

ITU-R F.2106 报告

利用自由空间光学链路的固定业务应用

(ITU-R 237/9号研究课题)

(2007年)

范围

本报告提供了关于自由空间光学（FSO）链路（FSOL）用于固定业务（FS）应用的ITU-R 237/9号研究课题的一个答复。

下列各节介绍了设备特性、可能的FS应用以及自由空间光传输的技术和操作方面（见注1和注2）。

注1 – 本报告中讨论的自由空间传输集中在户外使用的系统。

注2 – 在中心站和移动/游动终端之间作为无线局域网的自由空间光学连接超出了本报告的范畴；然而，本报告涵盖中心站之间的固定链路。

缩写

AAC:	自动衰减控制
APD:	雪崩光敏二极管
FSO:	自由空间光学
FSOL:	自由空间光学链路
LD:	激光二极管。

参考文献**ITU-R 建议书**

ITU-R F.1668建议书 – 在27 500 km假设参考通道和连接中所使用的实际数字固定无线链路的差错性能指标

ITU-R F.1703建议书 – 在27 500 km假设参考通道和连接中所使用的实际数字固定无线链路的可用性指标

ITU-R P.1814建议书 – 设计地面自由空间光学链路所要求的预测方法

ITU-R P.1817建议书 – 设计地面自由空间光学链路所要求的传播数据

ITU-T 建议书

ITU-T G.640建议书 – 用于自由空间光学系统的协同定位纵向兼容接口

ITU-T G.692建议书 – 有光放大器的多路系统的光接口。

1 引言

最近，FSO链路（FSOL）正在成为有吸引力的、适合短距离固定应用的传输媒介，FSOL具有以下优点：

- 可以获得宽带传输；
- 发送/接收设备简洁；
- 几乎不需要相互调整来避免FSOL之间的干扰。

因此，为了扩展FSOL当前的和将来的应用，需要通过理论分析以及在本报告中描述的实验方法来介绍FSOL的技术和操作方面。

2 对系统配置和基本参数的描述

2.1 参数说明

2.1.1 发射机端

2.1.1.1 发射面积， E_a

发射面积是用平方米（ m^2 ）表示的发射窗口的表面。

发射面积是一个用于确定激光器安全等级的参数。

2.1.1.2 发射功率， E_p

发射功率 E_p 是通过发射面积 E_a 发送的功率，用dBm或者mW表示，它是用来决定激光器的安全等级和用于计算链路余量的其他参数之一。功率测量应该在FSO外边进行，并且尽可能地接近FSO发射窗口。如果可能的话，应该等概地发送“0”和“1”来进行测量，功率是高电平数值（比特“1”）和低电平数值（比特“0”）的平均值。

为了安全起见，有必要确定功率测量的精度，例如 $E_p = 10 \text{ dBm} \pm 1 \text{ dB}$ 。

同样地，为了安全起见，如果终端具有自动发散调节功能，则将 E_p 定义为最小发散值，对于具有自动发射功率控制（ATPC）功能的终端，最大 E_p 值是发射功率的最大值。

对于拥有一个多波束系统的终端，应指出每 E_a 的 E_p 和总功率（各波束之和，以mW计）。当所有波束会聚于一点时，总功率是每个发射终端所有 E_p 之和，使用这个参数是出于安全的原因，还应该指出两个 E_a 之间的距离和波束散度。

对于拥有全息光学扩散器可获取更大范围光源的终端，为了以受控的扩散面积提供较高的扩散传输效率，并且采用第1级（按照IEC 60825-1标准[3]）配置提高传输效率；应指出基于 E_a 的 E_p 。

2.1.1.3 波束散度， B_d 或 θ

波束散度是相当于最大功率密度的波束中心轴与相当于功率密度下降-3 dB的方向之间角度的最大值。

这个数值对于确定激光器的安全等级和计算链路余量很重要，该数值可以表示成半角或全角，但是应该注明；其单位通常表示为毫弧度（mrad）。在调整散度的情况下，应该指出散度的最小值和最大值。

2.1.1.4 波长， W_a 或 λ

波长 W_a 或者 λ 是中心波长和它的半最大值全宽度（FWHM）。中心波长值对于激光器的安全等级计算也很重要，单位应该是纳米（例如： $\lambda = 849 \pm 2 \text{ nm}$ ）。

如果采用波分复用（WDM）传输，指出光谱的范围就会比较容易。

2.1.1.5 激光器安全等级

FSO终端的安全等级应遵循IEC 60825规范性标准，必须受控于有资质的实验室。应该优先选用安全等级为1或1 M的FSO终端。

2.1.2 接收机端

2.1.2.1 接收机面积， R_a

接收机面积 R_a 是穿过接收机窗口的全部接收机面积或者表面，单位可以用平方米（ m^2 ）来计量。

2.1.2.2 灵敏度， S_e

灵敏度 S_e 是具有假定的数据传输质量的最小光学强度（例如，BER应优于 10^{-6} ，即 $\text{BER} \leq 10^{-6}$ ）。

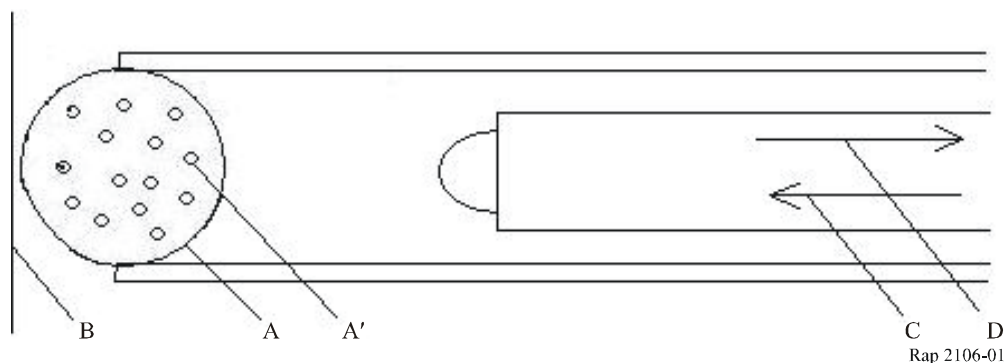
灵敏度的单位应该是dBm，测量灵敏度时应接近FSO接收机窗口。

如果终端具有多接收机窗口，应该指出每个 R_a 的 S_e 和总的灵敏度。

如果终端具有一个由微球体掺入而形成的接收系统，A掺杂了元素A'，按照伴随波束B的共振波长，与具有固定波长和可调节功率、在链路中以包含在微球体中的掺杂元素的共振频率提供能量的激光发射器C相互作用；终端D的灵敏度 S_e 将是这样一个具有相同假定数据传输质量的系统的灵敏度（图1）。

图 1

具有微球体的终端



2.1.2.3 饱和灵敏度, S_s

饱和灵敏度 S_s 是在拥有和没有自动衰减控制(AAC)的情况下,具有假定的数据传输质量的最大光学强度(例如, BER应优于 10^{-6} ;即 $BER \leq 10^{-6}$)。

饱和灵敏度的单位应该是dBm,测量饱和灵敏度时应该接近FSO接收机窗口。

如果终端具有多接收机窗口,应该指出每个 R_a 的 S_e 和总的灵敏度。

饱和灵敏度(即便有AAC)和灵敏度之间的差异表现为一个不断变化的范围。

2.1.2.4 视角, F_v

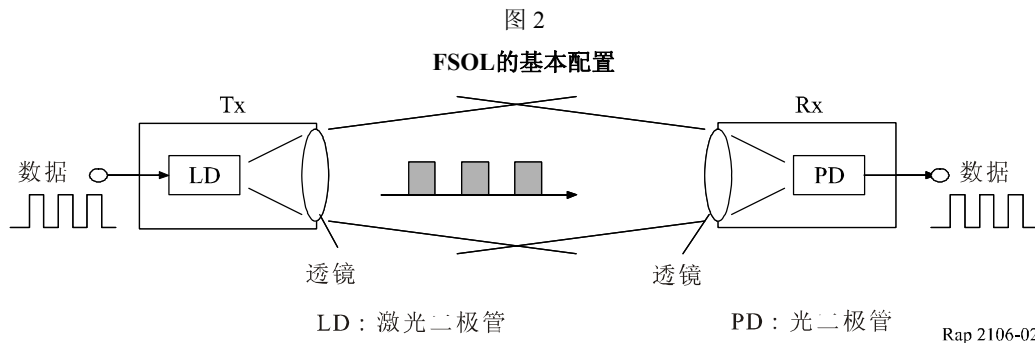
视角 F_v 是中心线和 -3 dB值角度检测之间的角度。这个数值可以表示成半角或全角,但是必须标明;视角的单位可以用毫弧度(mrad)表示。

2.1.2.5 系统损耗, SI

由于发射和接收机测量点的原因,该要素将作为一种指示,不能用于激光器安全等级和链路余量计算。系统损耗的单位是dB。

2.2 系统配置

用于FS应用的FSOL的基本配置如图2所示。



在许多FSOL中,电/光(E/O)或者光/电(O/E)转换功能分别是在Tx的LD中或者Rx的PD中实现的。最近,为了增加链路容量,在发射机和接收机对中 can 包含一些在一个以上的光载波中采用WDM技术的系统[1] [2]。然而,从经济使用的观点来看,WDM系统可能需要进一步的发展,特别是在接收端的分路滤波器技术方面。

FSOL设备通过两端的发射机/接收机对(激光二极管/APD或者PIN二极管)利用激光光束调制双向地交换二进制数据。该设备可用于点对点双向的且在视线之内(LoS)的链路。

每个设备包括若干个模块：

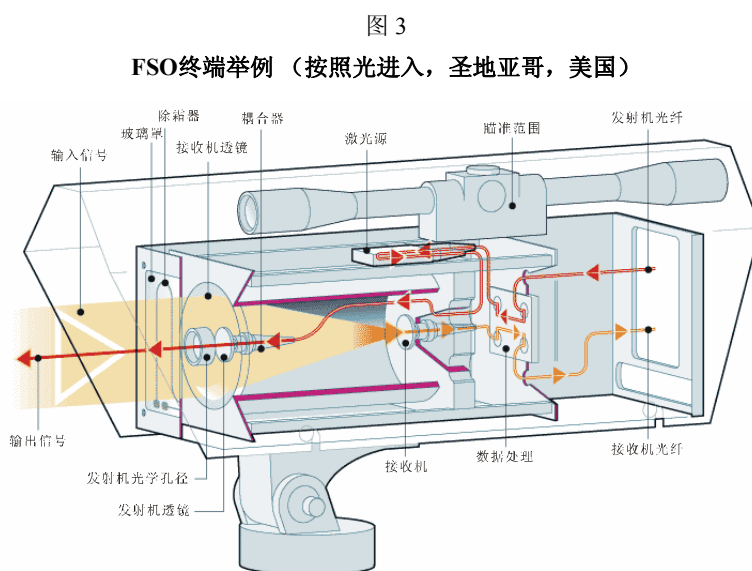
- 对于发送：
 - a) 附属接口：用于发送和接收数字数据的电的或者光的接口；
 - b) E/O转换模块（在有光接口的情况下）；
 - c) 电数字信号的滤波和放大；
 - d) 包含激光器的光传输模块。
- 对于接收：
 - a) 包含二极管的光接收机模块；
 - b) 电数字信号的滤波和放大；
 - c) O/E转换模块（在有光接口的情况下）；
 - d) 附属接口：用于发送和接收数字数据的电的或者光的接口。

有时候随设备一起提供管理软件，该软件可用于配置链路，并且获得来自不同模块的定性的和定量的信息。

附加功能的实现取决于厂家，例如：

- 跟踪系统，ATPC，AAC；
- 无线援助链路，在激光链路中断的情况下，具有有限的速率。

一个FSO设备结构的例子如图3所示。



Rap 2106-03

2.3 基本的系统参数

在规定光学链路时需要考虑的主要参数如下：

距离：这个变量随设备而变化，从几十米到几公里，有些厂家给出了最大距离，有些厂家规定了适用于各种天气条件的典型距离，有些厂家最后提出一个相对于最大值有一定余量的“推荐”距离，这些数值应当理解成数量级，而不是绝对值。

安全性：一个需要考虑的重要因素是设备的激光器种类，因为它的情况对于建立和维护一条FSO链路而言或多或少要容易一些，在定义激光器种类时需要考虑的参数是信号波长、遇到的功率和波束形状。建议选择以IEC 60825-1规范性标准为基础、等级为1或1M的终端。

数据速率和推荐的应用类型：许多系统对于数据速率和协议是透明的；对于一定的数据速率范围，这一点通常相对重要。应用于是取决于系统能够发送的、并且在无线电通信或者数据处理领域内恒定不变的最大容量，速率达200 Mbit/s的透明系统将能够发送如STM-1、ATM、FDDI或者快速以太网信号。为其他的终端指定了数据速率、接口以及一个特定的应用，例如E1（2.048 Mbit/s）或者以太网数据（10 Mbit/s）。

用于FSOL的频率/波长：有两个被FSOL应用广泛采用的主要频率/波长范围，即230-200 THz/1 300-1 500 nm范围和375-385 THz/780-800 nm范围。这些范围相对于其他范围有优势，当经过自由空间时大气吸收会相对较小，而且在光纤系统中，这些波长范围会表现出如此好的传输特性，以至于可以经济地采用半导体光器件。已经开发出了对波长的精确控制技术，特别是在1 500 nm范围附近，在这里通常会考虑WDM技术。在这种关系中，ITU-T第15研究组已经开展了关于适合光纤传输的波长配置研究，从大气传播的观点来看，2 000-2 200 nm的波长范围也很便利，原因是在这个范围内悬浮物散射和分子吸收的影响最小，特别是在2 200 nm附近[10] [11]。这个范围还有另外一个好处是它对大气温度变化造成的光波束弯曲不敏感（见第7.1节）。另一方面，在2 000-2 200 nm范围内较为经济的光学器件对于信号产生和检测还不可行，ITU-R第3研究组（第3J和3M工作组）已经研究了适用于宽带的光学频率的自由空间光学传播特性，包括卫星和陆地链路（见第3节）。

