

ITU-R P.1817建议书*

设计地面自由空间光链路所需的传播数据

(ITU-R第228/3号课题)

(2007年)

范围

本建议书提供设计自由空间光（FSO）链路和规划自由空间光系统所需的传播数据，它们分别处于本建议书所指明的有效范围内。

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 – 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 大气因素

地球大气层对光线的吸收与散射会对FSO链路造成不利影响。大气通常由许多不同的分子种类以及被称为气溶胶的微小悬浮颗粒组成，而正是由于大气的这种组成，大气与光相互作用。这种相互作用导致众多现象的发生：频率选择性吸收、散射和闪烁。

- 在特定光波长上的频率选择性吸收源自光子、原子或分子之间的相互作用，这种相互作用导致入射光子的消光、温度升高和辐射性发射。
- 大气散射源自传播媒介中光子、原子和分子之间的相互作用。散射造成已做或未做波长修正之辐射的角度再分布。
- 闪烁源自传播媒介中的热湍流，这种热湍流导致随机分布的单元。这些单元具有不同的尺寸（10 cm-1 km）、温度和折射率，导致散射、多路径和到达角的变化。结果是，收到的信号幅度在0.01~200 Hz的频率范围上波动。闪烁还会引起波前畸变，导致光束的散焦。

另外，当太阳与自由空间光链路的方向共线性时，阳光也会影响FSO的性能。

2 分子吸收

分子吸收源自光射线与媒介原子和分子（氮 N_2 、氧 O_2 、氢 H_2 、水 H_2O 、二氧化碳 CO_2 、臭氧 O_3 和氩 Ar 等）之间的相互作用。吸收系数取决于气体分子的类型与浓度。吸收系数的光谱变化决定了吸收光谱。该光谱的特点是因气体可能的能量等级变化而产生的，这些气体本质上是因电子跃迁、原子振动和分子旋转而产生的。压力或温度的升高往往通过激发更高的能量等级以及通过多普勒效应而拓宽光谱吸收线。分子吸收是一种选择性的现象，它导致相对透明的大气传输窗口以及相对不透明的大气吸收波段。

在光距中的传输窗口为：

- 可见光和非常近红外： 从0.4到1.4 μm ；
- 近红外或红外 I： 从1.4到1.9 μm 以及从1.9到2.7 μm ；
- 中红外或红外 II： 从2.7到4.3 μm 以及从4.5到5.2 μm ；
- 远红外或红外 III： 从8到14 μm ；
- 极远红外或红外 IV： 从16到28 μm 。

气体分子具备适合各物种的、量化的能量等级，并且能够在入射电磁辐射和从最初能量等级 e_i 向更高能量等级 e_f 跃迁的影响下吸收能量（或光子）。然后，辐射能量因一个或多个光子的损耗而衰减。

