

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.617-2
(02/2012)

**Datos de propagación y técnicas
de predicción necesarios para
el diseño de sistemas de
radioenlaces transhorizonte**

Serie P
Propagación de las ondas radioeléctricas



Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión sonora
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2012

© UIT 2012

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R P.617-2*

Datos de propagación y técnicas de predicción necesarios para el diseño de sistemas de radioenlaces transhorizonte

(Cuestión UIT-R 205/3)

(1986-1992-2012)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que para la planificación adecuada de los sistemas de radioenlaces transhorizonte es necesario disponer de datos y métodos de predicción de la propagación adecuados;
- b) que se han elaborado métodos que permiten la predicción de la mayoría de los parámetros de propagación importantes que afectan a la planificación de los sistemas de radioenlaces transhorizonte;
- c) que, en la medida de lo posible, se han probado estos métodos comparándolos con los datos medidos disponibles y se ha demostrado que con ellos se obtiene una precisión compatible con la variabilidad natural de los fenómenos de propagación y que es adecuada para la mayoría de las aplicaciones actuales en la planificación de los sistemas,

recomienda

que se adopten las técnicas y métodos de predicción expuestos en el anexo 1 para la planificación de los sistemas de radioenlaces transhorizonte, dentro de las gamas respectivas de los parámetros indicados.

Anexo 1

1 Introducción

Los únicos mecanismos de propagación radioeléctrica más allá del horizonte que se producen permanentemente en frecuencias superiores a 30 MHz son los de difracción en la superficie de la Tierra y de dispersión causada por irregularidades atmosféricas. En el caso de las señales difractadas, la atenuación aumenta muy rápidamente con la distancia y con la frecuencia y, en definitiva, el mecanismo principal es la dispersión troposférica. Ambos mecanismos pueden utilizarse para establecer sistemas de radiocomunicación «transhorizonte». Debido a la diferencia entre los dos mecanismos, es preciso considerar por separado los trayectos por difracción y dispersión troposférica para la predicción de la pérdida de transmisión.

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

Este Anexo se refiere al diseño de sistemas de radioenlaces transhorizonte. Uno de los objetivos es presentar de forma concisa métodos sencillos para predecir las distribuciones anuales y del mes más desfavorable de las pérdidas de transmisión debidas a dispersión troposférica, así como información relativa a sus límites de validez. Otro objetivo de este anexo es presentar otras informaciones y técnicas que pueden recomendarse para la planificación de los sistemas transhorizonte.

2 Pérdida de transmisión para los trayectos por difracción

Para trayectos con ligera elevación sobre el horizonte o que pasan sobre un obstáculo o sobre terreno montañoso, la difracción será en general el modo de propagación que determina la intensidad de campo. En estos casos, deben aplicarse los métodos descritos en la Recomendación UIT-R P.526.

3 Distribución de la pérdida de transmisión en los trayectos con dispersión troposférica

Las señales recibidas mediante dispersión troposférica presentan variaciones lentas y rápidas. Las variaciones lentas son causadas por los cambios globales en las condiciones de refracción de la atmósfera y el desvanecimiento rápido se debe al movimiento de las pequeñas irregularidades. Las variaciones lentas se describen adecuadamente mediante distribuciones de la pérdida de transmisión mediana horaria, que presentan una forma aproximadamente log-normal con desviaciones típicas entre unos 4 y 8 dB, según el clima. Las variaciones rápidas en periodos de hasta unos cinco minutos se aproximan mediante la distribución de Rayleigh.

