

## 长波长红外光大气信道传输

丛日进,汪井源,徐智勇,王 荣,王 喆

(解放军理工大学 通信工程学院,江苏 南京 210007)

**摘 要:** 采用光子追踪法,模拟光子在大气信道中的随机迁移路径及散射后随机迁移方向。引入光束发散角和接收视场角等参数,建立了包含散射作用的长波长红外光大气信道传输模型。运用蒙特卡洛方法进行仿真,分析了雾环境下长波长红外光的大气传输特性。与朗伯-比尔定律进行对比,发现在能见度较低、通信距离较近时接收机接收的散射能量不能被忽略。分析了通信距离、能见度、光束发散角、接收视场角对链路损耗的影响,分析了不同阶次散射对接收机接收能量的影响。发现在给定参数条件下,四阶及以上高阶次散射对接收机接收能量几乎可以忽略。

**关键词:** 自由空间光通信; 信道模型; 蒙特卡洛; 长波长红外光

**中图分类号:** TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0927-06

## Long wave infrared transmission in atmospheric channel

Cong Rijin, Wang Jingyuan, Xu Zhiyong, Wang Rong, Wang Zhe

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** A free space optical communication channel model including stochastic transfer distance and direction of photon after being scattered was developed using a Monte Carlo simulation method based on photon tracing. In this model, beam divergence and field of view(FOV) were introduced, the influence of scattering was also in consideration. Simulations using Monte Carlo method and Lambert-Beer Law were carried out under fog condition with long wave infrared. Compared with Lambert-Beer Law, the result shows that the received energy of scattering can't be ignored under the condition of short range and low visibility. The influence of different ranges, visibilities, beam divergences and field of views on pass loss were analysed respectively using Monte Carlo method. The contributions of different scattering orders to total received energy were also illustrated. The effects caused by the 4th or higher orders scattering can be overlooked under given conditions so as to improve the efficiency of calculation.

**Key words:** free space optical communication; channel model; Monte Carlo; long wave infrared

收稿日期:2013-07-20; 修订日期:2013-08-03

基金项目:江苏省科技支撑计划(BE2011177);江苏省自然科学基金(BK2011114);江苏省自然科学基金(BK2012509)

作者简介:丛日进(1988-),男,硕士生,主要从事无线光通信方面的研究。Email:541116696@qq.com

导师简介:汪井源(1975-),男,副教授,硕士生导师,主要从事无线光通信方面的研究。Email:wjywjy2011@163.com

## 0 引言

相比传统的无线电通信方式,自由空间光通信(Free Space Optics, FSO)具有带宽宽、保密性好、抗干扰性强、无需频率申请、组网机动灵活等特点。因此,无论在军事还是民用领域,FSO 都有广阔的发展应用前景。然而,激光光束在大气信道中传输时会受到大气效应(大气衰减、大气湍流)的影响。其中,恶劣天气及大气湍流对 FSO 系统的通信距离及可靠性影响十分显著。

理论研究和外场实验表明,与现已普遍商用的 0.78~1.55  $\mu\text{m}$  近红外光 FSO 系统相比,波长 8~14  $\mu\text{m}$  的长波长红外光可以降低大气衰减和大气湍流对系统的影响,且对雾、霾等天气具有较好的穿透性,可以有效地提高自由空间光通信系统的可靠性<sup>[1-2]</sup>。随着量子级联激光器和碲镉汞等检测器件的逐渐成熟,长波长红外自由空间光通信系统日趋实用化<sup>[3-4]</sup>。

现有计算红外光在粒子群中的衰减的方法通常是在 Mie 散射理论的基础上利用朗伯-比尔定律完成的<sup>[5-6]</sup>。朗伯-比尔定律的前提是假设接收机的视场角为  $0^\circ$ , 散射能量无法进入接收机,都被算作损耗。而在实际的工程应用中,接收机是有一定视场角的,被认为衰减掉的散射能量有一部分可以进入接收机,此时需要考虑散射作用对接收机接收能量的贡献。特别是在能见度较低的雾霾天气下,接收机接收到的散射能量不能被忽略。

由于朗伯-比尔定律忽略了散射作用对接收机接收能量的贡献,且未考虑光束发散角、接收视场角等实际工程应用所需要的参数,因此具有一定局限性。文中根据长波长红外光在大气中的散射特性,将自由空间光通信信道的散射作用考虑在模型内。并且引入接收机孔径、光束发散角、接收视场角等参量,使其能够更好的贴近实际工程应用。论文分析了雾环境下波长为 10.6  $\mu\text{m}$  的激光的大气传输特性,并针对不同通信距离、能见度、发散角、视场角条件下的链路损耗进行了仿真分析。

