

ITU-R P.618-14 建议书

(08/2023)

P系列：无线电波传播

**设计地对空电信系统所需的
传播数据和预测方法**



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：<https://www.itu.int/publ/R-REC/zh>）

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

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.618-14 建议书

设计地对空电信系统所需的传播数据和预测方法

(ITU-R第206/3号课题)

(1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2007-2009-2013-2015-2017-2023年)

范围

本建议书对规划地对空和空对地方向地球 – 空间网络/系统所需的各类传播参数作出了预测。

无线电通信全会，

考虑到

- a) 为合理规划地球-空间网络/系统，有必要拥有适当的传播数据和预测方法；
- b) 已制定了方法，使得预测在规划地球 – 空间网络/系统过程中所需的最重要传播参数得以实现，

建议

应采用附件 1 中的传播参数预测方法，在附件 1 中指出的各有效范围内，对地球 – 空间网络/系统进行规划。

注 – 涉及卫星广播业务、水上业务、陆地业务和航空卫星移动业务规划的额外信息可分别参见 ITU-R P.679、ITU-R P.680、ITU-R P.681和ITU-R P.682建议书。

附件1

目录

	页码
附件1.....	1
1 引言	2
2 传播损耗	5
2.1 大气气体引起的衰减	6
2.2 降水和云引起的衰减	6
2.3 晴空效应	16
2.4 闪烁和多路经损耗	17
2.5 多源同生大气衰减的总体衰减的评估	22

2.6	沙尘暴衰减	23
3	噪声温度	23
4	交叉极化效应	24
4.1	因水汽凝结导致的交叉极化的长期统计数据的计算	24
4.2	XPD联合统计数据 and 衰减	25
4.3	由水汽凝结导致的交叉极化的长期频率和极化统计数据变标	25
4.4	与交叉极化消除有关的数据	25
5	传播时延	26
6	带宽限制	26
7	到达角	26
8	非静止路径长期统计数据的计算	26

1 引言

在设计电信系统的地球-空间链路时，有几方面的效应必须考虑。需要考虑在所有频率上非电离层大气的效应，这种效应在1 GHz左右低仰角时尤其重要。这些效应包括：

- a) 大气气体的吸收；水汽（降水和云中的水和冰滴等）的吸收、散射和去极；吸收介质的发射噪声；以上这些在10 GHz以上的频率尤其重要；
- b) 由于大气的法向折射，地球站天线射束发散性而导致的信号损耗；
- c) 受折射率结构的不规则影响，由于天线孔径上的相位去相关性而导致的天线有效增益的降低；
- d) 因折射率大范围变化而导致的射束弯曲而产生的相对慢衰落；因折射率小范围变化而产生的更快的衰落（闪烁）和不同的到达角；
- e) 由于多次散射或多路径效应，尤其是高容量数字系统内的多次散射或多路径效应而产生的可能的带宽限制；
- f) 地面终端的局部环境（建筑物、树等）导致的衰减；
- g) 在上行和下行频率上的短期衰减变化，该变化可能影响到自适应抗衰减对策的精确性；
- h) 对于非静止卫星系统（non-GSO）而言，卫星仰角变化的影响。

电离层效应（参见ITU-R P.531号建议书）可能是重要的，尤其是1 GHz以下的频率更是如此。为方便起见，这些被量化为表1中的0.1、0.25、0.5、1、3和10 GHz，以便显示数值较高的总电子含量（TEC）。这些效应包括：

- j) 法拉第旋转：在电离层线极化传播的电波绕着极化平面进行往复旋转；

- k) 导致在发射信号带宽上产生时间差分时延的散射；
- l) 额外的时间时延；
- m) 电离层闪烁：电离层电子密度的不均一性产生了折射聚焦或无线电波的散焦并导致振幅波动，此为闪烁。电离层闪烁在地磁赤道附近最大，在中纬度地区最小。极光带也是闪烁较为突出的地区。强闪烁在振幅上呈雷利分布；弱闪烁几乎是对数正态分布。这些波动随频率的增加而减少，且依赖于路径几何对象、地点、季节、太阳活动和当地时间等系数。表2列出了中纬度地区VHF和UHF频段衰落深度数据，这些数据基于ITU-R P.531建议书。

伴随着振幅波动，还有相位波动。相位波动的谱密度与 $1/f^3$ 成比例，其中 f 是波动的傅里叶频率。该谱特征类似于振荡器频率闪烁，并可显著降低接收硬件的性能。

表1

仰角大约30°时、单向穿越情况下估计*的电离层效应**
(摘自ITU-R P.531建议书)

效应	频率相关性	0.1 GHz	0.25 GHz	0.5 GHz	1 GHz	3 GHz	10 GHz
法拉第旋转	$1/f^2$	30转	4.8转	1.2转	108°	12°	1.1°
传播时延	$1/f^2$	25 μs	4 μs	1 μs	0.25 μs	0.028 μs	0.0025 μs
折射	$1/f^2$	< 1°	< 0.16°	< 2.4'	< 0.6'	< 4.2"	< 0.36"
到达方向变化 (r.m.s.)	$1/f^2$	20'	3.2'	48"	12"	1.32"	0.12"
吸收 (极光和/或极冠)	$\approx 1/f^2$	5 dB	0.8 dB	0.2 dB	0.05 dB	6×10^{-3} dB	5×10^{-4} dB
吸收 (中纬度)	$1/f^2$	< 1 dB	< 0.16 dB	< 0.04 dB	< 0.01 dB	< 0.001 dB	< 1×10^{-4} dB
散射	$1/f^3$	0.4 ps/Hz	0.026 ps/Hz	0.0032 ps/Hz	0.0004 ps/Hz	1.5×10^{-5} ps/Hz	4×10^{-7} ps/Hz
闪烁 ⁽¹⁾	见ITU-R P.531建议书	见ITU-R P.531建议书	见ITU-R P.531建议书	见ITU-R P.531建议书	> 20 dB峰间值	≈ 10 dB峰间值	≈ 4 dB峰间值

* 该估计值基于总电子容量为 10^{18} el/m²，这是中纬度地区白天太阳活动活跃时的较高值。

** 10 GHz以上的电离层闪烁可以忽略不计。

(1) 在地磁赤道附近春(秋)分夜间早些时候(当地时间)太阳黑子高峰时观测到的数值。

表2

中纬度地区电离层闪烁的衰落深度分布 (dB)

时间百分比 (%)	频率 (GHz)			
	0.1	0.2	0.5	1
1	5.9	1.5	0.2	0.1
0.5	9.3	2.3	0.4	0.1
0.2	16.6	4.2	0.7	0.2
0.1	25	6.2	1	0.3

本附件只研究在涉及系统规划方面，对流层效应作用于有用信号的问题。关于干扰的方面在以下单独的建议书中研究：

- 地球站和地面电台的干扰 (ITU-R P.452建议书)；
- 来自和对空间电台的干扰 (ITU-R P.619建议书)；
- 地球站双向协调 (ITU-R P.1412建议书)。

一个明显的例外是路径去极，尽管只关系到干扰问题（例如正交极化信号传输），但它与同极化直接信号的传播损耗直接有关。

这些信息根据在实际系统规划中要考虑的链路参数进行了安排，而不是根据产生不同效应的物理现象。已尽可能提供了适用于实际应用的简单预测方法，并指出了其有效范围。尽管传播条件相差很大（从一年到另一年，从一个地点到另一个地点），这些相对简单的方法在绝大部分实际应用中产生了满意的效果。

本附件中的预测方法已尽可能比照无线电通信第3研究组数据库中的测量数据进行了检验（见ITU-R P.311建议书）。

2 传播损耗

相对于自由空间的传播损耗，在地球-空间路径上的传播损耗，主要由以下系数导致：

- 大气气体引起的衰减；
- 降雨、其它降水和云引起的衰减；
- 聚焦和散焦；
- 波阵面不相干性导致的天线增益降低；
- 闪烁和多路径效应；
- 沙尘暴引起的衰减。

作为频率、地理位置和仰角的函数，每一个影响系数都有其自身特性。通常，在10度以上的仰角，根据不同的传播条件，只有气体衰减，雨和云衰减以及可能的闪烁影响比较显著。对于非静止卫星系统，如第8段所述，仰角的变化应考虑在计算内。

