

## 3.8 $\mu\text{m}$ 和 1.55 $\mu\text{m}$ 激光辐射在雾中传输特性的数值计算

张泽宇<sup>1,2</sup>, 谢小平<sup>1</sup>, 段 毅<sup>1</sup>, 温 钰<sup>3</sup>, 汪 伟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西安通信学院, 陕西 西安 710106)

**摘 要:** 雾是影响自由空间光通信性能的不可避免的天气因素, 选择合适的激光波长可以有效的降低其影响。文中针对薄雾、雾、霾三种大气能见度, 在不同传播距离条件下, 计算分析了均处于大气吸收窗口的中红外波长 3.8  $\mu\text{m}$  和近红外波长 1.55  $\mu\text{m}$  的传输特性。利用 Monte Carlo 方法对大量光子沿水平方向的传播特性进行数值模拟, 俄罗斯轮盘赌法判定光子是否“湮灭”。计算不同接收面半径和相对光强的关系, 不同大气能见度和不同传输距离下光子的透过率。结果表明 3.8  $\mu\text{m}$  波长相对于 1.55  $\mu\text{m}$  波长, 在同样的接收面半径下光强更集中, 同样的传播距离下光子透过率更高, 更不易受大气能见度的影响, 所以 3.8  $\mu\text{m}$  波长比 1.55  $\mu\text{m}$  更适合在雾中进行水平链路的自由空间光通信。

**关键词:** 自由空间光通信; 大气散射; 中红外; Monte Carlo 方法; 俄罗斯轮盘赌法

**中图分类号:** TN929 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S104007

## Numerical calculation of 3.8 $\mu\text{m}$ and 1.55 $\mu\text{m}$ laser radiation transmission characteristic under foggy condition

Zhang Zeyu<sup>1,2</sup>, Xie Xiaoping<sup>1</sup>, Duan Tao<sup>1</sup>, Wen Yu<sup>3</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Xi'an Communication College, Xi'an 710106, China)

**Abstract:** Fog is an inevitable weather factor affecting the performance of free space optical communication. Selecting the appropriate laser wavelength can effectively reduce the influence. Three atmospheric visibility of mist, fog, haze were considered in this paper. The transmission characteristic of mid-wave IR wavelength at 3.8  $\mu\text{m}$  was compared with the traditional near-infrared wavelength at 1.55  $\mu\text{m}$  that both belong to atmospheric transmission windows. Using Monte Carlo method, the propagation of a large number of photons along the horizontal direction was numerically simulated. Relationship between the relative light intensity and different receiving surface radius, photon transmittance under different transmission distance and different atmospheric visibility were worked out. The result reveals that the mid-wave IR wavelength at 3.8  $\mu\text{m}$ , the light intensity is more concentrated under the same radius of receiving surface, and photon transmission is higher under the same propagation distance and less affected by atmospheric visibility. The wavelength at 3.8  $\mu\text{m}$  is more suitable for horizontal link of free space optical communication in the fog than 1.55  $\mu\text{m}$ .

收稿日期: 2016-02-18; 修订日期: 2016-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(61231012); 中国科学院创新基金(CXJJ-14-M09)

作者简介: 张泽宇(1989-), 男, 硕士生, 主要从事空间光通信系统的大气信道方面的研究。Email: zhangzeyu@opt.ac.cn

导师简介: 谢小平(1976-), 男, 研究员, 博士, 主要从事高速光信息处理传输领域方面的研究。Email: xxp@opt.ac.cn

**Key words:** free space optical communication; atmospheric scattering; mid-wave IR wavelength; Monte Carlo method; Russian Roulette method

## 0 引言

自由空间激光通信是指利用激光作为载波,大气作为信道,进行光信号传输的一种无线通信方式,具有高带宽、高保密性、抗电磁干扰能力强、无需铺设光缆或电缆、成本低廉等优点。目前空间激光通信普遍选择在  $0.8\ \mu\text{m}$ 、 $1.064\ \mu\text{m}$  和  $1.55\ \mu\text{m}$  这三个典型大气吸收窗口处,但是大气信道中的各种气体分子和气溶胶粒子,会对光产生吸收和散射,引起激光传输能量的衰减。空间激光通信系统对大气信道环境非常敏感,相对恶劣的气候环境将成为实现良好通信性能的巨大障碍<sup>[1-2]</sup>。

