

RECOMENDACIÓN UIT-R P.452-12*

Procedimiento de predicción para evaluar la interferencia en microondas entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra a frecuencias superiores a unos 0,7 GHz**

(Cuestión UIT-R 208/3)

(1970-1974-1978-1982-1986-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2005)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que debido a la congestión del espectro radioeléctrico, deben compartirse las bandas de frecuencias entre distintos servicios terrenales, entre sistemas del mismo servicio y entre sistemas de servicios terrenales y del servicio Tierra-espacio;
- b) que para que los sistemas compartan de forma satisfactoria las mismas bandas de frecuencias, es preciso establecer procedimientos de predicción de propagación de la interferencia que sean precisos y fiables así como aceptables para todas las partes implicadas;
- c) que es necesario efectuar predicciones sobre propagación de la interferencia para cumplir los objetivos de comportamiento en el «mes más desfavorable» y los objetivos de disponibilidad;
- d) que se necesitan métodos de predicción para aplicarlos a todos los tipos de trayecto y en todas las zonas del mundo,

recomienda

1 que, en frecuencias superiores a unos 0,7 GHz, se utilice el procedimiento que aparece en el Anexo 1 a la presente Recomendación para evaluar las pérdidas de propagación disponibles en los cálculos de interferencia en microondas entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra.

Anexo 1

1 Introducción

La congestión del espectro radioeléctrico ha determinado la necesidad de compartir muchas bandas de frecuencias de microondas entre diferentes servicios radioeléctricos y entre las diferentes entidades de explotación de servicios radioeléctricos similares. Para garantizar la coexistencia satisfactoria de los sistemas terrenos y terreno-espaciales existentes, es importante estar en condiciones de predecir con una precisión razonable la interferencia potencial que pueda existir entre ellos, utilizando procedimientos y modelos de predicción aceptables a todas las partes implicadas, y de precisión y fiabilidad demostradas.

* *Nota de la Secretaría de la BR* – En noviembre de 2006 se efectuaron modificaciones de redacción en la nota de pie de página, infra.

** En las páginas de la dirección web del UIT-R relativas a la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones puede obtenerse un programa informático de hoja de cálculo asociado con los procedimientos de predicción en condiciones de cielo despejado que se describen en esta Recomendación.

Pueden existir muchos tipos y combinaciones de trayectos de interferencia entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra y entre esas estaciones y las estaciones espaciales, siendo precisos métodos de predicción para cada situación. Este Anexo en particular aborda uno de los grupos de problemas de interferencia más importantes, a saber el de las situaciones en las que hay posibilidad de interferencia entre estaciones radioeléctricas de microondas ubicadas en la superficie de la Tierra.

El procedimiento de predicción que se detalla es adecuado para estaciones de radiocomunicaciones que funcionan en la gama de frecuencias de unos 0,7 GHz a 50 GHz. Se considera que el método es fiable para determinar el valor mediano de las pérdidas básicas de transmisión en frecuencias de hasta 0,1 GHz. Sin embargo, el modelo de propagación por conductos, que es importante para bajos porcentajes de tiempo, no ha sido aprobado para frecuencias inferiores a unos 0,7 GHz.

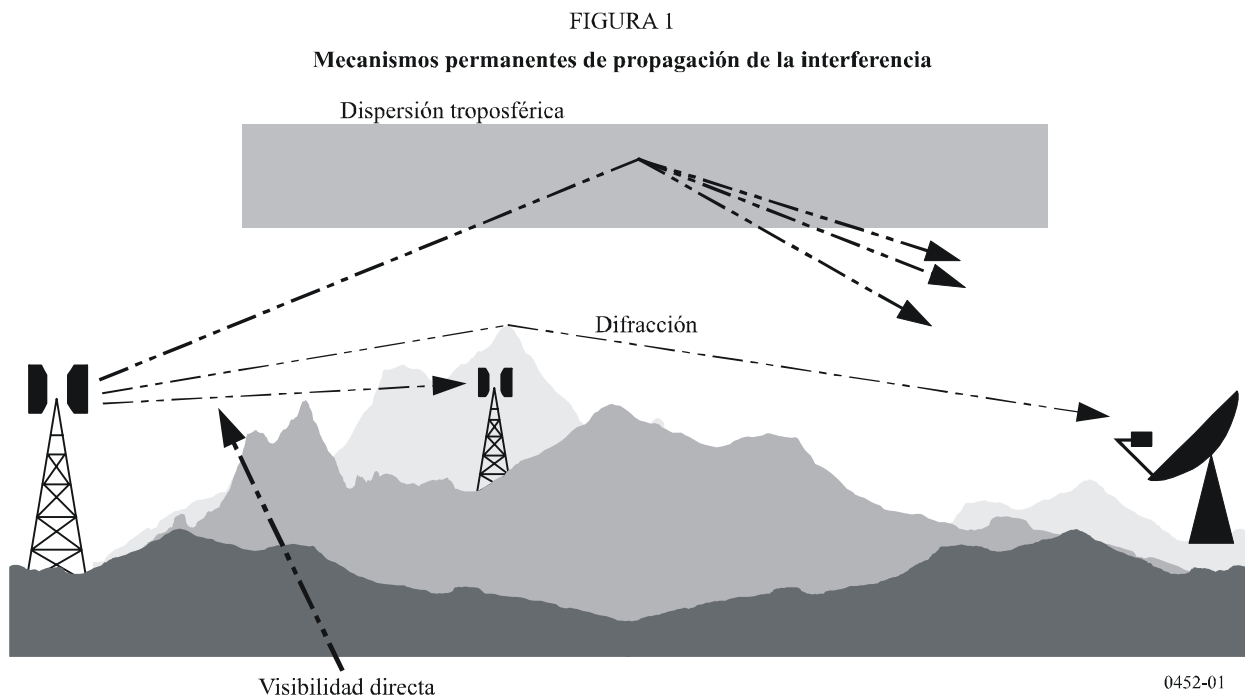
El método incluye un amplio conjunto de modelos de propagación para asegurar que las predicciones abarcan todos los mecanismos de propagación significativos que puedan surgir. Se presentan métodos para analizar las características radiometeorológicas y topográficas del trayecto que permitan formular una predicción para cualquier tipo práctico de trayecto de interferencia que entre en el marco del procedimiento hasta una distancia límite de 10 000 km.

2 Mecanismos de propagación de la interferencia

La propagación de la interferencia en microondas puede presentarse mediante diversos mecanismos y el predominio de cualquiera de ellos depende de factores tales como el clima, el porcentaje de tiempo en cuestión, la distancia y la topografía del trayecto. En cualquier momento puede darse un único mecanismo o más de uno. A continuación se presentan los principales mecanismos de propagación de la interferencia.

- *Visibilidad directa* (Fig. 1): El mecanismo más directo de propagación de la interferencia es aquel en que existe un trayecto de visibilidad mutua en condiciones atmosféricas de equilibrio. Sin embargo, puede surgir un problema adicional cuando la difracción del subtrayecto produce un ligero aumento del nivel de la señal. Además, en todos los trayectos, excepto en los más cortos (es decir, trayectos mayores de unos 5 km) los niveles de la señal pueden a menudo aumentar significativamente durante periodos cortos de tiempo debido a los efectos de propagación multitrayecto y de enfoque resultantes de la estratificación atmosférica (véase la Fig. 2).
- *Difracción* (Fig. 1): A partir de la situación de visibilidad directa y en condiciones normales, los efectos de difracción suelen ser dominantes cuando aparecen niveles significativos de la señal. Para los servicios en los que los problemas de anomalías de corta duración no son importantes, la exactitud del modelo de difracción determina a menudo la densidad de los sistemas de microondas que pueden implantarse. La capacidad de predicción de la difracción debe ser tal que permita incluir las situaciones de terreno liso, de obstáculos discretos y de terreno irregular (no estructurado).
- *Dispersión troposférica* (Fig. 1): Este mecanismo define el nivel de interferencia de fondo para trayectos más largos (por ejemplo, 100-150 km) en los que el campo de difracción se hace muy débil. No obstante, con excepción de algunos pocos casos especiales en los que intervienen estaciones terrenales sensibles o fuentes de interferencia de muy alta potencia (por ejemplo, sistemas de radar), la interferencia a través del mecanismo de dispersión troposférica tendrá un nivel demasiado reducido como para ser considerada significativa.

- *Propagación por conductos de superficie* (Fig. 2): Éste es el mecanismo de interferencia de corta duración más importante sobre el agua y en zonas de tierra costeras planas, y puede dar lugar a niveles de señal elevados en distancias largas (más de 500 km sobre el mar). Dichas señales pueden exceder el nivel equivalente de «espacio libre» en determinadas condiciones.



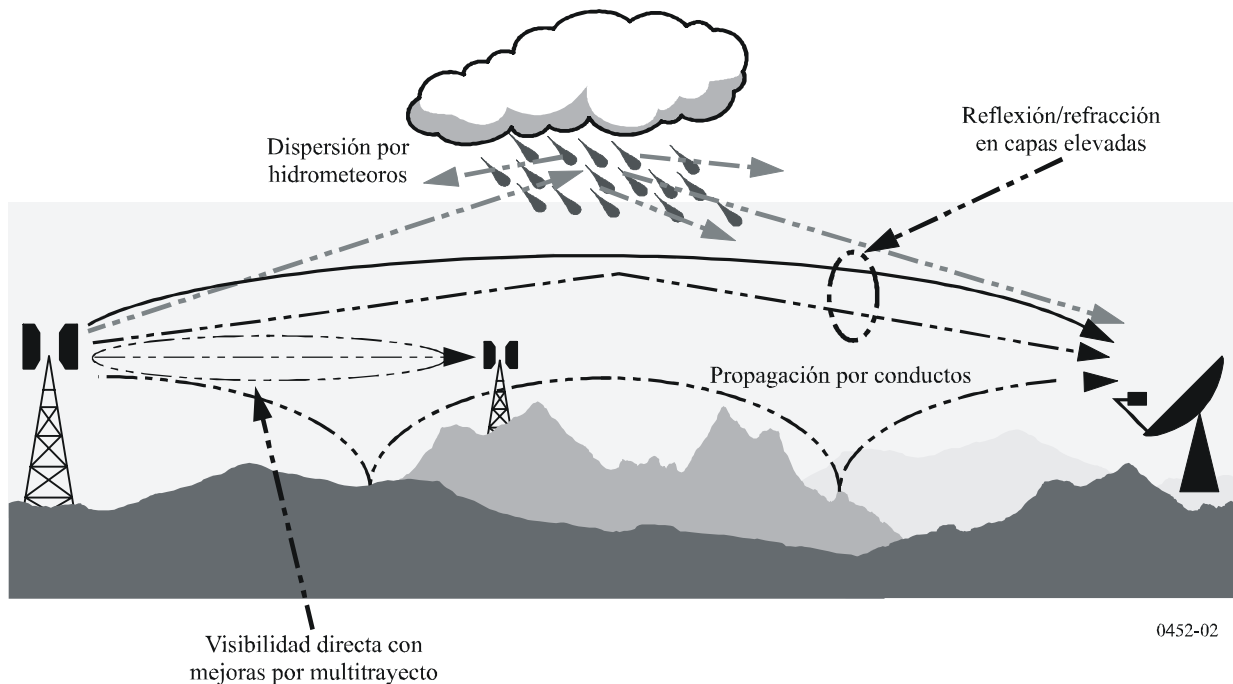
- *Reflexión y refracción en capas elevadas* (Fig. 2): El tratamiento de la reflexión y/o la refracción en capas de alturas de hasta algunos cientos de metros reviste gran importancia pues estos mecanismos pueden hacer que las señales superen las pérdidas de difracción del terreno muy netamente en situaciones favorables de geometría del trayecto. Una vez más, la repercusión puede ser significativa en distancias bastante largas (hasta 250-300 km).
- *Dispersión por hidrometeoros* (Fig. 2): La dispersión por hidrometeoros puede ser una fuente potencial de interferencia entre transmisores de enlaces terrenales y estaciones terrenas porque puede actuar prácticamente de forma omnidireccional y, por tanto, puede tener una repercusión más allá del trayecto de interferencia del círculo máximo. No obstante, los niveles de señal de interferencia son bastante reducidos y no suelen representar un problema significativo.

Un problema fundamental en la predicción de la interferencia (que además es común a todos los procedimientos de predicción troposférica) es la dificultad de establecer un conjunto coherente y unificado de métodos prácticos que abarquen una amplia gama de distancias y porcentajes de tiempo, es decir; para la atmósfera real en la que un mecanismo que predomina se mezcla gradualmente con otro a medida que cambian las condiciones meteorológicas y/o del trayecto. Especialmente en estas regiones de transición, puede producirse un nivel determinado de señal durante un porcentaje del tiempo total que se deba a la suma de los distintos mecanismos. En este

procedimiento se ha mantenido deliberadamente el enfoque que establece la separación entre las predicciones de los niveles de interferencia para los distintos mecanismos de propagación, de modo que puedan combinarse en una predicción global para el trayecto. Esta predicción global se lleva a cabo utilizando una técnica de combinación que asegura para cualquier distancia de trayecto y porcentaje de tiempo dados que la amplificación de la señal en el modelo de línea de visibilidad directa teórico equivalente es la más alta que se puede alcanzar.

FIGURA 2

Mecanismos de propagación anómala de la interferencia (corta duración)



3 Predicción de la interferencia en cielo despejado

3.1 Comentarios generales

El procedimiento utiliza cinco modelos de propagación para tratar los mecanismos de propagación en cielo despejado que se describen en el § 2. Estos modelos son los siguientes:

- *visibilidad directa* (que incluye las amplificaciones de la señal debidas a los efectos de propagación multitrayecto y de enfoque);
- *difracción* (que abarca los casos de tierra lisa, terreno irregular y subtrayecto);
- *dispersión troposférica*;
- *propagación anómala* (propagación por conductos y por reflexión/refracción en las capas);
- *variación altura-ganancia de la ocupación del suelo* (cuando proceda).

Dependiendo del tipo de trayecto, que se determina mediante un análisis del perfil de éste, se aplican uno o más de estos modelos para la predicción de las pérdidas básicas de transmisión.

3.2 Formulaci3n de una predicci3n

3.2.1 Resumen del procedimiento

Los pasos necesarios para realizar una predicci3n son los siguientes:

Paso 1: Datos de partida

Los datos b3sicos de partida necesarios para este procedimiento figuran en el Cuadro 1. Todo el resto de la informaci3n necesaria se deriva de estos datos b3sicos durante la ejecuci3n del procedimiento.

CUADRO 1
Datos b3sicos de partida

Par3metro	Resoluci3n preferida	Descripci3n
f	0,01	Frecuencia (GHz)
p	0,001	Porcentaje de tiempo requerido durante el cual no se rebasa la p3rdida b3sica de transmisi3n
φ_t, φ_r	0,001	Latitud de la estaci3n (grados)
ψ_t, ψ_r	0,001	Longitud de la estaci3n (grados)
h_{tg}, h_{rg}	1	Altura del centro de la antena sobre el nivel del suelo (m)
h_{ts}, h_{rs}	1	Altura del centro de la antena sobre el nivel medio del mar (m)
G_t, G_r	0,1	Ganancia de la antena en la direcci3n del horizonte a lo largo del trayecto ortodr3mico o del c3rculo m3ximo de interferencia (dBi)

NOTA 1 – Para distinguir entre las estaciones:

t : estaci3n interferente

r : estaci3n interferida.

Paso 2: Selecci3n de una predicci3n de a3o medio o de mes m3s desfavorable

La elecci3n de predicci3n anual o de «mes m3s desfavorable» viene dictada generalmente por los objetivos de calidad total (es decir, caracter3sticas y disponibilidad) del sistema radioel3ctrico interferido en el extremo receptor del trayecto de interferencia. Como la interferencia es a menudo un problema bidireccional, puede ser necesario evaluar dos conjuntos de este tipo de objetivos de calidad, a fin de determinar el sentido de transmisi3n m3s desfavorable en el que deben basarse las p3rdidas b3sicas de transmisi3n admisibles m3nimas. En la mayor3a de los casos, los objetivos de calidad se expresarán en t3rminos de porcentaje de «cualquier mes» y por tanto, se necesitarán los datos del mes m3s desfavorable.

Los modelos de predicci3n de la propagaci3n predicen la distribuci3n anual de las p3rdidas b3sicas de transmisi3n. Para las predicci3nes del a3o medio se utilizan directamente en el procedimiento de predicci3n los porcentajes de tiempo, p , para los que no se exceden valores particulares de p3rdidas

básicas de transmisión. Si se requieren predicciones del mes más desfavorable medio, debe calcularse el porcentaje de tiempo anual equivalente, p , del porcentaje de tiempo del mes más desfavorable, p_w , para la latitud del centro del trayecto, φ , utilizando:

$$p = 10 \left(\frac{\log(p_w) + \log(G_L) - 0,186 \omega - 0,444}{0,816 + 0,078 \omega} \right) \% \quad (1)$$

donde:

ω : fracción de trayecto sobre el agua (véase el Cuadro 3).

$$G_L = \begin{cases} \sqrt{1,1 + |\cos 2 \varphi|^{0,7}} & \text{para } |\varphi| \leq 45^\circ \\ \sqrt{1,1 - |\cos 2 \varphi|^{0,7}} & \text{para } |\varphi| > 45^\circ \end{cases} \quad (1a)$$

Si resulta necesario, se limitará el valor de p de forma que $12 p \geq p_w$.

Véase que la latitud φ (grados) se considera positiva en el hemisferio septentrional.

El resultado calculado representará entonces las pérdidas básicas de transmisión para el porcentaje de tiempo del mes más desfavorable requerido, p_w %.

Paso 3: Datos radiometeorológicos

El modelo de predicción utiliza tres parámetros radiometeorológicos para describir la variabilidad de las condiciones de propagación de fondo y anómala en los diferentes lugares del mundo.

- ΔN (unidades N/km), la proporción de variación del índice medio de refracción radio-eléctrica a lo largo del primer kilómetro de la atmósfera, proporciona los datos en que basar el cálculo del radio efectivo de la Tierra apropiado para el análisis del perfil del trayecto y del obstáculo de difracción. Las Figs. 11 y 12 presentan, respectivamente, los mapas mundiales de valores de un año promedio ΔN y valores medios mensuales máximos para las predicciones del mes más desfavorable (véase que ΔN es positivo en este procedimiento).
- β_0 (%), el porcentaje de tiempo en el que pueden esperarse, en los primeros 100 m de una atmósfera baja, sobretasas de la variación de la refracción superiores a 100 unidades N/km en la atmósfera inferior, se utiliza para estimar la incidencia de la propagación anómala totalmente desarrollada en la latitud considerada. El valor de β_0 a utilizar es el adecuado para la latitud del centro del trayecto.
- N_0 (unidades N), refractividad de la superficie a nivel del mar, se utiliza únicamente en el modelo de dispersión troposférica como medida de la variabilidad con el emplazamiento del mecanismo de dispersión troposférica. La Fig. 13 muestra valores anuales de N_0 . Como el cálculo del trayecto de dispersión se basa en una geometría de trayecto determinada por los valores anuales o del mes más desfavorable de ΔN , ya no hay necesidad adicional de obtener los valores de N_0 correspondientes al mes más desfavorable. Los valores correctos de ΔN y N_0 vienen dados por los valores del centro del trayecto obtenidos a partir de los mapas adecuados.

La incidencia puntual de la propagación anómala, β_0 (%), en el centro del trayecto, se determina utilizando la expresión:

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0,015|\varphi| + 1,67} \mu_1 \mu_4 & \% \quad \text{para } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 4,17 \mu_1 \mu_4 & \% \quad \text{para } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (2)$$

donde:

φ : latitud del centro del trayecto (grados).

El parámetro μ_1 depende del grado en que el trayecto esté sobre la tierra (en el interior y/o costero) y sobre el agua, viniendo dado por:

$$\mu_1 = \left[10^{\frac{-d_{tm}}{16 - 6,6\tau}} + \left[10^{-(0,496 + 0,354\tau)} \right]^5 \right]^{0,2} \quad (3)$$

donde el valor de μ_1 debe limitarse a $\mu_1 \leq 1$,

con:

$$\tau = \left[1 - e^{-(4,12 \times 10^{-4} \times d_{tm}^{2,41})} \right] \quad (3a)$$

donde:

d_{tm} : sección continua más larga sobre la tierra (interior + costera) del trayecto en el círculo máximo (km)

d_{im} : sección continua más larga sobre la tierra (interior) del trayecto en el círculo máximo (km).

