

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R P.1815-1 建议书
(10/2009)

差分雨衰

P 系列
无线电波传播



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号决议的附件1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
2010年，日内瓦

© ITU 2010

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.1815-1建议书*

差分雨衰

(第ITU-R 208/3号课题)

(2007-2009年)

范围

本建议书预测了某颗卫星与地球表面上的两点之间的联合差分雨衰统计值。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 为了进行共用分析，必须具备适当的技术来预测单颗卫星与地球表面上的多点之间的卫星路径上由降雨引起的差分衰减；
- b) 降雨率空间相关的估计值是可以得到的；
- c) 已经制定了预测由降雨引起的空一地路径差分衰减的方法，

建议

- 1** 应采用附件1所述的方法预测单颗卫星与地球表面上的多点之间的卫星路径上的差分雨衰。

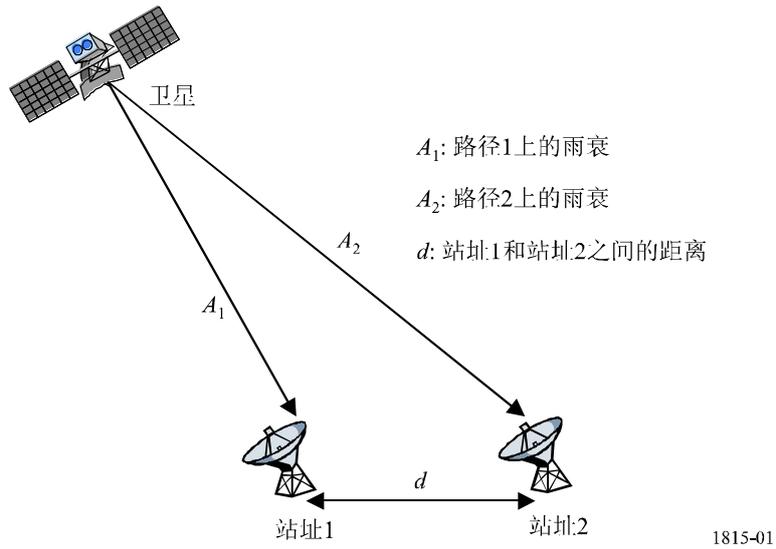
附件1**差分雨衰方法的说明****1 引言**

用本附件所述方法预测了某颗卫星与地球表面上的两点之间的联合差分雨衰统计值，适用范围是频率不超过55 GHz，仰角大于约10°，站址距离在0和至少250 km之间。

该方法考虑了雨滴大小、降雨强度和雨滴运动在差分雨衰方面的统计特性和时间特性。

* 无线电通信第3研究组于2016年根据ITU-R第1号决议对此建议书进行了编辑性修正。

图1
差分衰减的布局



预测差分衰减的布局示于图1，其中 A_1 和 A_2 分别为路径1和路径2上的雨衰。第一条路径上的衰减 A_1 在 a 和 b 之间，第二条路径上的衰减 A_2 小于或等于 $A_1 - c$ ，即联合概率为 $\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq A_1 - c\}$ ，则为理想的统计值。图2用阴影区内的集总概率描绘了该联合概率。