传统的近红外大气吸收窗口只能保障晴朗天气条件下的通信需要,在相对恶劣的天气条件下可能导致通信不稳定甚至链路失联。大气的散射效应对激光波长更长的影响会更小,所以中红外波段的大气吸收窗口  $3.8\ \mu\text{m}$  在相对恶劣的条件下会更具有优势。传统的激光器以及理论研究多限于近红外波段<sup>[3-6]</sup>,而衰减性能较好的中红外波段由于器件的限制反而研究的较少。近年来随着量子级联激光器以及光参量技术激光器的出现,使中红外波段激光在大气信道中的衰减特性以及在空间激光通信中的应用成了新的关注焦点<sup>[7-11]</sup>。

文中利用 Monte Carlo 的方法仿真以  $3.8\ \mu\text{m}$  为代表的中红外波段,与传统的  $1.55\ \mu\text{m}$  波段进行对比。研究两个波段在不同能见度下,不同的传播距离的衰减性能差异。结果表明中红外波段在长距离的雾中传输具有明显优势。

## 1 大气衰减对空间光通信的影响

大气衰减是指因大气对光束的吸收和散射作用引起的信号能量的减弱,包括大气分子的吸收和散射、气溶胶粒子的衰减。大气分子的吸收和波长有关,一般选择处于大气窗口区的波段进行传输,大气分子的散射主要有瑞利散射和米氏散射。气溶胶的衰减与天气状况(雾、霾、雨、雪等)密切相关,不同的大气能见度下引起的衰减不同<sup>[12-14]</sup>。

大气能见度是反映大气透明度的一个指标。观测者以天空为背景沿水平方向观测,在正常肉眼眼下所能分辨的标准黑色物体的最大距离即为能见度。气象学上通常按气象状态把能见度分为十个等级。文中主要针对能见度等级 4 的薄雾(能见度  $1\sim 2\text{ km}$ ),等级 5 的雾(能见度  $2\sim 4\text{ km}$ )以及等级 6 的轻霾(能见度  $4\sim 10\text{ km}$ )进行仿真研究。计算大气衰减可以用透过率来表示:

$$T_{\text{atm}}=I/I_0=\exp\left[-\int_0^L A dl\right] \quad (1)$$

式中: $T_{\text{atm}}$  为大气透过率; $L$  为传播的距离; $A$  为大气衰减系数。

$$A=K+\sigma \quad (2)$$

式中: $K$  为大气粒子总散射系数; $\sigma$  为大气粒子的总吸收系数。

## 2 雾中传输的散射模型

实际情况中的信道环境复杂多变的,光脉冲在雾中传播时会受到各种随机介质的散射和吸收。所以文中模型做了以下假设:信道选取的能见度是薄雾至轻霾,光子与大气粒子发生散射、吸收时彼此相互独立;同时研究的两种波段  $3.8\ \mu\text{m}$ 、 $1.55\ \mu\text{m}$  均为大气吸收窗口,所以衰减系数只考虑大气粒子的瑞利散射和气溶胶的米氏散射影响;并且入射光为单色光,忽略偏振影响。

在此假设的基础上,利用 Monte Carlo 的方法跟踪大量光子在雾中的传输过程。在跟踪的过程中,基于 Henyey-Greenstein 模型来确定散射角(由散射相函数和随机数  $\xi$  决定),整个过程如图 1 所示。

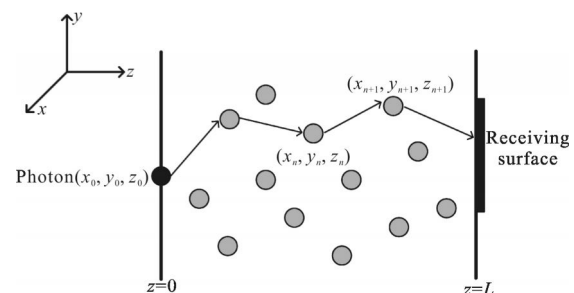


图 1 大气信道仿真模型

Fig.1 Atmospheric channel simulation model

### 2.1 散射角的确定

光子在大气信道中传输,发生的散射主要分为米氏散射和瑞利散射,散射系数分别为  $K_{mie}, K_{ray}$ :

