

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R P.618-10 建议书
(10/2009)

**设计地球-空间电信系统所需的
传播数据和预测方法**

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.618-10建议书

设计地球 – 空间电信系统所需的传播数据和预测方法

(ITU-R第206/3号课题)

(1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2009年)

范围

本建议书对规划地对空和空对地方向地球 – 空间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 – 空间系统过程中所需的最重要传播参数得以实现；
- c) 这些方法已尽可能比照现有数据进行了测试，并显示出既与传播现象的自然变化相兼容且足够满足绝大部分现有系统规划应用需要的精确性，

建议

1 应采用附件1中确定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 – 空间无线电通信系统进行规划。

注 1 – 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

1 介绍

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失；
- 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延迟的散射
- l) 额外的时间延迟；
- 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因素。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 rotations	4.8 rotations	1.2 rotations	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失直接有关。

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 传播损失

相对于自由空间的传播损失，在地球-空间路径上的传播损失，主要由以下因素导致：

- 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，每一个影响因素都有其自身特性。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

§ 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。

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§ 2.2.1.2段。

可以利用§ 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(degrees)

φ : 地球站的纬度(degrees)

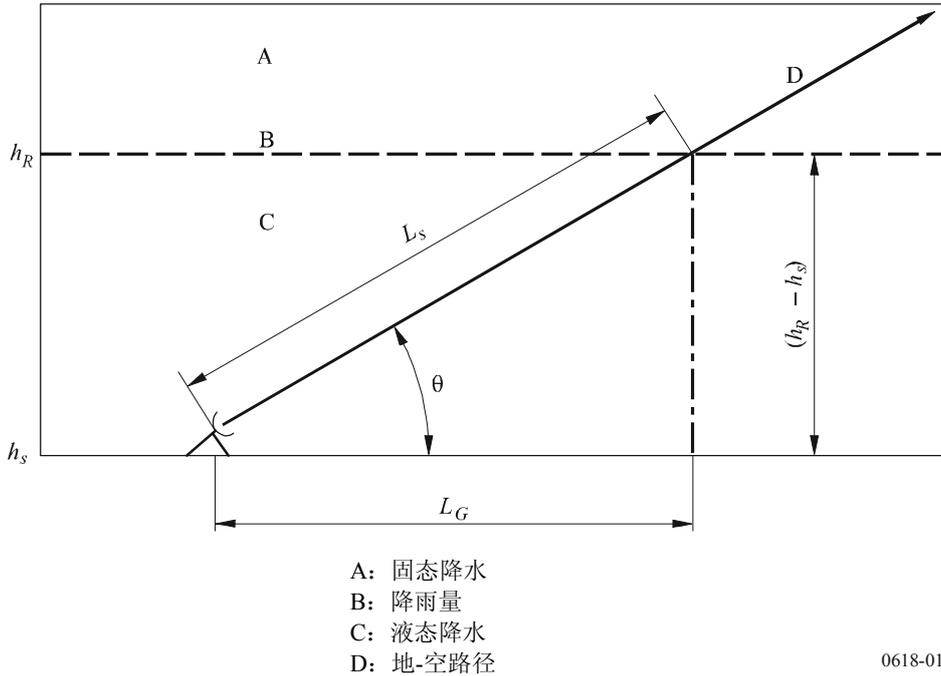
f : 频率(GHz)

R_e : 地球的有效半径(8 500 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



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 $v_{0.01}$ ：

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

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 $|\varphi| < 36^\circ$,

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

否则,

$$\chi = 0 \quad \text{degrees}$$

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

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 $p \geq 1\%$ or $|\varphi| \geq 36^\circ$ ：

$$\beta = 0$$

如果 $p < 1\%$ and $|\varphi| < 36^\circ$ and $\theta \geq 25^\circ$ ：

$$\beta = -0.005(|\varphi| - 36)$$

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 长期雨衰统计数据的频率与极化变标

可采用§ 2.2.1.1段中的方法研究衰减统计数据与仰角、极化和频率的相互关系，因此，该方法是按照这些参数将衰减进行变标的有用常规工具。

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。

$$A_2 = A_1(\varphi_2 / \varphi_1)^{1-H(\varphi_1, \varphi_2, A_1)} \quad (9)$$

其中：

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

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

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。

当可行时，最好采用基于可靠衰减数据的频率变标，而不采用基于降雨数据的预测方法。

当需要进行极化变标时，最好直接使用ITU-R P.838建议书中的参数 k 和 α 。这些参数也为频率变标提供了无线电气象基础。

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§ 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§ 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：

