RECOMENDACIÓN UIT-R P.834-6

Efectos de la refracción troposférica sobre la propagación de las ondas radioeléctricas

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2003-2005-2007)

Cometido

Esta Recomendación presenta métodos para calcular los efectos de la refractividad a gran escala en la atmósfera, incluyendo la curvatura de los rayos, las capas de conducción, el radio ficticio de la Tierra, los ángulos de elevación y de puntería aparente en los trayectos Tierra-espacio y la longitud del trayecto radioeléctrico ficticio.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

a) que para la planificación de los enlaces terrenales y Tierra-espacio es necesario disponer de procedimientos de cálculo para evaluar los efectos de la refractividad sobre las señales radioeléctricas;

b) que se han establecido procedimientos para calcular algunos efectos de la propagación sobre las señales radioeléctricas de los enlaces terrenales y Tierra-espacio,

recomienda

1 que se utilice la información del Anexo 1 para el cálculo de los efectos de la refractividad a gran escala.

Anexo 1

1 Curvatura de los rayos

Un haz radioeléctrico que atraviesa la porción inferior (no ionizada) de la atmósfera experimenta curvaturas debidas al gradiente del índice de refracción. Como el índice de refracción varía principalmente con la altitud, por lo general sólo se considera su gradiente vertical. Por ello, la curvatura en un punto está contenida en el plano vertical, y se expresa por:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\cos\varphi}{n}\,\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}h} \qquad (1)$$

donde:

ρ: radio de curvatura del trayecto del rayo

n: índice de refracción de la atmósfera

$\mathrm{d}n/\mathrm{d}h$: gradiente vertical del índice de refracción

h: altitud del punto por encima de la superficie terrestre

φ: ángulo del trayecto del rayo con la horizontal en el punto considerado.

Esta curvatura del rayo se considera positiva cuando se dirige hacia la superficie de la Tierra. Este fenómeno es prácticamente independiente de la frecuencia cuando el gradiente no varía significativamente a lo largo de una distancia igual a la longitud de onda.

2 Radio ficticio de la Tierra

Si el trayecto es casi horizontal, φ se aproxima a cero. Como, por otra parte, n se aproxima mucho a 1, la ecuación (1) puede simplificarse:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{dn}{dh} \tag{2}$$

Como se verá, si el gradiente vertical es constante, las trayectorias serán arcos de círculo.

Si el perfil de altura del coíndice de refracción es lineal, es decir, si el gradiente del coíndice es constante a lo largo del trayecto del rayo, es posible efectuar una transformación que permita considerar que la propagación es rectilínea. La transformación consiste en considerar una Tierra ficticia de un radio efectivo $R_e = k\,a$, con:

$$\frac{1}{ka} = \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} = \frac{1}{R_e} \tag{3}$$

siendo a el radio real de la Tierra y k el factor del radio efectivo (factor k). Con esta transformación geométrica, las trayectorias del rayo son lineales independientemente del ángulo de elevación.

En sentido estricto, el gradiente del coíndice es constante únicamente si el trayecto es horizontal. En la práctica, con alturas inferiores a 1 000 m, el modelo exponencial para el perfil del índice de refracción medio (véase la Recomendación UIT-R P.453) puede aproximarse por otro lineal. El factor k correspondiente es $k = 4/3$.

3 Índice de refracción modificado

Para ciertas aplicaciones, como, por ejemplo, para trayectografía, se utiliza un índice de refracción modificado o un módulo de refracción cuyas definiciones figuran en la Recomendación UIT-R P.310. El módulo de refracción, M, viene dado por:

$$M = N + \frac{h}{a} \tag{4}$$

donde h es la altitud del punto considerado expresada en metros y a el radio de la Tierra, expresado en miles de kilómetros. Esta transformación permite referir la propagación a una Tierra plana rodeada por una atmósfera cuyo coíndice sea igual al módulo de refracción M.

4 Ángulo de puntería aparente en los trayectos oblicuos

4.1 Introducción

Es necesario estimar con estudios de compartición el ángulo de elevación aparente de una estación espacial teniendo en cuenta la refracción atmosférica. Seguidamente figura un método de cálculo.

4.2 Visibilidad de la estación espacial

Según se dice en el § 1, un haz radioeléctrico emitido desde una estación en la superficie de la Tierra (altitud de h (km) y ángulo de elevación de θ (grados)) se curva hacia la Tierra a causa del efecto de la refracción atmosférica. La corrección de la refracción, τ (grados), se puede evaluar con la siguiente integral:

$$\tau = -\int_h^{\infty} \frac{n'(x)}{n(x) \cdot \operatorname{tg}\varphi} \, dx \tag{5}$$

donde φ se determina de la siguiente manera, aplicando la ley de Snell en coordenadas polares:

$$\cos\varphi = \frac{c}{(r + x) \cdot n(x)} \tag{6}$$

$$c = (r + h) \cdot n(h) \cdot \cos\theta \tag{7}$$

siendo:

r: radio de la Tierra (6 370 km)

x: altitud (km).