（在某些气候区，天线反射器和馈源表面上的降雪和积冰可导致长时间的严重衰减，甚至可能占衰减年累积分布的绝大部分。）

2.1 大气气体引起的衰减

大气气体引起的衰减完全源自吸收，主要与频率、仰角、水平面上的高度以及水蒸气密度（绝对湿度）等有关。在10 GHz以下频率，通常可以忽略。在10 GHz以上频率，其重要性逐渐增大，尤其是低仰角时更是如此。ITU-R P.676建议书的附件1给出了计算大气气体衰减的完整方法，同一建议书的附件2给出了适用于上至350 GHz频率的近似方法。

在一个给定的频率，氧气对大气吸收的贡献相对是稳定不变的。但是，水蒸气密度和其垂直剖面却经常变化。在典型情况下，最大的气体衰减发生在最大降雨的季节（参见ITU-R P.836建议书）。

2.2 降水和云引起的衰减

2.2.1 年均衰减统计的预测

第2.2.1.1段给出了评估在倾斜传播路径上降水和云引起的衰减的一般方法。沿倾斜路径的非零雨衰概率的预测方法见第2.2.1.2段。

如果可以得到可靠的长期衰减统计数据（测得这些数据的仰角和频率与需要采用预测方法时的仰角和频率不同），经常更多地将这些数据按照被研究的仰角和频率变标，而不是使用普通的方法。建议的频率变标方法见第2.2.1.3段。

可以利用第2.2.4段的方法估计站点分集的效应。

2.2.1.1 从单点降雨量计算长期雨衰数据

以下程序提供了在一个给定点，在上至55 GHz以内的频率范围内，对倾斜路径上长期雨衰统计的评估方法。需要以下参数：

$R_{0.01}$: 该地0.01%概率的年均单点降雨量（mm/h）

h_s : 地球站在平均海平面以上的高度（km）

θ : 仰角（度）

φ : 地球站的纬度（度）

f : 频率（GHz）

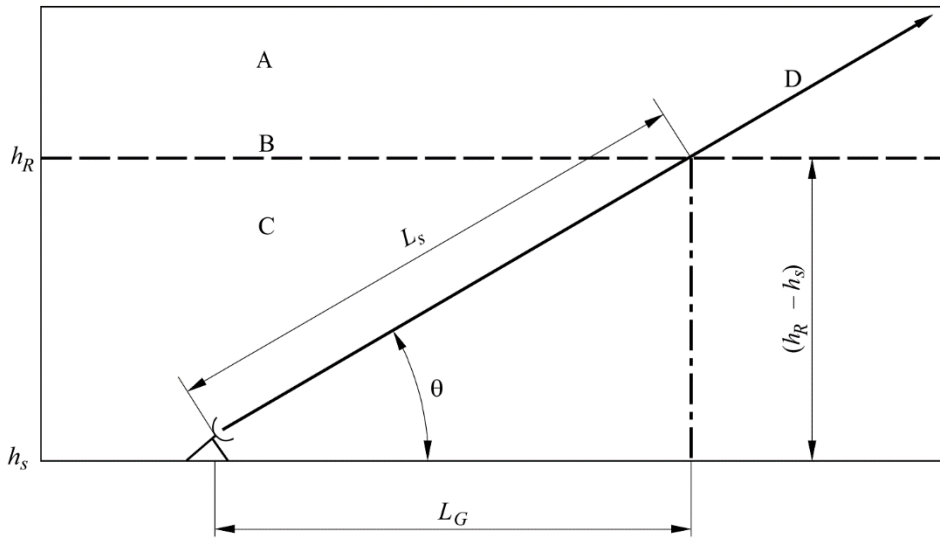
R_e : 地球的有效半径（8500 km）。

如果当地没有关于地球站在平均海平面以上高度的数据，可采用ITU-R P.1511建议书中地形高度图给定的数值作为估计值。

其几何排列见图1。

图1

地-空路径上给定衰减预测过程输入参数的示意图



A: 固态降水
 B: 降雨量
 C: 液态降水
 D: 地-空路径

P.0618-01

第1步：根据ITU-R P.839建议书，决定雨量 h_R ，

第2步：如果 $\theta \geq 5^\circ$ ，利用以下公式计算在该雨量值时倾斜路径长度 L_s ：

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \text{km} \quad (1)$$

如果 $\theta < 5^\circ$ ，则采用以下公式：

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{1/2} + \sin \theta} \quad \text{km} \quad (2)$$

如果 $h_R - h_s$ 小于或等于0，预计的雨衰在任何时间百分比上都是0且不需要再进行以下步骤。

第3步：利用以下公式计算倾斜路径的水平投影 L_G ：

$$L_G = L_s \cos \theta \quad \text{km} \quad (3)$$

第4步：获取概率超过0.01%的年均降雨量 $R_{0.01}$ （积分时间为1分钟）。如果本地数据来源中无法获得此项长期统计数据，可采用ITU-R P.837建议书降雨量图中给定的数值作为估计值。如果 $R_{0.01}$ 等于0，预计的雨衰在任何时间百分比上都是0且不需要再进行以下步骤。

第5步：利用以下公式，并采用ITU-R P.838建议书中给定的频率相关系数和第4步确定的降雨量 $R_{0.01}$ ，获取特定衰减 γ_R ：

$$\gamma_R = k (R_{0.01})^\alpha \quad \text{dB/km} \quad (4)$$

第6步：计算0.01%时间内的水平换算系数 $r_{0.01}$ ：

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38 (1 - e^{-2L_G})} \quad (5)$$

第7步：计算0.01%时间内的垂直调整系数 $v_{0.01}$ ：

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0.01}} \right) \quad \text{度}$$

如果 $\zeta > \theta$,

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad \text{km}$$

否则,

$$L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \text{km}$$

如果 $|\varphi| < 36^\circ$,

$$\chi = 36 - |\varphi| \quad \text{度}$$

否则,

$$\chi = 0 \quad \text{度}$$

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-(\theta/(1+\chi))} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0.45 \right)}$$

第8步：有效路径长度是：

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad \text{km} \quad (6)$$

第9步：预计衰减超过年均0.01%时间可用下式计算：

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad \text{dB} \quad (7)$$

第10步：预计衰减超过年均其它百分比（从0.001%到5%）的情形，由预计衰减超过年均0.01%时间来决定：

如果 $p \geq 1\%$ 或 $|\varphi| \geq 36^\circ$: $\beta = 0$

如果 $p < 1\%$ 及 $|\varphi| < 36^\circ$ 及 $\theta \geq 25^\circ$: $\beta = -0.005(|\varphi| - 36)$

其它时候: $\beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta$

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad \text{dB} \quad (8)$$

该方法提供了对由降雨引起的衰减长期统计数据的预测。当比较测量和预测的数据时，考虑到降雨量统计数据年与年之间较大的变动，应允许一定的误差（参见ITU-R P.678建议书）。

2.2.1.2 倾斜路径雨衰概率

以下各步计算了给定倾斜路径上非零雨衰的概率 $P(A > 0)$ (%), , 主要取决于以下输入参数:

$P_{0annual}(Lat, Lon)$: 地球站处的年降雨概率,

($0\% \leq P_{0annual} \leq 100\%$)

θ : 仰角 (度)

L_S : 从地球站到降雨层高度的倾斜路径长度 (公里)

第1步: 根据ITU-R P.837建议书或当地实测降雨率数据估算降雨概率 $P_{0annual}(Lat, Lon)$ (%)。

第2步: 计算参数 α :

$$\alpha = Q^{-1}\left(\frac{P_{0annual}}{100}\right) \quad (9)$$

其中:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (10)$$

第3步: 计算空间相关函数 ρ :

$$\rho = 0.59e^{-\frac{|d|}{31}} + 0.41e^{-\frac{|d|}{800}}, \quad (11)$$

其中:

$$d = L_S \cos \theta \quad (\text{公里}) \quad (12)$$

L_S 在方程式(2)中计算。

第4步: 计算互补二元正态分布 C_B ¹:

$$C_B = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \int_{\alpha}^{\infty} \int_{\alpha}^{\infty} e^{-\frac{x^2-2\rho xy+y^2}{2(1-\rho^2)}} dx dy \quad (13)$$