Las zonas radioclimáticas a utilizar para la obtención de d_{tm} y d_{im} se definen en el Cuadro 2.

$$\mu_4 = \begin{cases} 10^{(-0,935 + 0,0176|\varphi|)\log \mu_1} & \text{para } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 10^{0,3 \log \mu_1} & \text{para } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (4)$$

CUADRO 2

Zonas radioclimáticas

Tipo de zona	Código	Definición
Tierra costera	A1	Zonas de tierra costeras y del litoral, es decir la tierra adyacente al mar hasta una altitud de 100 m con respecto al nivel medio del mar o del agua pero hasta una distancia de 50 km desde la zona marítima más próxima. Cuando no se dispone de datos precisos de 100 m, puede utilizarse un valor aproximado, por ejemplo, 300 pies
Tierra interior	A2	Tierra, a excepción de las zonas costeras y del litoral definidas en el punto anterior como «tierra costera»
Mar	B	Mares, océanos y otras grandes masas de agua (cuya cobertura equivalga a un círculo de al menos 100 km de diámetro)

Grandes masas de agua interiores

Una «gran» masa de aguas interiores, que se considera perteneciente a la Zona B, se define como aquella cuya superficie es al menos 7800 km², pero excluyendo la superficie de ríos. Las islas situadas dentro de dichas masas de agua han de considerarse como si fueran agua en el cálculo de esta zona si tienen elevaciones inferiores a 100 m por encima del nivel medio del agua en más del 90% de su superficie. Las islas que no cumplan estos criterios deben considerarse como tierra a efectos del cálculo de la superficie de agua.

Grandes lagos interiores o zonas de tierras húmedas

Las grandes zonas interiores superiores a 7800 km² que contengan múltiples pequeños lagos o una red fluvial deben considerarse como Zona A1 «costera» por las administraciones cuando dicha zona comprenda más del 50% de agua y al mismo tiempo más del 90% de la tierra no alcanza los 100 m por encima del nivel medio del agua.

Las regiones climáticas pertenecientes a la Zona A1, las grandes masas de agua interiores y los grandes lagos y regiones húmedas interiores son difíciles de determinar de manera inequívoca. Por tanto, se invita a las administraciones a que inscriban en la Oficina de Radiocomunicaciones (BR) de la UIT estas regiones dentro de sus límites territoriales identificándolas como pertenecientes a una de estas categorías. En ausencia de la información registrada a este efecto, se considerará que todas las zonas terrestres pertenecen a la Zona climática A2.

Para lograr una máxima adaptación de los resultados entre administraciones, se recomienda vivamente que los cálculos según este procedimiento se basen en el mapa mundial digitalizado de la UIT (IDWM) que está disponible en la BR para entornos de ordenadores corporativos y personales.

Radio efectivo de la Tierra

El factor k_{50} del valor mediano del radio efectivo de la Tierra para el trayecto se determina utilizando la expresión:

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N} \quad (5)$$

Suponiendo un radio real de la Tierra de 6371 km, el valor mediano del radio efectivo de la Tierra, a_e , puede determinarse de la siguiente manera:

$$a_e = 6371 \cdot k_{50} \quad \text{km} \quad (6)$$

Paso 4: Análisis del perfil del trayecto

Los valores de una serie de parámetros relacionados con el trayecto que son necesarios para el cálculo y que se indican en el Cuadro 3, deben obtenerse a través de un análisis inicial del perfil del trayecto basado en el valor de a_e que viene dado por la ecuación (6). En el Apéndice 2 figura información sobre la obtención, determinación y análisis del perfil del trayecto. Habiéndose analizado el perfil de este modo, el trayecto quedará también clasificado en una de las tres categorías geométricas indicadas en el Cuadro 4.

NOTA 1 – La determinación de valores de parámetros adicionales relacionados con el perfil, y que son necesarios específicamente para los cálculos de la difracción, se explica en la Recomendación UIT-R P.526.

Paso 5: Cálculo de predicciones de propagación

El Cuadro 4 indica, para cada tipo de trayecto, los modelos de propagación apropiados así como las condiciones en las que deben aplicarse cada uno de ellos, para obtener la predicción global correcta. Las ecuaciones necesarias para estas predicciones individuales figuran en los textos expuestos en el § 4.7. Para los trayectos transhorizonte, se reutilizan dentro del proceso de combinación los elementos de ambos modelos de línea de visibilidad directa y de difracción. Una vez logrado esto para cada uno de los porcentajes de tiempo requeridos, la predicción queda concluida. Se debe observar que la ecuación (8c) utilizada para la combinación es una mezcla matemática para evitar cambios bruscos de pendiente pero no la suma lineal de las potencias eléctricas.

CUADRO 3

Parámetros resultantes del análisis del perfil de trayecto

Tipo de trayecto	Parámetro	Descripción
Transhorizonte	d	Distancia del trayecto a lo largo del círculo máximo (km)
Transhorizonte	d_{lt}, d_{lr}	Distancia desde las antenas de transmisión y de recepción a sus respectivos horizontes (km)
Transhorizonte	θ_t, θ_r	Ángulos de elevación de las antenas de transmisión y de recepción respecto del horizonte, respectivamente (mrad)
Transhorizonte	θ	Distancia angular del trayecto (mrad)
Todos	h_{ts}, h_{rs}	Altura del centro de la antena sobre el nivel medio del mar (m)
Transhorizonte	h_{te}, h_{re}	Alturas efectivas de las antenas sobre el terreno (m) (para definiciones véase el Apéndice 2)
Todos	$d_b^{(1)}$	Longitud combinada de las secciones del trayecto sobre el agua (km)
Todos	$\omega^{(1)}$	Fracción del trayecto total sobre el agua: $\omega = d_b/d \tag{7}$ siendo d la distancia de círculo máximo (km) calculada utilizando la ecuación (37). Para trayectos realizados totalmente sobre tierra $\omega = 0$
Transhorizonte	$d_{ct}^{(1)}$	Distancia sobre tierra desde el primer terminal (fuente interferente) hasta la costa, a lo largo del trayecto de círculo máximo de la interferencia (km). En el caso de un terminal ubicado en un barco o en una plataforma marítima d_{ct} es cero
Transhorizonte	$d_{cr}^{(1)}$	Distancia correspondiente para la segunda estación (interferida) (km)

⁽¹⁾ Estos parámetros sólo se necesitan cuando el trayecto tiene una o más secciones sobre el agua.

Los valores exactos de d_{ct} y d_{cr} sólo tienen importancia si d_{ct} y $d_{cr} \leq 5$ km. Si, en cualquiera de los dos casos o en ambos, las distancias son eminentemente superiores a 5 km, sólo es necesario señalar la condición de > 5 km. De hecho, sólo será necesaria la evaluación detallada de estos dos parámetros en algunos trayectos de interferencia.

CUADRO 4

Clasificaciones de los trayectos de interferencia y requisitos del modelo de propagación

Clasificación	Modelos necesarios
Visibilidad directa con la primera zona de Fresnel libre de obstáculos	Visibilidad directa (§ 4.2) Pérdidas debidas a la ocupación del suelo (§ 4.5 cuando proceda)
Visibilidad directa con difracción en subtrayecto, es decir; incursión del terreno en la 1ª zona de Fresnel	Visibilidad directa (§ 4.2) Difracción (§ 4.3) Pérdidas debidas a la ocupación del suelo (§ 4.3 cuando proceda)
Transhorizonte	Difracción (§ 4.3 para $d \leq 200$ km) Propagación por conductos/reflexión en las capas (§ 4.5) Dispersión troposférica (§ 4.4) Pérdidas debidas a la ocupación del suelo (§ 4.6 cuando proceda)

CUADRO 5

Métodos para obtener las predicciones generales

Tipo de trayecto	Actuación necesaria
Visibilidad directa	<p>La predicción se obtiene sumando las pérdidas de los modelos de visibilidad directa y de ocupación del suelo, es decir:</p> $L_b(p) = L_{b0}(p) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (8a)$ <p>siendo:</p> <p>$L_{b0}(p)$: pérdida de transmisión básica prevista no excedida durante el $p\%$ del tiempo del modelo de visibilidad directa</p> <p>A_{ht}, A_{hr}: pérdidas adicionales debidas a efectos de altura-ganancia en la ocupación del suelo local</p>
Visibilidad directa con difracción de subtrayecto	<p>La predicción se obtiene sumando las pérdidas de los modelos de visibilidad directa (subtrayecto) y de ocupación del suelo, es decir:</p> $L_b(p) = L_{b0}(p) + L_{ds}(p) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (8b)$ <p>siendo:</p> <p>$L_{ds}(p)$: predicción para $p\%$ de tiempo que viene dada por el elemento de pérdidas de difracción del subtrayecto del modelo de difracción</p>
Transhorizonte	<p>La predicción general se obtiene en tres etapas:</p> <p>Las pérdidas de propagación por conducto/reflexión en las capas sin modificar L_{ba} se obtienen utilizando el método del § 4.5.</p> <p>La pérdida del modelo modificado de propagación por conductos y por reflexión en las capas, $L_{bam}(p)$, se determina aplicando el algoritmo del § 4.7.1.</p> <p>– La predicción general puede obtenerse, por consiguiente, aplicando el siguiente algoritmo auxiliar:</p> $L_b(p) - 5 \log(10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bd}} + 10^{-0,2L_{bam}}) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (8c)$ <p>donde $L_{bs}(p)$ y $L_{bd}(p)$ son las pérdidas individuales predichas para el $p\%$ de tiempo que dan respectivamente los modelos de propagación de difracción y de dispersión troposférica respectivamente.</p> <p>NOTA 1 – Cuando no se haya propuesto un modelo para un trayecto (por no satisfacerse las condiciones del Cuadro 4) deben omitirse de la ecuación (8c) los términos correspondientes.</p>

4 Modelos de propagación en cielo despejado

4.1 Generalidades

Los procedimientos anteriores invocan uno o varios modelos de propagación diferentes para formular los componentes de la predicción general. Dichos modelos de propagación se presentan en este punto.

4.2 Propagación con visibilidad directa (incluidos los efectos a corto plazo)

La pérdida de transmisión básica $L_{b0}(p)$ no excedida durante el porcentaje de tiempo, $p\%$, que experimenta la propagación con visibilidad directa viene dada por:

$$L_{b0}(p) = 92,5 + 20 \log f + 20 \log d + E_s(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (9)$$

donde:

$E_s(p)$: corrección por los efectos de los trayectos múltiples y del enfoque:

$$E_s(p) = 2,6 (1 - e^{-d/10}) \log (p / 50) \quad \text{dB} \quad (10)$$

A_g : absorción gaseosa total (dB):

$$A_g = [\gamma_o + \gamma_w(\rho)] d \quad \text{dB} \quad (11)$$

donde:

$\gamma_o, \gamma_w(\rho)$: atenuaciones específicas producidas por el aire seco y el vapor de agua, respectivamente, y se hallan mediante las ecuaciones de la Recomendación UIT-R P.676

ρ : densidad del vapor de agua:

$$\rho = 7,5 + 2,5 \omega \quad \text{g/m}^3 \quad (11a)$$

ω : fracción del trayecto total sobre el agua.

4.3 Difracción

La variabilidad temporal del exceso de pérdidas debidas al mecanismo de difracción se supone que es el resultado de cambios en el índice de variación global de la refractividad radioeléctrica atmosférica, es decir, que a medida que se reduce el porcentaje de tiempo, p , se supone que aumenta el factor del radio de la Tierra, $k(p)$. Este proceso se considera válido para $\beta_0 \leq p \leq 50\%$. Para porcentajes de tiempo inferiores a β_0 los niveles de señal están dominados por mecanismos de propagación anómala más que por las características de refractividad global de la atmósfera. Por tanto, para valores de p inferiores a β_0 , $k(p)$ tiene el valor $k(\beta_0)$.

El valor de radio efectivo de la Tierra a utilizar en los cálculos de la difracción viene dado por:

$$a(p) = 6371 \cdot k(p) \quad \text{km} \quad (12)$$

donde:

p : puede tomar los valores 50 o β_0

$k(50\%)$: viene dado por la ecuación (5)

$k(\beta_0) = 3$.

El exceso de pérdidas debidas a los efectos de difracción, $L_d(p)$ se calcula por el método descrito en la Recomendación UIT-R P.526, combinado con una distribución log-normal de las pérdidas entre el 50% y β_0 como sigue:

- para $p = 50\%$, $L_d(50\%)$ se calcula utilizando el método descrito en la Recomendación UIT-R P.526 para el radio efectivo mediano de la Tierra $a(50\%)$;
- para $p \leq \beta_0$, $L_d(\beta_0)$ se calcula utilizando el método descrito en la Recomendación UIT-R P.526 para el radio efectivo de la Tierra $a(\beta_0)$ utilizando los obstáculos en filo de cuchillo identificados para el caso 50% (valor de la mediana);
- para $\beta_0 < p < 50\%$ $L_d(p)$ viene dado por:

$$L_d(p) = L_d(50\%) - F_i(p) [L_d(50\%) - L_d(\beta_0)] \quad (13)$$

donde:

F_i : factor de interpolación basado en una distribución log-normal de las pérdidas de difracción en la gama $\beta_0\% < p < 50\%$, que viene dado por:

$$F_i = I(p/100) / I(\beta_0/100) \quad (13a)$$

donde $I(x)$ es la función normal acumulativa inversa. El Apéndice 4 presenta una aproximación adecuada de $I(x)$ que puede utilizarse con confianza para $x < 0,5$.

NOTA 1 – Puede utilizarse la Recomendación UIT-R P.526 para el cálculo de las pérdidas de difracción a lo largo de un trayecto de visibilidad directa con obstrucción de subtrayecto o para un trayecto transhorizonte.

La pérdida básica de transmisión no excedida durante el $p\%$ del tiempo para un trayecto con difracción viene dada por:

$$L_{bd}(p) = 92,5 + 20 \log f + 20 \log d + L_d(p) + E_{sd}(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (14)$$

donde:

$E_{sd}(p)$: corrección por los efectos de propagación multitrayecto entre las antenas y los obstáculos del horizonte:

$$E_{sd}(p) = 2,6 \left(1 - e^{-(d_{lr} + d_{lr})/10} \right) \log \left(\frac{p}{50} \right) \quad \text{dB} \quad (14a)$$

A_g : absorción gaseosa determinada utilizando las ecuaciones (11) y (11a).

4.4 Dispersión troposférica (Notas 1 y 2)

NOTA 1 – Para porcentajes de tiempo muy inferiores al 50%, es difícil separar el modo real de dispersión troposférica de otros fenómenos de propagación secundaria que pueden dar lugar a efectos similares de propagación. El modelo de «dispersión troposférica» adoptado en esta Recomendación es por tanto una generalización empírica del concepto de dispersión troposférica que también abarca estos efectos de propagación secundaria. De esta manera se puede efectuar de manera coherente la predicción continua de las pérdidas básicas de transmisión en la gama de porcentajes de tiempo, p , que va desde el 0,001% al 50%, enlazando de este modo el modelo de propagación por conductos y de reflexión en capas durante pequeños porcentajes de tiempo con el «modo de dispersión» real, que es el adecuado para el débil campo residual excedido durante el porcentaje de tiempo más largo.

NOTA 2 – Este modelo de predicción de la dispersión troposférica se ha obtenido con fines de predicción de la interferencia y no es adecuado para el cálculo de las condiciones de propagación en los sistemas de reveladores radioeléctricos transhorizonte (radioenlaces transhorizonte) cuando éstos afecten a sus aspectos de calidad funcional durante tiempos superiores al 50% del de transmisión.

Las pérdidas básicas de transmisión debidas a la dispersión troposférica, $L_{bs}(p)$ (dB) no excedidas durante cualquier porcentaje de tiempo, p , inferior al 50%, vienen dadas por:

$$L_{bs}(p) = 190 + L_f + 20 \log d + 0,573 \theta - 0,15 N_0 + L_c + A_g - 10,1 [-\log(p/50)]^{0,7} \quad \text{dB} \quad (15)$$

siendo:

L_f : pérdidas dependientes de la frecuencia:

$$L_f = 25 \log f - 2,5 [\log(f/2)]^2 \quad \text{dB} \quad (15a)$$

L_c : pérdidas de acoplamiento en apertura al centro (dB):

$$L_c = 0,051 \cdot e^{0,055(G_t + G_r)} \quad \text{dB} \quad (15b)$$

N_0 : refractividad de la superficie a nivel del mar medida en el punto central de los trayectos, según la Fig. 6

A_g : absorción gaseosa derivada de la ecuación (11), utilizando $\rho = 3 \text{ g/m}^3$ para toda la longitud del trayecto.

4.5 Propagación por conductos y por reflexión en las capas

La predicción de las pérdidas básicas de transmisión, $L_{ba}(p)$ (dB), que se producen durante periodos de propagación anómala (propagación por conductos y por reflexión en las capas), se basa en la función siguiente:

$$L_{ba}(p) = A_f + A_d(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (16)$$

siendo:

A_f : pérdidas totales o pérdidas fijas de acoplamiento (excepto para las pérdidas debidas a la ocupación del suelo) entre las antenas y la estructura de propagación anómala dentro de la atmósfera:

$$A_f = 102,45 + 20 \log f + 20 \log(d_{lt} + d_{lr}) + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{dB} \quad (17)$$

A_{st}, A_{sr} : pérdidas de difracción debidas al apantallamiento del emplazamiento para las estaciones interferente e interferida, respectivamente:

$$A_{st, sr} = \begin{cases} 20 \log \left[1 + 0,361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2} \right] + 0,264 \theta''_{t,r} f^{1/3} \quad \text{dB} & \text{para } \theta''_{t,r} > 0 \text{ mrad} \\ 0 \quad \text{dB} & \text{para } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ mrad} \end{cases} \quad (18)$$

donde:

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \quad (18a)$$

A_{ct}, A_{cr} : correcciones del acoplamiento por conductos en la superficie sobre el mar, para las estaciones interferente e interferida, respectivamente:

$$A_{ct, cr} = -3 e^{-0,25 d_{ct, cr}^2} \left[1 + \text{tgh} (0,07(50 - h_{ts, rs})) \right] \quad \text{dB para } \omega \geq 0,75$$

$$d_{ct, cr} \leq d_{lt, lr} \quad (19)$$

$$d_{ct, cr} \leq 5 \text{ km}$$

$$A_{ct, cr} = 0 \quad \text{dB para todas las demás condiciones} \quad (19a)$$

Es útil señalar el conjunto limitado de condiciones para las que se necesita la ecuación (19).

$A_d(p)$: pérdidas dependientes del porcentaje de tiempo y de la distancia angular dentro del mecanismo de propagación anómala:

$$A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \quad \text{dB} \quad (20)$$

siendo:

γ_d : atenuación específica:

$$\gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{dB/mrad} \quad (21)$$

θ' : distancia angular (corregida cuando proceda con la ecuación (22a) para poder aplicar el modelo de apantallamiento del emplazamiento de la ecuación (18)):

$$\theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{mrad} \quad (22)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{mrad} & \text{para } \theta_{t,r} \leq 0,1 d_{lt,lr} & \text{mrad} \\ 0,1 d_{lt,lr} & \text{mrad} & \text{para } \theta_{t,r} > 0,1 d_{lt,lr} & \text{mrad} \end{cases} \quad (22a)$$

$A(p)$: variabilidad del porcentaje de tiempo (distribución acumulativa):

$$A(p) = -12 + (1,2 + 3,7 \times 10^{-3} d) \log \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p}{\beta} \right)^\Gamma \quad \text{dB} \quad (23)$$

$$\Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \log \beta)^{1,012}} \times e^{-(9,51 - 4,8 \log \beta + 0,198 (\log \beta)^2) \times 10^{-6} \cdot d^{1,13}} \quad (23a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \% \quad (24)$$

μ_2 : corrección por la geometría del trayecto:

$$\mu_2 = \left[\frac{500}{a_e} \frac{d^2}{(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}})^2} \right]^\alpha \quad (25)$$

El valor de μ_2 no excederá de 1.

$$\alpha = -0,6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau \quad (25a)$$

donde:

$$\varepsilon = 3,5$$

τ : definida en la ecuación (3a)

y el valor de α no será inferior a $-3,4$

μ_3 : corrección por la rugosidad del terreno:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{para } h_m \leq 10 \text{ m} \\ \exp \left[-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10) (43 + 6 d_i) \right] & \text{para } h_m > 10 \text{ m} \end{cases} \quad (26)$$

$$d_i = \min (d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (26a)$$

A_g : absorción gaseosa total determinada a partir de las ecuaciones (11) y (11a).

Los términos restantes se han definido en los Cuadros 1 y 2 y en el Apéndice 2.

