

ITU-R P. 840-9 建议书

(08/2023)

P系列：无线电波传播

云雾引起的衰减



前言

无线电通信部门的作用是确保所有无线电通信业务，包括卫星业务，合理、公平、有效和经济地使用无线电频谱，并开展没有频率范围限制的研究，在此基础上通过建议书。

无线电通信部门制定规章制度和政策的职能由世界和区域无线电通信大会以及无线电通信全会完成，并得到各研究组的支持。

知识产权政策（IPR）

国际电联无线电通信部门（ITU-R）的 IPR 政策述于 ITU-R 第 1 号决议所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC 的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从 <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/zh> 获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC 的通用专利政策实施指南》和 ITU-R 专利信息数据库。

ITU-R 建议书系列

（可同时在以下网址获得：<http://www.itu.int/publ/R-REC/zh>）

系列	标题
BO	卫星传输
BR	用于制作、存档和播放的记录；用于电视的胶片
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电测定、业余无线电以及相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定和固定业务系统之间频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和标准频率发射
V	词汇和相关课题

注：本ITU-R建议书英文版已按ITU-R第1号决议规定的程序批准。

电子出版物
2024年，日内瓦

© 国际电联 2024

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段翻印本出版物的任何部分。

ITU-R P.840-9 建议书

云雾引起的衰减

(ITU-R第201/3号课题)

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

范围

本建议书提供：

- a) 在可从当地数据、参考剖面图或参考数字地图得知瞬时综合云液态含水量的情况下¹，估算1至200 GHz频率范围内瞬时斜径云衰减的方法；
- b) 当综合云液态含水量统计数据来自当地数据、参考剖面图或参考数字地图时，估算1至200 GHz频率范围内斜径云衰减统计数据的方法；
- c) 用于ITU-R P.1853建议书的斜径云衰减的对数正态近似值。

关键词

云衰减、云液态含水量、综合柱状云液态含水量、云液体的衰减

首字母缩略语/缩写/词汇

ASCII 美国标准信息交换码

CCDF 互补累积分布函数

ECMWF 欧洲中期天气预报中心

相关ITU-R建议书和手册

ITU-R P.530建议书

ITU-R P.618建议书

ITU-R P.619建议书

ITU-R P.840建议书

ITU-R P.1853建议书

ITU-R P.2041建议书

ITU-R P.2145建议书

《无线电气象学手册》

注 – 在任何情况下，均应采用建议书最新的有效修订版/版本。

¹ 综合云液态含水量是指从地球表面延伸到大气顶部的垂直柱状云中的液态水总量。术语综合云液态含水量、云液态总含水量、总柱状云液态水、综合柱状云液态含水量和柱状云液态水总含量是同义词。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 有必要向工程师提供10 GHz以上频率地对空无线电通信系统的设计指导；
- b) 云衰减可能是一个重要因素，对10 GHz以上微波系统或低可用度系统而言尤为如此；
- c) 需要ITU-R P.1853建议书中使用的斜径云衰减的对数正态近似；
- d) 可能没有云中总柱状云液态水含量的当地测量数据；
- e) 数值天气预报系统的数据可提供有关云参数的信息，

建议

- 1 对于由当地数据所知的综合云液态含水量瞬时值，应使用第3.1段中的方法估算1至200 GHz频率范围的瞬时斜径云衰减；
- 2 对于从长期历史数据或第4节地图得知的综合云液态含水量统计数据值，应使用第3.2段中的方法估算1至200 GHz频率范围内斜径云衰减统计数据；
- 3 为了用于ITU-R P.1853建议书，应采用第3.3节中的方法估算斜径云衰减的对数正态近似值。

附件1

1 引言

对完全由通常小于0.01厘米的小水滴组成的云或雾而言，瑞利近似计算对最高达200 GHz的频率适用，则特定的云或雾中的具体衰减量可表示为：

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

其中：

- γ_c : 云中比衰减量 (dB/km)
- K_l : 云中液态水衰减系数 ((dB/km)/(g/m³))
- ρ_l : 云或雾中的液态水密度 (g/m³)。
- f : 频率 (GHz)
- T : 云中液态水温度 (K)。

在约100 GHz或以上频率，雾衰减可能非常显著。对中等雾而言，雾中液态水密度通常为约0.05 g/m³（能见度约为300米），浓雾则为0.5 g/m³（能见度约为50米）。

2 云中液态水衰减系数

基于瑞利散射、将双德拜模型用于水的介电常数 $\varepsilon(f)$ 的数学模型可用于计算最高达200 GHz 的频率的 K_l 值:

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

其中 f 是频率 (GHz), 以及:

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

水的复介电常数可表示为:

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

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

其中:

$$\varepsilon_0 = 77.66 + 103.3 \left(\frac{300}{T} - 1 \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon_1 = 0.0671\varepsilon_0 \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = 3.52 \quad (8)$$

且 T 是液态水温度 (K)。

主要弛豫频率 f_p 和次要弛豫频率 f_s 为:

$$f_p = 20.20 - 146 \left(\frac{300}{T} - 1 \right) + 316 \left(\frac{300}{T} - 1 \right)^2 \quad (\text{GHz}) \quad (9)$$

$$f_s = 39.8f_p \quad (\text{GHz}) \quad (10)$$

3 斜径云衰减预测方法

对斜径云衰减的预测方法有三种:

- 1) 如第3.1节所述, 基于瞬时当地测量数据且综合云中液态含水量已知时采用的瞬时预测方法;
- 2) 如第3.2段所述, 综合云液态含水量已知时所采用统计预测方法的数据来自:
 - a) 本地数据或;
 - b) 第4.1段中期望位置的综合图;
- 3) 如第3.3段所述, 斜径统计预测方法的对数正态近似, 其中已知对数正态平均值和标准偏差参数来自:
 - a) 本地数据或;
 - b) 第4.1段中期望位置的综合图。