$$K_{mie} = \frac{3.91}{V} \left( \frac{550}{\lambda} \right)^q \quad (3)$$

$$K_{ray} = \frac{8P\gamma^4 \times 10^{-17}}{3T} \quad (4)$$

式中:  $V$  为大气能见度;  $q$  为由  $V$  决定的修正因子<sup>[5]</sup>;  $P$  为大气压强;  $T$  为温度 (在一个标准大气条件下通常取  $T=300\text{ K}$ ),  $\gamma$  为波数。在传播过程中,根据散射体尺度的不同会发生米氏散射和瑞利散射。假设两种散射发生的概率分别为  $P_{mie}$  和  $P_{ray}$ :

$$P_{mie} + P_{ray} = 1 \quad (5)$$

式中:  $P_{mie}$  和  $P_{ray}$  所占比例由  $K_{mie}$  和  $K_{ray}$  决定:

$$\frac{P_{mie}}{P_{ray}} = \frac{K_{mie}}{K_{ray}} \quad (6)$$

散射类型由  $\xi_p$  决定,  $\xi_p$  在  $[0, 1]$  随机抽样。当  $\xi_p < P_{ray}$  时,发生瑞利散射,否则发生米氏散射。确定散射类型后,由 HG 相函数抽样得到散射偏转角的余弦函数为:

$$\cos \theta_{(m)} = \frac{1+g^2-(1-g^2)^2}{2g(1-g+2g\xi^{(m)})^2} \quad (7)$$

$$\cos \theta_{(r)} = \sqrt[3]{(4\xi^{(r)}-2)-\sqrt{(2-4\xi^{(r)})^2+1}} + \sqrt[3]{(4\xi^{(r)}-2)+\sqrt{(2-4\xi^{(r)})^2+1}} \quad (8)$$

式中:  $\theta_{(m)}$  为米氏散射相函数的偏转角;  $\theta_{(r)}$  则为瑞利散射相函数的偏转角;  $\xi^{(m)}$  和  $\xi^{(r)}$  均是在  $[0, 1]$  区间服从均为分布的随机数;  $g$  为大气的非对称因子,散射的相位角  $\varphi$  在  $[0, 2\pi]$  内均匀分布。

### 2.2 雾中衰减系数的确定

雾是由悬浮在近地面空气中缓慢沉降的水滴或冰晶质点组成的一种胶体系统。由于雾的存在,使空气中的能见度降低。由文献可得衰减系数  $A$  表示为<sup>[10]</sup>:

$$A = \frac{6.515 \times 10^6 \pi C W}{\lambda} \quad (9)$$

式中:  $\lambda$  为波长 ( $\mu\text{m}$ );  $W$  为雾的含水量 ( $\text{g}/\text{m}^3$ );  $C$  为利用米氏散射理论计算的消光截面曲线的平均斜率确定的经验常数<sup>[15]</sup>如表 1 所示。

一般认为,内陆的雾滴多大于波长,雾通常为辐射雾。所以含水量  $W$  和雾滴半径  $r$  有以下关系:

$$V = \frac{2.608r}{W}$$

表 1 不同波长对应的  $C$  值

Tab.1 Different wavelengths of the  $C$  value

$\lambda/\mu\text{m}$	1.55	3.8
$C$	0.62	0.68

$$r = 0.485 \cdot 3V^{-0.54} (\mu\text{m}) \quad (10)$$

式中:  $V$  为大气能见度 ( $\text{km}$ ), 将上式代入公式 (9), 得到辐射雾的衰减系数  $A$  为:

$$A = \frac{25.903CV^{-1.54}}{\lambda} \quad (11)$$

计算不同能见度下两个波长的衰减系数如表 2 所示。

表 2 不同能见度下的衰减系数

Tab.2 Attenuation coefficient under different visibility

Visibility	1.55 $\mu\text{m}$	3.8 $\mu\text{m}$
1 km	10.361	4.635
2 km	3.563	1.594
4 km	1.257	0.584
10 km	0.307	0.134