4.6 Pérdidas debidas a la ocupación del suelo adicionales

4.6.1 Generalidades

En términos de protección contra la interferencia, puede obtenerse una ventaja considerable de las pérdidas de difracción adicionales que pueden insertarse en antenas localizadas en zonas con cierto grado de ocupación del suelo (edificios, vegetación, etc.). Este procedimiento permite añadir dichas pérdidas debidas a la ocupación del suelo en uno o ambos extremos del trayecto, en aquellas situaciones en que el escenario de la ocupación del suelo se conoce. Cuando hay dudas en cuanto a la naturaleza de la ocupación del suelo, no deben incluirse estas pérdidas adicionales.

Las pérdidas por la ocupación del suelo se denominan A_{ht} (dB) o A_{hr} (dB) para las estaciones interferente e interferida, respectivamente. La protección adicional disponible depende de la altura y, por tanto, su modelo es una función de altura-ganancia normalizada respecto a la altura nominal de la ocupación del suelo. Se dispone de alturas nominales de la ocupación del suelo para una serie de ellos.

La corrección se aplica a todas las predicciones de cielo despejado de esta Recomendación, es decir, para todos los modos de propagación y porcentajes de tiempo.

4.6.2 Categorías de ocupación del suelo

El Cuadro 6 indica las categorías de ocupación del suelo (o de cobertura del terreno) definidas en la Recomendación UIT-R P.1058 a las que puede aplicarse la corrección de altura-ganancia. Se considera que la altura nominal de la ocupación del suelo, h_a (m), y la distancia respecto a la antena, d_k (km), son valores «promedio» más representativos del tipo de ocupación del suelo. No obstante, el modelo de corrección debe formarse con reservas reconociendo la incertidumbre que existe en cuanto a la altura real adecuada para cada una de las situaciones individuales. Cuando se conozcan de forma más precisa los parámetros de la ocupación del suelo, podrán sustituir directamente a los valores que se indican en el Cuadro 6.

Las alturas y distancias nominales del Cuadro 6 se aproximan a la altura característica, H_c , y a la separación horizontal, G_c , definidas en la Recomendación UIT-R P.1058. No obstante, se pretende que el modelo utilizado aquí para calcular las pérdidas adicionales debidas al apantallamiento por la ocupación del suelo (o la cobertura del terreno) dé estimaciones prudentes.

4.6.3 Modelo de altura-ganancia

Las pérdidas adicionales debidas a la protección respecto a la ocupación del suelo local vienen dadas por la expresión:

$$A_h = 10,25 \times e^{-d_k} \left(1 - \operatorname{tgh} \left[6 \left(\frac{h}{h_a} - 0,625 \right) \right] \right) - 0,33 \quad \text{dB} \quad (27)$$

siendo:

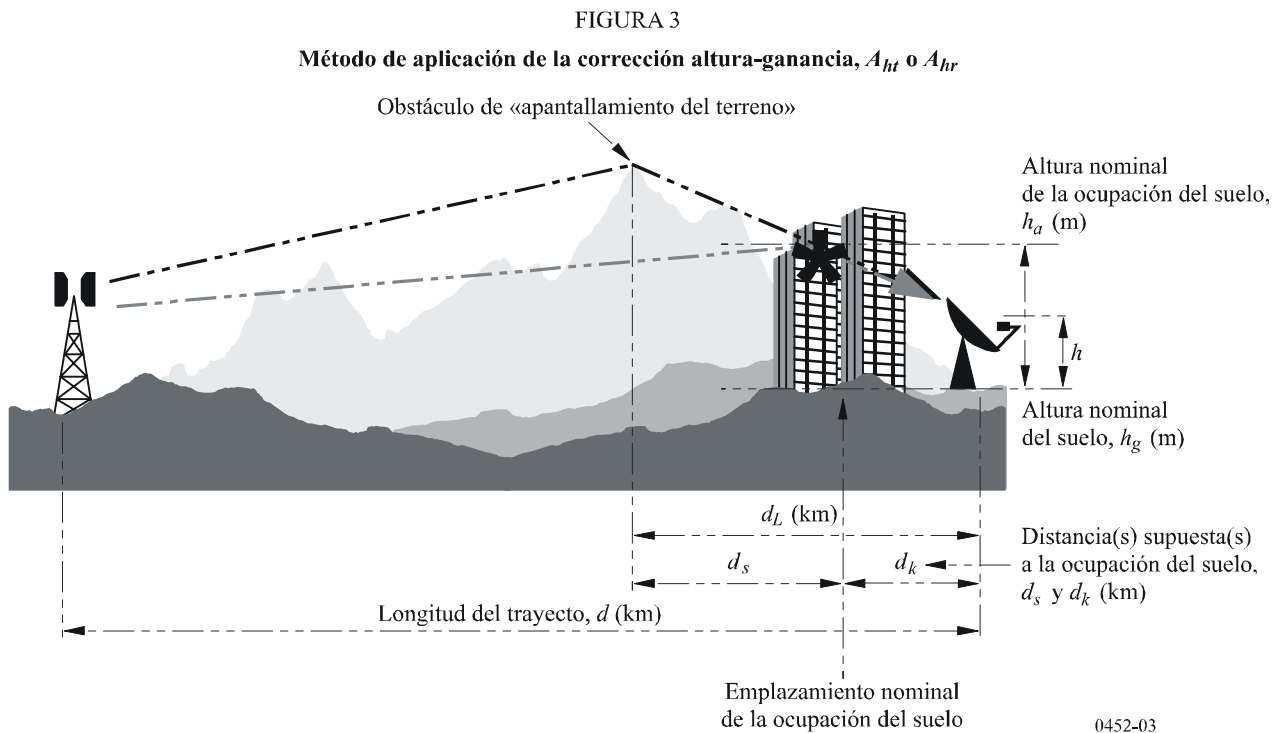
- d_k : distancia (km) desde el punto nominal de la ocupación del suelo a la antena (véase la Fig. 3)
- h : altura de la antena (m) por encima del nivel local del suelo
- h_a : altura nominal de la ocupación del suelo (m) por encima del nivel local del suelo.

CUADRO 6

Alturas y distancias nominales de ocupación del suelo

Categoría de ocupación del suelo (cobertura del terreno)	Altura nominal, h_a (m)	Distancia nominal, d_k (km)
Campos de cultivo alto Parques Árboles dispersos de forma irregular Cultivos (separación uniforme) Casas dispersas	4	0,1
Centro de población rural	5	0,07
Árboles de hoja caduca (separación irregular) Árboles de hoja caduca (separación uniforme) Bosque de árboles diversos	15	0,05
Coníferas (separación irregular) Coníferas (separación uniforme)	20	0,05
Selva tropical húmeda	20	0,03
Entorno suburbano	9	0,025
Entorno suburbano denso	12	0,02
Entorno urbano	20	0,02
Entorno urbano denso	25	0,02
Zona industrial	20	0,05

No puede hablarse de pérdidas adicionales debidas al apantallamiento por la ocupación del suelo (o cobertura del terreno) en las categorías no incluidas en el Cuadro 6.



4.6.4 Método de aplicación

El método de aplicación de la corrección altura-ganancia, A_{ht} o A_{hr} (dB) es directo y se indica en la Fig. 3.

Los pasos que hay que añadir al procedimiento básico de predicción son los siguientes:

Paso 1: Cuando se conoce el tipo de objeto reflectante o puede suponerse sin temor a error, se utiliza el procedimiento principal para calcular las pérdidas básicas de transmisión a la altura nominal, h_a , para el tipo adecuado de ocupación del suelo, a partir del Cuadro 6. La longitud del trayecto que hay que utilizar es $d - d_k$ (km). No obstante, cuando $d \gg d_k$, esta corrección menor para d_k puede ignorarse sin problemas.

Paso 2: Cuando hay un obstáculo de «apantallamiento del terreno» que ofrezca protección al terminal, debe incluirse esta circunstancia en el cálculo básico, pero deben calcularse las pérdidas de apantallamiento (A_{st} o A_{sr} (dB)) a la altura h_a y la distancia d_s , y no a las de h y d_L como debe hacerse en caso contrario.

Paso 3: Una vez concluido el procedimiento principal, puede añadirse la corrección de altura-ganancia de la ecuación (27), tal como se indica en el Cuadro 5.

Paso 4: Cuando no se dispone de información de la ocupación del suelo, puede seguirse el cálculo básico utilizando las distancias d y d_L (si procede) y la altura h .

NOTA 1 – Las correcciones de altura-ganancia de la ocupación del suelo deben añadirse en ambos extremos del trayecto, cuando convenga.

NOTA 2 – Cuando haya que aplicar la corrección de altura-ganancia en tierra y la corrección de acoplamiento de conducto en mar (A_{ct} o A_{cr} (dB)) (es decir cuando la antena está próxima al mar pero hay situaciones de ocupación del suelo), pueden utilizarse a la vez las dos correcciones, ya que son complementarias y compatibles.

NOTA 3 – Si d no es significativamente mayor que d_k , este modelo no es adecuado.

4.7 Predicción general

En el Cuadro 5 se indican las acciones necesarias con objeto de desarrollar la predicción general para cada clasificación de tipo de trayecto. En los trayectos clasificados como de visibilidad directa o de visibilidad directa con difracción de subtrayecto, no se requiere preprocesamiento ulterior de los resultados del modelo individual antes de aplicar la acción necesaria indicada en el Cuadro.

4.7.1 Trayectos transhorizonte

En el caso de los trayectos transhorizonte, aunque no se requiere el modelo de visibilidad directa, se utiliza en el proceso de combinación la pérdida del modelo de visibilidad directa teórico equivalente. La predicción general se basa en el cálculo de una pérdida modificada de propagación por conductos y por reflexión en las capas, $L_{bam}(p)$ de la siguiente función antes de aplicar la ecuación (8c) del Cuadro 5:

$$L_{bam}(p) = L_{bda}(p) + (L_{mín_{b0}}(p) - L_{bda}(p)) \cdot F_j \quad (28)$$

donde:

$$L_{bda}(p) = \begin{cases} L_{bd}(p) & \text{para } L_{mín_{ba}}(p) > L_{bd}(p) \\ L_{mín_{ba}}(p) + (L_{bd}(p) - L_{mín_{ba}}(p)) \cdot F_k & \text{para } L_{mín_{ba}}(p) \leq L_{bd}(p) \end{cases} \quad (29)$$

$L_{bd}(p)$: pérdida por difracción evaluada en el $p\%$ del tiempo de la ecuación (14)

F_k : factor de interpolación que combina la propagación por conductos y por reflexión en las capas con la pérdida por difracción con la distancia:

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \operatorname{tgh} \left(3,0 \cdot \kappa \cdot \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right) \quad (30)$$

donde:

d : longitud del trayecto de círculo máximo definida en el Cuadro 3

d_{sw} : parámetro fijo que determina la gama de distancias de la transición; fijado a 20

κ : parámetro fijo que determina la pendiente de aproximación en los extremos de la gama; fijado a 0,5

$L_{mín_{ba}}(p)$: pérdida modificada de propagación por conductos y por reflexión en las capas:

$$L_{mín_{ba}}(p) = \eta \cdot \ln \left(\exp \left(\frac{L_{ba}(p)}{\eta} \right) + \exp \left(\frac{L_{b0}(p)}{\eta} \right) \right) \quad (31)$$

donde:

$L_{ba}(p)$: pérdida de propagación por conductos y por reflexión en las capas obtenida a partir de la ecuación (16)

$L_{b0}(p)$: pérdida de visibilidad directa teórica para el trayecto obtenida a partir de la ecuación (9)

$$\eta = 2,5$$

$L_{mín_{b0}}(p)$: pérdida de propagación mínima teórica que puede alcanzar la pérdida modificada de propagación por conductos y por reflexión en las capas:

$$L_{mín_{b0}}(p) = \begin{cases} L_{b0}(p) & \text{para } p < \beta_0 \\ L_{bd50} - (L_{bd50} - L_{b0\beta}) \cdot F_i & \text{para } p \geq \beta_0 \end{cases} \quad (32)$$

donde:

$L_{b0\beta}$: pérdida de visibilidad directa teórica evaluada para el $\beta_0\%$ del tiempo a partir de la ecuación (9):

$$L_{b0\beta} = L_{b0}(\beta_0\%) \quad (33)$$

L_{bd50} : pérdida por difracción evaluada para el 50% del tiempo a partir de la ecuación (14):

$$L_{bd50} = L_{bd}(50\%) \quad (34)$$

F_i : factor de interpolación basado en una distribución log-normal de la pérdida por difracción definida en la ecuación (13a)

F_j : factor de interpolación que combina la propagación por conductos y por reflexión en las capas modificadas con la pérdida de visibilidad directa teórica:

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \operatorname{tgh} \left(3,0 \cdot \xi \cdot \frac{(\theta - \Theta)}{\Theta} \right) \right) \quad (35)$$

donde:

$$\Theta = 0,3$$

$$\xi = 0,8$$

θ : distancia angular del trayecto definida en el Cuadro 7.

4.8 Cálculo de pérdidas de transmisión

El método descrito en los § 4.2 a 4.7 anteriores da la pérdida de transmisión básica entre las dos estaciones. A fin de calcular el nivel de señal en una estación debido a la interferencia de la otra es necesario conocer la pérdida de transmisión, que tiene en cuenta las ganancias de antena de las dos estaciones situadas en la dirección del trayecto radioeléctrico, es decir la interferencia, entre ambas.

El siguiente procedimiento ofrece un método para calcular la pérdida de transmisión entre las dos estaciones terrenales. A modo de paso intermedio del método, también facilita una serie de fórmulas para calcular la longitud del trayecto ortodrómico y la distancia angular basada en las coordenadas geográficas de las estaciones, en contraposición con la obtención de dichas cantidades a partir del perfil del trayecto, como se presupone en el Cuadro 3.

El ángulo subtendido por el trayecto con vértice en el centro de la Tierra, δ se calcula a partir de las coordenadas geográficas de las estaciones, utilizando:

$$\delta = \arccos(\sin(\varphi_t) \sin(\varphi_r) + \cos(\varphi_t) \cos(\varphi_r) \cos(\psi_t - \psi_r)) \quad \text{rad} \quad (36)$$

La distancia de círculo máximo d , entre las estaciones es:

$$d = 6371 \cdot \delta \quad \text{km} \quad (37)$$

La marcación (dirección acimutal a partir del norte verdadero, en el sentido de las agujas del reloj) de la estación t a la estación r se calcula utilizando:

$$\alpha_{tr} = \arccos(\{\sin(\varphi_r) - \sin(\varphi_t) \cos(\delta)\} / \sin(\delta) \cos(\varphi_t)) \quad \text{rad} \quad (38)$$

Una vez aplicada la ecuación (38), si $\psi_t - \psi_r > 0$ entonces:

$$\alpha_{tr} = 2\pi - \alpha_{tr} \quad \text{rad} \quad (39)$$

Se calcula la marcación de la estación, r , a la estación, t , α_{rt} , por simetría a partir de las ecuaciones (38) y (39).

A continuación, supongamos que la dirección del haz principal (puntería) de la estación t es (ϵ_t, α_t) en (elevación, marcación), mientras que la dirección del haz principal de la estación r es (ϵ_r, α_r) . A fin de obtener los ángulos de elevación del trayecto radioeléctrico, es decir la interferencia, en las estaciones t y r , ϵ_{pt} y ϵ_{pr} , respectivamente, es necesario distinguir entre el trayecto de visibilidad directa y el trayecto transhorizonte. Por ejemplo, para los trayectos de visibilidad directa,

$$\epsilon_{pt} = \frac{h_r - h_t}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad} \quad (40a)$$

y

$$\epsilon_{pr} = \frac{h_t - h_r}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad} \quad (40b)$$

donde h_t y h_r son las alturas de las estaciones por encima del nivel medio del mar (km), mientras que para los trayectos transhorizonte, los ángulos de elevación vienen dados por los respectivos ángulos del horizonte, es decir:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\theta_t}{1\,000} \quad \text{rad} \quad (41a)$$

y

$$\varepsilon_{pr} = \frac{\theta_r}{1\,000} \quad \text{rad} \quad (41b)$$

Téngase en cuenta que los ángulos del horizonte radioeléctrico θ_t y θ_r (mrad), se introducen por primera vez en el Cuadro 3 y se definen, respectivamente en los § 5.1.1 y 5.1.3 del Apéndice 1 al Anexo 1.

Para calcular los ángulos con respecto al eje de puntería de las estaciones t y r , χ_t y χ_r , respectivamente, en la dirección del trayecto de la interferencia en las estaciones t y r , se recomienda utilizar:

$$\chi_t = \arccos(\cos(\varepsilon_t) \cos(\varepsilon_{pt}) \cos(\alpha_{tr} - \alpha_t) + \sin(\varepsilon_t) \sin(\varepsilon_{pt})) \quad (42a)$$

y

$$\chi_r = \arccos(\cos(\varepsilon_r) \cos(\varepsilon_{pr}) \cos(\alpha_{rt} - \alpha_r) + \sin(\varepsilon_r) \sin(\varepsilon_{pr})) \quad (42b)$$

Utilizando sus respectivos ángulos con respecto al eje de puntería, se obtienen las ganancias de antena para las estaciones t y r , G_t y G_r , respectivamente (dB). Si no se dispone de los diagramas de antena reales, la variación de la ganancia en función del ángulo se puede obtener en la información de la Recomendación UIT-R S.465.

Para obtener la pérdida de transmisión, L , se utiliza:

$$L = L_b(p) - G_t - G_r \quad \text{dB} \quad (43)$$

En los casos de interferencia con cielo despejado, en los que la propagación radioeléctrica está dominada por la dispersión troposférica, los ángulos de elevación serán un poco mayores que los ángulos del horizonte radioeléctrico, θ_t y θ_r . El uso de dichos ángulos debería introducir errores despreciables, a menos que éstos también coincidan con las direcciones de apuntamiento de las respectivas estaciones.

5 Predicción de la interferencia por dispersión debida a los hidrometeoros

Al contrario de lo que ocurre con los citados métodos de predicción de la interferencia con cielo despejado, el método de predicción de la interferencia debida a los hidrometeoros que se describe a continuación expresa directamente las pérdidas de transmisión entre dos estaciones, ya que exige conocer los diagramas de radiación de las antenas interferente e interferida para cada estación.

El método es bastante general puesto que puede utilizarse con cualquier diagrama de radiación de antena que proporcione un método de determinación de la ganancia de antena para cualquier ángulo con respecto al eje de puntería de la misma. Pueden utilizarse todos los diagramas de radiación como los que aparecen en las Recomendaciones UIT-R P.620, UIT-R F.699, UIT-R F.1245, UIT-R S.465 y UIT-R S.580, así como otros diagramas más complejos basados en las funciones de Bessel y diagramas medidos reales, si se dispone de ellos. El método también puede utilizarse con antenas unidireccionales o sectoriales, como las que se caracterizan en la Recomendación UIT-R F.1336, cuyas ganancias vienen generalmente determinadas a partir del ángulo vertical con respecto al eje de puntería (es decir, la elevación relativa al ángulo de máxima ganancia).

El método también es general en el sentido de que no está restringido a ninguna geometría en particular, siempre que se disponga de los diagramas de radiación de antena con una cobertura de $\pm 180^\circ$. Por consiguiente, incluye los acoplamientos haz principal a haz principal y lóbulo lateral a haz principal, y las geometrías de dispersión de círculo máximo y dispersión lateral. El método puede calcular los niveles de interferencia para geometrías de trayectos largos (> 100 km) y de trayectos cortos (hasta unos pocos kilómetros) con ángulos de elevación y acimutales arbitrarios en cualquiera de las estaciones. Por lo tanto, la metodología es adecuada para un amplio caso de hipótesis y servicios, incluida la determinación de la interferencia por dispersión debida a la lluvia entre dos estaciones terrenales, entre una estación terrenal y una estación terrena y entre dos estaciones terrenales que funcionen en bandas de frecuencias atribuidas bidireccionalmente.

La Oficina de Radiocomunicaciones puede proporcionar una realización del modelo en lenguaje Fortran, utilizando los diagramas de radiación de antena de las Recomendaciones UIT-R P.620, UIT-R F.1245 y UIT-R F.1336.

