

RECOMENDACIÓN UIT-R P.530-12

Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa

(Cuestión UIT-R 204/3)

(1978-1982-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2001-2005-2007)

Cometido

En esta Recomendación se proporcionan métodos de predicción para los efectos de propagación que deben tenerse en cuenta de cara al diseño de enlaces fijos digitales con visibilidad directa, tanto en condiciones de cielo despejado como con lluvia. También se proporcionan orientaciones para el diseño de enlaces mediante procedimientos bien definidos paso a paso, incluyendo la utilización de técnicas de reducción de la interferencia con objeto de minimizar las degradaciones de propagación. La interrupción final prevista es la base para otras Recomendaciones sobre características de error y disponibilidad.

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 reflexiones en superficies;
- 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 (XPD) 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 XPD, este Anexo trata únicamente de los efectos sobre la señal deseada. Aunque en el § 2.3.6 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 analizar los refuerzos debidos a la propagación. En tales casos se consideran 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 tipo de 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 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.

Las pérdidas por difracción en un terreno medio se pueden calcular aproximadamente, 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:

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

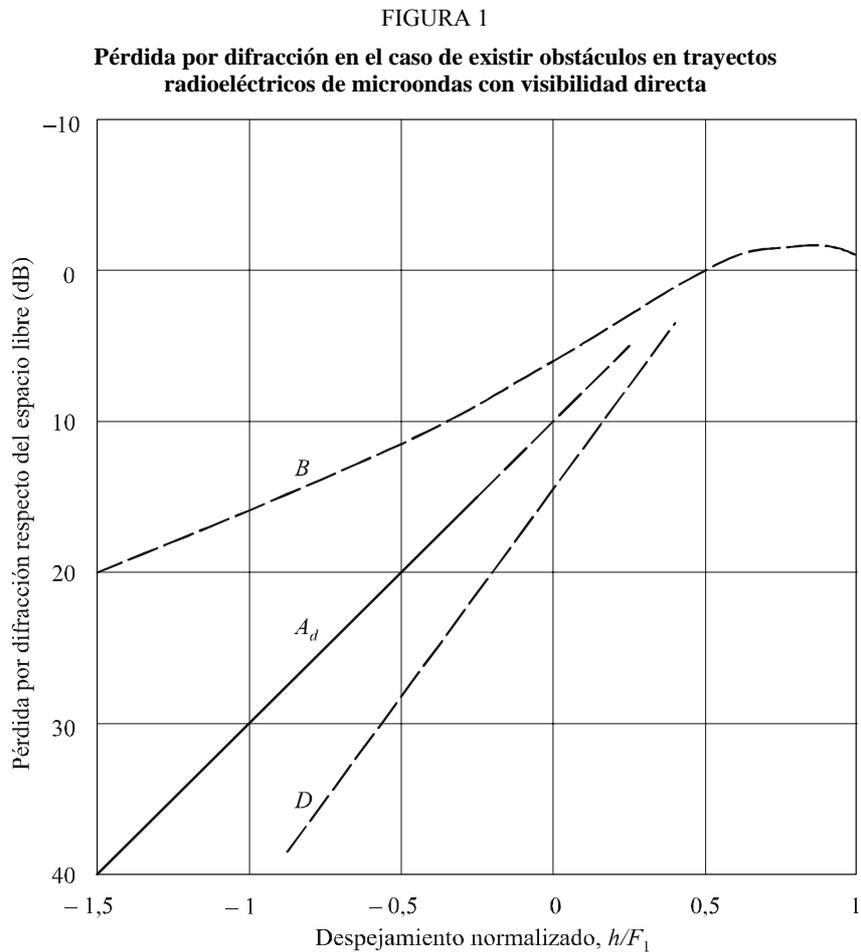
donde:

f : frecuencia (GHz)

d : longitud del trayecto (km)

d_1 y 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.



- 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

2.2.2 Criterios de planificación para el despejamiento del trayecto

En el pasado, el desvanecimiento por difracción de este tipo, a frecuencias por encima de unos 2 GHz, se compensaba 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 pueden producir algunas pequeñas interrupciones conocidas.

A falta de un procedimiento general que permita predecir el valor de las pérdidas por difracción para diversos porcentajes de tiempo pequeños, y en consecuencia, de un criterio estadístico de despejamiento, se recomienda utilizar los siguientes procedimientos en los climas templados y tropicales.

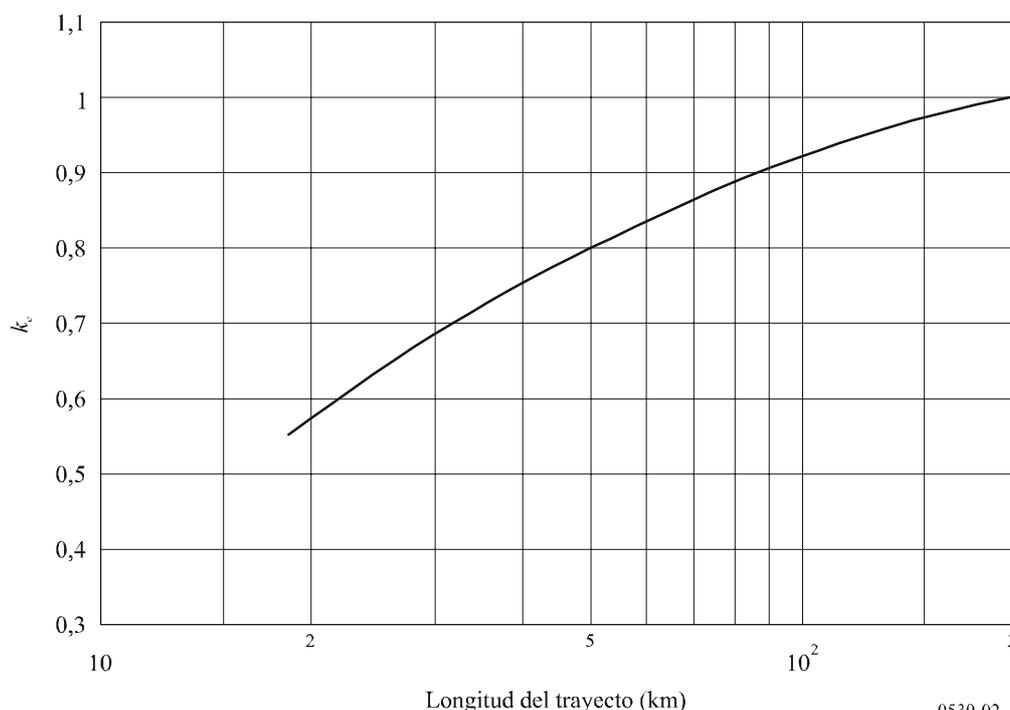
2.2.2.1 Configuraciones de antena sin diversidad

Paso 1: Se determinan las alturas de antenas necesarias para el valor mediano apropiado del factor k en el punto (véase el § 2.2; en ausencia de datos, utilícese $k = 4/3$) y un despejamiento de $1,0 F_1$ por encima del obstáculo más alto (en climas templados y tropicales).

Paso 2: Se obtiene el valor de k_e (99,9%) a partir de la Fig. 2, para la longitud del trayecto en cuestión.

FIGURA 2

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



Paso 3: Se calculan las alturas de antena necesarias para el valor de k_e obtenido en el Paso 2 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	

Paso 4: Utilícense las mayores alturas de antena obtenidas en los Pasos 1 y 3 (véase la Nota 1).

En los casos de incertidumbre sobre el tipo de clima, debe seguirse la regla de despejamiento más conservadora (véase la Nota 1) para climas tropicales o, al menos, una regla basada en el valor medio de despejamiento para climas templados y tropicales. En los Pasos 1 y 3 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.

A frecuencias por encima de 13 GHz, la exactitud de estimación de la altura del obstáculo comienza a acercarse al radio de la zona de Fresnel. Esta exactitud de estimación se debe agregar al despejamiento anterior.

NOTA 1 – Si bien estas reglas son conservadoras desde el punto de vista de la pérdida por difracción debido al desvanecimiento subrefractivo, se debe señalar que un diseño que pretenda fundamentalmente minimizar la indisponibilidad debida a la pérdida por difracción en condiciones subrefractivas puede producir una mayor degradación de la calidad de funcionamiento y disponibilidad en condiciones de multitrayecto. En la actualidad, no es posible establecer criterios generales para presentar una solución de compromiso entre las dos condiciones. Entre los factores pertinentes se dispone de los márgenes de protección contra desvanecimientos del sistema.

2.2.2.2 Configuraciones de dos o tres antenas con diversidad en el espacio

Paso 1: Se calcula la altura de la antena más elevada utilizando el procedimiento para configuraciones de una sola antena indicado anteriormente.

Paso 2: Se calcula la altura de la antena más baja para el valor mediano adecuado del factor k puntual (en ausencia de datos, utilícese $k = 4/3$) y los siguientes valores de despejamiento de la zona de Fresnel (véase la Nota 1):

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, durante las horas centrales del día, véase el § 8) o alguna otra pérdida adecuada al margen de protección contra desvanecimientos 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).

Paso 3: Se verifica que la separación entre las dos antenas satisface los requisitos para conseguir diversidad en condiciones de desvanecimientos por trayectos múltiples (véase el § 6.2.1), y si no se satisfacen dichos requisitos, se modifican hasta obtener diversidad.

NOTA 1 – Estos márgenes de despejamiento se eligieron para conseguir una pérdida por difracción que varía de unos 3 dB a 6 dB y para reducir la aparición de desvanecimientos causados por multitrayecto por superficies (véase el § 6.1.3). Por supuesto, los perfiles de unos trayectos no permitirán que la zona despejada se reduzca a este margen y, por tanto, se deben hallar otros medios para mejorar los efectos del desvanecimiento por trayectos múltiples.

En trayectos en los cuales predominan los desvanecimientos debidos a la propagación por trayectos múltiples por una o más reflexiones sobre superficies estables (por ejemplo sobre agua o zonas de superficies muy llanas), puede ser conveniente calcular primero la altura de la antena más alta utilizando el procedimiento que figura en el § 2.2.2.1, y determinar luego la separación óptima mínima de la antena en diversidad para obtener protección frente a trayectos múltiples por superficies (véase el § 6.1.3).

En situaciones extremas (por ejemplo trayectos muy extensos sobre agua), puede ser necesario emplear una configuración de tres antenas en diversidad. En este caso el despejamiento de la antena más baja se puede basar en la regla de despejamiento que figura en el Paso 2, y la correspondiente a la antena central se puede basar en el requisito de separación óptima con la antena más alta para mejorar los efectos de trayectos múltiples por superficies (véase el § 6.2.1).

2.3 Desvanecimientos y refuerzos 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 diversos mecanismos de desvanecimiento en condiciones de cielo despejado originados en 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 una superficie dando lugar a desvanecimiento por trayectos múltiples se produce un tipo de desvanecimientos selectivos en frecuencia especialmente acusados. Los desvanecimientos causados por centelleo debido a irregularidades de pequeña magnitud producidas por turbulencias atmosféricas siempre están presentes con estos mecanismos, pero a 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 de desvanecimientos a una sola frecuencia (o de banda estrecha) para desvanecimientos muy profundos 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, adecuado para todas las profundidades de desvanecimiento, que emplea el procedimiento para desvanecimientos muy profundos, según convenga, y un procedimiento de interpolación cuando la profundidad de desvanecimiento es pequeña.

En el § 2.3.3 se ofrece un método para predecir los refuerzos de la señal, en el que se 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

Paso 1: Para la ubicación del trayecto en cuestión, estímesese el factor geoclimático, K , correspondiente al 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).

Si no se dispone de datos medidos para K , y se está efectuando un diseño detallado del enlace (véase la Nota 1), estímesese el factor geoclimático para el mes más desfavorable medio a partir de la expresión:

$$K = 10^{-3,9-0,003dN_1s_a^{-0,42}} \quad (4)$$

en la que dN_1 es el gradiente de refractividad puntual en los 65 m inferiores de la atmósfera que no se rebasa durante el 1% de un año medio, y s_a es la rugosidad del terreno en la zona.

La Recomendación UIT-R P.453 da el valor de dN_1 en una cuadrícula de $1,5^\circ$ en latitud y longitud. El valor correcto de la latitud y la longitud en el centro del trayecto debe obtenerse por interpolación bilineal a partir de los valores de los cuatro puntos más próximos de la cuadrícula. Los datos van en formato tabular y pueden obtenerse de la Oficina de Radiocomunicaciones (BR).

s_a se define como la desviación típica de las alturas del terreno (m) en una zona de $110 \text{ km} \times 110 \text{ km}$ con una resolución de 30 s (por ejemplo, los datos Globe «gtopo30»). La zona debe estar alineada con la longitud, de forma que las dos mitades iguales de ésta se encuentren a cada lado de la longitud que atraviesa el centro del trayecto. Puede disponerse de datos del terreno en Internet (la BR facilita la dirección de Internet).

Si se necesita un cálculo rápido de K para aplicaciones de planificación (véase la Nota 1), puede obtenerse una estimación bastante precisa a partir de la fórmula:

$$K = 10^{-4,2-0,0029dN_1} \quad (5)$$

Paso 2: A partir de las alturas de antena h_e y h_r ((m) sobre el nivel del mar), calcúlese la magnitud de la inclinación del trayecto $|\varepsilon_p|$ (mrad) a partir de:

$$|\varepsilon_p| = |h_r - h_e| / d \quad (6)$$

en la que d es la longitud del trayecto (km).

Paso 3: Para aplicaciones de diseño detallado del enlace (véanse las Notas 1 y 2), calcúlese el porcentaje de tiempo, p_w , durante el que se rebasa la profundidad de desvanecimiento A (dB) en el mes más desfavorable medio a partir de:

$$p_w = Kd^{3,2}(1 + |\varepsilon_p|)^{-0,97} \times 10^{0,032f - 0,00085h_L - A/10} \% \quad (7)$$

donde f es la frecuencia (GHz), h_L es la altitud de la antena inferior (es decir, el valor menor de h_e y h_r), y donde el factor geoclimático, K , se obtiene de la ecuación (4).

Para aplicaciones de planificación rápida según se desee (véanse las Notas 1 y 2), calcúlese el porcentaje de tiempo, p_w , en el que se rebasa la profundidad de desvanecimiento A (dB) en el mes más desfavorable medio a partir de:

$$p_w = Kd^{3,0}(1 + |\varepsilon_p|)^{-1,2} \times 10^{0,033f - 0,001h_L - A/10} \% \quad (8)$$

en donde K se obtiene de la ecuación (5).

NOTA 1 – Las desviaciones típicas totales de los errores de las predicciones utilizando las ecuaciones (4) y (7), y (5) y (8), son 5,7 dB y 5,9 dB, respectivamente (incluyendo la contribución de la variabilidad de un año a otro). En la amplia gama de trayectos que se incluyen en estas cifras, se aplica una desviación típica mínima de los errores de 5,2 dB a los trayectos sobre tierra para los que $h_L < 700$ m, y un valor máximo de 7,3 dB para los trayectos sobre el agua. No obstante, la pequeña diferencia entre las desviaciones típicas totales no refleja de forma precisa la mejora en las predicciones que puede obtenerse utilizando las ecuaciones (4) y (7) para enlaces sobre terreno muy accidentado (por ejemplo, montañas) o terreno muy liso (por ejemplo, trayectos sobre el agua). Por ejemplo, las desviaciones típicas de los errores para enlaces sobre montañas ($h_L > 700$ m), se reducen en 0,6 dB, y los errores individuales para enlaces sobre regiones de montañas altas, hasta en varios decibelios.

NOTA 2 – Las ecuaciones (7) y (8), y las ecuaciones correspondientes (4) y (5) para el factor geoclimático K , se obtuvieron a partir de regresiones múltiples de los datos de desvanecimiento de 251 enlaces en varias regiones geoclimáticas del mundo con longitudes de trayecto d comprendidas entre 7,5 y 185 km, frecuencias f en la gama 450 MHz – 37 GHz, inclinaciones del trayecto $|\varepsilon_p|$ de hasta 37 mrad, altitudes de antena inferiores h_L en la gama 17-2 300 m, gradientes de refractividad dN_1 en la gama de -860 a -150 N unidades/km, y, rugosidades de la superficie de la zona s_a en la gama 6-850 m (para $s_a < 1$ m, se utiliza un límite inferior de 1 m).

Se espera también que las ecuaciones (7) y (8) sean válidas para frecuencias de al menos 45 GHz. Los resultados de un análisis semiempírico indican que el límite inferior de frecuencia es inversamente proporcional a la longitud del trayecto. Puede obtenerse una estimación aproximada de este límite inferior de frecuencia, f_{min} , a partir de:

$$f_{min} = 15 / d \quad \text{GHz} \quad (9)$$

2.3.2 Método para todos los porcentajes de tiempo

El método que se ofrece a continuación para la predicción del porcentaje de tiempo en que se excede una profundidad de desvanecimiento combina la distribución de desvanecimientos profundos que se da en el punto precedente con un procedimiento empírico de interpolación para desvanecimientos poco profundos de valor decreciente de hasta 0 dB.