## 1 蒙特卡洛信道传输模型

图 1 所示为光子在大气信道中传输示意图,光发射机位于初始坐标系  $(x_0, y_0, z_0)$  的原点处,光接收

机位于初始坐标  $(0, 0, r)$  处,即通信距离为  $r$ 。光发射机的光束发散角为  $\alpha_T$ , 光接收机的接收视场角为  $\alpha_R$ 。光子从发射机出射的初始方位角为  $\theta_0$ , 随机迁移步长为  $r_0$ , 偏转角为  $\phi_0$ 。  $O_i$  为第  $i$  次散射点, 散射方位角、随机迁移步长以及偏转角分别为  $(\theta_i, r_i, \phi_i)$ 。接收机接收到的光子可能未经历散射直接到达接收机,也可能经历 1~ $i$  次散射后到达接收机。图 1 所示为光子从出射后经历三次散射到达接收机。

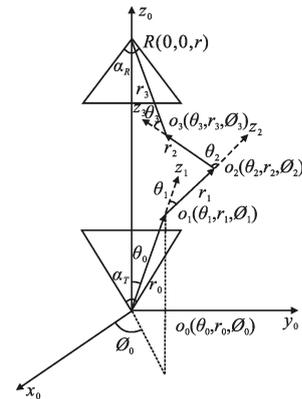


图 1 大气信道中光子传输示意图

Fig.1 Transmission of a photon in atmospheric channel

### 1.1 光子的发射

光子的初始位置即发射机的位置,也就是初始坐标  $(x_0, y_0, z_0)$  的原点。假设光源发射的光子在光束立体发散角  $\alpha_T$  内服从均匀分布,那么光子初始方位角和偏转角  $(\theta_0, \phi_0)$  所服从的概率密度函数为:

$$f_T(\theta_0, \phi_0) = \begin{cases} \frac{\sin\theta_0}{2\pi[1-\cos(\alpha_T/2)]} & (0 \leq \theta_0 \leq \alpha_T/2) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad (1)$$

$\phi_0$  在  $[0, 2\pi]$  内均匀分布,直接抽样得到:

$$\phi_0 = 2\pi\xi_\phi \quad (2)$$

$\theta_0$  在  $[0, \alpha_T/2]$  中的取值可根据  $\cos\theta_0$  在  $[\cos(\alpha_T/2), 1]$  内均匀分布,抽样得到:

$$\cos\theta_0 = 1 - \xi_\theta(1 - \cos(\alpha_T/2)) \quad (3)$$

公式(2)和(3)中,  $\xi_\phi$  和  $\xi_\theta$  均为  $[0, 1]$  内均匀分布的随机数。

### 1.2 光子迁移步长

当光子从发射机出射以后,以初始角度  $(\theta_0, \phi_0)$  在大气信道中迁移,直至到达接收机所在平面或发生第一次碰撞。碰撞的结果是光子被微粒散射出去或者被微粒吸收,它们之间相互独立且服从二项分布,其概率分别为  $k_s/k_e, k_a/k_e$ , 其中  $k_e = k_s + k_a$  为大气消

光系数,  $k_s$  为散射系数,  $k_a$  为吸收系数。相邻的散射体之间的距离  $r_i$  的概率密度函数为<sup>[7]</sup>:

$$f_i(r_i) = \exp(-k_e r_i) \quad (4)$$

则光子在经历第  $i$  次碰撞后随机迁移的步长  $r_i$  (即光子迁移  $r_i$  没有被散射也没有被吸收) 可由公式(4) 抽样得到:

$$r_i = -\lg(1 - \xi_i) / k_e \quad (5)$$

式中:  $\xi_i$  为一个  $[0, 1]$  之间的均匀分布的随机数。

### 1.3 光子的位置

光子发生第  $i$  次和第  $i+1$  次碰撞之间迁移向量为  $\vec{r}_i$ , 则第  $i+1$  个散射点  $o_{i+1}$  在坐标系  $(x_i, y_i, z_i)$  中的位置分量分别为:

$$x_i^{i+1} = r_i \sin \theta_i \cos \phi_i \quad y_i^{i+1} = r_i \sin \theta_i \sin \phi_i \quad z_i^{i+1} = r_i \cos \theta_i \quad (6)$$