- 2.2.4.1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
- 2.2.4.2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。

2.2.4.1所述计算方法最为精确，宜应首先采用此种方法。2.2.4.2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：

$$P_r(A_1 \geq a_1, A_2 \geq a_2) = 100 \times P_r \times P_a \% \quad (11)$$

这些概率如下：

$$P_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_r^2}} \int_{R_1}^{\infty} \int_{R_2}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{r_1^2 - 2\rho_r r_1 r_2 + r_2^2}{2(1-\rho_r^2)}\right)\right] dr_1 dr_2 \quad (12)$$

式中：

$$\rho_r = 0.7 \exp(-d/60) + 0.3 \exp[-(d/700)^2] \quad (13)$$

且

$$P_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_a^2}} \int_{\frac{\ln a_1 - m_{\ln A_1}}{\sigma_{\ln A_1}}}^{\infty} \int_{\frac{\ln a_2 - m_{\ln A_2}}{\sigma_{\ln A_2}}}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{a_1^2 - 2\rho_a a_1 a_2 + a_2^2}{2(1-\rho_a^2)}\right)\right] da_1 da_2 \quad (14)$$

式中：

$$\rho_a = 0.94 \exp(-d/30) + 0.06 \exp[-(d/500)^2] \quad (15)$$

并且 P_a 和 P_r 为互补二元正态分布。

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：

$$P_k^{rain} = 100 \times Q(R_k) = 100 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{R_k}^{\infty} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) dr \quad (16)$$

即：

$$R_k = Q^{-1}\left(\frac{P_k^{rain}}{100}\right) \quad (17)$$

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：

$$P_i = P_k^{rain} Q\left(\frac{\ln A_i - m_{\ln A_i}}{\sigma_{\ln A_i}}\right) \quad (18)$$

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2.2.1.1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 $P_i \leq P_k^{rain}$ 。

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

其中：

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

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。

ITU-R网站有关无线电通信第3研究组的部分提供了此MATLAB预测方法的实施案例，并引用了互补二元正态分布的近似值。

2.2.4.2 分集增益

尽管最佳方式是采用2.2.4.1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：

$$G_d = a (1 - e^{-bd}) \quad (19)$$

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：

$$G_f = e^{-0.025 f} \quad (20)$$

第3步：利用下式计算仰角相关的增益项：

$$G_\theta = 1 + 0.006 \theta \quad (21)$$

第4步：利用下式计算基线相关项：

$$G_\psi = 1 + 0.002 \psi \quad (22)$$

第5步：计算下列乘积，作为净分集增益：

$$G = G_d \cdot G_f \cdot G_\theta \cdot G_\psi \quad \text{dB} \quad (23)$$

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§ 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 波束扩展损失

折射率随着高度有规则地减少导致射线弯曲并形成低仰角时的散焦效应（ITU-R P.834建议书）。天线波束散焦损耗的幅度与1-100 GHz范围内的频率有关。

当仰角大于5度且纬度小于53度和纬度更高且仰角大于6度时，常规折射条件下波束扩展引起的损耗可以忽略。

在所有纬度，当仰角小于5度时，年均的波束扩展损失可用下式估计：

$$A_{bs} = 2.27 - 1.16 \log(1 + \theta_0) \quad \text{dB} \quad \text{如果 } A_{bs} > 0 \quad (24)$$

其中 θ_0 是考虑折射效应的视在仰角(mrad)。在纬度小于53度的地区，最坏月份的平均波束扩展损失也在等式(24)中给予了预测。

在纬度大于60度的地区，仰角小于6度时，最坏月份的平均波束扩展损失可用下式估计：

$$A_{bs} = 13 - 6.4 \log(1 + \theta_0) \quad \text{dB} \quad \text{如果 } A_{bs} > 0 \quad (25)$$

