

ITU-R P.1814 建议书*

设计地面自由空间光链路所需的预测方法

(ITU-R 228/3号研究课题)

(2007年)

范围

本新的建议书提供了用于规划地面自由空间光系统的传播预测方法。它包括用于估计晴天、雾天、雨天和雪中衰减的方法。它还涉及因阳光而引起的闪烁和不利影响。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 在地球上，可见光和红外光谱可用于无线电通信；
- b) 为正确规划工作于可见光和红外光谱的自由空间光（FSO）无线电通信系统，需要具备适当的传播数据；
- c) 已开发了一些方法，以便计算在规划工作于可见光和红外光谱的自由空间光系统时所需的、最重要的传播参数；
- d) 已尽可能利用可用的数据对这些方法进行了测试，结果表明，这些方法完全兼容传播现象的自然可变性，以及完全可用于规划工作于可见光和红外光谱的系统。

认识到

- a) 国际电联《组织法》第 12 款第 78 条规定，无线电通信部门的功能之一是“.....不受频率范围和所用建议书的限制，开展各项研究工作.....”，

建议

1 应采用附件 1 中所提供的传播参数预测方法，分别在本附件中所指明的有效范围内规划自由空间光（FSO）系统。

注1 – 对可见光和红外光谱中频率的传播预测方法，有一些相关的增补信息，这些信息可以在有关设计地面自由空间光链路所需之预测方法的ITU-R P.1817建议书中找到。

* 应提请无线电通信第1研究组和第9研究组注意本建议书。

附件1

1 引言

在设计 FOS 链路时，必须考虑到若干影响因素，包括因大气吸收而引起的损耗、散射和湍流、小气候环境和局部影响、链路距离和链路未对准。还必须考虑到波长的选择、数据率、眼睛安全问题和周围的太阳辐射等。

FSO 系统的运营要求在视距 (LOS) 内。当测试视距时，由于 FSO 系统使用波束扩展和经校准的波束，因此波束中心与任何障碍物之间所需的空隙实际上等于波束半径。这与 RF 系统形成对比，后者需要菲涅耳区空隙。

FOS 系统的主要缺点是它们容易受到大气的影 响，如衰减和闪烁的影响，这些影响会降低链路的可用性。窄的波束还使激光通信终端的布局要求比 RF 系统的布局要求更严格。

设计 FOS 链路时的一个关键参数是功率预算因素。链路余量 M_{link} (dB) 是指超出接收机灵敏度的可用功率，可以通过公式 (1) 计算得到：

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{geo} - A_{atmo} - A_{scintillation} - A_{system} \quad (1)$$

其中：

P_e (dBm)：发射机总的功率；

S_r (dBm)：接收机的灵敏度，它取决于带宽（数据率）；

A_{geo} (dB)：因发射波束随距离增大而扩展所引起的链路几何衰减；

A_{atmo} (dB)：因吸收和散射而引起的大气衰减；

$A_{scintillation}$ (dB)：因大气湍流而引起的衰减；

A_{system} (dB)：代表所有其他与系统有关的损耗，包括因未对准波束方向而引起的损耗、接收机光损耗、因波束漂移而引起的损耗、因周围光线而引起的灵敏度降低（阳光辐射）等。

在下面各节中给出这些项的定义和计算，以及对规划一条 FSO 链路所做的最初考虑。

2 设计FSO链路时最初的考虑因素

选择合适的链路位置是事关 FSO 系统能否成功运行的一个重要问题。FSO 链路的安装必须考虑到路径沿途的主要气候条件、物理障碍、表面类型以及收发器的安装情况，以确保链路的最佳性能。

2.1 天气

- 选定链路路径附近的气候条件，尤其是当地的气候，将影响雪、雨、毛毛雨、霾、气溶胶和灰尘/沙粒的出现，而这些因素将造成所发射信号的吸收与散射。

2.2 路径特性

- 必须明确避免发射机与接收机之间路径的物理障碍。非常值得注意的是，成年树木在一年内可以长高 0.5~1 米，并且一年内其树叶密度也会发生变化。
- 建筑物之间的链路应考虑到热气通风口，它会造成整个链路路径上热空气的上升，并且因此而产生的湍流会导致接收机上明显的闪烁效应。
- FSO 视距路径之下的地形和表面类型可对链路性能产生巨大的影响。跨越山谷或开放海域的 FSO 链路常常会受到雾的影响。链路之下的建筑物结构可能引起其上空气额外的热活动，并因此而可能导致接收信号上更强的闪烁效应。