第5步: $P(A > 0)$ (%), 计算倾斜路径的雨衰概率:

$$P(A > 0) = 100 \left[1 - \left(1 - \frac{P_{0annual}}{100} \right) \left(\frac{C_B - \left(\frac{P_{0annual}}{100} \right)^2}{\frac{P_{0annual}}{100} \left(1 - \frac{P_{0annual}}{100} \right)} \right)^{\frac{P_{0annual}}{100}} \right] \quad (\%) \quad (14)$$

如果 $\theta = 90^\circ$, 则 $P(A > 0) = P_{0annual}$ 。

¹ C_B 与第2.2.4.1段使用的二元正态积分相同。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。

2.2.1.3 长期频率和雨衰统计数据的极化定标

频率调整系指从一个已知的不同频率传播效应对一个频率传播效应（如雨衰）的预测。通常而言，得到预测的传播效应频率高于已知传播效应的频率。在降雨过程中，两个频率之间的雨衰比可能出现差异，雨衰增加时，二者之间比的差异会加大。

以下段落提供两种预测方法：

- 1) 第2.2.1.3.1节提供以 f_1 频率雨衰为条件的 f_2 频率雨衰的统计变化预测方法。该方法要求在两个频率上进行雨衰累积分布。
- 2) 第2.2.1.3.2节提供简单的以 f_1 频率雨衰为条件的 f_2 频率等概率雨衰预测方法。该方法不需要任何一个频率上的雨衰累积分布。

这些预测方法可适用于上行链路的功率控制和自适应式编码及调制，例如：

- a) 第一种方法基于测得的 f_1 频率下行链路瞬间雨衰预测 f_2 频率的瞬间上行链路雨衰，年度上行链路雨衰超过预测值的风险为P%。
- b) 第二种方法根据已知的 f_1 频率下行链路雨衰预测 f_2 频率的上行链路雨衰，超出预测值的概率相同。

2.2.1.3.1 有条件的雨衰频率调整比分布

本预测方法基于 A_2 (dB) – f_2 频率瞬间雨衰和 A_1 (dB) – f_1 频率瞬间雨衰之间的下列关系：

$$\ln(A_2) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \sqrt{1-\xi^2} \ln(A_1) + \left(\mu_2 - \frac{\sigma_2 \mu_1}{\sigma_1} \sqrt{1-\xi^2} \right) + \sigma_2 \xi \times n \quad (15)$$

其中 n 是带有零平均和单位变量的正态分布。下列分步骤的程序预测 $P(A_2 > a_2 | A_1 = a_1)$ – 以 f_1 频率雨衰为条件的 f_2 频率雨衰的补充累积分布。

该方法假设 $P(A_1 > a_1 | A_1 > 0)$ 和 $P(A_2 > a_2 | A_2 > 0)$ – 以 f_1 和 f_2 频率路径上出现非零雨衰为条件的补充累积雨衰分布（通过带有参数 (μ_1, σ_1) 和 (μ_2, σ_2) 的对数正态分布得出特性）：

$$P(A_1 > a_1 | A_1 > 0) = Q\left(\frac{\ln a_1 - \mu_1}{\sigma_1}\right) \quad (16)$$

$$P(A_2 > a_2 | A_2 > 0) = Q\left(\frac{\ln a_2 - \mu_2}{\sigma_2}\right) \quad (17)$$

其中：

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (18)$$

参数 μ_1 、 σ_1 、 μ_2 和 σ_2 通过同一传播路径的 f_1 和 f_2 频率雨衰统计数据得出，这些雨衰统计数据可通过局部测量的雨衰（即，除大气衰减、云衰减和闪烁衰落外的超量衰减）数据或第2.2.1.1段所述的特定地点和相关路径仰角雨衰预测方法得出。 f_1 和 f_2 频率的雨衰统计数据应从相同渠道推导得出。

已在19至50 GHz之间的频率上试验了该程序，但建议的频率最高为55 GHz。

要求有下列参数：

- f_1 : 已知雨衰的较低频率 (GHz)
- f_2 : 预测雨衰的较高频率 (GHz)
- P_{rain} : 降雨概率 (%)
- μ_1 : f_1 频率雨衰的平均对数正态分布
- μ_2 : f_2 频率雨衰的平均对数正态分布
- σ_1 : f_1 频率雨衰对数正态分布的标准偏差
- σ_2 : f_2 频率雨衰对数正态分布的标准偏差

针对 f_1 和 f_2 各频率，按照下列步骤进行雨衰与出现概率之间的对数正态拟合 (fit)：

步骤1：计算路径上降雨百分比 P_{rain} (%)。可通过ITU-R P.837建议书中有关相关地点经纬度的 $P_0(Lat, Lon)$ 预测 P_{rain} 。

步骤2：对于 f_i ，当 $i = 1$ 和 2 时，建立 $[P_i, A_{i,1}]$ 和 $[P_i, A_{i,2}]$ 对，其中 P_i (%) 是 $P_i \leq P_{rain}$ 时 $A_{i,1}$ (dB) 超出的时间百分比。应选择具体的 P_i 数值，以包含所关心的频率范围。然而，建议采用的时间百分比为 0.01、0.02、0.03、0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1、2、3 和 5%，常数为 $P_i \leq P_{rain}$ 。

步骤3：以 P_{rain} 降雨概率除以所有 P_i 时间百分比，以获得 $p_i = P_i / P_{rain}$ 的雨衰概率。

步骤4：将 $[p_i, A_{i,1}]$ 和 $[p_i, A_{i,2}]$ 两个序列对变换为 $[Q^{-1}(p_i), \ln A_{i,1}]$ 和 $[Q^{-1}(p_i), \ln A_{i,2}]$ 。

步骤5：通过对 $\ln A_{i,1} = \sigma_1 Q^{-1}(p_i) + \mu_1$ 和 $\ln A_{i,2} = \sigma_2 Q^{-1}(p_i) + \mu_2$ 序列进行最小二乘方拟合估算参数 μ_1 、 σ_1 、 μ_2 和 σ_2 。ITU-R P.1057 建议书附件 2 阐述分步骤的、通过对数正态累积分布近似补充累积分布的程序。

步骤6：计算频率相关性 (dependency) 系数 ξ ：

$$\xi = 0.19 \left[\frac{f_2}{f_1} - 1 \right]^{0.57} \quad (19)$$

步骤7：计算下列有条件的平均 $\mu_{2/1}$ 和有条件的标准偏差 $\sigma_{2/1}$ ：

$$\mu_{2/1} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \sqrt{1 - \xi^2} \ln(a_1) + \left(\mu_2 - \frac{\sigma_2 \mu_1}{\sigma_1} \sqrt{1 - \xi^2} \right) \quad (20)$$

$$\sigma_{2/1} = \sigma_2 \xi \quad (21)$$

那么 $P(A_2 > a_2 | A_1 = a_1)$ – 以 f_1 频率 $A_1 = a$ 雨衰为条件的 f_2 频率雨衰的补充累积分布 A_2 则为：

$$P(A_2 > a_2 | A_1 = a_1) = Q \left(\frac{\ln(a_2) - \mu_{2/1}}{\sigma_{2/1}} \right) \quad (22)$$

其中 a_1 (dB) 为 f_1 频率雨衰，且 $0 \leq P \leq 1$ 。 $P(A_2 > a_2 | A_1 = a_1)$ 表示 f_2 频率雨衰 A_2 (dB) 概率超出 a_2 (dB) (即，风险)，鉴于 f_1 频率的雨衰为 a_1 (dB)。

可通过以下假设 P 值计算 a_2 (dB) 数值:

$$a_2 = \exp(\sigma_{2/1} Q^{-1}(P) + \mu_{2/1}) \quad (23)$$

虽然该程序为雨衰推导得出, 但也可用于总衰减 (大气衰减、雨衰、云衰减和闪烁衰落) 补充累积分布的预测。然而, 目前尚未确立该程序的准确性。

2.2.1.3.2 雨衰的长期频率调整

如果可以得到在某一个频率上测得的可靠衰减数据, 可以应用以下经验式公式。该公式直接给出了作为频率一个函数的衰减比例, 衰减可以适用于7-55 GHz频率范围内同一路径上的频率变标。

$$A_2 = A_1 (\varphi_2 / \varphi_1)^{1-H(\varphi_1, \varphi_2, A_1)} \quad (24)$$