激光二极管的发射功率：用于FSOL的激光二极管（LD）的发射功率通常为10 mW 数量级，因此，在下一节中讨论的链路设计会以这个数值为基础，然而，技术的发展将会产生拥有高得多容量的光学器件，在不久的将来，这可能会扩展FSOL的领域和应用。

在选择一个系统时对下列次要的参数也要加以考虑：

- 光学链路运行的波长：这个参数会影响终端的安全等级；
- 影响链路余量的光学发射机和/或接收机的类型和数量；
- 简易的实现和维护操作过程；
- 简单、友好的监控软件，可以管理只来自一个站点的两个（或几个）终端（远程控制）；
- 以及，系统的成本。

3 与链路设计有关的自由空间传播特性

本节以ITU-R P系列建议书中的研究结果为基础，介绍了FSOL的自由空间传播特性，更多的关于本节中素材的背景，可参见相关的P系列建议书（ITU-R P.1814建议书和ITU-R P.1817建议书）。

3.1 晴天传播

在光波传播中，除了所谓的自由空间损耗以外，还要经历大气衰减，即便是在晴天。这个衰减 L_{atm} 是由瑞利散射和/或者分子吸收引起的，其影响主要取决于波长。

而且，大气内温度梯度变化会引起接收功率波动，这会导致光波传播路径中波束弯曲、光点跳动或者闪烁。

通常，对于不到1 km长的链路，在第2.3节中提到的波长范围（适用于FSOL的频率/波长）内， L_{atm} 的影响不是那样大，由这种现象引起的链路中断，能够简单地通过在发送端调整光波束散度以至于在接收机端的波束光点的直径变成一定的尺寸例如达到几米，而得以减少。

针对传播的影响，提高链路可用率的另外一个方法是在电气层采用信号重传体制和/或者前向纠错。

3.2 雾的影响

3.2.1 采用大气能见度的雾衰减评估

雾产生的衰减是由于Mie散射引起的[4]，Mie散射取决于微粒的数量（雾浓度）。直接测量雾浓度或者获得它的统计数据通常会很困难，雾产生衰减效应 Att_{fog} （dB/km）可以与大气能见度相关 V （km），能见度定义为以天空为背景我们可以辨认一个黑色物体的最大距离[5] [6]。更准确地说，能见度是为气象学目的而定义的，它描述的是人类观测者估计的大气透明度。按照气象光学距离、采用大气透射计或者扩散计可以测量得到能见度。

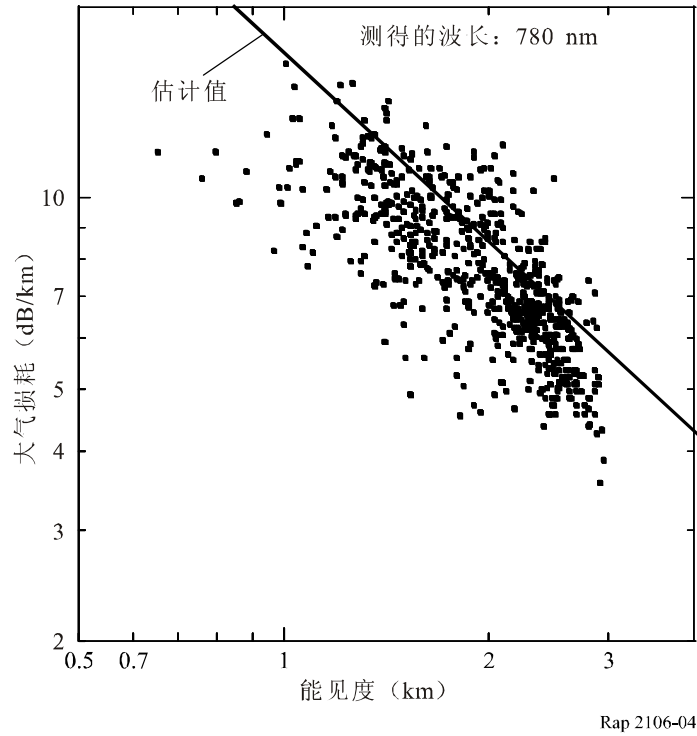
在当前情况下，能见度 V 的度量是以发送光功率降到它初始值的 ϵ 倍时的距离来给出的，在文献中，可以找到 ϵ 的下列两个数值 $\epsilon = 0.02$ 或者 $\epsilon = 0.05$ 。

于是， Att_{fog} 和 V 之间的关系可以用下面公式表示，在 V 小于3 km的范围内该公式可以独立地运用，而与雾的类型和光波长无关。

$$Att_{fog} = 10 \log_{10}(\epsilon)/V \quad (1)$$

因此，雾产生的光波衰减可以利用能见度统计数据估计，基于公式（1）的上述预测方法已经得到证实，并在链路设计中加以考虑。图4所示的是对于测量得到的数据 Att_{fog} 和 V 之间的关系[7]。

图 4
雾产生的大气衰减



3.2.2 关于悬浮物衰减的详细分析（雾）

在本小节中，提供了当雾的类型已知时更加详细的分析。

大气衰减是由存在于大气中的悬浮物和气体分子吸收和红外光色散的累加效应引起的。Beer Lambert关系式给出了随距离而变化的透光率：

$$\tau(\lambda, d) = \frac{P(\lambda, d)}{P(\lambda, 0)} = \exp[-\sigma(\lambda)d] \quad (2)$$

其中：

$\tau(\lambda, d)$: 距离发射机为 d 处的透光率；

$P(\lambda, d)$: 距离为 d 处的发射功率；

$P(\lambda, 0)$: 发射功率；

$\sigma(\lambda)$: 每单位长度特定的衰减或者消光系数。

经过 d (km) 长的链路后雾产生的衰减通过下面表达式与透光率联系起来：

$$Att_{fog,d} = 10 \log_{10}(1/\tau(\lambda, d)) \quad \text{dB} \quad (3)$$

消光系数是4项之和：

$$\sigma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (4)$$

其中:

- α_m : 分子吸收系数 (N_2 , O_2 , H_2 , HO , CO_2 , O_3 , ...)
- α_a : 悬浮物的吸收系数 (存在于大气中的小的固体或者液体微粒 (冰, 灰尘, 烟, ...))
- β_m : 当微粒的尺寸小于波长时, 由波的相互作用产生的瑞利散射系数。
- β_a : Mie散射系数, 它出现在当微粒的大小与发送波长是同一数量级时。

吸收在红外区占主要地位, 而散射在可见光和紫外线区占主要地位, 基本上, 大气衰减 (波长的函数) 与能见度成反比, 能见度是在有雾的情况下描述大气不透明度的一个参数。采用下面的Al Naboulsi和Al关系式, 可以表示出数值较小的分子和大气吸收系数以及瑞利散射系数、消光系数:

当温暖、潮湿的空气流过较冷的表面时会产生平流雾:

$$\sigma(\lambda)_{fog,adv} = \frac{0.11478\lambda + 3.8367}{V} \quad (5)$$

当气象条件有利时, 夜晚辐射期间气团的辐射冷却会产生辐射雾:

其中:

$$\sigma(\lambda)_{fog,rad} = \frac{0.18126\lambda^2 + 0.13709\lambda + 3.8367}{V} \quad (6)$$

其中:

- λ : FSO波长 (μm)
- V : 能见度 (km)。

注1 – 对于激光器辐射和存在于FASCOD中的两种雾: 平流雾和辐射雾, 这些关系式用于计算当波长在690到1 550 nm之间且能见度在50到1 000 m之间时雾的衰减。这两个关系式仅适用距离在50 m到1 000 m之间时, 由用户选择其中一个与雾的类型相对应的关系式。

3.3 雨的影响

下雨时, 衰减是由雨滴的几何散射引起的。该衰减 $Attrain$ (dB/km) 与波长无关, 在理论上与雨滴的大小分布 $f(r)$ 有关, 如下式所示:

$$Attrain = 27.29 \times 10^5 \cdot \int_0^{\infty} r^2 \cdot f(r) dr \quad (7)$$

其中:

- r : 雨滴的直径 (m)

对于某一地点和链路距离， fI 可以由降雨量（在多种情况下一个小时的降雨量 R （mm/h））的统计数据给出，如下式[8]所示：

$$fI = B \exp (C R^k r) \quad (8)$$

根据在日本收集的统计数据，在公式（8）中使用的参数举例：

例子（以马歇尔和帕默尔模型为基础）； $B = 0.16$ ， $C = -82$ 和 $k = -0.21$ 。

则通常采用公式（7）和（8）就可以得出随着降水强度 R （mm/h）而变化的 Att_{rain} 的影响。

$$Att_{rain} = \alpha * R^\beta \quad (9)$$

降雨强度是用于局部描述降雨的基本参数，按照地点给出了参数 α 和 β （如表1所示）。在法国获得的参数与ITU-R P.1814建议书中的参数一致。

表1
用于雨衰估计的参数举例

地点	α	β
日本	1.58	0.63
法国	1.076	0.67

上述预测方法，基本上与毫米范围电波的预测方法类似[9]，该方法已经得到证实能够对光波传播提供较好的估计[5] [7] [15]。

测量降雨强度可以直接采用雨量计或者气象雷达，如果已知由光功率链路余量推导得到的链路余量，就可以通过二分法推导出由降雨引起的链路中断概率。采用在法国测量得到的参数进行计算的例子如下：

例如：

$$R = 18 \text{ mm/h}$$

$$Att_{rain} = 1.076 \times 18^{0.67} = 7.46 \text{ dB/km}$$

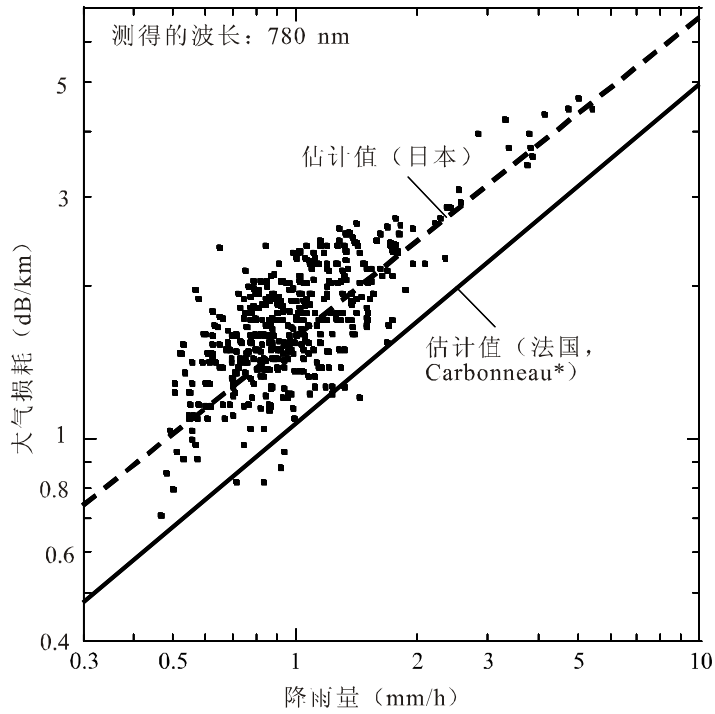
$$Att_{rain} = 7 \text{ dB/km.}$$

图5a)和图5b)所示的是采用表1中参数的 Att_{rain} 和在日本测得数据 R 之间的关系[7]。可以看出，在大降雨量的地区，基于ITU-R P.1814建议书的估计也能显示与在日本获得的测量数据非常接近。

图 5

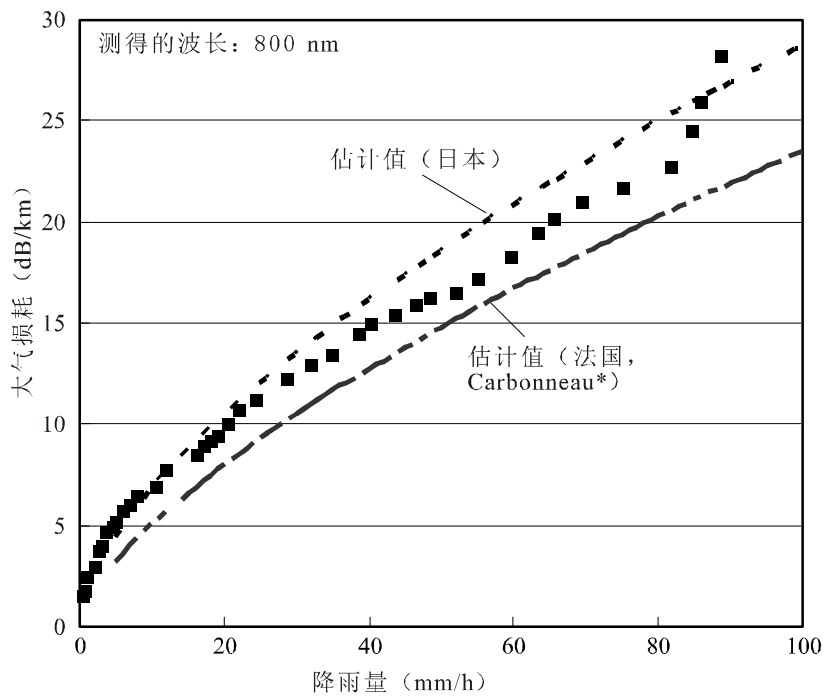
降雨引起的大气衰减

a) 例1



*这个估计值与ITU-R P.1814建议书一致

b) 例2



*这个估计值与ITU-R P.1814建议书一致

3.4 雪衰

降雪引起的衰减按照下面关系式随着波长 λ_{nm} 和降水强度 S (mm/h) 而变化:

— 湿雪 (海拔高度 < 500 m) :

$$Att_{snow} = (0.0001023 * \lambda_{nm} + 3.7855466) * S^{0.72} \quad \text{dB/km} \quad (10)$$

— 干雪 (海拔高度 > 或 = 500 m)

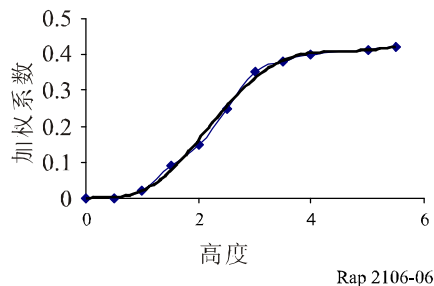
$$Att_{snow} = (0.0000542 * \lambda_{nm} + 5.4958776) * S^{1.38} \quad \text{dB/km} \quad (11)$$

降雪强度是用来局部描述下雪的基本参数, 在气象站对它进行测量。

下雪的降水特性可以由高度变化系统中下雨的降水特性推导得到。对于任一地点, 随高度 (km) 而变化的加权系数, 被应用于超过平均每年任何给定百分比 p 的下雨降水量 R_p (图 6)。如果已知由光功率链路余量推导得到的链路余量, 我们就可以通过二分法推导出由降雪引起链路中断的概率。

图 6

随高度变化的雪/雨加权系数



例如:

海拔高度 = 147 m, $\lambda = 850$ nm, $S = 40$ mm/h

$$Att_{snow} = ((0.0001023 \times 850) + 3.7855466) \times 40^{0.72} = 55.14 \text{ dB/km}$$

$$Att_{snow} = 55 \text{ dB/km.}$$

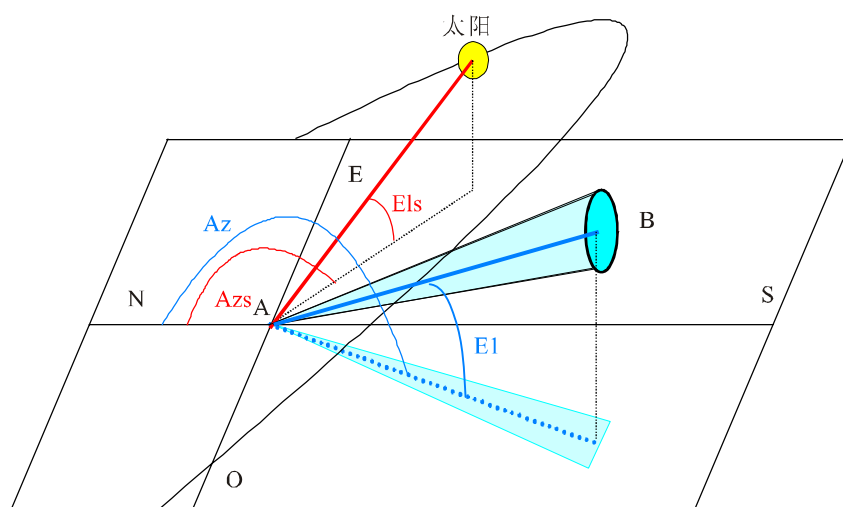
3.5 环境光衰减

日光会合发生在太阳或者太阳的反射影像在光学接收机的瞬间视野 F_v 内或者接近光学接收机的瞬间视野 F_v 时。通常, 接收机至少要和发射散度一样大, 这里我们将计算太阳的位置与光学链路平行的概率, 穿透到接收机内部的太阳功率要大于接收到的来自发射机的功率。

3.5.1 太阳轨迹

下图7示意性地描绘了对于一条FSOL天空中太阳轨迹的几何形状 (A是接收机, B是发射机)。

图 7
对于一条FSOL示意性的太阳轨迹



Rap 2106-07

可以由太阳的赤纬和赤经推导出一年中每一天、每一小时、每一分、每一秒不同的太阳参数（高度，方位角）。

3.5.2 接收机端的太阳功率

太阳辐射的功率（W/m²）由下式定义：

$$\text{Power_radiated} = 1200 * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \text{Elevation}_{\text{radian}}\right) \quad (12)$$

其中：

$\text{Elevation}_{\text{radian}}$ ： 太阳高度。

下式给出了穿透到接收机内部的功率：

$$P_{\text{solar}} = F_{\text{solar}} * \text{Power_radiated} * \text{Capture_surface} * \text{Width_band}_{\text{receiver(nm)}} / 100 \quad (13)$$

其中：

F_{solar} ： 表示太阳频谱功率的波长函数

Capture_surface ： 捕获表面接收机

$\text{Width_band}_{\text{receiver (nm)}}$ ： 宽带接收机。

3.6 闪烁效应

在传播媒介内热量扰动的影响下，应关注随机可变大小（10 cm - 1 km）和不同温度的单元的形成。这些不同的单元具有不同的折射系数，因此会引起散射、多径和到达角度变化：接收到的信号以0.01到200 Hz范围内的频率快速地波动，波阵面以同样的方式变化引起波束的聚焦与散焦。这种信号波动被称作闪烁，闪烁的幅度和频率取决于与波束的直径相比单元的大小。当杂质与波束截面相比较大时，波束是偏离的，当杂质很小时，波束会变宽。

对流层的闪烁效应通常从观测信号幅度 χ (dB)的对数(“对幅度取对数”)开始进行研究,定义为以分贝计的它的瞬时幅度和它的平均值的比,波动的强度和速度(闪烁的频率)随着波的频率而增加,对于平面波、较弱的扰动和特定的接收机,闪烁方差 σ_χ^2 (dB²)可以用下式表示:

$$\sigma_\chi^2 = 23.17 * k^{7/6} * C_n^2 * L^{11/6} \quad (14)$$

其中:

k (m⁻¹): 波形数量 $\frac{2\pi}{\lambda}$

L : 链路长度 (m)

C_n^2 (m^{-2/3}): 代表扰动强度的折射系数的结构参数,随着粗糙度、太阳辐射、湿度和陆地反射率而变化。

闪烁的峰-峰幅度等于 $4\sigma_\chi$,与闪烁有关的衰减等于 $2\sigma_\chi$,对于强扰动,有人观测到由上面关系式给出的方差的饱和状态[13],有人注意到 C_n^2 参数在毫米和可见光波长时具有不同的数值[14]。毫米波对于湿度变化特别敏感,而对于可见光,折射系数主要随着温度而变化(水蒸气的影响可以忽略)。有人得到在毫米波频段 C_n^2 的值大约为 10^{-13} m^{-2/3}时是平均的扰动(通常在毫米波频段, $10^{-14} < C_n^2 < 10^{-12}$),在可见光频段, C_n^2 的值大约为 2×10^{-15} m^{-2/3}时是轻微的扰动(通常在可见光频段, $10^{-16} < C_n^2 < 10^{-13}$) [13]。

3.7 其他因素

在户外传播中,FSOL几乎不会引入背景噪声。然而当太阳射线穿过FSOL的接收波束方向时,FSOL可能会被太阳射线中断。在太阳射线与接收波束的主轴相交的情况下,透镜的聚集光线热效应可能会变得很强,以至于损坏接收机。应选择光学链路的方向避免与太阳射线相交。

4 固定业务中的应用

4.1 一般特性

FSOL具有下列优点:

- 宽带或者高数据速率;
- 小并且简单的设备;
- 无须许可地操作;
- 有优势的成本;
- 快速而简单的配置;
- 快速的链路重用和重新定位。

对于一些特殊的应用，除了传统固定链路或者那些以光纤为基础的链路所呈现的优点以外，FSOL还具有几个另外的优点。以下是一些可能的应用举例：

- 用于特殊事件的链路；
- 临时链路：为了等待确定的传统链路，利用有限的时间快速建立链路；
- 应急链路：在链路中断的情况下建立一条应急链路；
- 站间链路，独立的网络（PDH，SDH，ATM，以及网10/100/1000）；
- 光学闭合环路；
- 备份链路；
- 密集网络；
- 移动基础设施，例如GSM或者IMT-2000毫微蜂窝或者微微蜂窝链路。

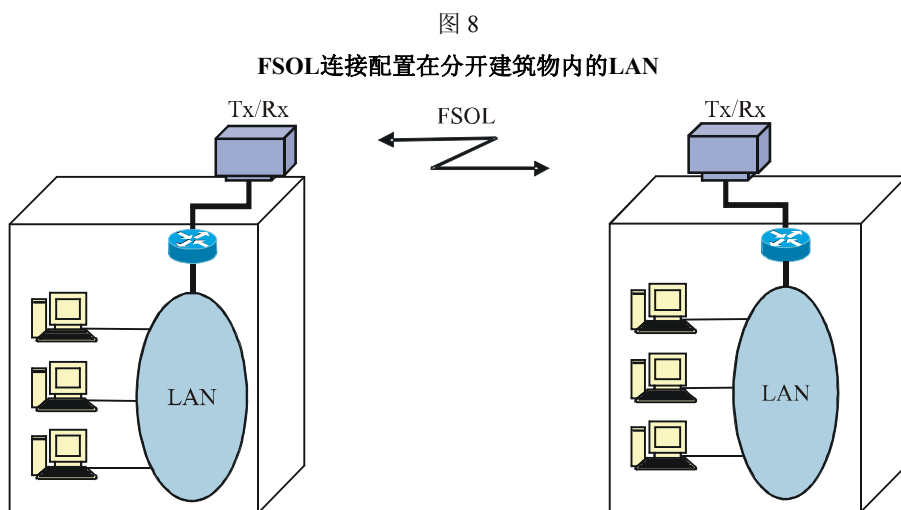
但FSOL具有以下缺点：

- 与距离有关的可用率；
- LoS条件。

另一方面，经过自由空间的光波传输必须克服传播引起的一些问题，如在第3节中讨论的一样。

4.2 基本应用举例

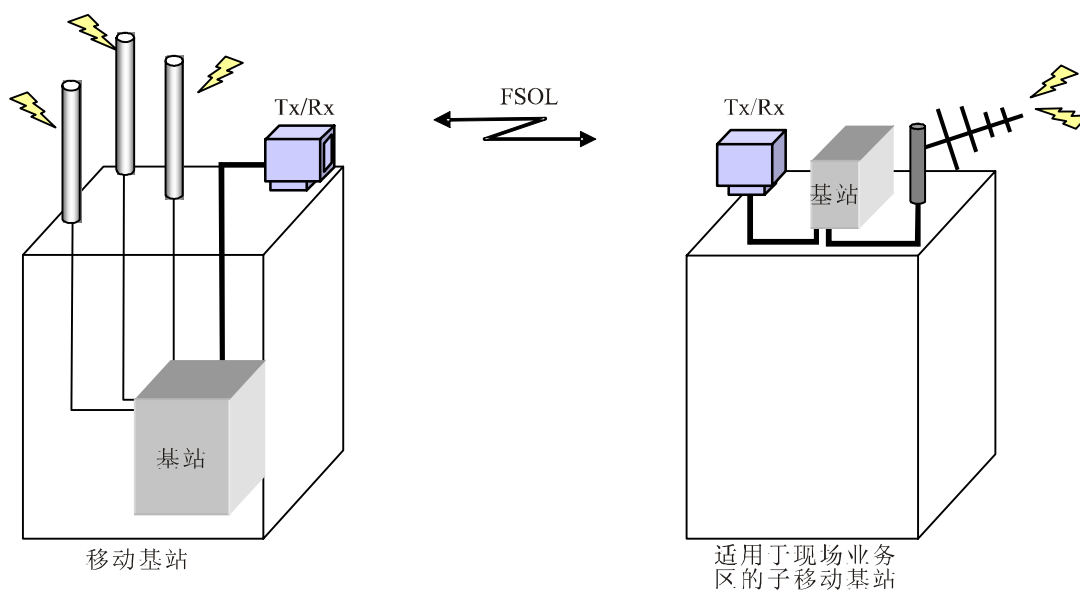
利用FSOL的优点，可以在有限的距离内实现典型的FSOL应用。本节介绍的是建筑物之间局域网（LAN）连接链路和用于移动基础设施延伸连接的例子，如图8和图9所示。



Rap 2106-08

图 9

FSOL延伸移动基础设施



Rap 2106-09

4.3 实际配置举例

本节介绍了一个FSOL配置的例子，与光纤系统一起构成宽带本地网络解决方案。

图9所示的是采用FSOL与光纤系统相结合的方式、用于高速互联网访问的学校网络配置。这样的宽带网络基础设施已经配置在许多学校中，利用卫星、光纤、固定无线接入到FSOL各种传输介质。在日本，FSOL被用于到100多所学校的链路中。