Como la curvatura de los rayos viene fundamentalmente determinada por las características de la parte inferior de la atmósfera, el índice de refracción a una altitud x en el caso de atmósfera típica puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$n(x) = 1 + a \cdot \exp(-bx) \tag{8}$$

donde:

$a = 0{,}000315$

$b = 0{,}1361$.

Este modelo se basa en la atmósfera exponencial para la propagación terrenal que figura en la Recomendación UIT-R P.453. Además, $n'(x)$ es la derivada de $n(x)$, es decir, $n'(x) = -ab \exp(-bx)$.

Los valores de τ (h, θ) (grados) se han evaluado en la condición de la atmósfera de referencia y se ha observado que se obtiene una buena aproximación con la fórmula numérica siguiente:

$$\tau(h, \theta) = 1/[1{,}314 + 0{,}6437\,\theta + 0{,}02869\,\theta^2 + h\,(0{,}2305 + 0{,}09428\,\theta + 0{,}01096\,\theta^2) + 0{,}008583\,h^2] \tag{9}$$

Esta fórmula se ha derivado como una aproximación para $0 \le h \le 3$ km y $\theta_m \le \theta \le 10°$, donde θ_m es el ángulo para el cual el haz radioeléctrico resulta interceptado por la superficie de la Tierra y viene dado por:

$$\theta_m = -\arccos\left(\frac{r}{r + h} \cdot \frac{n(0)}{n(h)}\right) \tag{10}$$

o, aproximadamente, $\theta_m = -0{,}875\sqrt{h}$ (grados).

La ecuación (9) da también una aproximación razonable con $10° < \theta \le 90°$.

Si el ángulo de elevación de una estación espacial es de θ_0 (grados) en condiciones de propagación en espacio libre y si el ángulo mínimo de elevación desde una estación en la superficie de la Tierra para la cual el haz radioeléctrico no es interceptado por la superficie de la Tierra, es de θ_m, la corrección de la refracción correspondiente a θ_m es τ (h, θ_m). Por lo tanto, la estación espacial sólo es visible cuando se verifica la siguiente desigualdad:

$$\theta_m - \tau(h, \theta_m) \le \theta_0 \tag{11}$$

4.3 Estimación del ángulo de elevación aparente

Cuando se verifica la desigualdad de la ecuación (11), el ángulo de elevación aparente θ (grados) se puede calcular, teniendo en cuenta la refracción atmosférica, resolviendo la ecuación siguiente:

$$\theta - \tau(h, \theta) = \theta_0 \tag{12}$$

y la solución de la ecuación (12) será:

$$\theta = \theta_0 + \tau_s(h, \theta_0) \tag{13}$$

donde los valores de $\tau_s(h, \theta_0)$ son idénticos a los de $\tau(h, \theta)$, pero se expresan en función de θ_0.

Se puede obtener una muy buena aproximación de la función $\tau_s(h, \theta_0)$ (grados) con la siguiente fórmula numérica:

$$\tau_s(h, \theta_0) = 1/[1{,}728 + 0{,}5411\,\theta_0 + 0{,}03723\,\theta_0^2 + h\,(0{,}1815 + 0{,}06272\,\theta_0 + 0{,}01380\,\theta_0^2) + h^2\,(0{,}01727 + 0{,}008288\,\theta_0)] \tag{14}$$

El valor de θ calculado con la ecuación (13) es el ángulo de elevación aparente.

4.4 Resumen de los cálculos

Paso 1: El ángulo de elevación de una estación espacial en condiciones de propagación en espacio libre recibe la designación θ_0.

Paso 2: Utilizando las ecuaciones (9) y (10), determinar si (11) se verifica o no. Si la respuesta es negativa, el satélite no es visible y no es necesario, por tanto, efectuar otros cálculos.

Paso 3: Si la respuesta al Paso 2 es positiva, calcúlese θ utilizando las ecuaciones (13) y (14).

4.5 Resultados medidos del ángulo de puntería aparente

En el Cuadro 1 se muestran los valores medios de la desviación angular para la propagación a través de la atmósfera. Ese Cuadro es un resumen de los datos experimentales obtenidos mediante técnicas de radar, con un radiómetro y con un radiotelescopio. Se observan fluctuaciones en el ángulo de elevación aparente debido a variaciones locales de la estructura del índice de refracción.