Paso 1: Utilizando el método del § 2.3.1, calcular el factor de ocurrencia de propagación por trayectos múltiples, p_0 (es decir, la intersección de la distribución de desvanecimiento profundo con el eje de porcentaje de tiempo):

$$p_0 = Kd^{3,2} (1 + |\varepsilon_p|)^{-0,97} \times 10^{0,032f - 0,00085h_L} \quad \% \quad (10)$$

para aplicaciones de diseño detallado del enlace, obteniendo K de la ecuación (4), y:

$$p_0 = Kd^{3,0} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,2} \times 10^{0,033f - 0,001h_L} \quad \% \quad (11)$$

para aplicaciones de planificación rápida, obteniendo K a partir de la ecuación (5). Véase que las ecuaciones (10) y (11) son equivalentes a las ecuaciones (7) y (8), respectivamente, con $A = 0$.

Paso 2: Calcular el valor de la profundidad de desvanecimiento, A_t , al que se produce la transición entre la distribución de desvanecimientos profundos y la distribución de desvanecimientos poco profundos obtenida por medio del procedimiento de interpolación empírica:

$$A_t = 25 + 1,2 \log p_0 \quad \text{dB} \quad (12)$$

El procedimiento depende ahora de si A es mayor o menor que A_t .

Paso 3a: Si la profundidad de desvanecimiento requerida, A , es igual o mayor que A_t :

Calcular el porcentaje de tiempo en que se excede A en el mes más desfavorable medio:

$$p_w = p_0 \times 10^{-A/10} \quad \% \quad (13)$$

Obsérvese que la ecuación (13) es equivalente a la ecuación (7), o a la (8) según el caso.

Paso 3b: Si la profundidad de desvanecimiento requerida, A , es menor que A_t :

Calcular el porcentaje de tiempo, p_t , en que se excede A_t en el mes más desfavorable medio:

$$p_t = p_0 \times 10^{-A_t/10} \quad \% \quad (14)$$

Obsérvese que la ecuación (14) es equivalente a la ecuación (7), o a la (8) según el caso, con $A = A_t$.

Calcular q'_a a partir de la profundidad de desvanecimiento de transición, A_t , y del porcentaje de tiempo de transición, p_t :

$$q'_a = -20 \log_{10} \left\{ -\ln \left[\left(100 - p_t \right) / 100 \right] \right\} / A_t \quad (15)$$

Calcular q_t a partir de q'_a y de la profundidad de desvanecimiento de transición, A_t :

$$q_t = (q'_a - 2) / \left[\left(1 + 0,3 \times 10^{-A_t/20} \right) 10^{-0,016 A_t} \right] - 4,3 \left(10^{-A_t/20} + A_t/800 \right) \quad (16)$$

Calcular q_a a partir de la profundidad de desvanecimiento requerida, A :

$$q_a = 2 + \left[1 + 0,3 \times 10^{-A/20} \right] \left[10^{-0,016 A} \right] \left[q_t + 4,3 \left(10^{-A/20} + A/800 \right) \right] \quad (17)$$

Calcular el porcentaje de tiempo, p_w , en el que se excede la profundidad de desvanecimiento, A (dB), en el mes más desfavorable medio:

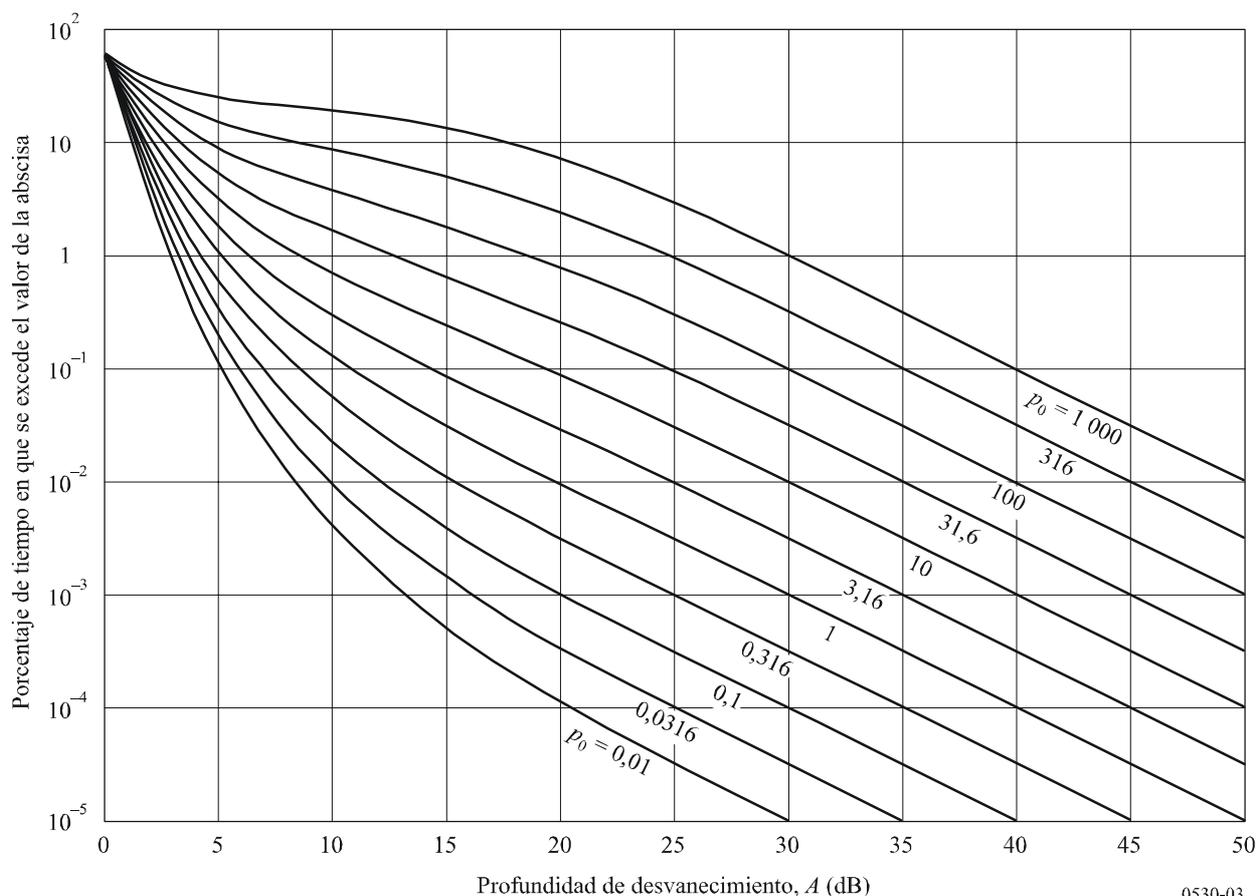
$$p_w = 100 \left[1 - \exp \left(-10^{-q_a A/20} \right) \right] \quad \% \quad (18)$$

A condición de que $p_0 < 2000$, el procedimiento anterior produce una variación monótona de p_w frente a A que puede utilizarse para calcular A para un determinado valor de p_w utilizando una iteración simple.

Con p_0 como parámetro, la Fig. 3 proporciona una familia de curvas que representa el método gráficamente.

FIGURA 3

Porcentaje del tiempo, p_w , en que se excede la profundidad del desvanecimiento, A , en un mes más desfavorable medio para valores de p_0 (de la ecuación (10) o la (11), según sea el caso) comprendidos entre 0,01 y 1 000



2.3.3 Método de predicción de los refuerzos

Se observan refuerzos de la señal de gran magnitud durante las mismas condiciones generales de propagación por conductos frecuentes, que causan desvanecimientos debidos a la propagación por trayectos múltiples. Para la predicción de los refuerzos de intensidad superior a 10 dB durante el mes más desfavorable medio se utilizará:

$$p_w = 100 - 10^{(-1,7 + 0,2 A_{0,01} - E)/3,5} \quad \% \quad \text{para } E > 10 \text{ dB} \quad (19)$$

siendo E (dB) el valor de la intensidad de los refuerzos no excedida durante un $p\%$ de tiempo y $A_{0,01}$ la profundidad de desvanecimiento acusado predicha mediante la ecuación (7) o la (8), según el caso, excedida durante un $p_w = 0,01\%$ del tiempo.

La intensidad de los refuerzos comprendida entre 10 y 0 dB se calcula aplicando el siguiente procedimiento paso a paso:

Paso 1: Cálculo del porcentaje de tiempo, p'_w , con una intensidad de los refuerzos menor o igual a 10 dB ($E' = 10$) mediante la ecuación (19).

Paso 2: Cálculo de q'_e aplicando:

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

Paso 3: Cálculo del parámetro q_s mediante:

$$q_s = 2,05q'_e - 20,3 \quad (21)$$

Paso 4: Cálculo de q_e para la E deseada aplicando:

$$q_e = 8 + \left[1 + 0,3 \times 10^{-E/20} \right] \left[10^{-0,7E/20} \right] \left[q_s + 12 \left(10^{-E/20} + E/800 \right) \right] \quad (22)$$

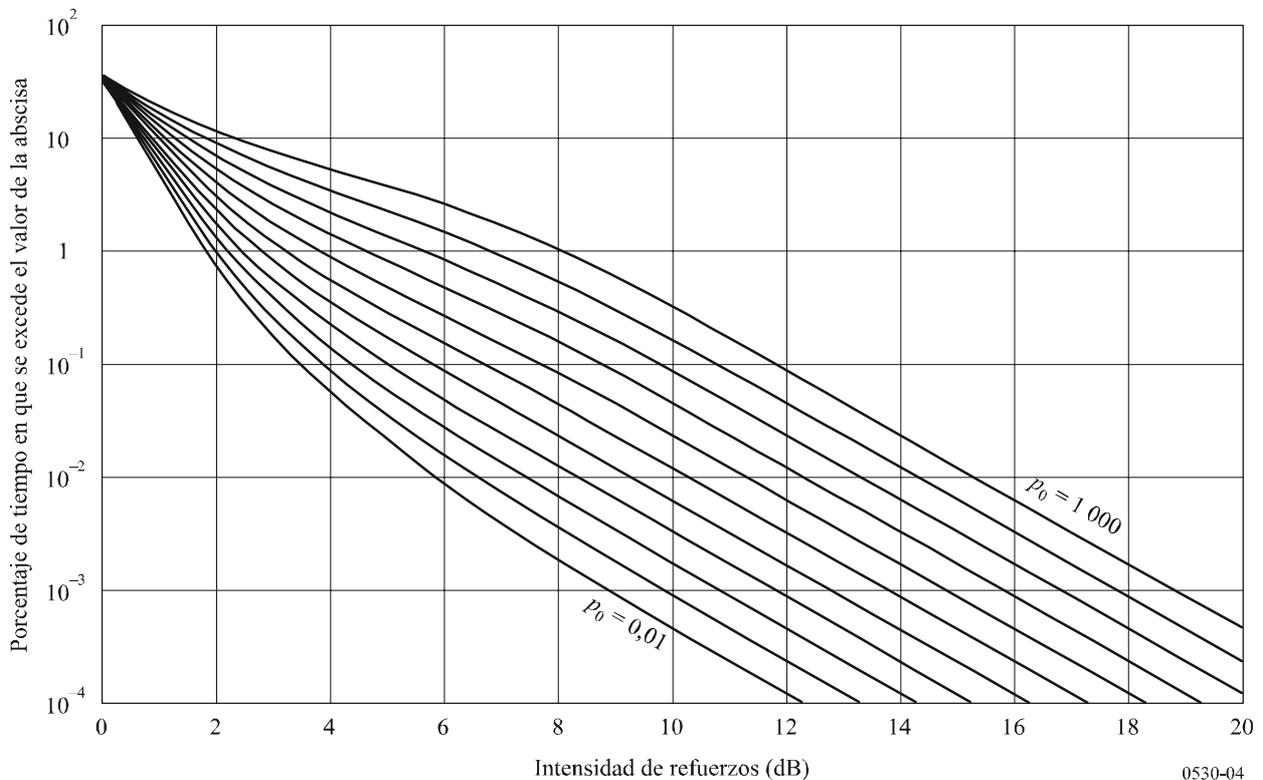
Paso 5: Obtención del porcentaje de tiempo en que la intensidad de los refuerzos E (dB) no es excedida mediante:

$$p_w = 100 - 58,21 \left[1 - \exp \left(-10^{-q_e E/20} \right) \right] \quad (23)$$

El conjunto de curvas de la Fig. 4 proporciona una representación apropiada del método con p_0 como parámetro (véase la ecuación (10) o la (11), según el caso). Cada curva de la Fig. 4 corresponde a la curva de la Fig. 3 con el mismo valor de p_0 . Se señala que en la Fig. 4 se da el porcentaje de tiempo durante el que se rebasa la intensidad de los refuerzos y que corresponde a $(100 - p_w)$, siendo p_w el valor dado por las ecuaciones (19) y (23).

FIGURA 4

Porcentaje de tiempo $(100 - p_w)$ en que se rebasa la intensidad de refuerzos E , en un mes más desfavorable medio para valores de p_0 (de la ecuación (10) o la (11), según sea el caso) comprendidos entre 0,01 y 1 000



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 distribuciones para el año medio

Las distribuciones de desvanecimientos y de refuerzos 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:

Paso 1: Se calcula el porcentaje de tiempo, p_w , en que se rebasa una profundidad de desvanecimiento, A , en la cola de la distribución correspondiente a profundos desvanecimientos para el mes más desfavorable medio, con la ecuación (7) o la (8), según el caso.

Paso 2: Se calcula el factor de conversión geoclimático logarítmico ΔG mediante la siguiente expresión:

$$\Delta G = 10,5 - 5,6 \log \left(1,1 \pm |\cos 2\xi|^{0,7} \right) - 2,7 \log d + 1,7 \log \left(1 + |\varepsilon_p| \right) \quad \text{dB} \quad (24)$$

siendo $\Delta G \leq 10,8$ dB. En la ecuación (24) se emplea el signo positivo para $\xi \leq 45^\circ$ y el signo negativo para $\xi > 45^\circ$, y donde:

ξ : latitud ($^\circ\text{N}$ o $^\circ\text{S}$)

d : longitud del trayecto (km)

$|\varepsilon_p|$: magnitud de la inclinación del trayecto (calculada con la ecuación (6)).

Paso 3: Se calcula el porcentaje de tiempo, p , en que se rebasa una profundidad de desvanecimiento, A , en la cola de la distribución correspondiente a profundos desvanecimientos para el año medio, mediante la siguiente expresión:

$$p = 10^{-\Delta G / 10} p_w \quad \% \quad (25)$$

Paso 4: Si se requiere el margen de la distribución correspondiente a desvanecimientos poco profundos, se debe seguir el método indicado en el Paso 3b del § 2.3.2, realizando los cambios siguientes:

- a) Convertir el valor de p_t obtenido en la ecuación (14) a un valor anual utilizando la ecuación (25) y emplear este valor anual en lugar de p_t , parámetro que aparece en la ecuación (15).
- b) El valor de p_w calculado en la ecuación (18) es el valor anual requerido p .

Paso 5: Si se requiere predecir la distribución de los refuerzos 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 (25) 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 (7) o la (8), según el caso y empleando p en lugar de p_w .

2.3.5 Conversión del mes medio más desfavorable a periodos de tiempo más cortos más desfavorables

El porcentaje de tiempo p_w durante el que se rebasa una profundidad de desvanecimiento A en el mes más desfavorable medio puede convertirse en un porcentaje de tiempo p_{sw} de rebasamiento de la misma profundidad de desvanecimiento durante un periodo de tiempo más desfavorable que sea más corto, T , mediante las relaciones:

$$p_{sw} = p_w \cdot (89,34T^{-0,854} + 0,676) \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h para trayectos relativamente llanos} \quad (26)$$

$$p_{sw} = p_w \cdot (119T^{-0,78} + 0,295) \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h para trayectos costeros ondulados} \quad (27)$$

$$p_{sw} = p_w \cdot (199,85T^{-0,834} + 0,175) \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h para trayectos terrestres ondulados} \quad (28)$$

NOTA 1 – Las ecuaciones (26) a (28) se obtuvieron a partir de datos de 25 enlaces en regiones templadas en las que se estimó el valor de p_w a partir de datos de meses de verano.

2.3.6 Predicción de la interrupción no selectiva 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 la componente no selectiva de los desvanecimientos (véase el § 7) a partir de:

$$P_{ns} = p_w / 100 \quad (29)$$

donde p_w (%) es el porcentaje de tiempo en que el margen contra el desvanecimiento plano $A = F$ (dB) correspondiente a la proporción de bits erróneos (BER) especificada resulta excedido en el mes y medio más desfavorable (obtenido del § 2.3.1 ó 2.3.2, según el caso). El margen de protección contra el desvanecimiento plano, F , se obtiene del cálculo del enlace y de 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 – Por razones de conveniencia, la interrupción de la transmisión se define aquí como la probabilidad de que la BER sobrepase un determinado umbral cualquiera que sea éste (para mayor información, véase el § 7).