5.1 Introducción

La metodología se basa en la aplicación de la ecuación del radar biestático, que relaciona la potencia P_r que llega a una estación receptora procedente de la dispersión debida a la lluvia con la potencia P_t transmitida por una estación transmisora:

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iiint_{\text{todo el espacio}} \frac{G_t G_r \eta A}{r_t^2 r_r^2} dV \quad \text{W} \quad (44)$$

donde:

- λ : longitud de onda
- G_t : ganancia (lineal) de la antena transmisora
- G_r : ganancia (lineal) de la antena receptora
- η : sección transversal de dispersión por unidad de volumen δV (m^2/m^3)
- A : atenuación a lo largo del trayecto del transmisor al receptor (en términos lineales)
- r_t : distancia del transmisor al elemento de volumen de dispersión
- r_r : distancia del elemento de volumen de dispersión al receptor.

Expresada en términos de pérdidas de transmisión (dB), para la dispersión entre dos estaciones, Estación 1 y Estación 2, la ecuación del radar biestático pasa a ser:

$$L = 208 - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log C + 10 \log S + A_g - M \quad \text{dB} \quad (45)$$

donde:

- f : frecuencia (GHz)
- Z_R : reflectividad del radar a nivel de suelo, que puede expresarse en términos de la intensidad de lluvia, R , (mm/h):

$$Z_R = 400R^{1,4} \quad (46)$$

$10 \log S$: factor de corrección (dB), que tiene en cuenta la desviación con respecto a la dispersión de Rayleigh en frecuencias superiores a 10 GHz:

$$10 \log S = \begin{cases} R^{0,4} \cdot 10^{-3} \left[4(f-10)^{1,6} \left(\frac{1+\cos \varphi_S}{2} \right) + 5(f-10)^{1,7} \left(\frac{1-\cos \varphi_S}{2} \right) \right] & \text{para } f > 10 \text{ GHz} \\ 0 & \text{para } f \leq 10 \text{ GHz} \end{cases} \quad (47)$$

donde:

φ_S : ángulo de dispersión

A_g : atenuación debida a los gases atmosféricos a lo largo del trayecto del transmisor al receptor (dB), calculada a partir de la Recomendación UIT-R P.676 Anexo 2

M : cualquier desadaptación de la polarización entre los sistemas de transmisión y recepción (dB).

En el modelo que aquí se indica, la dispersión está confinada a la que se produce en el interior de una célula de lluvia, que se define como una sección transversal circular con un diámetro que depende de la intensidad de lluvia:

$$d_c = 3,3R^{-0,08} \quad \text{km} \quad (48)$$

Dentro de la célula de lluvia, la intensidad de lluvia, y por consiguiente la reflectividad del radar, se supone constante hasta la altura de la lluvia, h_R . Por encima de dicha altura, se supone que la reflectividad disminuye linealmente con la altura a un ritmo de $-6,5$ dB/km.

La función de transferencia de la dispersión C , es la integral de volumen a lo largo de la célula de lluvia y puede expresarse, en coordenadas cilíndricas, de la forma siguiente:

$$C = \int_0^{h_{\max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_1^2 r_2^2} A \zeta \cdot r \, dr d\varphi dh \quad (49)$$

donde:

G_1, G_2 : ganancias lineales de la Estación 1 y la Estación 2, respectivamente

r_1, r_2 : distancias (km), desde el elemento de integración δV a la Estación 1 y a la Estación 2, respectivamente

A : atenuación debida a la lluvia, tanto dentro como fuera de la célula de lluvia, expresada en términos lineales

ζ : dependencia con la altura de la reflectividad del radar:

$$\zeta = \begin{cases} 1 & \text{para } h \leq h_R \\ 10^{-0,65(h-h_R)} & \text{para } h > h_R \end{cases} \quad (50)$$

h_R : altura de la lluvia (km)

r, φ, h : variables de integración dentro de la célula de lluvia.

La integración se realiza numéricamente, en coordenadas cilíndricas. Sin embargo, es conveniente considerar inicialmente la geometría de la dispersión desde la estación transmisora a través de una célula de lluvia hasta la estación receptora, en términos de un sistema de coordenadas Cartesiano tomando como origen a la Estación 1, ya que la posición real de la célula de lluvia no vendrá definida inmediatamente, especialmente en el caso de dispersión lateral.

En la referencia de coordenadas Cartesianas es conveniente, para mayor sencillez, convertir en primer lugar los diversos parámetros geométricos de sus valores reales referidos a una Tierra curva a los valores que se obtendrían en una representación plana de la Tierra.

La existencia de un acoplamiento de haz principal a haz principal entre las antenas se establece a partir de la geometría y la célula de lluvia se sitúa en el punto de intersección entre los ejes del haz principal. Si no existe el acoplamiento de haz principal a haz principal, la célula de lluvia se sitúa a lo largo del eje del haz principal de la Estación 1, centrada en el punto más próximo al eje del haz principal de la Estación 2. En este caso, las pérdidas de transmisión deben determinarse para un segundo caso intercambiando los parámetros de cada estación y tomando como representativas las pérdidas de caso más desfavorable de los niveles de interferencia probables.

5.2 Parámetros de partida

En el Cuadro 7 aparecen todos los parámetros de partida necesarios para aplicar el método que calcula la distribución acumulativa de las pérdidas de transmisión entre dos estaciones debidas a la dispersión por lluvia.

CUADRO 7

Lista de parámetros de partida

(El sufijo 1 se refiere a parámetros para la Estación 1 y el sufijo 2 a parámetros para la Estación 2)

Parámetro	Unidades	Descripción
d	km	Distancia entre estaciones
f	GHz	Frecuencia
h_{1_loc}, h_{2_loc}	km	Alturas locales sobre el nivel medio del mar de la Estación 1, Estación 2
$G_{máx-1}, G_{máx-2}$	dB	Máximas ganancias para cada antena
$h_R(p_h)$	km	Distribución acumulativa de la altura de la lluvia rebasada en función del porcentaje de tiempo p_h (véase la Nota 1)
M	dB	Desadaptación de la polarización entre sistemas
P	hPa	Presión en la superficie (por defecto 1013,25 hPa)
$R(p_R)$	mm/h	Distribución acumulativa de la intensidad de lluvia rebasada en función del porcentaje de tiempo p_R
T	°C	Temperatura de la superficie (por defecto, 15° C)
$\alpha_{1_loc}, \alpha_{2_loc}$	rad	Marcaciones locales de la Estación 1 desde la Estación 2 y de la Estación 2 desde la Estación 1, en sentido de las agujas del reloj
$\epsilon_{H1_loc}, \epsilon_{H2_loc}$	rad	Ángulos del horizonte local para la Estación 1 y la Estación 2
ρ	g/m ³	Densidad de vapor de agua de la superficie (por defecto, 8 g/m ³)
τ	grados	Ángulo de polarización del enlace (0° para polarización horizontal, 90° para polarización vertical)

NOTA 1 – Si no se dispone de la distribución, se utiliza el valor mediano de la altura de la lluvia h_R , junto con el Cuadro 8.

5.3 El procedimiento paso a paso

Paso 1: Determinación de los parámetros meteorológicos

Para obtener la distribución acumulativa de las pérdidas de transmisión debidas a la dispersión por lluvia en términos del porcentaje de tiempo durante el cual se rebasan dichas pérdidas, los parámetros de partida necesarios son las distribuciones de probabilidad de la intensidad de lluvia y la altura de la lluvia. Si se dispone de los valores locales de estos parámetros, deben utilizarse. En ausencia de dichos valores locales, puede emplearse la Recomendación UIT-R P.837 para obtener las distribuciones acumulativas de la intensidad de lluvia en cualquier emplazamiento, y el valor mediano de la altura de la lluvia puede obtenerse utilizando la Recomendación UIT-R P.839. Como valor por defecto de la distribución acumulativa de la altura de la lluvia, puede utilizarse la distribución de la altura de la lluvia relativa al valor mediano indicado en el Cuadro 8.

CUADRO 8

Distribución acumulativa de la altura de la lluvia relativa a su valor mediano

Diferencia de altura de la lluvia (km)	Probabilidad de rebasamiento (%)
-1,625	100,0
-1,375	99,1
-1,125	96,9
-0,875	91,0
-0,625	80,0
-0,375	68,5
-0,125	56,5
0,125	44,2
0,375	33,5
0,625	24,0
0,875	16,3
1,125	10,2
1,375	6,1
1,625	3,4
1,875	1,8
2,125	0,9
2,375	0,0

Las distribuciones acumulativas de la intensidad de lluvia y la altura de la lluvia pueden convertirse en funciones de densidad de probabilidad de la siguiente forma. Para cada intervalo entre dos valores adyacentes de intensidad de lluvia o altura de la lluvia, se considera que el valor medio es el representativo de dicho intervalo y su probabilidad de aparición es la diferencia entre las dos correspondientes probabilidades de rebasamiento. Cualquiera de los valores para los cuales h_R es inferior a 0 km cuando se utiliza el Cuadro 7, se fija un valor de 0 km y se suman sus probabilidades.

Se supone que la intensidad de lluvia y la altura de la lluvia son estadísticamente independientes entre sí, de manera que la probabilidad de aparición de un determinado par de combinaciones intensidad de lluvia/altura de la lluvia es simplemente el producto de las probabilidades individuales.

Para cada par de valores de intensidad de lluvia y altura de la lluvia, las pérdidas de transmisión se calculan de acuerdo con los siguientes pasos.

Paso 2: Conversión de parámetros geométricos a representación de Tierra plana

La geometría de la dispersión por lluvia entre dos estaciones viene determinada a partir de los siguientes parámetros de partida básicos: distancia de círculo máximo d entre las dos estaciones, valores locales para los ángulos de elevación de la antena de la estación terrena, ϵ_{1-loc} y ϵ_{2-loc} , y desplazamientos acimutales de los ejes del haz principal de la antena para cada estación con respecto a la dirección de la otra estación definidos como positivos en el sentido de las agujas del reloj α_{1-loc} y α_{2-loc} . La Estación 1 se toma como la posición de referencia, es decir, el origen del sistema de coordenadas Cartesianas y por consiguiente los parámetros de referencia son:

$$\epsilon_1 = \epsilon_{1-loc}, \alpha_1 = \alpha_{1-loc} \quad \text{y:} \quad \epsilon_{H1} = \epsilon_{H1-loc} \quad \text{rad} \quad (51)$$

En primer lugar, se convierten todos los parámetros geométricos a un sistema de coordenadas Cartesianas común, tomando la Estación 1 como origen, el plano horizontal es el plano x - y , el eje x apunta en dirección de la Estación 2 y el eje z apunta verticalmente hacia arriba. La Fig. 4 ilustra la geometría en una Tierra curva (para el caso simplificado de dispersión hacia adelante, es decir a lo largo del círculo máximo), siendo r_{eff} el radio efectivo de la Tierra.

$$r_{eff} = k_{50} R_E \quad \text{km} \quad (52)$$

donde:

k_{50} : valor mediano del factor de radio efectivo de la Tierra = 1,33

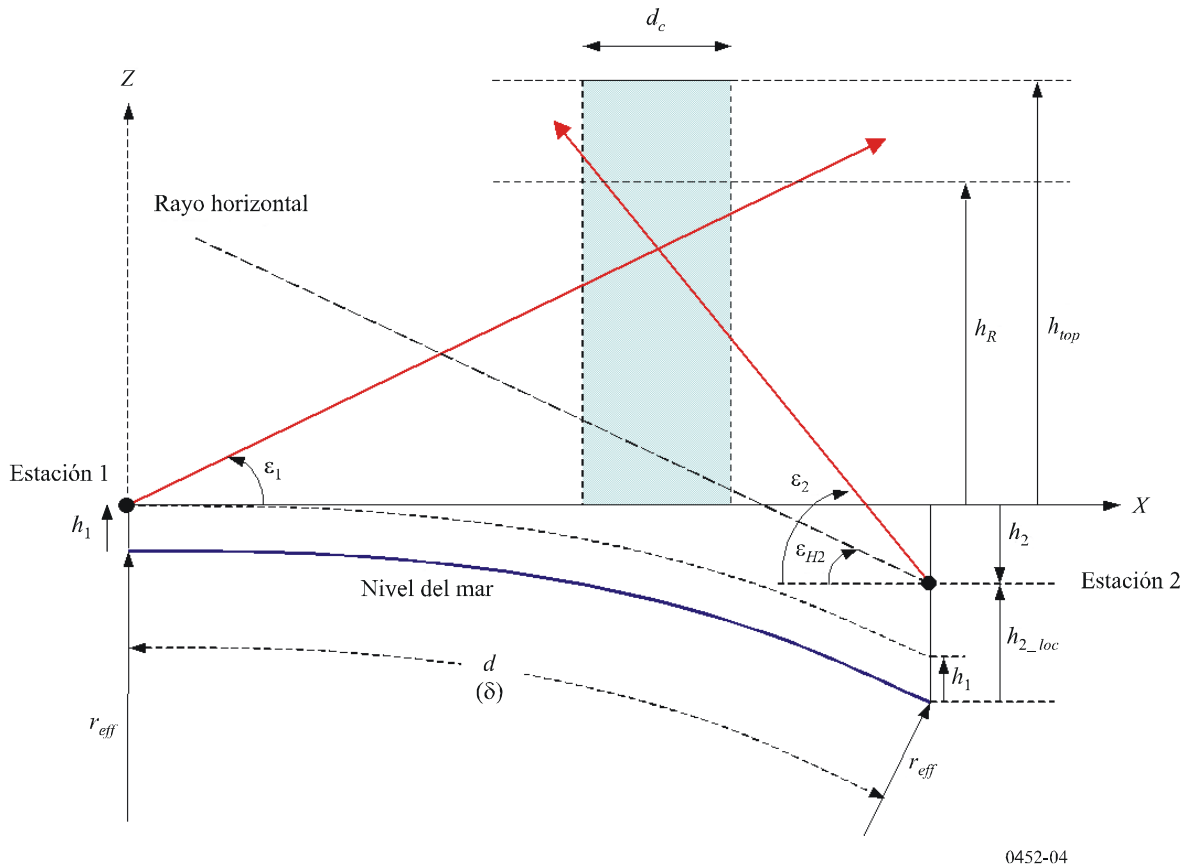
R_E : radio verdadero de la Tierra = 6 371 km.

Las dos estaciones están separadas por la distancia de círculo máximo d (km), subtendida por un ángulo δ cuyo vértice es el centro de la Tierra:

$$\delta = \frac{d}{r_{eff}} \quad \text{rad} \quad (53)$$

La vertical local en la Estación 2 está inclinada un ángulo δ con respecto a la vertical local en la Estación 1, es decir el eje z . Los ángulos de elevación y acimutal de la Estación 2 se convierten a una representación de Tierra plana de la forma siguiente, donde el subíndice *loc* se refiere a valores locales.

FIGURA 4
Geometría de las estaciones en una Tierra curva



Se calcula el ángulo de elevación de la Estación 2:

$$\varepsilon_2 = \arcsen(\cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta + \sin \varepsilon_{2_loc} \cos \delta) \quad (54)$$

y el ángulo horizontal en la Estación 2:

$$\varepsilon_{H2} = \arcsen(\cos \varepsilon_{H2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta + \sin \varepsilon_{H2_loc} \cos \delta) \quad (55)$$

El desplazamiento acimutal de la Estación 2 con respecto a la Estación 1 es:

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{\cos \varepsilon_{2_loc} \sin \alpha_{2_loc}}{\cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \cos \delta - \sin \varepsilon_{2_loc} \sin \delta}\right) \quad (56)$$

y la altura de la Estación 2 por encima del plano de referencia viene dada por la expresión:

$$h_2 = h_{2_loc} - h_1 - d \frac{\delta}{2} \quad \text{km} \quad (57)$$

La separación acimutal entre las dos estaciones en el punto de intersección entre las proyecciones del plano del suelo y los ejes del haz principal es:

$$\alpha_S = \pi - (\alpha_1 - \alpha_2) \quad \text{rad} \quad (58)$$

Paso 3: Determinación de la geometría del enlace

El método para determinar la geometría de los enlaces de dispersión utiliza la notación vectorial en la cual un vector en el espacio tridimensional se representa mediante una matriz de una sola columna y tres elementos que comprenden las longitudes de las proyecciones de la línea correspondiente en los ejes Cartesianos x , y y z . Un vector se representa mediante un símbolo en negritas. Por consiguiente, una asignación de vector puede en general escribirse como sigue:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

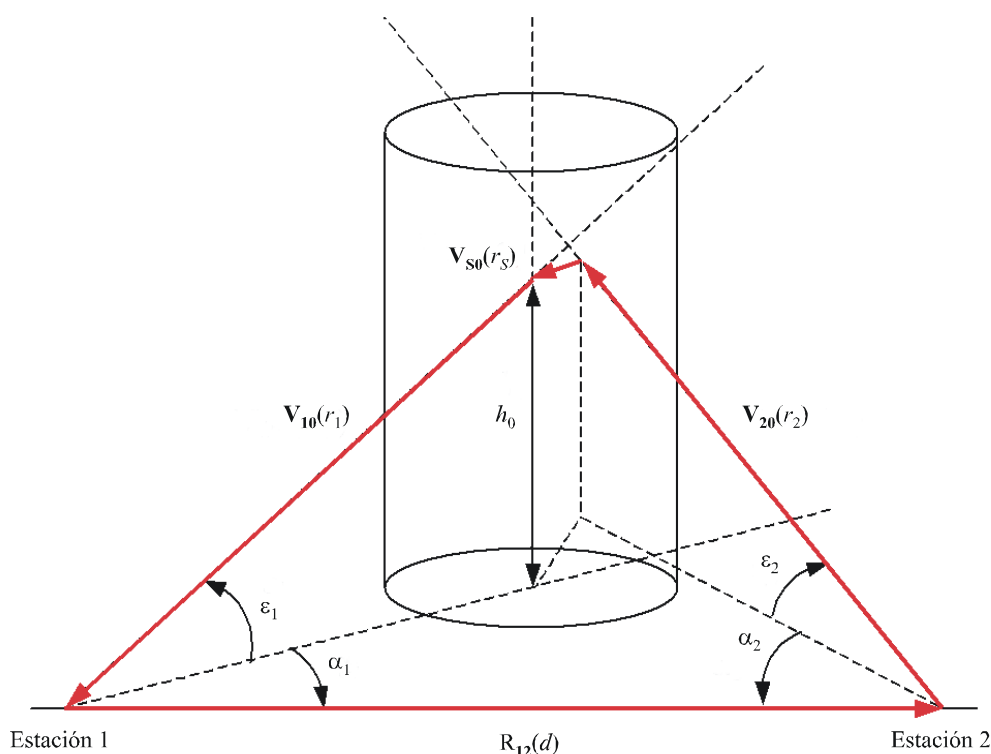
Un vector de longitud unitaria vendrá generalmente representado por el símbolo, \mathbf{V} , mientras que un vector general (es decir, que incluye una magnitud) se representará por otro símbolo apropiado, por ejemplo, \mathbf{R} .

La geometría básica de la dispersión por lluvia se ilustra esquemáticamente en la Fig. 5 para el caso general de dispersión lateral donde los dos ejes principales de hecho no se intersectan. En otras palabras, este ejemplo representa un acoplamiento de lóbulo lateral a lóbulo principal. El trayecto de interferencia puede ir de los lóbulos laterales de la Estación 2 al haz principal de la Estación 1 o viceversa.

FIGURA 5

Esquema de la geometría de dispersión por lluvia para el caso general de dispersión lateral

Obsérvese que los haces de antena no coinciden en este ejemplo, y el «ángulo de estrabismo» no es cero – véanse las ecuaciones (60) y (61)



El centro de la célula de lluvia está situado a lo largo del eje del haz principal de la antena de la Estación 1 en el punto más próximo entre los dos haces de antena. La geometría se establece en notación vectorial de la forma siguiente.

El vector de la Estación 1 a la Estación 2 se define como:

$$\mathbf{R}_{12} = \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad \text{km} \quad (59)$$

Los vectores \mathbf{R}_{12} , $r_2\mathbf{V}_{20}$, $r_S\mathbf{V}_{S0}$ y $r_1\mathbf{V}_{10}$ forman un polígono tridimensional cerrado, siendo el vector \mathbf{V}_{S0} perpendicular a \mathbf{V}_{10} y \mathbf{V}_{20} . En el ejemplo ilustrado en la Fig. 5, el vector \mathbf{V}_{S0} está dirigido hacia fuera de la página.