还有这样的情况，某一栋建筑物被用作中继设备，提供到1所以上学校的延伸链路，使用相同频率/波长的信号容易实现这种分流，表2给出了图10中FSOL所采用的系统参数。

表 2

FSOL参数

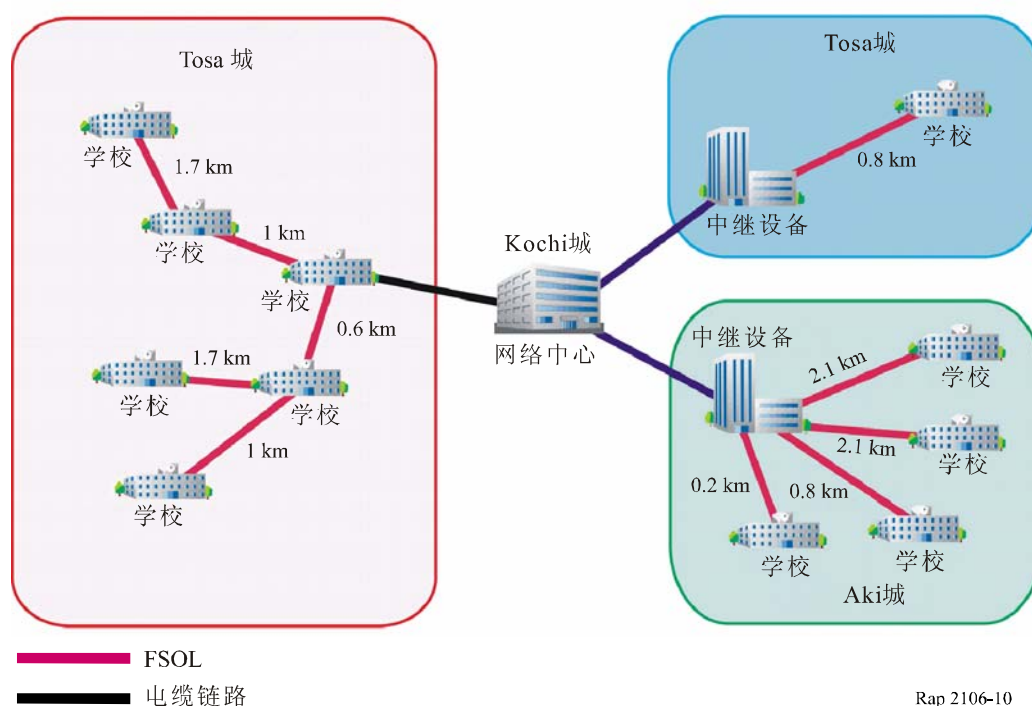
最大的链路长度 (km)	约2 ⁽¹⁾
传输容量 (Mbit/s)	300
衰减的限度 (dB)	20
光学器件 (波长范围)	激光二极管/Si-APD (0.8 μm 频带)
电缆接口	光纤1.3 μm

⁽¹⁾ 99%以上的链路可用率

APD: 雪崩光敏二极管

FSOL的链路可用率是以当地气象部门积累的能见度统计数据为基础设计的（见第3.2.1节）。

图 10
使用FSOL的宽带校园网络部署举例



Rap 2106-10

5 链路设计考虑事项

5.1 链路余量

在FSO传输中需要知道的重要因素之一是激光器的链路余量，为了使用预测模型，必需的设备参数为（没有穷举）：

- 发射功率；
- 接收机的灵敏度；
- 接收机的捕获面积；
- 发送波束的散度。

光学链路余量是在接收机灵敏度之上的有效功率，其定义见下面关系式：

$$M_{link} = E_p + |S_s| - Att_{Geo} - Att_{mol} - S_l \quad (15)$$

其中：

- M_{link} : 链路余量 (dB)
- E_p : 发射信号的功率 (dBm)
- S_s : 灵敏度 (dBm)
- Att_{Geo} : 链路的几何衰减 (dB)
- Att_{mol} : 链路的分子衰减 (dB)
- S_{loss} : 厂家给出的设备损耗 (dB) (可能要乘以2, 应该为0 dB)。

例如：

$$\begin{aligned}
 d &= 271 \text{ m}, \theta = 4 \text{ mrad}, E_p = 12 \text{ dBm}, S_s = -50 \text{ dBm} \\
 Att_{Geo} &= 21 \text{ dB} \\
 Att_{mol} &= 0.11 \text{ dB} \\
 S_{loss} &= 0 \text{ dB} \\
 M_{link} &= 12 + |-50| - 21 - 0.11 - 0 = 40.89 \\
 M_{link} &= 41 \text{ dB}。
 \end{aligned}$$

在下面章节中，描述了不同的固定衰减，以及在计算链路余量时必须要考虑的固定衰减和其他一些应知道的数值。

为了在同样的FSOL上增加数据传输速率，当采用WDM传输时，对一个波长采用以上关系式会更容易。

5.1.1 光点直径

光点直径是按照一个设定的波束散度在距离“ d ”处的波长正面，由下面关系式给出：

$$S_d \approx d \times \tan(\theta) \quad (16)$$

其中：

- θ : 波束散度（全角）（rad）
- d : 链路距离（m）
- S_d : 距离为 d 处的光点直径（m）。

例如：

$$\begin{aligned}
 d &= 271 \text{ m}, \theta = 4 \text{ mrad} = 0.004 \text{ rad} \\
 S_d &= 271 \times \tan(0.004) = 1.084 \\
 S_d &= 1.084 \text{ m}。
 \end{aligned}$$

5.1.2 几何衰减

由于发射机发出的波束被发散（1-3 mrad），接收单元将只能收集到发射能量的一部分。下面关系式给出了几何衰减：

$$Att_{Geo} = \frac{S_{surf}}{S_{capture}} = \frac{\pi (d\theta)^2}{4 S_{capture}} \quad (17)$$

其中：

- S_{surf} : 在距离 d 处的光点表面
- $S_{capture}$: 接收机面积的表面（Ra）
- θ : 波束散度（Bd）
- d : 发射机 - 接收机距离。

例如：

$$\begin{aligned}
 S_d &= 0.92 \text{ m}^2, Ra = 0.00785 = 7.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \\
 Att_{Geo} &= 10 \log_{10} (0.9228 / 0.00785) = 20.70 \text{ dB} \\
 Att_{Geo} &= 21 \text{ dB}。
 \end{aligned}$$

以dB计，该衰减为：

$$Aff_{dB} = 10 \log_{10}(Aff) \quad (18)$$

5.1.3 分子衰减

众所周知分子衰减（O₂, H₂, CO₂, O₃, ...）是大气衰减的一部分，与所使用的波长部分相关，表3中给出一些典型的数值（线性值）：

表 3
分子衰减的典型值

波长 (nm)	Att_{in} = 特定的分子衰减 (dB/km)
550	0.13
690	0.01
780	0.41
850	0.41
1 550	0.01

下面关系式给出了一条假定距离链路的分子衰减：

$$Att_{mol}(dB) = Att_{in}(\lambda) * d \quad (19)$$

其中：

Att_{in} : 线性分子衰减
 d : 发射机 - 接收机距离

例如：

$d = 271 \text{ m}$, $\lambda = 850 \text{ nm}$ 则 $Att_{in} = 0.41 \text{ dB/km}$
 $Att_{mol} = 0.271 \times 0.41 = 0.111 \text{ dB}$
 $Att_{mol} = 0.11 \text{ dB}$ 。

5.1.4 接收电平

接收电平是接收机在给定距离处接收到的功率电平，这个数值对于安装过程很重要，由下面公式给出：

$$R_{level} = Ep - Att_{Geo} - Att_{mol} - S_{loss} \quad (20)$$

其中：

R_{level} : 接收电平 (dBm)
 Ep : 发射信号的功率 (dBm)
 Att_{mol} : 链路的分子衰减 (dB)
 S_{loss} : 厂家给出的设备损耗 (dB) (可能要乘以2, 应该为0 dB)。

例如：

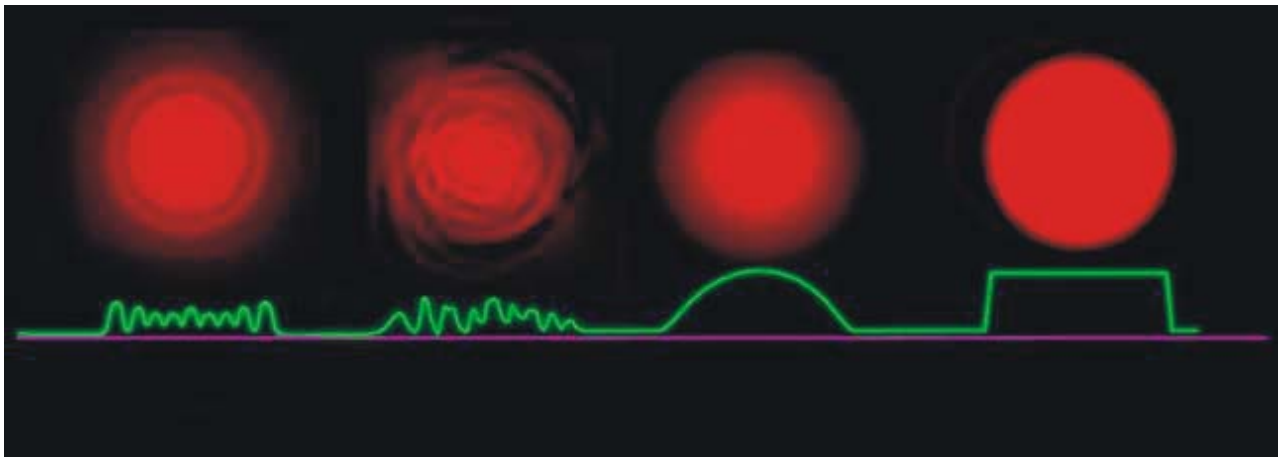
$$\begin{aligned}
 d &= 271 \text{ m}, \theta: 4 \text{ mrad}, E_p: 12 \text{ dBm}, S_s: -50 \text{ dBm} \\
 Att_{Geo} &= 21 \text{ dB} \\
 Att_{mol} &= 0.11 \text{ dB} \\
 S_{loss} &= 0 \text{ dB} \\
 R_{level} &= 12 - 21 - 0.11 - 0 = -9.11 \text{ dBm} \\
 R_{level} &= -9 \text{ dBm}。
 \end{aligned}$$

5.1.5 波长正面波束均匀性

波长正面波束均匀性的影响之一是光源的质量和使用的波，这些因素会影响投射光点的质量，因而影响链路评估。理想的目标是获得一个功率均匀分布的均匀光点（顶环），波长正面波束的功率差异不应超过3 dB。图11所示的是各种光点和均匀性。

图 11

FSO的各种光点和均匀性



Rap 2106-11

5.1.6 单位距离的余量

对于设想的一条具有给定距离的链路，为了获得一个终端对比因素，需要知道的重要因素之一（但不是唯一的）是单位距离的余量。它的定义见下面关系式：

$$L_{margin}(\text{dB/km}) = M_{link} / d \quad (21)$$

其中：

- L_{margin} : 单位距离的余量 (dB/km)
- M_{link} : 链路余量 (dB)
- d : 距离 (km)。

例如：

$$\begin{aligned}d &= 0.271 \text{ km}, \quad M_{link} = 41 \text{ dB} \\L_{margin} &= 41/0.271 = 151.29 \text{ dB/km} \\L_{margin} &= 151 \text{ dB/km}.\end{aligned}$$

6 在特定气候地区FSOL的配置

如前面章节所述，FSOL通常需要相当大的余量以备降雨和雾。如果FSOL配置在几乎没有雨的地区，链路的长度将大大增加。通过简单计算，可以认为减免20 dB的余量将会导致链路长度增加10倍。然而在这种情况下，必须要考虑大气衰减 L_{atm} 效应（见第3.1节）以及波束弯曲的影响。这些主要是由分子吸收或者温度变化产生的大气折射所引起的效应能够在起伏衰落即接收电平的波动中观测到。对于第3.6节中公式（14）定义的、在沙漠中的波动范围需要作进一步的研究。然而，对于半旱地区，Zilbermann *et al.* [12]以大量的成象LIDAR测量结果为基础，已经开发出关于折射湍流强度 C_n^2 的中东垂直剖面模型，这个模型能够用于沙漠地区直到将来提出一个更加强化的模型。

作为一种克服这种起伏衰落的方法，使用独立透镜排列的分集接收可能会有效。

需要考虑的另外一个问题是沙漠中沙暴的影响，沙暴可能会严重地遮挡发射机和接收机之间单跳的能见度条件。沙漠中被风吹起的土和沙由松散的和细微颗粒的土壤组成（例如钙、硅、铝和硫磺）。沙暴对FSOL能见度的影响取决于风速，虽然有某一款计算机程序可用来计算沙漠地区总的（吸收和散射）传输系数，但这个问题还没有被充分地研究，可能还需要作进一步的研究。

然而，采用沙漠模型（在这里悬浮物基本上是悬浮的沙粒）的FASCOD计算机程序（来自ONTAR）暂时能够用于计算沙漠地区总的（吸收和散射）传输系数。必要的输入数据是地水平面的能见度和高度为10 m处的风速。用户能够定义它自己的气候和悬浮物模型来计算大气衰减，或者使用由Zilbermann和Kopeika[12]从地中海地区（以色列）不同高度的LIDAR测量结果中获得的悬浮物大小分布、体积和数量浓度。

7 在操作方面的考虑事项

光学链路可以配置在任何时间和任何地方，这是基于一个假设 – 可能不需要相互调整来避免由不同操作员操作的这些链路之间的干扰。

从理论上讲，FSOL之间的干扰可能发生在下列情况下：

- 当两个系统采用相同的频率（波长）或者相互之间接近的频率（波长）时；
- 同时，它们在一个地理上靠近的分隔区内运行。

当所使用的频率相互接近时，光波的发射频谱可能会与另一条FSOL的频谱重叠，从而产生不受欢迎的干扰。在这种意义上，为了避免FSOL之间干扰的影响（见第2.3节），选择频率（波长）可能是值得操作员考虑的事情。

然而，除非两个链路运行在一个十分有限的地理环境中，干扰将不会产生有害的影响。如第3.1节所述，在接收机端通常要对光波束的光点进行调整，使得对于长度约为1 km的链路，光点的直径大约为几米。这意味着FSOL的发射功率会非常集中在孔径角度为 0.1° 数量级的窄波束上。另一方面，接收机端的透镜孔径具有稍微宽一些的角度，以便灵活地适应建筑物摇动或者其他不稳定因素。应该注意到在接收波束的光点之外光波功率将会明显地减少，例如数十dB。