CUADRO 1

Valores de la desviación angular para la propagación a través de la atmósfera total

Ángulo de elevación, θ (grados)	Medida total de la desviación angular, Δθ (grados)			
	Aire continental polar	Aire continental templado	Aire marítimo templado	Aire marítimo tropical
1	0,45	–	–	0,65
2	0,32	0,36	0,38	0,47
4	0,21	0,25	0,26	0,27
10	0,10	0,11	0,12	0,14
20		0,05	0,06	
30		0,03	0,04	
	Variación de un día a otro de Δθ (concierne únicamente a las columnas 1 y 4)			
1	0,1 valor medio cuadrático			
10	0,007 valor medio cuadrático			

5 Enfoque y desenfoque de una onda propagándose a través de la atmósfera

Los cambios en el nivel de la señal también pueden ser producidos por la dispersión o estrechamiento del haz de la antena provocado por la variación de la refracción atmosférica con el ángulo de elevación. Este efecto debe ser despreciable para ángulos de elevación superiores a unos 3º.

La ecuación (15) puede utilizarse para calcular la pérdida o ganancia de señal debidas a los efectos de la refractividad en el caso de una onda que atraviesa toda la atmósfera.

$$b = \pm 10 \log(B) \tag{15}$$

donde:

$$B = 1 - \frac{0{,}5411 + 0{,}07446\theta_0 + h(0{,}06272 + 0{,}0276\theta_0) + h^2\,0{,}08288}{\left[1{,}728 + 0{,}5411\theta_0 + 0{,}03723\theta_0^2 + h(0{,}1815 + 0{,}06272\theta_0 + 0{,}0138\theta_0^2) + h^2(0{,}01727 + 0{,}008288\theta_0)\right]^2}$$

siendo:

θ_0: ángulo de elevación de la línea que conecta los puntos de transmisión y recepción (grados) ($\theta_0 < 10^o$)

h: altitud del punto más bajo sobre el nivel del mar (km) ($h < 3$ km)

b: cambio en el nivel de la señal de la onda que atraviesa la atmósfera, en comparación con las condiciones en el espacio libre (dB)

el signo en la ecuación para b será negativo «–» si se trata de una fuente transmisora situada cerca de la superficie de la Tierra y positivo «+» si la fuente está situada fuera de la atmósfera.

6 Longitud de trayecto del radio ficticio y sus variaciones

Como el índice de refracción troposférica es mayor que la unidad y varía en función de la altitud, una onda que se propaga entre el suelo y un satélite tiene una longitud de trayecto radioeléctrico que rebasa la longitud del trayecto geométrico. La diferencia de longitud se puede obtener con la siguiente integral:

$$\Delta L = \int_A^B (n - 1)\, ds \tag{16}$$

donde:

s: longitud del trayecto

n: índice de refracción

A y B: extremos del trayecto.

La ecuación (16) sólo se puede emplear si se conoce la variación del índice de refracción, n, a lo largo del trayecto.

Cuando no se conoce la temperatura, T, la presión atmosférica, P, y la humedad relativa, H, a nivel del suelo, el rebasamiento de la longitud de trayecto, ΔL, se calculará utilizando el método semiempírico descrito más adelante, que se ha preparado utilizando los perfiles de sondeo radioeléctrico atmosférico suministrado por la campaña de mediciones realizada durante un año en

500 estaciones meteorológicas en 1979. En este método la expresión general del rebasamiento de la longitud de trayecto, ΔL, viene dada por:

$$\Delta L = \frac{\Delta L_V}{\text{sen } \varphi_0 \left(1 + k \cot g^2 + \varphi_0\right)^{1/2}} + \delta\left(\varphi_0, \Delta L_V\right) \quad (17)$$

donde:

φ_0: ángulo de elevación en el punto de observación

ΔL_V: rebasamiento vertical de la longitud del trayecto

k y $\delta(\varphi_0, \Delta L_V)$: términos correctivos, para cuyo cálculo se utiliza el modelo atmosférico exponencial.

El factor k tiene en cuenta la variación del ángulo de elevación a lo largo del trayecto. El término $\delta(\varphi_0, \Delta L_V)$ expresa los efectos de la refracción (el trayecto no es una línea recta). Este término siempre es muy pequeño, salvo en ángulos de muy baja elevación, y se desprecia en el cálculo, pues entraña un error de sólo 3,5 cm para un ángulo φ_0 de 10° y de 0,1 mm para un ángulo φ_0 de 45°. Además, cabe observar que en ángulos de elevación muy bajos en los que el término δ no sería despreciable, la hipótesis de una atmósfera estratificada plana, que constituye la base de todos los métodos de cálculo del rebasamiento de la longitud del trayecto, ya no es válida.