在纬度介于53°-60°之间的 ψ 度时，可将等式(24)（指定的 $A_{bs}(< 53^\circ)$ ）和25等式（指定的 $A_{bs}(> 60^\circ)$ ）获得的值用以下线性内插法预测波束扩展损失中值：

$$A_{bs} = A_{bs}(> 60^\circ) - \frac{60}{7} \Delta A_{bs} + \frac{1}{7} \Delta A_{bs} \psi \quad \text{dB} \quad (26)$$

其中 $\Delta A_{bs} = A_{bs}(> 60^\circ) - A_{bs}(< 53^\circ)$ 。

2.4 闪烁和多路径损耗

对流层闪烁的幅度取决于折射率变化的幅度和结构，随着频率和穿过介质的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。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。 N_{wet} 可以预测一个月的期间，也可以利用地表气象数据进行更长时间的预测。

在很小的时间比例内，或者反过来说，在很大的衰减深度内（大于约10度），在很低仰角（ $\leq 4^\circ$ 和对于水上或沿海地区链路来说 $\leq 5^\circ$ ）观测到的衰减比考虑闪烁因素后预测的结果要严重。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/decade（频率增加10倍或减少10倍为1个decade））逐步过渡的状态。§ 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。

对于4°–5°之间的水上和沿海路径，§ 2.4.2和2.4.3段的方法应与§ 2.4.1段的方法一起使用，路径衰减统计数据预测应采用上述给出结果中最大的衰减深度值。

由对流层折射效应导致的净衰减分布 $A_{ref}(p)$ 是上述波束扩展、闪烁和多路径衰减效应联合作用的结果。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4°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4°时预测对流层闪烁累积分布的一般方法。该方法基于每月和长期的平均温度 t (°C)以及相对湿度 H ，反映了站点的特定气候条件。因为 t 和 H 的平均值随着季节而变化，闪烁衰减深度分布也呈现出季节性的变化，这也可以通过使用该方法中 t 和 H 的季节性平均值来进行预测。 t 和 H 的取值可由该被研究站点的气候信息中获得。

该程序已在7至14 GHz的频率范围内测试过，但也建议适用于上至至少20 GHz的应用。

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 $4 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz}$

θ : 路径仰角，其中 $\theta \geq 4^\circ$

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。

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。（如果直接从ITU-R P.453建议书中获取 N_{wet} ，则不需要进行第1和第2步）

第3步： 利用下式计算作为参考的信号幅值的标准偏差 σ_{ref} ：

$$\sigma_{ref} = 3.6 \times 10^{-3} + 10^{-4} \times N_{wet} \quad \text{dB} \quad (27)$$

第4步： 根据下式计算有效路径长度 L ：

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2 \theta + 2.35 \times 10^{-4} + \sin \theta}} \quad \text{m} \quad (28)$$

其中 h_L 是近地面扰动层的高度，应采用 $h_L = 1000$ m的值。

第5步： 根据几何直径 D 和天线效率 η ，利用下式估计有效天线直径：

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} D \quad \text{m} \quad (29)$$

第6步： 利用下式计算天线平均系数：

$$g(x) = \sqrt{3.86 (x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin \left[\frac{11}{6} \arctan \frac{1}{x} \right] - 7.08 x^{5/6}} \quad (30)$$

且：

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

其中 f 是载波频率(GHz)。

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： 计算被考虑的期间内和路径上信号的标准偏差：

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1.2}} \quad (31)$$

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因子 $a(p)$ ：

$$a(p) = -0.061 (\log_{10} p)^3 + 0.072 (\log_{10} p)^2 - 1.71 \log_{10} p + 3.0 \quad (32)$$

第9步： 利用下式计算时间百分比 p 内的闪烁衰减深度：

$$A_s(p) = a(p) \cdot \sigma \quad \text{dB} \quad (33)$$

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

本方法预测年均或平均最坏月份（年均的预测结果由平均最坏月份的取值推出）中 A_{ref} 由波束扩展、闪烁和多路径衰减分布组合形成的大衰减深度范围（通常大于25 dB左右的衰