2.3.7 Ocurrencia de desvanecimientos simultáneos en enlaces con múltiples vanos

La evidencia experimental señala que, en condiciones de cielo despejado, casi no existe correlación entre los desvanecimientos profundos en vanos adyacentes en un enlace de múltiples vanos. Ello es aplicable en caso de desvanecimientos selectivos en frecuencia, de desvanecimientos planos o de una combinación de ambos.

Para un enlace de múltiples vanos, puede obtenerse el límite superior de la probabilidad total de interrupción en condiciones de cielo despejado, sumando las probabilidades de interrupción de cada vano. Puede estimarse un límite superior más preciso de la probabilidad de rebasar una profundidad de desvanecimiento A (dB) en un enlace de n vanos a partir de (véase la Nota 1):

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^{n-1} (P_i P_{i+1})^C \quad (30)$$

$$C = 0,5 + 0,0052A + 0,0025(d_A + d_B) \quad (31)$$

donde P_i es la probabilidad de interrupción predicha para el i -ésimo vano de un total de n y d_i la longitud del trayecto (km) del i -ésimo vano. La ecuación (31) debe utilizarse para $A \leq 40$ dB y $(d_i + d_{i+1}) \leq 120$ km. Por encima de estos límites, $C = 1$.

NOTA 1 – La ecuación (31) se obtuvo basándose en los resultados de las mediciones de 19 pares de vanos adyacentes con visibilidad directa funcionando en las bandas de 4 y 6 GHz, y longitudes de trayecto comprendidas entre 33 y 64 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 los desvanecimientos debidos a la propagación por trayectos múltiples, pueden sumarse los porcentajes excedidos para una profundidad de desvanecimiento determinada correspondientes a cada uno de estos mecanismos.

2.4.1 Estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo

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

Paso 1: Se obtiene la intensidad de precipitación $R_{0,01}$ superada 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 intensidad 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:

$$r = \frac{1}{1 + d / d_0} \quad (32)$$

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

$$d_0 = 35 e^{-0,015 R_{0,01}} \quad (33)$$

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:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = \gamma_R dr \quad \text{dB} \quad (34)$$

Paso 5: Para enlaces radioeléctricos situados a 30° o más (Norte o Sur) de latitud, las atenuaciones excedidas durante otros porcentajes de tiempo p en el margen de 0,001% a 1% pueden deducirse de la siguiente ley potencial:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log_{10} p)} \quad (35)$$

Esta fórmula se ha elaborado de manera que dé 0,12, 0,39, 1 y 2,14 para el 1%, 0,1%, 0,01% y 0,001%, respectivamente, y sólo se utilizará dentro de este margen.

Paso 6: Para enlaces radioeléctricos situados por debajo de 30° (Norte o Sur) de latitud, las atenuaciones excedidas durante otros porcentajes de tiempo p en el margen de 0,001% a 1% pueden deducirse de la siguiente ley potencial:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,07 p^{-(0,855 + 0,139 \log_{10} p)} \quad (36)$$

Esta fórmula se ha elaborado de manera que dé 0,07, 0,36, 1 y 1,44 para el 1%, 0,1%, 0,01% y 0,001%, respectivamente y sólo se utilizará dentro de este margen.

Paso 7: 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 anuales, serán superados para los correspondientes porcentajes de tiempo p_w de 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 Método combinado para lluvia y nieve húmeda

La atenuación, A_p , rebasada para el porcentaje de tiempo p dado en el punto anterior, es válida para trayectos de enlace a través de los cuales sólo se precipita lluvia líquida.

Para latitudes elevadas o altitudes de enlace altas, podrían rebasarse valores de atenuación mayores durante el porcentaje de tiempo p debido al efecto de las partículas de hielo derretido o nieve húmeda de la capa de fusión. La incidencia de este efecto se determina mediante la altura del enlace en relación con la de la lluvia, que varía con el emplazamiento geográfico. La variación de la altura de la lluvia de cero grados se tiene en cuenta en el método siguiente tomando 49 valores de altura relativos a la mediana de la altura de la lluvia, con la probabilidad asociada a cada uno que figura en el Cuadro 1.

El método siguiente no es necesario si se sabe que un enlace nunca se ve afectado por la capa de fusión. Si no se sabe, debe utilizarse el anterior cálculo para lluvia a fin de evaluar A_p , siguiéndose posteriormente los siguientes pasos:

Paso 1: Obtener el valor mediano de la altura de la lluvia, h_{lluvia} m por encima del nivel medio del mar (snmm) a partir de la Recomendación UIT-R P.839.

Paso 2: Calcular la altura de la lluvia del centro del trayecto del enlace, h_{enlace} , teniendo presente la curvatura media de la Tierra, mediante la ecuación:

$$h_{enlace} = 0,5(h_1 + h_2) - (D^2 / 17) \quad \text{m snmm} \quad (37)$$

donde:

- $h_{1,2}$: altura de los terminales del enlace (snmm)
- D : longitud del trayecto (km).

Paso 3: Puede efectuarse ahora una prueba para determinar si existe la posibilidad de atenuación adicional. Si $h_{enlace} \leq h_{lluvia} - 3\,600$, las condiciones de la capa de fusión no afectarán al enlace, tomado A_p como la atenuación rebasada durante el $p\%$ del tiempo, y pudiendo detener este método. De lo contrario, éste prosigue con los siguientes pasos:

Paso 4: Inicializar a cero un factor multiplicador, F .

Paso 5: Para valores sucesivos del índice $i = 0, 1, 2, \dots, 48$, con objeto de:

a) Calcular la altura de lluvia, h_{lluvia} , mediante:

$$h_{lluvia} = h_{lluvia\,m} - 2\,400 + 100i \quad \text{m snmm} \quad (38)$$

b) Calcular la altura del enlace relativa a la altura de lluvia mediante:

$$\Delta h = h_{enlace} - h_{lluvia} \quad \text{m} \quad (39)$$

c) Calcular la adición al factor multiplicativo para este valor del índice i :

$$\Delta F = \Gamma(\Delta h)P_i \quad (40)$$

donde:

$\Gamma(\Delta h)$: factor multiplicativo que tiene en cuenta las diferentes atenuaciones específicas de acuerdo con la altura relativa a la altura de lluvia, que se expresa:

$$\Gamma(\Delta h) = \begin{cases} 0 & 0 < \Delta h \\ \frac{4\left(1 - e^{\Delta h/70}\right)^2}{\left(1 + \left(1 - e^{-(\Delta h/600)^2}\right)^2 \left(4\left(1 - e^{\Delta h/70}\right)^2 - 1\right)\right)} & -1\,200 \leq \Delta h \leq 0 \\ 1 & 0 < \Delta h - 1\,200 \end{cases} \quad (41)$$

P_i : probabilidad de que el enlace esté en Δh , obtenido del Cuadro 1.

d) Añadir ΔF al valor actual de F . Esta operación puede representarse como un procedimiento mediante la expresión:

$$F = F + \Delta F \quad \text{dB} \quad (42)$$

Paso 6: Calcular la atenuación combinada debida a la lluvia y a la nieve húmeda mediante:

$$A_{rs} = A_p \cdot F \quad (43)$$

Dependiendo de la altura del enlace relativa a la mediana de la altura de lluvia, A_{rs} puede ser superior o inferior a A_p . Cerca de los polos de la Tierra es posible que el enlace esté siempre por encima de la altura de lluvia, caso en el que A_{rs} es cero.

CUADRO 1

Índice «i»		Probabilidad P_i
	o	
0	48	0,000555
1	47	0,000802
2	46	0,001139
3	45	0,001594
4	44	0,002196
5	43	0,002978
6	42	0,003976
7	41	0,005227
8	40	0,006764
9	39	0,008617
10	38	0,010808
11	37	0,013346
12	36	0,016225
13	35	0,019419
14	34	0,022881
15	33	0,026542
16	32	0,030312
17	31	0,034081
18	30	0,037724
19	29	0,041110
20	28	0,044104
21	27	0,046583
22	26	0,048439
23	25	0,049588
24		0,049977

2.4.3 Extrapolación a diferentes frecuencias de las estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo 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 de 7 a 50 GHz, para una misma longitud del vano y en la misma región climática:

$$A_2 = A_1 (\Phi_2 / \Phi_1)^{1 - H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)} \quad (44)$$

donde:

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2} \quad (45)$$

$$H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) = 1,12 \times 10^{-3} (\Phi_2 / \Phi_1)^{0,5} (\Phi_1 A_1)^{0,55} \quad (46)$$

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.

2.4.4 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 (V) u horizontal (H)) para un enlace dado, puede estimarse la atenuación para la otra polarización en el mismo enlace mediante las siguientes fórmulas:

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \quad \text{dB} \quad (47)$$

o

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \quad \text{dB} \quad (48)$$

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

2.4.5 Estadísticas sobre la duración de los sucesos y su número

Aunque se dispone todavía de poca información sobre la distribución global de la duración de los desvanecimientos, hay algunos datos, así como un modelo empírico, de estadísticas específicas tales como la duración media de un suceso de desvanecimiento y el número de esos sucesos. La diferencia observada entre los valores medios y medianos de la duración indica, sin embargo, una asimetría en la distribución global de la duración. Además, hay pruebas fehacientes de que la duración de los sucesos de desvanecimiento en condiciones de lluvia es mucho mayor que en condiciones de propagación por trayectos múltiples.

Un suceso de atenuación se define aquí como el exceso de atenuación, A , durante un cierto periodo de tiempo (por ejemplo, 10 s o bien un periodo de un tiempo superior). La relación entre el número de sucesos de atenuación, $N(A)$, la duración media, $D_m(A)$, de tales sucesos y el tiempo total, $T(A)$, durante el cual la persistencia del exceso de atenuación, A , es superior a una duración determinada, viene dada por:

$$N(A) = T(A) / D_m(A) \quad (49)$$

El tiempo total, $T(A)$, depende de la definición del suceso. En general, el suceso de interés para esta aplicación es el de atenuación A que dura 10 s o más. No obstante, sucesos de menor duración (por ejemplo, un intervalo de muestreo de 1 s utilizado en un experimento) también interesan para determinar el porcentaje del tiempo total de interrupción imputable a la indisponibilidad (es decir, el tiempo total de sucesos igual o superior a 10 s).

El número de sucesos de desvanecimiento en los que se sobrepasa el valor de la atenuación, A , durante 10 s o más puede representarse por:

$$N_{10\text{s}}(A) = a A^b \quad (50)$$

siendo a y b coeficientes que dependerán en principio de la frecuencia, la longitud del trayecto y otras variables, por ejemplo el clima.

Sobre la base de un conjunto de mediciones efectuadas en un trayecto de 15 km a 18 GHz en la península escandinava, los valores de a y b calculados para un periodo de un año son:

$$a = 5,7 \times 10^5 \quad b = -3,4 \quad (51)$$

Una vez que se ha obtenido $N_{10s}(A)$ por medio de la ecuación (50), la duración media de los sucesos de desvanecimiento de 10 s o más puede calcularse invirtiendo la ecuación (49).

Según el mencionado conjunto de mediciones (en un trayecto de 15 km a 18 GHz en la península escandinava), el 95% a 100% de todos los sucesos de lluvia cuya atenuación fue superior a unos 15 dB puede atribuirse a la indisponibilidad. Conocida esa proporción, la disponibilidad se obtiene multiplicándola por el porcentaje total de tiempo durante el que se sobrepasa un determinado valor de la atenuación, A , obtenido con el método del § 2.4.1.

2.4.6 Atenuación debida a la lluvia en redes de múltiples vanos

Hay varias configuraciones de múltiples vanos que interesan en las redes punto a punto en las que tiene relevancia la estructura no uniforme de los hidrómetros. Configuraciones de ese tipo son, por ejemplo, una serie de vanos en una red en tándem y más de una de esas series en una red con diversidad de encaminamientos.

2.4.6.1 Longitud de los vanos individuales en una red en tándem

Las características de transmisión globales de una red en tándem se ven muy afectadas por las características de propagación de vanos individuales. A veces es posible conseguir la misma conexión física global mediante combinaciones diferentes de longitudes de vano. Aumentando la longitud de vanos individuales, se aumenta inevitablemente la probabilidad de interrupción en éstos. Por otra parte, tal modificación puede hacer que se utilicen menos vanos, con lo que la calidad total de la red en tándem puede no degradarse.

2.4.6.2 Desvanecimientos correlacionados en vanos 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:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i \quad (52)$$

donde P_i es la probabilidad de desvanecimiento del 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 múltiples vanos también estará correlacionada, en cuyo caso la probabilidad de desvanecimiento combinado puede expresarse de la siguiente manera:

$$P_T = K \sum_{i=1}^n P_i \quad (53)$$

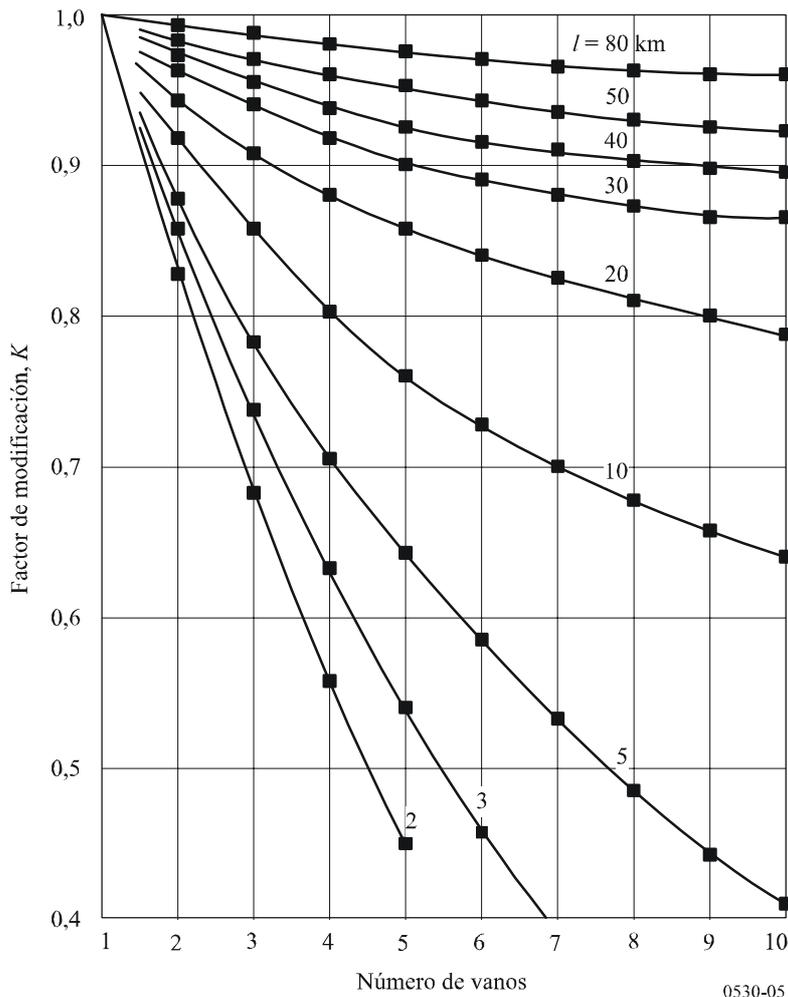
siendo K un factor de modificación que incluye el efecto total de la correlación correspondiente a la lluvia.

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 vanos cortos orientados Norte-Sur, o más o menos perpendiculares a la dirección dominante de las tormentas durante la estación de máxima pluviosidad.

En los enlaces paralelos a la dirección del movimiento de las tormentas, el efecto de la correlación en una serie de vanos, 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 vanos más cortos los efectos son más importantes: la probabilidad total de interrupción simultánea para 10 enlaces, de 20, 10 y 5 km, cada uno de ellos es, aproximadamente, el 80%, el 65% y el 40% de los valores esperados 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 los primeros vanos, y que luego disminuye al aumentar la longitud total de la cadena.