El rebasamiento de la longitud del trayecto en la dimensión vertical (m) viene dado por:

$$\Delta L_V = 0{,}00227\, P + f(T)\, H \quad (18)$$

En el primer término teórico de la ecuación (18), P es la presión atmosférica (hPa) en el punto de observación.

En el segundo término empírico, H es la humedad relativa (%); la función de la temperatura $f(T)$ depende de la ubicación geográfica y viene dada por:

$$f(T) = a\, 10^{bT} \quad (19)$$

donde:

T se expresa en °C

a en m/% de humedad relativa

b en $°C^{-1}$.

En el Cuadro 2 se indican los parámetros a y b de acuerdo con la ubicación geográfica.

CUADRO 2

Ubicación	***a*** **(m/%)**	***b*** **($°C^{-1}$)**
Zonas costeras (islas, o ubicaciones a menos de 10 km de la costa)	$5{,}5 \times 10^{-4}$	$2{,}91 \times 10^{-2}$
Zonas ecuatoriales no costeras	$6{,}5 \times 10^{-4}$	$2{,}73 \times 10^{-2}$
Todas las demás zonas	$7{,}3 \times 10^{-4}$	$2{,}35 \times 10^{-2}$

Para calcular el factor de corrección k de la ecuación (17) se supone una variación exponencial en función de la altura h del coíndice de refracción atmosférica N:

$$N(h) = N_s \exp\left(-h / h_0\right) \quad (20)$$

donde N_s es el valor medio del coíndice de refracción en la superficie de la Tierra (véase la Recomendación UIT-R P.453), y h_0 viene dado por:

$$h_0 = 10^6 \frac{\Delta L_V}{N_s} \tag{21}$$

k se calcula entonces mediante la siguiente expresión:

$$k = 1 - \left[\frac{n_s r_s}{n(h_0) r(h_0)}\right]^2 \tag{22}$$

donde n_s y $n(h_0)$ son los valores del índice de refracción en la superficie de la Tierra a la altura h_0 (dada por la ecuación (21)) respectivamente, y r_s y $r(h_0)$ son las distancias correspondientes al centro de la Tierra.

Para los trayectos Tierra-satélite con un ángulo de elevación θ mayor de 10°, el exceso de longitud del trayecto troposférico (m) se puede expresar como la suma de los componentes seco y húmedo:

$$\Delta L = \Delta L_{dry} + \Delta L_{wet} = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m}\left\{k_1 \cdot p_s + \frac{k_2}{(\lambda+1)} \cdot \frac{e_s}{T_{ms}}\right\} \cdot \frac{1}{\text{sen}\,\theta} \quad \text{m} \tag{23}$$

donde:

p_s, e_s: presión total del aire y presión del vapor de agua en la superficie de la Tierra (hPa)

T_{ms}: temperatura media del vapor de agua por encima de la superficie (K)

λ: factor de reducción de la presión del vapor

R_d: R/M_d = 287,0 (J/kg K)

R: constante molar de gas = 8,314 (J/mol K)

M_d: masa molar de aire seco = 28,9644 (g/mol)

k_1 = 77,604 (K/hPa)

k_2 = 377600 (K^2/hPa)

g_m = $g(lat,h_s) = 9{,}784 \cdot (1 - 0{,}00266 \cdot \cos(2 \cdot lat) - 0{,}00028 \cdot h_s)$ = aceleración de la gravedad (m/s^2)

lat: latitud de la ubicación (grados)

h_s: altura de la ubicación por encima del nivel del mar (km).

Para los receptores ubicados a una altura h (km) con respecto al nivel medio del mar distinta de la altura h_s de superficie, pueden extrapolarse los valores de los parámetros meteorológicos a partir de los valores de la superficie T_{ms}, e_s y p_s, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\Delta L(h) = \Delta L_{dry}(h) + \Delta L_{wet}(h) = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m(h)}\left\{k_1 \cdot p(h) + \frac{k_2}{(\lambda+1)} \cdot \frac{e(h)}{T_m(h)}\right\} \cdot \frac{1}{\text{sen}\,\theta} \quad \text{m} \tag{24a}$$

$$T_m(h) = T_{ms} - \alpha_m \cdot (h - h_s) \quad \text{K} \tag{24b}$$

$$p(h) = p_s \left[1 - \frac{\alpha(h - h_s)}{T_s}\right]^{\frac{g_m}{R_d' \alpha}} \quad \text{hPa} \tag{24c}$$

$$e(h) = e_s \cdot \left[\frac{p(h)}{p_s}\right]^{\lambda+1} \quad \text{hPa} \tag{24d}$$

donde:

α_m: gradiente de disminución térmica de la temperatura media del vapor de agua (K/km).

$$\alpha \cong 0{,}5\frac{(\lambda+1)g_m}{R'_d}\left[1-\sqrt{\frac{(\lambda+1)g_m}{R'_d}\left[\frac{(\lambda+1)g_m}{R'_d}-4\alpha_m\right]}\right] = \text{gradiente de disminución térmica de la temperatura del aire (K/km)} \quad (24e)$$

$$R'_d = R_d/1\,000 = 0{,}287 \quad \text{J/g K} \quad (24f)$$

$$T_s = \frac{T_{ms}}{1-\dfrac{\alpha R'_d}{(\lambda+1)g_m}} \quad \text{K} \quad (24g)$$

Pueden obtenerse los valores que se introducen en el modelo asumiendo que los parámetros meteorológicos se caracterizan por una fluctuación estacional:

$$X_i(D_y) = a1_i - a2_i \cos\left[2\pi\frac{(D_y - a3_i)}{365{,}25}\right] \quad (25)$$

donde:

X_i: p_s, e_s, T_{ms}, λ o αm

$a1_i$: valor medio del parámetro

$a2_i$: fluctuación estacional del parámetro

$a3_i$: día del valor mínimo del parámetro

D_y: día del año (1 ... 365,25), 1 = 1 de enero, 32 = 1 de febrero, 60,25 = 1 de marzo.

Los coeficientes $a1$, $a2$ y $a3$ se han calculado adaptando el modelo armónico a las estadísticas mensuales de los parámetros meteorológicos a partir de la base de datos ECMWF ERA15.

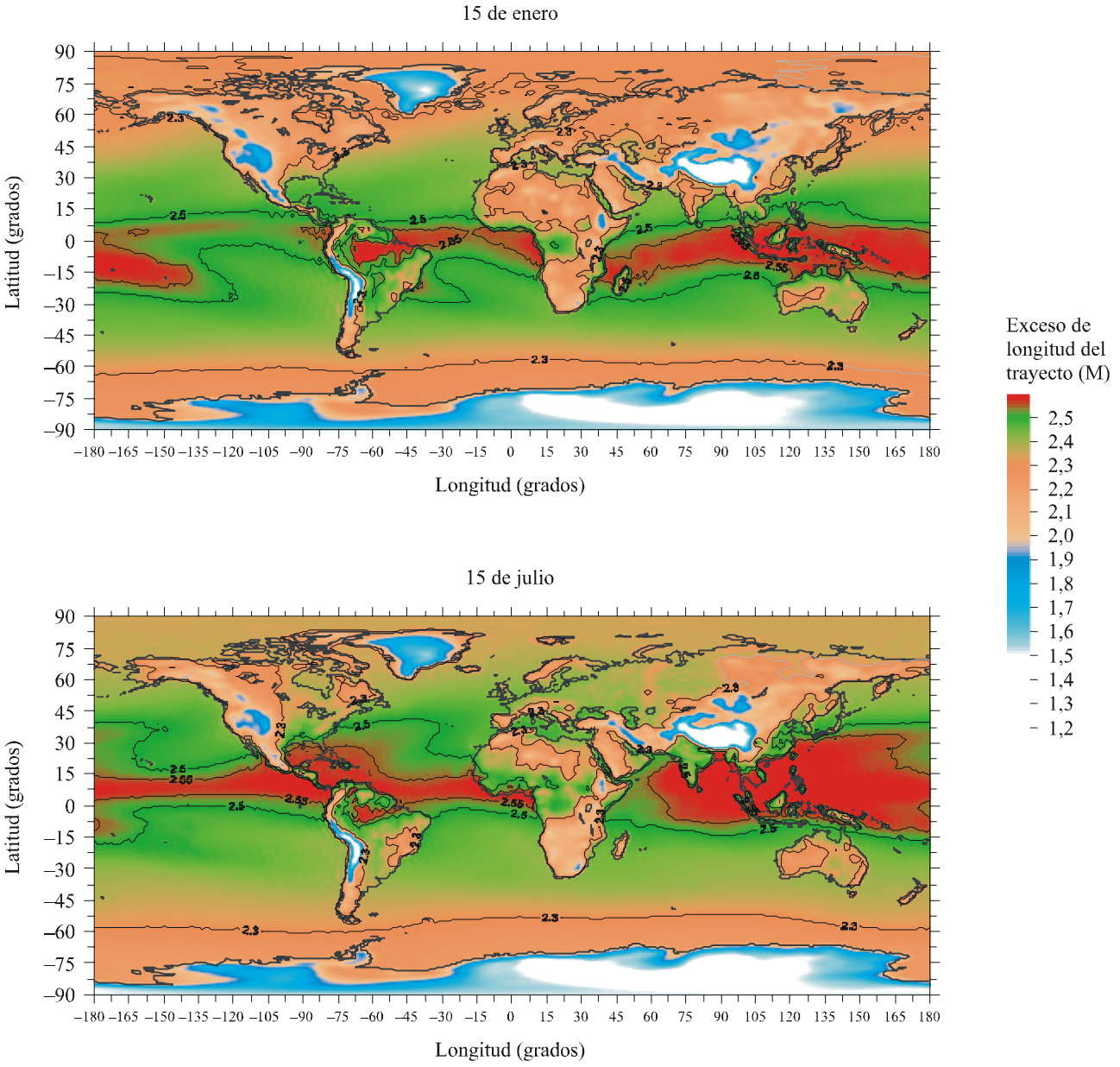
Los valores de los parámetros de este modelo armónico, a_1, a_2, a_3 para cada parámetro meteorológico, figuran en un total de 15 mapas digitales con una resolución de 1,5 × 1,5 (grados). Los coeficientes del modelo armónico están incluidos en ficheros denominados **<*met_param*>_<*mod_par*>.dat**, donde **<*met_param*>** es **press**, **vapr**, **tmpm**, **lamd** o **alfm** para p_s, e_s, T_{ms}, λ o αm, respectivamente, y **<*mod_par*>** es ***a*1**, ***a*2** o ***a*3**. Los datos corresponden a una longitud de 0 a 360 y una latitud de +90 a –90, con una resolución de 1,5° tanto de longitud como de latitud. También se necesitan para el modelo los valores **lat.dat** = valores de latitud de referencia (90 ... –90), **long.dat** = valores de longitud de referencia (0 ... 360) y **hreflev.dat** = altura media del nivel de referencia con respecto al nivel del mar (m).