2.3 收发器安装

- 大多数 FSO 系统的波束宽度都非常窄，结果是，准确安装发射机与接收机变得至关重要；任何不当的安装都有可能引起巨大的信号损耗。望远镜的座架必须稳固，应直接安装于坚固的墙上，或安装于单根柱子的顶部，对一段时间内可靠的性能而言，这些都被认为是必不可少的条件。应尽可能减小因不均匀热膨胀而引起的移动或因风而引起的振动。

3 几何衰减

即使在晴朗的天气条件下，波束也会分岔，结果是，检测设备收到的信号功率变小了。因发射波束随距离增大而扩展所引起的衰减称为几何衰减，通过以下公式来计算：

$$A_{geo} (dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{S_d}{S_{capture}} \right) \quad (2)$$

其中：

$S_{capture}$ ：接收机捕捉表面积 (m^2)；

S_d ：距离 d 处发射波束表面积，它通过以下公式来近似计算：

$$S_d = \frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2$$

其中：

θ ：波束分叉 (mrad)；

d ：发射机—接收机之间的距离 (km)。

对短的链路，捕捉面积有可能大于波束面积。在这些情况下，由于聚集了所有的波束能量，因此 A_{geo} 的值应设为 0。

4 因吸收和散射而引起的特殊的大气衰减 γ_{atmo}

特殊的大气衰减 γ_{atmo} (dB/km)可计为以下两个项的和:

$$\gamma_{atmo} = \gamma_{clear_air} + \gamma_{excess} \quad (3)$$

其中:

γ_{clear_air} : 晴空条件下的特殊衰减 (因存在气体分子);

γ_{excess} : 因偶尔出现的雾、薄雾、霾、毛毛雨、雨、雪、冰雹等而引起的特殊衰减。

大气是一个随时间变化的传输媒介, 因此, γ_{atmo} 是一个随机过程。不过, 如公式 (1) 所示, 对系统可用性及其影响所施加的限制通常从统计学角度进行处理。链路余量 M_{link} 代表衰减数量, 它是特定系统在特定范围内可以容许的。

4.1 特殊的晴天衰减 γ_{clear_air}

晴天条件下的衰减主要是指因气体分子吸收而引起的衰减。在特定光波长上的大气吸收源自光子、原子或分子 (氮 N_2 、氧 O_2 、氢 H_2 、水 H_2O 、二氧化碳 CO_2 、臭氧 O_3 等) 之间的相互作用, 这种相互作用导致入射光子的吸收和温度的升高。吸收系数取决于:

- 气体分子类型; 及其
- 浓度。

分子吸收是一种波长选择性现象, 它带来大气传输窗和大气吸收区。在红外波段中具有高吸收性的重要大气分子包括水 H_2O 、二氧化碳 CO_2 、臭氧 O_3 和氧 O_2 。

由于气体分子的尺寸大大小于波长, 因此, 来自气体分子的散射效应可以忽略不计。

通常情况下, 激光的波长选择在大气传输窗之内, 因此, γ_{clear_air} 可以忽略不计。在 FSO 系统中所用的波长通常接近 690、780、850 和 1550 nm。不过, 与相对未受污染的郊区位置相比, 在气溶胶含量很高的密集市区的应用, 可能受益于不同的波长。

4.2 特殊的额外衰减

额外衰减是指因雾、薄雾、霾、毛毛雨、雨和雪颗粒的偶尔出现而引起的衰减。这些颗粒的出现会引起入射通量的角度再分布, 称为散射, 它减少了初始方向上的通量传播。不过, 这里不存在类似于吸收的能量损耗。发射激光波长散射体的物理大小决定了散射类型。表 1 显示了三种不同的散射形式, 它们取决于散射体的大小以及波长与散射体衰减系数之间的大致关系 (有效截面积)。表 1 还显示了各种形式中有关可见光和红外波长的散射体类型。

表 1

取决于相对发射激光波长 λ 之散射体大小 r 的散射形式。
还显示了波长与散射体衰减系数 $Q(\lambda)$ 之间的大致关系。

	瑞利散射	米氏散射	非选择性散射 或几何散射
	$r \ll \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$	$r \approx \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-1.6} \sim$ $Q(\lambda) \sim \lambda^0$	$r \gg \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^0$
散射体类型	空气分子 霾	霾 雾 气溶胶	雾 雨 雪 冰雹

