmisión P_{ns} debido a un componente no selectivo del desvanecimiento (véase el § 7) a partir de:

$$P_{ns} = p_w / 100 \quad (32)$$

donde p_w (%) es el porcentaje de tiempo en que el margen de desvanecimiento plano $A = F$ (dB) correspondiente a la proporción de bits erróneos especificada (BER) resulta excedido en el mes y medio más desfavorable (obtenido del § 2.3.1 ó 2.3.2, según el caso). El margen de desvanecimiento plano F se obtiene calculando el enlace y procesando la información facilitada con el equipo de que se trate, y teniendo en cuenta también las posibles reducciones ocasionadas por la interferencia en el diseño real del enlace.

NOTA 1 – La interrupción de la transmisión se calcula a partir de una proporción de bits erróneos (BER) que corresponde a un suceso de segundo con muchos errores (para mayor información, véase el § 7).

2.3.6 Ocurrencia de desvanecimientos simultáneos en enlaces con reflexión ionosférica múltiple

Los datos experimentales indican que, en condiciones de cielo despejado, casi no existe ninguna correlación entre sucesos de desvanecimiento en los que se superan los 20 dB en reflexiones adyacentes de un enlace con reflexión ionosférica múltiple, lo que induce a pensar que, en el caso de sistemas analógicos con grandes márgenes de protección contra el desvanecimiento, la duración de las interrupciones para una serie de reflexiones en tándem vendrá dada aproximadamente por la suma de las duraciones de las interrupciones de cada una de las reflexiones.

Si las profundidades del desvanecimiento no superan los 10 dB, la probabilidad de rebasar simultáneamente una profundidad de desvanecimiento dada en dos reflexiones adyacentes puede estimarse mediante la siguiente fórmula:

$$P_{12} = (P_1 P_2)^{0,8} \quad (33)$$

donde P_1 y P_2 son las probabilidades de rebasar esta profundidad de desvanecimiento en cada una de las reflexiones (véase la Nota 1).

La correlación entre desvanecimientos en reflexiones adyacentes disminuye a medida que aumenta la profundidad del desvanecimiento entre 10 y 20 dB, de modo que la probabilidad de rebasar simultáneamente una profundidad de desvanecimiento superior a 20 dB puede expresarse aproximadamente mediante:

$$P_{12} = P_1 P_2 \quad (34)$$

NOTA 1 – Se piensa que la correlación entre desvanecimientos en reflexiones adyacentes depende de la longitud del trayecto. La ecuación (33) es un valor medio basado en los resultados de las mediciones efectuadas en 47 pares de reflexiones adyacentes con visibilidad directa funcionando en la banda de 5 GHz, con longitudes de trayecto entre 11 y 97 km y una longitud de trayecto media de 45 km.

2.4 Atenuación debida a hidrometeoros

También puede producirse atenuación como resultado de la absorción y dispersión provocadas por hidrometeoros como la lluvia, la nieve, el granizo y la niebla. Aunque puede hacerse caso omiso de la atenuación debida a la lluvia para frecuencias por debajo de unos 5 GHz, debe incluirse en los cálculos de diseño a frecuencias superiores, en las que su importancia aumenta rápidamente. En el § 2.4.1 figura una técnica de estimación de las estadísticas a largo plazo de la atenuación debida a la lluvia. En trayectos a latitudes elevadas o en trayectos a latitudes bajas y altitudes elevadas, la nieve húmeda puede provocar una atenuación significativa en una gama de frecuencias aun mayor. En la Recomendación UIT-R P.840 figura información más detallada sobre la atenuación causada por hidrometeoros distintos de la lluvia.

En las frecuencias en que deben tenerse en cuenta tanto la atenuación debida a la lluvia como el desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples, pueden añadirse los porcentajes excedidos para una profundidad de desvanecimiento determinada correspondientes a cada uno de estos mecanismos.

2.4.1 Estadísticas de la atenuación producida por la lluvia a largo plazo

Para estimar las estadísticas de la atenuación producida por la lluvia a largo plazo puede utilizarse la siguiente técnica sencilla:

Paso 1: Se obtiene el índice de precipitación $R_{0,01}$ superado durante el 0,01% del tiempo (con un tiempo de integración de 1 min). Si no se dispone de esta información a partir de las fuentes locales de medidas a largo plazo puede obtenerse una estimación utilizando la información que aparece en la Recomendación UIT-R P.837.

Paso 2: Se calcula la atenuación específica γ_R (dB/km) para la frecuencia, polarización e índice de precipitación de interés, utilizando la Recomendación UIT-R P.838.

Paso 3: Se calcula la longitud efectiva del trayecto d_{eff} del enlace multiplicando la longitud del trayecto real, d , por un factor de distancia r . Una estimación de este factor viene dada por:

$$r = \frac{1}{1 + d / d_0} \quad (35)$$

donde, para $R_{0,01} \leq 100$ mm/h:

$$d_0 = 35 e^{-0,015 R_{0,01}} \quad (36)$$

Para $R_{0,01} > 100$ mm/h utilícese el valor 100 mm/h en vez de $R_{0,01}$.

Paso 4: Una estimación de la atenuación del trayecto excedida durante el 0,01% del tiempo viene dada por:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = \gamma_R dr \quad \text{dB} \quad (37)$$

Paso 5: Las atenuaciones excedidas durante otros porcentajes de tiempo p en la gama de 0,001% a 1% pueden deducirse de la siguiente ley exponencial:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log_{10} p)} \quad (38)$$

Se ha elaborado esta fórmula de manera que dé 0,12, 0,39, 1 y 2,14 para el 1%, 0,1%, 0,01% y 0,001%, respectivamente, y solo se utilizará con esta gama.

Paso 6: Si se desean obtener las estadísticas relativas al mes más desfavorable, se calculan los porcentajes de tiempo anual p correspondientes a los porcentajes de tiempo del mes más desfavorable p_w mediante la información relativa al clima especificada en la Recomendación UIT-R P.841. Los valores de A rebasados durante los porcentajes de tiempo p anualmente, serán superados por los correspondientes porcentajes de tiempo p_w en los meses más desfavorables.