Para un receptor ubicado en una posición distinta de cualquiera de los puntos de la rejilla, ha de calcularse el exceso de longitud del trayecto mediante una interpolación bilineal del exceso de longitud del trayecto en los cuatro puntos más próximos de la rejilla, utilizando para la estimación la misma altura del receptor.

La exactitud del modelo propuesto ha sido probada utilizando mediciones por radiosonda y GPS, que han revelado que el margen de error se encuentra entre 2 y 6 cm para todo el mundo. En aquellos casos en que se necesite una mayor precisión, podrán incorporarse en el modelo mediciones locales de presión total del aire y presión del vapor de agua.

FIGURA 1

Mapas del exceso de retardo del trayecto en el nivel de referencia en enero y julio



Nota 1 – Los procedimientos Matlab que aplican le modelo descrito por las ecuaciones (23) a (25) pueden obtenerse del sitio web del UIT-R correspondiente a la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones.

0834-01

7 Propagación por capas de conducción

Los conductos radioeléctricos existen cuando el gradiente vertical del coíndice de refracción a una altura y lugar dados es menor que –157 N/km.

La existencia de conductos es importante porque pueden originar una propagación anómala de las ondas radioeléctricas, especialmente en enlaces terrenales o enlaces Tierra-espacio de ángulo muy bajo. Los conductos proporcionan un mecanismo para que las señales radioeléctricas de frecuencias suficientemente altas se propaguen más allá de la distancia de visibilidad directa normal, causando

posible interferencia con otros servicios (véase la Recomendación UIT-R P.452). Constituyen también un factor importante en la aparición de la interferencia debida a la propagación por trayectos múltiples (véase la Recomendación UIT-R P.530) aunque no son necesarios ni suficientes para la propagación por trayectos múltiples en un enlace determinado.

7.1 Influencia del ángulo de elevación

Cuando una antena transmisora está situada dentro de un conducto radioeléctrico estratificado horizontalmente, los rayos emitidos en ángulos de elevación muy rasantes pueden quedar «atrapados» dentro de los límites del conducto. Para el caso simplificado de un perfil de coíndice de refracción «normal» por encima de un conducto de superficie que tiene un gradiente de coíndice de refracción fijo, el ángulo de elevación crítico α (rad) para que los rayos sean guiados, viene dado por la siguiente expresión:

$$\alpha = \sqrt{2 \times 10^{-6} \left| \frac{dM}{dh} \right| \Delta h} \tag{26}$$

donde dM/dh es el gradiente vertical del coíndice de refracción modificado $\left(\frac{dM}{dh} < 0 \right)$ y Δh, es el espesor del conducto, que es la altura del límite del conducto por encima de la antena transmisora.

