

Recomendación UIT-R P.840-9

(08/2023)

Serie P: Propagación de las ondas radioeléctricas

Atenuación debida a las nubes y a la niebla



Prólogo

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

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

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

Series de las Recomendaciones UIT-R

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

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

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

Publicación electrónica
Ginebra, 2024

© UIT 2024

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

RECOMENDACIÓN UIT-R P.840-9

Atenuación debida a las nubes y a la niebla

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2009-2012-2013-2017-2019-2023)

Cometido

Esta Recomendación proporciona:

- a) un método para estimar la atenuación instantánea de nubes a lo largo de trayectos oblicuos para la gama de frecuencias de 1 a 200 GHz cuando el contenido¹ instantáneo integrado de agua líquida de las nubes se conoce a partir de datos locales, un perfil de referencia o mapas digitales referenciados;
- b) un método para estimar las estadísticas de atenuación de nubes a lo largo de trayectos oblicuos para la gama de frecuencias de 1 a 200 GHz cuando se conocen las estadísticas integradas del contenido de agua líquida de las nubes a partir de datos locales, un perfil de referencia o mapas digitales referenciados;
- c) una aproximación logarítmica normal para la atenuación de nubes a lo largo de trayectos oblicuos para uso en la Recomendación UIT-R P.1853.

Palabras clave

Atenuación debida a las nubes, contenido de agua líquida de nube, contenido de agua líquida de la nube columnar integrada, atenuación específica del líquido de nube

Abreviaturas/Glosario

ASCII	Código normalizado estadounidense para el intercambio de información (<i>American Standard Code for Information Interchange</i>)
ECMWF	Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>)
FDAC	Función de distribución acumulativa complementaria (<i>Complementary Cumulative Distribution Function</i>)

Recomendaciones y Manuales UIT-R conexos

Recomendación UIT-R P.530

Recomendación UIT-R P.618

Recomendación UIT-R P.619

Recomendación UIT-R P.840

Recomendación UIT-R P.1853

Recomendación UIT-R P.2041

Recomendación UIT-R P.2145

Manual de Radiometeorología

¹ El contenido integrado de agua líquida de las nubes es la cantidad total de agua líquida de las nubes en una columna vertical que se extiende desde la superficie de la Tierra hasta la parte superior de la atmósfera. Los términos: contenido integrado de agua líquida de las nubes, contenido total de agua líquida de las nubes, contenido total de agua líquida de las nubes en columna/columnar, contenido integrado de agua líquida de las nubes en columna y contenido total de agua líquida de las nubes en columna son sinónimos.

NOTA – En todos los casos, debe utilizarse la última revisión/edición de la Recomendación en vigor.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que es necesario dar pautas a los ingenieros para el diseño de los sistemas de telecomunicación Tierra-espacio en frecuencias superiores a 10 GHz;
- b) que la atenuación debida a las nubes puede ser un factor importante, especialmente para los sistemas de microondas que funcionan en frecuencias muy superiores a 10 GHz o para los sistemas de baja disponibilidad;
- c) que se necesita una aproximación logarítmica normal a la atenuación de la nube a lo largo de trayectos oblicuos para uso en la Recomendación UIT-T P.1853;
- d) que puede que no se disponga de los datos locales medidos del contenido total de la columna de agua líquida de nube;
- e) que los datos del sistema de predicción meteorológica numérica pueden proporcionar información sobre los parámetros de las nubes,

recomienda

- 1 que, para valores instantáneos del contenido integrado de agua líquida de las nubes conocidos a partir de datos locales, debe utilizarse el método del § 3.1 para estimar la atenuación instantánea de las nubes a lo largo de trayectos oblicuos para la gama de frecuencias de 1 a 200 GHz;
- 2 que, para los valores de las estadísticas integradas del contenido de agua líquida de las nubes conocidos a partir de datos históricos a largo plazo o de los mapas de § 4, debe utilizarse el método de § 3.2 para estimar las estadísticas de la atenuación de las nubes a lo largo de trayectos oblicuos para la gama de frecuencias de 1 a 200 GHz;
- 3 que, para su uso en la Recomendación UIT-R P.1853, se utilice el método del § 3.3 para estimar la aproximación log-normal a la atenuación de nube por trayectoria oblicua.