其中:

$$\varphi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2} \quad (25)$$

$$H(\varphi_1, \varphi_2, A_1) = 1.12 \times 10^{-3} (\varphi_2 / \varphi_1)^{0.5} (\varphi_1 A_1)^{0.55} \quad (26)$$

A_1 和 A_2 分别是在频率 f_1 和 f_2 (GHz)时过度雨衰的等概率值。

最好采用基于可靠长期测量的衰减数据、而非基于长期测量的降雨数据进行频率变标。

2.2.2 季节变化 – 最坏月份

系统规划通常需要最坏月份中衰减值超过一定时间百分比的数值 p_w 。使用以下程序来预计最坏月份中衰减超过规定的时间百分比的情形。

第1步: 利用ITU-R P.841建议书中规定的等式, 照其所述将 p 适当调整后获得每年的时间比例 p , 该比例与要求的最坏月份比例 p_w 对应。

第2步: 对于讨论中的路径, 用第2.2.1.1段的方法获得超过每年时间百分比 p 的衰减 A (dB), 也可以从测量或频率变标衰减统计数据中获得该值。这个 A 值是最坏月份 p_w 百分比内的预计衰减值。

ITU-R P.678建议书给出了最坏月份值与平均值之间的变化曲线。

2.2.3 空间和时间统计的变化

在同一路径, 同一频率和极化上测得的降水衰减分布可能出现明显的年度变化。在一年0.001%至0.1%的范围内, 固定概率水平上的衰减值相差20% r.m.s.以上。当采用第2.2.1段的衰减预测或变标模型将某一地点的观测结果变标以预计同一地点的另一路径时, 变化幅度增至25% r.m.s.以上。

2.2.4 站点分集

因强降雨在地对空链路上造成大幅衰减的小区，通常其水平范围不会超过几公里。可将业务流量绕行至其它地球站，或者可以使用载有（可用作临时划分的）额外资源的卫星的分集系统，能够大幅提高系统的可靠性。如果两条链路的衰减门限值相等，则可将该站点分集系统归入平衡类系统，若两条链路的衰减门限值不相等，则应将其归入不平衡类系统。在 20 GHz 以上的频率中，非降雨类恶化亦可影响着站点分集的性能。

目前存在两种站点分集预测模型：

- 第2.2.4.1段所述的预测方法。该方法适用于不平衡和平衡系统，并计算超出衰减门限值的联合概率，和
- 第2.2.4.2段所述的预测方法。该方法适用于短距离平衡系统，并计算分集增益。

第2.2.4.1段所述计算方法最为精确，宜应首先采用此种方法。第2.2.4.2段中所述的简化预测方法，可以用于间隔距离小于20公里的情况；但此方法精确度较低。

2.2.4.1 预测因站点分集的雨衰所造成中断的概率

该分集预测方法假设降雨强度和雨衰呈对数正态分布。

此方法预测，联合概率 $P_r(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$ (%) 中第一站点路径上的衰减大于 a_1 ，并且第二站点路径上的衰减大于 a_2 。 $P_r(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2)$ 是两种联合概率的产物：

- 1) P_r ，当两个站点同时降雨时的联合概率，和
- 2) P_a ，当两个站点同时降雨，且两站点的衰减值分别超过 a_1 和 a_2 时的有条件联合概率；即：

$$P_r(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2) = 100 \times P_r \times P_a \% \quad (27)$$

这些概率如下：

$$P_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_r^2}} \int_{R_1}^{\infty} \int_{R_2}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{r_1^2 - 2\rho_r r_1 r_2 + r_2^2}{2(1-\rho_r^2)}\right)\right] dr_2 dr_1 \quad (28)$$

式中：

$$\rho_r = 0.7 \exp(-d/60) + 0.3 \exp[-(d/700)^2] \quad (29)$$

且

$$P_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_a^2}} \int_{\frac{\ln a_1 - m_{\ln A_1}}{\sigma_{\ln A_1}}}^{\infty} \int_{\frac{\ln a_2 - m_{\ln A_2}}{\sigma_{\ln A_2}}}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{b_1^2 - 2\rho_a b_1 b_2 + b_2^2}{2(1-\rho_a^2)}\right)\right] db_2 db_1 \quad (30)$$

式中：

$$\rho_a = 0.94 \exp(-d/30) + 0.06 \exp[-(d/500)^2] \quad (31)$$

并且 P_a 和 P_r 为互补二元正态分布²。

参数 d 为两站点之间的间隔（公里）。门限值 R_1 和 R_2 的解为：

$$P_k^{rain} = 100 \times Q(R_k) = 100 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{R_k}^{\infty} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) dr \quad (32)$$

即：

$$R_k = Q^{-1}\left(\frac{P_k^{rain}}{100}\right) \quad (33)$$

式中：

R_k ：第 k 个站点的门限值

P_k^{rain} ：降雨概率（%）

Q ：补充累积正态分布，且

Q^{-1} ：为它的倒数

P_k^{rain} ：某一特定地点的 P_k^{rain} ，可以根据ITU-R P.837建议书附件1的第3步，利用当地数据或ITU-R降雨量图得出。

确定 $m_{\ln A_1}, m_{\ln A_2}, \sigma_{\ln A_1}$ ，和 $\sigma_{\ln A_2}$ 参数值的方法是，将各单独站点的雨衰 A_i 与发生概率 P_i 插入对数正态分布公式：

$$P_i = P_k^{rain} Q\left(\frac{\ln A_i - m_{\ln A_i}}{\sigma_{\ln A_i}}\right) \quad (34)$$

各独立位置均可获得这些参数，亦可使用单一的位置。可使用第2.2.1.1段所述方法，预测出雨衰与年发生概率之比。

对于各个路径，雨衰与发生概率之比的对数正态拟合采用下述步骤进行：

第1步：确定 P_k^{rain} （时间%），第 k 个路径的降雨概率。

第2步：构建对集合 $[P_i, A_i]$ ，其中 P_i （时间%）是超出衰减 A_i (dB)的概率，其中 $P_i \leq P_k^{rain}$ 。应考虑令人满意的概率范围确定 P_i 的具体值；然而，提议的一个时间百分比集合是0.01%、0.02%、0.03%、0.05%、0.1%、0.2%、0.3%、0.5%、1%、2%、3%、5%和10%，其限制条件为 $P_i \leq P_k^{rain}$ 。

² 注 – 这与第2.2.1.2段使用的二元正态积分相同。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。

第3步：将对集合 $[P_i, A_i]$ 转换为 $\left[Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_k^{rain}}\right), \ln A_i \right]$ (35)

其中：

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (36)$$

第4步：通过对所有 i 执行 $\ln A_i = \sigma_{\ln A_i} Q^{-1}\left(\frac{P_i}{P_k^{rain}}\right) + m_{\ln A_i}$ 的最小平方差拟合，确定变量 $m_{\ln A_i}$ 和 $\sigma_{\ln A_i}$ 。运用逐步计算程序，通过ITU-R P.1057建议书中描述的对数正态补充累积分布估算补充累积分布，从而确定最小平方差拟合。

2.2.4.2 分集增益

尽管最佳方式是采用第2.2.4.1段中所述预测方法，但存在一种简化的替代方法，可使用下述经验公式对站点对间的分集增益， G (dB)，进行预测。此替代方法可用于站点间隔小于20公里的情况。计算分集增益所需的参数如下：

- d : 两个站点之间的距离(km)
- A : 一个站点的路径雨衰(dB)
- f : 频率(GHz)
- θ : 路径仰角(degrees)
- ψ : 传播路径方位与站点间基线的夹角，且应 $\psi \leq 90^\circ$ 。