En la Fig. 2 se indica el ángulo de elevación máximo para que los rayos sean guiados dentro del conducto. El ángulo máximo de propagación guiada aumenta rápidamente cuando los gradientes de coíndice de refracción disminuyen por debajo de –157 N/km (es decir, incremento de régimen de disminución térmica con la altura) y cuando aumenta el espesor del conducto.

7.2 Frecuencia mínima de la propagación por conductos

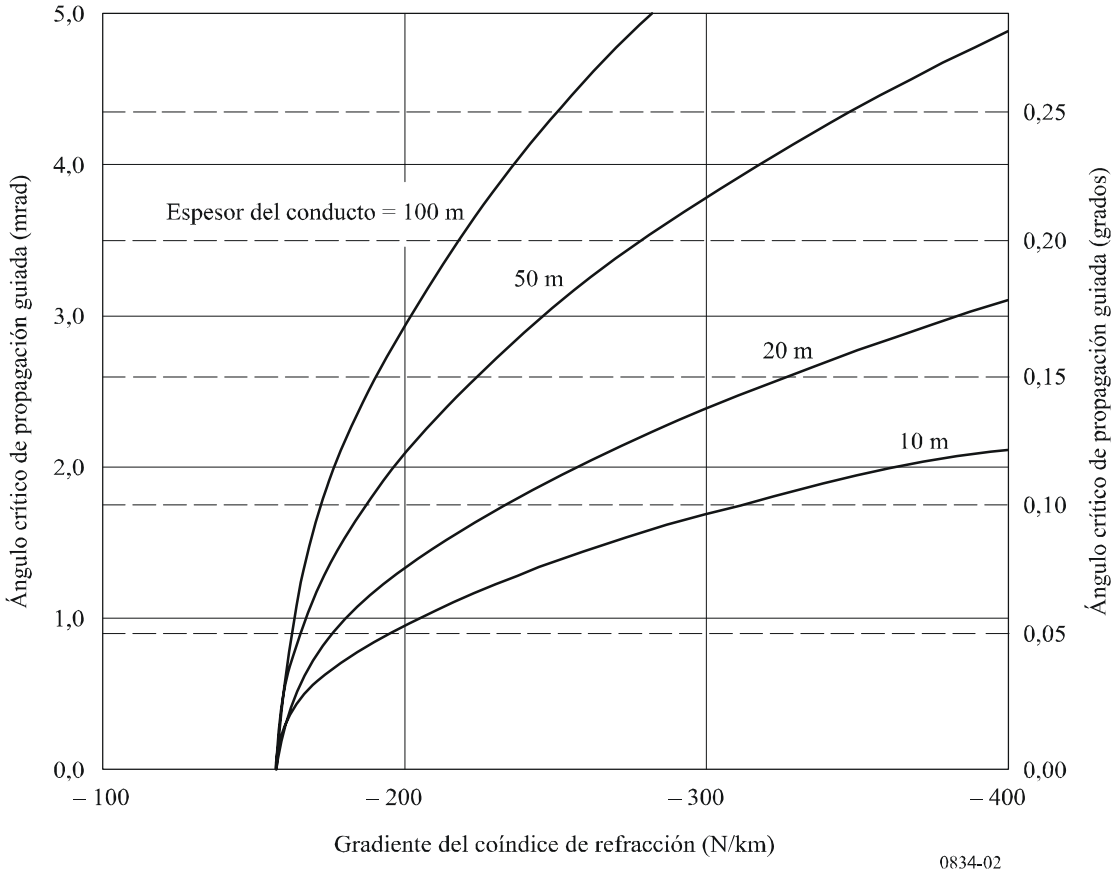
La existencia de un conducto, aunque esté situado convenientemente, no implica necesariamente que la energía se acoplará eficazmente al mismo de modo que se produzca una propagación a larga distancia. Además de satisfacer la condición de ángulo de elevación máximo indicada anteriormente, la frecuencia de la onda debe estar por encima de un valor crítico determinado por la profundidad física del conducto y por el perfil del coíndice de refracción. Por debajo de esta frecuencia mínima, las cantidades de energía cada vez mayores se fugarán a través de los límites del conducto.

La frecuencia mínima para que una onda pueda propagarse dentro de un conducto troposférico se puede estimar utilizando un método integral de fase. En la Fig. 3 se indica la frecuencia mínima para conductos en la superficie (curvas de trazo continuo) en los que se supone que un gradiente de coíndice de refracción (negativo) constante se extiende desde la superficie hasta una altura dada con un perfil normalizado por encima de esta altura. Para las frecuencias utilizadas en sistemas terrenales (típicamente 8-16 GHz), se requiere una capa de propagación guiada con un espesor mínimo de unos 5 a 15 m y en esos casos, la frecuencia de propagación mínima, $f_{mín}$, que depende en gran medida del espesor del conducto y del gradiente de índice de refracción.