### 2.3 俄罗斯轮盘赌判据

光子在实际传播过程中与大气粒子相互作用发生吸收或散射。根据吸收散射系数所占衰减系数的比值,采用“俄罗斯轮盘赌”的方法判定光子是发生散射还是“湮灭”,则判定阈值  $W_H$  可以表示为:

$$W_H = \frac{K}{A} = \frac{K_{mie} + K_{ray}}{A} \quad (12)$$

式中:  $K_{mie}, K_{ray}, A$  分别为米氏散射系数,瑞利散射系数和衰减系数。这种判据直接由散射系数和吸收系数决定,比传统的依靠经验给定阈值更加符合实际情况。当光子遇到散射体时,由计算机生成一个随机数  $\text{Rand}$ ,当  $\text{Rand} > W_H$  时光子发生“湮灭”,则终止对其跟踪;而当  $\text{Rand} \leq W_H$  时认为光子发生散射。

### 2.4 基于 Monte Carlo 算法的光子传播模拟

将  $10^6$  个光子的坐标  $(x_0, y_0, z_0)$  进行初始化  $(0, 0, 0)$ , 逐个跟踪每一个光子,仿真流程如图 2 所示。

激光发散角为  $10^{-4}$  rad, 光子进行逐个传播一定距离。利用 Monte Carlo 方法对光子自由程  $l$  进行抽样:

$$l = \frac{-\ln \xi}{K + \sigma} = \frac{-\ln \xi}{A} \quad (13)$$

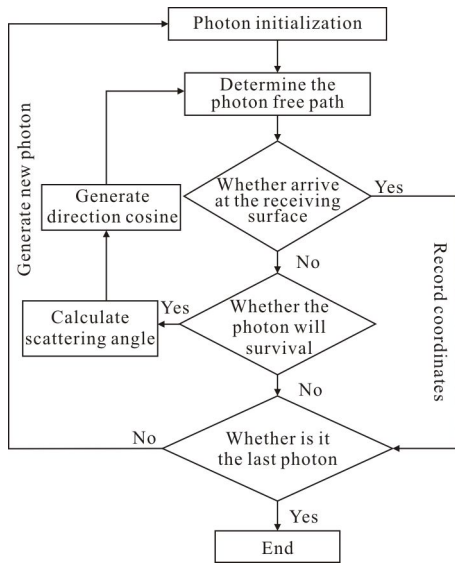


图 2 仿真步骤图

Fig.2 Figure of simulation steps

式中： $\xi$  是  $(0, 1)$  的随机数； $A$  为衰减系数； $K$  为散射系数； $\sigma$  则为吸收系数。光子传播自由程  $l$  后，得到光子的新坐标  $(x_1, y_1, z_1)$ 。此时遇到大气中的粒子，先根据俄罗斯轮盘赌判据判定光子是否发生“湮灭”：如果光子发生“湮灭”则停止对该光子的跟踪；如果没有“湮灭”，再根据  $\xi_p$  判定该次散射是瑞利散射还是米氏散射，决定  $\theta$  取  $\theta_{(m)}$  或者  $\theta_{(r)}$ ，相位角  $\varphi$  为  $(0, 2\pi)$  的随机数。方向余弦  $(u_x, u_y, u_z)$  根据散射角  $\theta$  和相位角  $\varphi$  得到新的方向余弦  $(u_x', u_y', u_z')$ ：

$$\begin{aligned} u_x' &= \sin \theta \cos \varphi \\ u_y' &= \sin \theta \sin \varphi \\ u_z' &= \sin(u_z) \cos \varphi \end{aligned} \quad (14)$$

经过  $n+1$  次散射后光子到达接收面是的坐标为  $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$  和  $n$  次散射后的坐标  $(x_n, y_n, z_n)$  的关系为：

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + u_x l \\ y_{n+1} &= y_n + u_y l \\ z_{n+1} &= z_n + u_z l \end{aligned} \quad (15)$$

传播距离  $l$  选取 10 km，接收面则是以  $(0, 0, l)$  为中心，边长为  $R$  的正方形，记录所有到达  $XOY$  面的光子的坐标和方向余弦。