FIGURA 5

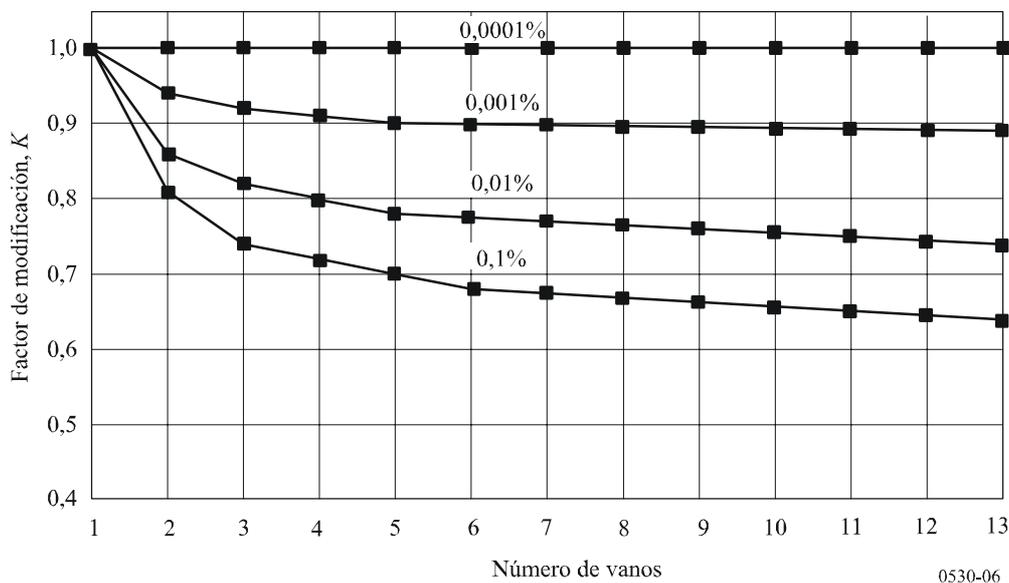
Factor de modificación de la atenuación total debida a la lluvia sobre una serie de vanos en tándem de igual longitud, l , para una probabilidad excedida de 0,03% en cada enlace



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, para varios niveles de probabilidad. En esta situación, los factores de modificación disminuyen más rápidamente en los primeros vanos (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 vanos 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

2.4.6.3 Redes con diversidad de encaminamientos

Aprovechando el hecho de que la estructura horizontal de la precipitación puede cambiar mucho en el espacio de una fracción de kilómetro, las redes con diversidad de encaminamientos pueden integrar dos o más vanos en tándem en dos o más encaminamientos diferentes. Aunque no se dispone de información sobre la mejora por diversidad para redes con diversidad total de encaminamientos, se poseen algunos datos sobre elementos de tales redes. Dichos elementos son dos trayectos que convergen en el nodo de la red, y trayectos más o menos paralelos separados horizontalmente.

2.4.6.3.1 Trayectos convergentes

En la Recomendación UIT-R P.1410 se puede encontrar información sobre el factor de mejora por diversidad para trayectos convergentes en la zona inferior de ondas milimétricas del espectro. Aunque ha sido elaborada para aplicaciones punto a zona, puede utilizarse como orientación general de la mejora que pueden aportar tales elementos de una red punto a punto con diversidad de encaminamientos (o malla), de los que habría dos.

Debido a la distribución aleatoria, tanto temporal como espacial, de la lluvia, los enlaces punto a punto convergentes experimentarán instantáneamente distintas profundidades de atenuación. Por consiguiente, puede haber una degradación de la relación S/I entre enlaces para usuarios en distintos sectores angulares cuando la señal deseada está atenuada por la lluvia en dicho trayecto y la señal interferente no lo está.

Puede estimarse la distribución acumulada del diferencial de atenuación debida a la lluvia para dos enlaces convergentes que funcionen con la misma frecuencia mediante a la ecuación (véase la Nota 1):

$$A_{12}(p) = [A_1(p) - 0,34 A_2(p)] \left(2,65 |\theta|^{0,23} + 0,004 |\Delta d|^{2,25} \right) f^{-0,4} \quad \text{dB} \quad (54)$$

donde p es el porcentaje de tiempo, comprendido entre 0,01% y 1%, f (GHz) es la frecuencia, Δd (km) la diferencia de longitud del trayecto y θ (rad) es el ángulo entre enlaces, que va de 0° a 180° . $A_1(p)$ y $A_2(p)$ son los valores de atenuación debida a la lluvia rebasados en cada enlace durante $p\%$ del tiempo, que se calculan utilizando el método del § 2.4.1.

NOTA 1 – La ecuación (54) se basa en los resultados de las mediciones de 36 pares de enlaces convergentes con frecuencias comprendidas en la gama de 15 a 38 GHz y longitudes de trayecto de entre 1 y 23 km.

2.4.6.3.2 Trayectos paralelos separados horizontalmente

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 los elementos de trayectos paralelos de las redes con diversidad de encaminamientos. La ganancia de diversidad (es decir, la diferencia entre la atenuación (dB) rebasada durante un 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 un determinado porcentaje de tiempo y una 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.

2.4.6.4 Trayectos con repetidores pasivos

2.4.6.4.1 Repetidores con reflector plano

Para trayectos con dos o más tramos (N en total) en los que se utilizan reflectores pasivos planos, y cuyos tramos distan apenas unos grados de ser paralelos (véase la Nota 1), ha de calcularse la atenuación debida a la lluvia de todo el trayecto sustituyendo la longitud del trayecto.

$$d = d_{leg1} + d_{leg2} + \dots + d_{legN} \quad \text{km} \quad (55)$$

en el método del § 2.4.1, incluyendo en el cálculo el factor de reducción de distancia de la ecuación (32).

NOTA 1 – No pueden formularse en este momento directrices estrictas sobre la distancia que separa los tramos paralelos. Si los tramos no son paralelos, la ecuación (55) dará como resultado un factor de reducción r para la ecuación (32), inferior a lo que debería ser, subestimando así la atenuación total real. Para solucionar este problema podría emplearse tanto la ecuación (55) como la longitud del trayecto obtenida uniendo los extremos del primer y el último tramo en el cálculo del factor de reducción, y calculando la media de los resultados.

Otra posibilidad es considerar los tramos como trayectos independientes y aplicar la información del § 2.4.6.

2.4.6.4.2 Antenas repetidoras adosadas

Si dos o más tramos de un trayecto utilizan la misma polarización, ha de calcularse la estadística de atenuación utilizando el método del § 2.4.6.4.1 para los reflectores planos.

Si los tramos del trayecto utilizan distintas polarizaciones, habrá de aplicarse el método del § 2.4.1 junto con la ecuación (55) tanto para la polarización horizontal como para la vertical, a fin de obtener los porcentajes de tiempo, p_H y p_V , durante los cuales se ha rebasado la atenuación deseada (véase la Nota 1) en la polarización horizontal y vertical, respectivamente. Se utilizará la ecuación (55) para calcular la longitud total del trayecto, d_H , en los tramos que utilizan polarización horizontal, y asimismo para calcular la longitud total del trayecto, d_V , en los tramos que utilizan polarización vertical. Se calculará a continuación el porcentaje de tiempo p durante el cual se ha rebasado dicha atenuación en todo el trayecto, mediante la fórmula (véase la Nota 2):

$$p = \frac{p_H d_H + p_V d_V}{d_H + d_V} \quad \% \quad (56)$$

NOTA 1 – Dado que el método del § 2.4.1 proporciona la atenuación rebasada durante un determinado porcentaje de tiempo, habrán de invertirse los términos para obtener el porcentaje de tiempo durante el cual se ha sobrepasado una atenuación dada.

NOTA 2 – Si los tramos del trayecto se desvían notablemente del plano paralelo, es probable que se utilice un enfoque similar al sugerido en la Nota 1 del § 2.4.6.4.1 para mejorar la exactitud. En este caso, habrá de emplearse dicho método con el fin de calcular la atenuación para cada polarización separadamente.

2.4.7 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 contra desvanecimiento plano, F (dB), (véase el § 2.3.5) para la BER especificada, a partir de:

$$P_{lluvia} = p / 100 \quad (57)$$

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 (35) 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 (XPD)

La 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 XPD 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:

$$XPD_0 = \begin{cases} XPD_g + 5 & \text{para } XPD_g \leq 35 \\ 40 & \text{para } XPD_g > 35 \end{cases} \quad (58)$$

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:

$$\eta = 1 - e^{-0,2(P_0)^{0,75}} \quad (59)$$

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 (7) o la (8), según el caso.

Paso 3: Determínese:

$$Q = -10 \log \left(\frac{k_{XP} \eta}{P_0} \right) \quad (60)$$

donde:

$$k_{XP} = \begin{cases} 0,7 & \text{para una antena transmisora} \\ 1 - 0,3 \exp \left[-4 \times 10^{-6} \left(\frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] & \text{para dos antenas transmisoras} \end{cases} \quad (61)$$

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:

$$C = XPD_0 + Q \quad (62)$$

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

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XP}}{10}} \quad (63)$$

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

$$M_{XPD} = \begin{cases} C - \frac{C_0}{I} & \text{sin XPIC} \\ C - \frac{C_0}{I} + XPIF & \text{con XPIC} \end{cases} \quad (64)$$

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 mejora 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 XPD 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 de la componente copolar (CPA) debida a la lluvia, (véase el § 2.4) utilizando la relación de equiprobabilidad:

$$XPD = U - V(f) \log CPA \quad \text{dB} \quad (65)$$

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:

$$U = U_0 + 30 \log f \quad (66)$$

$$V(f) = 12,8 f^{0,19} \quad \text{para } 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \quad (67)$$

$$V(f) = 22,6 \quad \text{para } 20 < f \leq 35 \text{ GHz}$$

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 (65).

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

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log (f_2 / f_1) \quad \text{para } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \quad (68)$$

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 (68) 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 (34).

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

$$A_p = 10^{((U - C_0/I + XPIF)/V)} \quad (69)$$

donde U se obtiene a partir de la ecuación (66) y V de la ecuación (67), 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:

$$m = \begin{cases} 23,26 \log \left[A_p / 0,12 A_{0,01} \right] & \text{si } m \leq 40 \\ 40 & \text{para otros valores} \end{cases} \quad (70)$$

y

$$n = \left(-12,7 + \sqrt{161,23 - 4m} \right) / 2 \quad (71)$$

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:

$$P_{XPR} = 10^{(n-2)} \quad (72)$$

5 Distorsión debida a los efectos de la propagación

La distorsión en los enlaces con visibilidad directa en las bandas de ondas decimétricas y centimétricas está causada principalmente por el hecho de que tanto la amplitud como el retardo de grupo, en condiciones de propagación por trayectos múltiples y cielo despejado, dependen de la frecuencia. En los sistemas analógicos un aumento del margen contra desvanecimientos 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 contra desvanecimientos mayor no será un factor de ayuda, si es el desvanecimiento selectivo en 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 réplica de ésta de aproximadamente la misma

amplitud, pero retardada apreciablemente, llegan al receptor, se producirá una interferencia entre símbolos que puede redundar en un error al 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 las distribuciones de amplitud, junto con un modelo adecuado de los elementos del equipo, tales como moduladores, ecualizador, dispositivos de corrección de errores en recepción sin canal de retorno (FEC), etc. Aunque existen muchos métodos, éstos pueden agruparse en tres categorías generales basadas en la utilización de una signatura del sistema; en la distorsión lineal de amplitud (LAD, *linear amplitude distortion*) o en el margen neto contra desvanecimientos. Cuando se emplea la signatura 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. En el caso de usar la 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, si el método se basa en margen neto contra desvanecimientos se emplean distribuciones estadísticas estimadas de las amplitudes de los rayos, así como información sobre el equipo, como se hace en el caso de utilizar la LAD. En el § 5.1 el método recomendado para predecir la característica de error es un método basado en la signatura 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 define aquí como la probabilidad de que la BER sobrepase un determinado valor umbral.

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

$$\tau_m = 0,7 \left(\frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad \text{ns} \quad (73)$$

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:

$$P_s = 2,15\eta \left(W_M \times 10^{-B_M/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \times 10^{-B_{NM}/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,NM}|} \right) \quad (74)$$

donde:

W_x : anchura de la signatura (GHz)

B_x : profundidad de la signatura (dB)

$\tau_{r,x}$: retardo de referencia (ns) utilizado para obtener la signatura, mientras que x indica ya sea el desvanecimiento de fase mínima (M) o el de fase no mínima (NM).

Si únicamente se dispone del parámetro de sistema K_n normalizado, puede calcularse la probabilidad de interrupción selectiva de la ecuación (71) de la siguiente manera:

$$P_s = 2,15\eta (K_{n,M} + K_{n,NM}) \frac{\tau_m^2}{T^2} \quad (75)$$

donde:

- T : periodo de símbolos del sistema (ns)
 $K_{n,x}$: parámetro del sistema normalizado, siendo x el desvanecimiento de fase mínima (M) o el de fase no mínima (NM).

Las definiciones de los parámetros de la signatura y la forma de obtener la signatura se consignan en la Recomendación UIT-R F.1093.

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

En el diseño del enlace se deben tener en cuenta los efectos de los desvanecimientos relativamente lentos no selectivos en frecuencia (es decir, el desvanecimiento plano) debidos a la dispersión del haz, así como los desvanecimientos más rápidos selectivos en frecuencia causados por la propagación en trayectos múltiples. Hay una serie de técnicas disponibles para reducir esos efectos, la mayoría de las cuales reducen ambos al mismo tiempo. Las mismas técnicas también mitigan ocasionalmente las reducciones en la XPD. Éstas se pueden dividir en técnicas que no requieren ninguna clase de recepción o transmisión en diversidad, y técnicas que requieren diversidad.

Teniendo en cuenta que por razones económicas es conveniente, en la medida de lo posible, evitar la utilización de diversidad, se tratarán en primer lugar las estrategias y técnicas que no requieren la utilización de diversidad (véase el § 6.1). No obstante, estas estrategias y técnicas son también pertinentes para sistemas en diversidad, y se deben emplear cuando sea conveniente aun cuando puedan ser menos necesarias. Las técnicas de diversidad se tratan en el § 6.2.

6.1 Técnicas que no emplean diversidad

Para reducir los efectos del desvanecimiento por propagación en trayectos múltiples sin diversidad hay varias técnicas que pueden emplearse tanto si el enlace se efectúa entre torres ya existentes o entre torres nuevas que se van a construir. Es útil tener en cuenta que estas técnicas consiguen llevar varias de las estrategias siguientes:

- Estrategia A:* reducir la aparición del «desvanecimiento plano» debido a los mecanismos de la atmósfera (dispersión del haz, desacoplamiento de la antena y propagación por trayectos múltiples en la atmósfera; véase el § 2.3).
Estrategia B: reducir la aparición de reflexiones significativas en superficies.
Estrategia C: reducir el retardo relativo de las reflexiones en la superficie con respecto a la onda atmosférica.

6.1.1 Aumento de la inclinación del trayecto

Los enlaces estarán situados de forma que se aprovechen las ventajas del terreno para aumentar la inclinación del trayecto (denominada a veces técnica de «alto-bajo»), pues tiende a satisfacer la estrategia A y, en cierta medida, también la estrategia B. Este método se debe aplicar conjuntamente con medidas más específicas de apantallamiento del terreno para reducir los niveles de reflexiones en superficies (véase la estrategia B y el § 6.1.2), pues ambos están estrechamente vinculados.

Cuando las torres están ya instaladas, se podría reducir la altura de la antena en un extremo del trayecto para obtener este efecto, siempre que se satisfagan las reglas de despejamiento que figuran en el § 2.2.2.

6.1.2 Reducción del efecto de las reflexiones en superficies

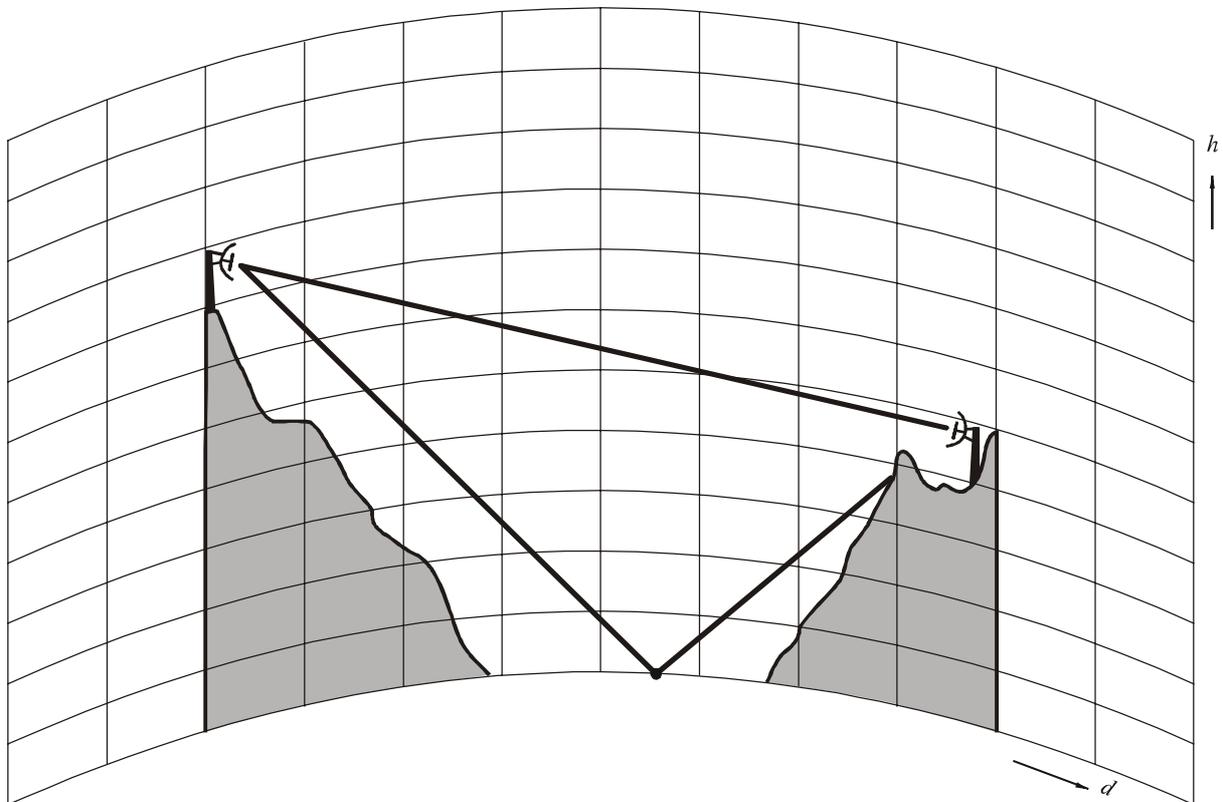
Los enlaces se deben ubicar, en la medida de lo posible, de forma tal de reducir la aparición de reflexiones especulares y difusas significativas en superficies (o al menos transformar grandes reflexiones especulares en pequeñas reflexiones difusas), reduciendo así la aparición de desvanecimiento y distorsión por trayectos múltiples por superficies (véase la estrategia B). Existen diversas técnicas para llevar esto a cabo, la mayor parte de las cuales están relacionadas entre sí. Por tanto, no debe efectuarse la aplicación de una de ellas sin tener en consideración las otras. Las técnicas son las siguientes:

6.1.2.1 Apantallamiento del punto de reflexión

Una técnica consiste en aprovechar las colinas, montañas o edificios que se encuentran en el trayecto para apantallar las antenas contra las superficies más reflectivas en el trayecto (por ejemplo, masas de agua, superficie planas, cumbres de colinas llanas no cubiertas de árboles, parte superior de un edificio; véase la Fig. 7). De manera ideal, las colinas o montañas deben estar cubiertas de vegetación para reducir en mayor grado el nivel del campo difractado sobre ellas. Por supuesto, el apantallamiento de las superficies reflectivas es más sencillo para despejamientos reducidos (véase el § 6.1.3).