El procedimiento de predicción indicado anteriormente se considera válido en todo el mundo, al menos para frecuencias de hasta 40 GHz y longitudes de trayecto de hasta 60 km.

2.4.2 Extrapolación para diferentes frecuencias de las estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo y para una frecuencia

Cuando se dispone de estadísticas fiables de la atenuación a largo plazo para una frecuencia, puede utilizarse la siguiente expresión empírica para obtener una primera estimación de las estadísticas sobre atenuación a otras frecuencias de la gama 7-50 GHz, para una misma longitud de la reflexión y en la misma región climática:

$$A_2 = A_1 (\Phi_2 / \Phi_1)^1 - H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) \quad (39)$$

donde:

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2} \quad (40)$$

$$H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) = 1,12 \times 10^{-3} (\Phi_2 / \Phi_1)^{0,5} (\Phi_1 A_1)^{0,55} \quad (41)$$

A_1 y A_2 son los valores equiprobables de la atenuación por lluvia en exceso a las frecuencias f_1 y f_2 (GHz), respectivamente.

2.4.3 Extrapolación de las estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo, para polarizaciones ortogonales

Cuando se dispone de estadísticas a largo plazo de la atenuación con una determinada polarización (sea vertical u horizontal) para un enlace dado, puede estimarse la atenuación para la otra polarización en el mismo enlace mediante las siguiente fórmulas:

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \quad \text{dB} \quad (42)$$

o

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \quad \text{dB} \quad (43)$$

Estas expresiones se consideran válidas para las gamas de longitudes de trayecto y frecuencias del método de predicción del § 2.4.1.

2.4.4 Estadísticas de duración y de tasa de desvanecimiento

Hay algunos indicios de que la tasa de los desvanecimientos producidos por la lluvia es muy inferior a la de los debidos a la propagación por trayectos múltiples. Por otra parte, los valores medios y medianos de la duración difieren, lo que indica distorsión en la distribución de la duración de los desvanecimientos.

2.4.5 Trayectos en tándem y convergentes y diversidad de trayectos

2.4.5.1 Longitud de las reflexiones individuales

Las características de transmisión globales de un sistema en tándem se ven muy afectadas por las características de propagación de los enlaces individuales. A veces es posible conseguir la misma conexión física global mediante combinaciones diferentes de longitudes de reflexión. Aumentando la longitud de las reflexiones individuales, se aumenta inevitablemente la probabilidad de interrupción durante estas reflexiones. Por otra parte, esta medida puede hacer que se utilicen menos reflexiones, con lo que las características globales del sistema en tándem pueden no degradarse.

2.4.5.2 Desvanecimientos correlacionados en los trayectos en tándem

Si la ocurrencia de la lluvia fuera estadísticamente independiente de su localización, la probabilidad general de desvanecimientos para una serie lineal de enlaces en tándem vendría dada con buena aproximación por:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i \quad (44)$$

siendo P_i el i -ésimo enlace del total de n enlaces.

Por otra parte, si los sucesos de precipitación están correlacionados en una zona finita, la atenuación que se produzca en dos o más enlaces de un sistema de relevadores con muchas reflexiones también estará correlacionada, en cuyo caso la probabilidad de desvanecimiento combinado puede expresarse de la siguiente manera:

$$P_T = K \sum_{i=1}^n P_i \quad (45)$$

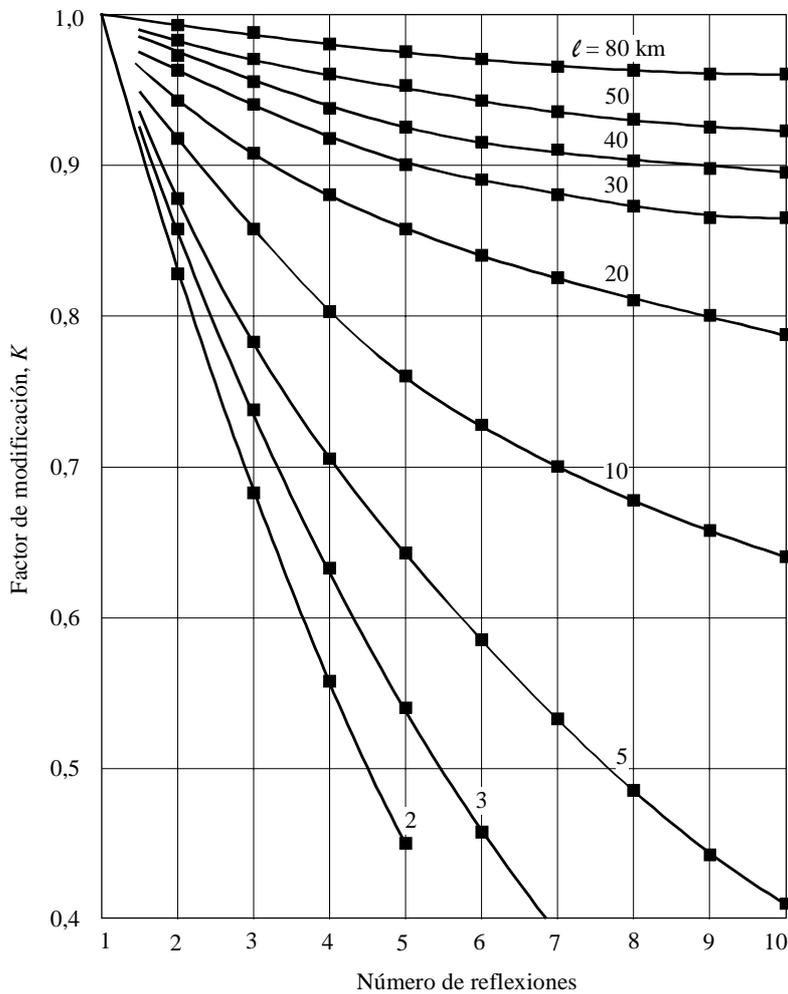
siendo K un factor de modificación que incluye el efecto total de la correlación correspondiente a la lluvia.

Se han realizado pocos estudios sobre esta cuestión. En uno de ellos se analizó la correlación instantánea de la lluvia en puntos localizados a lo largo de una ruta Este-Oeste, aproximadamente paralela a la dirección de desplazamiento de las tormentas. En otro estudio se examinó la atenuación en una serie de pequeñas reflexiones orientadas Norte-Sur, o más o menos perpendiculares a la dirección de las tormentas durante la estación máxima pluviosidad.