减)。该方法同时也作为§ 2.4.3段中插值程序的基础，插值程序被用来预测分布的弱衰减范围。逐步计算的程序见下：

第1步： 获得（考虑折射效应）被研究路径位置的视在准线仰角 θ_0 (mrad)（参见ITU-R P.834建议书）。

第2步： 对于被研究的路径位置，利用下式获得适用于平均最坏月份的地面因子 K_w ：

$$K_w = p_L^{1.5} 10^{0.1(C_0 + C_{Lat})} \quad (34)$$

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-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（34号）等式中系数 C_0 的取值和其适用条件。纬度 ψ 的系数 C_{Lat} 由以下决定：

$$C_{Lat} = 0 \quad \text{如果} \quad 53^\circ \text{ S} \geq \psi \leq 53^\circ \text{ N} \quad (35)$$

$$C_{Lat} = -53 + \psi \quad \text{如果} \quad 53^\circ \text{ N或S} < \psi < 60^\circ \text{ N或S} \quad (36)$$

$$C_{Lat} = 7 \quad \text{如果} \quad \psi \geq 60^\circ \text{ N或S} \quad (37)$$

表3

34号等式中系数 C_0 在不同传播路径上的取值

路径类型	C_0
传播路径 ⁽¹⁾ 完全在陆上且其地球站天线高度在平均海平面700米以下 ⁽²⁾	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⁾ 传播路径指地-空路径上的最低部分，据信相关对流层衰减机制在此产生效应。传播路径的大概长度由以下等式决定：

$$d_{eff} = 14000(1 + \theta_0)^{-1.3} \quad \text{km} \quad d_{eff} \leq 300 \text{ km} \quad (38)$$

其中 θ_0 是准线仰角 (mrad)。

如果路径剖面的一个截面（也就是地面海拔高度在路径上等于等式（38）给定距离的剖面）低于平均海平面（或大块内陆水体平均水面）100米或位于海岸线50公里以内，且在传播路径和海岸之间没有高度大于100米以上的陆地，则认为该路径经过海岸地区。

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。

⁽²⁾ 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： 利用以下幂函数公式计算衰减深度 A_{ref} (dB)在平均最坏月份被超出的时间百分比：

$$p = K_w f^{0.9} (1 + \theta_0)^{-5.5} \times 10^{-A_{ref}/10} \quad \% \quad (39)$$

或者，利用下式计算频率 f 时在平均最坏月份 $p\%$ 的时间内的衰减深度 A_{ref} ：

$$A_{ref} = G_w + 92 + 9 \log f - 55 \log (1 + \theta_0) - 10 \log p \quad \text{dB} \quad (40)$$

其中 G_w 为平均最坏月份的对数地面因子，由以下公式决定：

$$G_w = 10 \log K_w - 92 \quad \text{dB} \quad (41)$$

第4步： 从等式(39)，将 K_w 替换为 K_a ，由下式计算年均衰减深度 A_{ref} (dB)被超出的时间百分比：

$$K_a = K_w \times 10^{-0.1 \Delta G} \quad (42)$$

且：

$$\Delta G = -1.8 - 5.6 \log \left(1.1 \pm |\cos 2\psi|^{0.7} \right) + 4.5 \log (1 + \theta_0) \quad \text{dB} \quad (43)$$

在等式(43)中，当 $\psi \leq 45^\circ$ (°N or °S)时，应选择“+”号，当 $\psi > 45^\circ$ 时，应选择“-”号。或者，在等式(40)中，将 G_w 替换为 $G_a = G_w - \Delta G$ ，计算频率 f 时在 $p\%$ 的时间内被超出的年均衰减深度 A_{ref} (dB)。

等式(39)和(40)适用于 A_{ref} 大于25 dB左右的情形。它们是根据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

第1步： 根据需要，利用下式预测平均最坏月份或年均超过63%的衰减深度 A_{ref} (63%) (表示为 A_{63})：在纬度大于 60° 时在平均的最坏月份，依照如下公式：

$$A_{63} = 9.4 - 4.5 \log (1 + \theta_0) \quad \text{dB} \quad \text{如果 } A_{bs} > 0 \quad (44)$$

其中 θ_0 是准线仰角(mrad)。如果纬度小于 53° ，使用表达式(18)。如果纬度介于 53° 和 60° 之间，根据等式(20)进行线性内插。对于年均计算，在所有纬度使用等式(18)。