因此，可以认为如果操作员的FSOL不是采用相同的频率（波长）、几乎平行地配置，它们之间的干扰问题就不大可能存在。

在第3.7节中讨论的太阳射线效应可能需要操作员更多地注意FSOL站的地点选择。

7.1 传播时间

FSO设备的另外一个引人关注的特性是它的数字数据传输速率；举例来说这个特性可能允许丢弃LAN链路的路由器。

实际上，大多数FSO设备对于传输协议透明，通常对数据的内容或者性质不作处理，这会提供相对短的传播时间。

在计算到达入口的传播时间时应考虑的参数为：

- FSO设备的电子处理时间（发射机和接收机）；
- 光在设备A和设备B之间的大气中的传播时间（光在大气中的传播时间：大约为 3×10^{-9} s/m）；
- 到达入口的传播时间是这两个参数之和；
- 例如：
 - 500 m长的链路；
 - 数据速率为155 Mbit/s；
 - FSO设备的电子处理时间举例： $3 \times 10^{-7} \times 2 = 6 \times 10^{-7}$ s；
 - 光在设备A和设备B之间的大气中的传播时间： $500 \text{ m} \geq \text{传播时间} 1.5 \times 10^{-6}$ s；
 - 传播时间为： $6 \times 10^{-7} + 1.5 \times 10^{-6} = 2.11 \times 10^{-6}$ \Leftrightarrow 即为2.11 μ s。

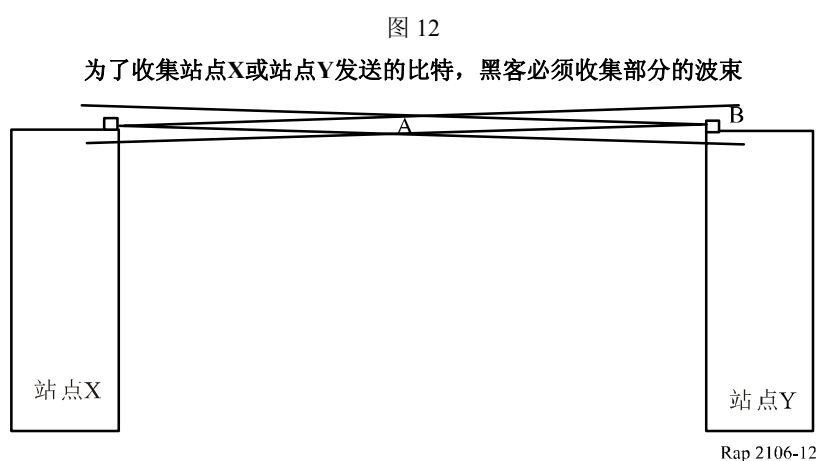
7.2 传输数据机密性

对于利用激光的数据传输，大多数厂家采用“开-关”类型的幅度调制，传输协议通常是透明的，但是“窃取”信息的可能性十分有限。

除了直接作用于对设备或者它的入口以外，某一个人“要恢复”发送的数据只有两种方法：利用大量的技术技巧和复杂的介入条件。

只有当实施下列操作时信息黑客才有可能：

- 1 从同一个厂家获得相同的FSO设备，用来收集和解码数据。
- 2 进行数据“收集”，一部分的、然而方向性很强的波束。并且“恢复者”要有足够的的能力处理它们（图12）：
 - A在两个站点之间，仅仅要获取由站点X或者站点Y发出的数据，附加的难点在于要避免切断波束。
 - 或者，例如，B在Y站点后面，对于由站点X发出的数据，知道信号离开信源以后的衰减非常重要。
 - 或者，例如，B在站点Y设备的前面，对于由站点Y发出的数据，附加的难点在于要避免切断波束。
- 3 最后，为了理解收集到的数据，最后的难点在于要知道传输协议。



7.3 关于实现FSOL的指导

7.3.1 FSO安装过程

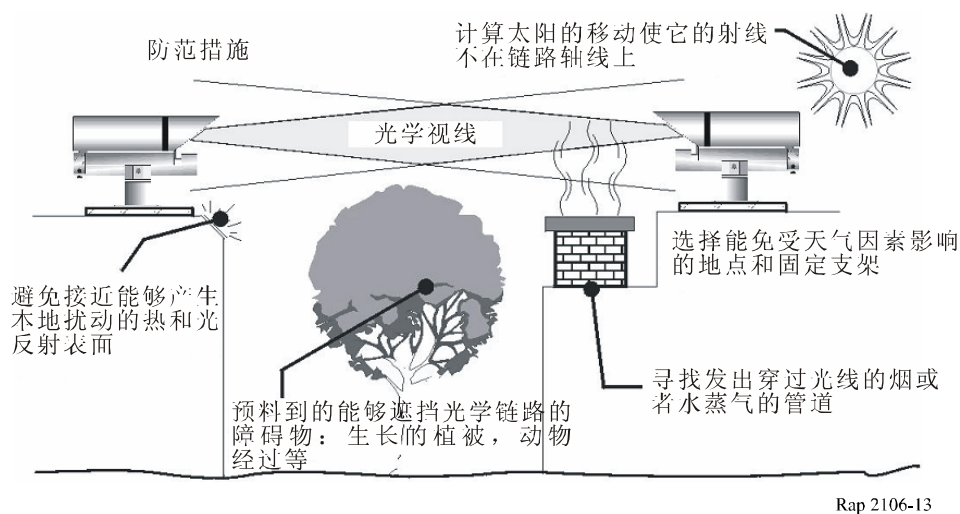
通常，对于固定无线系统，采用相似的方式设置FSO设备：

- 为了限定链路的利用率，对链路的工程处理（例如，采用“FSO预测”软件）；
- 在高处安装（建筑物、铁塔、水塔…）；
- 视线内在目前或未来的轨迹中没有障碍；
- 一条链路的安装时间少于一天。

但是由于FSO的特殊技术，在安装过程中应考虑一些因素和防范措施（图13）。

图 13

FSO安装防范措施



已知设备的特性以后（激光波束的低发散度），非常精确的对准是必需的，发射机和接收机的对准表现为光学链路的耦合，机械振动之后这些对准会被打乱，通信系统的装配工必须：

- 在固定的支架或者承重墙上安装设备，这样设备经历振动或者冲击的可能性较小（墙的边缘，侧墙…）；
- 避免光学器件直接对准太阳射线；
- 避免接近会产生大气扰动的因素（烟囱，反射面…）。

7.3.2 FSO对准过程举例

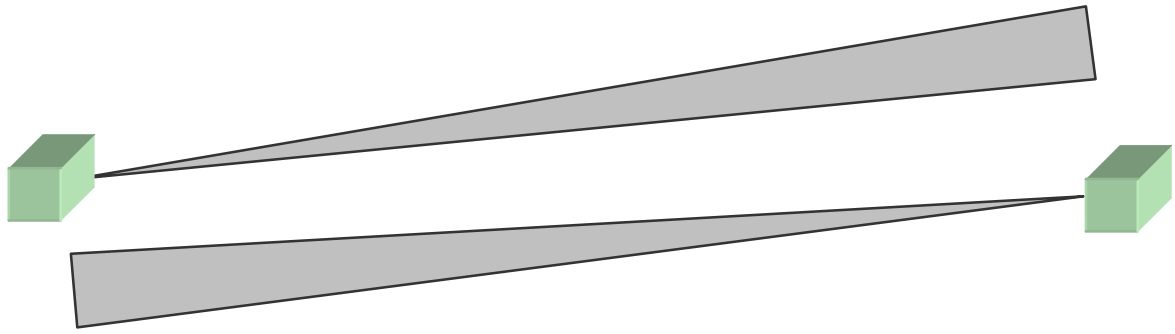
利用一些预备的计算得到的数值就可以进行FSO的对准过程，例如：

- 接收电平；
- 光点直径。

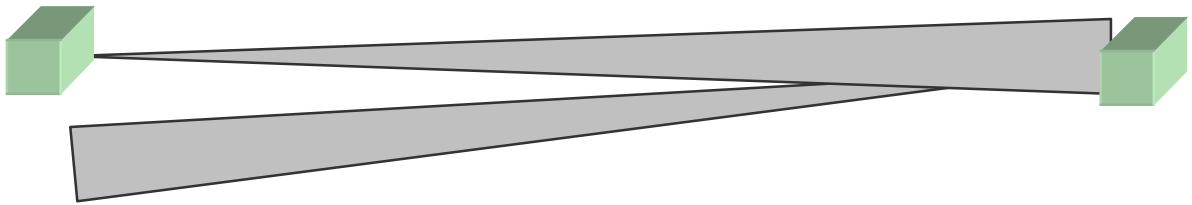
初级对准是通过在两端采用视觉高地和方位对准获得的。

应利用照相机、声级、bip频率、功率计指示来保持精确的对准，并按这些步骤实施（图14和图15）。

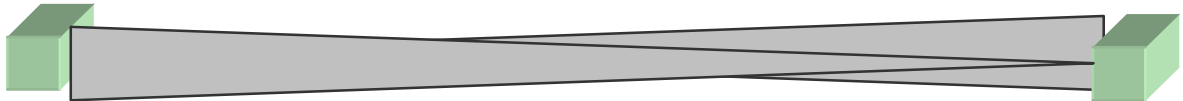
图 14
对准过程举例



a) 第1侧的FSO波束对准第2侧的FSO接收机



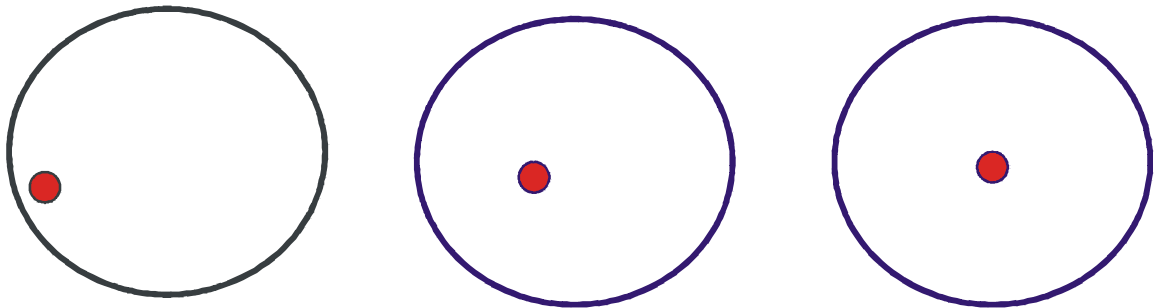
b) 第2侧FSO波束对准第1侧的FSO接收机



c) 另外，站点1的波长正面波束（紫色）相对于站点2的接收机面积（Ra）（红色）要精确地位于中心，反之亦然（在高度和方位上）

Rap 2106-14

图 15
精确对准过程



Rap 2106-15

7.4 多条FSOL

在采用相同波长和相同的接收电平实现多条FSOL的情况下，为了避免比特差错应注意下列事项：

- 两条平行的或者接近平行的FSOL之间的最小光点直径间隔应比较短距离FSOL的光点直径大两倍以上；
- 两条FSOL之间的最小的方向夹角应该为较短距离FSOL的全角散度的两倍；
- 应注意到ITU-T第15研究组关于这个项目已经开发了ITU-T G.640建议书 - 用于自由空间光学系统的协同定位纵向兼容接口。

8 小结

本报告考虑了用于FS应用的FSOL的特性以及它们的技术/操作要求，在以前章节中给出的考虑事项集中在用于固定业务应用的FSOL，注意到有其他类型的FSOL，例如属于移动业务或者空间业务的FSOL。需要进一步研究或者考虑的项目概括如下：

- 在光学器件方面的技术发展趋势；
- FS应用的扩展；
- 如果有必要，与用于其他无线电通信业务应用的FSOL的兼容性。

将来的研究可能从FSO扩展到多点FSO户外系统，点对点 and 点对多点FSO室内系统，以及试验和测量过程。

参考文献

- [1] G. Nykolak, *et al.*, "4 X 2.5 Gb/s 4.4 km WDM free-space optical link at 1 550 nm, " in Proc. OFC'99, PD11, 1999.
- [2] Y. Aburakawa, "Dense wavelength division multiplexed optical wireless link towards terabit transmission, " in Proc. Of MWP'03, pp. 135, 2003.
- [3] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 60825-1 standard, "Safety of laser products".
- [4] G. Mie, *Ann. Physik.*, Vol. 25, pp. 377-445, 1908.
- [5] K. Morita, *et al.*, "Light wave attenuation in propagation through the atmosphere, " Review of Electrical Communications Labs., Vol. 19, No. 714-725, pp. 798-842, 1971.
- [6] Final Approach Visibility Studies, 1955, U.S. Weather Bureau.
- [7] Y. Aburakawa, *et al.*, "Experimental evaluation of 800-nm band optical wireless link for radio access network, " IEICE Trans. Electron., Vol. E86-C, pp. 1 175-1 183, No. 7, 2003.
- [8] J.S. Marshal and W.M. Palmer, "The distribution of raindrops with size", *Journal of the Meteorology*, Vol. 5, No. 6, pp. 165, 1948.
- [9] K. Morita, and I. Higuchi, "Statistical studies on electromagnetic wave attenuation due to rain, " Review of Electrical Communications Labs., Vol. 19, No. 7-8, pp. 798-842, 1971.