Anexo 1

1 Introducción

Para las nubes y la niebla compuestas totalmente de gotas minúsculas, generalmente inferiores a 0,01 cm, la aproximación de Rayleigh es válida para frecuencias de hasta 200 GHz, y la atenuación específica en el interior de una nube o de la niebla puede expresarse como:

$$\gamma_c(f, T) = K_l(f, T)\rho_l \quad (\text{dB/km}) \quad (1)$$

siendo:

- γ_c : atenuación específica (dB/km) en la nube
- K_l : coeficiente de la atenuación específica del agua líquida de nube ((dB/km)/(g/m³))
- ρ_l : densidad de agua líquida en la nube o la niebla (g/m³)
- f : frecuencia (GHz)

T : temperatura del agua líquida de la nube (K).

En frecuencias del orden de 100 GHz y superiores, la atenuación debida a la niebla puede ser significativa. La densidad de agua líquida en la niebla es típicamente de unos $0,05 \text{ g/m}^3$ en la niebla moderada (visibilidad del orden de 300 m) y de $0,5 \text{ g/m}^3$ en niebla espesa (visibilidad del orden de 50 m).

2 Coeficiente de atenuación específica del agua líquida de la nube

Para calcular el valor de K_l se puede utilizar un modelo matemático válido hasta frecuencias de 200 GHz basado en la dispersión de Rayleigh, que utiliza un modelo Debye doble para la permitividad dieléctrica $\varepsilon(f)$ del agua. Por tanto:

$$K_l(f, T) = \frac{0.819f}{\varepsilon''(f)(1+\eta(f)^2)} \quad (\text{dB/km})/(\text{g/m}^3) \quad (2)$$

donde f es la frecuencia (GHz), y:

$$\eta(f) = \frac{2+\varepsilon'(f)}{\varepsilon''(f)} \quad (3)$$

La permitividad dieléctrica compleja del agua viene dada por:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p[1+(f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s[1+(f/f_s)^2]} \quad (4)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{[1+(f/f_p)^2]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{[1+(f/f_s)^2]} + \varepsilon_2 \quad (5)$$

siendo:

$$\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3 \left(\frac{300}{T} - 1 \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon_1 = 0,0671 \varepsilon_0 \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = 3,52 \quad (8)$$

y T es la temperatura del agua líquida (K).

Las frecuencias de relajación principal f_p y secundaria f_s son:

$$f_p = 20,20 - 146 \left(\frac{300}{T} - 1 \right) + 316 \left(\frac{300}{T} - 1 \right)^2 \quad (9)$$

$$f_s = 39,8f_p \quad (\text{GHz}) \quad (10)$$

3 Método de predicción de la atenuación de nubes a lo largo de trayectos oblicuos

Existen tres métodos de predicción de la atenuación de nubes a lo largo de trayectos oblicuos:

- 1) Como se describe en § 3.1, un método de predicción instantánea, cuando el contenido integrado de agua líquida de las nubes se conoce a partir de datos instantáneos medidos localmente;
- 2) Como se describe en § 3.2, un método de predicción estadística, cuando se conocen las estadísticas del contenido integrado de agua líquida de las nubes, ya sea a partir de:
 - a) datos locales o;
 - b) de los mapas integrales en el lugar deseado en § 4.1;

3) Como se describe en § 3.3, la aproximación logarítmica normal al método de predicción estadística de la trayectoria a lo largo de trayectos oblicuos, en la que se conocen los parámetros de media logarítmica normal y desviación típica, ya sea a partir de:

- a) datos locales; o
- b) de los mapas integrales en el lugar deseado en § 4.1.