Teniendo en cuenta la curvatura de la Tierra, se calcula el vector de longitud unidad \mathbf{V}_{10} en dirección del haz principal de la antena de la Estación 1:

$$\mathbf{V}_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_1 \cos \alpha_1 \\ -\cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 \\ \sin \varepsilon_1 \end{bmatrix} \quad (60)$$

y el vector de longitud unitaria \mathbf{V}_{20} en dirección del haz principal de la antena de la Estación 2:

$$\mathbf{V}_{20} = \begin{bmatrix} \sin \varepsilon_{2_loc} \sin \delta - \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \cos \delta \\ \cos \varepsilon_{2_loc} \sin \alpha_{2_loc} \\ \sin \varepsilon_{2_loc} \cos \delta + \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta \end{bmatrix} \quad (61)$$

El método utiliza ahora el producto escalar de dos vectores que se escribe y evalúa de la forma siguiente:

$$\mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{V}_2 = x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2 \quad \text{donde } \mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$

El ángulo de dispersión φ_S , es decir el ángulo entre los dos haces de antena, se determina a partir del producto escalar de los dos vectores \mathbf{V}_{10} y \mathbf{V}_{20} :

$$\varphi_S = \arccos(-\mathbf{V}_{20} \cdot \mathbf{V}_{10}) \quad (62)$$

Si $\varphi_S < 0,001$ rad, los dos haces de antena son aproximadamente paralelos y puede suponerse que cualquier acoplamiento por dispersión debida a la lluvia será despreciable.

Como se ilustra en la Fig. 5, los cuatro vectores \mathbf{R}_{12} , $r_2\mathbf{V}_{20}$, $r_S\mathbf{V}_{S0}$ y $r_1\mathbf{V}_{10}$ forman un polígono tridimensional cerrado, es decir:

$$\mathbf{R}_{12} + r_2\mathbf{V}_{20} + r_S\mathbf{V}_{S0} - r_1\mathbf{V}_{10} = 0 \quad (63)$$

la ecuación puede resolverse para las distancias r_i . El método utiliza el producto vectorial de dos vectores, que se escribe y evalúa de la forma siguiente. El producto vectorial (o cruzado) es:

$$\mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} y_1 z_2 - z_1 y_2 \\ z_1 x_2 - x_1 z_2 \\ x_1 y_2 - y_1 x_2 \end{bmatrix}$$

El vector de longitud unitaria \mathbf{V}_{S0} , que es perpendicular a ambos haces de antena, se calcula a partir del producto vectorial $\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}$:

$$\mathbf{V}_{S0} = \frac{\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}}{\text{sen } \varphi_S} \quad (64)$$

La ecuación (63) puede resolverse utilizando el determinante de tres vectores que se escribe y evalúa como sigue:

$$\det[\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_2 \quad \mathbf{V}_3] = \det \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} = x_1(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_2(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_2 - y_2 z_1)$$

Se calcula la distancia entre los dos haces en su máxima aproximación:

$$r_S = \frac{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{12}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]} \quad (65)$$

La distancia de trayecto oblicuo r_1 desde la Estación 1 a lo largo de su haz principal hasta el punto más próximo al haz principal de la Estación 2 es:

$$r_1 = \frac{\det[\mathbf{V}_{12} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]} \quad (66)$$

mientras que la correspondiente distancia de trayecto oblicuo r_2 desde la Estación 2 a lo largo de su haz principal hasta el punto más próximo al haz principal de la Estación 1 (teniendo en cuenta el signo menos) es:

$$r_2 = \frac{-\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{12} \quad \mathbf{V}_{S0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]} \quad (67)$$

Se calcula el ángulo de estrabismo con respecto al eje ψ_1 en la Estación 1 del punto más próximo en el eje del haz principal de la Estación 2:

$$\Psi_1 = \arctg\left(\frac{|r_S|}{r_1}\right) \quad (68)$$

y el correspondiente ángulo de estrabismo con respecto al eje en la Estación 1 del punto más próximo en el eje del haz principal de la Estación 1:

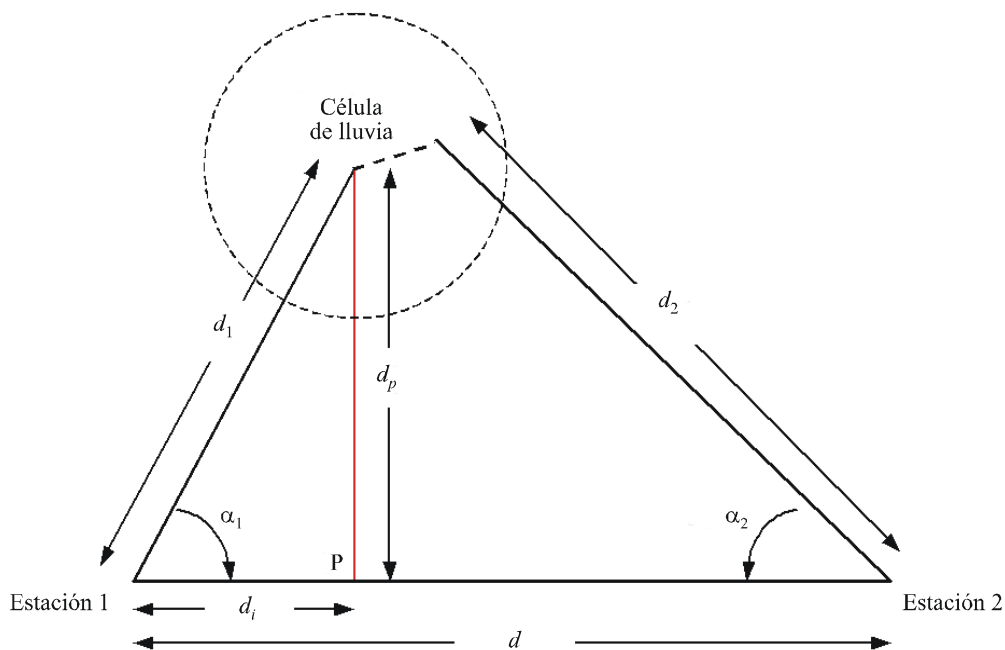
$$\Psi_2 = \arctg\left(\frac{|r_S|}{r_2}\right) \quad (69)$$

A partir de estos parámetros, se determina si se produce o no acoplamiento de haz principal a haz principal entre las dos estaciones. Para que se produzca dicho acoplamiento, el ángulo de estrabismo debe ser inferior a la anchura de haz a 3 dB de la antena correspondiente. Para ángulos de estrabismo mayores a éste, el acoplamiento de haz principal a haz principal será inexistente o muy reducido y el trayecto de transmisión estará influenciado fundamentalmente por el acoplamiento de lóbulo lateral a haz principal. De ser así, deben considerarse dos posibilidades, cuando el centro de la célula de lluvia está situado a lo largo del eje del haz principal de cada una de las antenas y cuando se considera que las pérdidas de transmisión más bajas representan la situación de caso más desfavorable. Como el emplazamiento por defecto de la célula de lluvia es el punto más próximo a lo largo del eje del haz principal de la Estación 2, esto puede lograrse fácilmente sustituyendo los parámetros de la Estación 2 por los de la Estación 1, y viceversa.

Por último, es necesario determinar también las proyecciones horizontales de las diversas distancias calculadas anteriormente a partir de las cuales puede establecerse el emplazamiento de las células de lluvia. La Fig. 6 representa una vista en planta del caso general de dispersión lateral.

FIGURA 6

Vista en planta de la geometría de la dispersión lateral



Se calcula la distancia horizontal desde la Estación 1 hasta el centro de la célula de lluvia, definido como el punto en el suelo inmediatamente por debajo del punto más próximo al eje del haz principal de la Estación 1:

$$d_1 = r_1 \cos \epsilon_1 \quad \text{km} \quad (70)$$

y la correspondiente distancia horizontal desde la Estación 2 hasta la proyección sobre el plano del suelo de su punto más cercano:

$$d_2 = r_2 \cos \epsilon_2 \quad \text{km} \quad (71)$$

La altura sobre el suelo del punto más cercano en el eje principal de la Estación 1 es:

$$h_0 = |r_1| \sin \epsilon_1 \quad \text{km} \quad (72)$$

mientras que en los casos donde no hay acoplamiento de haz principal a haz principal, la altura del punto más próximo en el eje principal de la Estación 2 es:

$$h_{2_0} = |r_2| \sin \epsilon_2 \quad \text{km} \quad (73)$$

Los parámetros de altura asociados con la célula de lluvia deben corregirse para tener en cuenta todo desplazamiento que se haya producido con respecto al trayecto de círculo máximo en el caso de dispersión lateral. La distancia en el trayecto de círculo máximo entre las dos estaciones es:

$$d_p = d_1 \sin \alpha_1 \quad (74)$$

y, por consiguiente, la separación angular es:

$$\delta_p = \frac{d_p}{r_{eff}} \quad \text{km} \quad (75)$$

A continuación se determina la corrección para la dispersión lateral:

$$h_c = h_1 + d_p \frac{\delta_p}{2} \quad \text{km} \quad (76)$$

Obsérvese que esta corrección también se aplica a otros parámetros asociados con la célula de lluvia; es decir, la altura de la lluvia, h_R y el límite superior para la integración, h_{top} , y en la determinación de la atenuación gaseosa (véase el Paso 8), que requiere la utilización de parámetros locales.

Con ello se han establecido los principales parámetros de geometría estática para ubicar la célula de lluvia con respecto a las estaciones y evaluar las pérdidas de transmisión debidas a la dispersión por lluvia. Es necesario considerar a continuación la geometría del elemento de integración, que puede encontrarse en cualquier parte dentro de la célula de lluvia, hasta un límite superior predeterminado para la integración, h_{top} , a fin de establecer las ganancias de antena en cada punto dentro de la célula de lluvia y las atenuaciones del trayecto en la célula de lluvia en dirección de cada estación. Para ello se cambia el sistema de coordenadas a coordenadas cilíndricas (r, φ, h) , centrado en la célula de lluvia.

Paso 4: Determinación de la geometría para las ganancias de antena

Con objeto de calcular la ganancia de cada antena para el elemento de integración en las coordenadas (r, φ, h) utilizando dicho diagrama de radiación de antena, y la atenuación de trayecto dentro de la célula de lluvia, es necesario calcular el ángulo de puntería con respecto al eje en la posición del elemento de integración y las longitudes de los trayectos desde el elemento de integración hasta el borde de la célula de lluvia en las direcciones de cada estación. La Fig. 7 ilustra la geometría correspondiente donde el punto A representa un elemento de integración arbitrario situado en las coordenadas (r, φ, h) y el punto B es la proyección de este punto sobre el plano del suelo. En la Fig. 8 aparece una vista en planta de la geometría.

FIGURA 7

Geometría para determinar las ganancias de antena y la atenuación del trayecto dentro de la célula de lluvia

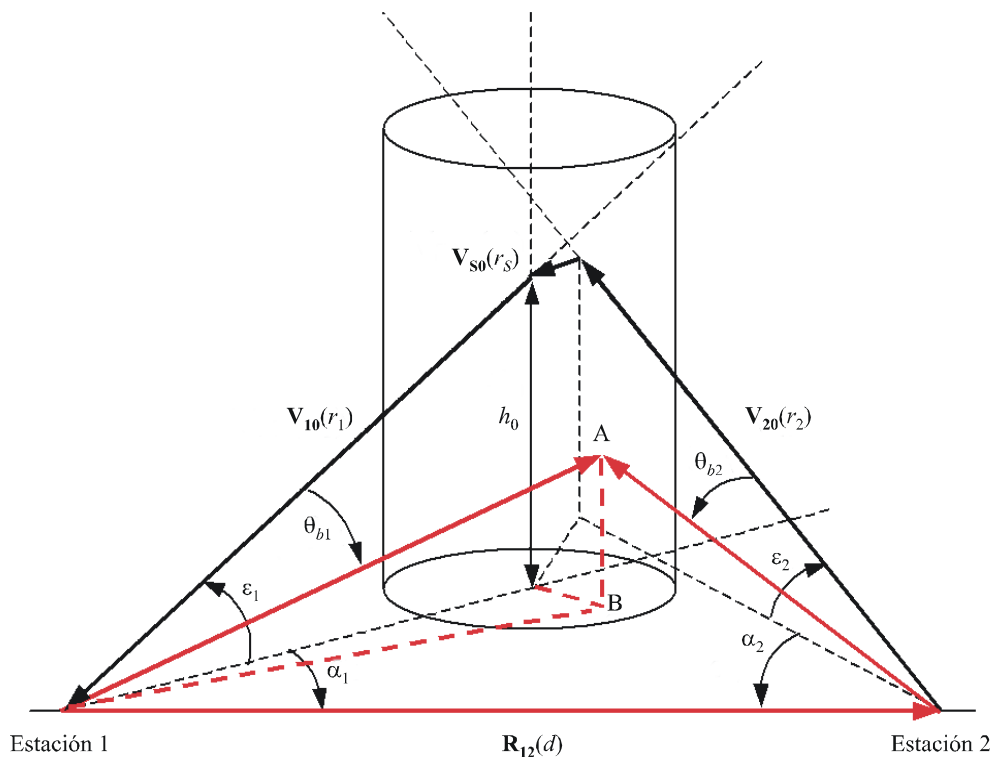
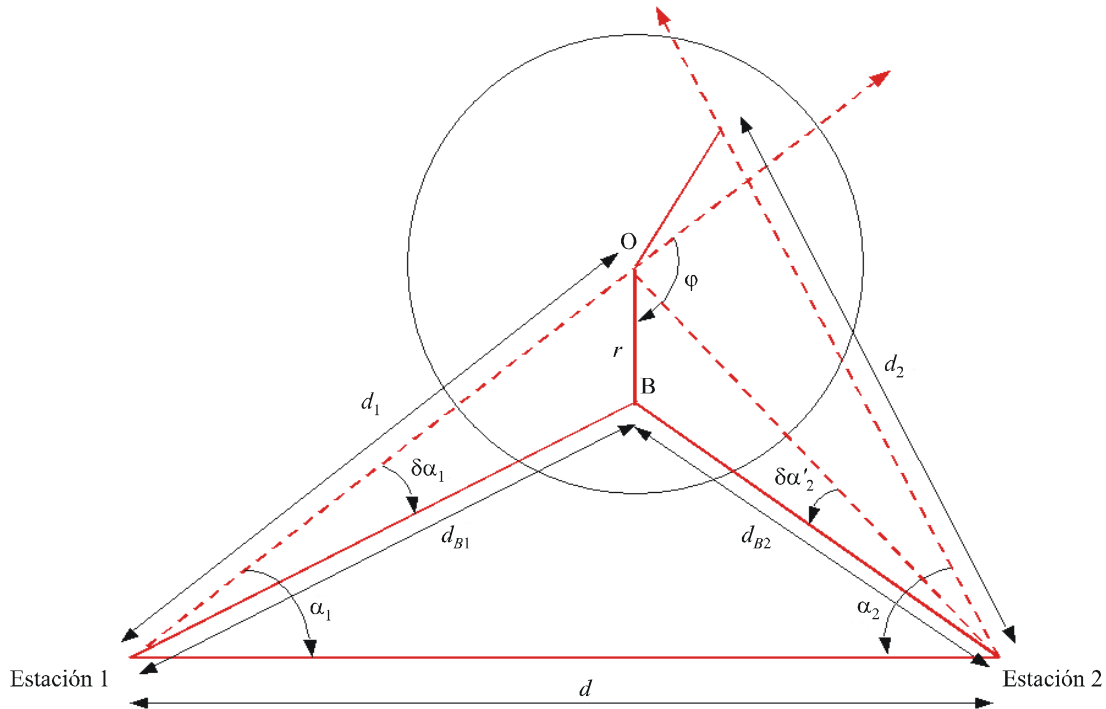


FIGURA 8

Vista en planta de la geometría para determinar las ganancias de antena



0452-08

Se calcula la distancia horizontal desde la Estación 1 al punto B:

$$d_{B1} = \sqrt{r^2 + d_1^2 + 2rd_1 \cos \phi} \quad \text{km} \quad (77)$$

y el ángulo que forma este trayecto y la proyección horizontal del eje del haz principal de la antena de la Estación 1:

$$\delta\alpha_1 = \arcsen\left(\frac{r \sin \phi}{d_{B1}}\right) \quad (78)$$

El ángulo de elevación del punto A desde la Estación 1 viene dado por la expresión:

$$\epsilon_{A1} = \arctg\left(\frac{h}{d_{B1}}\right) \quad (79)$$

El vector de longitud unitaria de la Estación 1 al punto A se define como sigue:

$$\mathbf{V}_{A1} = \begin{bmatrix} \cos \epsilon_{A1} \cos(\alpha_1 - \delta\alpha_1) \\ -\cos \epsilon_{A1} \sin(\alpha_1 - \delta\alpha_1) \\ \sin \epsilon_{A1} \end{bmatrix} \quad (80)$$

Se determina el ángulo de puntería con respecto al eje de la antena del punto (r, φ, h) para la antena de la Estación 1:

$$\theta_{b1} = \arccos(\mathbf{V}_{A1} \cdot \mathbf{V}_{10}) \quad (81)$$

La distancia desde la Estación 1 al punto A es:

$$r_{A1} = \frac{d_{B1}}{\cos \varepsilon_{A1}} \quad \text{km} \quad (82)$$

y, observando que los vectores \mathbf{R}_{12} , \mathbf{R}_{A2} y $\mathbf{R}_{A1} = r_{A1} \mathbf{V}_{A1}$ forman un triángulo cerrado, el vector entre la Estación 2 y el punto A en (r, φ, h) puede determinarse a partir de la expresión:

$$\mathbf{R}_{A2} = \mathbf{R}_{12} - r_{A1} \mathbf{V}_{A1} \quad \text{km} \quad (83)$$

La distancia entre la Estación 2 y el punto A se calcula, pues, como sigue:

$$r_{A2} = |\mathbf{R}_{A2}| \quad \text{km} \quad (84)$$

mientras que el vector unitario desde la Estación 1 en dirección del elemento de integración es:

$$\mathbf{V}_{A2} = \frac{\mathbf{R}_{A2}}{r_{A2}} \quad (85)$$

A continuación, se determina el ángulo de puntería con respecto al eje de la antena de la Estación 2 del elemento de integración en el punto A, con las coordenadas (r, φ, h) :

$$\theta_{b2} = \arccos(-\mathbf{V}_{A2} \cdot \mathbf{V}_{20}) \quad (86)$$

El método anterior para calcular las ganancias de antena sólo es apropiado en el caso de antenas circulares. Si la antena de la Estación 1 es una antena sectorial u omnidireccional, como las que se instalan en los sistemas de difusión punto a multipunto, por ejemplo, se utiliza un método algo diferente para determinar la ganancia de antena que variará únicamente en la dirección vertical (dentro de la zona cubierta por la célula de lluvia). En este caso, el ángulo de puntería con respecto al eje en la dirección vertical se determina de manera más sencilla a partir de la fórmula:

$$\theta_{b1} = |\varepsilon_{A1} - \varepsilon_1| \quad (87)$$

De forma similar, si la antena de la Estación 2 es una antena sectorial u omnidireccional, el ángulo de puntería con respecto al eje en dirección vertical se determina a partir de la fórmula:

$$\theta_{b2} = |\varepsilon_{A2} - \varepsilon_2| \quad (88)$$

donde:

$$\varepsilon_{A2} = \arctg\left(\frac{h}{d_{B2}}\right) \quad (89)$$

y

$$d_{B2} = \sqrt{d^2 + d_{B1}^2 - 2d \cdot d_{B1} \cos(\alpha_1 - \delta\alpha_1)} \quad \text{km} \quad (90)$$

Es importante recordar que los ángulos de puntería con respecto al eje se especifican normalmente en grados cuando se utilizan en los diagramas de radiación de antena típicos, mientras que las funciones trigonométricas en la mayoría de los paquetes informáticos generalmente se calculan en radianes. Por consiguiente, es necesario realizar una sencilla conversión de radianes a grados antes de utilizar estos ángulos en los procedimientos de integración.

Las ganancias de antena pueden obtenerse entonces a partir del diagrama de radiación de antena, de la máxima ganancia de la antena y del ángulo de puntería con respecto al eje, que es función del emplazamiento dentro de la célula de lluvia. Por defecto, pueden utilizarse los diagramas de radiación de las Recomendaciones UIT-R P.620 (también UIT-R F.699) o UIT-R F.1245, observando que en esta última aparecen unos niveles del lóbulo lateral inferiores. Cabe señalar que es necesario expresar las ganancias en términos lineales para efectuar la integración.

Paso 5: Determinación de las longitudes del trayecto dentro de la célula de lluvia

A continuación se determinan las pérdidas del trayecto desde el elemento de integración hacia cada una de las estaciones, A_1 y A_2 , que dependen de las longitudes del trayecto y de la posición del elemento de integración dentro de la célula de lluvia.