图2
理想联合概率分布

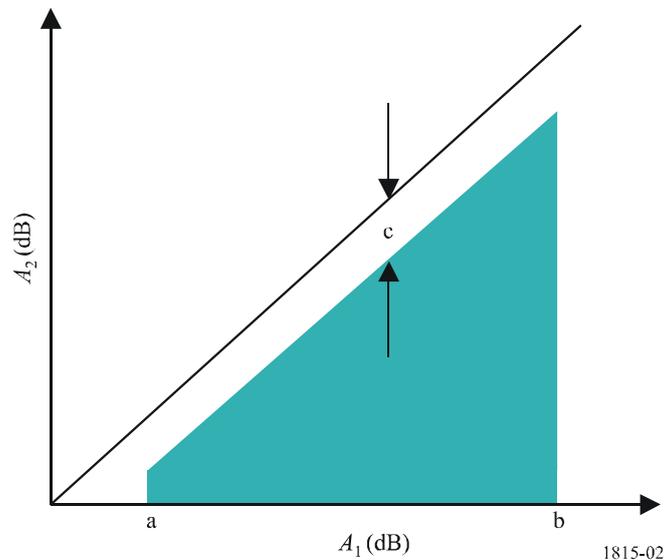


图2阴影区内的联合概率可以用长方形窄竖条内的各集总概率之和来严格逼近，如图3所示。

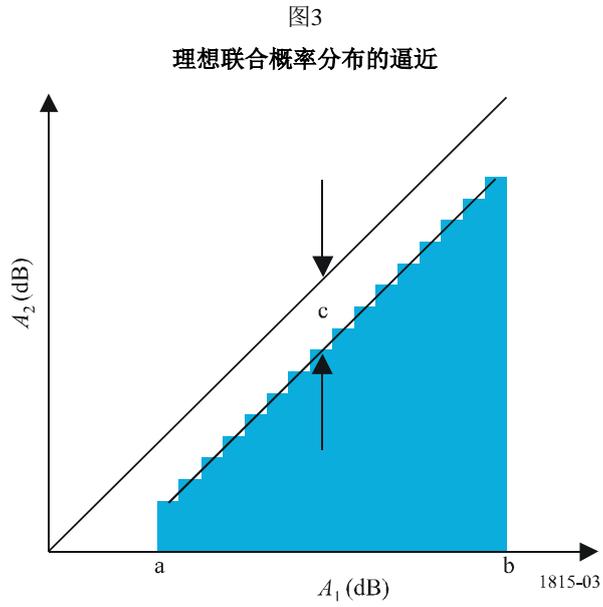


图3阴影区内的联合概率则可由图4阴影区内的联合概率与图5阴影区内的联合概率之差算出。

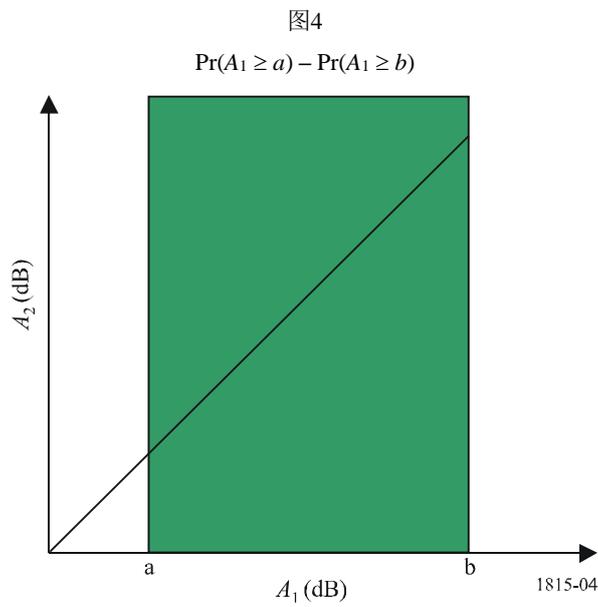
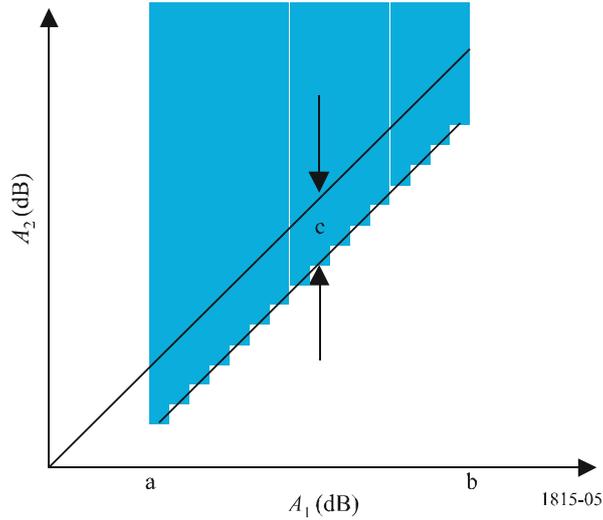


图5

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \Pr \left(A_1 \geq a + (i-1)\delta - \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) - \Pr \left(A_1 \geq a + (i-1)\delta + \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) \right\}$$