FIGURA 7

Ejemplo de apantallamiento de antena contra la reflexión especular



Se deben efectuar análisis de trayectorias de rayos para una gama de factores k efectivos que varían de k_e (99,9%) (o algún otro valor mínimo) a «infinito» (véase el § 2.2.2) para encontrar un obstáculo de apantallamiento apropiado. Se debe asegurar que la reflexión en la superficie esté bloqueada, o al menos parcialmente apantallada, para valores grandes de factor k efectivo, así como para el valor medio. Es evidente que la ventaja que se obtiene por apantallamiento debido a un obstáculo se pierde en cierta medida si una o más ondas reflejadas por superficies son superrefractadas sobre los obstáculos, pues el desvanecimiento y la distorsión por trayectos múltiples por superficies son más probables en esas condiciones. Asimismo, debe asegurarse que la onda directa no está difractada más de lo aceptable dentro de los criterios de despejamiento del trayecto para los valores bajos del factor k efectivo que se dan en condiciones de subrefractividad.

6.1.2.2 Traslado del punto de reflexión a una superficie menos reflectora

Otra técnica consiste en ajustar la altura de la antena en uno o ambos extremos del trayecto para ubicar las reflexiones sobre una superficie con vegetación o un terreno más accidentado. En trayectos sobre masas de agua, por ejemplo se podría ajustar la inclinación del trayecto para ubicar la reflexión de la superficie sobre un área de tierra en lugar de agua, o, aún mejor, sobre una superficie de tierra cubierta por árboles u otra vegetación. El punto de reflexión se desplaza hacia la antena cuya altura se disminuye y se aleja de la antena cuya altura se aumenta.

El método para determinar la ubicación de posibles zonas de reflexión se indica en el § 6.1.2.3 (Pasos 1 a 3). En trayectos suficientemente cortos, se debe emplear el método completo para determinar las alturas de una o ambas antenas para así evitar la interferencia destructiva por reflexiones especulares sobre superficies.

En el § 6.1.2.4 se presentan métodos para calcular o medir la intensidad de reflexión especular sobre una superficie.

6.1.2.3 Determinación óptima de las alturas de las antenas

En trayectos suficientemente cortos se puede ajustar a veces la altura de una o ambas antenas de modo tal que ninguna onda reflejada por una superficie interfiera a la señal de rayo directo dentro del margen significativo de valores k efectivos. Como se indicó en el § 6.1.2.2, el ajuste de las alturas de las antenas también se puede utilizar para ubicar las reflexiones sobre una superficie menos reflectante. El procedimiento por pasos para la aplicación de ambas técnicas y para determinar si es necesario emplear diversidad, es el siguiente:

Paso 1: Calcular las alturas posibles de las antenas transmisora y receptora utilizando la regla de despejamiento para sistemas sin diversidad conforme al § 2.2.2.1.

Paso 2: Calcular las alturas de las antenas transmisora y receptora superior por encima de posibles zonas de reflexión especular sobre el perfil del trayecto o cercano al mismo. Zonas tales como masas de agua, planicies, la cumbre lisa de una colina no cubierta de árboles, o la parte superior de edificios, pueden producir reflexiones especulares importantes. Por supuesto, estas áreas pueden ser horizontales o no y puede haber más de una de ellas (véase la Nota 1). Si bien algunas zonas se pueden determinar por medio de mapas, otras pueden requerir una inspección detallada del terreno a lo largo del trayecto y en sus cercanías.

Las alturas h_1 y h_2 de las antenas por encima de una zona de reflexión y con un ángulo de inclinación v (véase la Nota 1) son las siguientes (véase la Fig. 8):

$$h_1 = h_{1G} + y_1 - y_0 + x_0 \times 10^3 \times \operatorname{tg} v \quad \text{m} \quad (76)$$

$$h_2 = h_{2G} + y_2 - y_0 - (d - x_0) \times 10^3 \times \operatorname{tg} v \quad \text{m} \quad (77)$$

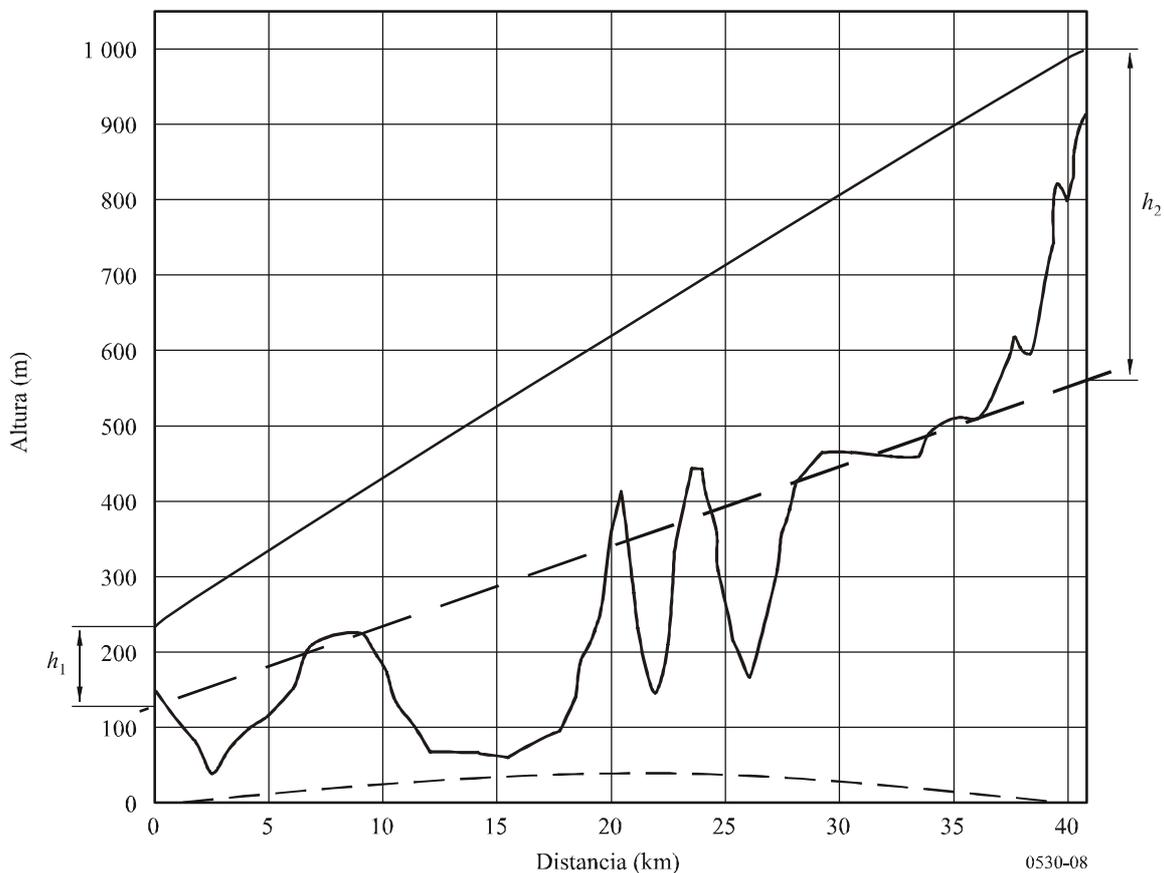
donde:

- y_1, y_2 : altitudes del terreno sobre el nivel del mar en los emplazamientos 1 y 2, respectivamente (m)
- h_{1G}, h_{2G} : alturas de las antenas sobre el terreno en los emplazamientos 1 y 2, respectivamente (m)
- y_0 : altitud del punto medio de la zona de reflexión sobre el nivel del mar (m)
- x_0 : distancia del punto medio de la zona de reflexión desde el emplazamiento 1 (km).

Si la zona de reflexión está situada sobre el mar, es necesario tener en cuenta las variaciones de las mareas.

FIGURA 8

Trayecto con terreno reflectivo



Paso 3: Para una gama de factores k efectivos que varían desde k_e (99,9%) a infinito (véase el § 2.2.2; en la práctica, se puede escoger un valor grande de k tal como $k = 1,0 \times 10^9$), calcúlense las distancias d_1 y d_2 a cada superficie de reflexión posible desde los emplazamientos 1 y 2, respectivamente, mediante las expresiones siguientes (véase la Nota 2):

$$d_1 = d(1 + b)/2 \quad \text{km} \quad (78)$$

$$d_2 = d(1 - b)/2 \quad \text{km} \quad (79)$$

donde:

$$b = 2 \sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right] \quad (80)$$

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \times 10^3 \quad (81)$$

$$c = (h_1 - h_2) / (h_1 + h_2) \quad (82)$$

con $a_e = ka$ de radio efectivo de la Tierra para un factor k dado (siendo $a = 6375$ km el radio real de la Tierra); en la ecuación (81), d está indicada en kilómetros y h_1 y h_2 en metros.

Si las zonas de reflexión especular se pueden evitar ajustando las alturas de una o de ambas antenas en cantidades razonables, mientras se satisfacen las reglas de despejamiento (Paso 1), estímesese la variación e iníciense nuevamente el Paso 2.

Paso 4: Para superficies que originan reflexiones especulares que no se pueden evitar, calcúlese la diferencia de longitud del trayecto entre las ondas (o rayos) directas y reflejadas en longitudes de onda para la misma gama de valores k efectivos mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{2f}{0,3d} \left[h_1 - \frac{d_1^2}{12,74k} \right] \left[h_2 - \frac{d_2^2}{12,74k} \right] \times 10^{-3} \quad (83)$$

Cada vez que el número de longitudes de onda τ es un valor entero positivo mientras k varía (es decir, 1, 2, etc.), el nivel de señal recibido pasa a través de un mínimo. Esta condición se debe evitar en la medida de lo posible. Cuanto mayor es el número de valores enteros de $\tau_{máx} - \tau_{mín}$ medida que k varía en toda su gama, es más probable que la calidad de funcionamiento se vea comprometida y que sea necesario algún tipo de diversidad.

Si $\tau_{máx} - \tau_{mín} < 1$ mientras k varía en el margen adecuado, es casi seguro que la diversidad se puede evitar. Sin embargo, en trayectos mayores de 7,5 km de longitud, la mejor manera de asegurarse de que la protección por diversidad no es necesaria es aplicar el procedimiento para calcular la aparición de trayectos múltiples del § 2.3, y el procedimiento de predicción de interrupción del servicio para sistemas digitales no protegidos del § 5.1. En cualquier caso, las alturas de una o ambas antenas se deben ajustar de modo tal que $\tau \approx 0,5$ en el valor mediano de k .

Si $\tau_{máx} - \tau_{mín} \geq 1$, la profundidad de desvanecimientos por trayectos múltiples por superficies y la posibilidad de que sea necesario algún tipo de diversidad depende de cómo se refleja la señal (véanse los § 6.1.2.2 y 6.1.2.3) y de si una o ambas antenas discriminan las reflexiones en superficies (véase el § 6.1.2.5). Sin embargo, se debe recordar que, en trayectos suficientemente largos, las capas anormales con gradientes del coíndice de refracción sumamente negativos pueden hacer que la señal directa se desvanezca como resultado de una dispersión del haz y que las ondas reflejadas en superficies pueden aumentar su intensidad simultáneamente como resultado de la energía de la onda directa dispersada hacia la superficie reflectante. La mejor manera de determinar si es necesario algún tipo de protección por diversidad es aplicar el procedimiento para determinar la ocurrencia de trayectos múltiples indicado en el § 2.3, y el procedimiento de predicción de interrupción del servicio para sistemas digitales no protegidos como se indica en el § 5.1.

NOTA 1 – Teniendo en cuenta que el perfil del trayecto se basa en alturas de muestras cada cierta distancia, la pendiente del terreno real variará ligeramente entre los puntos de muestreo en el perfil. Se sugiere que se permita una pequeña variación en el ángulo de inclinación v alrededor del valor estimado a partir del perfil digital (por ejemplo, valores correspondientes a variaciones en las alturas del perfil, en un extremo del

segmento de perfil en cuestión, de ± 10 m). Si fuera necesario, se puede llevar a cabo una inspección visual del trayecto entre los puntos del terreno correspondientes a los puntos de muestro.

En algunos casos en que el perfil de trayecto es algo accidentado y su tratamiento en segmentos de trayecto individuales no parece apropiado, se debe ajustar el perfil de trayecto mediante una curva de regresión como se explica en el § 6.1.2.4.1 y considerarse que la reflexión se produce sobre esta curva a fin de calcular las alturas y las distancias al punto de reflexión. En este caso, es necesario considerar en combinación los pasos de este subpunto y el § 6.1.2.4.1.

NOTA 2 – Para algunos diseños, puede ser conveniente utilizar un valor k efectivo mínimo menor que k_e (99,9%).

6.1.2.4 Elección de la polarización vertical

En trayectos sobre agua en frecuencias por encima de unos 3 GHz, es conveniente elegir polarización vertical en lugar de polarización horizontal. En ángulos rasantes mayores de unos $0,7^\circ$, se prevé una reducción en la reflexión en la superficie de 2 a 17 dB mayor que con polarización horizontal.

Una estimación más exacta del coeficiente de reflexión efectivo de la zona de superficie afectada por una reflexión especular se puede obtener por cálculo o por medición, de la siguiente manera:

6.1.2.4.1 Cálculo del coeficiente de reflexión efectivo de una superficie

El coeficiente de reflexión efectivo de una superficie se puede calcular mediante el siguiente procedimiento por pasos (véase la Nota 1):

Paso 1: Calcúlese la constante dieléctrica compleja de la superficie de la Tierra en las proximidades de zonas de reflexión de superficie, mediante la siguiente expresión:

$$\eta = \epsilon_r - j18\sigma/f \quad (84)$$

donde ϵ_r es la constante dieléctrica relativa y σ es la conductividad (S/m). Estímese ϵ_r y σ , conforme a la información que figura en la Recomendación UIT-R P.527.

Paso 2: Calcúlese el ángulo rasante para la gama de valores k efectivo obtenido en el Paso 3 del § 6.1.2.3 mediante:

$$\varphi = \frac{h_1 + h_2}{d} \left[1 - m(1 + b^2) \right] \quad (85)$$

Paso 3: Calcúlese el coeficiente de reflexión de la superficie y la misma gama de valores k por medio de:

$$\rho = \left| \frac{\text{sen } \varphi - \sqrt{C}}{\text{sen } \varphi + \sqrt{C}} \right| \quad (86)$$

donde:

$$C = \eta - \cos^2 \varphi \quad \text{polarización horizontal} \quad (87)$$

$$C = \frac{\eta - \cos^2 \varphi}{\eta^2} \quad \text{polarización vertical} \quad (88)$$

Paso 4: Calcúlese el factor de divergencia de la superficie de la Tierra mediante:

$$D = \sqrt{\frac{1 - m(1 + b^2)}{1 + m(1 - 3b^2)}} \quad (89)$$

Paso 5: Calcúlese la longitud, L_1 , de la elipse de la primera zona de Fresnel sobre la superficie de la Tierra a lo largo del trayecto mediante la siguiente expresión:

$$L_1 = d \sqrt{1 + \frac{4fh_1h_2 \times 10^{-2}}{3d}} \left[1 + \frac{f(h_1 + h_2)^2 \times 10^{-2}}{3d} \right]^{-1} \quad \text{km} \quad (90)$$

y la anchura, W_1 , en el sentido transversal mediante:

$$W_1 = \sqrt{\frac{3 \times 10^{-4} d}{f}} \quad \text{km} \quad (91)$$

donde h_1 y h_2 están dadas en metros y d en kilómetros. Se supone que la elipse de la primera zona de Fresnel está centrada en el punto geométrico de reflexión de una reflexión obvia en una superficie (véase la Nota 2).