只有当入射波频率准确对应所考虑分子的其中一个谐振频率时，才会发生此过程，它通过以下公式来计算：

$$\nu_0 = \frac{e_f - e_i}{h} \quad (1)$$

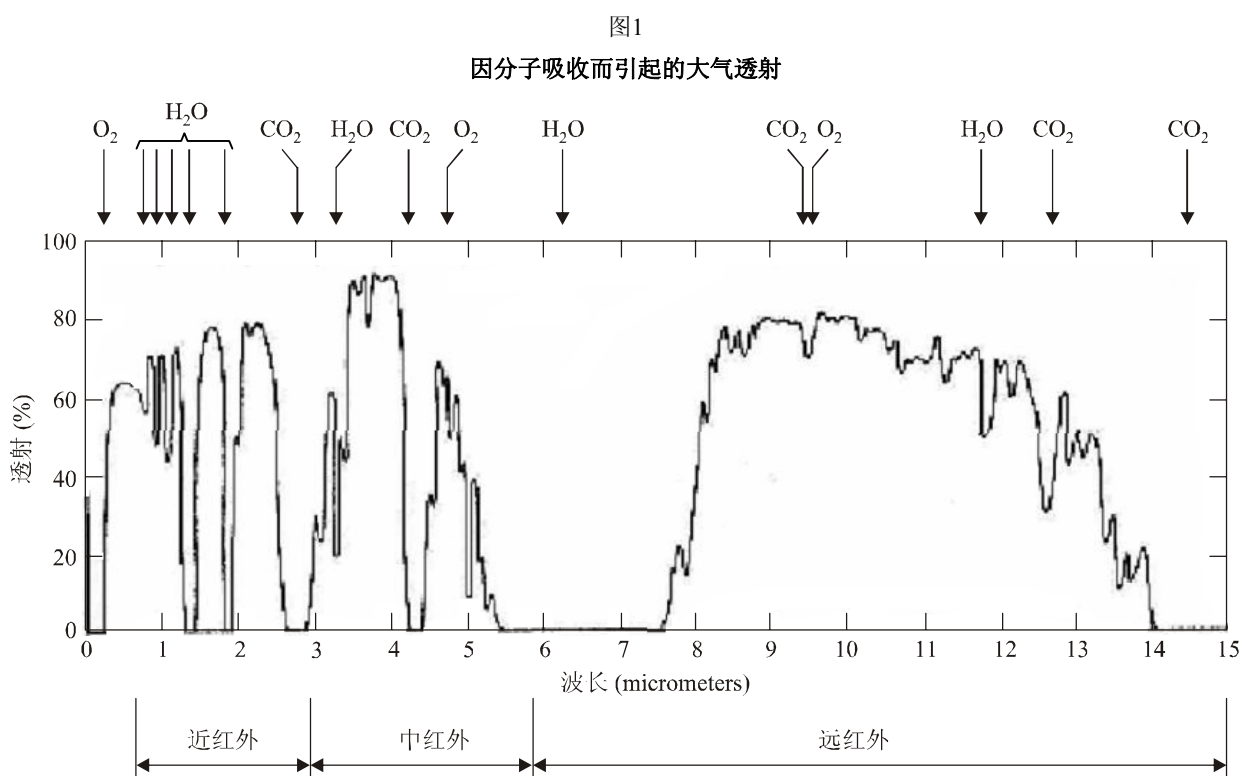
其中：

ν_0 : 为入射波频率 (Hz) ；

h : 为普朗克常数, $h = 6.6262 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 。

用于确定因分子谐振而产生的吸收的基本参数为：各分子种类可能的能量等级、从能量等级 e_i 向能量等级 e_f 跃迁的可能性、谐振线的强度，以及各线的自然剖面。

通常，当分子正相对入射波移动时，各吸收线的剖面将通过多普勒效应以及因分子相互作用而引起的碰撞效应来修正。这些现象导致各分子自然线的光谱拓宽。对某些分子而言，如二氧化碳 (CO_2)、水蒸气 (H_2O)、氮 (N_2) 和氧 (O_2)，吸收线剖面可从各中央线充分扩展。该属性导致吸收的连续统一性。图1显示了海平面上、一条长1 820米的水平链路上，因分子吸收而在名义上度量得到的大气透射率。



1817-01

3 分子散射

分子散射源自光与大气颗粒的相互作用，大气颗粒的尺寸小于入射光的波长。因大气气体分子而引起的散射（瑞利散射）造成了电磁辐射总的衰减。

因分子散射而引起的消光系数 $\beta_m(\lambda)$ 通过以下公式来计算:

$$\beta_m(\lambda) = \frac{24\pi^3}{\rho\lambda^4} 10^3 \left(\frac{[n(\lambda)]^2 - 1}{[n(\lambda)]^2 + 2} \right) \left(\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right) \quad (2)$$

其中:

- $\beta_m(\lambda)$: 分子散射系数 (km^{-1});
- λ : 波长 (μm);
- ρ : 分子密度 (m^{-3});
- δ : 空气的去极化因子 ($\cong 0.03$);
- $n(\lambda)$: 空气的折射率。

$\beta_m(\lambda)$ 的近似值为:

$$\beta_m(\lambda) = A\lambda^{-4} \quad (3)$$

其中:

$$A = 1.09 * 10^{-3} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \quad \text{km}^{-1} \text{m}^4 \quad (4)$$

以及:

- P : 大气压 (mbar);
- P_0 : 1 013 mbar;
- T : 大气温度 (K); 以及
- T_0 : 273.15 K。

分子散射在红外波长中是可以忽略的, 而瑞利散射主要影响紫外波长, 直至可见波长。晴朗天空的背景呈蓝色, 就是因为这类散射。

4 气溶胶吸收

气溶胶是悬浮在大气中、降落速度非常慢、极为细小的固体或液体颗粒(冰、灰尘、烟雾等)。它们的大小通常为 10^{-2} - $100 \mu\text{m}$ 。雾、灰尘和海浪飞沫颗粒都是气溶胶的例子。

由于它们的化学性质、大小和浓度, 气溶胶影响大气衰减的条件。在海洋环境中, 气溶胶主要由小水滴(水泡、雾、毛毛雨、雨)、盐晶和各种各样来自大陆的颗粒组成。大陆颗粒的类型与密度取决于距附近海岸的距离和特性。

因气溶胶吸收而引起的消光系数 $\alpha_n(\lambda)$ 通过以下公式来计算:

$$\alpha_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_a \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n'' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad \text{km}^{-1} \quad (5)$$

其中:

- λ : 波长 (μm);
- $dN(r)/dr$: 单位体积的颗粒大小分布 (cm^{-4});

n'' : 所考虑气溶胶之折射率的假想部分 n ;

r : 颗粒的半径 (cm) ;

$Q_a(2\pi r/\lambda, n'')$: 特定类型气溶胶的吸收截面。

米氏理论预测, 相同类型的球形颗粒衍射电磁场。吸收 (Q_a) 和散射 (Q_d) 截面取决于颗粒大小、折射率和入射波长。它们代表入射波部分, 其中吸收的 (散射的) 功率等于入射功率。

气溶胶的折射率取决于它们的化学组成和波长。它用 $n = n' + n''$ 来表示, 其中, n' 是颗粒散射能力的函数, n'' 是颗粒吸收能力的函数。

在可见光和近红外光谱区域, 折射率的假想部分极低, 可在计算总的衰减 (消光) 时被忽略掉。在远红外情况下, 折射率的假想部分必须予以考虑。

5 气溶胶散射

当颗粒大小与入射光波长处于同一数量级时, 将发生气溶胶散射 (米氏散射) 现象。衰减是频率和能见度的函数, 而能见度与颗粒大小分布有关。这一现象成为了远距离部署自由空间光系统的最大限制因素。在光区域, 它主要由薄雾和雾引起。光区域中的衰减可达 300 dB/km, 这与毫米波区域的情况形成对比, 后者的雨衰通常为几个 dB/km。

因气溶胶散射而引起的消光系数 β_n 通过以下公式来计算:

$$\beta_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_d \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad \text{km}^{-1} \quad (6)$$

其中:

λ : 波长 (μm) ;

$dN(r)/dr$: 单位体积的颗粒大小分布 (cm^{-4}) ;

n' : 气溶胶折射率的实际部分 n ;

r : 颗粒半径 (cm) ;

$Q_d(2\pi r/\lambda, n')$: 特定类型气溶胶的散射截面。

米氏理论用于预测因气溶胶而引起的散射系数 Q_d , 它假设颗粒是球形的, 并被充分隔开, 从而可以通过假设远场 (单一) 散射来计算散射场。

散射截面 Q_d 很大程度上取决于相比波长的气溶胶尺寸, 对半径小于或等于波长的颗粒而言, 这是一个频率选择性很强的函数。对半径等于波长的颗粒, 它达到其最大值 (3.8), 在这种情况下, 散射最强。随着颗粒尺寸的增大, 散射截面趋于一个约为 2 的值。