从图4和图5可以看出，联合概率 $\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq A_1 - c\}$ 可由下式严格逼近：

$$\begin{aligned} & \Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq A_1 - c\} \\ &= \Pr(A_1 \geq a) - \Pr(A_1 \geq b) \\ & - \sum_{i=1}^n \left\{ \Pr \left(A_1 \geq a + (i-1)\delta - \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) - \Pr \left(A_1 \geq a + (i-1)\delta + \frac{\delta}{2}, A_2 \geq a + (i-1)\delta - c \right) \right\} \end{aligned}$$

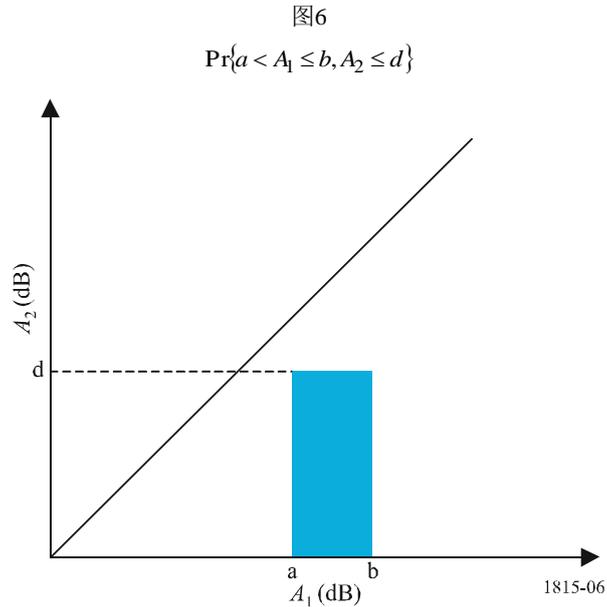
其中：

$$\delta = \frac{b-a}{n}$$

且选择的点数 n 可让逼近足够准确。0.01 dB 的步长 δ 一般就能给出足够的准确度。

该方法也可用于计算其他的理想联合概率。例如，图6阴影区内所示的联合概率 $\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq d\}$ 即为：

$$\Pr\{a < A_1 \leq b, A_2 \leq d\} = \Pr\{A_1 \geq a\} - \Pr\{A_1 \geq b\} - [\Pr(A_1 \geq a, A_2 \geq d) - \Pr(A_1 \geq b, A_2 \geq d)]$$



2 年度差分衰减统计值

若需要年度差分衰减统计值，则概率 $\Pr\{A_1 \geq a, A_2 \geq b\}$ 可采用附件2所述的预测方法，根据单址雨衰与年度出现概率 $\Pr\{A_1 \geq a\}$ 和 $\Pr\{A_2 \geq b\}$ 拟合对数正态概率分布的情况来计算。雨衰与年度出现概率可采用ITU-R P.618建议书第2.2.1.1节所述的方法来预测。

年度差分衰减统计值可采用下述程序得到：

步骤1： 采用ITU-R P.618建议书第2.2.1.1节所述的ITU-R雨衰预测方法得出年度雨衰与出现概率；

步骤2： 采用第1节所述的差分雨衰预测方法，其中的相应概率 $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$ 用附件2所述的方法计算。

3 最差月份差分衰减统计值

若需要最差月份差分衰减统计值，可采用ITU-R P.841建议书将单址年度雨衰统计值转换为单址最差月份雨衰统计值。

最差月份差分衰减统计值可采用下述程序得到：

步骤1： 采用ITU-R P.618建议书第2.2.1.1节所述的ITU-R雨衰预测方法得出年度雨衰与出现概率；

步骤2： 采用ITU-R P.841建议书所述的ITU-R最差月份转换方法将年度雨衰统计值转换为最差月份雨衰统计值；

步骤3： 采用第1节所述的差分雨衰预测方法，其中的相应概率 $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$ 用附件2所述的方法计算。

附件2

差分雨衰预测方法的说明

1 分析

差分雨衰预测方法假定降雨强度与雨衰呈对数正态分布。

该方法用于预测 $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$ ，即通向第一个站址的路径上的衰减大于 a_1 且通向第二个站址的路径上的衰减大于 a_2 的联合概率 (%)。 $\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$ 是下述两个联合概率的乘积：

P_r ：两个站址都降雨的联合概率，及

P_a ：假定两个站址都降雨的情况下衰减分别超过 a_1 和 a_2 的条件联合概率，即：

$$\Pr(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2) = 100 \times P_r \times P_a \quad \% \quad (1)$$