### 3 仿真结果与分析

根据接收到所有光子的坐标，对比研究大气信道对不同波长的激光束在不同接收面尺寸，不同大

气能见度以及不同传播距离下的相对光强和透过率的影响。

#### 3.1 相对光强和接收面尺寸的关系

比较  $1.55 \mu\text{m}$  和  $3.8 \mu\text{m}$  两个波长在大气能见度  $V=4 \text{ km}$ ，传播距离  $l=10 \text{ km}$ ，接收面为  $5000 \text{ mm} \times 5000 \text{ mm}$  的正方形。光子的分布如图 3，图 4 所示。

通过图 3 和图 4 可以看出  $3.8 \mu\text{m}$  波长的光子数要明显多于  $1.55 \mu\text{m}$ 。并且两者都是中心处光子最密，向外扩散越来越疏。将 500 个光子通过  $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$  接收面的光强记为 1，统计光子的坐标得到两个波长在接收面相对光强的分布如图 5，图 6 所示。

激光发散角为  $10^{-4} \text{ rad}$ ，传播 10 km 理论上几何光斑大小应该是 1 000 mm。由图 5 和图 6 可以看出， $1.55 \mu\text{m}$  波长的光斑达到近 2 000 mm， $3.8 \mu\text{m}$  波长的光斑要明显小于  $1.55 \mu\text{m}$  波长，只有不到 1 500 mm。同时在中心区域  $1.55 \mu\text{m}$  的相对光强都达不到  $3.8 \mu\text{m}$  相对光强的 60%，说明两种波长的光子

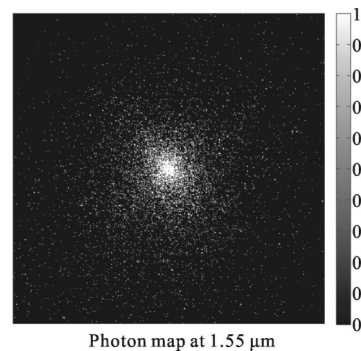


图 3 传播 10 km 光子在接收面的分布

Fig.3 Distribution in the receiving surface of photons spreading 10 km at  $1.55 \mu\text{m}$

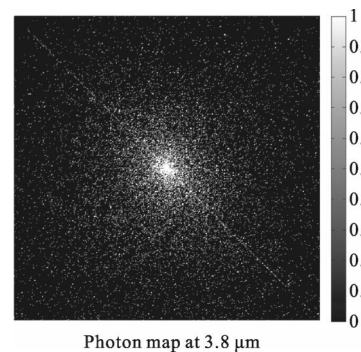


图 4 传播 10 km 光子在接收面的分布

Fig.4 Distribution in the receiving surface of photons spreading 10 km at  $3.8 \mu\text{m}$

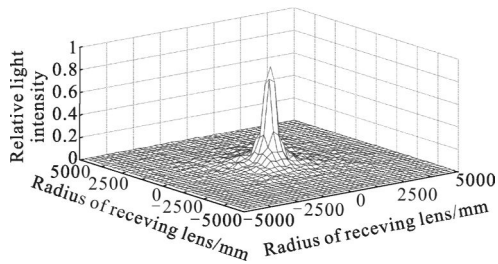


图 5 1.55 μm 波长传播 10 km 相对光强的分布情况

Fig.5 Relative intensity distribution of spreading 10 km at 1.55 μm

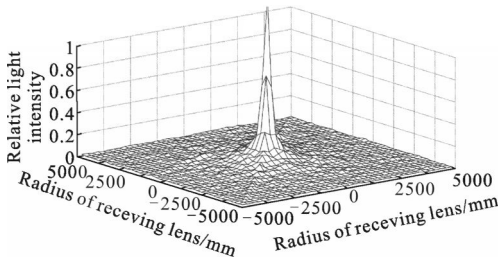


图 6 3.8 μm 波长传播 10 km 相对光强的分布情况

Fig.6 Relative intensity distribution of spreading 10 km at 3.8 μm

在大气信道传播过程中,1.55 μm 波长比 3.8 μm 波长多衰减了大量光子。使得最终到达接收面的光子大幅下降。

### 3.2 不同能见度下透过率和传播距离的关系

利用 MATLAB 仿真能见度分别为 1 km, 2 km, 4 km 和 10 km 天气条件下的光子传输透过率随传输距离增大的变化曲线,结果如图 7~图 10 所示。