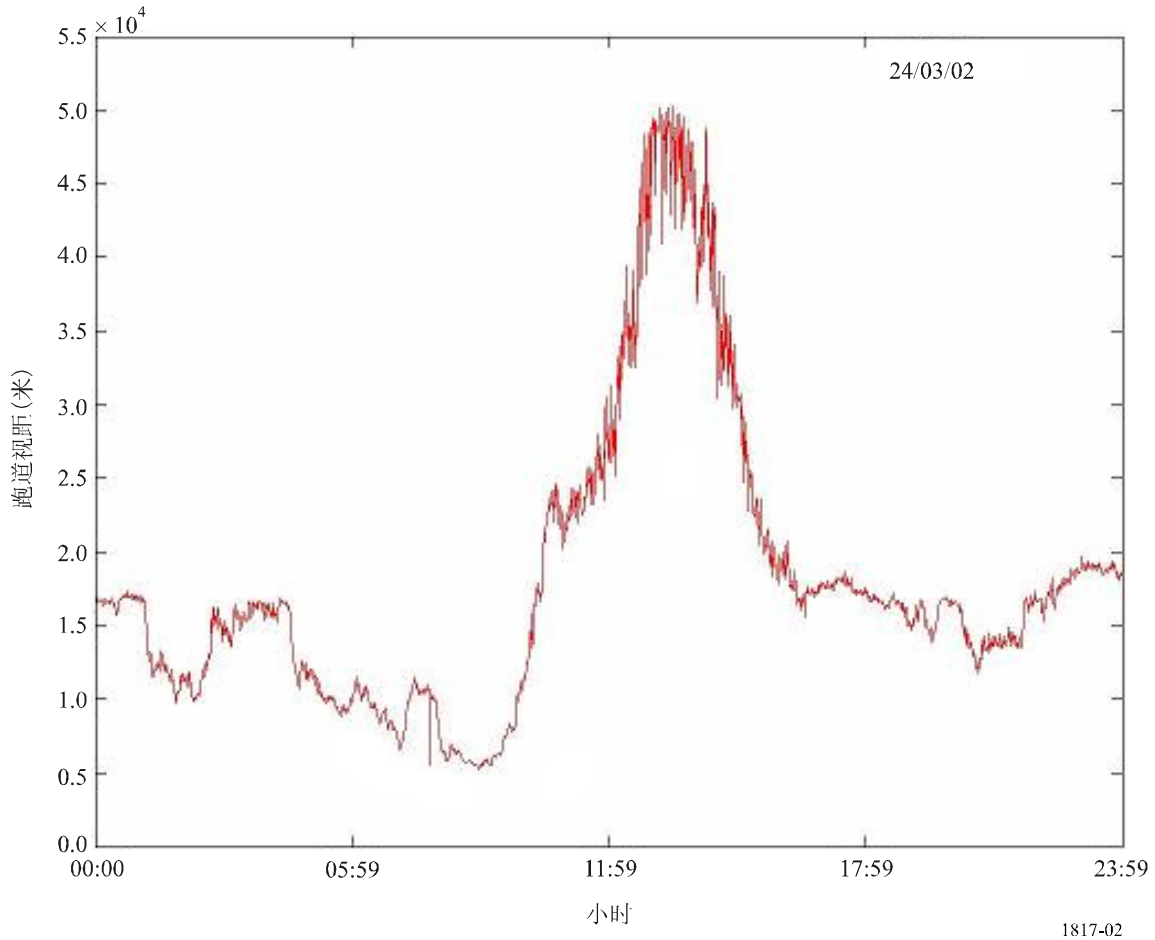
由于气溶胶的浓度、组成和大小分布随时间和空间变化而变化, 因此难以预测这些气溶胶的衰减。尽管浓度与光的能见度密切相关, 但仍没有针对特定能见度的、唯一的颗粒大小分布。

当由人类观测者进行估计时，能见度描述了大气的透明度。它通过跑道视距（RVR）来度量，为光束必须穿越大气的距离，原因是其强度（或光通量）将降至其初始值的0.05倍。可以使用透射仪或扩散测定仪来度量它。

图2提供了一个例子，用于说明在一个能见度高的白天，在法国La Turbie观测到的、跑道视距的变化情况。

图2

在一个能见度高的白天，在La Turbie（法国）观测到的跑道视距的变化



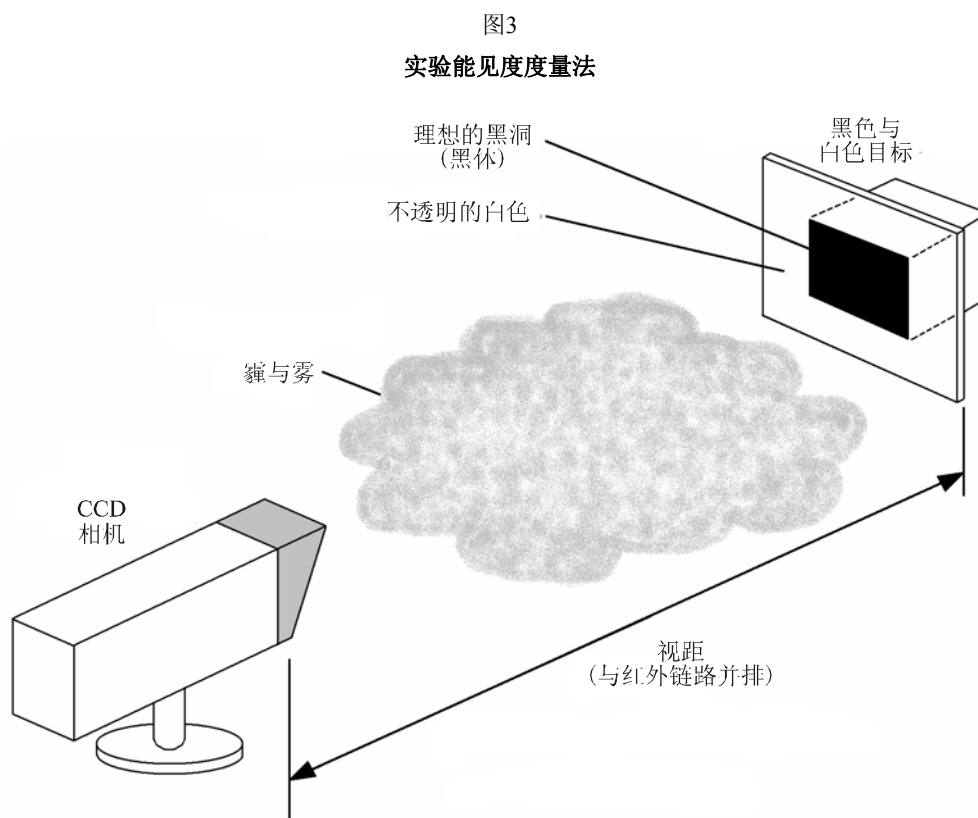
可选地，沿传输路径的能见度可以使用一个CCD相机和一个黑白参照对象来度量。对这种方法，视距 V_r 通过以下公式来计算：