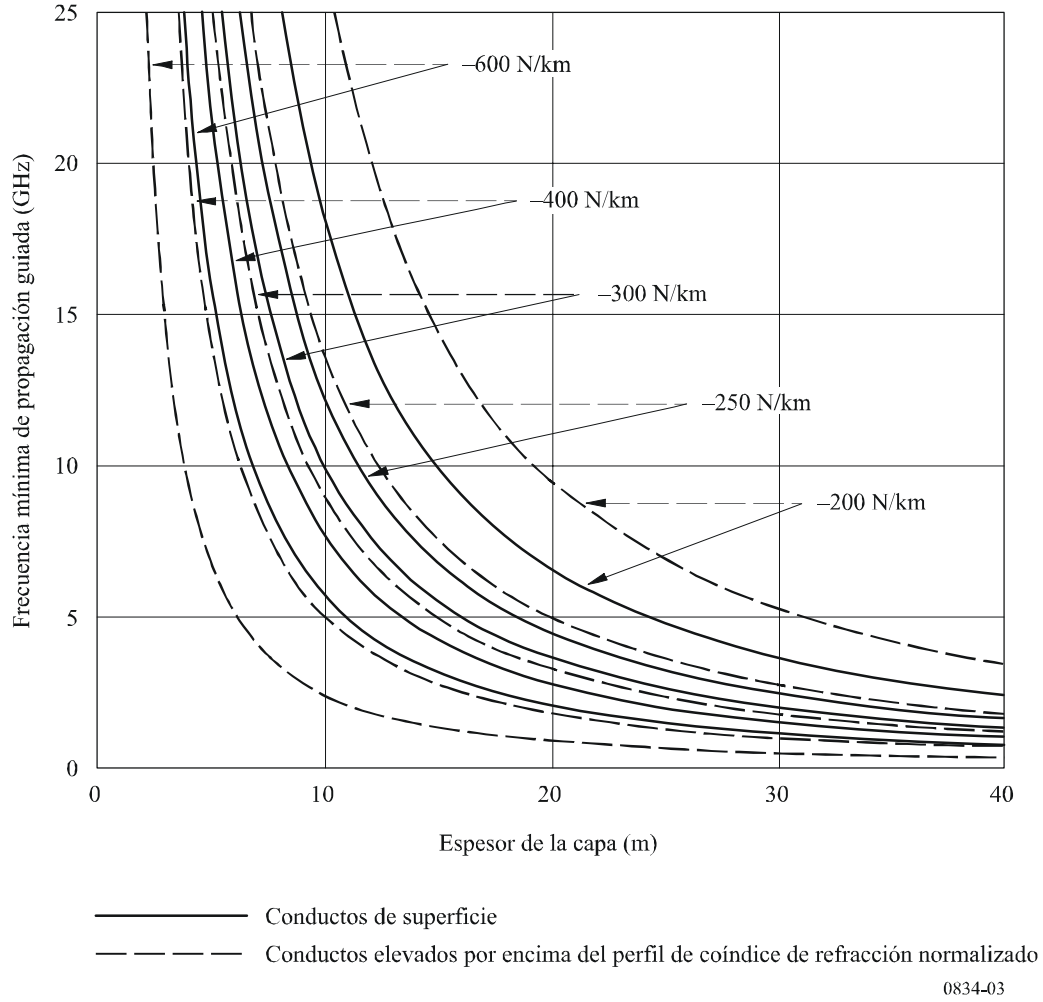
En el caso de conductos elevados, interviene un parámetro adicional aún para el caso simple de un perfil de coíndice de refracción lineal. Este parámetro se relaciona con la configuración del perfil de índice de refracción que está por debajo del gradiente de conducción. Las curvas de trazo interrumpido de la Fig. 3 muestran la frecuencia mínima de propagación guiada para una capa de conducción de gradiente constante que está por encima de una capa de superficie que tiene un gradiente de coíndice de refracción normal de –40 N/km.

FIGURA 2

Ángulo máximo de propagación guiada para un conducto de superficie de gradiente de coíndice constante sobre una Tierra esférica



Para capas que presentan gradientes de disminución de temperatura que sólo son ligeramente superiores que el mínimo requerido para que se produzca un conducto radioeléctrico, la frecuencia mínima de propagación guiada aumenta realmente por el conducto de superficie equivalente. Sin embargo, para gradientes de conducción muy intensos, la propagación guiada por un conducto elevado requiere una capa mucho más delgada que un conducto de superficie de igual gradiente para cualquier frecuencia dada.

FIGURA 3

Frecuencia mínima de propagación guiada para conductos radioeléctricos atmosféricos de gradiente de coíndice constante