En los enlaces paralelos a la dirección del movimiento de las tormentas, el efecto de la correlación en una serie de enlaces, cuya longitud, l , era superior a 40 km, fue escaso. En ese caso, el factor de modificación K rebasó el valor 0,9 para 0,03% de interrupciones debidas a la lluvia, por lo que no hace falta tenerlo en cuenta (véase la Fig. 5). Pero en el caso de pequeñas reflexiones los efectos son más importantes: la probabilidad de interrupción simultánea para 10 enlaces, cada uno de ellos con longitudes de 20, 10 y 5 km, es, aproximadamente, el 80%, el 65% y el 40% de la expectativa sin correlación, respectivamente (o sea, factores de modificación de 0,8; 0,65 y 0,4). Se estima que la influencia de la correlación de la lluvia es algo mayor para las primeras reflexiones, y que disminuye al aumentar la longitud total de la cadena.

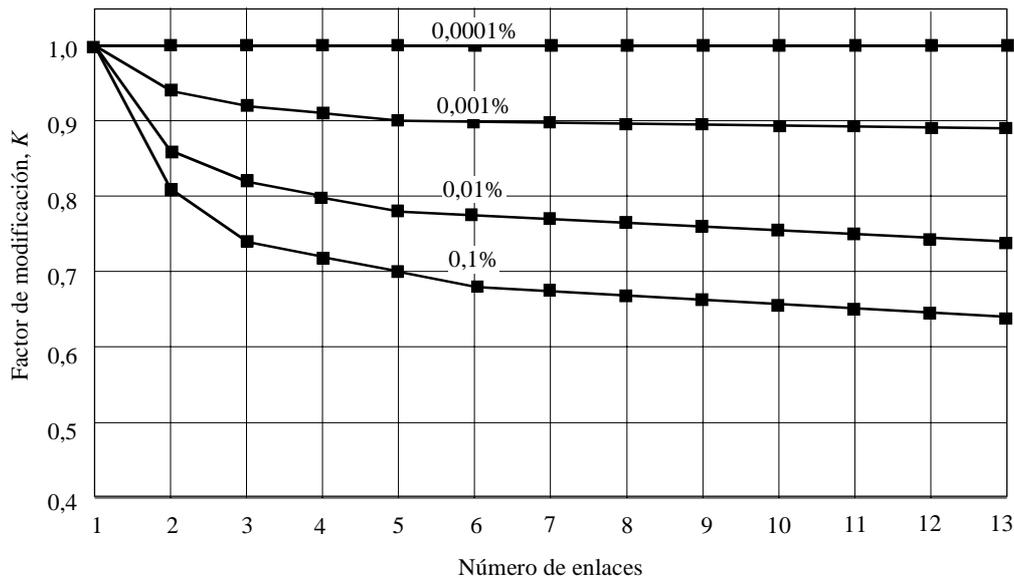
FIGURA 5

Factor de modificación de la atenuación total debida a la lluvia sobre una serie de enlaces en tándem de igual longitud, l , para una probabilidad excedida de 0,03% en cada enlace



En la Fig. 6 se muestran los factores de modificación para el caso de la propagación en dirección perpendicular a la dirección de desplazamiento de las tormentas, aplicables a varios niveles de probabilidad. En esta situación, los factores de modificación disminuyen más rápidamente en algunas de las primeras reflexiones (lo que indica una correlación a corto plazo más fuerte que la que se produce en la propagación paralela al desplazamiento de las tormentas), y a partir de entonces sus valores se mantienen relativamente constantes (lo que indica una correlación más débil a largo plazo).

FIGURA 6
Factor de modificación de la atenuación total debida a la lluvia
sobre una serie de enlaces en tándem, cada uno de una longitud aproximada
de 4,6 km, para varios niveles de probabilidad de excederse en cada enlace
 (Mayo de 1975-marzo de 1979)



0530-06

2.4.5.3 Trayectos convergentes

Cuando dos o más trayectos radioeléctricos convergen en una estación de un sistema de relevadores radioeléctricos, el coeficiente de correlación de la atenuación entre pares de trayectos depende del ángulo entre los trayectos. Esta dependencia, así como la atenuación diferencial sobre los trayectos convergentes y la interferencia entre los mismos se ha estudiado para el caso en que la longitud del trayecto es del orden de magnitud o menor que el tamaño de una celda de lluvia. Por ejemplo, se ha encontrado teóricamente que, para una longitud de trayecto de 4 km, el coeficiente de correlación aumentaba de 0,8 a 0,97 cuando el ángulo entre los trayectos disminuía de 180° a 20°.

2.4.5.4 Diversidad de trayectos

Mientras que el desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples puede superarse mediante una separación vertical de varios metros entre las antenas, la reducción del desvanecimiento debido a las precipitaciones se logra eligiendo trayectos separados en varios kilómetros.

Los datos obtenidos experimentalmente en el Reino Unido en la gama de 20 a 40 GHz dan una indicación de la mejora de la fiabilidad del enlace que puede lograrse con el uso de un sistema con diversidad por conmutación de trayectos. La ganancia de diversidad (es decir, la diferencia entre la atenuación en dB rebasada durante determinado porcentaje del tiempo en un enlace único y la rebasada simultáneamente en dos enlaces en paralelo):

- tiende a disminuir a medida que aumenta la longitud del trayecto más allá de 12 km, para determinado porcentaje de tiempo y determinada separación lateral entre los trayectos;
- suele ser mayor para una separación de 8 km que para una separación de 4 km, pero aumentando esa separación a 12 km no se obtiene ninguna mejora adicional;
- no depende significativamente de la frecuencia en la gama de 20 a 40 GHz, para una geometría dada; y
- varía entre unos 2,8 dB, durante el 0,1% del tiempo, y 4,0 dB durante el 0,001% del tiempo, para una separación de 8 km y longitudes de trayecto aproximadamente iguales. La variación correspondiente para una separación de 4 km es de 1,8 a 2,0 dB aproximadamente.