$$V_r = \frac{\ln(0.02)}{\ln(C/C_0)} d \quad (7)$$

C 为对象黑白区域之间度量的对比， C_0 为对象的固有对比度（近距离度量得到）， d 为距对象的距离。 C 值通过以下关系式来计算：

$$C = \frac{L_w - L_b}{L_w + L_b} = 0.02 = e^{-b_{EX} \cdot V_r} \quad (8)$$

其中, L_w 和 L_b 为对象黑白部分的亮度, b_{EX} 为消光系数, V_r 为视距。图3显示了理想的对象, 带有对象的黑色部分、漆成白色的平面中的洞穴表面, 以及漆成黑色的洞的内表面, 以避免任何直接散射的光。



1817-03

气溶胶尤其是雾的所有光学性质都与颗粒的大小分布有关, 这可以被看作是决定雾的物理和光学性质的关键参数。

通常, 这种分布用解析函数来表示, 如针对气溶胶的对数正态分布以及针对雾的改进型伽马分布。后者主要用于对各种类型的雾和云进行建模, 通过以下公式来计算:

$$N(r) = ar^{\alpha} \exp(-br) \quad (9)$$

其中, $N(r)$ 为单位体积和半径 r 每增加一个单位的颗粒数量, α 、 a 和 b 为描述颗粒大小分布的参数。

计算机代码 (参见附录1) 通常考虑两种特殊情况: 强平流雾和中辐射雾, 它们都通过上面所示的改进型伽马尺寸分布来建模。表1提供了改进型伽马分布的典型参数。

表1

浓平流雾和中辐射雾条件下颗粒大小分布的各种参数

	α	a	b	N (cm ⁻³)	W (g/m ³)	r_m (μm)	V (m)
浓平流雾	3	0.027	0.3	20	0.37	10	130
中辐射雾	6	607.5	3	200	0.02	2	450

其中:

N : 为单位体积水颗粒的总数 (cm³) ;

r_m : 为形态半径 (μm) , 对该半径, 分布代表最大值;

W : 为液态水含量 (g/m³) ;

V : 为与雾的类型相关的能见度 (m) 。

接收到的信号电平可经受因能见度变化而引起的巨大短期波动。图4显示了远红外和中红外链路经归一化的接收强度, 以及在1分钟时间片内的链路能见度。

图4

在1分钟内同步记录的远红外与中红外链路 (a) 和视距 (b) 实时接收到的强度

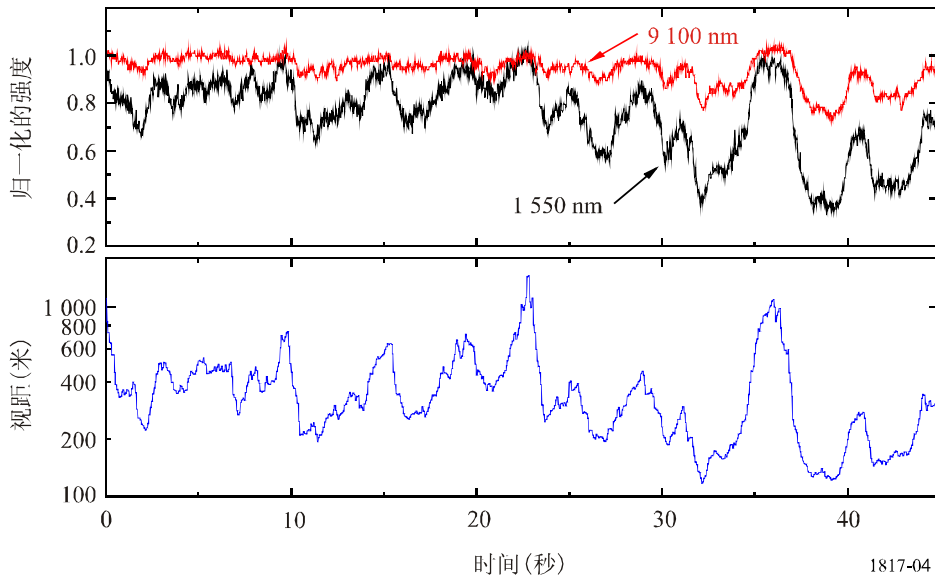
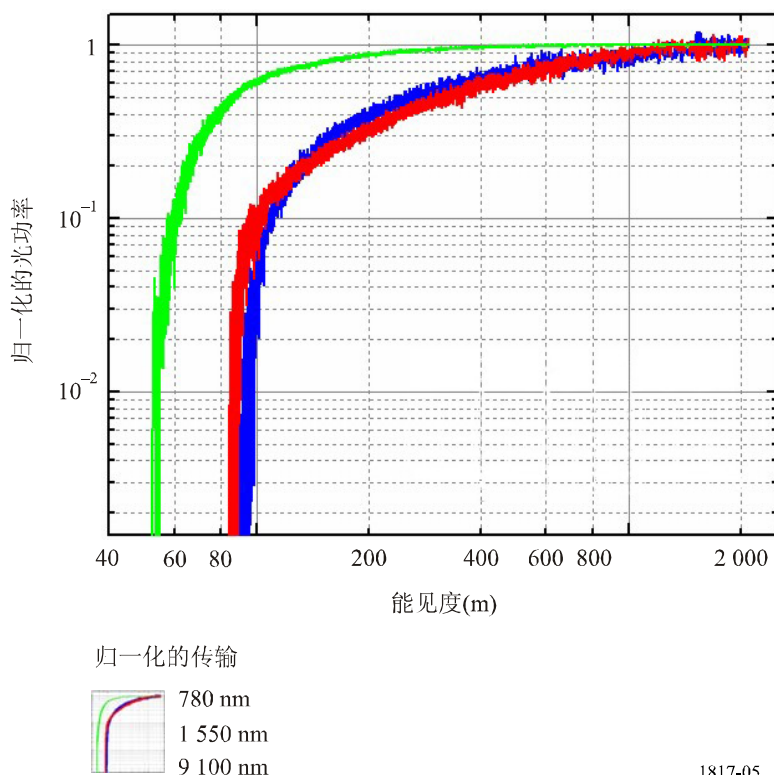