3.1 Método de predicción de la atenuación instantánea de las nubes a lo largo de trayectos oblicuos

La atenuación instantánea de las nubes en la trayectoria oblicua prevista, A_C , es:

$$A_C(f) = \frac{K_L(f) \cdot L}{\sin \theta} \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

siendo:

- f : frecuencia considerada, en GHz
- K_L : coeficiente de absorción de la masa del líquido de la nube en dB/(kg/m²) o dB/mm
- L : contenido integrado de agua líquida de las nubes, en kg/m² o mm, a partir de la superficie de la Tierra en el lugar deseado
- θ : ángulo de elevación.

y

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273,75K) \cdot \left(A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (12)$$

con:

$$\begin{cases} A_1 = 0,1522, A_2 = 11,51, A_3 = -10,4912 \\ f_1 = -23,9589, f_2 = 219,2096 \\ \sigma_1 = 3,2991 \times 10^3, \sigma_2 = 2,7595 \times 10^6 \end{cases}$$

3.2 Método estadístico de predicción de la atenuación de nubes a lo largo de trayectos oblicuos

La atenuación estadística prevista de las nubes a lo largo de trayectos oblicuos, A_C , es:

$$A_C(f, p) = \frac{K_L(f) \cdot L(p)}{\sin \theta} \quad (\text{dB}) \quad (13)$$

siendo:

- f : frecuencia considerada, en GHz
- K_L : coeficiente de absorción de la masa del líquido de la nube en dB/(kg/m²) o dB/mm
- p : probabilidad de rebasamiento (CCDF) considerada, en %
- $L(p)$: contenido integrado de agua líquida de las nubes en la probabilidad de superación p , en kg/m² o mm, desde la superficie de la Tierra en la ubicación deseada
- θ : ángulo de elevación.

y

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273,75K) \cdot \left(A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (14)$$

con:

$$\begin{cases} A_1 = 0,1522, A_2 = 11,51, A_3 = -10,4912 \\ f_1 = -23,9589, f_2 = 219,2096 \\ \sigma_1 = 3,2991 \times 10^3, \sigma_2 = 2,7595 \times 10^6 \end{cases}$$

3.3 Aproximación logarítmica normal a la atenuación estadística de las nubes a lo largo de trayectos oblicuos

La aproximación logarítmica normal a la atenuación estadística prevista de las nubes a lo largo de trayectos oblicuos, A_c , es:

$$A_c(f, p) = \begin{cases} \frac{K_L(f)e^{m_L + \sigma_L Q^{-1}\left(\frac{p}{P_L}\right)}}{\sin \theta} & \text{para } p < P_L \quad (\text{dB}) \\ 0 & \text{para } p \geq P_L \end{cases} \quad (15)$$

siendo:

- f : frecuencia considerada, en GHz
- p : probabilidad de rebasamiento (CCDF) considerada, en %
- m_L : parámetro de promedio logarítmico normal en el lugar deseado
- σ_L : parámetro de desviación estándar logarítmico normal en el lugar deseado
- P_L : probabilidad de nube en el lugar deseado, en %
- θ : ángulo de elevación
- $Q^{-1}(x)$: función de distribución acumulativa complementaria normalizada inversa definida en la Recomendación UIT-R P.1057.

y

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273,75K) \cdot \left(A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (16)$$

con:

$$\begin{cases} A_1 = 0,1522, A_2 = 11,51, A_3 = -10,4912 \\ f_1 = -23,9589, f_2 = 219,2096 \\ \sigma_1 = 3,2991 \times 10^3, \sigma_2 = 2,7595 \times 10^6 \end{cases}$$

NOTA – Si la ubicación deseada se encuentra en un punto de cuadrícula del mapa digital de P_L donde $P_L \leq 0,02$, entonces $A_c(f, p) = 0$ dB; si la ubicación deseada se encuentra entre puntos de cuadrícula del mapa digital de P_L donde $P_L \leq 0,02$ en cualquiera de los cuatro puntos de cuadrícula circundantes, entonces $A_c(f, p) = 0$ dB.

