

# 大气对地基激光通信系统的信号衰减分析

邵俊峰, 施 龙

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,  
吉林 长春 130033)

**摘 要:** 激光通信具有频带宽、速度快、稳定可靠、不受外界电磁干扰以及保密性强等优点。地基激光通信系统受大气信道的的影响严重,有必要对大气信道的特性进行研究和总结。本文从大气的组成及特性入手,分析了对流层大气对地基无线激光通信系统的衰减特性,定量给出了大气衰减的理论公式,针对理论公式参数不易获得的问题给出了以能见度为参数的大气衰减的经验公式。

**关键词:** 地基激光通信; 大气衰减; 大气吸收; 大气散射

**中图分类号:** TN929.1      **文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI20112810.0001

## Atmospheric Attenuation Analysis for Terrestrial FSO System

SHAO Jun-feng, SHI Long

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** FSO system has the advantages of high bandwidth, high speed, high stability, immunity to external EMI source and better security property. Terrestrial FSO system is badly influenced by the atmospheric signal channel, so it is of great importance to research and conclude the property of the atmospheric channel. In this paper, the atmospheric composition and its attenuation property of the FSO system was discussed, after which the theoretical equations of the attenuation were given. Due to the pain in unavailability of the parameters of the theoretical equations in real time application, the experimental equations were also given which parameter was the visibility of the atmosphere. It could be used in real time to determine the system margin.

**Keywords:** FSO; atmospheric attenuation; atmospheric absorption; atmospheric scattering

## 1 引言

现有的激光通信系统主要包括以光纤为传输介质的光纤激光通信和以空域传播的激光束为载波的自由空间激光通信,其中光纤激光通信系统的信道模型参数恒定,传输损耗较小且确定可知(现有多模光纤损耗约为2~3 dB/km,单模光纤损耗约为0.2~0.5 dB/km<sup>[1]</sup>),因此,在过去的几十年中,光纤激光通信系统得到了快速的发展。现在,光纤通信技术已经非常成熟并已应用于各种高速通信场合。而大气激光通信中大气对激光的衰减是随天气随机变化的,而且很难预知,其损耗可以低至0.2 dB/km,也可能高于几百 dB/km<sup>[1]</sup>,其信道建模相对光纤系统而言要复杂得多,因此,尽管在20世纪60年代就开始有人进行研究,但是其快速发展却是在20世纪80年代。

大气激光通信是一种采用光波作为载波,利用大气作为信道传递信息的技术。当光波在大气中传输时,大气对光信号产生的影响成为研究的重要内容。因此,大气的组成及其特性对于研究大气激光通信具有重要作用。当激光在大气中传输时,大气对光束的影响主要有吸收、散射、大气闪烁等<sup>[2]</sup>。

## 2 大气组成及特性

大气是地球的一层气体屏障,从地表一直延伸到上千公里的高空。根据温度、压强和电离状态等在垂直方向的分布特性,可将大气分为5层:对流层、平流层、中间层、热层和外逸层<sup>[2]</sup>。对流层是邻接地面的大气层,它的高度随纬度而不同,低纬度地区为17 km左右,中纬度地区为11 km左右,高纬度地区为8 km左右。对流层大气占大气总质量的3/4,该层最显著的特点是温度随高度的增加而递减,即垂直方向的气流运动剧烈而频繁,而水平方向可忽略不计。一切的天气现象,如风雨雪雾等都发生在对流层。本文研究的大气通信系统,其使用范围就是近地大气,因此,本文主要研究对流层

对激光通信的影响。

对流层主要由气态物质组成。组成对流层大气的气体主要有:干洁大气、CO<sub>2</sub>、水汽等。其中干洁大气是指不包含水汽与气溶胶等粒子的大气,由两类成分混合组成:一类是定常成分,主要有氮、氧、氩、氖、氦、氪、氙等,这类成分在大气中的含量随时间与地点的变化很小,其含量比例尤为固定;另一类是可变成分,如二氧化碳、一氧化碳、甲烷、氧化氮物、臭氧、二氧化硫、氨与碘等。另外,对流层大气也包括部分液态水和固体颗粒,大气中悬浮着大量固体和液体粒子。通常将半径小于几十微米的固态微粒叫做大气气溶胶,其他则分别称之为雾滴、云滴、冰晶、雨滴以及冰雹、雪花等。大气中的气态物质、气溶胶与固态降水粒子等具有多种复杂的物理化学特性,其对激光束的折射、吸收、散射以及其自身的湍流给大气激光通信造成的影响主要表现为光强的衰减和闪烁、光束的漂移、扩展以及像点的抖动等<sup>[3]</sup>。光强的衰减来源于大气的吸收和散射;光强的闪烁、光束的漂移、扩展和像点的抖动主要来源于大气湍流。