图5显示了作为视距函数的、归一化的光功率, 在780 nm、1 550 nm和9100 nm处测得。

图5

针对三种不同波长的、相对链路能见度的、归一化的接收到的光功率



在多数浓雾情况下，颗粒分布是不均匀的。在这种情况下，远红外链路可以提供杰出的可用性，原因是，10 μm 的光能够克服在浓雾中的损耗，并保持链路的可用性，而较短波长的光则不能。

6 闪烁

在热湍流影响下，变化的折射系数的随机分布单元可以在传播媒介中形成。这些单元引起散射、多路径和到达角的变化，导致收到的信号电平在0.01~200 Hz的频率范围内波动。同样地，波前变动导致光束时间变化的聚焦与散焦。信号的这种波动称为闪烁。闪烁的幅度与频率取决于单元相对于光束直径的大小。以下各图显示了这种影响以及接收到信号的变动（幅度、频率）。当相比光束截面而言，不同成分很大时，光束偏离（图6），当相比光束截面而言，不同成分很小时，光束变宽（图7）。不同成分的混合造成闪烁（图8）。

图6
在大于光束直径的热湍流单元影响下的光束偏离

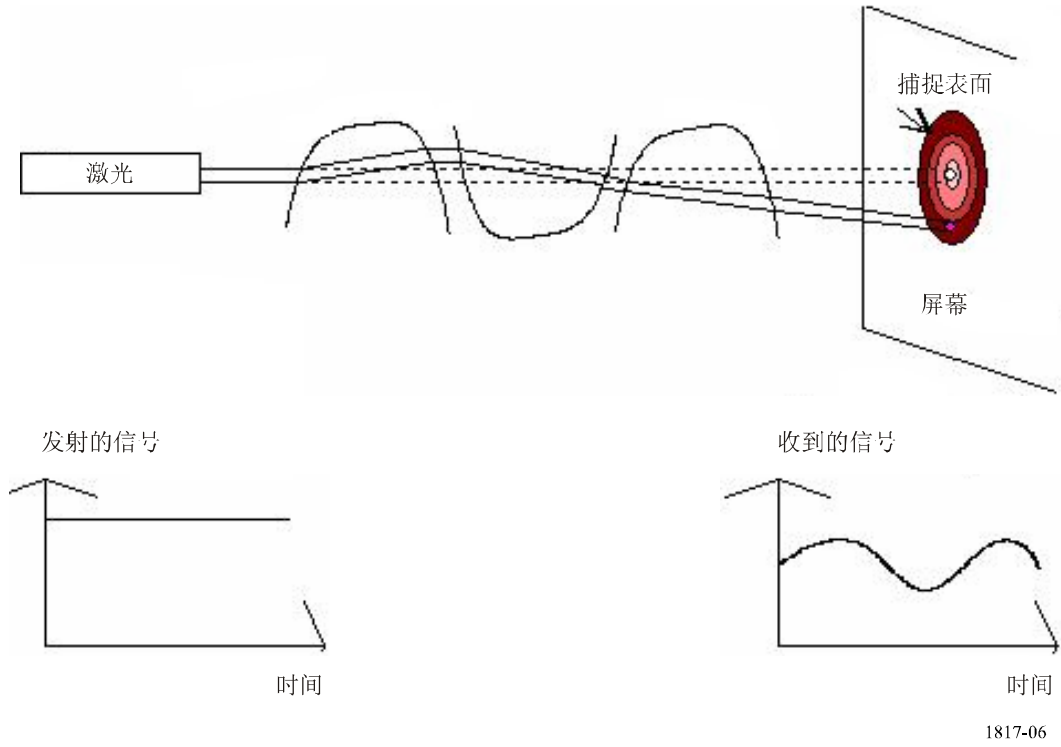


图7
在小于光束直径的热湍流单元影响下的光束偏离（光束的拓宽）

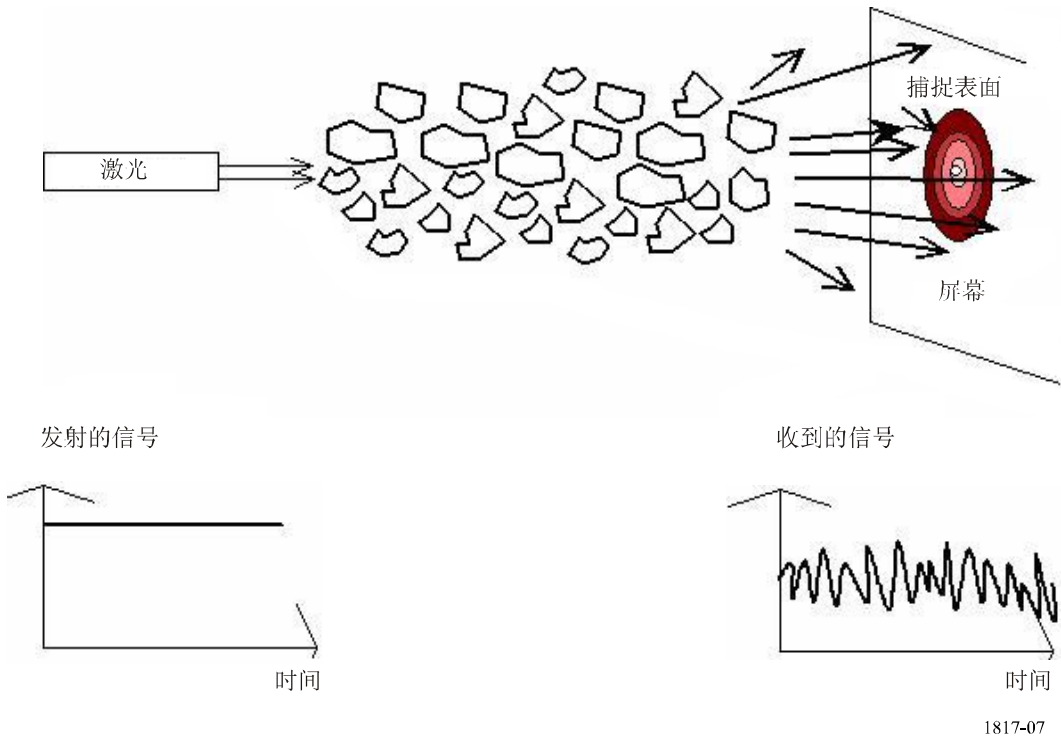