- [10] N. Hiromoto, “Novel detector technologies for infrared communication and sensing, CRL International Topic Workshop on Space Laser Communication Current Status and Future Perspectives, pp. 90-95, 1997.
- [11] M. Akiba, *et al.*, “Measurement of optical propagation characteristics for free-space optical communication during rainfall”, IEICE Trans. Commun., Vol. E87-B, No. 7 July 2004.
- [12] Zilberman A., Kopeika N. S., “Aerosol and turbulence characterization at different heights in semi-arid regions”, Proc. SPIE Vol. 5891, p. 129-140.
- [13] P. Bataille, “Analyse du comportement d’un système de télécommunication optique fonctionnant à 0, 83 micron dans la basse troposphère”, Thèse, Université Rennes, 1992.
- [14] H. Vasseur, *et al.*, “Influence de la troposphère sur les liaisons sans fil aux ondes millimétriques et optiques”, Propagation électromagnétique du décimétrique à l’angström, 3èmes journées, Rennes 1997.
- [15] T.H. Carbonneau, D.R. Wiseley, “Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free-space telecommunications link in today’s crowded marketplace”, SPIE Conf. on optic. Wireless Com., Boston, USA, Vol. 3232, 1998.

附件1

链路预算举例

1 链路预算举例

为FSOL设计的链路预算主要源自于考虑链路配置地点的传播特性时必需的链路可用率。

表A1-1显示的是适用于两种不同类型FSOL的系统参数举例，对于这两种系统，已经采用了具有相同发射功率的激光二极管（LD），还选择波束扩展损耗 L_p 为24 dB的等效值，波束扩展损耗相当于发射机Tx和接收机Rx之间FSOL的实际链路损耗，即电波时的自由空间损耗减去天线增益，在理论上， L_p 用下面公式表示：

$$L_p = (A_r / w_r)^2 L_{atm} \quad (\text{A-1})$$

其中：

w_r ： 发射的光在距离 r （链路长度）处的波束光点直径

A_r ： 接收透镜的有效孔径。

这些参数 w_r 和 A_r ，能够通过安装在Tx或Rx中的光学透镜的会聚功率进行调整，通常认为大气损耗 L_{atm} 很小，如第3.1节所述。

必需的接收功率源自于 L_p 的计算，包括针对雾和降雨影响的必要余量，在表A1-1的例子中，对于这两种类型的链路设计总的余量大约为22 dB。

得到公认的是具有不同链路长度的两个FSOL 能够以相同的发射功率和波束扩展损耗运行，却会导致截然不同的中断率目标。

注意到在类型1中链路中断率为0.1%，可能不适用于公共网络连接，例如PSTN或者ISDN，反之，类型2 FSOL的中断率要低得多，可以作为连接至公共核心网络的固定无线接入系统。

表A1-1
为FSOL设计的链路预算举例

参数	类型1	类型2
链路长度 (m)	900	350
链路容量 (Mbit/s)	622.08	
需要的BER	BER = 10^{-9}	
链路中断率	0.1% (大约 9小时/年)	0.004% (大约20分钟/年)
发射机功率 (LD 输出: 标称的)	13 dBm (20 mW)	
Tx的插入损耗 (dB)	3	
波束扩展损耗 (dB)	24	
Rx的插入损耗 (dB)	3	
雾余量 (注1) (dB)	14.0	15.5
降雨余量 (注1) (dB)	8.0	6.5
接收机灵敏度 (dBm)	-40	

注1 - 根据在东京观测得到的统计数据 [7] [9]。

2 FSO可用率预测举例

在FSO传输中需要知道的重要因素之一是FSO的余量，事实上，以无线电报务员设备或者无线中继系统为例，知道一条特定链路的余量最为重要。例如，在建立一条链路的时候，数学模型可用于计算链路在一年中或者最差的月份中的可用率。

第一步是要知道链路的余量，该因素可用于知道发送数字数据的激光设备的容量，而不管天气条件的变化。

为了使用预测模型，必需的设备参数为（没有穷举）：

- 发射的功率；
- 接收机的灵敏度；
- 接收机的捕获面积；
- 发送波束的散度。

例如，由这些数据就可以知道几何衰减的数值以及链路余量和最终的可用率。

2.1 一些链路余量

在下表中给出了对于三种典型设备，链路余量计算的一些例子。计算是在链路距离为500 m、分子衰减可以忽略的情况下进行的，这些作为例子给出的链路余量、数据对于随后了解由气候现象（雾、雨、雪、闪烁…）产生的激光信号衰减是基本的因素。

表 A1-2
三种链路余量举例

发射功率 (dBm)	10	13	26
灵敏度 (dBm)	-35	-40	-36
几何衰减 (dB) ($D=500$ m)	26	17	18
系统损耗 (dB)	1	2	0
链路余量 (dB)	18	34	44

2.2 可用率和服务质量

这部分介绍了对于一条使用三种FSO设备特性的特定链路，服务质量（QoS）研究的一个具体例子。

在这个例子中，考虑到了下列因素：

- 链路距离：500 m；
- 厂家：不同来源的三个厂家（A、B和C）；
- 设备：采用光纤的155 Mbit/s的SDH接口；
- 模型：给出了悬浮物（雾）衰减的法国电信模型 - 最干扰FSOL的衰减 - 被采用；
- 地点：只研究一个地点，雷恩（法国）。

QoS的研究是分三步进行的一个过程；此后，这个过程能够部分或者全部用计算机进行处理。

2.2.1 最小能见度计算举例

考虑采用155 Mbit/s接口长为500 m的链路。采用法国电信衰减模型，由线性链路余量可以确定最小能见度的数值。

表 A1-3
三种最低能见度计算举例

	设备A	设备B	设备C
波长 (nm)	690	850	1 550
链路距离 (m)	500	500	500
发射功率 (dBm)	10	13	26
灵敏度 (dBm)	-35	-40	-36
几何衰减 (dB)	25.94	17.4	18.59
分子衰减 (dB)	0.05	0.205	0.05
系统损耗 (dB)	0	0	0
链路余量 (dB)	19	35	43
线性余量 (dB/km)	38	71	87
最低能见度值 (m)	470	250	210

2.2.2 气象统计数据举例

从法国Météo提供的雷恩市每小时雾出现的百分比、长期合成数据的气象文件；可以得到表示在三个时间周期内雾出现的累积百分比的曲线：

- 8时 - 20时；
- 20时 - 8时；
- 从凌晨0点到晚上12点一整天。

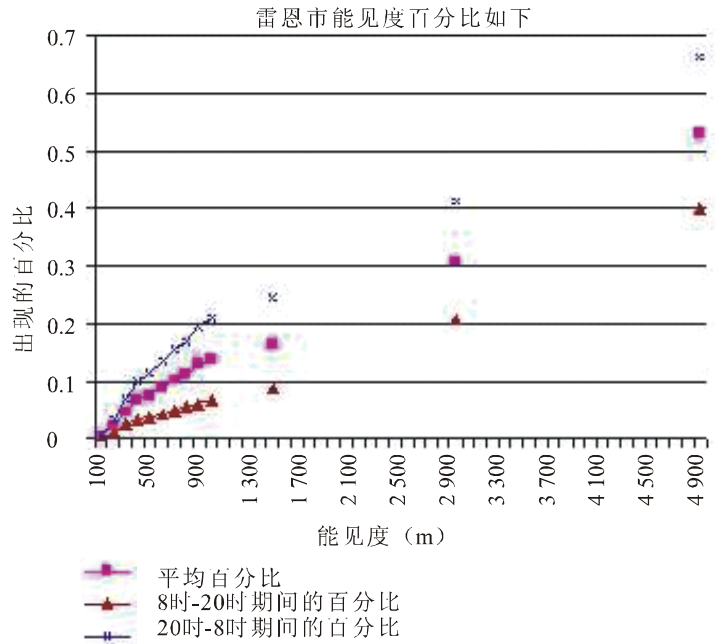
这些气象文件具有以下特性：

- 每小时的能见度；
- 从100 到 5 000 m；
- 从1992年到 2002 年；
- 超过73 000个观测结果；
- 出现的累积百分比；
- 三个按小时计的观测周期。

已经绘制出图中三条曲线，对于每条曲线，我们规定：

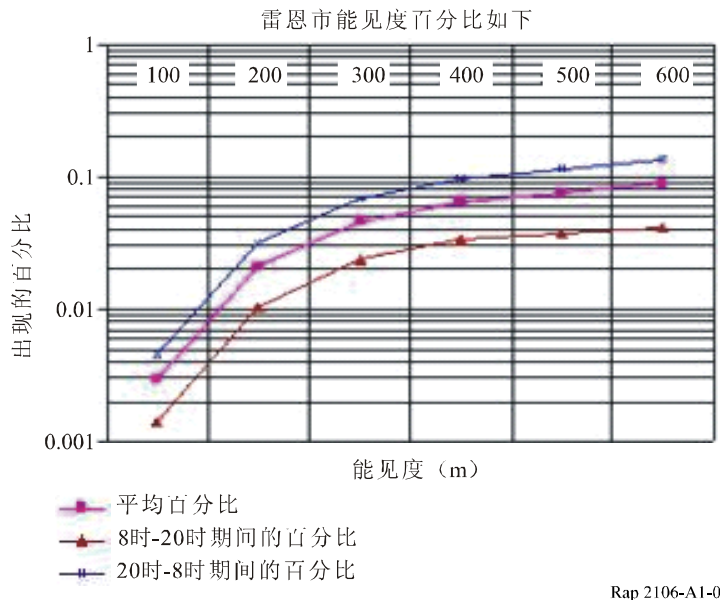
- X轴：能见度的最小值 (m) (即雾浓度)；
- Y轴：各种最小能见度出现的百分比 (%)。

图 A1-1
特定能见度的雾出现的百分比



为了表示得更清楚，X轴用对数标度表示。

图 A1-2
特定能见度的雾出现的百分比 (对数标度)



2.2.3 链路可用率计算举例

当雾浓度大于链路余量时，FSOL会变得不可用。因而采用气象图，就可以研究拥有一条无用FSOL的时间百分比。通过扩展，就可确定用百分比和每一年的小时（或者分钟）数表示的、考虑的FSOL的可用率。通过对每个设备取最小能见度数值（在X轴上）并且测定

出现的百分比数值，就可进行FSOL无效性的研究，如果知道这个数值，就可以估计出超过这个数值时FSOL会变得不可用。

下表给出了每一种设备的百分比数值和无效性数值。

表 A1-4
能见度和时间段对比

出现的百分比		设备A	设备B	设备C
最小能见度数值 (m)		342	184	150
模型变化	全天	0.052	0.015	0.008
	8时 - 20时期间	0.028	0.007	0.004
	20时 - 8时期间	0.08	0.022	0.012

通过扩展，可以确定用百分比和每一年的小时（或者分钟）数表示的、考虑的FSOL的可用率。对于考虑的地点见表A1-5。

表A1-5
在雷恩市三种不同设备A、B和C的链路可用率

设备A	%可用率	无效性 - Nb小时/年
年	99.948	4.56
8时 - 20时期间	99.972	1.23
20时 - 8时期间	99.920	3.50

8 760 小时 = 1 年

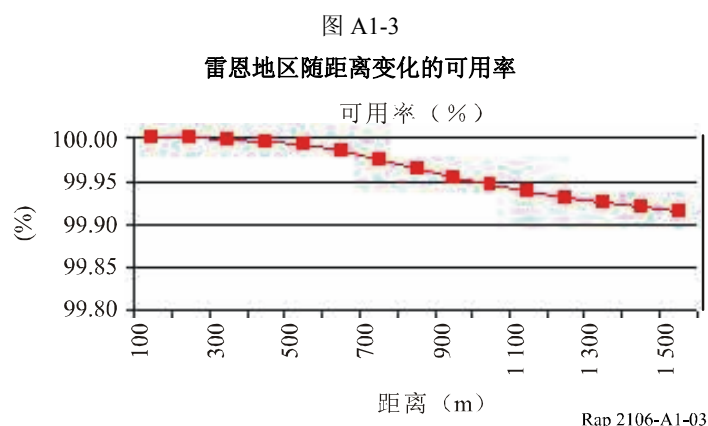
设备B	%可用率	无效性 - Nb 小时/年
年	99.985	1.31
8时 - 20时期间	99.993	0.31
20时 - 8时期间	99.978	0.96

8 760小时= 1年

设备C	%可用率	无效性 - Nb 小时/年
年	99.992	0.70
8时 - 20时期间	99.996	0.18
20时 - 8时期间	99.988	0.53

2.2.4 随链路距离变化的可用率举例

另外一种方法是对于考虑的地点，提供随FSOL距离变化的QoS。



在这个例子中，要注意三条重要的注释：

- FSOL的QoS十分依赖于当地天气情况（例如，雾），对气候资料的数据处理变得很重要。
- QoS管理取决于链路的距离（在理想天气条件下），通过选择设备或者厂家可能会修改或者改进这个参数的。例如，根据上面的曲线图，如果期望雷恩市的QoS高于99.95%，则FSOL的长度不超过900 m将是必要的。
- 这个过程以及其他的气候参数处理可以用计算机进行处理。

附件2

ITU-R建议书和“FSO预测”服务质量软件之间的对比（在法国开展试验）

1 引言

经营者（FSO 04）已经获得了关于FSO产品容量的评估，并且开发了内部软件“FSO预测”。为了实现这些目标，设想开展一项试验使FSO设备容量与天气数据相对照，该项研究在冬季里大约六个月的时间（2004.01.12 - 2005.05.31）内于图卢兹附近的法国电信站进行，冬季对于采用FSO技术传输数值数据的产品而言是最坏的季节。

定义了两个目标：

- 为了免除有关统计数据，在一个足够长的时间内，把“FSO预测”软件的结果与现场实验数据进行对比。
 - 统计分析主要针对对于光学链路最不利的现象，即雾衰减或者大气衰减。
 - 检验结果与其他衰减现象和现场试验数据的一致性。
- 以微波链路为基础，把FSO链路结果与ITU-R建议书目标进行对比：
 - ITU-R F.1703建议书 - 在27 500 km假设参考通道和连接中所使用的实际数字固定无线链路的可用性指标。
 - ITU-R F.1668建议书 - 在27 500 km假设参考通道和连接中所使用的实际数字固定无线链路的差错性能指标。