由于瑞利形式的 $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$ 关系式，因此气体分子的散射对总的衰减系数的影响可以忽略不计。

由于颗粒比波长大多得多，因此可以通过几何光学来描绘与激光波长无关的散射。雨滴、雪、冰雹、云中的小水滴和浓雾将在几何上散射激光。

由于颗粒的尺寸可以相比激光波长，因此可应用米氏散射理论。雾和气溶胶颗粒是米氏散射过程的主要作用因素。

可以使用一种解析法，它基于理论上获得的大气颗粒有效截面积来计算预测特定的衰减，对大气颗粒，假设了其颗粒大小的分布。不过，气溶胶或雾的颗粒大小分布都是决定其物理和光学特性的重要参数，难以对它们进行建模和度量。

4.2.1 估计因雾天而引起的特殊的衰减 γ_{fog} (米氏散射)

由于解析法在计算因米氏散射而引起的衰减时常常不太实用，因此 FSO 界采用了一些经验法。在这些方法中，因米氏散射而引起的衰减系数与能见度有关。

能见度或视距在技术上定义为：光的最初功率降至 2% 所经过的距离，或者，质量上的能见度是指刚好能够参照地平线辨别一个黑体的距离。能见度参数易于度量并存储于气象站或机场数据库中，它允许使用该参数的分布来对这些电信系统做本地性能评估。不过，在机场收集到的能见度数据可能不一定代表在城市或农村环境中的条件，这两种环境在地形学上差异巨大，接近水体。

以下是一个经验简化公式，在 FSO 界用来计算因雾而引起的特殊衰减 $\gamma_{fog}(\lambda)$ (dB/km)：

$$\gamma_{fog}(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550 \text{ nm}} \right)^{-q} \quad (4)$$

其中:

V : 能见度 (km);

λ : 波长 (nm);

q : 取决于散射颗粒之大小分布的一个系数。它由实验数据决定, 如下所示:

$$\begin{aligned} q &= 1.6 && V > 50 \text{ km} \\ &= 1.3 && 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ &= 0.585V^{1/3} && V < 6 \text{ km} \end{aligned} \quad (5)$$

为获得超过某个特定时间百分比 p 的衰减值 (即针对某个特定的概率), 要求公式 (4) 不超过该百分比 p 的能见度值。

4.2.2 因雨天而引起的特殊的衰减 γ_{rain}

特殊的雨衰减 γ_{rain} (dB/km) 通过以下关系式来计算:

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^\alpha \quad (6)$$

ITU-R P.837 建议书提供了降雨率 $R(p)$ (mm/h), 超过了平均年的任何特定百分比 p 和任何位置的降雨率, 公式 (6) 提供了超过时间百分比 p 的特殊衰减。

参数 k 和 α 取决于雨的特性, 表 2 提供了从这些指标确定的一些值。图 1 和图 2 描绘了 γ_{rain} 与降雨率 R 之间的关系, 使用了表 2 中有关日本的参数。