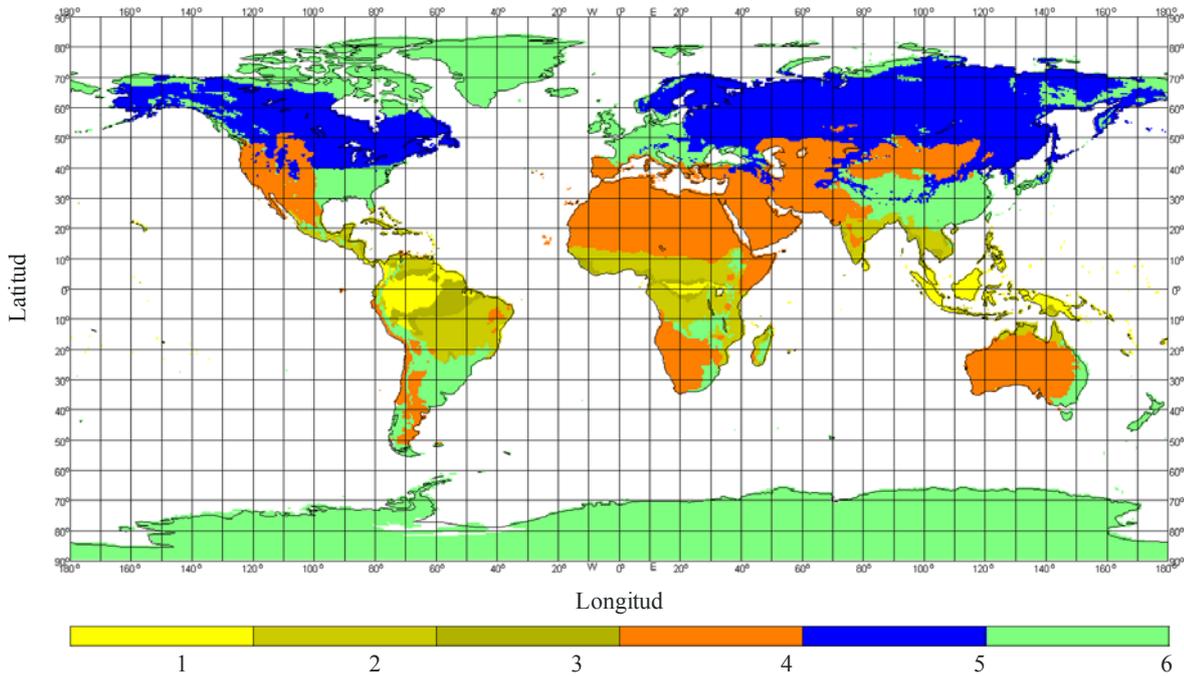
Para determinar el comportamiento de los radioenlaces transhorizonte en geometrías en las que el mecanismo predominante es la dispersión troposférica, es habitual estimar la distribución de la pérdida de transmisión mediana horaria para porcentajes de tiempo de no rebasamiento superiores al 50%. En el § 3.1 aparece una técnica semianalítica sencilla para predecir la distribución de la pérdida de transmisión media anual en esta gama. En el § 3.2 figura una técnica gráfica para trasladar estos porcentajes de tiempo anuales a los porcentajes relativos al mes más desfavorable medio. Por último, en el § 3.3 aparecen directrices sobre la estimación de la distribución de la pérdida de transmisión para pequeños porcentajes de tiempo a fin de utilizar estos datos con objeto de obtener las gamas dinámicas necesarias del receptor. El Apéndice 1 contiene informaciones complementarias sobre las variaciones estacionales y diurnas de la pérdida de transmisión, la frecuencia de los desvanecimientos rápidos en los trayectos con dispersión troposférica y la anchura de banda de transmisión.

3.1 Distribución del valor medio de la pérdida de transmisión mediana anual para porcentajes de tiempo superiores al 50%

Se recomienda utilizar el siguiente procedimiento paso a paso para realizar una estimación del valor medio de la pérdida de transmisión mediana anual, $L(q)$, no rebasada en porcentajes de tiempo q superiores al 50%. El procedimiento hace uso de los siguientes parámetros del enlace: longitud de trayecto de círculo máximo d (km), frecuencia f (MHz), ganancia de la antena transmisora G_t (dB), ganancia de la antena receptora G_r (dB), ángulo al θ_t (mrad) en el transmisor y ángulo al horizonte θ_r (mrad) en el receptor:

Paso 1: Determinar el clima apropiado para el volumen común del enlace en cuestión utilizando el mapa climático de la Fig. 1. Este mapa está disponible en formato electrónico en el sitio web de la CE 3 del UIT-R en el enlace «Software para la propagación ionosférica y troposférica y ruido radioeléctrico».