第1步：利用下式计算空间间隔产生的增益：

$$G_d = a (1 - e^{-bd}) \quad (37)$$

其中：

$$a = 0.78 A - 1.94 (1 - e^{-0.11 A})$$

$$b = 0.59 (1 - e^{-0.1 A})$$

第2步：利用下式计算频率相关增益：

$$G_f = e^{-0.025 f} \quad (38)$$

第3步：利用下式计算仰角相关的增益项：

$$G_\theta = 1 + 0.006 \theta \quad (39)$$

第4步：利用下式计算基线相关项：

$$G_\psi = 1 + 0.002 \psi \quad (40)$$

第5步：计算下列乘积，作为净分集增益：

$$G = G_d \cdot G_f \cdot G_\theta \cdot G_\psi \quad \text{dB} \quad (41)$$

2.2.5 降水事件的特性

2.2.5.1 单个衰减的持续时间

超过指定的衰减电平的雨衰持续时间大概成对数正态分布。中等衰减持续时间在几分钟左右。在衰减小于20 dB的绝大部分测量结果中，这些分布与衰减路径没有很大的关联，这意味着在低衰减电平或高频率上观测到的更大的衰减总体时间百分比是由大量的单个衰减构成，这些单个衰减的持续时间分布基本相似。不符合对数正态分布似乎只发生在小于半分钟的衰减持续时间中。在特定衰减电平上的衰减持续时间倾向于随着仰角的降低而增大。

对于通过卫星的综合服务数字网络（ISDN）线路的规划，需要小于10秒的衰减事件如何影响整个衰减时间方面的数据。此信息尤其与中断门限对应的衰减电平有关，其中持续时间超过10秒的事件形成了系统不可用时间，而时间较短的事件影响到可用时间内的系统性能（参见ITU-R S.579建议书）。现有数据表明绝大部分情况下，系统可用时间内的超出时间占净超出时间的2%-10%。但是，在低仰角情况下，由对流层闪烁造成的短时间信号波动变得显著起来。在某些情况下，系统可用时间内的超出时间比高仰角地-空路径上的情形高得多。

2.2.5.2 衰减变化比例（衰减率）

已有公论正衰减和负衰减率是对数正态分布的，且这两者之间非常相似。衰减路径对衰减率的影响效应还没有确定。

2.2.5.3 不同频率上瞬时衰减值的相互关系

不同频率上瞬时雨衰率的数据是很多衰减自适应技术关心的问题。频率变标率被发现呈对数正态分布，受降雨类型和降雨温度的影响。数据显示衰减的短期变化可能相当明显，且随着路径仰角的减小而增大。

2.3 晴空效应

与大气吸收不同，没有降雨时的晴空效应不会对工作在10 GHz左右以下的频率，且10度以上仰角的空间电信系统产生严重的衰减。但是，在低仰角（ $\leq 10^\circ$ ）且10 GHz左右以上的频率时，大气闪烁在个别情况下会导致严重的性能下降。在很低仰角时（内陆路径上 $\leq 4^\circ$ ，水上或沿海路径 $\leq 5^\circ$ ），多路经传播效应引发的衰减可能特别严重。在某些地点，电离层闪烁可能在6 GHz左右以下的频率较为明显（参见ITU-R P.531建议书）。

2.3.1 波阵面不相干性导致的天线增益降低

接收天线波束射入的波阵面不相干性是由大气结构折射率小规模的不规则引起的。除了第2.4段讨论的信号迅速波动外，这些不规则性还带来天线-介质的耦合损耗，该损耗可用天线增益的降低来描述。

这种效应随着频率的增加和仰角的降低而变得明显，是天线直径的一个函数。尽管没有明确地在以下折射模型中予以考虑，这种效应相对而言是可以忽略的。

2.3.2 波束扩散损耗

地对空和空对地波束扩散损耗的预测方法见ITU-R P.834建议书。

2.4 闪烁和多路径损耗

对流层闪烁的幅度取决于沿传播路径的折射率变化的幅度和结构。闪烁幅度随着频率和路径长度的增大而增加，随着孔径平滑导致的天线波束宽度下降而降低。测得数据表明，月均有效波动与无线电折射率项 N_{wet} 关系密切，后者取决于大气的水蒸气比例。

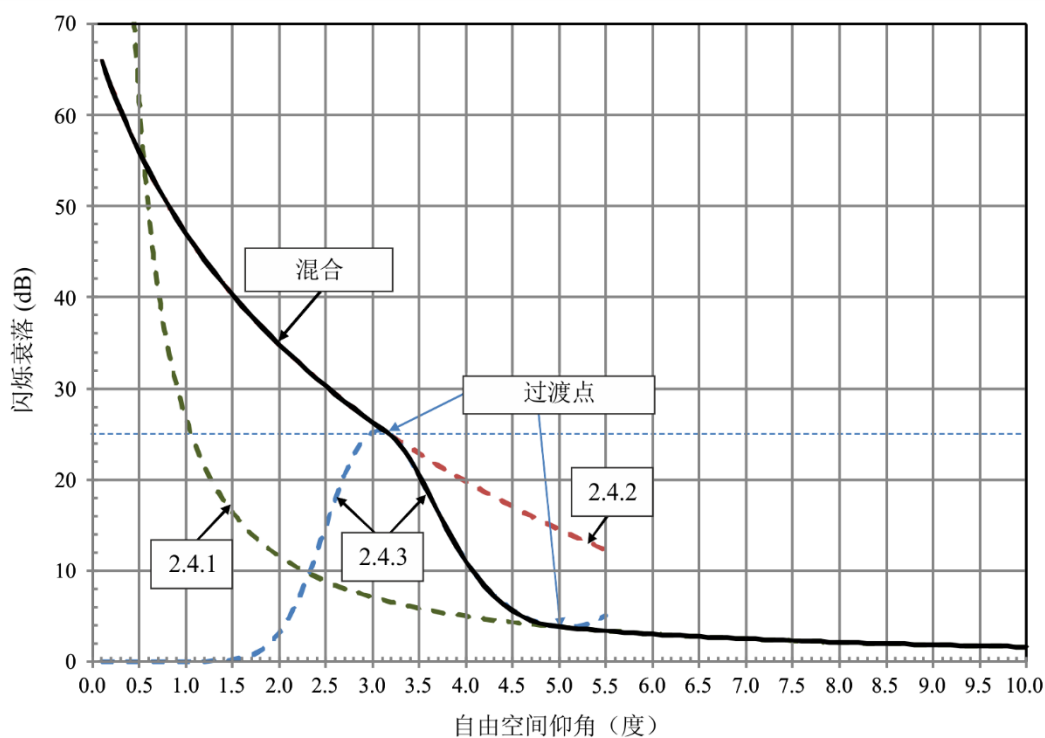
预测由闪烁幅度造成的衰落的方法有三个部分：

- 1) 预测自由空间仰角 $\geq 5^\circ$ 的闪烁幅度（第2.4.1段）。
- 2) 预测衰落 ≥ 25 dB的闪烁幅度衰落（第2.4.2段）。
- 3) 预测上述两个分布之间过渡区的闪烁幅度（第2.4.3段）。

如ITU-R P.834建议书所述，地球表面台站与空间台站之间的无线电波由于大气折射效应而向地球方向弯曲，由此，考虑到大气折射的视在仰角大于仅考虑两个台站之间视距的自由空间仰角。如果所关心的自由空间仰角大于或等于 5° ，则视在仰角和自由空间仰角之间的差异不重要，因此，仅需要考虑第2.4.1段所述的预测方法。

图2具体说明该预测方法的三个组成部分。请注意，第2.4.3段所述的过渡区预测方法对第2.4.1段所述的分布为正切（自由空间仰角为 5° ），且对2.4.2段所述的分布亦为正切（闪烁衰落深度为25 dB）。

图2
闪烁预测方法三部分的具体示例



在很小的时间比例内，且同样，在很大的衰减深度内（大于约10度），在很低仰角观测到的闪烁造成的衰减可能十分严重。观测也同时发现衰减与地面业务链路多路径衰减的特性类似。与地面链路衰减深度的分布类似，非常低仰角卫星链路的分布似乎与折射梯度统计数据也有关系。整个衰减分布呈现出从大超越比例的闪烁分布到小超越比例的多路径衰减分布（斜率为10 dB/十年）逐步过渡的状态。第2.4.2和2.4.3段分别关于整体分布中强衰减和浅度衰减部分的预测方法使用了折射斜率统计数据 p_L 来描述分布中的气候变化。