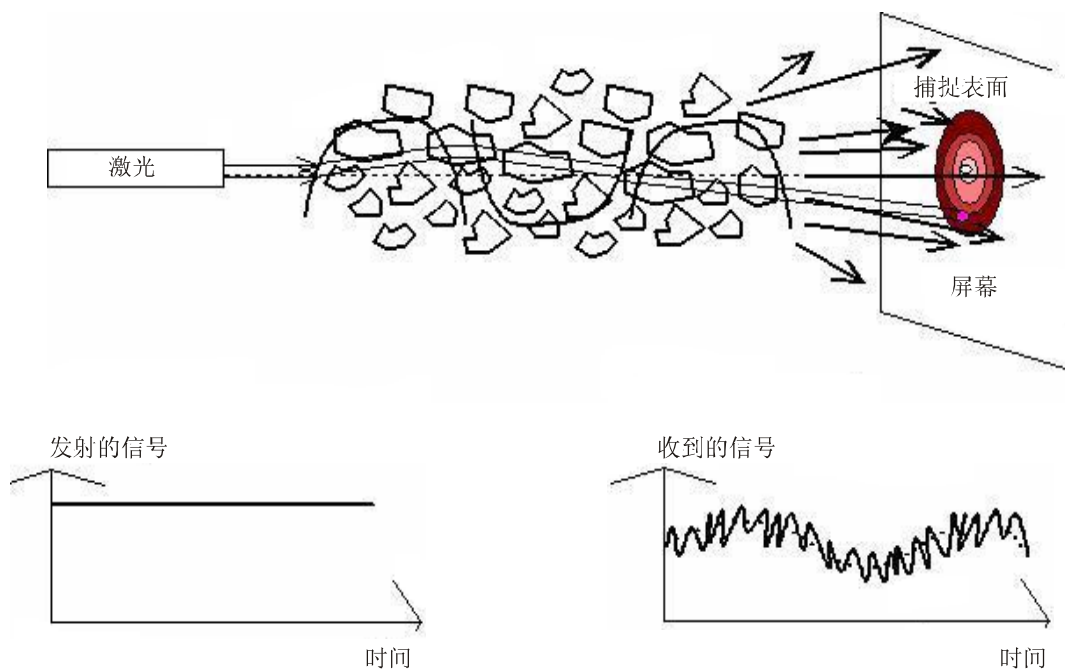


图8
不同大小不同成分对激光光束传播的影响（闪烁）



1817-08

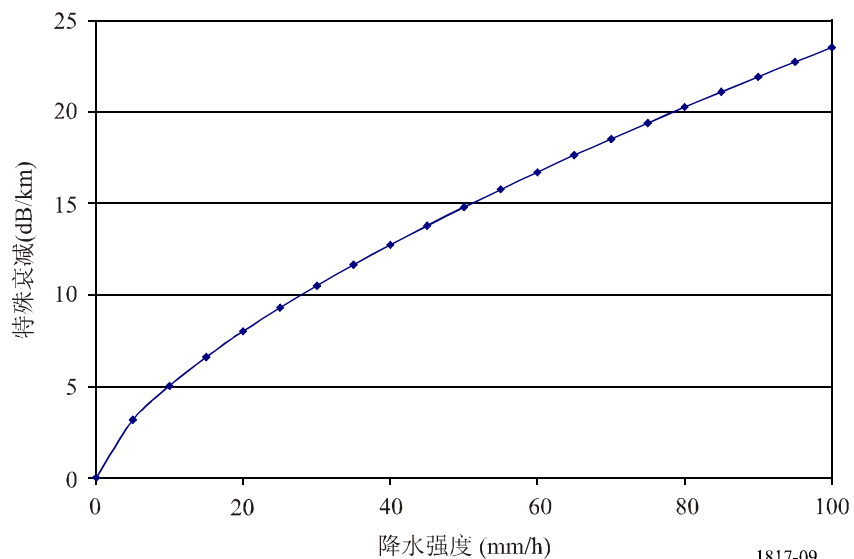
7 雨衰

因降雨而引起的特殊衰减 (dB/km) 通常通过以下公式来近似计算:

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^\alpha \quad (10)$$

图9描述了因在光和红外范围中观测到的降雨而引起的特殊衰减的典型变化 (dB/km)。

图9
在光和红外范围中因降水而引起的特殊衰减 (dB/km)



1817-09

ITU-R P.837建议书提供了降雨率 R_p (mm/h)，它超过了平均年的特定百分比 p ，并且针对的是任何位置。

8 雪衰

因降雪而引起的特殊衰减 (dB/km) 作为降雪率的一个函数，通过以下公式来计算：

$$\gamma_{snow} = a \cdot S^b \quad (11)$$

其中：

- γ_{snow} ：为因降雪而引起的特殊衰减 (dB/km)；
- S ：为降雪率 (mm/h)；
- a and b ：均为波长 λ (nm) 的函数，在表2中提供：