3.1 斜径瞬时云衰减预测方法

预测斜径瞬时云衰减的 A_c 为:

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

其中:

- f : 相关频率, 单位为GHz
- K_L : dB/(kg/m²)或dB/mm为单位的云液体质量吸收系数
- L : 期望位置地表综合云液态含水量, 以公斤/平方米或毫米为单位
- θ : 仰角。

且

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273.75K) \cdot \left(A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} A_1 = 0.1522, A_2 = 11.51, A_3 = -10.4912 \\ f_1 = -23.9589, f_2 = 219.2096 \\ \sigma_1 = 3.2991 \times 10^3, \sigma_2 = 2.7595 \times 10^6 \end{cases}$$

3.2 斜径统计云衰减的预测方法

预测斜径统计云衰减的 A_c 为:

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

其中:

- f : 相关频率, 单位为GHz
- K_L : dB/(kg/m²)或dB/mm为单位的云液体质量吸收系数
- p : 超越概率 (CCDF), 即%
- $L(p)$: 期望位置地表综合云液态含水量超出的概率 p , 以公斤/平方米或毫米为单位
- θ : 仰角。

且

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273.75K) \cdot \left(A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (14)$$

其中:

$$\begin{cases} A_1 = 0.1522, A_2 = 11.51, A_3 = -10.4912 \\ f_1 = -23.9589, f_2 = 219.2096 \\ \sigma_1 = 3.2991 \times 10^3, \sigma_2 = 2.7595 \times 10^6 \end{cases}$$

3.3 斜径统计云衰减的对数正态近似

预测斜径统计云衰减的对数正态近似 A_c 为:

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

其中:

- f : 相关频率, 单位为GHz
- p : 超越概率 (CCDF), 即 %
- m_L : 所需位置上的对数正态平均参数
- σ_L : 在所需位置的对数正态标准差参数
- P_L : 云在目标位置的概率, 即%
- θ : 仰角
- $Q^{-1}(x)$: ITU-R P.1057建议书中定义的逆标准正态互补累积分布函数。

且

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273.75K) \cdot \left(A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (16)$$

其中:

$$\begin{cases} A_1 = 0.1522, A_2 = 11.51, A_3 = -10.4912 \\ f_1 = -23.9589, f_2 = 219.2096 \\ \sigma_1 = 3.2991 \times 10^3, \sigma_2 = 2.7595 \times 10^6 \end{cases}$$

注 - 如果期望位置位于 P_L 数字地图的网格点, $P_L \leq 0.02$, 则 $A_c(f, p) = 0$ dB; 如果期望位置位于 P_L 年数字地图的网格点之间, 且周围四个网格点中任何一个的网格点 $P_L \leq 0.02$, 则 $A_c(f, p) = 0$ dB。

4 与云衰减计算相关的数字地图

4.1 年度和月度气象统计参数

以 kg/m^2 或等效毫米为单位的全球云液态含水量 (L) 全球年度和月度统计数据数字地图, 是本建议书不可分割的组成部分, 请参见本建议书的附加部分。

通过对数正态分布近似得出的综合云液态含水量 (L) 全球年度统计数字地图, 是本建议书不可分割的组成部分, 请参见本建议书的附加部分。

4.2 插值

第4.2.1节提供了计算地表任意期望位置年度和月度综合云液态含水量与超越概率 (CCDF) 的统计和空间插值方法。

第4.2.2节提供了一种统计和空间插值方法, 用于计算地球表面任意期望位置的年度和月度综合云液态含水量的平均值和标准偏差, 以及对数正态综合云液态含水量的平均和标准偏差参数。

4.2.1 空间与统计 (CCDF) 插值

在综合数字地图超越概率范围内，地表任意期望位置的年度或月度综合云液态含水量统计数据 ($L(p)$) 及超越概率 (CCDF) (p)，可使用以下插值法计算：

- a) 确定高于和低于期望超越概率 (p) 的两个超过概率 p_{above} 和 p_{below} ，其中一个来自集合：0.01、0.02、0.03、0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1、2、3、5、10、20、30、50、70、80、90、95、99和100%（年度统计数据），另一个来自集合：0.1、0.2、0.3、0.5、1、1、2、3、5、10、20、30、50、60、70、80、90、95、99和100%（月度统计数据为）；
- b) 对于周围四个网格点中的每个点， $i = 1、2、3$ 和4，以及两个超越概率 p_{above} 和 p_{below} ，从 $L(p)$ 适当的年度或月度地图中确定综合云液态含水量 L_i ；
- c) 使用ITU-R P.1144建议书附件1规定的双线性插值法，通过在四周格栅点进行 L_i , $i = 1、2、3$ 和4的双线性插值，确定期望位置的 L_{above} 和 L_{below} 以及两个概率 p_{above} 和 p_{below} ；
- d) 通过将“ L_{above} 和 L_{below} ”与“ p_{above} 和 p_{below} ”插入线性 L 与 $\log_{10} p$ 尺度上的 p ，确定期望位置的综合云液态含水量 L 以及超越概率 p 。

4.2.2 空间和统计 (平均和标准偏差) 插值

可使用ITU R P.1144建议书附件1规定的双线性插值法，计算地球表面任意期望位置的月度或年度平均云液态含水量 \bar{L} 或 σ_L 、年度对数正态综合云液态含水量平均或标准方差参数 m_L 或 s_L ，或年度云 P_L 概率。其位置在期望参数 X 周围的四个点，期望位置的 $X = \bar{L}、\sigma_L、m_L、s_L$ 或 P_L 。