这两个概率为：

$$P_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_r^2}} \int_{R_1}^{\infty} \int_{R_2}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{r_1^2 - 2\rho_r r_1 r_2 + r_2^2}{2(1-\rho_r^2)}\right)\right] dr_2 dr_1 \quad (2)$$

其中：

$$\rho_r = 0.7 \exp(-d/60) + 0.3 \exp[-(d/700)^2] \quad (3)$$

且

$$P_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_a^2}} \int_{\frac{\ln a_1 - m_{1\ln A_1}}{\sigma_{1\ln A_1}}}^{\infty} \int_{\frac{\ln a_2 - m_{1\ln A_2}}{\sigma_{1\ln A_2}}}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{b_1^2 - 2\rho_a b_1 b_2 + b_2^2}{2(1-\rho_a^2)}\right)\right] db_2 db_1 \quad (4)$$

其中：

$$\rho_a = 0.94 \exp(-d/30) + 0.06 \exp[-(d/500)^2] \quad (5)$$

且 P_a 和 P_r 是互补双变量正态分布¹。

参数 d 是两个站址之间的距离（km）。门限 R_1 和 R_2 是下式的解：

$$P_k^{rain} = 100 \times Q(R_k) = 100 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{R_k}^{\infty} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) dr \quad (6)$$

即：

$$R_k = Q^{-1}\left(\frac{P_k^{rain}}{100}\right) \quad (7)$$

其中：

R_k ：第 k 个站址的门限

P_k^{rain} ：降雨概率（%），

Q ：互补累积正态分布，

Q^{-1} ：逆互补累积正态分布。

P_k^{rain} ：某个特定地点可由ITU-R P.837建议书附件1的步骤3得到，采用当地数据或ITU-R降雨率图谱均可。

参数 $m_{\ln A_1}$ 、 $m_{\ln A_2}$ 、 $\sigma_{\ln A_1}$ 和 $\sigma_{\ln A_2}$ 的数值可通过每一单址雨衰 A_i 与出现概率 P_i 对下述对数正态分布的拟合得到：

$$P_i = P_k^{rain} Q\left(\frac{\ln A_i - m_{\ln A_i}}{\sigma_{\ln A_i}}\right) \quad (8)$$

这些参数可由每一地点逐一得到，也可采用单一的地点。雨衰与年度出现概率可用ITU-R P.618建议书第2.2.1.1节所述的方法预测。

对每一站址，雨衰与出现概率的对数正态拟合按下述方式完成：

步骤1：确定 P_k^{rain} （时间百分比）， k -th路径上的雨出现概率。

步骤2：构建参数对的集合 $[P_i, A_i]$ ，其中 P_i （时间百分比）是超过衰减 A_i （dB）的概率，其中 $P_i \leq P_k^{rain}$ 。 P_i 的具体值应考虑相关的概率范围；然而，建议的时间百分比为0.01%、0.02%、0.03%、0.05%、0.1%、0.2%、0.3%、0.5%、1%、2%、3%、5%和10%，限定条件为 $P_i \leq P_k^{rain}$ 。

¹ 这一积分的近似值见Z. Drezner和G.O. Wesolowsky的“二元正态积分的计算”（On the Computation of the Bivariate Normal Integral），《统计计算与模拟》（Journal of Statistical Computation and Simulation）第35卷，1989年，第101-107页。Matlab的统计工具框包含内置的Matlab函数“mvncdf”，可以计算二元正态积分，Python库包含内置函数“mvndst”，用于计算二元正态积分。

步骤3: 将参数对 $[P_i, A_i]$ 变换为 $\left[Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_k^{rain}}\right), \ln A_i \right]$,

其中:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

步骤4: 对于所有 i , 完成对 $\ln A_i = \sigma_{\ln A_i} Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_k^{rain}}\right) + m_{\ln A_i}$ 的最小二乘方拟合, 以确定变量 $m_{\ln A_i}$ 和 $\sigma_{\ln A_i}$ 。不采用ITU-R P.1057建议书中描述的“分布程序, 通过对数正态余补累积分布模拟余补累积分布”来确定最小二乘方拟合。