表2
针对湿雪和干雪的参数“ a ”与“ b ”

	a	b
湿雪	$0.0001023\lambda_{nm} + 3.7855466$	0.72
干雪	$0.0000542\lambda_{nm} + 5.4958776$	1.38

图10和图11显示了当 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 时，作为降雪率函数的估计衰减。

图10
当 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 时，相对降雪率的湿雪衰减
湿雪衰减

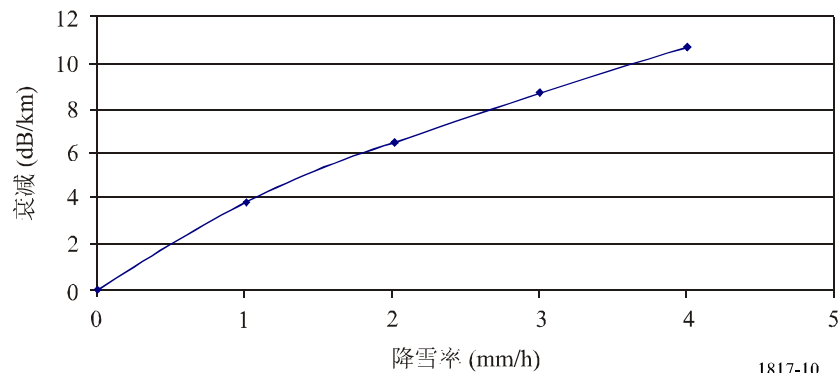
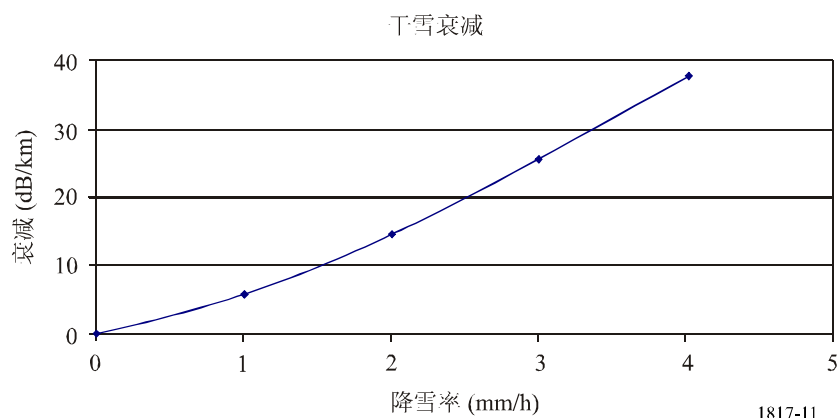


图11
当 $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$ 时, 相对降雪率的干雪衰减



9 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。目的是计算太阳位置与光链路平行的概率, 进入发射机内的太阳功率大于在发射机处收到的功率。在ITU-R P.1814建议书中提供了一种用于评估这种影响的方法。

10 衰减的累积分布

图12显示了一年时间内, 在捷克共和国布拉格市的850 nm处、850 m路径上测得的、因所有水汽现象、雾、雨、雨加雪和雪而引起的衰减累积分布。所有衰减事件都依据导致特殊衰减事件的气象条件来分类。使用发射机与接收机之间地带的相机图像, 以及使用从接近接收机的自动气象站处获得的数据, 来确定气象条件。由雾和雪引起的衰减事件是最严重的。

11 混合/FSO系统

图15比较了在所有水汽现象和只有降雨情况下、58 GHz频率上、同一路径光链路上的衰减度量结果。降雨时, 光路径比毫米波路径的衰减要小。利用降雨可引起RF路径衰减但对雾不敏感这一事实, 混合无线电/光 (RF/FSO) 系统可以改进FSO链路的性能。相反, 雾可引起光路径的严重衰减, 但它对降雨不太敏感。

图13中所示的年度累积分布给出了对假定之混合RF/FSO系统性能的评估。考虑到在混合系统中, RF和光路径具有相同的衰减余量, $FM=20\ \text{dB}$ 。使用了一种简单的分集技术, 因而系统的RF或FSO任一部分都是活动的, 这取决于RF和光路径衰减的瞬时值。假设系统的RF部分减轻了非降雨事件, FSO部分减轻了降雨事件。表3显示了从FSO降雨统计数据中评估得到的混合系统可用率 (AR)。