FIGURA 1
 Clasificación de las zonas climáticas



P0617-01

Si el volumen común de dispersión en la troposfera reside sobre el mar, se determina el clima en la ubicación del transmisor y del receptor. Si los dos terminales tiene una zona climática que corresponde a un punto en tierra, la zona climática del trayecto viene dada por el valor más pequeño de las zonas climáticas del transmisor y del receptor. Si sólo un terminal tiene una zona climática correspondiente a un punto en tierra, dicha zona define la zona climática del trayecto. Si ninguno de los terminales dispone de una zona climática correspondiente a un punto en tierra, se asigna al trayecto una zona climática de «trayecto marítimo».

Paso 2: Se obtienen los parámetros de la estructura meteorológica y atmosférica M y γ , respectivamente, y la ecuación que ha de utilizarse para calcular $Y(90)$ se obtiene del Cuadro 1 que figura a continuación para el clima o los climas correspondientes.

CUADRO 1

Valores de los parámetros estructurales meteorológicos y atmosféricos

Clima	1	2	3	4	5	6	Mar
M (dB)	39,60	29,73	19,30	38,50	29,73	33,20	26,00
γ (km ⁻¹)	30,33	20,27	10,32	30,27	20,27	30,27	20,27
$Y(90)$ Ecuación	9	7	10	11	7	7	8

Paso 4: Se calcula el ángulo de dispersión θ (distancia angular) mediante la ecuación

$$\theta = \theta_e + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (1)$$

donde θ_t y θ_r son los ángulos al horizonte del transmisor y del receptor, respectivamente, y

$$\theta_e = d \cdot 10^3 / ka \quad \text{mrad} \quad (2)$$

siendo:

d : la longitud del trayecto (km)

$a = 6\,370$ km, el radio de la Tierra, y

k : factor de radio ficticio de la Tierra para las condiciones de refractividad medianas (debe utilizarse un valor de $k = 4/3$ a menos que se conozca un valor más preciso).

Paso 4: Se estima la dependencia de la pérdida de transmisión L_N con la altura del volumen común a partir de la ecuación:

$$L_N = 20 \log(5 + \gamma H) + 4,34 \gamma h \quad \text{dB} \quad (3)$$

donde:

$$H = 10^{-3} \theta d / 4 \quad \text{km} \quad (4)$$

$$h = 10^{-6} \theta^2 k a / 8 \quad \text{km} \quad (5)$$

y γ es el parámetro de estructura atmosférica obtenido en el Paso 2.

Paso 5: Se determina el factor de conversión $Y(q)$ para porcentajes de no rebasamiento q distintos del 50% a partir de la fórmula:

$$Y(q) = C(q) Y(90) \quad (6)$$

En este caso, $Y(90)$ es el factor de conversión para $q = 90\%$ dado por la ecuación adecuada (7-11), como se indica en el Cuadro 1 para el clima correspondiente:

$$Y_{90} = -2,2 - [8,1 - 2,3 \cdot 10^{-4} \min(1000f, 4000)] \exp(-0,137h) \quad (7)$$

$$Y_{90} = -9,5 - 3 \exp(-0,137h) \quad (8)$$

$$Y_{90} = -8,2 \quad d_s < 100 \quad (9a)$$

$$Y_{90} = 1,006 \cdot 10^{-8} d_s^3 + 2,569 \cdot 10^{-5} d_s^2 + 0,224 d_s - 10,2 \quad 100 \leq d_s < 1\,000 \quad (9b)$$

$$Y_{90} = -3,4 \quad \text{de lo contrario} \quad (9c)$$

$$Y_{90} = -10,845 \quad d_s < 100 \quad (10a)$$

$$Y_{90} = -4,5 \cdot 10^{-7} d_s^3 + 4,45 \cdot 10^{-4} d_s^2 + 0,122 d_s - 2,645 \quad 100 \leq d_s < 550 \quad (10b)$$

$$Y_{90} = -4,0 \quad \text{de lo contrario} \quad (10c)$$

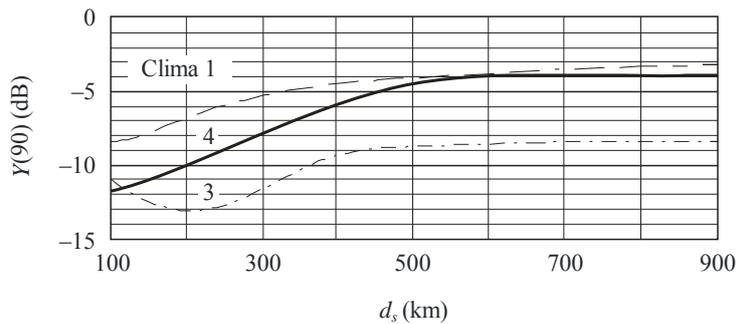
$$Y_{90} = -11,5 \quad d_s < 100 \quad (11a)$$