表 2
用于估计因下雨而引起的特殊衰减的参数

位置	k	α
日本	1.58	0.63
法国	1.076	0.67

图 1
因降雨而引起的大气衰减

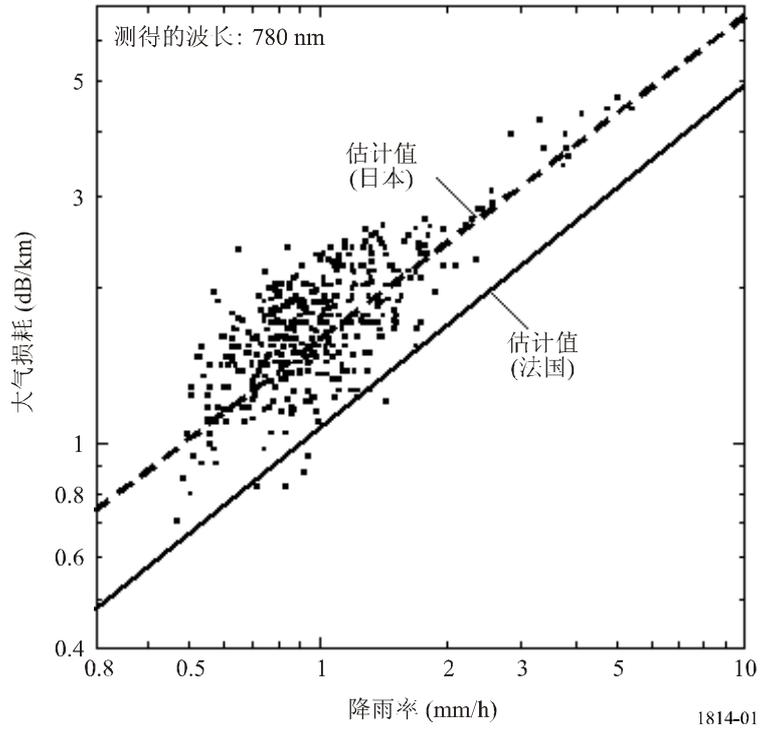
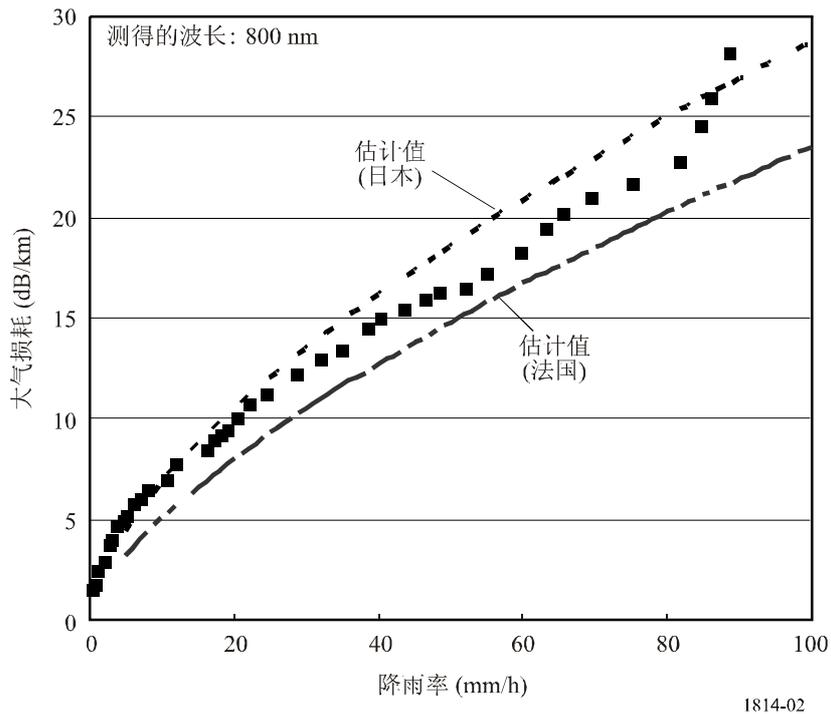


图 2
因降雨而引起的大气衰减



4.2.3 因雪天而引起的特殊的衰减 γ_{snow}

作为降雪之函数的衰减通过以下公式来计算：

$$\gamma_{snow} = \alpha \cdot S^b \quad (7)$$

其中：

γ_{snow} ：因降雪而引起的特殊衰减（dB/km）；

S ：降雪率（mm/h）；

α 和 b ：波长的函数 λ （nm）。表 3 中给出了干雪和湿雪的估计值。

表 3
用于估计因下雪而引起的特殊衰减的参数

	α	b
湿雪	$0.000102\lambda + 3.79$	0.72
干雪	$0.0000542\lambda + 5.50$	1.38

5 闪烁的影响

影响激光通信系统性能的第二个主要大气过程是因湍流而引起的大气闪烁，它将引起接收信号功率出现剧烈波动。

大气湍流产生临时性的气囊，其温度稍有不同，密度和折射率也不同。当激光束穿越这些折射率不同的大气时会发生变形，因波束漂移和闪烁，会出现数据丢失现象。各种影响的大小取决于这些湍流单元相对激光束直径的大小。

如果湍流单元大于波束直径，那么若波束漂移开接收机孔径，则整个激光束将发生随机弯曲，导致信号损耗。尽管波长依赖性较弱，但较长的波长将比较短的波长更少地发生波束漂移。

更常见的是，如果湍流单元的尺寸小于激光束直径，那么射线弯曲和衍射将在激光束波前产生失真。这将在接收机处引起激光束强度的暂时波动，频谱范围为 0.01 Hz~200 Hz，称为闪烁。

对流层闪烁的影响一般从被观测信号的幅度对数 χ （dB）（“对数—幅度”）角度进行研究，定义为其瞬时幅度与其平均值之间的比，以分贝数计。强度和波动率（闪烁频率）随波长的增大而增大。对平面波和弱湍流，闪烁变化 σ_χ^2 （dB²）可以通过以下关系式来表示：

$$\sigma_\chi^2 = 23.17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6} \quad (8)$$