La célula de lluvia se divide en tres volúmenes, como muestra la Fig. 9. En el volumen inferior, la sección transversal de dispersión es constante a lo largo de la célula de lluvia y viene determinada por la reflectividad del radar Z_R a nivel del suelo, siendo $\zeta(h) = 1$. Los trayectos dentro de la célula de lluvia en las direcciones hacia cada estación, x_1 y x_2 , están sujetos a la atenuación por lluvia. En el volumen medio, el elemento de integración se encuentra por encima de la altura de la lluvia y la sección transversal de dispersión disminuye en función de la altura por encima de la altura de la lluvia, a un ritmo de $-6,5$ dB/km. Sin embargo, una fracción f de cada trayecto puede que siga pasando a través de la lluvia por debajo de la altura de la lluvia, dependiendo de la geometría, y en consecuencia estos trayectos están sujetos a la atenuación adicional por lluvia a lo largo de estas longitudes de trayecto fraccionarios $f_{x1,2}$ que pasan a través de la célula. En el volumen superior, el elemento de integración se encuentra por encima de la célula de lluvia y ninguna porción de los trayectos pasa a través de la célula de lluvia por debajo de la altura de la lluvia. En consecuencia, tales trayectos no sufren ninguna atenuación por lluvia.

Las longitudes de trayecto en estos volúmenes se evalúan de la forma siguiente.

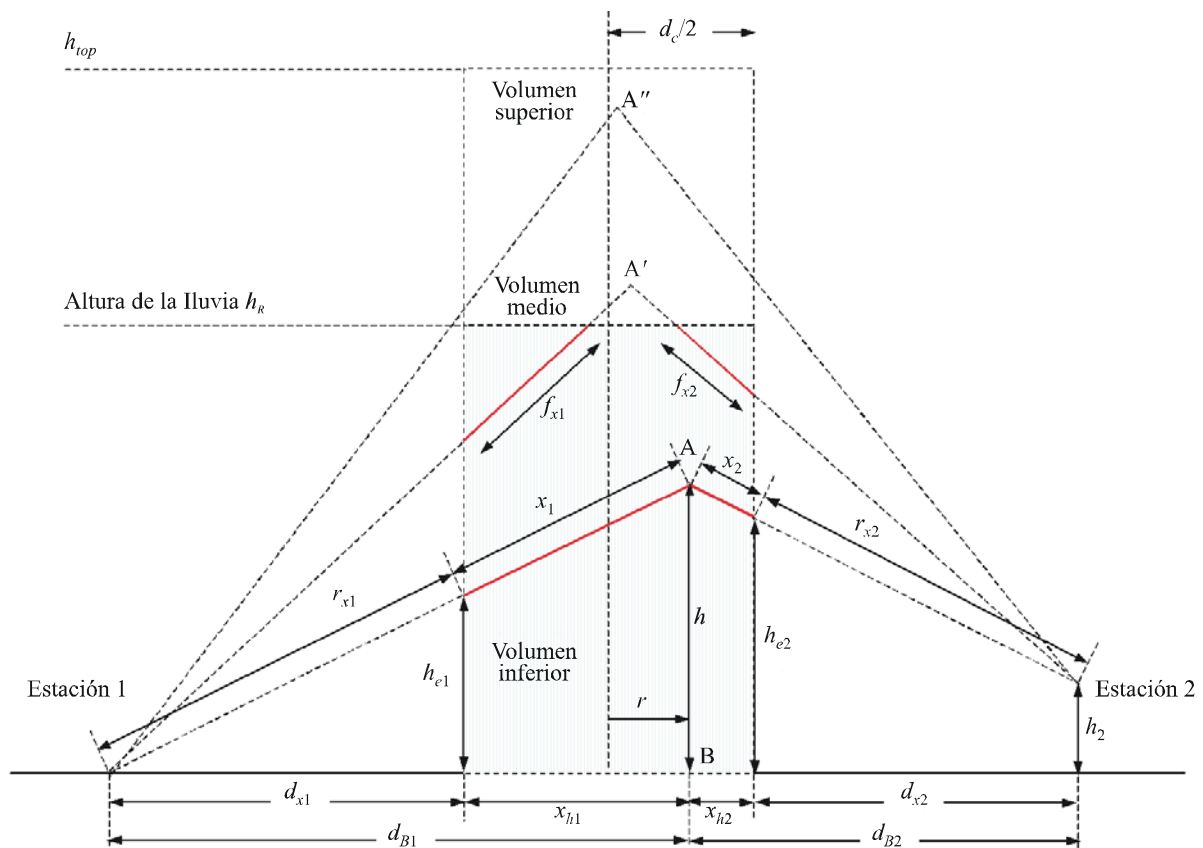
Volumen inferior

En el volumen inferior, el elemento de integración se encuentra siempre por debajo de la altura de la lluvia, h_R , y los trayectos dentro de la célula de lluvia están todos ellos sujetos a atenuación por lluvia, es decir:

$$A_{1,2} = \gamma_{R1,2} x_{1,2} \quad \text{dB} \quad (91)$$

donde $\gamma_{R1,2} = k_{1,2} R^{\alpha_{1,2}}$ es la atenuación específica por lluvia (dB/km), y los coeficientes $k_{1,2}$ y $\alpha_{1,2}$ son funciones de la frecuencia f , de la polarización τ y de la elevación del trayecto $\epsilon_{1,2}$ según la Recomendación UIT-R P.838. Obsérvese que la atenuación por lluvia específica depende del ángulo de elevación del trayecto y, en principio, debe calcularse para cada elemento de integración y para cada valor de las coordenadas (r, ϕ, h) . Sin embargo, la variación con el ángulo de elevación es pequeña y es suficiente para determinar los valores de γ_R únicamente una vez para los trayectos dirigidos hacia cada estación basándose en los respectivos ángulos de elevación de antena.

FIGURA 9
Volúmenes de integración dentro de la célula de lluvia



0452-09

Las longitudes del trayecto r_{x1} , r_{x2} , x_1 y x_2 se obtienen a partir de la geometría, como sigue. La Fig. 10 representa una vista en planta horizontal siendo B el punto de proyección sobre el plano del suelo del elemento de integración A. En este caso, la altura corregida de la Estación 2, h_2 , se supone inicialmente de un valor cero y esto se tiene en cuenta posteriormente.

Se calcula la distancia horizontal d_{x1} desde la Estación 1 al borde de la célula de lluvia (punto X_1), mediante la regla del coseno (tomando el signo negativo ya que es el borde más cercano):

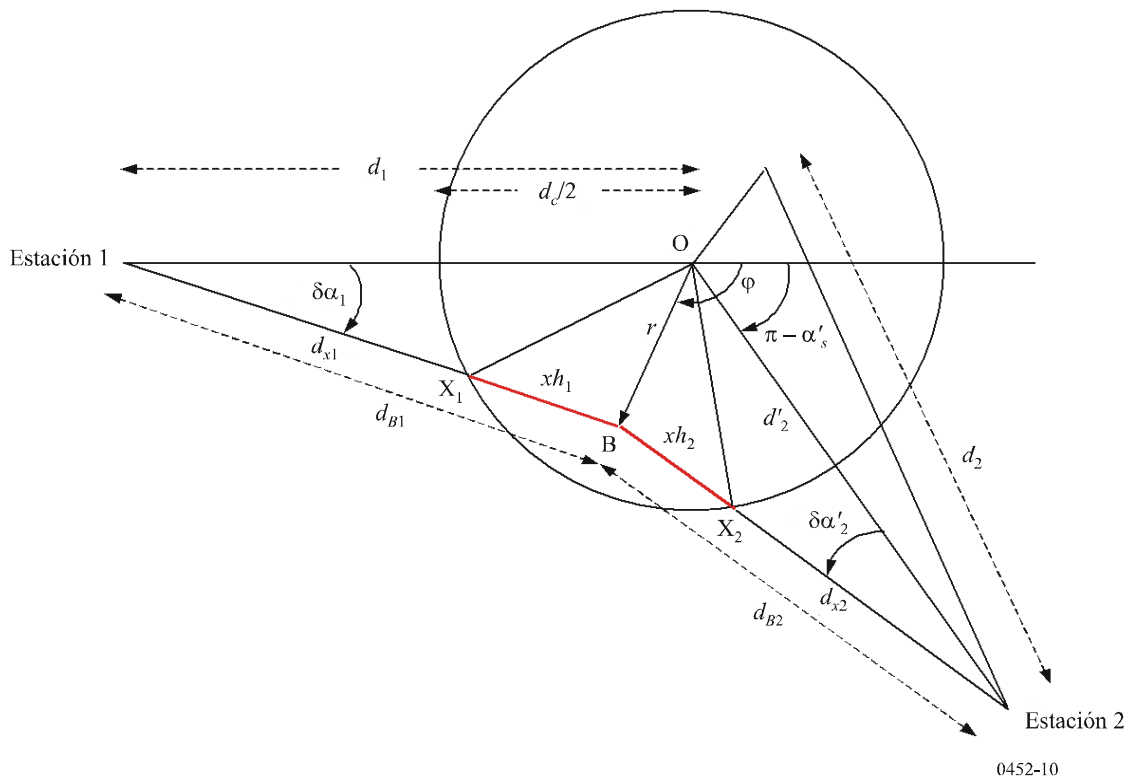
$$d_{x1} = d_1 \cos \delta \alpha_1 - \sqrt{d_1^2 \cos^2 \delta \alpha_1 - d_1^2 + \left(\frac{d_c}{2}\right)^2} \quad \text{km} \quad (92)$$

La distancia de trayecto oblicuo hasta el borde de la célula de lluvia es, por consiguiente:

$$r_{x1} = \frac{d_{x1}}{\cos \epsilon_{A1}} \quad \text{km} \quad (93)$$

FIGURA 10

Vista en planta de la geometría de dispersión a través del elemento de integración



0452-10

Se determina el ángulo de desplazamiento del elemento de integración en el punto A para la Estación 2:

$$\delta \alpha_2 = \arctg \left(\frac{-r \sin(\varphi + \alpha'_s)}{d'_2 + r \cos(\varphi + \alpha'_s)} \right) \quad (94)$$

donde α'_s viene dado por la expresión

$$\alpha'_s = \arcsen \left(\frac{d}{d'_2} \sin \alpha_1 \right) \quad (95)$$

y

$$d'_2 = \sqrt{d^2 + d_1^2 - 2d \cdot d_1 \cos \alpha_1} \quad \text{km} \quad (96)$$

A continuación, se calcula la distancia horizontal d_{x2} a partir de la regla del coseno:

$$d_{x2} = d'_2 \cos \delta\alpha'_2 - \sqrt{\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 - d'^2_2 \sin^2 \delta\alpha'_2} \quad \text{km} \quad (97)$$

Se calcula la distancia del trayecto oblicuo r_{x2} a través de la célula de lluvia hacia la Estación 2:

$$r_{x2} = \frac{d_{x2}}{\cos \epsilon_{A2}} \quad \text{km} \quad (98)$$

A continuación es preciso considerar dos casos:

Caso 1: cuando la Estación 1 está situada fuera de la célula de lluvia; es decir, cuando $d_1 > d_c/2$. En este caso, únicamente una parte del trayecto que va desde el elemento de integración A hasta la Estación 1 se encontrará dentro de la célula de lluvia y, por consiguiente, sujeto a atenuación;

Caso 2: cuando el ángulo de elevación es muy alto y la Estación 1 está situada dentro de la célula de lluvia; es decir, cuando $d_1 \leq d_c/2$. En este caso, todo el trayecto hasta la altura de la lluvia se encontrará siempre dentro de la célula de lluvia y, en consecuencia, sufrirá atenuación.

La longitud de trayecto x_1 para la atenuación por lluvia a lo largo del trayecto hacia la Estación 1 viene determinada por la siguiente expresión:

$$x_1 = \begin{cases} r_{A1} - r_{x1} & \text{si } d_1 > \frac{d_c}{2} \\ r_{A1} & \text{si } d_1 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{km} \quad (99)$$

y la longitud del trayecto x_2 para la atenuación por lluvia a lo largo del trayecto hacia la Estación 2 viene determinada por la siguiente expresión:

$$x_2 = \begin{cases} r_{A2} - r_{x2} & \text{si } d_2 > \frac{d_c}{2} \\ r_{A2} & \text{si } d_2 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{km} \quad (100)$$

Por consiguiente, en los casos en que el elemento de integración se encuentre por debajo de la altura de la lluvia, puede determinarse la atenuación a través de la célula de lluvia, en términos lineales, a partir de la siguiente expresión:

$$A_b = \exp[-k(\gamma_{R1}x_1 + \gamma_{R2}x_2)] \quad \text{si } h \leq h_R \quad (101)$$

donde $k = 0,23026$ es una constante para convertir la atenuación expresada en dB a atenuación expresada en neperios.

Volúmenes medio e inferior

En estos volúmenes el elemento de integración se encuentra por encima de la altura de la lluvia, h_R , pero algunas partes de los trayectos hacia cada una de las estaciones pueden atravesar la lluvia por debajo de la altura h_R . Ello ocurrirá únicamente cuando los ángulos de elevación del elemento de integración A, $\epsilon_{A1,2}$, sean inferiores a los ángulos $\epsilon_{C1,2}$ subtendidos en cada estación por la esquina superior más próxima de la célula de lluvia, es decir si:

$$\epsilon_{A1} < \epsilon_{C1} = \arctg\left(\frac{h_R}{d_{x1}}\right) \quad \text{y} \quad \epsilon_{A2} < \epsilon_{C2} = \arctg\left(\frac{h_R - h_2}{d_{x2}}\right)$$

En estos casos, debe tenerse en cuenta la atenuación resultante. Esta circunstancia es especialmente importante en el Caso 2 anterior, cuando una de las antenas tiene un ángulo de elevación muy alto y la estación está situada dentro de la célula de lluvia.

En la Fig. 9, las alturas a las cuales los rayos procedentes del elemento de integración en el punto A pasan a través de los bordes de la célula de lluvia pueden determinarse a partir de las relaciones entre las distancias horizontales desde cada estación al borde de la célula de lluvia y al punto B:

$$\begin{aligned} h_{e1} &= h \cdot \frac{d_{x1}}{d_{B1}} && \text{km} && (102) \\ h_{e2} &= (h - h_2) \cdot \frac{d_{x2}}{d_{B2}} + h_2 \end{aligned}$$

La parte fraccionaria de las longitudes de trayecto $f_{x1,2}$ que pasa a través de la célula de lluvia puede determinarse a partir de las relaciones:

$$f_{x1,2} = \begin{cases} x_{1,2} \left(\frac{h_R - h_{e1,2}}{h - h_{e1,2}} \right) & \text{si } h > h_R > h_{e1,2} \quad \text{y} \quad \epsilon_{A1,2} < \epsilon_{C1,2} && \text{km} && (103) \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Por último, se calcula la atenuación en términos lineales para los casos en los que el elemento de integración se encuentra por encima de la altura de la lluvia, h_R :

$$A = \exp[-k\{6,5(h - h_R) + \gamma_{R1}f_{x1} + \gamma_{R2}f_{x2}\}] \quad \text{para } h \geq h_R \quad (104)$$

Este Paso define a continuación el integrando para la función de transferencia de dispersión.

Paso 6: Atenuación fuera de la célula de lluvia

En la formulación aquí utilizada, la lluvia está confinada únicamente a una célula con un diámetro d_c , definida por la geometría indicada en el Paso 2 y la intensidad de lluvia se considera uniforme dentro de dicha célula. Por regla general, la lluvia se extenderá más allá de esta región disminuyendo en intensidad a medida que aumenta la distancia desde el centro de la célula y esta circunstancia debe tenerse en cuenta. Sin embargo, si la estación está ubicada dentro de la célula de lluvia, no se producirá atenuación debida a la lluvia externa que deba ser considerada para esa estación. Además, si el elemento de integración está lo suficientemente alejado por encima de la altura de la lluvia de manera que ninguna parte del trayecto hacia cualquier estación pase a través de la célula de lluvia, no se incluye ninguna atenuación externa a lo largo de ese trayecto.

Como una aproximación, se considera que la lluvia fuera de la célula de lluvia disminuye con la distancia de la manera indicada por la siguiente expresión:

$$r_m = 600R^{-0,5} 10^{-(R+1)^{0,19}} \quad \text{km} \quad (105)$$

Para la dispersión por debajo de la altura de la lluvia, se calcula la atenuación fuera de la célula de lluvia utilizando la siguiente expresión:

$$A_{ext1,2} = \begin{cases} \frac{\gamma_{R1,2} r_m}{\cos \varepsilon_{A1,2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{d_{x1,2}}{r_m}\right) \right] & \text{si } d_{1,2} > \frac{d_c}{2} \text{ y } f_{x1,2} \neq 0 \\ 0 & \text{si } d_{1,2} \leq \frac{d_c}{2} \text{ o } f_{x1,2} = 0 \end{cases} \quad \text{dB} \quad (106)$$

es decir, la atenuación a lo largo de cualquier trayecto se fija a cero si la estación correspondiente está situada dentro de la célula de lluvia ($d_{1,2} \leq d_c/2$) o si el elemento de integración se encuentra por encima de la célula de lluvia y ninguna parte del trayecto atraviesa la célula de lluvia, lo que viene determinado por el hecho de si los trayectos fraccionarios $f_{x1,2}$ son cero o no.

Paso 7: Integración numérica de la función de transferencia de dispersión

La integración se divide en dos secciones, para la dispersión por debajo de la altura de la lluvia y la dispersión por encima de la altura de la lluvia:

$$C_b = \int_{h_{\min}}^{h_R} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(\gamma_{R1} x_1 + \gamma_{R2} x_2 + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\varphi dh \quad (107)$$

$$C_a = \int_{h_R}^{h_{\text{top}}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(6,5(h - h_R) + \gamma_{R1} f_{x1} + \gamma_{R2} f_{x2} + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\varphi dh \quad (108)$$

donde las ganancias de antenas se especifican en términos lineales como funciones de los ángulos de puntería con respecto al eje $\theta_{b1,2}(r, \varphi, h)$.

La integración, en coordenadas cilíndricas, se realiza a lo largo de las siguientes gamas: para r desde 0 hasta el radio de la célula de lluvia, $d_c/2$, y para φ desde 0 hasta 2π . Pueden imponerse algunas limitaciones en la variable de la tercera integración, h , que es la altura en el interior de la célula de lluvia. La mínima altura, h_{\min} , viene determinada por la visibilidad de la célula de lluvia desde cada una de las estaciones. Si existe algún apantallamiento causado por el terreno en las proximidades de alguna de las estaciones, la dispersión desde las alturas dentro de la célula de lluvia que no son visibles desde ninguna estación debe eliminarse de la integración. Por consiguiente, la mínima altura para la integración puede determinarse a partir de los ángulos del horizonte para cada estación, de la forma siguiente:

$$h_{\min} = \max(d_{x1} \operatorname{tg} \varepsilon_{H1}, d_{x2} \operatorname{tg} \varepsilon_{H2}) \quad \text{km} \quad (109)$$

Obsérvese que en este caso se utilizan valores locales puesto que en la determinación de los ángulos de puntería con respecto al eje ya se ha tenido en cuenta cualquier apantallamiento inherente debido a la curvatura de la Tierra para un ángulo de elevación cero.

Puede definirse la máxima altura para la integración, h_{top} , a fin de minimizar los requisitos de cálculo, ya que por regla general no será necesario integrar la sección transversal de dispersión a

alturas por encima de las cuales los lóbulos laterales de la antena se han reducido significativamente. Se suponen 15 km como valor por defecto de la altura por encima de la cual puede finalizar la integración sin que disminuya la precisión.

Integración numérica

Existen varios métodos disponibles para la integración numérica y muchos paquetes informáticos matemáticos incluyen funciones de integración intrínseca que pueden explotarse eficazmente. En los casos en que el usuario desea elaborar un paquete informático especializado en otros lenguajes de programación, se ha demostrado la eficacia de los métodos basados en técnicas de bisección iterativa. Una de dichas técnicas es el método de Romberg que se trata de una variante de orden más elevado de la regla trapezoidal básica (es decir, la regla de Simpson) para realizar la integración mediante sucesivas bisecciones de los intervalos de integración.