2.4.6 Predicción de la interrupción de las transmisiones debida a la lluvia

Para diseñar el enlace digital, calcúlese la probabilidad, P_{lluvia} , de exceder una atenuación ocasionada por la lluvia igual al margen del desvanecimiento plano F (dB) (véase el § 2.3.5) para la proporción de bits erróneos especificada, a partir de:

$$P_{lluvia} = p / 100 \quad (46)$$

donde p (%) es el porcentaje de tiempo en que la atenuación debida a la lluvia de F (dB) es excedida en el año promedio, resolviendo la ecuación (38) del § 2.4.1.

3 Variación de los ángulos de llegada y de salida

Gradientes anormales del índice de refracción con cielo despejado a lo largo de un trayecto pueden provocar variaciones considerables de los ángulos de salida y de llegada de las ondas transmitidas y recibidas, respectivamente. Esta variación es prácticamente independiente de la frecuencia y se produce principalmente en el plano vertical de las antenas. La gama de ángulos es superior en las regiones costeras húmedas que en las zonas secas del interior. En condiciones de precipitación no se han observado variaciones importantes.

El efecto puede ser importante en trayectos largos en los que se emplean antenas de elevada ganancia y haz estrecho. Si las anchuras de haz de las antenas son demasiado pequeñas, la onda directa de salida/llegada puede estar tan descentrada del eje del haz que dé lugar a un desvanecimiento importante (véase el § 2.3). Por otra parte si las antenas se han alineado durante periodos de ángulos de llegada muy anormales, la alineación puede no ser óptima. Por lo tanto, al alinear las antenas en trayectos críticos (por ejemplo, trayectos largos en zonas costeras), puede ser conveniente comprobar varias veces la alineación en un periodo de unos pocos días.

4 Reducción de la discriminación por polarización cruzada

La discriminación por polarización cruzada (XPD) puede deteriorarse suficientemente como para causar interferencia cocanal y, en menor medida, interferencia de canal adyacente. Debe tenerse en cuenta la reducción de la XPD producida en condiciones de cielo despejado y de precipitaciones.

4.1 Predicción de la interrupción de la transmisión ocasionada por efecto de la situación de cielo despejado

El efecto combinado de la propagación por trayectos múltiples y los diagramas de polarización cruzada de las antenas determinan las reducciones en la XPD que se producen para pequeños porcentajes de tiempo. Para calcular el efecto de estas reducciones de la calidad de funcionamiento del enlace debe seguirse el siguiente procedimiento paso a paso:

Paso 1: Calcúlese:

$$XPD_0 = \begin{cases} XPD_g + 5 & \text{para } XPD_g \leq 35 \\ 40 & \text{para } XPD_g > 35 \end{cases} \quad (47)$$

donde XPD_g es el XPD mínimo garantizado por el fabricante en el eje de puntería para las antenas de transmisión y recepción, esto es, el XPD mínimo en el eje de puntería para la antena de transmisión y recepción.

Paso 2: Evalúese el parámetro de actividad multitrayecto:

$$\eta = 1 - e^{-0,2(P_0)^{0,75}} \quad (48)$$

donde $P_0 = p_w/100$ es el factor de ocurrencia del multitrayecto correspondiente al porcentaje de tiempo p_w (%) en que se excede $A = 0$ dB en el mes más desfavorable medio, calculado a partir de la ecuación (19).

Paso 3: Determínese:

$$Q = -10 \log \left(\frac{k_{xp} \eta}{P_0} \right) \quad (49)$$

donde:

$$k_{xp} = \begin{cases} 0,7 & \text{para una antena transmisora} \\ 1 - 0,3 \exp \left[-4 \times 10^{-6} \left(\frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] & \text{para dos antenas transmisoras} \end{cases} \quad (50)$$

En el caso de dos transmisiones polarizadas ortogonalmente a partir de diferentes antenas, la separación vertical es s_t (m) y la anchura de banda de la portadora es λ (m).

Paso 4: Derívese el parámetro C a partir de:

$$C = XPD_0 + Q \quad (51)$$

Paso 5: Calcúlese la probabilidad de la interrupción de la transmisión P_{xp} debido a la polarización cruzada con cielo despejado a partir de:

$$P_{xp} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}} \quad (52)$$

donde M_{XPD} (dB) es el margen XPD equivalente a una BER de referencia dada por:

$$M_{XPD} = \begin{cases} C - \frac{C_0}{I} & \text{sin XPIC} \\ C - \frac{C_0}{I} + XPIF & \text{con XPIC} \end{cases} \quad (53)$$

Donde C_0/I es la relación portadora/interferencia para una BER de referencia, que puede evaluarse basándose en simulaciones o mediciones.

XPIF es un factor de mejoramiento de la polarización cruzada (cross-polarization improvement factor) medido en laboratorio que permite obtener la variación del aislamiento polar cruzado (XPI-cross-polar isolation) con una relación portadora/ruido suficientemente amplia (típicamente de 35 dB) y una BER específica para sistemas con y sin supresor de interferencia polar cruzada (XPIC-cross polar interference canceller). Un valor típico de XPIF es 20 dB aproximadamente.

4.2 Predicción de la interrupción de la transmisión debida a los efectos de la lluvia

4.2.1 Estadísticas de la XPD en condiciones de precipitación

La lluvia intensa determina las reducciones de la XPD que se observan en pequeños porcentajes de tiempo. Para trayectos de los que no se dispone de predicciones o mediciones detalladas puede obtenerse una estimación aproximada de la distribución incondicional de la XPD a partir de una distribución acumulativa de la atenuación debida a la lluvia de la componente copolar CPA, (véase el § 2.4) utilizando la relación de equiprobabilidad:

$$XPD = U - V(f) \log CPA \quad \text{dB} \quad (54)$$

que se aplica tanto para la polarización lineal como para la polarización circular. Los coeficientes U y $V(f)$ dependen, en general, de cierto número de variables y parámetros empíricos, incluida la frecuencia f . Para trayectos de visibilidad directa con pequeños ángulos de elevación y polarización horizontal o vertical, pueden darse a tales coeficientes los valores aproximados siguientes:

$$U = U_0 + 30 \log f \quad (55)$$

$$\begin{aligned} V(f) &= 12,8 f^{0,19} && \text{para } 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ V(f) &= 22,6 && \text{para } 20 < f \leq 35 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (56)$$

Se ha obtenido un valor medio de U_0 de unos 15 dB, con un límite inferior de 9 dB para todas las mediciones, en atenuaciones superiores a 15 dB.