其中：

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} : \text{波的数量 (m}^{-1}\text{);}$$

L : 链路长度 (m);

C_n^2 : 折射率结构参数 ($\text{m}^{-2/3}$)。

闪烁具有 $4\sigma_\chi$ 的峰值振幅，因闪烁而引起的衰减为 $2\sigma_\chi$ 。对强湍流，可观测到由以上关系式给出的变化饱和度。参数 C_n^2 在光波长上的值与在毫米波长上的值是不同的。在毫米波长上的闪烁主要源于湿度的波动，而在光波长上的闪烁主要源于温度的作用。在毫米波长上， C_n^2 约等于 $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ （一般而言，在毫米波长上， C_n^2 介于 10^{-14} 与 $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ 之间），而在光波长上，对弱湍流， C_n^2 的值约等于 $2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ （一般而言，在光波长上， C_n^2 介于 10^{-16} 与 $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 之间）。

图 3 描绘了 1 550 nm 波长光束在弱、中和强湍流时的衰减变化，距离最大可为 2 000 米。显然，随着湍流的增大，衰减也增大。表 4 显示了湍流对光和无电线波传播的影响。光的波长越长，衰减则越大。

图 3

1 550 nm处依据不同湍流类型距离的、闪烁引起之衰减的变化

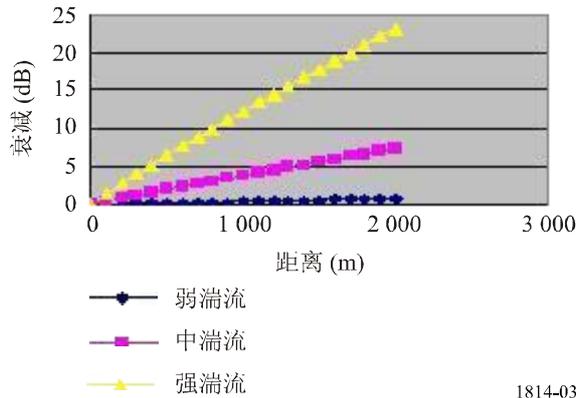


表 4

1 km路径长度预期闪烁衰减深度表

	湍 流		
	低	中	高
C_n^2 光波 ($\text{m}^{-2/3}$)	10^{-16}	10^{-14}	10^{-13}
衰减 (0.98 μm) (dB)	0.51	5.06	16.00
衰减 (1.55 μm) (dB)	0.39	3.87	12.25
C_n^2 毫米波 ($\text{m}^{-2/3}$)	10^{-15}	10^{-13}	10^{-12}
衰减 (40 GHz) (dB)	0.03	0.09	0.27
衰减 (60 GHz) (dB)	0.03	0.11	0.35

要么通过使用多个发射波束，要么通过使用大的接收机孔径，可以减少闪烁。另外，为了尽可能减轻闪烁对传输路径的影响，不应将 FSO 系统安装在热表面附近。由于闪烁与高度成反比，因此建议将 FSO 系统安装在略高于屋顶 (>1 米) 的地方，如果在类似沙漠的环境中进行安装，那么应远离边墙。

为补偿雾或雨衰减而分配的余量也可用于补偿闪烁的影响。

6 周围光线的影响

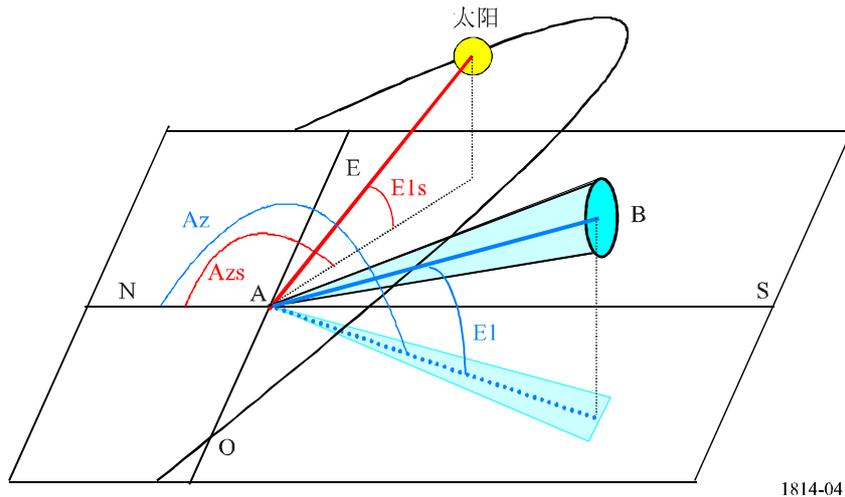
当太阳或太阳反射的图像处于或接近光接收机的瞬时视场 (IFOV) 时，将出现日光交叉现象。接收 IFOV 通常至少与传输散度一样大。当太阳位置与光链路平行时，问题就变得严重起来，进入接收机内的太阳功率大于在发射机处收到的功率。