Paso 6: Si claramente sólo hay una porción (o porciones) de la elipse de la primera zona de Fresnel que determine reflexión especular, estímese la longitud Δx (km) de esta porción. Estímese luego el factor de reflexión especular con la siguiente expresión (véase la Nota 2).

$$R_s = \sqrt{\frac{f(h_1 + h_2)^4 (\Delta x)^2 \times 10^{-2}}{3h_1h_2d^3}} \quad (92)$$

donde nuevamente h_1 y h_2 están dadas en metros y d en kilómetros. De otro modo, se supondrá que $R_s = 1$.

Paso 7: Si la superficie dentro de la elipse de la primera zona de Fresnel es algo accidentada, estímese el factor de rugosidad de la superficie mediante:

$$R_r = \sqrt{\frac{1 + (g^2/2)}{1 + 2,35(g^2/2) + 2\pi(g^2/2)^2}} \quad (93)$$

donde:

$$g = \frac{40\pi f \sigma_h \text{sen}\varphi}{3} \quad (94)$$

siendo σ_h (m) la desviación típica de la altura de la superficie alrededor de la curva de regresión a lo largo de esa porción del perfil de trayecto dentro de la elipse de la primera zona de Fresnel (véase la Nota 3). De otro modo, se supondrá que $R_r = 1$.

Paso 8: Calcúlese el coeficiente de reflexión efectivo para la gama de valores k efectivos pertinentes mediante:

$$\rho_{eff} = \rho D R_s R_r \quad (95)$$

El nivel de la señal o señales reflejadas relativas a la señal directa se puede estimar entonces mediante la técnica que figura en el § 6.1.2.5.

NOTA 1 – Se reconoce que será difícil en muchos trayectos sobre tierra (en particular a frecuencias elevadas) obtener una estimación precisa del coeficiente efectivo de reflexión de una superficie debido a diversas incertidumbres tales como la conductividad del suelo, la rugosidad de la superficie, etc., y el grado de subjetividad normalmente necesario para realizar un cálculo. El procedimiento de cálculo puede constituir sólo una guía aproximada en estas situaciones para ayudar a identificar problemas de trayecto o para elegir entre un trayecto u otro, en el caso de que exista esta posibilidad. Cuando la superficie de reflexión esté en el suelo, puede ser conveniente suponer una tierra húmeda en zonas en las que esta condición prevalece durante las mismas horas y meses en los que los desvanecimientos son frecuentes.

NOTA 2 – La ecuación (92) es más exacta si ninguno de los bordes de la zona de reflexión especular está lejos del punto de reflexión especular. En algunos casos es mejor dividir el área de la primera zona de Fresnel en una porción muy accidentada que evidentemente no es reflectora (debido al ángulo por inclinación pronunciada del terreno afectado o a causa del apantallamiento que origina el terreno), y otra porción menos rugosa que es parcialmente reflectora, pero para la cual el cálculo del factor de rugosidad de superficie se efectúa conforme al Paso 7.

A título de orientación, si el área de reflexión de la superficie de la Tierra cubre exactamente el área de la primera zona de Fresnel a lo largo del trayecto, la amplitud de la señal reflejada es 2,6 dB mayor que la de la señal directa (sin tener en cuenta el efecto del factor de divergencia, D , y la discriminación de antena tratada en el § 6.1.2.5). Este valor sería de 6 dB si el área de reflexión cubriera exactamente la primera zona de Fresnel no sólo en forma longitudinal sino también en forma lateral. Por otra parte, si el área de reflexión no contiene el punto de reflexión geométrico, la amplitud relativa de la señal reflejada no será mayor que -3,4 dB. Si el área de reflexión está completamente fuera de la primera zona de Fresnel, la amplitud relativa de la señal reflejada será menor que -11,5 dB.

NOTA 3 – Si el perfil de trayecto es suficientemente accidentado, convendría ajustar el perfil de trayecto mediante una curva de regresión en una longitud correspondiente a la longitud de la primera zona de Fresnel propiamente dicha, que sirva de base para determinar la ubicación del punto de reflexión y para el cálculo subsiguiente de la desviación típica de las alturas de perfil σ_h (m) respecto a esta curva. Dado que la ubicación inicial de la primera zona de Fresnel es desconocida éste puede ser un proceso iterativo. Si la elipse de la primera zona de Fresnel se encuentra sobre una masa de agua, se supondrá una superficie lisa.

6.1.2.4.2 Medición del coeficiente de reflexión efectivo de superficie

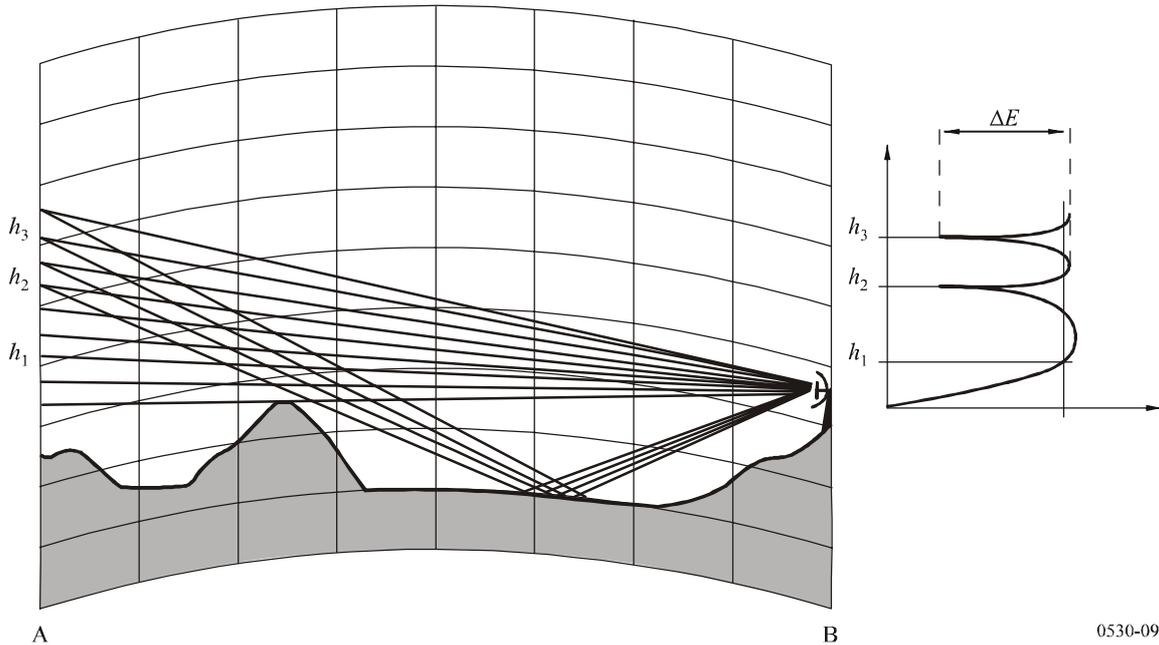
El coeficiente de reflexión efectivo de la superficie reflectora se puede medir en condiciones normales de propagación (véase el § 8 para determinar la mejor hora del día; véase también la Nota 1) mediante un diagrama del nivel de la señal recibida que refleje la ganancia en función de la altura mientras se ajusta la altura de la antena transmisora o receptora en un margen suficiente de valores de las alturas, de forma que se observen los valores máximos y mínimos del coeficiente de reflexión en el diagrama. Si ΔE (dB) es la diferencia entre los niveles máximo y mínimo (véase la Fig. 9), el coeficiente de reflexión efectivo viene dado por la siguiente expresión:

$$\rho_{eff} = \frac{10^{\Delta E/10} + 1 - 2 \times 10^{\Delta E/20}}{10^{\Delta E/10} - 1} \quad (96)$$

NOTA 1 – La superficie de tierra puede ser más seca durante la parte del día en que se esperan condiciones normales de propagación que durante la parte del día en que se esperan condiciones de trayectos múltiples. En tales situaciones es conveniente introducir una corrección basada en las ecuaciones que figuran en el § 6.1.2.4.1 y las diferencias conocidas de conductividad del suelo en condiciones húmedas y secas. El procedimiento incluido en los § 6.1.2.4.1 y § 6.1.2.4.2 tiene la intención de servir únicamente de orientación.

FIGURA 9

Medición de ΔE (dB) del diagrama de ganancia en función de la altura



0530-09

6.1.2.5 Empleo de discriminación de antena

En trayectos suficientemente inclinados o trayectos con despejamientos naturalmente amplios, los ángulos entre la señal o señales reflejadas por superficies se tornan lo suficientemente grandes como para aprovechar el diagrama de radiación de una o ambas antenas en la discriminación de la señal o señales reflejadas. Aun sin esta ventaja natural puede ser conveniente inclinar una o ambas antenas ligeramente hacia arriba para incrementar la discriminación a considerar. El procedimiento por pasos es el siguiente:

Paso 1: Calcúlense los ángulos entre la señal o señales directa y reflejada por superficies en los emplazamientos 1 y 2 para la gama de valores k efectivos pertinentes que se obtuvo en el Paso 3 del § 6.1.2.4 mediante la siguiente expresión:

$$\alpha_1 = \frac{180}{\pi} \left[\frac{h_1}{d_1} - \frac{h_1 - h_2}{d} - \frac{d_2}{12,74k} \right] \times 10^{-3} \quad \text{grados} \quad (97)$$

$$\alpha_2 = \frac{180}{\pi} \left[\frac{h_2}{d_2} - \frac{h_2 - h_1}{d} - \frac{d_1}{12,74k} \right] \times 10^{-3} \quad \text{grados} \quad (98)$$

Paso 2: Estímese la pérdida en el nivel de la señal o señales reflejadas por superficies, con relación a la señal directa, introducida por discriminación de las antenas, mediante la ecuación siguiente (véase la Nota 1):

$$L_a = 12 \left[\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{dB} \quad (99)$$

donde α_{a1} y α_{a2} son las anchuras de haz de potencia mitad de las antenas.

Si la señal o señales reflejadas por superficies salen y entran dentro de la anchura de haz de potencia mitad de una o ambas antenas, las antenas pertinentes deben estar normalmente inclinadas hacia arriba alrededor de media anchura de haz de modo tal que se introduzca una discriminación de antena adicional (véase la Nota 2). Aun si los ángulos de llegada de la onda reflejada por superficies se encuentran ligeramente fuera de la anchura de haz de potencia mitad de las antenas, una pequeña inclinación hacia arriba podría ser ventajosa (véase la Nota 2). Se puede entonces estimar la pérdida total debido a la discriminación de las antenas mediante la siguiente expresión (véase la Nota 1):

$$L_a = 12 \left[\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_{t1}}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_2 + \alpha_{t2}}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{dB} \quad (100)$$

donde α_{t1} y α_{t2} son los ángulos de inclinación de las antenas hacia arriba.

Paso 3: En algunos trayectos puede ser útil estimar o medir el coeficiente de reflexión efectivo de superficie de modo que se obtenga una estimación total del nivel de reflexión o reflexiones en superficies en condiciones normales de propagación. Esto se puede efectuar utilizando las indicaciones que figuran en el § 6.1.2.4. La pérdida total en el nivel de la señal o señales reflejadas por superficies se calcula mediante:

$$L_s = L_a - 20 \log \rho_{eff} \quad \text{dB} \quad (101)$$

donde L_a se obtiene de la ecuación (99) o de la (100), según corresponda. No obstante, como el coeficiente de reflexión efectivo de superficie puede aumentar en condiciones de trayectos múltiples por superficies, no es crítico estimar su valor exacto, ni siquiera evaluarlo, a fin de calcular los ángulos de inclinación hacia arriba apropiados para las antenas (véase el Paso 5).

Paso 4: Si una o ambas antenas están inclinadas hacia arriba, la pérdida de nivel correspondiente de la señal directa en condiciones normales de propagación ($k = 4/3$) viene dada por (véase la Nota 1):

$$L_d(k = 4/3) = 12 \left[\left(\frac{\alpha_{t1}}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_{t2}}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{dB} \quad (102)$$

En condiciones de superrefracción o subrefracción, $L_d(k)$ se puede estimar con la siguiente expresión (véase la Nota 1):

$$L_d(k) = 12 \left[\left(\frac{\alpha_{t1} - \alpha_d}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_{t2} - \alpha_d}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{dB} \quad (103)$$

donde el ángulo de llegada de la señal directa se calcula aproximadamente con (véase la Nota 2):

$$\alpha_d = -0,0045d \left(\frac{1}{k} - \frac{3}{4} \right) \quad \text{grados} \quad (104)$$

Paso 5: La profundidad de desvanecimiento máximo posible en condiciones normales de propagación ($k = 4/3$) por interferencia destructiva entre las señales directa y reflejada por superficies se puede calcular por medio de:

$$A_{m\acute{a}x} = -20 \log \left(10^{-L_d/20} - 10^{-L_s/20} \right) \quad \text{dB} \quad (105)$$

donde L_d viene dada por la ecuación (102) y L_s por la ecuación (101) (véase la Nota 2). En condiciones superrefractivas o subrefractivas en las que la señal directa también sufre una pérdida adicional de $0,5L_{add}$ (por ejemplo, debido a la dispersión del haz en condiciones superrefractivas) y la señal reflejada por superficies una ganancia de $-0,5L_{add}$, la profundidad de desvanecimiento máximo posible se calcula con la siguiente expresión:

$$A_{m\acute{a}x} = -20 \log \left(10^{-(L_d + 0,5L_{add})/20} - 10^{-(L_s - 0,5L_{add})/20} \right) \quad \text{dB} \quad (106)$$

donde L_d se calcula con la ecuación (103) y L_s con la ecuación (101) (véase la Nota 2).

Los ángulos de inclinación de las antenas se pueden optimizar para reducir al mínimo el desvanecimiento por multitrayectos por superficies o bien la distorsión de amplitud causada por multitrayectos por superficies, o una combinación de ambos. La optimización para reducir el desvanecimiento al mínimo se puede efectuar fijando el valor de L_{add} en la ecuación (106) tal que L_d sea menor que L_s con $k = \infty$ (en la práctica, se puede elegir un valor grande de k tal como $k = 1 \times 10^9$) con alrededor de 0,3 dB y minimizar $A_{m\acute{a}x}$ por el método de aproximaciones sucesivas de ángulos de inclinación. De manera alternativa, se puede fijar el valor de ρ_{eff} en la ecuación (101) igual a un valor que se aproxime a 1,0, o mayor, para obtener la misma diferencia de unos 0,3 dB (véase la Nota 2), y luego llevar a cabo la optimización. Esto evita la situación en la que ρ_{eff} no es conocida. La pérdida del margen contra desvanecimientos por este método se encuentra en la gama de 2,5 a 4 dB.

La optimización para reducir la distorsión de amplitud al mínimo debido a trayectos múltiples por superficies se puede llevar a cabo aumentando aún más los ángulos de inclinación hasta que la discriminación relativa de las antenas frente a la señal o señales reflejadas por superficies se maximiza. Esto se conseguirá cuando la diferencia en la discriminación entre las señales directa y reflejada por superficies sea máxima. Sin embargo, a fin de optimizar con exactitud los ángulos de inclinación en función de la distorsión por trayectos múltiples por superficies, los diagramas de antena deben estar disponibles pues el modelo de ecuación (100) es menos exacto fuera de las anchuras de haz de potencia mitad de las antenas, en especial a medida que se acerca el borde del lóbulo principal (véase la Nota 1). Como la optimización frente a la distorsión de amplitud se consigue en función de la pérdida ulterior del margen contra desvanecimiento plano, se recomienda que los ángulos de inclinación obtenidos por la optimización en función del desvanecimiento se aumenten en la misma proporción, hasta que se produzca una pérdida máxima de unos 6 dB del margen contra desvanecimientos. Si bien los ángulos de inclinación resultantes no están optimizados contra desvanecimientos, el aumento de la profundidad de los desvanecimientos es de sólo una fracción de decibelio (véase la Nota 3).

Cabe señalar que optimizando la discriminación de las antenas frente a trayectos múltiples por superficies mediante antenas inclinadas hacia arriba también se tenderá a discriminar los trayectos múltiples de origen atmosférico (véase la Nota 4).

NOTA 1 – Esta aproximación de haz gaussiano es más precisa dentro de las anchuras de haz de las antenas. Fuera de las anchuras de haz se pueden utilizar diagramas reales para obtener una estimación más exacta si se desea. Esto es especialmente importante a medida que se acerca el borde del lóbulo principal.