由对流层折射效应导致的净衰减分布 $A(p)$ 是上述波束扩展、闪烁和多路径衰减效应的联合作用的结果。对流层和电离层闪烁分布可将超过指定衰减电平的时间百分比相加组合后得出。

2.4.1 仰角大于5度时闪烁幅度每月和长期统计数据的计算

以下给出了仰角大于或等于5度时预测对流层闪烁累积概率分布的一般方法。该预测方法基于每月和长期的平均温度以及相对湿度，反映了相关地球站的特定气候条件。因为地表平均温度和地表平均相对湿度随着季节而变化，因此闪烁衰减深度分布也呈现出季节性的变化。季节变化可以通过使用季节性地表平均温度和季节性地表平均相对湿度来进行预测，且该信息可由所涉站点的天气信息中获得。

该方法要求的参数包括：

t : 该站点1个月或更长时间内平均的表面环境温度(°C)

H : 该站点1个月或更长时间内平均的表面相对湿度(%)

(注1 – 如果没有 t 和 H 的实验数据，也可采用ITU-R P.453建议书中的 N_{wet} 地图。)

f : 频率(GHz)，其中 $4 \text{ GHz} \leq f \leq 55 \text{ GHz}$

θ : 自由空间仰角，其中 $\theta \geq 5^\circ$

D : 地球站天线的物理直径(m)

η : 天线效率，如果未知，采用 $\eta = 0.5$ 的保守估计值。

如果表面折射的潮湿项中值超过平均年份，则通过ITU-R P.453建议书中的数字地图获得 N_{wet} ，并直接进入步骤3。

第1步：对于 t 值，按照ITU-R P.453建议书计算饱和水蒸气压力 e_s (hPa)。

第2步：计算未处理的无线电波折射率 N_{wet} ，该 N_{wet} 与ITU-R P.453建议书中给定的 e_s 、 t 和 H 相对应。

第3步：计算参考信号幅值的标准偏差 σ_{ref} ：

$$\sigma_{ref} = 3.6 \times 10^{-3} + 10^{-4} \times N_{wet} \quad \text{dB} \quad (42)$$

第4步：计算有效路径长度 L ：

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2 \theta + 2.35 \times 10^{-4} + \sin \theta}} \quad \text{m} \quad (43)$$

其中 h_L 是近地面扰动层的高度，为1000 m。

第5步：根据几何直径 D 和天线效率 η ，估计有效天线直径 D_{eff} ：

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} D \quad \text{m} \quad (44)$$

第6步：计算天线平均系数：

$$g(x) = \sqrt{3.86 (x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin \left[\frac{11}{6} \tan^{-1} \frac{1}{x} \right] - 7.08 x^{5/6}} \quad (45)$$

其中：

$$x = 1.22 D_{eff}^2 (f/L) \quad (46)$$

如果平方根的变量是一个负数（也就是当 $x \geq 7.0$ 时），任何时间比例的预计闪烁衰减深度为0且无需进行以下步骤。

第7步：计算适用期间内和路径上信号的标准偏差：

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1.2}} \quad (47)$$

第8步：计算时间百分比 p 在 $0.01 < p \leq 50$ 范围内的时间百分比系数 $a(p)$ ：

$$a(p) = -0.061 (\log_{10} p)^3 + 0.072 (\log_{10} p)^2 - 1.71 \log_{10} p + 3.0 \quad (48)$$

第9步：计算超出时间百分比 $p\%$ 内的衰减深度：

$$A(p) = a(p) \cdot \sigma \quad \text{dB} \quad (49)$$

2.4.2 仰角小于5°时闪烁/多路径衰减中强衰减部分分布的计算

本方法预测年均和平均最坏月份中由波束扩展、闪烁和多路径衰减组合形成的大深度衰减（大于或等于25 dB的衰减）。逐步计算的程序见下：

第1步：使用ITU-R P.834建议书所述方法，计算考虑折射效应的、所涉路径上对应所需自由空间仰角 θ_0 (mrad)的视在准线仰角 θ_0 (mrad)。

第2步：对于所涉路径，计算年份平均最坏月份的地面系数 K_w ：

$$K_w = p_L^{1.5} \times 10^{\frac{C_0 + C_{Lat}}{10}} \quad (50)$$

变量 $p_L(\%)$ 是某一个月中折射斜率在大气最低的100米处低于-100 N units/km的时间百分比，该月在有季节代表性的2月、5月、8月和11月中 p_L 值最高，ITU-R P.453建议书中的图8至图11给出了其图。

作为例外，对于大于南、北纬60度的纬度，只应使用5月和8月的图表。

表3总结了(50)等式中对应于路径类型的系数 C_0 的取值。对应纬度 ψ （以南纬或北纬度数表示）的系数 C_{Lat} 由以下决定：

$$C_{Lat} = 0 \quad \text{对于} \quad |\psi| \leq 53^\circ \quad (51)$$

$$C_{Lat} = -53 + \psi \quad \text{对于} \quad 53^\circ < |\psi| \leq 60^\circ \quad (52)$$

$$C_{Lat} = 7 \quad \text{对于} \quad 60^\circ < |\psi| \quad (53)$$

表3

等式(50)中系数 C_0 在不同类型传播路径上的取值

路径类型	C_0
传播路径完全在陆上且其地球站天线高度在平均海平面700米以下	76
地球站天线高度在平均海平面700米以上的传播路径	70
传播路径完全或部分经过水上或靠近这些水体的沿海地区（参见注 ⁽¹⁾ 中关于传播路径、沿海地区和 r 的定义）	$76 + 6r$

⁽¹⁾ 表达式中 C_0 栏的变量 r 指穿过水体或邻近沿海地区路径的一部分。

穿过小型湖泊或河流的传播路径归类为完全穿越陆地。尽管这些水体可以包括在 r 的计算中，其对系数 C_0 的增加作用（相对于穿越陆地非沿海地区的数值）是可以忽略的。

第3步：计算 f 频率（GHz）和所需视在仰角 θ (mrad)上超出 $p\%$ 时间的衰减深度 $A(p)$ ，

a) 平均年份：

$$A(p) = 10 \log_{10} K_w - v + 9 \log_{10} f - 59.5 \log_{10}(1 + \theta) - 10 \log_{10} p \quad \text{dB} \quad (54)$$

其中：

$$v = -1.8 - 5.6 \log_{10}(1.1 \pm |\cos 2\psi|^{0.7}) \quad \text{dB} \quad (55)$$

而且在等式(55)中，当 $|\psi| \leq 45^\circ$ 时，应选择“+”号，当 $|\psi| > 45^\circ$ 时，应选择“-”号。

或者

b) 平均年份最差月份：

$$A(p) = 10 \log_{10} K_w + 9 \log_{10} f - 55 \log_{10}(1 + \theta) - 10 \log_{10} p \quad \text{dB} \quad (56)$$

等式(54)、(55)和(56)适用于 A_{ref} 大于或等于25 dB左右的情形。这些等式是根据6-38 GHz的频率以及 1° - 4° 的仰角范围内的数据制定的，被认为可以适用于1-45 GHz的频率和 0.5° - 5° 的仰角范围。

2.4.3 仰角小于 5° 时闪烁/多路径衰减中弱衰减部分分布的计算

本节为过渡区闪烁衰落制定阴影衰落模型，这种衰落小于25 dB且自由空间仰角小于 5° 。

第1步：Set $A_1 = 25$ dB并计算频率 f (GHz)和所需时间百分比 $p(\%)$ 的视在仰角 θ_1 ：

$$\theta_1 = \begin{cases} \left(\frac{K_w f^{0.9}}{p 10^{10}} \right)^{\frac{1}{5.5}} - 1 & \text{最差月份} \\ \left(\frac{K_w 10^{-\frac{v}{10}} f^{0.9}}{p 10^{10}} \right)^{\frac{1}{5.95}} - 1 & \text{平均年份} \end{cases} \quad \text{mrad} \quad (57)$$

其中几何气候系数 K_w 在等式(50)中确定, v 在等式(56)中确定。

第2步: 计算 A_1'

$$A_1' = \begin{cases} -\frac{55}{1+\theta_1} \log_{10} e & \text{最差月份} \\ -\frac{59.5}{1+\theta_1} \log_{10} e & \text{平均年份} \end{cases} \quad \text{dB/mrad} \quad (58)$$