La integración de Romberg utiliza una combinación de dos métodos numéricos para calcular una aproximación a una integral propia, es decir:

$$I = \int_a^b y(x)dx$$

La regla trapezoidal ampliada se utiliza para calcular una secuencia de aproximaciones a la integral, dividiendo por dos cada término entre los intervalos entre las evaluaciones de la función. A continuación, se usa la extrapolación polinómica para extrapolar la secuencia a un intervalo de longitud cero. El método puede resumirse mediante el bucle de pseudocódigo:

```

Índice = 1
WHILE estimated_error > desired_error DO
  S(Índice) = aproximación de la regla trapezoidal utilizando 2Índice intervalos
  I = extrapolación polinómica de S
  Índice = Índice + 1
ENDWHILE

```

Regla trapezoidal ampliada

Mediante interpolación lineal entre $N + 1$ abscisas equiespaciadas (x_i, y_i) la integral puede aproximarse de la siguiente forma:

$$I \approx T^N = h(N) \left(\frac{1}{2} y_0 + y_1 \cdots y_{N-1} + \frac{1}{2} y_N \right)$$

donde:

$$h(N) = \frac{b-a}{N} : \quad \text{intervalo entre abscisas.}$$

El número de intervalos puede duplicarse utilizando la recurrencia:

$$T^{2N} = \frac{1}{2} T^N + h(2N)(y_1 + y_3 \cdots y_{N-3} + y_{N-1})$$

El método de Romberg construye por recurrencia la secuencia $S(i) = T^{2^i}$.

Extrapolación polinómica

En el límite, el error en la aproximación trapezoidal ampliada a I es un polinomio en h^2 , es decir:

$$I = T^N + \varepsilon^N$$

donde:

$$\varepsilon^N \cong P(h^2(N))$$

y

P : polinomio desconocido.

La secuencia de aproximaciones trapezoidales, $T^N = I - \varepsilon^N$, también es un polinomio a h^2 y, por consiguiente, puede utilizarse una extrapolación polinómica para estimar el límite cuando $h \rightarrow 0$. Si se dispone de m aproximaciones trapezoidales, puede ajustarse un polinomio único de grado $M - 1$ a los puntos $(h^2(n), T^n)$ para $n = 1, 2, 4, 8, \dots, 2^{M-1}$. Evaluando este único polinomio en $h = 0$ se obtiene una aproximación al límite del método trapezoidal.

Normalmente, el método de Neville se utiliza para calcular el valor del polinomio en $h = 0$. El método de Neville es eficaz y arroja una estimación de error que puede utilizarse para finalizar la integración de Romberg. El método es una aproximación por interpolación lineal sucesiva a una interpolación polinómica Lagrangiana de grado elevado. El método de Lagrange puede describirse como sigue. Para $M + 1$ puntos (x_i, y_i) , puede definirse un polinomio de grado m como una combinación lineal de funciones básicas:

$$P(x) \equiv \sum_{i=0}^n y_i L_i(x) \equiv \sum_{i=0}^n y_i \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^n \frac{(x - x_k)}{(x_i - x_k)}$$

es decir:

$$L_i(x) = \frac{(x - x_0) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)}$$

Este método de interpolación requiere conocer todas las coordenadas y_i para realizar una estimación de la solución a $x = 0$, y en el caso de problemas de gran envergadura esto no es eficaz porque no se aprovechan las interpolaciones previas cuando se efectúen iteraciones a órdenes más elevados. El método de Neville es un proceso recurrente basado en la relación entre una aproximación y un polinomio y sus dos aproximaciones precedentes. En consecuencia, para dos puntos cualesquiera (x_k, y_k) , existe un polinomio único de grado 0; es decir, una línea recta, que pasa a través de estos dos puntos, $P_k = y_k$. Se realiza una segunda iteración en la cual el polinomio se ajusta mediante pares de puntos obteniéndose P_{12}, P_{23}, \dots , y se repite el procedimiento para establecer una pirámide de aproximaciones:

$$\begin{array}{cccc} P_1 & & & \\ & P_{12} & & \\ P_2 & & P_{123} & \\ & P_{23} & & P_{1234} \\ P_3 & & P_{234} & \\ & P_{34} & & \\ P_4 & & & \end{array}$$

El resultado final puede representarse por:

$$P_{i(i+1)\dots(i+m)} = \frac{(x - x_{i+m})P_{i(i+1)\dots(i+m-1)} + (x_i - x)P_{(i+1)(i+2)\dots(i+m)}}{x_i - x_{i+m}}$$

El método Neville, por consiguiente, es un proceso recurrente que completa la pirámide columna a columna de una manera eficaz desde el punto de vista de cálculo.

En la práctica, la extrapolación polinómica es inestable cuando se ajusta un gran número de puntos y, en consecuencia, normalmente en la integración de Romberg se utiliza una extrapolación polinómica de cuarto grado que se ajusta a las últimas cinco aproximaciones trapezoidales.

Los métodos de integración numérica, tales como los que utilizan técnicas de bisección, realizan iteraciones hasta lograr que se satisfaga un criterio de precisión, según el cual se da por finalizada la iteración cuando la diferencia entre iteraciones sucesivas es más pequeña que una fracción predeterminada del resultado precedente. Normalmente, esta fracción estará comprendida entre 10^{-3} y 10^{-6} , siendo este último valor próximo a las capacidades de los procesadores de 32 bits. Debe tenerse precaución cuando se utilizan valores más elevados por encima de esta gama puesto que pueden aumentar los errores en las pérdidas calculadas. Como regla general, se ha determinado que un valor de 10^{-4} es un buen compromiso entre precisión y velocidad de cálculo.

Se necesitan tres integraciones numéricas jerarquizadas para llevar a cabo la integración de volumen tridimensional a lo largo de la célula de lluvia, en coordenadas cilíndricas, realizando la integración exterior a lo largo del parámetro altura, h , por ejemplo. Esta integración requiere realizar la integral a lo largo del parámetro acimutal φ para un valor particular de h que, a su vez, exige calcular la integral a lo largo del parámetro radio r para valores particulares de (h, φ) .

Cabe señalar que generalmente son necesarias muchas iteraciones de la función de transferencia de dispersión a fin de lograr la precisión requerida, especialmente cuando las ganancias de antena son elevadas y el producto de las ganancias de antena puede variar a lo largo del diámetro de la célula de lluvia un valor de 60 dB o más. En consecuencia, los tiempos de cálculo pueden alcanzar las decenas de minutos e incluso algunas horas en los casos más extremos, aun utilizando procesadores de alta velocidad.

En la Oficina de Radiocomunicaciones se dispone de una versión informática de la metodología escrita en lenguaje Fortran, que utiliza el método de Romberg, y una versión escrita en Mathcad que utiliza unos dispositivos de integración incorporados.

Paso 8: Determinación de otros factores de pérdidas

Se calcula la desviación con respecto a la dispersión de Rayleigh utilizando la ecuación (39) con el ángulo de dispersión φ_s dado por la ecuación (54).

Se calcula la atenuación a lo largo de los trayectos debido a la absorción por gases atmosféricos utilizando el Anexo 2 a la Recomendación UIT-R P.676 para las atenuaciones específicas γ_o e γ_w y las alturas equivalentes h_o y h_w para los casos de aire seco y vapor de agua, respectivamente. Las atenuaciones se calculan utilizando las siguientes expresiones para la atenuación del trayecto entre dos altitudes sobre el nivel del mar, estando determinada la altitud superior por la altura del punto de cuasi-intersección entre los ejes de los haces principales de las dos antenas. Este método es una aproximación ya que la atenuación gaseosa real variará para cada elemento de dispersión dentro del volumen de dispersión. Sin embargo, como la atenuación gaseosa normalmente es una componente menor en las pérdidas de transmisión totales, y su variabilidad es reducida en comparación con las

incertidumbres que presentan los valores de otros parámetros tales como la intensidad de lluvia, la altura de la lluvia y la geometría de la propia célula de lluvia, esta simplificación se considera justificable. El siguiente método proporciona una estimación de la atenuación gaseosa con una precisión aceptable para el procedimiento global.

Las altitudes menores para cada estación vienen dadas por los valores locales $h_{1_loc} = h_{2_loc}$. La altitud superior h_p es la altura del punto de cuasi-intersección, teniendo en cuenta la curvatura de la Tierra; es decir, el valor local que se determina a partir de la expresión:

$$h_p = h_0 + \sqrt{d_1^2 + r_{eff}^2} - r_{eff} + h_c \quad \text{km} \quad (110)$$

Para ángulos de elevación comprendidos entre 5° y 90° , la atenuación entre dos altitudes se calcula a partir de la diferencia entre las atenuaciones de trayecto oblicuo total desde cada altitud:

$$A_{o_i} = \frac{\gamma_o h_o - \gamma_o h_o \left[\exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_o}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_o}\right) \right]}{\text{sen}\epsilon_{i_loc}} \quad \text{dB} \quad (111)$$

$$A_{w_i} = \frac{\gamma_w h_o - \gamma_w h_o \left[\exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_w}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_w}\right) \right]}{\text{sen}\epsilon_{i_loc}} \quad \text{dB} \quad (112)$$

donde el índice, i , se refiere a cada una de las dos estaciones y ϵ_{i_loc} son los ángulos de elevación local de cada antena.

La densidad de vapor de agua ρ utilizada para determinar la atenuación específica γ_w es el valor hipotético a nivel del mar determinado a partir del valor a nivel del suelo en las estaciones (que puede suponerse que es el mismo):

$$\rho = \rho_g \exp\left(\frac{h_{i_loc}}{2}\right) \quad \text{g/m}^3 \quad (113)$$

Para ángulos de elevación comprendidos entre 0° y 5° , es necesario tener en cuenta los efectos de refracción. Los ángulos de elevación para el trayecto superior vienen determinados por la siguiente expresión:

$$\epsilon'_i = \arccos\left(\frac{h_1 + r_{eff}}{h_p + r_{eff}} \cos\epsilon_{i_loc}\right) \quad (114)$$

La atenuación del trayecto viene dada por las siguientes expresiones:

Para atenuaciones en aire seco:

$$A_{o_i} = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{h_{i_loc} + r_{eff}} \cdot F \left(\text{tg } \epsilon_i \sqrt{\frac{h_{i_loc} + r_{eff}}{h_o}} \right) \exp \left(-\frac{h_{i_loc}}{h_o} \right)}{\cos \epsilon_{i_loc}} \right. \\ \left. - \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F \left(\text{tg } \epsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_o}} \right) \exp \left(-\frac{h_p}{h_o} \right)}{\cos \epsilon'_i} \right] \quad \text{dB} \quad (115)$$

y para atenuación de vapor de agua:

$$A_{w_i} = \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{h_{i_loc} + r_{eff}} \cdot F \left(\text{tg } \epsilon_i \sqrt{\frac{h_{i_loc} + r_{eff}}{h_w}} \right) \exp \left(-\frac{h_{i_loc}}{h_w} \right)}{\cos \epsilon_{i_loc}} \right. \\ \left. - \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F \left(\text{tg } \epsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_w}} \right) \exp \left(-\frac{h_p}{h_w} \right)}{\cos \epsilon'_i} \right] \quad \text{dB} \quad (116)$$

donde la función F viene definida por:

$$F(x) = \frac{1}{0,661x + 0,339\sqrt{x^2 + 5,51}} \quad (117)$$

Incluyendo también cualquier desadaptación por polarización, M , que sea adecuada.

Paso 9: Determinación de la distribución acumulativa de las pérdidas de transmisión

Para cada par de valores de intensidad de lluvia y de altura de la lluvia, se calculan las pérdidas de transmisión según los Pasos 5 a 8, utilizando la siguiente expresión:

$$L = 208 - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log (C_b + C_a) + 10 \log S + A_g - M \quad \text{dB} \quad (118)$$

Una vez evaluadas todas las posibles combinaciones de intensidad de lluvia y de altura de la lluvia, los valores resultantes de las pérdidas de transmisión (dB), se truncan al valor entero más elevado y más próximo en dB (utilizando, por ejemplo, una función de *máximo*), y las probabilidades (en porcentaje) de todas las combinaciones que arrojan el mismo valor de pérdidas se suman para obtener la probabilidad global para cada nivel de pérdidas de transmisión. A continuación, la función densidad de probabilidad resultante se convierte en la correspondiente distribución acumulativa de pérdidas de transmisión sumando los porcentajes para valores de pérdida en aumento.

Apéndice 1 al Anexo 1

Datos radiometeorológicos necesarios para el procedimiento de predicción con cielo despejado

1 Introducción

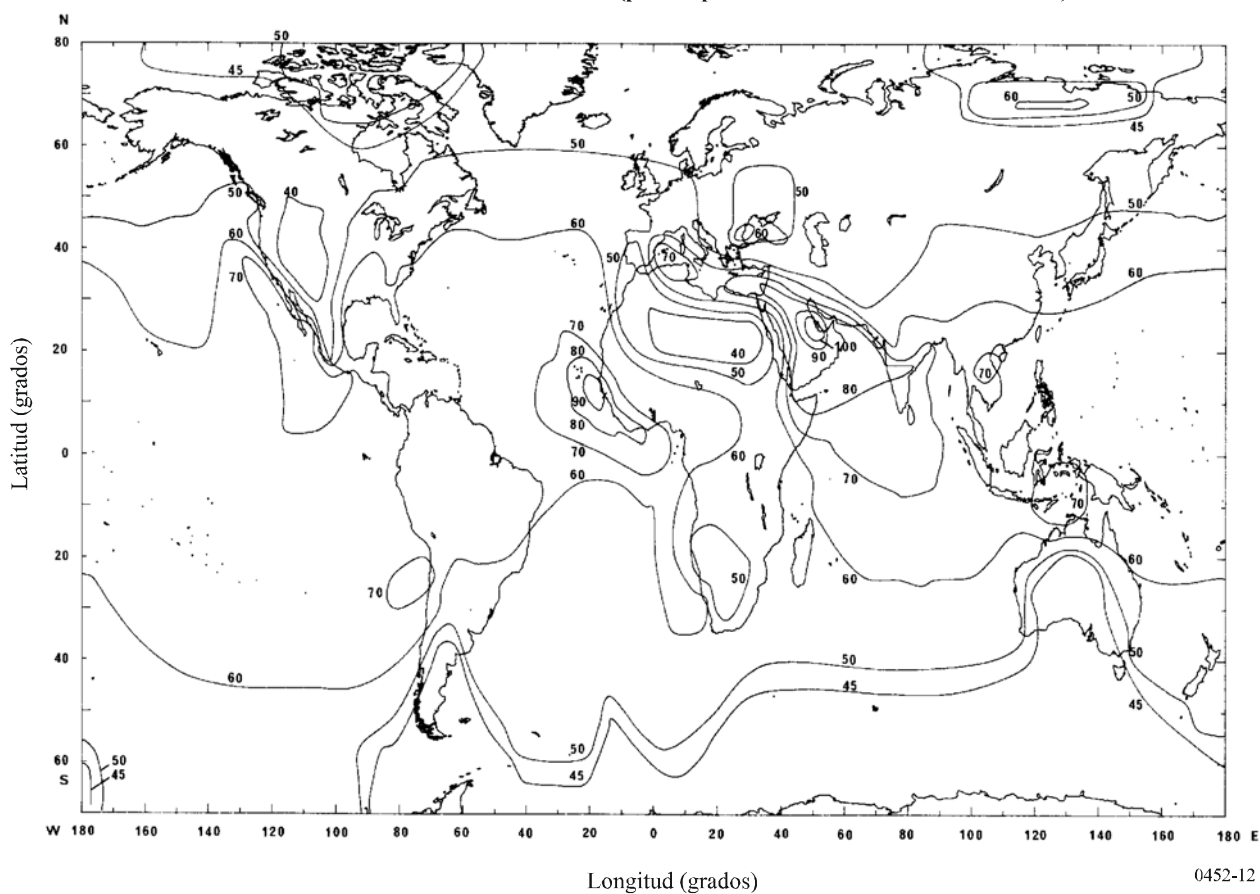
Los procedimientos de predicción con cielo despejado se basan en datos radiometeorológicos para proporcionar la variación básica de las predicciones con respecto a la localización. Estos datos vienen en forma de mapas que se incluyen en este Apéndice.

2 Mapas sobre la variación vertical de los datos de refracción radioeléctrica

En el procedimiento global, la radiometeorología del trayecto con cielo despejado se caracteriza para los mecanismos de interferencia continua (largo plazo) por el valor anual medio de ΔN (proporción de variación del índice de refracción en el primer kilómetro de la atmósfera), y para los mecanismos anómalos (a corto plazo) por el porcentaje de tiempo, $\beta_0\%$, en los cuales el gradiente de refracción de la capa inferior de la atmósfera es inferior a -100 unidades N/km. Estos parámetros proporcionan una base razonable sobre la cual establecer los modelos de los mecanismos de propagación con cielo despejado descritos en el § 2 del Anexo 1. Para algunas de estas cantidades, este Apéndice ofrece datos relativos a los cálculos anuales y a los del mes más desfavorable:

- la Fig. 11 proporciona datos de ΔN para un año promedio;
- la Fig. 12 proporciona los contornos asociados a los valores máximos de media mensual de ΔN .

FIGURA 12

Valores máximos de media mensual de ΔN (para la predicción del mes más desfavorable)

3 Mapa de refracción en la superficie, N_0

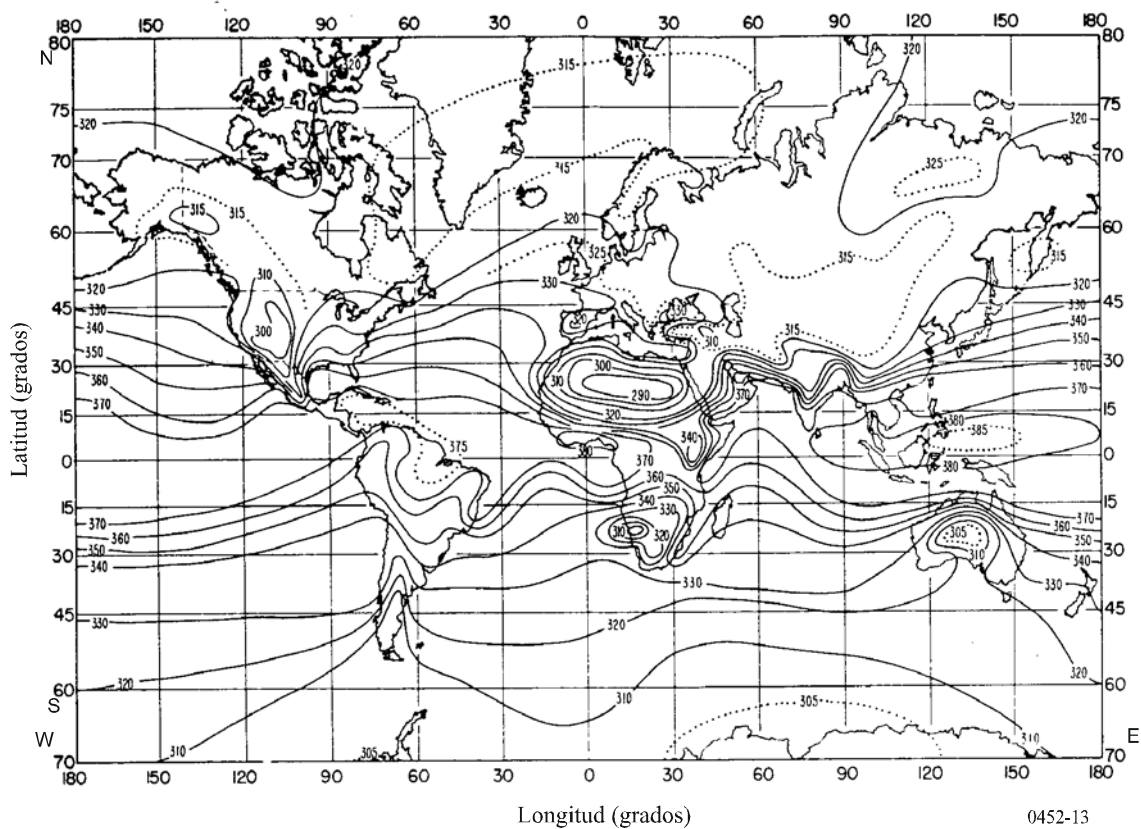
La Fig. 13 es un mapa de la refracción media en la superficie del mar, N_0 , para un modelo de dispersión troposférica.

4 Integración de los mapas como base de datos informática

Para la informatización de los procedimientos, conviene digitalizar estos mapas y convertirlos así en bases de datos sencillas a las que se pueda acceder mediante soporte lógico.

Para los mapas de índices de refracción global, se sugiere convertir los contornos en parejas de datos correspondientes a $0,5 \times 0,5$ de latitud y longitud. Para paliar discontinuidades en la predicción debidas a pequeños cambios de emplazamiento o distancia, los valores para cada pareja deberán obtenerse por interpolación entre contornos consecutivos en el mapa.