La variabilidad de los valores de U y $V(f)$ es tal que la diferencia entre los valores de la CPA para las polarizaciones vertical y horizontal no es significativa en la evaluación de la XPD. Se aconseja al usuario que utilice el valor de la CPA para la polarización circular al trabajar con la ecuación (54).

Las estadísticas de XPD correspondientes a un largo periodo, obtenidas en una frecuencia, pueden extrapolarse a otra utilizando la fórmula semiempírica:

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log (f_2/f_1) \quad \text{para } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \quad (57)$$

donde XPD_1 y XPD_2 son los valores de XPD no rebasados durante el mismo porcentaje de tiempo a las frecuencias f_1 y f_2 .

En la relación entre XPD y CPA influyen muchos factores, incluida la XPD residual de la antena, que no se ha tenido en cuenta. La ecuación (57) es menos precisa cuando existen grandes diferencias entre las respectivas frecuencias, y es sumamente precisa cuando XPD_1 y XPD_2 corresponden a la misma polarización (horizontal o vertical).

4.2.2 Procedimiento paso a paso para predecir la interrupción de la transmisión debida a efectos de la lluvia

Paso 1: Determinése la atenuación de trayecto, $A_{0,01}$ (dB), excedida para el 0,01% del tiempo, a partir de la ecuación (37).

Paso 2: Determinése la atenuación de trayecto equivalente, A_p (dB):

$$A_p = 10^{((U - C_0/I + XPIF) / V)} \quad (58)$$

donde U se obtiene a partir de la ecuación (55) y V de la ecuación (56), C_0/I (dB) es la relación portadora/interferencia definida para la BER de referencia sin XPIC, y XPIF (dB) es el factor de mejoramiento de la polarización cruzada para la BER de referencia.

Si no se utiliza un dispositivo XPIC dar a XPIF un valor = 0.

Paso 3: Determinése los siguientes parámetros:

$$m = \begin{cases} 23,26 \log [A_p / 0,12 A_{0,01}] & \text{si } m \leq 40 \\ 40 & \text{para otros valores} \end{cases} \quad (59)$$

y

$$n = (-12,7 + \sqrt{161,23 - 4m}) / 2 \quad (60)$$

Los valores válidos para n deben estar comprendidos entre -3 y 0 . Hay que observar que en ciertos casos, especialmente cuando se utiliza un dispositivo XPIC, pueden obtenerse valores de n inferiores a -3 . En este caso, hay que indicar que los valores de p inferiores a -3 arrojarán una BER de interrupción inferior a 1×10^{-5} .

Paso 4: Determinése la probabilidad de interrupción de la transmisión a partir de:

$$P_{XPR} = 10^{(n-2)} \quad (61)$$

5 Distorsión debida a los efectos de la propagación

La causa principal de la distorsión en los enlaces con visibilidad directa en las bandas de ondas decimétricas y centimétricas es la dependencia de la amplitud con respecto a la frecuencia y el retardo de grupo en condiciones de propagación por trayectos múltiples y cielo despejado. En los sistemas analógicos un aumento de margen de desvanecimiento mejorará la calidad de funcionamiento, ya que se reducen los efectos del ruido térmico. Sin embargo, en los sistemas digitales la utilización de un margen de desvanecimiento mayor no será un factor de ayuda, si es el desvanecimiento selectivo de la frecuencia el que ocasiona la reducción en la calidad de funcionamiento.

El canal de propagación se modela la mayoría de las veces suponiendo que la señal sigue diferentes trayectos o rayos del transmisor al receptor. Esto presupone que el trayecto directo atraviesa la atmósfera y puede incluir uno o más trayectos reflejados por la superficie y/o refractados por la atmósfera adicionales. Si la señal directa y una reproducción significativamente retardada de aproximadamente la misma amplitud llega al receptor, se producirá una interferencia entre símbolos que puede redundar en un error en lo que concierne a detectar la información. En los métodos para predecir la calidad de funcionamiento se utiliza un modelo multirrayos de este tipo, integrando las diferentes variables, por ejemplo el retardo (diferencia temporal entre el rayo que llega primero y los demás) y distribuciones de amplitud, junto con un modelo adecuado de los elementos del equipo, tales como moduladores, equalizador, dispositivos de corrección de errores en recepción sin canal de retorno (FEC), etc. Aunque existen muchos métodos, éstos pueden

agruparse en tres categorías generales, en torno a un rasgo característico del sistema; a la distorsión lineal de amplitud (LAD-linear amplitude distortion) o al margen de desvanecimiento neto. En el marco de enfoque de rasgo se suele utilizar un modelo de laboratorio con simulador de dos rayos y asociar este modelo a otra información como por ejemplo la ocurrencia de la propagación por trayectos múltiples y las características del enlace. Con el enfoque LAD se calcula la distribución de la distorsión en un trayecto determinado que se observaría en dos frecuencias de la banda radioeléctrica y se utilizan características del modulador y del ecualizador, etc. Asimismo, en el enfoque de margen de desvanecimiento neto se emplean distribuciones estadísticas de las estimaciones de amplitudes de los rayos, así como información sobre el equipo, como se hace cuando se aplica el enfoque LAD. En el § 5.1 el método recomendado para predecir la característica de error es un método de rasgo característico (banda característica).

Se considera que la distorsión resultante de la precipitación es desdeñable y, en todo caso, un problema mucho menos importante que la propia atenuación debida a la lluvia. Se sabe que la distorsión se produce en bandas de absorción de ondas milimétricas y submilimétricas, pero no se han aclarado aún sus efectos sobre los sistemas operacionales.

5.1 Predicción de la interrupción de las transmisiones en los sistemas digitales no protegidos

La probabilidad de interrupción de la transmisión se ha definido aquí como la probabilidad de que la BER sobrepase un determinado valor umbral.

Paso 1: Calcúlese el retardo temporal medio, como sigue:

$$\tau_m = 0,7 \left(\frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad \text{ns} \quad (62)$$

donde d es la longitud del trayecto (km).