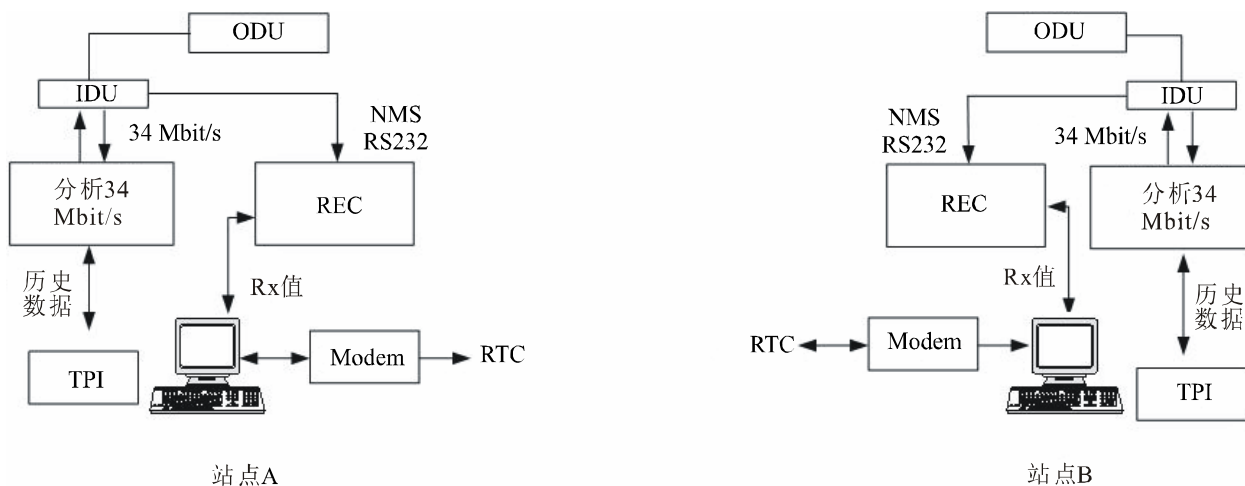
在简单描述了实验地点特性和FSO设备之后，简略介绍了法国电信研发中心开发的FSO预测、光学链路服务质量仿真软件。

于是为了实现这两个目标，在考虑的期间内，把软件结果与光学链路数据和天气数据进行比较。

2 FSOL现场试验

2.1 地点和设备特性

图 A2-1
链路特性



Rap 2106-A2-01

各个地点的设备说明：

- FSO (ODU - 室外单元和IDU - 室内单元) 在命名为A和B的两个建筑物之间、其间隔大约为270 m (0.2英里) 传输PDH双向帧。

- 命名为维多利亚的PDH帧传输分析仪记录每一秒钟可能出现的差错或者无效，并把结果每隔15分钟通过RS-232连接器发送到PC，这是一个双向的分析，在记录的数据中，我们选择并连接：
 - ES：差错秒（比特差错）；
 - SES：严重差错秒；
 - 无效。
- 专用的监控软件在每分钟内记录接收电平（灵敏度），并且将数据连续发送到PC。
- 安装RTC调制解调器，用于在发生问题的时候通过任何地方的PC软件实施干预。
- 气象数据来自位于Blagnac机场的法国气象站（距离法国电信实验地点不到500 m，约0.4英里）。这些数据每周通过电子邮件发送，由以下测量结果确定：
 - 大气透射计，显示能见度数值（所有的数值 - 频度：每隔一分钟 - 每月大约40 000个数值）。
 - 雨量计，显示降水强度（最大值 - 频度：每隔6分钟）。
 - 雪，显示降雪强度（最大值）。
 - 日射强度计，显示光强度（最大值）。

2.2 链路设计

2.2.1 工程数据

FSOL由两台互相指向的终端设备（每台设备拥有ODU和IDU）组成，提供距离大约为270 m的PDH双向连接。在安装链路的范围内有一些信息是必需的[BOU 06]，这些信息是：

- 链路余量；
- 接收电平；
- 光点直径。

2.2.2 现场数据

在安装过程之后，在链路各个方向测得的数据见表A2-1和表A2-2：

表 A2-1

A到B的灵敏度

方向：从A到B	接收电平	理论上的	-9 dBm
		实际的	-11 dBm ⁽¹⁾
	链路余量	理论上的	41 dB
		实际的	39 dB

⁽¹⁾ 2 dB的差异有可能通过精确的对准来缩小。

表 A2-2

B到A的灵敏度

方向：从 B到A	接收电平	理论上的	-9 dBm
		实际的	-16 dBm⁽¹⁾
	链路余量	理论上的	41 dB
		实际的	34 dB

⁽¹⁾ 为了研究相当于可用率和服务质量准则的余量灵敏度，要自发地维持两个方向之间5 dB的差异。

3 仿真软件

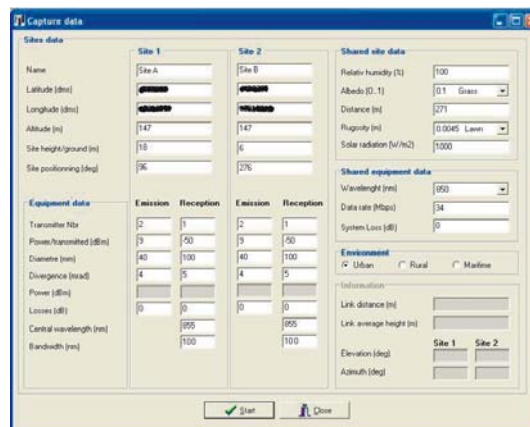
FSO预测软件V3.00提供：

- 任何地理位置的光学链路设计计算。
- 对于法国的任何地方（在该版本中），链路可用率的计算。

3.1 捕获数据窗口

根据站点数据和FSO设备测量结果，我们把这些数据填入FSO预测软件的第一个窗口，该窗口分成六块内容：站点数据方框、设备方框、公共站点数据、公共设备数据、环境和信息。然后我们开始计算过程算出各种链路参数，并且根据气象文件确定QoS和可用率。

图 A2-2
捕获数据窗口



Rap 2106-A2-02

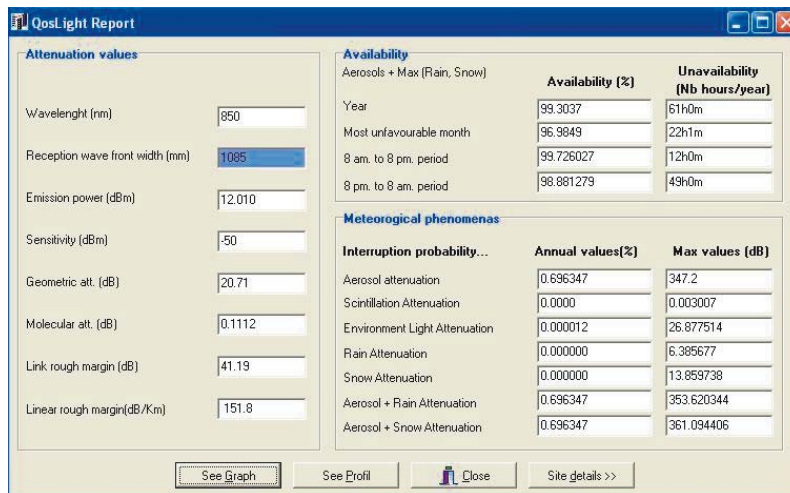
3.2 报告窗口

报告窗口为我们显示：

- 可用率的方框内容：
 - 一年内可用率为99.3037%，相当于中断61小时。
 - 在最差的月份内可用率为96.9849%，相当于中断22小时，为年中中断量的36%。

- 白天可用率为99.7260%，为天中断量的20%。
- 夜间可用率为98.8813%，为天中断量的80%。
- 气象现象的方框内容：
 - 雾的影响为0.696347%，占气象现象数量的99.9982%。
 - 环境光的影响为0.000012%，占气象现象数量的0.0018%。
- 没有闪烁、没有雨、雪的影响。

图 A2-3
报告窗口



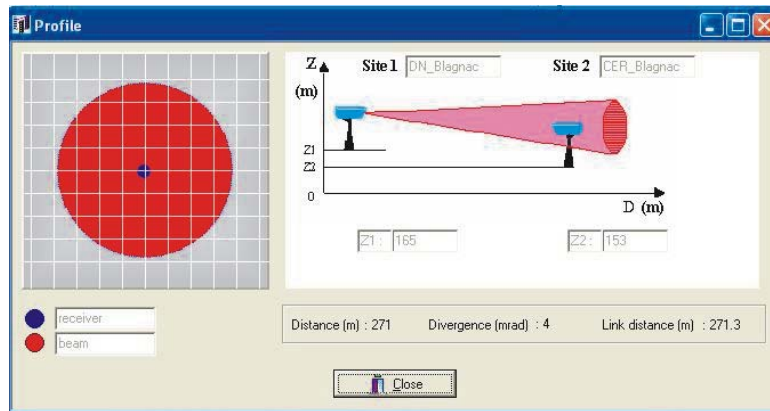
Rap 2106-A2-03

3.3 剖面窗口

这个窗口表示两个站点以及波束光点在接收机和接收机表面的差异。比率为接收机上的波束光点除以接收机表面，等于1 085/100，即10.85。这个数值表明：

- 大比例使得可以在良好情况下获得双向链路的指向。
- 良好的抗震性或者承受支架（建筑物）膨胀现象的能力。

图 A2-4
剖面窗口



Rap 2106-A2-04

4 结果比较

在本章中，我们进行了六个月实验数据、可用率和QoS准则、软件得到的数值之间的比较。

4.1 相对于FSO和法国气象站，比较FSO预测

4.1.1 悬浮物衰减（雾）

为了检验Al Naboulsi 和Al确定的模型，对三个悬浮物或雾衰减公式进行了分析、比较，并且把它们集成到FSO预测软件中。

这三个模型是：

- Kim和 Al模型
- 适用于白天平流的Al Naboulsi 和 Al雾模型，以及
- 适用于夜间辐射的Al Naboulsi和 Al雾模型。

雾衰减举例（见正文第3.2.2节中公式（3））

$$Aff_{fog,d} = 10 \log_{10}(1/\tau(\lambda, d)) = 10 \log_{10}(1/\exp(-\sigma(\lambda)d)) = 10 \log_{10} \exp(\sigma(\lambda)d) = 10 \frac{\ln(\exp(\sigma(\lambda)d))}{\ln 10}$$

相当于：

$$Aff_{fog,d} = \frac{10}{\ln 10} \sigma(\lambda)d$$

例如，当雾能见度为80 m时，有： $\sigma(850)d = 49.97$ 和 $Aff_{fog} = 217$ dB/km。

4.1.1.1 过程

为了能够提出以FSOL中断为基础的比较模型，要对数据进行处理。当雾（气象文件 - 能见度数据）的强度足以中断光学链路时，选择这些数据。

例如，能见度为100 m的雾相当于大约为180 dB/km的悬浮物衰减，即对于链路的距离，悬浮物衰减大约为49 dB。这个数值要大于链路余量（线性余量：124 dB/km），因此在理论上，连接会中断。

这种雾中断必须同时（月：日：年 - 小时：分）被传输分析仪数据文件（链路无效性数值）和FSO监控软件数据（灵敏度数值 $-S < -55$ dBm - 实验室测试期间的中断等效值）确认。

只有当中断仅仅是由雾引起的时候才选择该数据。

4.1.1.2 结果

大约400个以上、应答上述特性的数值被选用，一些不相关的数据（大量的能见度和操作连接）被抛弃，这可以从FSOL实验地和法国气象站所在地之间的相对距离（500 m）得到解释，这段距离会在雾的移动垂直于两个地点的时候，使记录产生轻微的暂时移动，或者当雾的移动平行于两个地点时产生异常的结果。