FIGURA 13
Refracción en la superficie del mar, N_0



Apéndice 2 al Anexo 1

Análisis del perfil de trayecto

1 Introducción

Para el análisis del perfil del trayecto, se necesita conocer el perfil del trayecto relativo a las elevaciones del terreno situadas por encima del nivel medio del mar. En el Cuadro 9 se presentan los parámetros que han de obtenerse del análisis del perfil del trayecto para establecer los modelos de propagación.

2 Construcción del perfil del trayecto

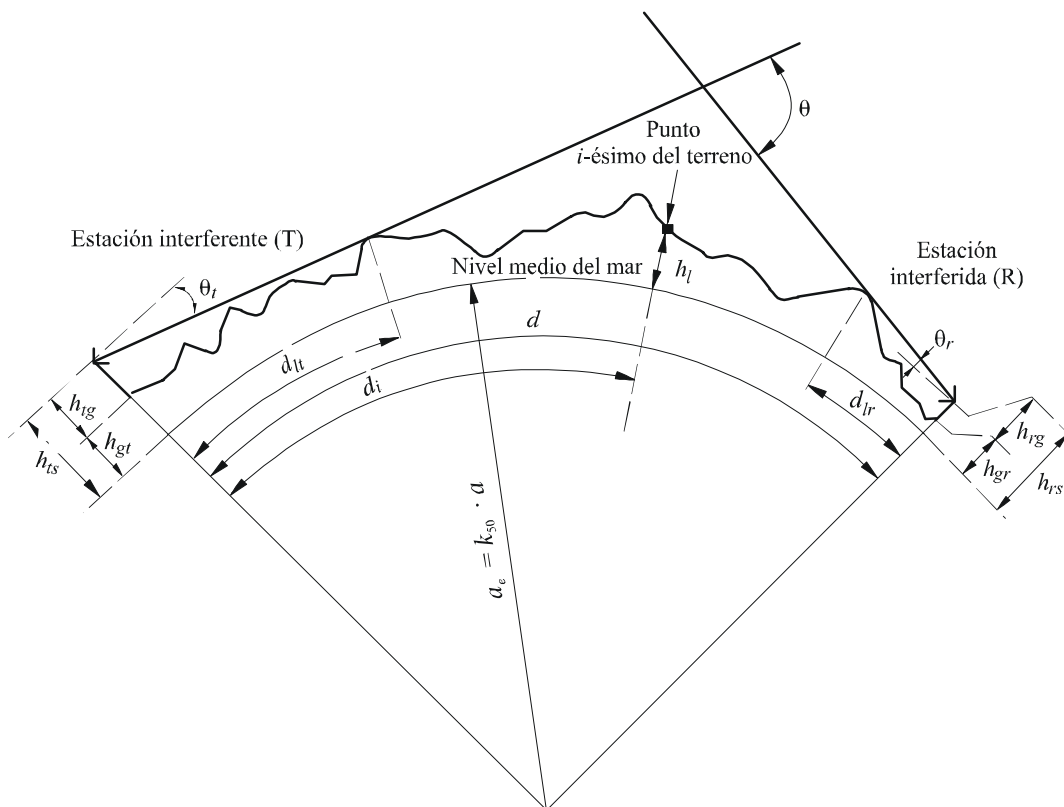
A partir de las coordenadas geográficas de las estaciones interferente (ϕ_i, ψ_i) e interferida (ϕ_r, ψ_r), se obtienen las elevaciones del terreno (por encima del nivel medio del mar) a lo largo del trayecto de círculo máximo a partir de una base de datos topográfica o de los correspondientes mapas de contorno a gran escala. La resolución preferida de distancias en el perfil es aquella que ofrece un número entero de pasos de aproximadamente 0,25 km. Pueden utilizarse otros incrementos de

distancia, hasta un máximo de 1 km aproximadamente, lo que disminuirá seguramente la precisión de la predicción. El perfil debe incluir las elevaciones del terreno en los emplazamientos de las estaciones interferente e interferida como puntos de comienzo y final. A las elevaciones a lo largo del trayecto se ha de añadir la curvatura de la Tierra, que se base en el valor de a_e hallado en la ecuación (6).

Aunque se consideran preferibles los puntos del perfil con separación uniforme, es posible utilizar el método de puntos del perfil con separación irregular. Ello puede resultar útil cuando el perfil se ha obtenido a partir de un mapa digital de los contornos de elevación del terreno. Sin embargo, debe señalarse que la Recomendación se ha elaborado a partir de pruebas realizadas utilizando puntos del perfil con separación uniforme; no se dispone de datos exactos sobre el efecto de los puntos separados de forma irregular.

Para los fines de esta Recomendación, el punto del perfil del trayecto en la estación interferente se considera como punto cero y el punto en la estación interferida como punto n . Así pues, el perfil de trayecto se compone de $n + 1$ puntos. La Fig. 14 ofrece un ejemplo de perfil de trayecto que muestra los diversos parámetros de las correspondientes elevaciones del terreno por encima del nivel medio del mar.

FIGURA 14
Ejemplo de un perfil de trayecto transhorizonte



Nota 1 – El valor del ángulo θ_r representado será negativo.

0452-14

El Cuadro 9 define los parámetros utilizados u obtenidos durante el análisis del perfil de un trayecto.

CUADRO 9

Definiciones de los parámetros del perfil del trayecto

Parámetro	Descripción
a_e	Radio efectivo de la Tierra (km)
d	Distancia del trayecto por el círculo máximo (km) (o distancia ortodrómica)
d_i	Distancia por el círculo máximo al punto de terreno i -ésimo desde la estación interferente (km) (o distancia ortodrómica)
d_{ii}	Distancia incremental para los datos del perfil del trayecto regular (km)
f	Frecuencia (GHz)
λ	Longitud de onda (m)
h_{ts}	Altura de la antena interferente sobre el nivel medio del mar (snmm) (m)
h_{rs}	Altura de la antena interferida (snmm) (m)
θ_t	Ángulo de elevación del horizonte por encima de la horizontal local (mrad), medido desde la antena interferente
θ_r	Ángulo de elevación del horizonte por encima de la horizontal local (mrad), medido desde la antena interferida
θ	Distancia angular del trayecto (mrad)
h_{st}	Altura de la superficie de la Tierra lisa (snmm) en el emplazamiento de la estación interferente (m)
h_{sr}	Altura de la superficie de la Tierra lisa (snmm) en el emplazamiento de la estación interferida (m)
h_i	Altura del punto del terreno i -ésimo (snmm) (m) h_0 : altura del emplazamiento (suelo) de la estación interferente h_n : altura del emplazamiento (suelo) de la estación interferida
h_m	Rugosidad del terreno (m)
h_{te}	Altura efectiva de la antena interferente (m)
h_{re}	Altura efectiva de la antena interferida (m)

3 Longitud del trayecto

Con carácter general, la longitud del trayecto, d (km), puede hallarse a partir de los datos del perfil del trayecto:

$$d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \quad \text{km} \quad (119)$$

sin embargo, para datos del perfil del trayecto con pasos regularmente espaciados (o trayecto regular), el procedimiento se reduce a:

$$d = n \cdot d_{ii} \quad \text{km} \quad (120)$$

donde d_{ii} es la distancia incremental del trayecto (km).

4 Clasificación del trayecto

El perfil del trayecto se clasificará a continuación dentro de una categoría geométrica entre tres posibles, basadas en un radio efectivo de la Tierra a_e . Las clasificaciones del trayecto de interferencia se señalan en el Cuadro 4.

4.1 Paso 1 de clasificación: Comprobación de un trayecto transhorizonte

Un trayecto es transhorizonte si el ángulo de elevación del horizonte físico visto desde la antena interferente (con respecto a la horizontal del lugar) es mayor que el ángulo (de nuevo con respecto a la horizontal del lugar del interferente) abarcado por la antena interferida.

De este modo, la prueba de la condición de trayecto transhorizonte es:

$$\theta_{m\acute{a}x} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (121)$$

donde:

$$\theta_{m\acute{a}x} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (122)$$

θ_i : ángulo de elevación hasta la altura i -ésima del terreno

$$\theta_i = \frac{h_i - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (123)$$

donde:

h_i : altura del punto del terreno i -ésimo sobre el nivel medio del mar (snmm) (m)

h_{ts} : altura de la antena interferente (snmm) (m)

d_i : distancia desde el interferente al elemento de terreno i -ésimo (km)

$$\theta_{td} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} - \frac{10^3 d}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (124)$$

donde:

h_{rs} : altura de la antena interferida (snmm) (m)

d : distancia total del trayecto de círculo máximo (km)

a_e : valor mediano del radio efectivo de la Tierra apropiado al trayecto (ecuación (6)).

Si se satisface la condición de la ecuación (121), puede realizarse el resto del análisis del perfil de trayecto requerido para trayectos transhorizonte (véase el § 5.1). En este caso ya no se necesitará el Paso 2 para clasificar el trayecto.

Si no se cumple la condición de la ecuación (121), el trayecto será de visibilidad directa, con o sin invasión de la primera zona de Fresnel por el terreno.

4.2 Paso 2: Comprobación de la visibilidad directa con difracción de subtrayecto (es decir, sin la primera zona de Fresnel completamente libre de obstáculos)

Un trayecto que no sea transhorizonte es de visibilidad directa con difracción de subtrayecto, si el ángulo de elevación por encima del horizonte físico, visto desde la antena interferente (con respecto a la horizontal local), y que contempla un despejamiento igual al radio del primer elipsoide de Fresnel en el punto del horizonte, es mayor que el ángulo (de nuevo con respecto a la horizontal del lugar del interferente) abarcado por la antena interferida.

El trayecto tiene difracción de subtrayecto si:

$$\theta_{f\acute{m}ax} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (125)$$

donde:

$$\theta_{f\acute{m}ax} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_{fi}) \quad (126)$$

Para concluir esta prueba es necesario por tanto un término adicional en la ecuación (123) que contemple el primer elipsoide de Fresnel. El § 2 de la Recomendación UIT-R P.526 ofrece el radio de este elipsoide, R_i (m) en cualquier punto del trayecto:

$$R_i = 17,392 \sqrt{\frac{d_i(d - d_i)}{d \cdot f}} \quad \text{m} \quad (127)$$

donde f es la frecuencia (GHz).

El radio apropiado R_i (m), se añade a cada altura del terreno, h_i (m), de la ecuación (123), lo que da por resultado la ecuación (128). Si existe despejamiento de la primera zona de Fresnel, θ_{fi} , el ángulo de elevación de la antena terminal (rad) hasta el punto i -ésimo se obtiene de la ecuación:

$$\theta_{fi} = \frac{(h_i + R_i) - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (128)$$

Si se cumple la condición de la ecuación (125), puede realizarse el resto del análisis del perfil del trayecto requerido para casos de difracción en el subtrayecto.

Si no se cumple la condición de la ecuación (125), el trayecto es de visibilidad directa y ya no se necesitará otro análisis del perfil del trayecto.

5 Obtención de los parámetros a partir del perfil del trayecto

5.1 Trayectos transhorizonte

En el Cuadro 9 se encuentra la lista completa de parámetros del perfil del trayecto.

5.1.1 Ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena interferente, θ_t

El ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena interferente es el ángulo de elevación máximo de la antena sobre el horizonte cuando se aplica la ecuación (122) a las $n - 1$ alturas del perfil del terreno.

$$\theta_t = \theta_{m\acute{a}x} \quad \text{mrad} \quad (129)$$

determinándose $\theta_{m\acute{a}x}$ mediante la ecuación (122).

5.1.2 Distancia al horizonte de la antena interferente, d_{it}

La distancia al horizonte es la distancia mínima desde el transmisor en el que se calcula el ángulo de elevación máximo de la antena sobre el horizonte de acuerdo con la ecuación (122).

$$d_{it} = d_i \quad \text{km} \quad \text{para máx } (\theta_i) \quad (130)$$

5.1.3 Ángulo de elevación sobre el horizonte de la antena interferida, θ_r

El ángulo de elevación de la antena receptora sobre el horizonte es el ángulo de elevación máximo sobre el horizonte de la antena cuando se aplica la ecuación (122) a las $n - 1$ alturas del perfil del terreno.

$$\theta_r = \max_{j=1}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (131)$$

$$\theta_j = \frac{h_j - h_{rs}}{d - d_j} - \frac{10^3 (d - d_j)}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (132)$$

5.1.4 Distancia al horizonte de la antena interferida, d_{ir}

La distancia al horizonte es la distancia mínima desde el receptor para el que se calcula el ángulo de elevación máximo de la antena con respecto al horizonte según la ecuación (122).

$$d_{ir} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{para máx } (\theta_j) \quad (133)$$

5.1.5 Distancia angular θ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (134)$$

5.1.6 Modelo de «Tierra lisa» y alturas efectivas de la antena

5.1.6.1 Generalidades

Para determinar las alturas efectivas de la antena y realizar una valoración apropiada de la irregularidad del trayecto es preciso obtener una superficie efectiva de «Tierra lisa» como plano de referencia sobre el cual se considera que existe el terreno rugoso del trayecto. Una vez obtenida ésta, pueden obtenerse los valores del parámetro de rugosidad del terreno (§ 5.1.6.4) y de las alturas efectivas de antena para las estaciones interferente e interferida.

5.1.6.2 Excepciones

Para los trayectos «marítimos» directos, es decir, para $\omega \geq 0,9$, y cuando los dos horizontes de antena caen en la superficie del mar, puede omitirse la obtención del cálculo de la superficie de Tierra lisa si se desea. En este caso, puede considerarse como plano de referencia un nivel medio del mar (o del agua) a lo largo de todo el trayecto, puede suponerse una rugosidad del terreno de 0 m, y las alturas efectivas de antena equivaldrán a las alturas reales por encima de la superficie del mar.

Para todos los demás trayectos es necesario aplicar el procedimiento de aproximación del terreno de Tierra lisa detallado en el § 5.1 y obtener las alturas efectivas de antena y la irregularidad del terreno como se indica en el § 5.1.6.4.

5.1.6.3 Obtención de la superficie de Tierra lisa

Una aproximación en línea recta de las alturas del terreno por encima del nivel medio del mar se obtendrá de la fórmula:

$$h_{si} = h_{st} + m \cdot d_i \quad \text{m} \quad (135)$$

donde:

h_{si} : altura snmm (m), de la superficie ajustada por mínimos cuadrados y situada a una distancia d_i (km) de la fuente de interferencia

h_{st} : altura snmm (m), de la superficie de la Tierra lisa en el origen del trayecto, es decir; en la estación interferente

m : pendiente (m/km) de la superficie ajustada por mínimos cuadrados con respecto al nivel del mar.

Se dispone de métodos alternativos para los dos pasos siguientes del cálculo. Pueden utilizarse las ecuaciones (136a) y (137a) si los puntos del perfil están separados uniformemente. Las ecuaciones (136b) y (137b), más complicadas, deben utilizarse si los puntos del perfil no están separados de manera uniforme, y pueden utilizarse asimismo en el otro caso.

Para perfiles con puntos separados uniformemente:

$$m = \frac{\sum_{i=0}^n (h_i - h_a) \left(d_i - \frac{d}{2} \right)}{\sum_{i=0}^n \left(d_i - \frac{d}{2} \right)^2} \quad \text{m/km} \quad (136a)$$

Para cualquier perfil:

$$m = \left(\frac{1}{d^3} \right) \sum_{i=1}^n 3 (d_i - d_{i-1}) (d_i + d_{i-1} - d) (h_i + h_{i-1} - 2h_a) + (d_i - d_{i-1})^2 (h_i - h_{i-1}) \quad \text{m/km} \quad (136b)$$

donde:

h_i : altura real (snmm) del punto i -ésimo del terreno (m)

h_a : media de las alturas reales (snmm) del trayecto desde h_0 a h_n ambas inclusive (m), que viene dada por:

Para cualquier perfil se calcula una media ponderada:

$$h_a = \left(\frac{1}{2d} \right) \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) (h_i + h_{i-1}) \quad \text{m} \quad (137b)$$

La elevación de la superficie uniforme de la Tierra en la estación interferente, h_{st} , viene dada por:

$$h_{st} = h_a - m \frac{d}{2} \quad \text{m} \quad (138)$$

y por tanto, la altura de la superficie de Tierra lisa en la estación interferida, h_{sr} , viene dada por:

$$h_{sr} = h_{st} + m \cdot d \quad \text{m} \quad (139)$$

Hay que realizar una corrección si las alturas de Tierra lisa se sitúan por encima de la altura real del terreno, es decir:

$$h_{st} = \text{mín} (h_{st}, h_0) \quad \text{m} \quad (140a)$$

$$h_{sr} = \text{mín} (h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (140b)$$

Si se modifica h_{st} o h_{sr} , o ambas, por las ecuaciones (140a) o (140b), entonces la pendiente, m , de la superficie de Tierra lisa también debe corregirse:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (141)$$

5.1.6.4 Rugosidad del terreno, h_m

El parámetro de irregularidad del terreno, h_m (m), es la altura máxima del terreno correspondiente a la superficie de Tierra lisa, en la sección del trayecto que se extiende entre los puntos del horizonte; comprendidos dichos puntos:

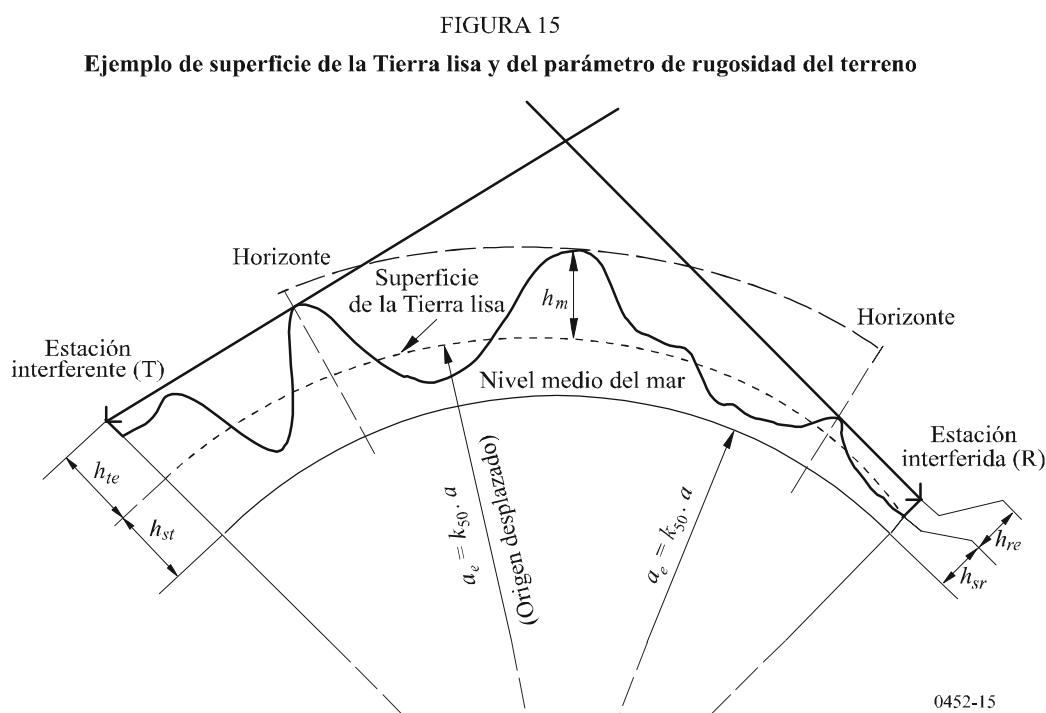
$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{m} \quad (142)$$

siendo:

i_{lt} : índice del punto del perfil situado a la distancia d_{lt} del transmisor

i_{lr} : índice del punto del perfil situado a la distancia d_{lr} del receptor.

En la Fig. 15 se ilustran la superficie de Tierra lisa y el parámetro h_m de rugosidad del terreno.



Apéndice 3 al Anexo 1

Una aproximación a la función de distribución normal acumulativa inversa para $x \leq 0,5$

La siguiente aproximación a la función de distribución normal acumulativa inversa es válida para $0,000001 \leq x \leq 0,5$ y su error como máximo es 0,00054. Puede utilizarse con confianza para la función de interpolación en la ecuación (13a). Si $x < 0,000001$, lo que implica que $\beta_0 < 0,0001\%$, x debe fijarse a 0,000001. La función $I(x)$ viene entonces dada por:

$$I(x) = \xi(x) - T(x) \quad (143)$$

donde:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (143a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \quad (143b)$$

$$C_0 = 2,515516698 \quad (143c)$$

$$C_1 = 0,802853 \quad (143d)$$

$$C_2 = 0,010328 \quad (143e)$$

$$D_1 = 1,432788 \quad (143f)$$

$$D_2 = 0,189269 \quad (143g)$$

$$D_3 = 0,001308 \quad (143h)$$