## 3 大气吸收

大气对某些波长范围存在着很强的吸收,其吸收机理主要是光波通过大气时,大气分子在光波电场作用下产生极化,并依入射光的频率作受迫震动。所以,光波为了克服大气分子内部阻尼力要消耗能量,这个能量的一部分转化为其他形式的能量(如热能),表现为大气分子的吸收。当入射光的频率等于大气分子的固有频率时,发生共振吸收,吸收出现极大值。因此,分子的吸收特性强烈地依赖于光波的频率,而且不同大气分子对光波的吸收也不同<sup>[2]</sup>。在天气晴朗的情况下大气吸收对不同波长的可见光和近红外光线所产生的衰减如图1所示<sup>[4]</sup>。

在近红外波段,大气吸收中起主要作用的主要是水分子。气体分子(如CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>等)对光束的吸收作用与水分子相比要微弱得多。因此,在近红外波

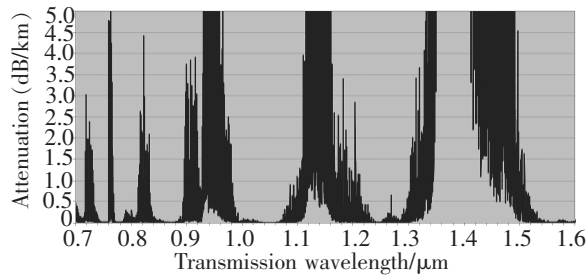


图1 大气吸收对不同波长的光线所产生的衰减

段, 水分子的吸收在大气吸收中起主导作用, 而可以忽略气体分子的吸收作用。在波长>2 000 nm的红外波段, 情况刚好相反, 气体分子的吸收作用大于水分子的吸收作用, 而成为大气吸收的主导作用<sup>[4]</sup>。

大气分子的大量吸收谱线组成了吸收带群, 但在吸收带之间的少数几个区域中存在相对“透明”的“窗口”, 在这些“窗口”中光的辐射透过率较高, 吸收较弱, 通常将这些吸收较弱的波长范围称为“大气传输窗口”, 一般简称为“大气窗口”。几个重要的大气窗口主要有: 可见光波段、780~850 nm波段、1 520~1 600 nm 波段、3~5 μm 波段、8~13 μm 波段。大气光通信中, 一般会选取大气窗口中的波长范围来作为信号的载波, 这样, 信号载波在大气中传输时, 大气的吸收很少, 受到的主要影响是大气散射和湍流等其他因素, 可以有效地降低光束在大气中的吸收损耗。

#### 4 大气散射

大气散射是由大气中不同大小的颗粒的反射或折射造成的, 这些颗粒包括组成大气的气体分子、气溶胶粒子和大气的水滴等, 另外, 湍流的不均匀性也会引起光波的散射<sup>[5]</sup>。纯散射没有能量的损失, 它只是改变了能量的分配方向。大气对光束的散射可以分为分子散射(瑞利散射)、粒子散射(米耶散射)和几何散射(非选择性散射)。在近地面大气层中, 分子散射的影响很小, 造成光能量衰减的主要是悬浮粒子的散射。

具体发生何种散射决定于大气散射粒子的尺寸和光束波长的比值, 因此, 定义无量纲的尺寸参数:

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (1)$$

其中,  $r$  是散射粒子的半径,  $\lambda$  是光束的波长。不同的尺寸参数对应的散射类型如图 2 所示<sup>[1]</sup>。

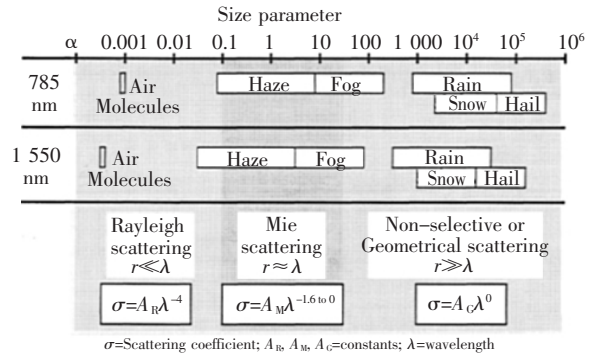


图 2 不同尺寸参数对应的散射类型

#### 4.1 分子散射(瑞利散射)

由大气分子引起的光波散射叫做分子散射。在通信窗口, 波长总是远大于大气分子线度, 根据散射理论, 此时的散射为瑞利散射<sup>[2]</sup>。由瑞利散射理论可以得到气体分子的散射系数的表达式:

$$\sigma_m(\theta, \lambda) = \frac{\pi^2(n^2-1)^2}{2N\lambda^4} \cdot \frac{6+3\delta}{6-7\delta} \cdot (1+\cos^2\theta) \quad (2)$$

其中,  $\lambda$  ( $\mu\text{m}$ ) 表示波长;  $N$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) 表示单位体积内的气体分子数, 在海平面处标准大气条件下  $N=2.55 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ;  $n$  为大气的折射率;  $\delta$  为散射的退偏振因子(对空气  $\delta=0.035$ );  $\theta$  为散射方向角。将上式在  $4\pi$  立体角上积分得到体散射系数:

$$\sigma_m(\lambda) = \frac{8\pi^3(n^2-1)^2}{3N\lambda^4} \cdot \frac{6+3\delta}{6-7\delta} \quad (3)$$

由公式(3)可知, 瑞利散射系数与波长的四次方成反比, 即波长越长, 散射越弱; 波长越短, 散射越强。在光通信中使用的红外波段, 瑞利散射所造成的影响非常小<sup>[3]</sup>。

#### 4.2 粒子散射(米耶散射)

大气中除了大气分子外, 还有大量直径在  $0.03 \sim 2\ 000 \mu\text{m}$  之间的固态和液态微粒, 由于这些微粒在大气中的悬浮呈胶溶状态, 所以通常称为大气气溶胶。气溶胶粒子大于无线光通信中的光波长或与光波长相当, 根据散射理论, 应当使用描述球形

粒子散射的米耶理论。米耶散射系数由下式确定：

$$\sigma_a = \pi \int_{r_1}^{r_2} n(r) \times Q_s(X_r, m) \times r^2 dr \quad (4)$$

式中,  $N(r)$  为单位体积的粒子数 ( $\text{cm}^{-3}$ );  $r$  为粒子半径 ( $\text{cm}$ );  $Q_s$  为散射效率;  $n(r)$  为单位体积 ( $\text{cm}^3$ ) 中半径分布在  $[r, r+dr]$  的粒子数。

由于大气气溶胶粒子的尺寸分布是依据经验获得的, 在工程上难以实时获得, 因此, 一般情况下用下列近似公式计算气溶胶粒子的消光系数:

$$\sigma_a = \frac{3.912}{V_M} \left( \frac{\lambda}{550 \text{ nm}} \right)^{-q} \quad (5)$$

其中,  $\lambda$  ( $\text{nm}$ ) 为传输波长;  $V_M$  ( $\text{km}$ ) 为能见度, 其定义为光功率衰减到最初功率的 2% (有的模型为 5%<sup>[5]</sup>) 时的距离, 或者在白日水平天空背景下, 可分辨足够大的绝对黑体 (目标物) 的最远距离<sup>[1,6]</sup>, 可由下式的 Koschmieder<sup>[6-7]</sup> 定律计算得到:

$$V_M = \frac{|\ln \eta|}{\sigma_a(\lambda=550 \text{ nm})} = \frac{3.912}{\sigma_a(\lambda=550 \text{ nm})} \quad (6)$$

其中,  $\eta$  为人眼的对比灵敏度阈值, 一般取为 0.02 (也有模型将其取为 0.05, 见文献[5]);  $\sigma_a(\lambda=550 \text{ nm})$  为 550 nm 光波在大气中的米耶散射系数。

$q$  为经验常数, 与大气中粒子尺寸和密度有关, 一般按照公式(7)的 Kruse 模型<sup>[8]</sup>取值:

表 1 典型天气状况对应的大气衰减系数

天气条件	能见度	衰减系数 $a$ (dBm/km)
重雾	40~70 m	392~220
浓雾	70~250 m	220~58
中雾	250~500 m	58~28.2
轻雾	500~1 000 m	28.2~13.4
薄雾	1~2 km	13.4~6.3
雾或霾	2~4 km	6.3~2.9
轻霾	4~10 km	2.9~1.03
晴	10~20 km	1.03~0.45
晴朗	20~50 km	0.45~0.144
非常晴朗	50~150 km	0.144~0.03

$$q = \begin{cases} 1.6, & (V_M > 50 \text{ km}) \\ 1.3, & (6 \text{ km} < V_M < 50 \text{ km}) \\ 0.585V^{1/3}, & (V_M < 6 \text{ km}) \end{cases} \quad (7)$$

表 1 给出了典型天气状况对应的大气衰减系数。在近地面大气层中, 纯净大气的散射主要由瑞利散射和米耶散射构成, 瑞利散射较小, 造成光能量衰减的主要是米耶散射; 到了高空, 可见光的瑞利散射与米耶散射的影响相当。

#### 4.3 几何散射

当大气中的粒子尺寸远远超过光束的波长时, 或粒子的尺寸参数  $> 50$  时, 发生的散射称为几何散射或非选择性散射。由于粒子尺寸很大, 所以几何散射可以使用几何光学加以解释。雨滴、雪、冰雹、云滴以及浓雾都会产生几何散射。这种散射的衰减系数与光束的波长无关<sup>[1]</sup>。当降雨强度为  $F$  ( $\text{mm/h}$ ) 时, 雨水的衰减为  $1.076F^{0.67}$  ( $\text{dB/km}$ )<sup>[8]</sup>; 湿雪的衰减为:

$$(1.023 \times \lambda \times 105 + 3.785 \ 546 \ 6) \times F^{0.72} \quad (\text{dB/km}),$$

干雪的衰减为:

$$(5.42 \times \lambda \times 10^4 + 5.495 \ 877 \ 6) \times F^{1.38} \quad (\text{dB/km})^{[8]}.$$

## 5 总 结

大气的吸收和散射是大气衰减的主要方面, 其中吸收在大气衰减中处于次要地位, 在进行系统设计时只要选择大气窗口中的波长范围, 就可以忽略大气吸收所导致的功率衰减。对于大气散射而言, 瑞利散射系数和波长的四次方成反比, 在通信系统中使用的红外波段瑞利散射系数很小, 其造成的影响同样可以忽略不计<sup>[9]</sup>, 因此, 大气信道所造成的总的衰减可以表示为  $\sigma_T = \sigma_m + \sigma_\alpha + K_m + K_\alpha + \sigma_g \approx \sigma_\alpha + \sigma_g$ , 其中  $\sigma$  为大气的散射系数,  $K$  为大气的吸收系数,  $m$  表示大气分子,  $\alpha$  表示大气气溶胶粒子,  $g$  表示几何散射。该公式可用于系统设计时的裕量计算和系统运行过程中最大通信距离的估计。

## 参考文献

- [1] Kim I I, McArthur B, Korevaar E. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1 550 nm in fog and haze for optical wireless communications[J]. *SPIE*, 2001, 4214: 26-37.
- [2] 邓代竹. 大气随机信道对无线激光通信的影响[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2002.
- [3] 东堂. 大气激光通信中的多光束发射和接收技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学博士学位论文, 2004.
- [4] Bloom S, Korevaar E, Schuster J, *et al.* Understanding the performance of free space optics[J]. *Journal of Optical Networking*, 2003, 2: 178-200.
- [5] Kolka Z, Wilfert O, Kvicala R, *et al.* Complex model of terrestrial FSO links[J]. *SPIE*, 2007, 6709: 67091J-1-8.
- [6] Achour M. Simulating atmospheric free-space optical propagation, part II: haze, fog, and low clouds attenuations[J]. *SPIE*, 2002, 4873: 1-12.
- [7] Maher AI N. Wavelength selection for the free space optical telecommunication technology[J]. *SPIE*, 2004, 5465: 168-179.
- [8] Muhammad S S. Channel modeling for terrestrial free space optical links[C]. *Proceedings of 2005 7th International Conference on Transparent Optical Networks, Barcelona, Spain*, 2005: 407-410.
- [9] 柯熙政. 无线激光通信概论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.

作者简介: 邵俊峰(1984-), 男, 汉族, 安徽宿州人, 硕士, 研究实习员, 2009年于复旦大学获得硕士学位, 主要从事光电对抗技术的研究。E-mail: shao\_junfeng@hotmail.com