从图中可以分析得到,在不同能见度条件下,光子的透过率随传输距离的增大而减小,而中红外 3.8 μm 光子的透过率始终优于近红外 1.55 μm,说明 3.8 μm 波段受大气信道衰减影响更小。当能见度为 1 km, 2 km 的薄雾天气(图 7、图 8)时,信道对光子的衰减非常明显。传输距离增加至 4 km 时,接收到的光子数迅速递减至 10%接着趋于平稳,在探测到的光子数量非常少的时候,中红外 3.8 μm 光子的透过率几乎比近红外 1.55 μm 高出一倍。当能见度提高到 4 km 的霾(图 9)时,可以明显看出 1.55 μm 随着距离的递减幅度高于 3.8 μm。当能见度为 10 km 的薄雾天气时(图 10),两者的衰减速度近似线性关系且差距不大,但是中红外波段仍然具有优势。

## 4 结论

通过对 3.8 μm 波长为代表的中红外波段和 1.55 μm 波长为代表的近红外波段在雾中传播的模

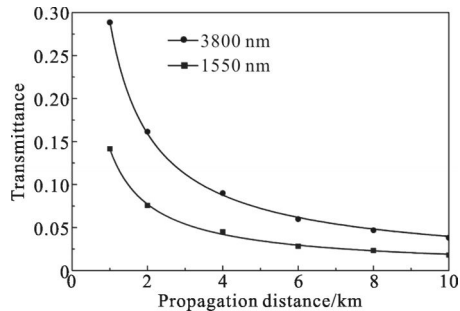


图 7 能见度为 1 km 的光子数随距离变化的曲线

Fig.7 Number of photons with the change of distance at 1 km visibility

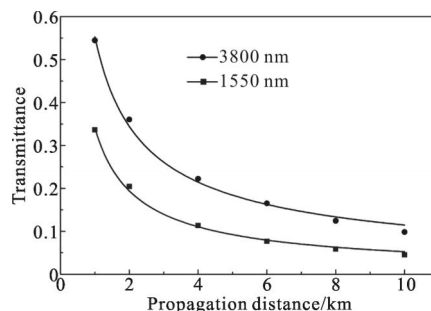


图 8 能见度为 2 km 的光子数随距离变化的曲线

Fig.8 Number of photons with the change of distance at 2 km visibility

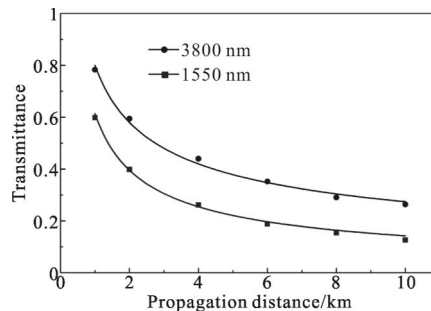


图 9 能见度为 4 km 的光子数随距离变化的曲线

Fig.9 Number of photons with the change of distance at 4 km visibility

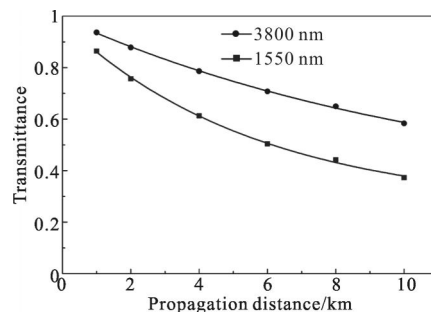


图 10 能见度为 10 km 的光子数随距离变化的曲线

Fig.10 Number of photons with the change of distance at 10 km visibility

拟可以看出:

- (1) 激光在雾中传播时,受到大气影响导致光强衰减的非常明显。由于信道的散射吸收作用使得光

斑面积变大,但是 3.8  $\mu\text{m}$  波长的光斑半径只有 1.55  $\mu\text{m}$  波长的 75%左右。

(2) 相对于 1.55  $\mu\text{m}$  的光子分布,3.8  $\mu\text{m}$  经常信道的衰减后能到达接收面的光子更多更集中;经过进一步计算相对光强可知,1.55  $\mu\text{m}$  中心处的光强不到 3.8  $\mu\text{m}$  的 60%,当激光器的发射功率不强时,1.55  $\mu\text{m}$  波长更容易对探测产生一定影响。

(3) 能见度对透过率的影响非常明显,从  $V=10\text{ km}$  到  $V=1\text{ km}$ ,透过率变化从 90%降到 30%。但是 3.8  $\mu\text{m}$  的透过率高于 1.55  $\mu\text{m}$ ,并且衰减的速度也明显比 1.55  $\mu\text{m}$  慢。

激光在雾中传输时,通过对相对光强和透过率在不同传输环境,接收面以及传播距离的研究对比,可以看到 3.8  $\mu\text{m}$  波长有明显的优势。

#### 参考文献:

- [1] Garlington T. Analysis of free space optics as a transmission technology [J]. *U S Army Information Systems Engineering Command*, 3(2005).
- [2] Zeller J, Manzur T. Effects of atmosphere on free-space optical transmission at 1.55  $\mu\text{m}$ [C]//SPIE, 2010, 7833: 783313.
- [3] Haim Manor, Shlomi Arnon. Performance of an optical wireless communication system as a function of wavelength [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(21): 4285-4294.
- [4] Fu Qiang, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, et al. Research status and development trend of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 116-125. (in Chinese)  
付强,姜会林,王晓曼,等.空间激光通信研究现状及发展趋势[J].中国光学,2012,5(2):116-125.
- [5] Huang Zhaojun, Wu Zhensen, Liu Yafeng, et al. Numerical calculation of phase function of atmospheric aerosol particles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3):580-586. (in Chinese)  
黄朝军,吴振森,刘亚锋,等.大气气溶胶粒子散射相函数的数值计算[J].红外与激光工程,2012,41(3):580-586.
- [6] Lin Yong, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan. Optimization of link analysis for non-line-of-sight atmospheric scattering communication in fog weather [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 705-710. (in Chinese)  
林勇,徐智勇,汪井源,等.雾环境下非视距散射光通信最佳链路分析[J].红外与激光工程,2015,44(2):705-710.
- [7] Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Dong Yan, et al. Single beam tracking subsystem of space laser communication network[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3348-3353. (in Chinese)  
于笑楠,佟首峰,董岩,等.空间激光通信组网单光束跟踪子系统[J].光学精密工程,2014,22(12):3348-3353.
- [8] Shen Na, Zhang Xiangjin, Guo Jing. Attenuation of laser fuse through fog[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 864-869. (in Chinese)  
沈娜,张祥金,郭婧.水雾对激光引信的衰减[J].光学精密工程,2013,21(4):864-869.
- [9] Zhao Zhenwei, Wu Zhensen. Millimeter-wave attenuation due to fog and clouds[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2000, 21(1): 1607-1616.
- [10] Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 670-680. (in Chinese)  
吴丛均,颜昌翔,高志良.空间激光通信发展概述[J].中国光学,2013,6(5):670-680.
- [11] Wang Yamin, Gao Guoqiang. Research on attenuation characteristic of laser transmission in fog environment [J]. *Laser Technology*, 2014, 29(1): 4-9. (in Chinese)  
王亚民,高国强.雾天环境中激光传输的衰减特性研究[J].激光技术,2014,29(1):4-9.
- [12] Martini R. Free-space optical transmission of multimedia satellite data streams using mid-infrared quantum cascade lasers[J]. *Electron Lett*, 2002, 38: 181-183.
- [13] Thomas Plank, Lettgeb E, Pezzeri P, et al. Wavelength-selection for high data rate free space optics (FSO) in next generation wireless communications [C]//IEEE, 2012, 34(6): 1-5.
- [14] Haipeng Ding, Gang Chen, et al. Modeling of none-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication [J]. *IEEE*, 2010, 27(9): 1535-1544.
- [15] Chylek P. Extinction and liquid water content of fogs and clouds[J]. *J Atmos Sci*, 1978, 35: 296-300.