第3步: 由等式(49)计算 A_2

$$A_2 = A_s(p) \quad \text{dB} \quad (59)$$

当自由空间仰角 θ 为 5° 时。

第4步: 按照如下方法计算 A_2' :

$$A_2' = A_2 \times \left[\frac{g'(x)}{g(x)} \frac{dx}{d\theta} - \frac{1.2}{\tan(\theta)} \right] \times \frac{1}{1000} \quad \text{dB/mrad} \quad (60)$$

其中:

$$\frac{g'(x)}{g(x)} = \frac{1770(x^2+1) + 2123x^{\frac{1}{6}}(x^2+1)^{\frac{11}{12}} [\cos \zeta - x \sin \zeta]}{12x^{\frac{1}{6}}(x^2+1) \left[354x^{\frac{5}{6}} - 193(x^2+1)^{\frac{11}{12}} \sin \zeta \right]} \quad (61)$$

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{1.22 D_{eff}^2 f}{2h_L} \left[\frac{\sin \theta}{\sqrt{\sin^2 \theta + 2.35 \times 10^{-4}}} + 1 \right] \cos \theta \quad (62)$$

以及

$$\zeta = \frac{11}{6} \tan^{-1} \frac{1}{x} \quad (63)$$

当自由空间仰角 θ 为 5° 时, 其中 x 、 D_{eff} 和 h_L 由第 2.4.1 段确定。

第5步: 使用 ITU-R P.834 建议书中的等式 (12) 计算对应于 5° 自由空间仰角的视在仰角 θ_2 , 并将仰角 θ_2 变换为 mrad。

第6步：通过在 (θ_1, A_1, A_1') 和 (θ_2, A_2, A_2') 点之间进行内插计算所需视在仰角 θ (mrad) 上超出 p (%)时间的闪烁衰落 $A(p)$ ：

$$A(p) = A_1 \exp \left[\alpha(p)(\theta - \theta_1) + \beta(p)(\theta - \theta_1)^2 + \gamma(p)(\theta - \theta_1)^2 (\theta - \theta_2) \right] \quad (64)$$

其中：

$$\alpha(p) = \frac{A_1'}{A_1}$$

$$\beta(p) = \frac{\ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right) - \alpha \delta}{\delta^2}$$

$$\gamma(p) = \frac{A_2' - A_2(\alpha + 2\beta\delta)}{A_2\delta^2}$$

$$\delta = \theta_2 - \theta_1$$

衰落深度 $A(p)$ 适用于过渡区的视在仰角，即， $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ 和 $0 \leq p \leq 50\%$ 。

2.5 多源同生大气衰减的总体衰减的评估

对于在约18 GHz以上频率操作的系统，尤其是在低仰角和/或低余量时，必须考虑多源同生大气衰减的效应。

总体衰减(dB)代表着雨、气体、云和闪烁的综合效应，需要以下一个或多个输入参数：

$A_R(p)$ ：降雨导致的固定概率的衰减(dB)，由等式(8)中的 A_p 进行评估

$A_C(p)$ ：云导致的固定概率的衰减(dB)，由ITU-R P.840建议书进行评估

$A_G(p)$ ：水蒸气和氧气导致的固定概率的气体衰减(dB)，由ITU-R P.676建议书进行评估

$A_S(p)$ ：对流层闪烁导致的固定概率的衰减(dB)，由等式(49)进行评估

其中 p 是在50%至0.001%范围内，衰减超过的概率（即CCDF）。

如果可以得到在要求的时间百分比内当地的气象资料，气体衰减作为时间百分比的一个函数，可用ITU-R P.676建议书附件2中第2.2段进行计算。如果没有这些在要求的时间百分比内的气象资料，应计算平均气体衰减并在等式(65)和(66)中使用。

对于时间百分比在0.001%至5%之间的情况，计算给定概率的总体衰减的一般方法如下：

$$A_T(p) = A_G(p) + \sqrt{(A_R(p) + A_C(p))^2 + A_S^2(p)} \quad (\text{dB}) \quad (65)$$

当时间百分比在5%和50%之间时，总衰减由下式给出：

$$A_T(p) = A_G(p) + \sqrt{A_C^2(p) + A_S^2(p)} \quad (\text{dB}) \quad (66)$$

其中:

$$A_C(p) = A_C(5\%) \quad \text{对于 } p < 5.0\% \quad (67)$$

$$A_G(p) = A_G(5\%) \quad \text{对于 } p < 5.0\% \quad (68)$$

当总衰减预测方法与使用同时测量的降雨率或ITU-R P.837建议书所述世界降雨率地图测量的总衰减统计数据进行比较时, 0.001%至5%概率范围内的平均r.m.s.相对误差约为33%。由于在各种概率上各种效应的不同作用, 以及各种概率水平上测试数据可得性的差异, 整个概率分布上总体均方根 (r.m.s.) 误差会发生一些变化。

2.6 沙尘暴衰减

在倾斜路径上沙尘暴对无线电波信号的影响现在还所知甚少。现有数据表明在30 GHz以下的频率, 需要高粉尘浓度和/或高水分含量来达到重大的传播效应。

3 噪声温度

噪声温度随衰减的增加而增加。对于装备低噪声前端的地球站, 噪声温度的增加对由此产生的信噪比的影响可能比衰减自身要更大。

地面站天线处的天空噪声温度可用以下等式预测:

$$T_{sky} = T_{mr} (1 - 10^{-A/10}) + 2.7 \times 10^{-A/10} \quad \text{K} \quad (69)$$

其中:

T_{sky} 地面站天线处的天空噪声温度 (K)

A : 总大气衰减 (不包括闪烁衰落) (dB)

T_{mr} : 大气平均辐射温度 (K)。

当表面温度 T_s (K)已知时, 可利用以下方法估算晴天和多云天气情况下的平均辐射温度 T_{mr} :

$$T_{mr} = 37.34 + 0.81 \times T_s \quad \text{K} \quad (70)$$

如缺少当地数据, 大气平均辐射温度 T_{mr} (275 K)可用于晴天和雨天的情况。

ITU-R P.372建议书对地球表面和空间台站的噪声环境进行了详细介绍。

对于使用静止卫星轨道的卫星通信系统, 地球站将会发现在所有频率上太阳或月球是重要的噪声来源, 月球的噪声要低些; 对于2 GHz以下的频率, 银河背景噪声可能是一个重要的考虑系数 (参见ITU-R P.372建议书)。此外, 天鹅座A和X、仙后座A、金牛座和蟹状星云也可能影响到天空背景噪声温度。

从上述讨论的亮温来判定地球站系统噪声温度时, 可参考ITU-R P.372建议书。

4 交叉极化效应

通过正交极化来进行频率复用是增加空间通信系统容量经常采用的方法。当然，这种技术也受大气传播路径去极的限制。各种去极机制，特别是水汽凝结效应在大气中是重要的。

ITU-R P.531建议书讨论了电离层极化面的法拉第旋转。在10 GHz，可能会遇到多达1°的旋转，在更低的频率，旋转更大。从地球站来看，极化面在上下行围绕着同一方向旋转。因此，如果发送和接收使用同一副天线，无法通过旋转天馈系统来补偿法拉第旋转。

4.1 因水汽凝结导致的交叉极化的长期统计数据的计算

通过雨衰统计数据计算长期的去极统计数据，需要以下参数：

- A_p : 在被研究的路径上，在需要的时间百分比 p 内超出的雨衰(dB)，通常称为同极化衰减(CPA)
- τ : 电场矢量线极化相对于水平面的倾斜角（对于圆极化， $\tau = 45^\circ$ ）
- f : 频率(GHz)
- θ : 路径仰角（度）。

下述从雨衰统计数据计算同一路径交叉极化鉴别(XPD)统计数据只适用于 $6 \leq f \leq 55$ GHz且 $\theta \leq 60^\circ$ 的情况。将频率变换低至4 GHz的程序见第4.3段（见以下第8步）。