Paso 2: Calcúlese el parámetro de actividad del multitrayecto, η , como en el Paso 2 del § 4.1.

Paso 3: Calcúlese la probabilidad de interrupción selectiva de la transmisión como sigue:

$$P_s = 2,15\eta \left(W_M \times 10^{-B_M/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \times 10^{-B_{NM}/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,NM}|} \right) \quad (63)$$

donde:

W_x : anchura de la banda característica (GHz)

B_x : penetración en esta banda (dB)

$\tau_{r,x}$: retardo de referencia (ns) utilizado para obtener esta banda, mientras que x indica cuál es el desvanecimiento de fase mínima (M) o el de fase no mínima (NM).

Las definiciones de los parámetros de esta banda y la forma de obtenerlos se consignan a la Recomendación UIT-R F.1093.

6 Técnicas para reducir los efectos de la propagación por trayectos múltiples

Haciendo uso tanto de técnicas de no diversidad como de diversidad pueden reducirse los efectos del desvanecimiento lento relativamente no selectivo de frecuencia (es decir, el «desvanecimiento plano») debido a la dispersión del haz, así como los del desvanecimiento más rápido que es selectivo de frecuencia y es debido a la propagación por trayectos múltiples.

6.1 Técnicas de no diversidad

Los enlaces deben realizarse de tal forma que se aprovechen las ventajas del terreno para aumentar la inclinación del trayecto, puesto que se sabe que incrementando dicha inclinación disminuyen los efectos de la dispersión del haz, del desvanecimiento por trayectos múltiples en la superficie y del desvanecimiento por trayectos múltiples en la atmósfera. Los enlaces deben situarse en la medida de lo posible de tal forma que se reduzca el nivel de las reflexiones en la superficie, lo cual, a su vez, disminuye la aparición de distorsiones y el desvanecimiento por trayectos múltiples. Entre estas técnicas puede citarse la de establecer enlaces sobre masa de agua de tal forma que las reflexiones en la superficie

se produzcan en tierra y no en agua, así como sobre superficie de tierra y sobre agua de tal manera que se impida análogamente la formación de grandes superficies reflectantes planas sobre tierra. Otra técnica conocida para disminuir el nivel de las reflexiones en la superficie es la de inclinar las antenas ligeramente hacia arriba. Aún no se dispone de información detallada sobre los ángulos de inclinación adecuados. Debe llegarse a un compromiso entre la pérdida de directividad de la antena en condiciones de refracción normales resultante de aplicar esta técnica y la mejora que se logra en las condiciones de desvanecimiento por trayectos múltiples.

Otra técnica menos comprendida es la de reducción del despejamiento del trayecto. También en este caso debe llegarse a una solución de compromiso entre la reducción de los efectos de la distorsión y del desvanecimiento por trayectos múltiples y el incremento del desvanecimiento causado por la subrefracción.

6.2 Técnicas de diversidad

Las técnicas de diversidad incluyen la diversidad en el espacio, en ángulo y en frecuencia. En la medida de lo posible, debe evitarse utilizar diversidad en frecuencia, para ahorrar espectro. Cuando se utilice diversidad en el espacio, debe emplearse también diversidad en ángulo inclinando las antenas hacia arriba con distintos ángulos. La diversidad en ángulo puede utilizarse en situaciones en que no es posible emplear la diversidad adecuada en el espacio o para disminuir las alturas de los mástiles.

La mejora que se logra con estas técnicas depende del grado de descorrelación de las señales que discurren por las ramas de diversidad del sistema. En el caso de sistemas analógicos de banda estrecha, basta con determinar la mejora en las estadísticas de profundidad del desvanecimiento para una sola frecuencia. Para los sistemas digitales de banda ancha, la mejora de diversidad depende también de las estadísticas de la distorsión dentro de banda.

El factor de mejora de la profundidad de desvanecimiento (A), por diversidad, I , viene dado por:

$$I = p(A) / p_d(A) \quad (64)$$

siendo $p_d(A)$ el porcentaje de tiempo en el ramal de combinación de la diversidad de señal con una profundidad de desvanecimiento mayor que A , y $p(A)$ el porcentaje para el trayecto no protegido. En el caso de sistemas digitales, se define el factor de mejora de diversidad mediante el cociente de los tiempos en que se rebasa una BER determinada, en ausencia y en presencia de diversidad. Actualmente puede recomendarse un procedimiento de predicción para el factor de mejora de diversidad aplicable únicamente a sistemas de banda estrecha con diversidad en el espacio.

6.2.1 Técnica de diversidad en sistemas analógicos

En trayectos sobre tierra, el factor de mejora por diversidad vertical en el espacio para señales de banda estrecha, puede estimarse mediante:

$$I = \left[1 - \exp \left(-3,34 \times 10^{-4} S^{0,87} f^{-0,12} d^{0,48} P_0^{-1,04} \right) \right] 10^{(A - V) / 10} \quad (65)$$

donde:

$$P_0 = p_w \cdot 10^{A / 10} / 100 \quad (66)$$

y

$$V = |G_1 - G_2| \quad (67)$$

siendo:

- A : profundidad de desvanecimiento (dB) del trayecto no protegido
- p_w : porcentaje de tiempo en que se rebasa la profundidad de desvanecimiento A en el mes más desfavorable medio
- P_0 : factor de aparición de los desvanecimientos
- S : separación vertical de las antenas receptoras (m), de centro a centro
- f : frecuencia (GHz)
- d : longitud del trayecto (km)
- G_1, G_2 : ganancias de las dos antenas (dBi).

Esta ecuación se basa en los datos de los bancos de datos de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones para las siguientes gamas de valores de las variables: $43 \leq d \leq 240$ km, $2 \leq f \leq 11$ GHz y $3 \leq S \leq 23$ m. Existen razones para considerar que los datos seguirán siendo razonablemente válidos hasta longitudes de trayecto tan cortas como 25 km. El porcentaje de rebasamiento p_w puede calcularse a partir de la ecuación (19). La ecuación (65) es válida en la gama de desvanecimientos profundos en la que también lo es la ecuación (19).