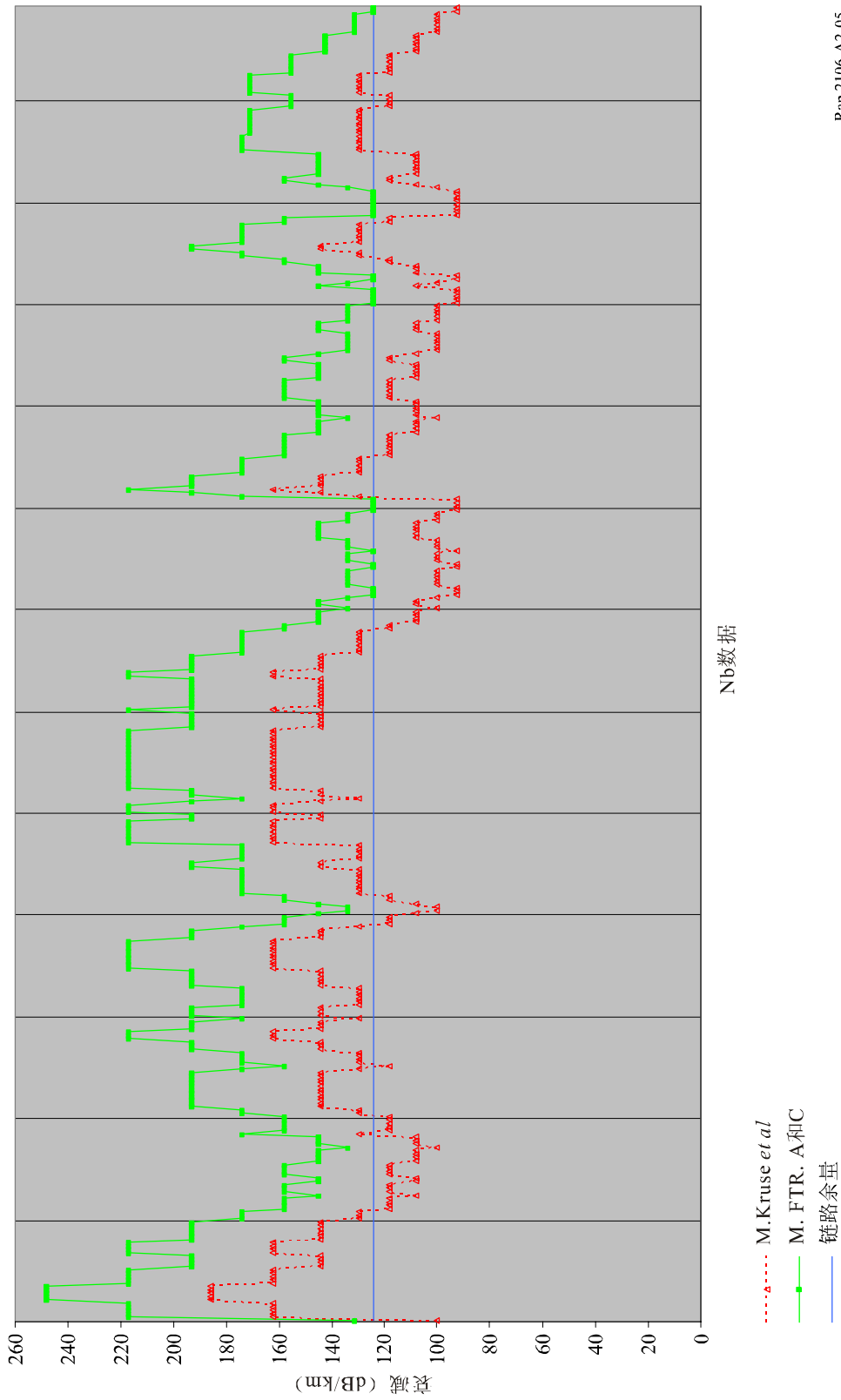
出现在此图形中的结果如下：

- 等于124 dB/km的光学线性链路余量（蓝色直线），
- Kim和Al雾衰减公式（红色虚曲线），
- Al Naboulsi雾衰减公式，与选择这两个模型其中之一时每小时的结果相联系（绿色曲线）。

由于能见度很低所以选择在本图中出现的所有数据，能见度低意味着雾衰减数值很大，会使光学链路强制性地中断。

看来对于链路中断的配置，Al Naboulsi雾衰减公式表现出同链路余量的完全一致性（100%）；而Kim和Al雾衰减公式与几乎50%的实际情况不符，Al Naboulsi雾衰减公式似乎和实际情况更加一致。

图 A2-5
雾衰减比较



4.1.2 其他衰减

4.1.2.1 雨衰

雨衰按照下面关系式 (A-2) 随着降水强度 R (mm/h) 而变化:

$$Att_{rain} = 1.076 * R^{0.67} \quad \text{dB/km} \quad (\text{A-2})$$

其中:

R : 降水强度 (mm/h)。

FSO预测为我们显示雨衰产生的无效性等于零。法国气象站指出在考虑的期间内, 测得的最大降雨为2005年5月13日在6分钟的时间内 $R = 1.6$ mm, 采用最不利的预测, 降水强度大概为16 mm/h。

雨衰: $R = 16$ mm/h, $Att_{rain} = 1.076 \times (16)^{0.67} = 6.89$; $Att_{rain} = 7$ dB/km

链路雨衰 $Att_{rain-link} = (271 \times 7) / 1000 = 1.89$ dB; 即 $Att_{rain-link} = 2$ dB。

该数值要小于链路余量, 因此这个现象不会干扰光学链路, FSO预测软件结果与被考虑期间内的气候数据一致。

4.1.2.2 雪衰

雪产生的衰减按照下列关系式 (湿雪公式, 地点高度低于500 m) (A-3) 随着波长 (λ_{nm}) 和降水强度 S (mm/h) 而变化:

$$Att_{snow} = (0.0000542 * \lambda_{nm} + 5.4958776) * S^{1.38} \quad \text{dB/km} \quad (\text{A-3})$$

FSO预测为我们显示雪衰减产生的无效性等于零。法国气象站指出在该站采取两种形式进行降雪的测量:

- 雪等效水位 (与降水量相对应),
- 雪地高度。

根据图卢兹 - 波拉尼亚气象站的数据, 在考虑的期间内, 雪地高度没有达到可测量的数值, 因此我们得出下雪天气现象的衰减为零。

即 $Att_{snow} = 0$ dB。

显然, 这个数值要小于链路余量, 因此该现象不会干扰光学链路。FSO预测软件结果与被考虑期间内的气象数据一致。

4.1.2.3 环境光衰减

日光会合发生在太阳在光学接收机的视野 (FOV) 内时, FSO预测计算一年内每一分钟太阳位置与光学链路平行的概率, 透射到接收机内部的太阳功率比接收到的来自发射机的功率要大。

FSO预测定义了由下式计算的环境光衰减（Stefan 定律-9）：

$$F_{emis} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=+\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{A-4})$$

其中：

- λ : 波长 (m)
- C : 光速 (3×10^8 m/s)
- T : 温度 (K)
- $K = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K
- $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ Wm⁻² K⁻⁴
- $H = 6.62 \times 10^{-34}$ J/s

于是在FSO产品的频谱窗口中（波长从720到950 nm的滤波器）有：

$$F_{emis} = \int_{\lambda=720nm}^{\lambda=950nm} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda = 11.5 \text{ MW} / \text{m}^2$$

由角度为5 mrd、直径为100 mm的FOV可确定接收机接收到的电平（A-5）。

其中：

- 太阳直径：1.4百万公里
- 地球 - 太阳距离：150 百万公里

$$\theta = \arctan g\left(\frac{\text{SunDiameter} / 2}{\text{EarthSunDistance}}\right) \quad (\text{A-5})$$

$$\theta = \arctan g\left(\frac{1.4 / 2}{150}\right) = 0.004333 \text{ rad}$$

$\theta = 4.3$ mrd（小于5 mrd），因此在某些配置位置上的FSO产品能够接收到太阳的所有光强。

法国气象站指出在考虑的期间内最大的太阳强度为 $S = 3\,500$ J/cm²，近似等于 $1\,000$ W/m²。

$$C_n^2 = F_1(\text{roughness}) * F_2(\text{solar - radiation}) * F_3(\text{humidity}) * (1 + A)$$

* 日光损耗比（空间+大气）

$$\frac{\text{TotalLightFlux}}{\text{EarthTotalLightFlux}} = \frac{\text{FilteredLightFlux}}{\text{FilteredReceivedFlux}} \quad (\text{A-6})$$

$$\frac{64 \times 10^6 \text{ Wm}^{-2}}{1\,000 \text{ Wm}^{-2}} = \frac{11.5 \times 10^6 \text{ Wm}^{-2}}{\text{FilteredReceivedFlux}}$$

即：过滤后的接收光通量 = 180 W/m²

考虑到进入的光通量完全集中在接收二极管上，就是说：

$$\text{ReceivedPower} = \text{FilteredReceivedFlux} * \text{ReceptionArea}, \quad \text{ReceivedPower} = 180 * \left(\frac{\pi}{4} * 0.1^2 \right).$$

因此，接收功率等于1.4 W或31.5 dBm。

这个数值肯定要与FSO接收机的-11 dBm或者-16 dBm接收电平值进行比较，FSO预测指出0.000012%的无效性是由环境光衰减产生的，在有些太阳位置格局中，太阳功率值要高于接收到的数值，因此，当太阳在FSO的FOV方向上时，该现象会影响和干扰光学链路。FSO预测仿真的结果与被考虑期间内的气候数据一致。

4.1.2.4 闪烁效应

FSO预测定义了闪烁效应的计算。

法国气象站指出最大的太阳辐射和水文测量分别等于3 500 J/cm²（或者约为1 000 W/m²）和100%。

闪烁效应： $F1 = 8.99 \times 10^{-14}$ ； $R = 1\ 000\ \text{W/m}^2$ ； $F2 = 26.6$ ； $H = 100$ ； $F3 = 0.19$ ；则
 $C_n^2 = 4.5 \times 10^{-13}$

$$L = 270\ \text{m}; \lambda = 850\ \text{nm}; K = 7.4 \times 10^6; \sigma_X^2 = 1.23 \times (7.4 \times 10^6)^{7/6} \times 4.5 \times 10^{-13} \times (270)^{11/6} = 1.65$$

$$Aff_{\text{Scintillation-Link}} = 2.57\ \text{dB}.$$

这个数值要小于链路余量，因此该现象不会干扰光学链路。FSO预测软件结果与被考虑期间内的气候数据一致。

4.2 相对于ITU-R建议书，比较FSO的QoS和可用率

4.2.1 相对ITU-R F.1668建议书，比较FSO的QoS

ITU-R F.1668建议书提出了适合实际数字固定无线链路的误差性能目标，它适用于点对点数字固定微波链路。在没有与FSO有关的特定建议书的情况下，该建议书已经被采用。建议书提出的适用于34 Mbit/s接入网的目标见表A2-3。

表 A2-3
误差性能指标

	每月	每年
ES的数量	< 389	< 4668
SES的数量	< 14 580	< 174 960

在考虑的期间内，两个方向上FSOL服务质量的结果见表A2-4。

从这些数据来看，同时依据微波链路标准，该FSOL相对于ITU-R F.1668建议书服务质量标准来说不合格。

表 A2-4

QoS

月份	方向：从A到B				方向：从B到A				结果
	Nb ES	程度	Nb SES	程度	Nb ES	程度	Nb SES	程度	
2004年12月	17	好	16	好	120	好	120	好	100%
2005年1月	104	好	45	好	619	好	619	差	75%
2005年2月	1 048	好	1 048	差	134	好	134	好	75%
2005年3月	157	好	154	好	88	好	88	好	100%
2005年4月	1 688	好	1 688	差	329	好	329	好	75%
2005年5月	272	好	264	好	149	好	149	好	100%

4.2.2 相对ITU-R F.1703建议书，比较FSO的可用率

ITU-R F.1703建议书提出了属于接入网的实际数字固定无线链路的可用率目标，它适用于点对点数字固定微波链路。在没有与FSO有关的特定建议书的情况下，建议采用该建议书。建议书提出的适用于34 Mbit/s接入网的目标见表A2-5。

表 A2-5

可用率目标

	最差的月份	每年的
可用率	> 99.4 ⁽¹⁾ (或者3 154分钟或 189 240秒钟不可用)	> 99.99 (或者53分钟或者3 180秒钟不可用)

⁽¹⁾ 基于其他11个月可用率为100%。

在考虑的时期内两个方向FSOL可用率的结果见表A2-6。

表 A2-6

可用率

月份	方向：从A到B		方向：从B到A		结果
	暂停秒数	程度	暂停秒数	程度	
2004年12月	0	好	0	好	100%
2005年1月	1 601	好	38 839	差	50%
2005年2月	232	好	0	好	100%
2005年3月	13	好	0	好	100%
2005年4月	818	好	0	好	100%
2005年5月	0	好	0	好	100%

从这些结果来看，并且依据微波链路标准，该FSOL相对于ITU-R F.1703建议书的可用率标准来说不合格。

4.3 相对FSO预测软件，比较FSOL的可用率

将FSO预测仿真的结果与六个月时间内记录的FSOL可用率进行比较。如表A2-7所示。

表 A2-7
FSO预测

	最差的月份	每年的	结果
FSO预测	96.9849%	99.3037%	正确
FSO 链路	98.5016% ⁽¹⁾	99.8768% ⁽²⁾	正确

⁽¹⁾ 每年的预测

⁽²⁾ 根据最大的无效性

在考虑的期间内，FSO预测软件的结果与FSOL可用率一致，但比FSOL可用率要略微悲观一些，预测的每年可用率要低0.58%，预测的最差的月份中的可用率低1.56%。

备注和注释

- 应注意到两个方向光学链路之间的余量差异（5 dB）在可用率结果中体现得十分明显。
- 来自建筑物A顶上的烟囱和来自厨房的烟有时会遮挡光学链路，但是产生的阻碍会以非常精确的配置出现（温度、风向、风速…）并且不能被量化。
- 日出和日落也会遮挡光学链路，软件FSO预测提到过这一点，但是引起的阻碍可能要更频繁一些。
- 位于实验地点周围的人们已经确认了在实验期间异常特性的能见度数值（雾）（2005年中大量的雾现象没有觉察到，至少要从1995年开始）。因此，最好定期升级FSO预测软件中的气象数据。

5 结论

首先，光学链路实验使得实现这两个目标成为可能：

- 把结果与FSO预测软件进行对比：
 - 被雾中断的光学链路统计分析显示出比在软件中集成的模型更高的精确度。
 - 针对其他衰减现象的数据测试合成与软件的结果一致。
 - 软件可用率结果与FSOL的实际情况相近，比FSOL的实际情况稍微要悲观一些。

- 以微波链路准则为基础，把FSO结果与ITU-R建议书目标进行对比：
 - 光学链路的结果与ITU-R F.1703建议书提出的在27 500 km假设参考通道和连接中所使用的实际数字固定无线链路的可用性指标不一致。
 - 光学链路的结果与ITU-R F.1668建议书提出的在27 500 km假设参考通道和连接中所使用的实际数字固定无线链路的差错性能指标不一致。

参考文献

[BOU 06] Olivier BOUCHET *et al.* [2006] *Free-space Optics: Propagation and Communication*. ISTE Publishing Company. ISBN: 1905209029.

[FSO 04] <http://www.francetelecom.com/en/>.