第1步：计算频率相关项：

$$C_f = \begin{cases} 60 \log f - 28.3 & 6 \leq f < 9 \text{ GHz} \\ 26 \log f + 4.1 & 9 \leq f < 36 \text{ GHz} \\ 35.9 \log f - 11.3 & 36 \leq f \leq 55 \text{ GHz} \end{cases} \quad (71)$$

第2步：计算雨衰相关项：

$$C_A = V(f) \log A_p \quad (72)$$

其中：

$$V(f) = \begin{cases} 30.8 f^{-0.21} & 6 \leq f < 9 \text{ GHz} \\ 12.8 f^{0.19} & 9 \leq f < 20 \text{ GHz} \\ 22.6 & 20 \leq f < 40 \text{ GHz} \\ 13.0 f^{0.15} & 40 \leq f \leq 55 \text{ GHz} \end{cases}$$

第3步：计算极化改善系数：

$$C_\tau = -10 \log [1 - 0.484 (1 + \cos 4\tau)] \quad (73)$$

如果 $\tau = 45^\circ$ ，改善系数 $C_\tau = 0$ ；如果 $\tau = 0^\circ$ 或 90° ， C_τ 值最大，为15 dB。

第4步：计算仰角相关项：

$$C_\theta = -40 \log (\cos \theta) \quad \text{对于 } \theta \leq 60^\circ \quad (74)$$

第5步：计算伪角相关项：

$$C_\sigma = 0.0053 \sigma^2 \quad (75)$$

σ 是雨滴伪角分布的有效标准偏差，用度数表示；在时间的1%、0.1%、0.01%和0.001%内分别取值为 0° 、 5° 、 10° 和 15° 。

第6步：计算 $p\%$ 时间内未超出的降雨XPD：

$$XPD_{rain} = C_f - C_A + C_\tau + C_\theta + C_\sigma \quad \text{dB} \quad (76)$$

第7步：计算冰晶相关项：

$$C_{ice} = XPD_{rain} \times (0.3 + 0.1 \log p)/2 \quad \text{dB} \quad (77)$$

第8步：计算考虑结冰系数后， $p\%$ 时间内未超出的降雨XPD：

$$XPD_p = XPD_{rain} - C_{ice} \quad \text{dB} \quad (78)$$

本预测方法中，在4至6 GHz频段内，路径衰减较低， A_p 统计数据在预测XPD统计数据方面用处不大。对于6 GHz以下的频率，可采用第4.3段中的频率变标公式将在6 GHz计算的交叉极化统计数据变标为6-4 GHz频段的数据。

4.2 XPD联合统计数据和衰减

XPD特定值为 A_p 时的条件概率分布可假设交叉极化到同极化的电压比 $r = 10^{-XPD/20}$ 呈正态分布并以此建模。分布的参数为平均值 r_m ，该值十分接近 $10^{-XPD_{rain}/20}$ ，其中 XPD_{rain} 由等式(76)给定，标准偏差 σ_r 在 $3 \text{ dB} \leq A_p \leq 8 \text{ dB}$ 时假设为几乎为常量值0.038。

4.3 由水汽凝结导致的交叉极化的长期频率和极化统计数据变标

在一个频率和极化倾斜角上获得的长期XPD统计数据可利用以下半经验式的公式变标为另一个频率或极化倾斜角：

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log \left[\frac{f_2 \sqrt{1 - 0.484 (1 + \cos 4 \tau_2)}}{f_1 \sqrt{1 - 0.484 (1 + \cos 4 \tau_1)}} \right] \quad \text{对于 } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \quad (79)$$

其中 XPD_1 和 XPD_2 是分别在 f_1 和 f_2 频率以及 τ_1 和 τ_2 极化倾斜角时，相同时间百分比内未超过的XPD值。

等式(79)基于与第4.1段中预测方法相同的理论公式，可用于包括降雨和结冰两种去极效应的XPD数据变标，因为观测结果表明两种现象在约30 GHz以下的频率依赖性几乎是相同的。

4.4 与交叉极化消除有关的数据

实验表明在地-空路径上6和4 GHz频率上的降雨去极（既包括长期，也包括单个事件）有很大的相互关联性，因此使用同时发生的下行去极测量去补偿上行去极似乎是可行的。即使在严重降雨事件中，只有微分相位效应是明显的，在6和4 GHz频率上，单个参数补偿（也就是针对微分相位）看起来足够了。

在6和4 GHz频率上的测量结果同时也表明99%的XPD变化小于 $\pm 4 \text{ dB/秒}$ ，或者换算成平均路径微分相移，低于 $\pm 1.5^\circ/\text{秒}$ 。因此，一个去极补偿系统在这些频率的时间常数只需要大约1秒。

5 传播时延

ITU-R P.834建议书给出了基于无线电气象业务，用来估计穿越对流层的地-空路径平均的传播延时或距离误差及其对应变化的方法。数字卫星通信系统的卫星测距和同步需要这种延时变化。在10 GHz以上的频率，电离层时延（参见ITU-R P.531建议书）通常小于对流层，但在个别情况下也需要考虑。

测距精度达到厘米级需要仔细考虑导致过度测距延时的各种系数。一条顶点路径且参考大气的表面水蒸气浓度为 7.5 g/m^3 ，均质大气高度达2公里的水蒸气成分可达10厘米（参见ITU-R P.676建议书）。尽管干燥的大气增加了2.3米额外的天顶距离延迟，水蒸气成分是导致不确定性的最大系数。

对于现在的卫星通信应用，降水导致的额外传播延时已小到足可以忽略不计。

6 带宽限制

大气吸收线的附近，反常色散在折射率中引起了细小的变化。但是，这些折射率的变化在划分给地-空通信的频段附近很小，不会限制系统的带宽。

由于多次散射信号的时延变化，降雨中的多次散射能限制不连贯传输系统的带宽；但是，这种情况下衰减自身产生的问题更为严重。一个关于带宽限制问题的研究表明这样的带宽限制在所有可能的情况下都超过3.5 GHz，上述带宽限制是由衰减频率依赖性和连续传输系统遇到降雨造成的相位移动引发的。该数值大于任何一个40 GHz以下、划分给地-空通信的带宽，因此雨衰远比其频率依赖性更为重要。

7 到达角

ITU-R P.834建议书给出了折射引起的仰角误差。对于一个热带海上大气，整个的角度折射（视在仰角的增加）在 1° 、 3° 和 5° 时分别是 0.65° 、 0.35° 和 0.25° 。对于极地大陆气候，其对应的数值是 0.44° 、 0.25° 和 0.17° 。其它气候的数值在这两者之间。日常的视在仰角变化在 1° 仰角时可达 0.1° (r.m.s.)，但仰角增加时变化下降很快。

ITU-R P.834建议书讨论了短期的到达角波动。折射高度变化导致的短期波动，每 1° 仰角可以达到 0.02° (r.m.s.)，但同样在仰角增加时变化下降很快。实际上，很难在折射高度分布短期变化的效应与该分布上添加的任意不规则效应两者之间进行区别。在19.5 GHz上，仰角为 48° 的到达角短期波动统计分析表明，在仰角和方位角方向，1%累积时间百分比内，到达角的标准偏差波动都在 0.002° 左右。到达角波动的季节性变化表明波动在夏季增大，在冬季减小。每日的变化表明波动在白天增大，在早晨和夜晚减小。

8 非静止路径长期统计数据的计算

上述的方法是从仰角不变的应用中推导出来的。对于非静止卫星系统，其仰角是变化的，对于一个单个卫星的链路可用性可用以下方法计算：

- a) 计算系统操作中最大和最小仰角；
- b) 将仰角的操作范围分成小的增量（例如5度间隔）；

- c) 在每一个增量中计算作为仰角的函数，卫星可见的时间百分比；
- d) 对于一个给定的传播损耗电平，求出每一个仰角增量中电平被超出的时间百分比；
- e) 对于每一个仰角增量，将c)和d)的结果相乘并除以100，即为在这个仰角损耗电平被超出的时间百分比；
- f) 将e)中获得的时间百分比数值相加，即可得到整个系统损耗电平被超出的时间百分比。

对于采用卫星路径分集技术（即切换到最小损耗的路径）的多重可视性星座，可通过假设选择仰角最高的航天器来进行大概的计算。