6.2.2 Técnicas de diversidad en los sistemas digitales

Se dispone de métodos para predecir la probabilidad de la interrupción de la transmisión y el mejoramiento de diversidad para sistemas de diversidad en el espacio, en frecuencia y en ángulo, así como para sistemas que utilizan una combinación de diversidad en el espacio y en frecuencia. Los procedimientos «paso a paso» son los siguientes.

6.2.2.1 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad en el espacio

Hasta el momento se han utilizado muy extensamente en los sistemas de diversidad en el espacio los combinadores de potencia máxima. El procedimiento paso a paso indicado a continuación, se aplica a sistemas que emplean dichos combinadores. Otros combinadores, en que se aplica un enfoque más avanzado, emplean distorsión mínima y potencia máxima, dependiendo de una evaluación del canal radioeléctrico tendente a conseguir una mejor calidad de funcionamiento.

Paso 1: Calcúlese el factor de actividad multitrayecto, η , como en el Paso 2 del § 4.1.

Paso 2: Calcúlese el cuadrado del coeficiente de correlación no selectiva, k_{ns} , como sigue:

$$k_{ns}^2 = 1 - \frac{I_{ns} \cdot P_{ns}}{\eta} \quad (68)$$

donde el factor de mejora, I_{ns} , puede evaluarse a partir de la ecuación (65) para una profundidad de desvanecimiento, A (dB), correspondiente al margen de desvanecimiento plano, F (dB) (véase el § 2.3.5) y P_{ns} a partir de la ecuación (32).

Paso 3: Calcúlese el cuadrado del coeficiente de correlación selectiva, k_s , como sigue:

$$k_s^2 = \begin{cases} 0,8238 & \text{para } r_w \leq 0,5 \\ 1 - 0,195 (1 - r_w)^{0,109 - 0,13 \log(1 - r_w)} & \text{para } 0,5 < r_w \leq 0,9628 \\ 1 - 0,3957 (1 - r_w)^{0,5136} & \text{para } r_w > 0,9628 \end{cases} \quad (69)$$

donde el coeficiente de correlación, r_w , de las amplitudes relativas viene dado por:

$$r_w = \begin{cases} 1 - 0,9746 (1 - k_{ns}^2)^{2,170} & \text{para } k_{ns}^2 \leq 0,26 \\ 1 - 0,6921 (1 - k_{ns}^2)^{1,034} & \text{para } k_{ns}^2 > 0,26 \end{cases} \quad (70)$$

Paso 4: Calcúlese la probabilidad de interrupción de la transmisión no selectiva, P_{dns} , como sigue:

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}}{I_{ns}} \quad (71)$$

donde P_{ns} es la probabilidad de interrupción de la transmisión no protegida, dada por la ecuación (32).

Paso 5: Calcúlese la probabilidad de interrupción de la transmisión selectiva, P_{ds} , como sigue:

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \quad (72)$$

donde P_s es la probabilidad de interrupción de la transmisión no protegida, dada por la ecuación (63).

Paso 6: Calcúlese la probabilidad total de interrupción de la transmisión, P_d , como sigue:

$$P_d = \left(P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{1,33} \quad (73)$$

6.2.2.2 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad en frecuencia

El método dado se aplica para un sistema 1 + 1. Se utiliza el mismo procedimiento que en el caso de diversidad en el espacio, pero en el Paso 2 se aplica aquí la siguiente fórmula:

$$I_{ns} = \frac{80}{fd} \left(\frac{\Delta f}{f} \right) 10^{F/10} \quad (74)$$

donde:

Δf : separación en frecuencias (GHz)

f : frecuencia de la portadora (GHz).

6.2.2.3 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad en ángulo

Paso 1: Estímese el ángulo medio de llegada, μ_θ , como sigue:

$$\mu_\theta = 2,89 \times 10^{-5} G_m d \quad \text{grados} \quad (75)$$

donde G_m es el valor medio del gradiente de refractividad (unidades-N/km). En presencia clara de una fuerte reflexión de superficie, μ_θ puede estimarse a partir del ángulo de llegada del rayo reflejado en condiciones normales de propagación.

Paso 2: Calcúlese el parámetro de reducción no selectiva, r , como sigue:

$$r = \begin{cases} 0,113 \operatorname{sen} [150(\delta/\Omega) + 30] + 0,963 & \text{para } q > 1 \\ q & \text{para } q \leq 1 \end{cases} \quad (76)$$

donde:

$$q = 2505 \times 0,0437^{(\delta/\Omega)} \times 0,593^{(\epsilon/\delta)} \quad (77)$$

y:

δ : separación angular entre los dos diagramas de radiación

ϵ : ángulo de elevación de la antena superior (positivo con respecto al suelo)

Ω : anchura del haz de media potencia de los diagramas de radiación de antena.

Paso 3: Calcúlese el parámetro de correlación no selectiva, Q_0 , como sigue:

$$Q_0 = r \left(0,9399^{\mu_\theta} \times 10^{-24,58 \mu_\theta^2} \right) \left[2,469^{1,879(\delta/\Omega)} \times 3,615^{[(\delta/\Omega)^{1,978} (\epsilon/\delta)]} \times 4,601^{[(\delta/\Omega)^{2,152} (\epsilon/\delta)^2]} \right] \quad (78)$$

Paso 4: Calcúlese el parámetro de actividad multitrayecto, η , como en el Paso 2 del § 4.1.

Paso 5: Calcúlese la probabilidad de interrupción de la transmisión no selectiva a partir de:

$$P_{dns} = \eta Q_0 \times 10^{-\frac{F}{6,6}} \quad (79)$$

Paso 6: Calcúlese el cuadrado del coeficiente de correlación selectiva, k_s , como sigue:

$$k_s^2 = 1 - \left(0,0763 \times 0,694^{\mu_\theta} \times 10^{23,3 \mu_\theta^2} \right) \delta \left(0,211 - 0,188 \mu_\theta - 0,638 \mu_\theta^2 \right)^\Omega \quad (80)$$

Paso 7: Obténgase la probabilidad de interrupción de la transmisión selectiva, P_{ds} , como sigue:

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \quad (81)$$

donde P_s es la probabilidad de interrupción de la transmisión no protegida (véase el Paso 3 del § 5.1).