4 Mapas digitales conexos al cálculo de la atenuación de las nubes

4.1 Parámetros estadísticos meteorológicos anuales y mensuales

Los mapas digitales de las estadísticas mundiales anuales y mensuales del contenido integrado de agua líquida de las nubes, L , en kg/m^2 , o, lo que es lo mismo, en mm, forman parte integrante de la presente Recomendación y pueden consultarse en las partes adicionales de la misma.

Los mapas digitales de las estadísticas anuales mundiales del contenido integrado de agua líquida de las nubes, L , aproximado por una distribución logarítmica normal, forman parte integrante de esta Recomendación y pueden consultarse en las partes adicionales de la misma.

4.2 Interpolación

La sección 4.2.1 proporciona el método estadístico y de interpolación espacial para calcular el contenido anual y mensual integrado de agua líquida de las nubes frente a la probabilidad de rebasamiento (CCDF) en cualquier lugar deseado de la superficie de la Tierra.

La sección 4.2.2 proporciona un método estadístico y de interpolación espacial para calcular la media anual y mensual y la desviación estándar del contenido integrado de agua líquida de las nubes, y los parámetros logarítmicos normales de media y desviación estándar del contenido integrado de agua líquida de las nubes en cualquier lugar deseado de la superficie de la Tierra.

4.2.1 Interpolación especial y estadística (CCDF)

Las estadísticas anuales o mensuales integradas del contenido de agua líquida de las nubes, $L(p)$, en cualquier ubicación deseada de la superficie de la Tierra y la probabilidad de rebasamiento (CCDF), p , dentro del intervalo de probabilidad de rebasamiento de los mapas digitales integrales pueden calcularse utilizando el siguiente método de interpolación:

- determinar las dos probabilidades de superación, p_{above} y p_{below} , por encima y por debajo de la probabilidad de superación deseada, p , a partir del conjunto: 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99 y 100% para las estadísticas anuales y a partir del conjunto: 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99 y 100% para las estadísticas mensuales;
- para cada uno de los cuatro puntos circundantes de la cuadrícula, $i = 1, 2, 3$ y 4 , y para las dos probabilidades de rebasamiento, p_{above} y p_{below} , determinar el contenido integrado de agua líquida de las nubes, L_i , a partir del mapa anual o mensual apropiado de $L(p)$;
- determinar L_{above} y L_{below} en la ubicación deseada y las dos probabilidades p_{above} y p_{below} realizando una interpolación bilineal de L_i , $i = 1, 2, 3$ y 4 en los cuatro puntos circundantes de la cuadrícula utilizando el método de interpolación bilineal especificado en el Anexo 1 de la Recomendación UIT R P.1144;
- determinar el contenido integrado de agua líquida de las nubes, L , en la ubicación deseada y la probabilidad de superación, p , interpolando L_{above} y L_{below} frente a p_{above} y p_{below} a p en una escala lineal L frente a $\log_{10} p$.

4.2.2 Interpolación espacial y estadística (promedio y desviación típica)

La media mensual o anual o la desviación típica del contenido integrado de agua líquida de las nubes, \bar{L} o σ_L , la media logarítmica normal anual del contenido integrado de agua líquida de las nubes o la desviación típica del parámetro, m_L o s_L , o la probabilidad anual de nubes, P_L , en cualquier localización deseada de la superficie de la Tierra puede calcularse utilizando el método de interpolación bilineal especificado en el Anexo 1 de la Recomendación UIT-R P.1144, en los cuatro puntos circundantes del parámetro de interés deseado X , donde $X = \bar{L}, \sigma_L, m_L, s_L$ o P_L en la ubicación deseada