NOTA 2 – La inclinación hacia arriba de las antenas es conveniente para mejorar su comportamiento en condiciones de desvanecimiento por trayectos múltiples por superficies, independientemente del nivel de la señal o señales reflejadas por superficies en condiciones normales de propagación (es decir, $k = 4/3$). El objetivo de minimizar el desvanecimiento es reducir el nivel de la señal o señales reflejadas en superficies en un valor mayor que el de la señal directa, mientras que esta última se reduce sólo lo suficiente para que la profundidad de desvanecimiento total se minimice. El objetivo de reducir la distorsión de amplitud al mínimo es maximizar la diferencia relativa entre las amplitudes de la señal o señales directas y reflejadas por superficies a expensas de incrementar ligeramente la profundidad de desvanecimiento máxima. Ambos objetivos se pueden conseguir desplazando el ángulo de llegada de la señal o señales reflejadas en superficies

a puntos sobre los diagramas de antena en los que son más inclinados. Si fuera necesario, la pérdida del margen de desvanecimiento plano en condiciones normales, originada por la pérdida en la discriminación de antena en el sentido de la señal directa debido a la inclinación hacia arriba, se puede compensar aumentando el tamaño de las antenas.

Los ángulos de inclinación de las antenas para reducir al mínimo el efecto de la reflexión o reflexiones en superficies en condiciones normales de propagación, variarán en función de la geometría del trayecto, las anchuras de haz de la antena y el nivel relativo de la reflexión o reflexiones en superficies. Si bien cuanto mayor es la anchura del haz mayor será el ángulo de inclinación requerido para que tenga un efecto en condiciones normales de propagación, la relación apropiada del ángulo de inclinación con respecto a la anchura del haz se hará menor con el aumento de la anchura del haz.

Los ángulos de inclinación de antena necesarios para reducir al mínimo el efecto de la reflexión o reflexiones en superficies en condiciones de trayectos múltiples por superficies serán mayores que los correspondientes a las condiciones normales y, por lo general, serán los ángulos elegidos. Cuando una capa extrema tal como un conducto produce una pérdida por dispersión del haz en el nivel de la señal directa, existe una mayor probabilidad de que la señal o señales reflejadas por superficies sean reforzadas simultáneamente y se produzcan desvanecimientos por trayectos múltiples importantes. Esto estará acompañado de un aumento en la distorsión de propagación.

Con el objeto de elegir los ángulos de inclinación apropiados para reducir al mínimo la profundidad de desvanecimiento basado en la ecuación (106), se puede llevar a cabo una simulación de la manera descrita en el Paso 5. (Si L_d y L_s tienen por efecto acercarse entre sí en un valor de 0,3 dB cambiando uno o el otro, o ambos simultáneamente, no parece ser un factor crítico del resultado.) Los ángulos de inclinación óptimos variarán en función de los ángulos de las ondas reflejadas por superficies calculados según las ecuaciones (97) y (98). El mayor de los ángulos de inclinación de la antena corresponde al mayor ángulo de reflexión en superficies desde esta antena. Como se indicó, la pérdida típica del margen para ángulos de inclinación óptimos está en la gama de 2,5-4 dB. En cualquier caso, si los tamaños de las antenas se incrementan para compensar la pérdida en el margen contra desvanecimiento plano, debe tener lugar otra optimización para determinar los nuevos ángulos óptimos de inclinación.

Como se señaló, antes de efectuar la optimización para reducir al mínimo la distorsión de amplitud debe llevarse a cabo el paso cuyo objetivo es minimizar los desvanecimientos y los ángulos de inclinación se aumentarán en proporciones iguales. Si se utiliza un conjunto de ángulos de inclinación, el otro dependerá de las consideraciones del sistema (véase la Nota 3).

Cabe señalar que durante las condiciones de trayectos múltiples por superficies una parte de la pérdida de discriminación de la antena en la dirección del rayo más intenso (normalmente la señal directa) originada como resultado de la inclinación de antena se recupera por el hecho de que este rayo tiende a tener un ángulo de llegada positivo.

NOTA 3 – Si se puede evitar un incremento del tamaño de la antena mediante la optimización de los ángulos de inclinación de las antenas para minimizar la profundidad de desvanecimiento máxima (con la pérdida prevista en el margen contra desvanecimiento plano de 2,5-4 dB), ésta puede ser la mejor alternativa. Por otra parte, puede ser también la mejor alternativa optimizar los ángulos de inclinación para reducir al mínimo la amplitud de distorsión si se mejora lo suficiente la calidad de funcionamiento para que no sea necesaria la aplicación de diversidad. La elección dependerá de la calidad de equalización utilizada en el sistema. Una tercera alternativa sería optar por ángulos de inclinación de antena que produzcan una pérdida del margen contra desvanecimiento plano entre los extremos de 2,5-4 dB y unos 6 dB. Es importante observar que la optimización para minimizar la distorsión supone sólo una pequeña desviación de la condición de desvanecimiento óptima (es decir, profundidad de desvanecimiento mínima).

NOTA 4 – Los análisis de trayectoria de rayos y las numerosas mediciones experimentales de los ángulos de llegada y de las amplitudes de las tres señales de trayectos múltiples más intensas indican que la onda de trayectos múltiples de origen atmosférico con el mayor ángulo de llegada hacia arriba tiende a tener un nivel más alto que la segunda onda de trayecto múltiple de origen atmosférico, en orden decreciente de intensidad. Esto indica que mientras que las antenas se ajusten en ángulos de inclinación hacia arriba mayores que los dos ángulos de llegada más elevados (por lo general menor que $0,3^\circ$ para longitudes de trayectos en la gama de 31 a 51 km), la discriminación de la antena contra los trayectos múltiples de origen atmosférico también aumentará. De esta manera, la inclinación óptima hacia arriba de la antena debe estar basada normalmente en la reducción al mínimo de los efectos de trayectos múltiples por superficies.

6.1.3 Reducción del despejamiento

Otra técnica que no es muy bien comprendida, ni está cuantificada como las otras, comprende la reducción del despejamiento del trayecto para determinar un valor predecible de pérdida por difracción, al menos en condiciones subrefractivas. Se considera que esta técnica funciona en gran parte por:

- la reducción de la posibilidad y/o severidad de la pérdida de dispersión del haz sufrida por la señal directa a causa de una capa de características extremas (tal como un conducto) que se produce justo debajo o parcialmente debajo de la longitud total del trayecto (técnica de estrategia A); y
- la reducción simultánea de la posibilidad de que la misma capa refuerce las reflexiones de superficies (técnica de estrategia B). Esto a su vez reduce la posibilidad de que la onda directa se combine en condiciones destructivas con una o más reflexiones de superficies para causar severos desvanecimientos selectivos en frecuencia.

Otro efecto por el cual se cree en esta técnica es que los retardos entre la señal directa y la señal o señales interferentes reflejadas por superficies se reducen si la capa de características extremas que produce la dispersión del haz de la señal directa está debajo del trayecto sólo parcialmente (es decir, estrategia C). En consecuencia, resultan desvanecimientos selectivos en frecuencia menos severos que si la totalidad de la capa estuviera por debajo del trayecto.

Esta técnica requiere un compromiso entre, por una parte, la reducción de los efectos de desvanecimientos por trayectos múltiples causados por superficies y, por la otra, un incremento de los desvanecimientos debidos a la pérdida de difracción en condiciones subrefractivas. La regla de despejamiento que figura en el § 2.2.2.1 está diseñada para evitar la pérdida por difracción en condiciones normales de refractividad (es decir, factor k efectivo medio), pero también para permitir unos 6 dB de pérdida de difracción en condiciones correspondientes a k_e (99,9%). En principio, para sistemas con márgenes contra desvanecimientos planos suficientemente grandes, se podrían tolerar valores de pérdida de difracción mayores en condiciones normales como subrefractivas.

La técnica es de gran valor en trayectos con pequeña inclinación o sin inclinación. Sin embargo, aun en trayectos con alguna inclinación, puede ser útil reducir el despejamiento del trayecto para reducir también los efectos de los trayectos múltiples por superficies.

La técnica se aplica con mayor seguridad a la antena más baja en una configuración de diversidad de espacio, y se recomienda como cosa algo evidente en la técnica presentada en el § 6.2.1.

6.2 Técnicas de diversidad

Las técnicas de diversidad incluyen la diversidad en el espacio, en ángulo y en frecuencia. Normalmente se preferirá la diversidad en el espacio o en ángulo, o una combinación de ambas, a la diversidad en frecuencia. De este modo, no sólo se utiliza más eficazmente el espectro de frecuencias, sino que estas técnicas son generalmente mejores. En concreto, la diversidad en el espacio contribuye a contrarrestar el desvanecimiento plano (como el causado por la pérdida de propagación del haz, y no por trayectos múltiples atmosféricos con un breve retardo relativo), así como los desvanecimientos selectivos en frecuencia, mientras que la diversidad en frecuencia sólo contribuye a contrarrestar los desvanecimientos selectivos en frecuencia (como los causados por trayectos múltiples en la superficie y/o los trayectos múltiples atmosféricos). Siempre que sea posible, y a fin de conservar el espectro, se evitará utilizar la diversidad en frecuencia. Cuando se utilice la diversidad en el espacio, también se empleará la diversidad en ángulo, inclinando las antenas a distintos ángulos. La diversidad en ángulo puede utilizarse igualmente cuando no es posible utilizar la diversidad en el espacio o para reducir la altura de las torres.

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 de 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 por diversidad, I , para una profundidad de desvanecimiento, A , viene dado por:

$$I = p(A) / p_d(A) \quad (107)$$

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.

6.2.1 Separación de antenas en sistemas con diversidad de espacio

La separación apropiada de antenas en sistemas con diversidad de espacio está regida por tres factores:

- la necesidad de mantener el despejamiento de la antena de menor altura lo más bajo posible (dentro de las directrices sobre el despejamiento indicadas en el § 2.2.2) para reducir al mínimo la aparición de desvanecimientos por trayectos múltiples por superficies (véase el § 6.1.3);
- la necesidad de obtener un factor de mejora de diversidad de espacio especificado para trayectos terrestres (véase el § 6.2.2); y
- la necesidad de reducir al mínimo la posibilidad de que la señal en una antena en diversidad se desvanezca por trayectos múltiples por superficies cuando la señal en la otra antena se desvanece.

El procedimiento por pasos para determinar la separación entre las antenas es el siguiente:

Pasos 1-4: Aplíquense los Pasos 1-4 del § 6.1.2.3 para determinar si:

- hay alguna zona del trayecto en la que la reflexión especular por una superficie puede ser importante; y si
- es necesario aplicar diversidad de espacio contra el desvanecimiento por trayectos múltiples por superficies.

(Para vanos de dos tramos con reflector pasivo con uno o más reflectores pasivos muy próximos, véase la Nota 1.) Si no hay zonas que puedan producir reflexiones especulares importantes en superficies, continúese con el Paso 8.

Paso 5: Para la misma gama de valores k efectivos del Paso 3, calcúlense las distancias de separación entre los valores máximos y mínimos del nivel de la señal recibida (debido a la interferencia entre la onda directa y la onda de trayectos múltiples reflejada por superficies; véase la Fig. 9) mediante la siguiente expresión:

$$\theta_2 = \frac{150d}{f(h_1 - d_1^2 / 12,74k)} \quad \text{m} \quad (108)$$

La distancia de separación θ_1 en el emplazamiento 1 se puede calcular reemplazando h_1 y d_1 de la ecuación (108) por h_2 y d_2 , respectivamente.

Repítase este paso para cada zona de posible reflexión especular.

Paso 6: Calcúlense las separaciones óptimas posibles de las antenas en diversidad para la misma gama de valores de k , mediante:

$$S_1 = \theta_1 / 2, 3\theta_1 / 2, 5\theta_1 / 2 \text{ etc.} \quad S_2 = \theta_2 / 2, 3\theta_2 / 2, 5\theta_2 / 2 \text{ etc.} \quad \text{m} \quad (109)$$

Aquí también, repítase este paso para cada zona de posible reflexión especular.

Paso 7: Trayectos con reflexiones especulares obvias sobre superficies: Calcúlese una altura tentativa de la antena en diversidad siguiendo los Pasos 2-3 del § 2.2.2.2, y la separación tentativa resultante S'_1 de las antenas. Compárese la separación tentativa con las separaciones óptimas obtenidas en el Paso 6 para la gama pertinente de valores de k efectivos.

Para trayectos en los cuales se prevé que el nivel de la señal reflejada por superficies se acerque al que tiene la señal directa en condiciones normales de refractividad (es decir, k mediano o $k = 4/3$), la separación óptima mínima obtenida con el Paso 6 (es decir, $S_1 = \theta_1/2$) para el valor mediano de k se debe escoger como la separación real (véase la Nota 2). Esto dará protección en diversidad de espacio para la gama de valores k mayores. (En bajas frecuencias, puede ser necesario incrementar la altura de la antena superior aun para llevar a cabo esta separación óptima mínima.)

Para trayectos en los que no se prevé que el nivel de la señal o señales reflejadas por superficies se acerque al de la señal directa en condiciones normales de refractividad (véanse los § 6.1.2.4 y 6.1.2.5 para determinar si éste es el caso), es posible otro método de diseño. Con este método se opta por una de las separaciones óptimas más grandes de la ecuación (109) (por ejemplo, $S_1 = 3\theta_1/2$ ó $5\theta_1/2$) para el valor mediano de k , de modo tal que se acerca pero aún es menor que S'_1 . Esto reducirá la ocurrencia de desvanecimientos por trayectos múltiples por superficie, pero continuará ofreciendo una protección importante por diversidad de espacio cuando este desvanecimiento se produzca. La ventaja de disminuir la ocurrencia de desvanecimientos por trayectos múltiples por superficies se debe considerar frente al inconveniente de utilizar una separación que no es óptima en una gama tan amplia de valores k efectivos (véase la Nota 3).

Como se indicó en el § 2.2.2.2 algunos trayectos largos (por lo general sobre masas de agua) pueden requerir ocasionalmente el empleo de tres antenas en diversidad de espacio. En este caso, la separación entre la antena más alta y la antena de altura media debería ser el valor óptimo más bajo posible conforme a la ecuación (109). La altura de la antena más baja ha de estar basada en la regla de zona despejada que se indica en el § 2.2.2.2 (véase la Nota 4).

Paso 8: Trayectos sin reflexiones especulares obvias sobre superficies: Calcúlese la altura de la antena en diversidad conforme a los Pasos 2-3 del § 2.2.2.2.

Para la separación obtenida de las antenas en diversidad, se deben efectuar los cálculos de mejora por diversidad y de interrupciones utilizando los métodos indicados en los § 6.2.1 y 6.2.2. Si la separación de diversidad es mayor que el límite $S = 23$ m conforme a la ecuación (109), efectúese el cálculo con este límite pues la mejora real con mayor separación sería más grande. Si fuera necesario, calcúlese una nueva altura para la antena más alta que satisfaga los criterios de interrupciones. En la mayoría de los casos, si se ha determinado el despejamiento de la antena más baja para minimizar la aparición de dispersión del haz directo y el desvanecimiento consiguiente por trayectos múltiples por superficies, no será necesario aumentar la altura de la antena más alta.

NOTA 1 – Para vanos de dos tramos con un reflector pasivo, con uno o más reflectores pasivos en estrecha proximidad, se sugiere que cada tramo sea tratado inicialmente como un enlace independiente para determinar la separación de las antenas en diversidad en cada extremo. Si no hubiera reflexiones especulares obvias en superficies, la separación determinada entonces para el tramo más largo se debe emplear también en el tramo más corto.

NOTA 2 – Estos trayectos serán en su mayor parte aquellos por los que la onda reflejada por una superficie se produce sobre masas de agua y no está bloqueada en condiciones normales, y el ángulo entre la onda directa y la onda reflejada en ambas antenas está dentro de una anchura de haz de 3 dB. Son también aptos para trayectos sobre tierra en los que la reflexión se produce sobre una superficie terrestre muy lisa (por ejemplo planicies mojadas o cubiertas de nieve).

NOTA 3 – Se considera que la ventaja de disminuir la ocurrencia de desvanecimientos por trayectos múltiples por superficies es aquí muy importante. Se estima que cuando se producen desvanecimientos importantes por trayectos múltiples por superficies, serán en virtud de un conducto sobre el suelo u otra capa extrema con un gradiente del índice de refracción negativo elevado ubicado debajo del trayecto o parcialmente debajo de éste. Bajo esas condiciones, los valores de k efectivos menores que el valor mediano no se considerarán. En cualquier caso, la separación de las antenas óptima estimada se debe basar en el valor de k efectivo mediano.

NOTA 4 – Si la separación de las antenas intermedia e inferior se puede disponer de modo que se satisfaga la ecuación (109), con un pequeño ajuste de la regla de despejamiento conforme al § 2.2.2.2, podría obtenerse alguna mejora adicional en la calidad de funcionamiento.