Paso 8: Calcúlese, por último la probabilidad total de interrupción de la transmisión, P_d , como sigue:

$$P_d = (P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75})^{1,33} \quad (82)$$

6.2.2.4 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad en el espacio y en frecuencia (dos receptores)

Paso 1: Obténgase el coeficiente de correlación no selectiva, k_{ns} , como sigue:

$$k_{ns} = k_{ns,s} k_{ns,f} \quad (83)$$

donde $k_{ns,s}$ y $k_{ns,f}$ son los coeficientes de correlación no selectiva calculados para la diversidad en el espacio (véase el § 6.2.2.1) y la diversidad en frecuencia (véase el § 6.2.2.2), respectivamente.

Los pasos siguientes son los mismos que los aplicados para diversidad en el espacio.

6.2.2.5 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad en el espacio y en frecuencia (cuatro receptores)

Paso 1: Calcúlese η como en el Paso 2 del § 4.1.

Paso 2: Calcúlese el parámetro de diversidad, m_{ns} , como sigue

$$m_{ns} = \eta^3 (1 - k_{ns,s}^2) (1 - k_{ns,f}^2) \quad (84)$$

donde $k_{ns,s}$ y $k_{ns,f}$ se obtienen del mismo modo que en el § 6.2.2.4.

Paso 3: Calcúlese la probabilidad de interrupción de la transmisión no selectiva, P_{dns} , como sigue:

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}^4}{m_{ns}} \quad (85)$$

donde P_{ns} se obtiene de la ecuación (32).

Paso 4: Calcúlese el cuadrado del coeficiente de correlación no selectiva equivalente, k_{ns} , como sigue:

$$k_{ns}^2 = 1 - \sqrt{\eta} (1 - k_{ns,s}^2) (1 - k_{ns,f}^2) \quad (86)$$

Paso 5: Calcúlese el coeficiente de correlación selectiva equivalente, k_s , utilizando el mismo procedimiento que para la diversidad en el espacio (Paso 3).

Paso 6: Se obtiene la probabilidad de interrupción de la transmisión selectiva, P_{ds} , mediante la siguiente expresión:

$$P_{ds} = \left[\frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \right]^2 \quad (87)$$

donde P_s es la probabilidad de interrupción de la transmisión no protegida dada por la ecuación (63).

Paso 7: Obténgase, a continuación, la probabilidad total de interrupción de la transmisión, P_d , utilizando la ecuación (73).

7 Predicción de la interrupción total de la transmisión

Calcúlese la probabilidad total de interrupción de la transmisión debida a los efectos de situación de cielo despejado mediante la siguiente expresión:

$$P_t = \begin{cases} P_{ns} + P_s + P_{XP} \\ P_d + P_{XP} \end{cases} \quad \text{si se utiliza diversidad} \quad (88)$$

obtenida aplicando los métodos indicados en los § 2.3.5, 4.1, 5.1, y 6.2.2.

La probabilidad total de interrupción de la transmisión debida a la lluvia se calcula formando el mayor de los valores P_{lluvia} y P_{XPR} obtenida aplicando los métodos indicados en los § 2.4.6 y 4.2.2.

Los métodos de predicción de la interrupción dados para los sistemas radioeléctricos digitales se han elaborado definiendo la interrupción de la transmisión como una BER superior a un determinado valor (por ejemplo, 1×10^{-3}), para cumplir los requisitos establecidos en la Recomendación UIT-T G.821. La interrupción de la transmisión se atribuye a característica de error y disponibilidad (véanse las Recomendaciones UIT-R F.594, UIT-R F.634, UIT-R F.695, UIT-R F.696, UIT-R F.697, UIT-R F.1092, UIT-R F.1189 y UIT-R F.557). La interrupción de la transmisión ocasionada por una situación de cielo despejado se atribuye en su mayor parte a la calidad de funcionamiento (característica de error) mientras que la interrupción debida a la lluvia se atribuye sobre todo a la disponibilidad. No obstante, es probable que los efectos con cielo despejado también contribuyan a la disponibilidad y las precipitaciones contribuyan a la característica de error.

Si se han de cumplir los requisitos de la Recomendación UIT-T G.826, es necesario contar con métodos de predicción que se basen en la estimación de errores de bloque, en lugar de bits erróneos. Para satisfacer dichos requisitos se debe diseñar el enlace de modo que la BER sea distinta de 1×10^{-3} : para sistemas de 155 Mbit/s, entre 1×10^{-5} y 1×10^{-4} , dependiendo de la longitud de la ráfaga de errores y de 1×10^{-3} para un sistema de 2 Mbit/s.

APÉNDICE 1

AL ANEXO 1

Método de determinación del factor geoclimático, K , a partir de datos de desvanecimiento medidos sobre trayectos terrenales en tierra

Paso 1: Obténgase la distribución del desvanecimiento de la envolvente durante el mes civil más desfavorable de cada año de funcionamiento, utilizando como referencia el valor mediano a largo plazo. Promédiense esos valores para obtener la distribución acumulativa del desvanecimiento durante el mes medio más desfavorable, y represéntense en un gráfico semilogarítmico.

Paso 2: En el gráfico, anótese la profundidad de desvanecimiento, A_1 , a partir de la cual la distribución acumulativa es aproximadamente lineal y obténgase el correspondiente porcentaje de tiempo, p_1 . Esta porción lineal constituye la ancha cola de la profundidad de desvanecimiento, cuya pendiente puede variar hasta 3 ó 4 dB/década con respecto al valor «Rayleigh» promediado de 10 dB/década, dependiendo la amplitud de esa variación del número de años de datos contenidos en la distribución media.

Paso 3: Calcúlese la inclinación del trayecto, $|\epsilon_p|$, mediante la ecuación (18).

Paso 4: Inclúyanse las coordenadas (p_1, A_1) del «primer punto de la cola» en la ecuación (19), junto con los valores de $d, f, |\epsilon_p|$ y calcúlese el factor geoclimático, K .

Paso 5: Si se dispone de datos para varios trayectos procedentes de una región de clima y terrenos similares, o para varias frecuencias, etc., en un trayecto único, deberá obtenerse un factor geoclimático medio promediando los valores de $\log K$.