第2步： 对于平均最坏季节的预测，利用等式(39)计算在多路径分布的尾部衰减深度超过 $A_t = 25$ dB的时间百分比 p_t 。对于年均预测，将等式(39)中的 K_w 替换为等式(40)中的 K_a 进行计算。

第3步： 根据以下计算新的时间百分比 p ：

$$p = 10^{-0.1 A_{63} + \log p_t} \quad \% \quad (45)$$

第4步： 根据以下计算与衰减深度 A_t 以及时间百分比 p 对应的参数 q' ：

$$q' = -\frac{20}{A_t} \log_{10} \left[-\ln \left(\frac{100-p}{100} \right) \right] \quad (46)$$

第5步： 根据以下计算波形因数 q_t ：

$$q_t = (q' - 2) / \left[\left(1 + 0.3 \times 10^{-A_t/20} \right) \times 10^{-0.016 A_t} \right] - s_0 \left(10^{-A_t/20} + A_t/800 \right) \quad (47)$$

其中：

$$s_0 = -1.6 - 3.2 \log f + 4.2 \log (1 + \theta_0) \quad (48)$$

且：

f ： 频率(GHz)

θ_0 ： 视在仰角(mrad)。

第6步： 如果 $q_t < 0$ ， 以 $A_t = 35$ dB重复第2-5步， 以获得 q_t 的确定值。

第7步： 如果 $A_{63} < A_{ref}(p) < 25 + A_{63}$ dB或 $A_{63} < A_{ref}(p) < 35 + A_{63}$ dB， 根据 A_t 取值要求的不同， 利用下式计算 A_{ref} 被超过得时间百分比 p ：

$$p = 100 \left[1 - \exp \left(-10^{-q(A_{ref} - A_{63})/20} \right) \right] \% \quad (49)$$

其中 q 也是 A_{ref} 的函数且由以下决定：

$$q = 2 + 10^{-0.016(A_{ref} - A_{63})} \left[1 + 0.3 \times 10^{-(A_{ref} - A_{63})/20} \right] \cdot \left[q_t + s_0 \left(10^{-(A_{ref} - A_{63})/20} + (A_{ref} - A_{63})/800 \right) \right] \quad (50)$$

此处参数 q_t 的值是由第5或适当时， 第6步获得的值。

如果 $A_{ref} \geq 25 + A_{63}$ dB 或 $A_{ref} \geq 35 + A_{63}$ dB， 根据 A_t 取值要求的不同， 利用等式(39)计算 A_{ref} 被超过得时间百分比 p 。对于年均预测， 将等式(39)中的 K_w 替换为等式(40)中的 K_a 进行计算。

第8步： 如果 $A_{ref}(p) < A_{ref}(63\%)$ ， 对于分布的增强范围， 相对于 $A_{ref}(63\%)$ 的增强可表示为：

$$E_{ref}(p_e) = A_{ref}(63\%) - A_{ref}(p) \quad \text{dB} \quad (51)$$

这个超过时间百分比 p_e （但不超过时间 $p = 100 - p_e\%$ ）的增强， 可用ITU-R P.530建议书 § 2.3.3 段的方法大概估计：

- 采用这种方法计算平均最坏月份时， 应将地面业务链路的等式替换为等式(40)获得平均最坏月份超过0.01%的衰减深度 $A_{0.01}$ 的取值。
- 采用这种方法计算年均时， 应采用等式(40)并将 G_w 替换为 G_a ， G_a 由等式(40)之后的第4步获得。

应注意到当 $p_e = 10\%$ 时， 该方法可能低估相对浓缩幅度高达78%； 当 $p_e = 1\%$ 时， 低估相对浓缩幅度可达47%。当 $p_e < 0.1\%$ ， 即人们最为关注的情况时， 精确度较为令人满意。

第1步至第7步的方法适用于 q_t 大于-1.5的情况，这几乎涵盖了在操作环境下 K 、 f 和 θ_0 几乎可能出现的各种组合。对于 q_t 小于-1.5的情况，不建议采用这种方法。该方法隐含地包括了第§ 2.3.2段讨论的波束扩展损失。

