

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R P.840-8 建议书
(08/2019)

云雾引起的衰减

P 系列
无线电波传播



ITU 国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

知识产权政策 (IPR)

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议中所参引的《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/en>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 系列建议书

(也可在线查询 <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

系列	标题
BO	卫星传送
BR	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
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	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和频率标准发射
V	词汇和相关问题

说明： 该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版
2020年，日内瓦

© 国际电联 2020

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R P.840-8 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年)

范围

本建议书提供了预测地对空路径上云雾引起的衰减的方法。

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) 为计算总衰减的时间序列和空-时预测方法，需提供层状云液态水总含量统计数据的解析表达式；
- d) 可能没有云中液态水总柱状含量的当地测量数据，

建议

- 1 如果没有云中液态水总柱状含量的当地测量数据，则应使用附件1第3.1节中的方法来预测云雾造成的衰减；
- 2 如果已掌握云中液态水总柱状含量的当地测量数据，则应使用附件1第3.2节中的方法来计算由云造成的衰减；
- 3 根据需应用层状云液态水总含量统计数据的解析表达式的空-时信道模型要求，附件1第4段中的信息应用于全球传播效应的计算。

附件1**1 引言**

对完全由通常小于 0.01 cm 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：

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

其中:

γ_c : 云中比衰减量 (dB/km)

K_l : 云中液态水比衰减系数 ((dB/km)/(g/m³))

M : 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 m), 浓雾则为 0.5 g/m³ (能见度约为 50 m)。

2 云中液态水比衰减系数

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

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

其中 f 是频率 (GHz), 以及:

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

水的复介电常数可表示为:

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s[1 + (f/f_s)^2]} \quad (4)$$

$$\epsilon'(f) = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{[1 + (f/f_s)^2]} + \epsilon_2 \quad (5)$$

其中:

$$\epsilon_0 = 77.66 + 103.3(\theta - 1) \quad (6)$$

$$\epsilon_1 = 0.0671\epsilon_0 \quad (7)$$

$$\epsilon_2 = 3.52 \quad (8)$$

$$\theta = 300 / T \quad (9)$$

其中 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:

$$f_p = 20.20 - 146(\theta - 1) + 316(\theta - 1)^2 \quad (\text{GHz}) \quad (10)$$

$$f_s = 39.8f_p \quad (\text{GHz}) \quad (11)$$

3 沿斜路径云衰减

如果没有云中液态水总柱状含量 L (kg/m^2 或等效的毫米)的当地测量数据,则应使用第3.1节中的方法来预测沿斜路径的云衰减。该预测方法基于ERA-40数据,其中使用了降至固定温度273.15 K的云中液态水总柱状含量 L_{red} (kg/m^2 或等效的毫米)。

如果可从其他渠道(如从地面辐射测量、地球观测产品或气象数值产品)获得云中液态水总柱状含量的当地测量数据,应采用第3.2节中的方法计算沿斜路径云衰减。

3.1 基于全球数字地图的沿斜路径云衰减分布

对于给定的概率 p ,斜路径云衰减 A 为:

$$A = \frac{L_{red} K_l(f, 273.15)}{\sin j} \quad (\text{dB}) \quad \text{对于 } 90^\circ \geq \varphi \geq 5^\circ \quad (12)$$

其中 L_{red} 是在概率 p 时温度降至273.15 K的液态水的总柱状含量 L_{red} (kg/m^2 或等效的毫米), φ 是仰角,对于273.15 K的水温度,通过公式(2)至(11)计算 K_l 。

平均每年0.1、0.2、0.3、0.5、1、2、3、5、10、20、30、50、60、70、80、90、95和99%的概率超出的层状云降低液态水总含量年度值 L_{red} (kg/m^2)是本建议书不可分割的组成部分并以数字地图形式提供。

平均月份1、2、3、5、10、20、30、50、60、70、80、90、95和99%的概率超出的层状云降低液态水总含量月值是本建议书不可分割的组成部分并以数字地图的形式提供。

这些数字地图在补充文件R-REC-P.840-8-201908-I!!ZIP-E.zip中提供。

这些数据是经度 0° 至 360° 和纬度 $+90^\circ$ 至 -90° 之间的数据,纬度和经度的分辨率均为 1.125° 。

地球表面所需位置的层状云降低液态水总含量可通过下列插值方法得出:

- 从0.1、0.2、0.3、0.5、1、2、3、5、10、20、30、50、60、70、80、90、95和99%数据组中确定年度统计数据高于和低于所需概率 p 的两个概率 p_{above} 和 p_{below} ,并从1、2、3、5、10、20、30、50、60、70、80、90、95和99%数据组中确定其月统计数据的这些概率;
- 确定最近的四个栅格点上两个概率 p_{above} 和 p_{below} 时气柱云降低液态水总含量 L_{red1} 、 L_{red2} 、 L_{red3} 和 L_{red4} ;
- 通过ITU-R P.1144建议书中所述的四个栅格点上层状云降低液态水总含量的四个值 L_{red1} 、 L_{red2} 、 L_{red3} 和 L_{red4} 的双线性插值确定两个概率 p_{above} 和 p_{below} 时的层状云液态水总含量 $L_{redabove}$ 和 $L_{redbelow}$;
- 通过线性 L_{red} : $\log p$ 换算中 $L_{redabove}$ 和 $L_{redbelow}$: p_{above} 和 p_{below} 与 p 的插值确定所需概率 p 的气柱云降低液态水总含量 L_{red} 。

3.2 基于当地数据的沿斜路径云衰减

斜路径云衰减 A 为:

$$A = \frac{LK_l^*(f, 273.15)}{\sin \varphi} \quad (\text{dB}) \quad \text{对于 } 90^\circ \geq \varphi \geq 5^\circ \quad (13)$$

其中 L 是液态水的总柱状含量 (kg/m^2 或等效的毫米), φ 是仰角, K_l^* 计算如下:

$$K_l^*(f, T) = \frac{0.819(1.9479 \times 10^{-4} f^{2.308} + 2.9424 f^{0.7436} - 4.9451)}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \quad (\text{dB/km})/(\text{g/m}^3) \quad (14)$$

其中 η 在公式(3)中给出, ε'' 在公式(4)中给出, 液态水温度 T 为273.15 K。

4 通过对数正态分布算出 L_{red} 的近似值

温度降低到 273.15 K 的液态水的总柱状含量的年度统计值可近似为狄拉克对数正态分布 (Dirac log-normal distribution)。平均值 m 、标准偏差 σ 和温度降至 273.15 K 的液态水总柱状含量非零概率 P_{CLW} 的数字地图是本建议的组成部分, 可在补充文件 R-REC-P.840-8-201908-I!!ZIP-E.zip 中获得。数据的经度范围是从 0°E 到 360°E , 纬度范围是从 $+90^\circ\text{N}$ 到 -90°N , 经度和纬度的分辨率都是 1.125° 。

本节提供了 ITU-R P.1853 建议书所阐述云衰减时序生成器所需的有用地点的 m 、 σ 和 $P_{CLW}(\%)$ 的值; L_{red} 的相关值仅供参考。在其他情况下, 应使用第 3 节提供的数值而非本节计算得出的估计值计算 L_{red} 。

在地球表面任何所需的位置, 对于任何平均年的超出概率 $P(\%)$ 在 0.1%和 99%之间, 温度降至 273.15 K 的液态水的总柱状含量 L_{red} , 可以计算如下:

- a) 确定周围四个栅格点的参数 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 、 P_{CLW1} 、 P_{CLW2} 、 P_{CLW3} 和 P_{CLW4} ;
- b) 采用ITU-R P.1144建议书附录1所述方法, 对每个参数 m 、 σ 和 P_{CLW} 进行双线性空间插值, 确定所需位置的 m 、 σ 和 P_{CLW} 值;
- c) 作为参考, 在地球表面的所需位置, 温度降至273.15 K的液态水的总柱状含量 L_{red} , 以及从 m 、 σ 和 P_{CLW} 数值进行空间插值得到的超出概率 P 如下所示:

- i) 如果 $P \geq P_{CLW}$,

$$L_{red} = 0 \quad (15a)$$

- ii) 否则

$$L_{red} = e^{m + \sigma Q^{-1}\left(\frac{P}{P_{CLW}}\right)} \quad (\text{kg/m}^2) \quad (15b)$$

其中, $Q^{-1}(x)$ 是ITU-R P.1057建议书中定义的逆标准正态互补累积分布函数。