通常通过调整接收机的安放位置来减小日光的干扰，因此，太阳总是偏离轴线。

图 4 描述了有关自由空间光链路的、太阳路径在空中的几何关系 (A 为接收机，B 为发射机)。

图 4

有关自由空间光链路的太阳路径示意图



1814-04

太阳辐射的功率 $P_{radiated}$ (W/m^2) 通过以下关系式来定义：

$$P_{radiated} = 1200 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - E_{Is}\right) \quad (9)$$

其中， E_{Is} 为太阳高度 (rad)。

接收到的功率通过以下公式来计算：

$$P_{solar} = F_{solar} \cdot P_{radiated} \cdot S_{capture} \cdot W_{receiver} / 100 \quad (10)$$

其中：

F_{solar} : 作为波长之函数的太阳光谱功率；

$S_{capture}$: 接收机捕捉表面积 (m^2)；

$W_{receiver}$: 接收机带宽 (nm)；

F_{solar} : 通过以下曲线拟合来建模：

$$F_{solar} = 8.97 \times 10^{-13} \lambda^5 - 4.65 \times 10^{-9} \lambda^4 + 9.37 \times 10^{-6} \lambda^3 - 9.067 \times 10^{-3} \lambda^2 + 4.05 \lambda - 5.70 \quad (11)$$

其中：

λ : 波长 (nm)。

7 计算链路边际

接收机距离发射机 d (km) 的 FSO 系统的链路衰减余量可以通过以下步骤来估计：

步骤 1: 可以从公式 (1) 获得几何衰减 A_{geo} 。

步骤 2: 通常选择激光波长落于大气传播窗口内，因此认为可以忽略不计 γ_{clear_air} 。不过，对晴天特殊衰减的估计可以从 ITU-R P.1817 建议书中获得。

步骤 3: 可以从公式 (4) 和公式 (5) 获得因雾而引起的特殊衰减 γ_{fog} 。在缺少本地数据的情况下，能见度的典型值可以在 ITU-R P.1817 建议书中找到。

步骤 4: 可以从公式 (6) 和表 2 获得因雨而引起的特殊衰减 γ_{rain} 。

步骤 5: 可以从公式 (7) 和表 3 获得因雪而引起的特殊衰减 γ_{snow} 。

步骤 6: 通过以下公式来计算衰减余量 M_{link} (dB)：

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{system} - A_{geo} - \gamma_{clear_air} \cdot d - \gamma_{fog} \cdot d - \gamma_{rain} \cdot d - \gamma_{snow} \cdot d$$

其中：

P_e (dBm): 发射机总的功率；

S_r (dBm): 接收机的灵敏度；

A_{system} (dB): 代表所有其他与系统有关的损耗。它们包括因未对准链路而引起的损耗、接收机光损耗、波束漂移损耗、周围光线衰减（阳光辐射）等。

8 其它问题

当 FSO 系统的设计包括以下内容时，还应考虑到其它一些因素：

国际安全监管机构严格限制光系统的最大输出功率。在 1 550 nm 处，监管机构允许大约 100 倍的“眼睛安全”较短波长所代表的功率。这种激光类型的缺点主要是其相比工作于 850 nm 左右的较短波长激光所代表的成本。

FSO 收发器可部署在窗户后面。波束与窗户形成的角度是至关重要的。角度应尽可能垂直，不过要稍微保持一定角度（5 度），以减少波束对其接收机的反射。另外，某些窗户也会含有玻璃或玻璃涂层，以减轻炫光。由于这些窗户常常是经特殊设计的，以排斥红外线，因此涂层可衰减 60%或更多的信号。

低能见度将降低 FSO 系统的有效性和可用性。在一年或一天中的某个特殊时段，可能出现低能见度现象。另外，低能见度也可能是一种局部现象（海岸的雾）。减轻低能见度负面影响的一种解决方案是缩短各终端之间的距离，这将提供更大的链路余量，以应对恶劣的天气。