图12
不同路径条件下的累积衰减分布

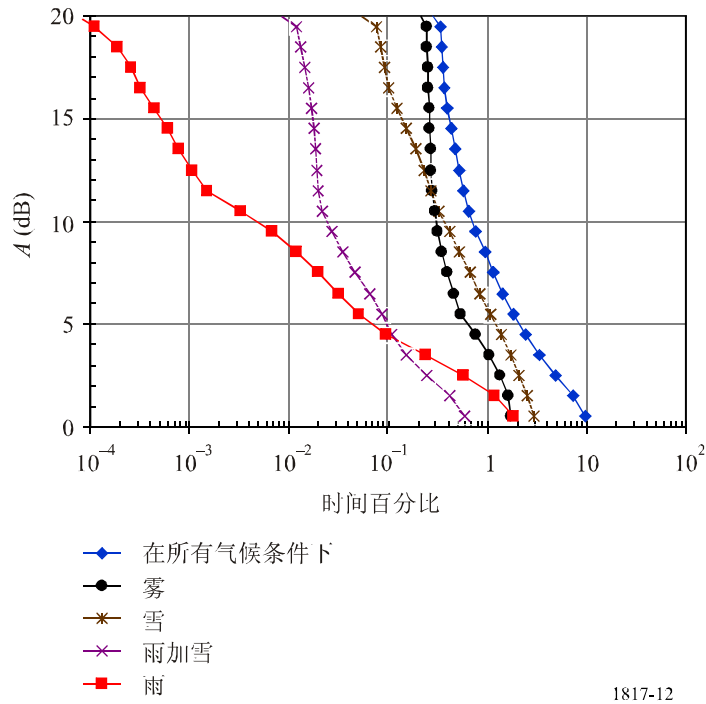


图13
超过不同时间百分比的RF和FSO衰减

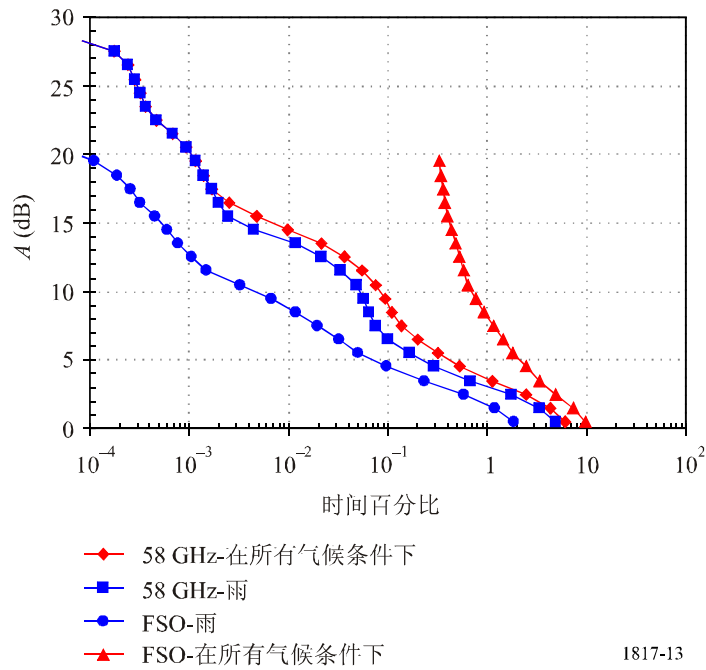


表3

RF、FSO和假定的RF/FSO混合系统的可用率比较

系统	AR (%)
FSO部分 (850 nm)	99.7
RF 部分 (58 GHz)	99.999
混合RF/FSO	99.9999

12 能见度度量

能见度 V (千米) 定义为距目标的距离, 其中, 图像对比度下降至其初始值的2%。在550 nm处度量的波长对应太阳光谱的最大强度, 通过以下Koschmieder关系式计算:

$$V(\text{km}) = \frac{3.912}{\gamma_{550 \text{ nm}}} \quad (12)$$

其中, $\gamma_{550 \text{ nm}}$ 为媒介 (大气和气溶胶) 的消光系数。

能见度用两种类型传感器来度量: 大气透射仪和扩散测定仪。

下表列出了各种气候条件下表示衰减 (dB/km) 的国际能见度代码:

- 从十分晴朗的时期到浓雾的气候条件;
- 降水 (mm/h): 毛毛雨、雨、暴雨;
- 能见度从50米~50千米。

国际能见度代码					
气候条件	降水量		能见度 (m)	衰减 (dB/km)	
	mm/h				
浓雾			0		
			50	315	
大雾			200	75	
中雾			500	28.9	
小雾	雪	暴雨	100	770	18.3
非常小的雾				1 000	13.8
		大雨	25	1 900	6.9
薄雾				2 000	6.6
		中雨	12.5	2 800	4.6
非常薄的雾				4 000	3.1
		小雨	2.5	5 900	2
				10 000	1.1
晴天		毛毛雨	0.25	18 100	0.6
大晴天				20 000	0.54
			23 000	0.47	
			50 000	0.19	

附件1的附录1

计算机建模

从对物理现象的理论描述中，已经开发出了一定数量的计算机建模程序，用于确定大气传输系数。其中一些模型是可用的：LOWTRAN 和 NAM程序（海上气溶胶模型）；在海洋环境中的NOVAM 和 WKDAER等。NOVAM包括在MODTRAN、FASCOD等模型中。

LOWTRAN包含一些因气溶胶而引起的光信号衰减的模型。它基于逐线模型，并可以从ONTAR（美国）处获得。

NAM软件更加特定地应用于海洋环境。它基于GATHMAN的气溶胶分布模型。

NOVAM考虑到了大陆本土的灰尘颗粒。

WKDAER可调整为针对特定环境。

FASCOD使用逐线模型，它考虑到了用于描述吸收线特性的所有参数（强度、跃迁概率等）。它基于高分辨率的分子吸收数据库HITRAN。HITRAN中包括的主要线参数为谐振频率、296 K时的线强度、跃迁概率、296 K时的线半宽，以及低能量的或基本的分子状态。

空军地球物理实验室（AFGDL）开发了三种相互关联的模型，它们带有各种各样的光谱分辨率：

- LOWTRAN 7 – 低分辨率传输 – 在 5 cm^{-1} 阶段的光谱分辨率为 20 cm^{-1} （等于600 GHz）。
- MODTRAN 3 – 中分辨率传输 – 在 1 cm^{-1} 阶段的光谱分辨率为 2 cm^{-1} （等于60 GHz）。
- HITRAN 2004 – 高分辨率传输 — 光谱分辨率为 0.001 cm^{-1} （等于30 MHz）。

所有这些模型都包含了关于诸多大气种类的光谱信息，包括水（ H_2O ）、臭氧（ O_3 ）、一氧化二氮（ N_2O ）、一氧化碳（ CO ）、甲烷（ CH_4 ）、氧气（ O_2 ）、一氧化氮（ NO ）、二氧化氮（ NO_2 ）、二氧化硫（ SO_2 ）和硝酸（ HNO_3 ）。（HITRAN包括了有关37种分子的、超过1 000 000吸收线的详细内容）。此外，三种模型都包括了在整个光谱中的水（ H_2O ）连续统一体、在 $2\ 000\text{--}2\ 700\text{ cm}^{-1}$ 区域中的氮（ N_2 ）连续统一体、分子散射，以及源自气溶胶、雾、雨和云的吸收与散射。