$$Y_{90} = -8,519 \cdot 10^{-8} d_s^3 + 7,444 \cdot 10^{-5} d_s^2 + 4,18 \cdot 10^{-4} d_s - 12,1 \quad 100 \leq d_s < 465 \quad (11b)$$

$$Y_{90} = -8,4 \quad \text{de lo contrario} \quad (11c)$$

El coeficiente $C(q)$ para el porcentaje de tiempo q de no rebasamiento en cuestión puede obtenerse a partir del Cuadro 2.

FIGURA 2
Y(90) para los climas 1, 3 y 4



P.0617-02

CUADRO 2

Valores de interés de $C(q)$

q	50	90	99	99,9	99,99
$C(q)$	0	1	1,82	2,41	2,90

Paso 6: Se calcula la pérdida de acoplamiento entre la antena y el medio, L_c , a partir de la ecuación:

$$L_c = 00,7 \exp [0,055(G_t + G_r)] \quad \text{dB} \quad (12)$$

donde G_t y G_r son las ganancias de antena.

Paso 7: Se calcula la pérdida de transmisión media anual no superada durante el $q\%$ del tiempo a partir de la ecuación:

$$L(q) = M + 30 \log f + 10 \log d + 30 \log \theta + L_N + L_c - G_t - G_r - Y(q) \quad \text{dB} \quad (13)$$

NOTA 1 – La ecuación (13) es una fórmula empírica basada en los datos para la gama de frecuencias entre 200 MHz y 4 GHz. Puede ampliarse hasta 5 GHz introduciendo muy poco error para la mayoría de las aplicaciones.

3.2 Valor medio de la distribución de la pérdida de la transmisión mediana en el mes más desfavorable para porcentajes de tiempo superiores al 50%

Por razones de coherencia con la distribución de la pérdida de transmisión media anual, esta distribución se determina más adecuadamente a partir del valor medio de la distribución anual mediante un factor de conversión. El procedimiento es el siguiente:

Paso 1: Se obtiene la distribución media anual para los porcentajes de tiempo de no rebasamiento (50, 90, 99 y 99,9) y el clima o climas de interés utilizando la técnica descrita en el § 3.1.

Paso 2: Se obtiene la diferencia de pérdida de transmisión básica entre la distribución media anual y la distribución media del mes más desfavorable a partir de las curvas de la Fig. 3. Como no se dispone de estas curvas, para el clima 2 deben utilizarse en ese caso las curvas para el clima 3.

Paso 3: Se añaden las diferencias determinadas en el Paso 2 a los valores anuales medios correspondientes obtenidos en el Paso 1 a fin de obtener las pérdidas de transmisión medias del mes más desfavorable para los porcentajes de tiempo de no rebasamiento (50, 90, 99 y 99,9).

Paso 4: Las pérdidas de transmisión medias del mes más desfavorable no superadas durante el 99,99% del tiempo puede estimarse a partir de los valores anteriores realizando una extrapolación logarítmica (es decir, una extrapolación efectuada mediante un gráfico trazado sobre un papel de probabilidad normal).

3.3 Valor medio de la distribución de la pérdida de transmisión mediana anual para porcentajes de tiempo inferiores al 50%

Para porcentajes de tiempo entre, aproximadamente, el 20% (llegando en algunos climas secos sobre tierra a valores tan reducidos como el 1%) y el 50%, la distribución de la pérdida de transmisión media anual puede considerarse simétrica y los valores de la pérdida de transmisión calculados a partir de los valores correspondientes por encima del valor mediano son:

$$L(20\%) = L(50\%) - [L(80\%) - L(50\%)] \quad (14)$$

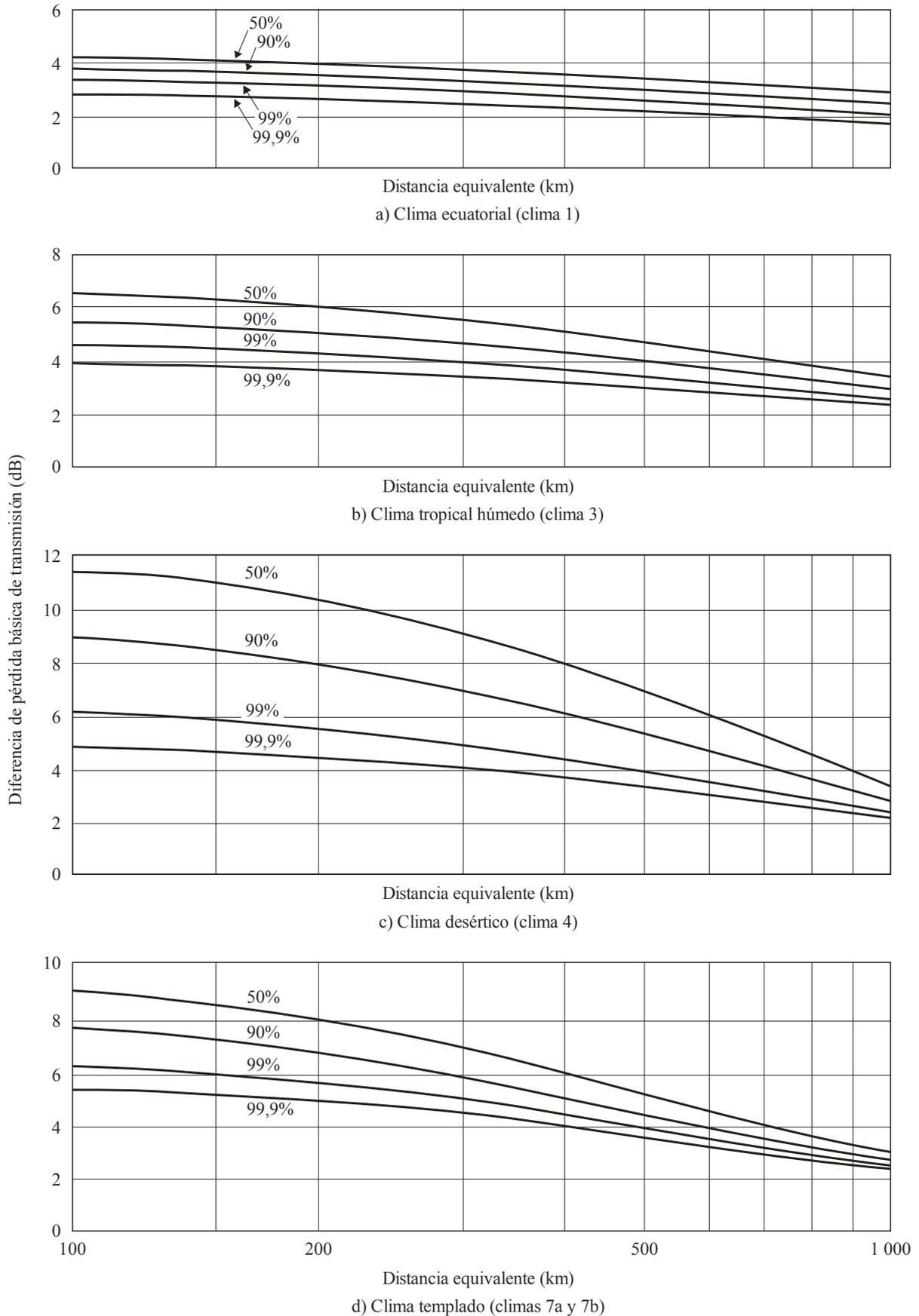
Sin embargo, para cálculos de gama dinámica que requieren una estimación de la distribución para porcentajes de tiempo inferiores, no puede suponerse la existencia de dispersión troposférica pura. Los valores de la pérdida de transmisión no superados por porcentajes de tiempo muy reducidos se determinarán mediante el mecanismo de propagación por conducto. En la Recomendación UIT-R P.452 figura una técnica más adecuada para calcular estos valores.