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(33)进行评估

其中 p 是在50%至0.001%范围内，衰减超过的概率。

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§ 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(52)中使用。

计算给定概率的总体衰减的一般方法如下：

$$A_T(p) = A_G(p) + \sqrt{(A_R(p) + A_C(p))^2 + A_S^2(p)} \quad (52)$$

其中：

$$A_C(p) = A_C(1\%) \quad \text{for } p < 1.0\% \quad (53)$$

$$A_G(p) = A_G(1\%) \quad \text{for } p < 1.0\% \quad (54)$$

等式(53)和(54)考虑了很大一部分云衰减和气体衰减已包括在时间百分比1%以下的雨衰预测中这一事实。

上述完整的预测方法通过ITU-R P.311建议书附件1给定的程序进行了测试，结果表明很好地与所有纬度地区0.001%-1%概率范围内的现有测量数据相匹配。当使用ITU-R P.837建议书的降雨等值线图时，总体均方根 (r.m.s.) 误差大约是35%。当与多年的地-空数据进行对比时，总体均方根 (r.m.s.) 误差是25%左右。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。

大气对地面站天线噪声的影响可用以下等式预测：

$$T_s = T_m (1 - 10^{-A/10}) \quad (55)$$

其中：

T_s : 天线看到的天空噪声温度(K)

A : 路径衰减(dB)

T_m : 介质的有效温度(K)

有效温度取决于散射对衰减的影响程度，云和雨团在散射体物理温度的铅锤变化的物理范围以及天线波束宽度，后者的关联性较小。通过比较辐射观测和同时信标衰减测量的结果，在10-30 GHz频率之间，路径上云和雨的介质有效温度被判定在260-280 K之间。

当衰减可知时，可使用以下介质的有效温度来获得60 GHz以下频率天空噪声温度的上限：

对于云， $T_m = 280$ K

对于雨， $T_m = 260$ K

地球表面和空间台站的温度环境在ITU-R P.372建议书中详细介绍。

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因素（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的系统噪声温度，可采用ITU-R P.372建议书的等式。

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(degrees)。

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§ 4.3段（见以下第8步）。

第1步： 计算频率相关项：

$$C_f = \begin{cases} 60 \log f - 28.3 & 6 \leq f < 9 \text{ GHz} \\ 26 \log f + 4.1 & 9 \leq f < 36 \text{ GHz} \\ 35.9 \log f - 11.3 & 36 \leq f \leq 55 \text{ GHz} \end{cases} \quad (56)$$

第2步： 计算雨衰相关项：

$$C_A = V(f) \log A_p \quad (57)$$

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： 计算极化改善因子：

$$C_\tau = -10 \log [1 - 0.484 (1 + \cos 4\tau)] \quad (58)$$

如果 $\tau = 45^\circ$ ，改善因子 $C_\tau = 0$ ；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：

$$C_\theta = -40 \log (\cos \theta) \quad \text{for } \theta \leq 60^\circ \quad (59)$$

第5步： 计算伪角相关项：

$$C_\sigma = 0.0053 \sigma^2 \quad (60)$$

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：

$$XPD_{rain} = C_f - C_A + C_\tau + C_\theta + C_\sigma \quad \text{dB} \quad (61)$$

第7步： 计算冰晶相关项：

$$C_{ice} = XPD_{rain} \times (0.3 + 0.1 \log p)/2 \quad \text{dB} \quad (62)$$

第8步： 计算考虑结冰因素后， $p\%$ 时间内未超出的降雨XPD：

$$XPD_p = XPD_{rain} - C_{ice} \quad \text{dB} \quad (63)$$

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§ 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(61)给定，标准偏差 σ_r 在3 dB $\leq A_p \leq$ 8 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：

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log \left[\frac{f_2 \sqrt{1 - 0.484 (1 + \cos 4 \tau_2)}}{f_1 \sqrt{1 - 0.484 (1 + \cos 4 \tau_1)}} \right] \quad \text{如果 } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \quad (64)$$

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(64)基于与§ 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 ± 4 dB/秒，或者换算成平均路径微分相移，低于 $\pm 1.5^\circ$ /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因素。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因素。

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，因此雨衰远比其他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°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。