6.2.2 Separación angular en sistemas de diversidad en ángulo y diversidad de espacio/ángulo combinados

La diversidad en ángulo se puede combinar con la diversidad de espacio para mejorar la calidad de funcionamiento si se desea. Las antenas en diversidad de espacio están inclinadas para proporcionar esta mejora adicional de diversidad en ángulo. El procedimiento para determinar los ángulos de inclinación, sea en un par de diversidad de espacio o en un par de diversidad en ángulo en disposición colateral, es la siguiente:

Paso 1: Inclínese la antena principal (más alta) de un par en diversidad de espacio (o una de las antenas de un par en diversidad en ángulo en disposición colateral) y la antena transmisora hacia arriba por ángulos basados en los procedimientos indicados en el § 6.1.2.5 (véase la Nota 1). Esto producirá una pérdida del margen contra desvanecimiento plano en la gama aproximada de 2,5 a 6 dB, cuyo valor depende de si la inclinación está optimizada para reducir el desvanecimiento o la distorsión de amplitud al mínimo. Si fuera necesario, utilícese una antena más grande para compensar la pérdida del margen contra desvanecimiento plano ocasionada.

Paso 2: Inclínese la antena (más baja) de diversidad de un par de diversidad de espacio (o la otra antena de un par en diversidad en ángulo en disposición colateral) hacia abajo desde la horizontal local, un ángulo que sea menor que:

- el ángulo en la dirección de la reflexión especular dominante a lo largo del trayecto (en condiciones de $k = \infty$); y
- el ángulo que da un valor de 3 dB de pérdida relativa a la mira de alineamiento (véase la Nota 2).

Si a lo largo del trayecto hay más de una reflexión especular significativa se deberá optar por un ángulo de puntería de compromiso. Si no hay reflexión especular obvia, se podría fijar un ángulo en el sentido de la reflexión difusa más intensa estimada (por ejemplo desde el terreno y/o vegetación). De otro modo, esta antena se debe apuntar en la dirección de visibilidad directa en condiciones normales, o del horizonte si la trayectoria rectilínea está bloqueada.

NOTA 1 – Se debe señalar que los ángulos de inclinación óptimos para antenas transmisoras y receptoras no serán los mismos salvo que las alturas de las antenas sobre el punto de reflexión en una superficie a lo largo del trayecto sean idénticas. El ángulo de mayor inclinación corresponde a la antena que presenta el ángulo mayor en la dirección de la reflexión por una superficie (véase el § 6.1.2.5).

NOTA 2 – El objetivo principal es doble:

- proporcionar una combinación de niveles de señal directa y reflejada por superficies que sea significativamente diferente del nivel de la antena más alta, de modo tal que se maximice el efecto de diversidad en ángulo; y

- proporcionar mayor protección por diversidad en condiciones de desvanecimiento plano severo debido a la dispersión del haz de la onda directa en uno o más conductos a lo largo del trayecto (es decir, la señal reflejada por una superficie, que ha sido reforzada intencionalmente, es más probable que permanezca por encima del umbral de ruido en esas situaciones).

El límite de 3 dB tiene por objeto evitar reducir demasiado el nivel de la señal directa en la antena en diversidad, en particular cuando la reflexión especular dominante está a corta distancia de la antena.

Nótese que el ángulo de inclinación resultante puede ser positivo con respecto a la línea de visibilidad directa durante condiciones normales, en particular si la señal directa en la antena en diversidad tiene pérdidas por difracción importantes durante las condiciones normales (es decir, antena «enterrada»).

6.2.3 Separación de frecuencias en los sistemas con diversidad en frecuencia

Este punto concierne a las raras situaciones en las que la diversidad en frecuencia puede ser un valor necesario o conveniente, quizá en combinación con la diversidad en el espacio o en ángulo.

La separación de frecuencias entre los canales principales y de protección en los sistemas con diversidad en frecuencia se rige por tres factores:

- el plan de frecuencias del sistema disponible (véanse las Recomendaciones UIT-R de la Serie F);
- la necesidad de obtener un factor de mejora de diversidad en frecuencia específico para trayectos terrestres (véase el § 6.2.5.2);
- la necesidad de reducir al mínimo la posibilidad de que la señal se desvanezca en una frecuencia al mismo tiempo que en otras frecuencias se desvanece en trayectos de gran reflexión.

Los pasos del procedimiento para determinar la separación de frecuencias son los siguientes:

Pasos 1-4: Aplíquense los Pasos 1-4 del § 6.1.2.3 para determinar:

- si hay alguna zona del trayecto en que la reflexión especular por una superficie puede ser importante;
- si es necesario aplicar diversidad en frecuencia contra el desvanecimiento por trayectos múltiples por superficies. Si no hay zonas donde la reflexión especular por una superficie sea importante, se ha de pasar directamente al Paso 8.

Paso 5: Utilizando la misma gama de valores k efectivos del Paso 3, calcúlese la separación de frecuencias óptima mínima de los canales principales y de protección con la siguiente fórmula:

$$\Delta f_{min} = \frac{7,5 \times 10^4 d}{\left(h_1 - \frac{d_1^2}{12,74k}\right) \left(h_2 - \frac{d_2^2}{12,74k}\right)} \quad \text{MHz} \quad (110)$$

donde h_1 y h_2 se expresan en metros y d , d_1 y d_2 en kilómetros. Hay que aplicar esta fórmula a cada posible zona de reflexión especular.

Paso 6: Han de calcularse las separaciones de frecuencias óptimas posibles de los canales principales y de protección con la fórmula:

$$\Delta f = \Delta f_{min}, 3\Delta f_{min}, \text{ etc.} \quad \text{MHz} \quad (111)$$

Como en el caso anterior, ha de aplicarse esta fórmula a cada posible zona de reflexión especular.

Paso 7: Trayectos con reflexiones especulares obvias en la superficie: Para los trayectos en que el nivel de la señal principal reflejada en la superficie se supone que va a acercarse al de la señal directa en condiciones normales de refractividad (es decir, k mediana o $k = 4/3$), la separación ideal será la separación de frecuencias óptima mínima obtenida en el Paso 5 (véase la Nota 1). Se obtendrá así la protección de diversidad en frecuencia para la gama más grande de valores de k . Evidentemente, la separación de frecuencias real habrá de ser un término medio entre este valor ideal y un valor factible en el plan de frecuencias disponible. Cualquier diferencia con el valor ideal para adaptarse al plan de frecuencias disponible deberá acercarse lo más posible al valor mínimo obtenido en la ecuación (110), con $k = \infty$. No obstante, es necesario insistir en que la separación de frecuencias real no tiene necesariamente que ser igual al valor óptimo para obtener la protección por diversidad en frecuencia. Puede utilizarse, a título orientativo, el método del § 6.2.5.2, incluso para los trayectos con reflexión.

Para trayectos en los que no se prevé que el nivel de la señal o de las señales reflejadas en la superficie se acerque al de la señal directa en condiciones normales de refractividad (véanse los § 6.1.2.4 y 6.1.2.5 para determinar si éste es el caso), es posible, en casos excepcionales, utilizar otro método de diseño. Con dicho método, se opta por una de las separaciones de frecuencias óptimas más grandes de la ecuación (111) para el valor mediano de k , si el plan de frecuencias y los parámetros del trayecto (tales como grandes alturas de antena inevitables, h_1 y/o h_2 , por encima de la superficie de reflexión) lo permiten, o si se emplea la diversidad en banda cruzada. El inconveniente de utilizar una separación de frecuencias mayor que el valor óptimo mínimo es que dicha separación no será efectiva en una gama tan amplia de valores reales de k (véase la Nota 2).

Para vanos con uno o más repetidores pasivos que dan como resultado dos o más segmentos distintos, deberá aplicarse la ecuación (110) a cada segmento que tenga reflexiones especulares obvias y se sumarán los resultados para obtener el valor total de Δf_{min} . En este cálculo se ignorarán los segmentos sin reflexión especular obvia.

Paso 8: Trayectos sin reflexiones especulares obvias en la superficie: Han de realizarse los cálculos de mejora de la diversidad utilizando el método del § 6.2.5.2 y ajustando la separación de frecuencias para minimizar la interrupción de las transmisiones dentro de los límites del plan de frecuencias.

NOTA 1 – Estos trayectos serán principalmente aquellos en los que la onda reflejada por una superficie se produce sobre masas de agua y no está bloqueada en condiciones normales, y el ángulo entre la onda directa y la onda reflejada en ambas antenas está dentro de una anchura de haz de 3 dB. Son también aptos los trayectos sobre tierra en los que la reflexión se produce sobre una superficie terrestre muy lisa (por ejemplo, planicies mojadas o cubiertas de nieve). En ambos casos, se utilizan las separaciones óptimas más pequeñas para trayectos cortos con grandes alturas de antena por encima de la superficie reflectante.

NOTA 2 – Para trayectos con más de una señal importante reflejada en la superficie, especialmente aquellas cuyos niveles son difícilmente comparables, habrá de encontrarse un punto medio entre las distintas separaciones de frecuencias ideales obtenidas, y las disponibles a partir del plan de frecuencias. Nuevamente, se insiste en que las separaciones inferiores a las separaciones de frecuencias ideales proporcionarán un determinado grado de protección de diversidad.

6.2.4 Mejora por diversidad en el espacio en sistemas de banda estrecha

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

$$I = \left[1 - \exp \left(-0,04 \times S^{0,87} f^{-0,12} d^{0,48} p_0^{-1,04} \right) \right] 10^{(A-V)/10} \quad (112)$$

donde:

$$V = |G_1 - G_2| \quad (113)$$

siendo:

- A : profundidad de desvanecimiento (dB) del trayecto no protegido
- p_0 : factor de ocurrencia de multitrayecto (%), obtenido de la ecuación (10) o de la (11)
- 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).

La ecuación (108) 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 (7) u (8), según el caso. La ecuación (112) es válida en la gama de desvanecimientos profundos en la que también lo es la ecuación (7) u (8).

6.2.5 Técnicas de diversidad en los sistemas digitales

Se dispone de métodos para predecir la probabilidad de la interrupción de la transmisión y la mejora por diversidad para sistemas con 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.

6.2.5.1 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad de espacio

Hasta el momento se han utilizado muy extensamente en los sistemas de diversidad de 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 los que se aplica un enfoque más avanzado, por medio de distorsión mínima y potencia máxima, dependiendo de una evaluación del canal radioeléctrico, pueden 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 no selectivo de correlación, k_{ns} , como sigue:

$$k_{ns}^2 = 1 - \frac{I_{ns} \times P_{ns}}{\eta} \quad (114)$$

donde el factor de mejora, I_{ns} , puede evaluarse a partir de la ecuación (112) para una profundidad de desvanecimiento, A (dB), correspondiente al margen contra desvanecimiento plano, F (dB) (véase el § 2.3.6) y P_{ns} a partir de la ecuación (29).

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

$$k_s^2 = \begin{cases} 0,8238 & \text{para } r_w \leq 0,5 \\ 1 - 0,195 (1 - r_w)^{0,109 - 0,13 \log(1 - r_w)} & \text{para } 0,5 < r_w \leq 0,9628 \\ 1 - 0,3957 (1 - r_w)^{0,5136} & \text{para } r_w > 0,9628 \end{cases} \quad (115)$$

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

$$r_w = \begin{cases} 1 - 0,9746 (1 - k_{ns}^2)^{2,170} & \text{para } k_{ns}^2 \leq 0,26 \\ 1 - 0,6921 (1 - k_{ns}^2)^{1,034} & \text{para } k_{ns}^2 > 0,26 \end{cases} \quad (116)$$

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

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}}{I_{ns}} \quad (117)$$

donde P_{ns} es la probabilidad de interrupción de la transmisión para un enlace sin protección, dada por la ecuación (29).

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

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \quad (118)$$

donde P_s es la probabilidad de interrupción de la transmisión para un enlace sin protección, dada por la ecuación (74).

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

$$P_d = \left(P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{4/3} \quad (119)$$

6.2.5.2 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 de espacio, pero en el Paso 2 se aplica aquí la siguiente fórmula:

$$I_{ns} = \frac{80}{fd} \left(\frac{\Delta f}{f} \right) 10^{F/10} \quad (120)$$

donde:

Δf : separación en frecuencias (GHz). Si $\Delta f > 0,5$ GHz, utilícese $\Delta f = 0,5$

f : frecuencia de la portadora (GHz)

F : margen contra desvanecimiento plano (dB).

Esta ecuación se aplica únicamente a las siguientes gamas de parámetros:

$$2 \leq f \leq 11 \text{ GHz}$$

$$30 \leq d \leq 70 \text{ km}$$

$$\Delta f / f \leq 5\%$$

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

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

$$\mu_\theta = 2,89 \times 10^{-5} G_m d \quad \text{grados} \quad (121)$$

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

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

$$r = \begin{cases} 0,113 \operatorname{sen} \left[150 (\delta / \Omega) + 30 \right] + 0,963 & \text{para } q > 1 \\ q & \text{para } q \leq 1 \end{cases} \quad (122)$$

donde:

$$q = 2505 \times 0,0437^{(\delta/\Omega)} \times 0,593^{(\varepsilon/\delta)} \quad (123)$$

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 no selectivo de correlación, Q_0 , como sigue:

$$Q_0 = r \left(0,9399^{\mu_\theta} \times 10^{-24,58 \mu_\theta^2} \right) \left[2,469^{1,879(\delta/\Omega)} \times 3,615^{[(\delta/\Omega)^{1,978}(\varepsilon/\delta)]} \times 4,601^{[(\delta/\Omega)^{2,152}(\varepsilon/\delta)^2]} \right] \quad (124)$$

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

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

$$P_{dns} = \eta Q_0 \times 10^{-F/6,6} \quad (125)$$

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

$$k_s^2 = 1 - \left(0,0763 \times 0,694^{\mu_\theta} \times 10^{23,3 \mu_\theta^2} \right) \delta \left(0,211 - 0,188 \mu_\theta - 0,638 \mu_\theta^2 \right)^\Omega \quad (126)$$

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

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \quad (127)$$

donde P_s es la probabilidad de interrupción de la transmisión sin protección (véase el Paso 3 del § 5.1).

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

$$P_d = \left(P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{4/3} \quad (128)$$

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

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

$$k_{ns} = k_{ns,s} k_{ns,f} \quad (129)$$

donde $k_{ns,s}$ y $k_{ns,f}$ son los coeficientes no selectivos de correlación calculados para la diversidad de espacio (véase el § 6.2.5.1) y la diversidad en frecuencia (véase el § 6.2.5.2), respectivamente.

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

6.2.5.5 Predicción de la interrupción de la transmisión utilizando diversidad de 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:

$$m_{ns} = \eta^3 \left(1 - k_{ns,s}^2\right) \left(1 - k_{ns,f}^2\right) \quad (130)$$

donde $k_{ns,s}$ y $k_{ns,f}$ se obtienen del mismo modo que en el § 6.2.5.4.

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

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}^4}{m_{ns}} \quad (131)$$

donde P_{ns} se obtiene de la ecuación (29).

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

$$k_{ns}^2 = 1 - \sqrt{\eta} \left(1 - k_{ns,s}^2\right) \left(1 - k_{ns,f}^2\right) \quad (132)$$

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

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

$$P_{ds} = \left[\frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \right]^2 \quad (133)$$

donde P_s es la probabilidad de interrupción de la transmisión sin protección dada por la ecuación (74).

Paso 7: Obténgase, a continuación, la probabilidad total de interrupción de la transmisión, P_d utilizando la ecuación (119).

7 Predicción de la interrupción total de la transmisión

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

$$P_t = \begin{cases} P_{ns} + P_s + P_{XP} \\ P_d + P_{XP} \end{cases} \quad \text{si se utiliza diversidad} \quad (134)$$

obtenida aplicando los métodos indicados en los § 2.3.6, 4.1, 5.1 y 6.2.5.

La probabilidad total de interrupción de la transmisión debida a la lluvia se calcula tomando el mayor de los valores P_{lluvia} y P_{XPR} obtenidos aplicando los métodos indicados en los § 2.4.7 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 en condiciones de cielo despejado se asigna en su mayor parte a la calidad de funcionamiento (característica de error) mientras que la interrupción debida a la lluvia se asigna sobre todo a la disponibilidad. No obstante, es probable que los efectos en cielo despejado también contribuyan a la disponibilidad y las precipitaciones contribuyan a la característica de error.

8 Aspectos de la propagación relativos a la puesta en servicio

Al efectuar pruebas cuando se pone en servicio un sistema conforme a la Recomendación UIT-R F.1330, conviene evitar las épocas del año y las horas del día en que es más probable la aparición de la propagación multitrayecto.

Los estudios efectuados en climas templados de Europa Oriental indican que la probabilidad mínima de aparición de los efectos de propagación multitrayecto se da en invierno y en los dos meses que le preceden. Para las pruebas que deban efectuarse en verano, el periodo del día en el que se ha observado la probabilidad mínima de dichos efectos estaba entre las 10.00 y las 14.00 horas locales.

Las mediciones realizadas en climas costeros de Europa Occidental a la altura del paralelo 60° Norte indican que la probabilidad mínima de aparición de los efectos de la propagación multitrayecto se da entre las 13.00 y las 20.00 horas locales, independientemente de la estación. El periodo invernal es el menos afectado por los desvanecimientos causados por la propagación multitrayecto, seguido del otoño y la primavera.

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 (6).

Paso 4: Inclúyanse las coordenadas (p_1, A_1) del «primer punto de la cola» en la ecuación (7) o en la (8) según el caso, 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 $\log K$.