4 Recepción con diversidad

El profundo desvanecimiento que aparece en la propagación por dispersión troposférica reduce notablemente la calidad de funcionamiento de los sistemas que utilizan este modo de propagación. El efecto del desvanecimiento puede limitarse mediante la recepción con diversidad, utilizando dos o más señales sometidas a desvanecimientos independientes en mayor o menor grado según las diferencias del trayecto de dispersión o la frecuencia. Es sabido que empleando técnicas de diversidad en el espacio, en ángulo o en frecuencia disminuyen los porcentajes de tiempo durante los cuales se superan pérdidas de transmisión elevadas. Sin embargo, la diversidad en ángulo puede tener el mismo efecto que la diversidad en el espacio en dirección vertical y resulta más económica.

FIGURA 3

Curvas de diferencia entre la pérdida básica de transmisión en el mes más desfavorable y la pérdida básica de transmisión anual



4.1 Diversidad en el espacio

Puede utilizarse diversidad en el espacio en dirección horizontal o vertical según convenga en el emplazamiento en cuestión. Las separaciones adecuadas para la diversidad, Δh y Δv en las direcciones horizontal y vertical respectivamente, para frecuencias superiores a 1 000 MHz vienen dadas por las siguientes relaciones empíricas:

$$\Delta h = 0,36 \left(D^2 + 4 I_h^2 \right)^{1/2} \quad \text{m} \quad (15)$$

$$\Delta v = 0,36 \left(D^2 + 4 I_v^2 \right)^{1/2} \quad \text{m} \quad (16)$$

siendo D el diámetro de la antena (m) e $I_h = 20$ m e $I_v = 15$ m son las longitudes de escala empíricas en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente.

4.2 Diversidad en frecuencia

En instalaciones donde se desea utilizar diversidad en frecuencia, la siguiente relación ofrece la separación de frecuencias adecuada, Δf (MHz), para frecuencias superiores a unos 1 000 MHz:

$$\Delta f = (1,44 f / \theta d) \left(D^2 + I_v^2 \right)^{1/2} \quad \text{MHz} \quad (17)$$

siendo:

f : frecuencia (MHz)

D : diámetro de la antena (m)

θ : ángulo de dispersión (mrad) obtenido a partir de la ecuación (1)

$I_v = 15$ m la longitud de escala indicada anteriormente.

4.3 Diversidad en ángulo

También puede recurrirse a la diversidad en ángulo en la cual dos o más alimentadores de antenas separados en la dirección vertical se utilizan con un reflector común, lo que origina volúmenes comunes con separación vertical distinta, situación similar a la de diversidad en el espacio en la dirección vertical. La separación angular $\Delta \theta$, necesaria para lograr aproximadamente el mismo efecto que en la separación vertical Δv (m) en la ecuación (16) sobre un trayecto aproximadamente simétrico es:

$$\Delta \theta = \text{arc tan} (\Delta v / 500d) \quad (18)$$

donde d es la longitud del trayecto (km).

5 Influencia de la ubicación de las estaciones

La ubicación de los enlaces que utilizan la transmisión transhorizonte requiere cierto cuidado. Los haces de antena no deben quedar dificultados por obstáculos próximos y las antenas deben estar apuntadas ligeramente por encima del horizonte. La elevación óptima precisa es función del trayecto y de las condiciones atmosféricas, pero está comprendida dentro de 0,2 a 0,6 veces el ancho del haz de la antena por encima del horizonte.

Las mediciones efectuadas alejando el haz de una antena con una ganancia de 53 dB de la dirección del horizonte del círculo máximo de dos transmisores de 2 GHz, distantes entre sí 300 km, demostraron un coeficiente de reducción aparente de la potencia recibida de 9 dB por grado. Esto se produjo con aumentos del ángulo de dispersión sobre los tres primeros grados, tanto en acimut como en elevación, para cada trayecto y para una amplia gama de porcentajes de tiempo.

Apéndice 1

Material complementario

1 Variaciones diarias y estacionales de la pérdida de transmisión

En los climas templados, la pérdida básica de transmisión varía anual y diurnamente. Las pérdidas mensuales medias suelen ser mayores en invierno que en verano. La gama es de 10 a 15 dB en los trayectos terrestres de 150-250 km, pero disminuye en función de la distancia. Las mediciones realizadas en la parte europea de la Federación de Rusia, en un trayecto de 920 km a 800 MHz demuestran una diferencia de sólo 2 dB entre las medianas estivales e invernales. Las variaciones diurnas son más pronunciadas en verano, con una gama de 5 a 10 dB en trayectos terrestres de 100-200 km. La mayor pérdida básica de transmisión se produce por la tarde y la menor durante el alba. Los trayectos marítimos se ven afectados con mayor probabilidad por la superrefracción y las capas elevadas que los trayectos terrestres y por eso presentan una variación mayor. Esto puede aplicarse también a las regiones costeras llanas y bajas de las zonas marítimas.

En los climas desérticos secos y calientes, la atenuación es máxima en verano. Las variaciones anuales de las medianas mensuales para trayectos de longitud media exceden de 20 dB. Las variaciones diurnas son muy importantes.

En los climas ecuatoriales, las variaciones anuales o diurnas son en general pequeñas.

En los climas monzónicos en los que se han hecho mediciones (Senegal, Barbados), los valores máximos de N_s se registran en la estación húmeda, pero la atenuación mínima se da entre las estaciones seca y húmeda.

2 Frecuencia de los desvanecimientos rápidos

Los desvanecimientos rápidos se producen varias veces por minuto en las frecuencias bajas y varias veces por segundo en las bandas de ondas decimétricas. La superposición de varias componentes incoherentes variables daría una señal cuya amplitud obedecería a la ley de distribución de Rayleigh; se observa que esta hipótesis se comprueba prácticamente si se analiza la distribución durante intervalos de tiempo de cinco minutos de duración mínima. Esta distribución se modifica cuando una parte importante de la señal está constituida por otros tipos de señales. Se han observado desvanecimientos rápidos, repentinos y profundos, en el momento en que una perturbación frontal afecta a un enlace. La reflexión de las ondas en una aeronave puede provocar desvanecimientos rápidos muy marcados.

La frecuencia de los desvanecimientos rápidos se ha estudiado desde el punto de vista de la función de autocorrelación en el tiempo, lo que conduce a una «frecuencia media de desvanecimiento» durante periodos cortos en que la señal es estacionaria. Se ha observado que el valor mediano de la frecuencia media de desvanecimiento aumenta casi proporcionalmente a la longitud del trayecto y a la frecuencia portadora, y disminuye ligeramente cuando aumenta el diámetro de la antena.

Asimismo, las mediciones efectuadas han mostrado que la rapidez de desvanecimiento es mayor cuando la pérdida de transmisión mediana horaria es superior al valor mediano a largo plazo. En términos generales, se ha observado que la velocidad del desvanecimiento disminuye cuando la pérdida de transmisión desciende por debajo del valor mediano a largo plazo, las velocidades de desvanecimiento más bajas se registran en los casos en que la propagación por conductos es predominante.

El factor más importante es el desvanecimiento de mayor rapidez correspondiente a los valores medianos horarios de pérdida de transmisión que son superiores a la mediana a largo plazo; las pocas mediciones disponibles (en 2 GHz) arrojan unas velocidades de desvanecimiento medianas comprendidas entre unos 20 y 30 desvanecimientos/minuto.

3 Anchura de banda transmisible

Las diversas heterogeneidades que producen la propagación por dispersión crean otros tantos trayectos de propagación diferentes, variables en número y en tiempo de transmisión. Como resultado de ello, no existe una correlación total entre los coeficientes de transmisión para dos frecuencias adyacentes, lo que provoca una distorsión de la señal transmitida. La anchura de banda transmisible es la banda de frecuencias en cuyo interior la distorsión debida a este fenómeno es aceptable para la señal transmitida. Tal anchura de banda depende, pues, tanto de la naturaleza de la señal transmitida (telefonía múltiple, imagen de televisión, etc.) como de la distorsión admisible para esa señal. Los estudios realizados en Francia demuestran que:

- el aumento de la ganancia de las antenas ensancha la banda transmisible en la medida en que se incrementa también la pérdida de ganancia (es decir, para ganancias superiores a unos 30 dB);
 - por otra parte, en igualdad de otras condiciones, la anchura de banda transmisible depende de la estructura de la atmósfera y, por tanto, de la región climática considerada;
 - la anchura de banda transmisible disminuye al aumentar la distancia, pero con arreglo a una ley que difiere según los climas;
 - la anchura de banda transmisible disminuye cuando los ángulos de salida son positivos, y aumenta cuando son negativos.
-