坐标系  $(x_i, y_i, z_i)$  是以  $\vec{r}_{i-1}$  的方向为  $z$  轴建立的直角坐标系, 如图 2 所示。

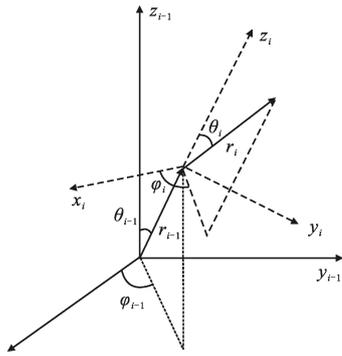


图 2 坐标转换示意图  
Fig.2 Transition of coordinate

假设光子最终经历  $i$  次散射, 则第  $i$  次散射点在初始坐标  $(x_0, y_0, z_0)$  中的位置可由公式(7)得到。

$$\begin{bmatrix} x_0^i \\ y_0^i \\ z_0^i \end{bmatrix} = \prod_{n=0}^{i-1} \begin{bmatrix} \cos \theta_n \cos \phi_n & -\sin \phi_n & \cos \phi_n \sin \theta_n \\ \sin \phi_n \cos \theta_n & \cos \phi_n & \sin \phi_n \sin \theta_n \\ -\sin \theta_n & 0 & \cos \theta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{i-1} \sin \theta_{i-1} \cos \phi_{i-1} \\ r_{i-1} \sin \theta_{i-1} \sin \phi_{i-1} \\ r_{i-1} \cos \theta_{i-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0^{i-1} \\ y_0^{i-1} \\ z_0^{i-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 1.4 光子的散射

光子发生散射后, 其散射方向由散射相函数决定。由于雾滴对光子的散射属于 Mie 散射, 它的散射相函数可以直接由严格的幂级数求解得到。但是, 在

实际计算时, 直接计算 Mie 散射理论相函数比较复杂, 且得出的解是幂级数的形式, 不易抽样得到散射方向。因此, 在实际应用中通常采用 H-G 散射相函数来代替<sup>[8]</sup>。

$$p_{H-G}(\theta) = \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{1.5}} \quad (8)$$

式中:  $g$  为不对称度因子。

对其进行抽样得到:

$$\cos(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2g} \left[ (1+g^2) - \left( \frac{1-g^2}{1-g+2g\xi_s} \right) \right] & (g \neq 0) \\ 2\xi_s - 1 & (g = 0) \end{cases} \quad (9)$$

$\phi_i$  在  $[0, 2\pi]$  内均匀分布, 直接抽样得到:

$$\phi_i = 2\pi \xi_n \quad (10)$$

公式(9)和(10)中,  $\xi_s$  和  $\xi_n$  均为  $[0, 1]$  之间均匀分布的随机数。

### 1.5 光子的权重

光子在大气中传输, 与微粒发生碰撞时会被微粒散射或吸收, 散射和吸收为相互独立事件, 其概率分别为  $k_s/k_e, k_a/k_e$ 。当发生散射时, 利用 Poole<sup>[9]</sup>等提出的加权统计法, 在光子发射后为每个光子赋予一个初始值为  $W_0=1$  权值。每次散射后更新光子的权值, 经历  $i$  次散射后光子的权值为:

$$W_i = W_{i-1} \cdot k_s/k_e = (k_s/k_e)^i \quad (11)$$

当光子散射达到一定次数, 即权值小于门限值或光子被吸收时, 停止对该光子追踪。

### 1.6 光子的检测

接收机接收到的光子, 或未经历散射直接到接收机, 或经历若干次散射后到达接收机。采用指向概率法计算光子发生散射后指向接收机的概率, 通过每次散射后概率的叠加, 使得每一个光子的每一次散射都对接收机接收的能量都有贡献, 这样就可以通过较小的模拟量得到较为稳定的结果。

光子经历第  $i$  次散射后指向接收机的概率可由公式(12)得到。

$$P = \frac{1}{4\pi} \int p(\theta) d\Omega = \frac{1}{2} \int p(\theta) \sin \theta d\theta \quad (12)$$

实际上, 指向概率法只是计算光子散射后指向接收机的概率, 由于接收机有一定的视场角, 因此, 并不是所有指向接收机的光子都能被检测到。除了计算光子散射后指向接收机的概率, 还需要判断散射点是否在接收机的视场角内。只有在视场角内的散射点散射的光子对最后的检测结果才有影响。

将每个光子对接收机最后接收能量的贡献叠加起来得到接收机接收到的总能量  $E_r$ , 设发射机发送的总能量为  $E_t$ , 则激光在大气中的传输损耗为:

$$L(\text{dB}) = -10 \lg \left( \frac{E_r}{E_t} \right) \quad (13)$$

## 2 仿真结果及分析

激光在大气中传输会受到大气衰减和大气湍流效应的影响, 其中, 雾对自由空间光通信系统的可靠性影响显著。长波长红外对雾具有较好的穿透性, 文中针对长波长红外在雾中传输进行仿真分析。

激光在雾中传输时, 链路损耗是由大气分子以及雾滴粒子的散射与吸收引起的。其中大气分子散射和吸收引起的损耗与雾滴粒子散射和吸收引起的损耗相比可以忽略。因此, 在研究激光在雾中传输时只需考虑雾滴粒子的散射与吸收作用。

液态的雾滴粒子由于其表面张力的作用, 基本呈球形, 半径一般在  $1 \sim 60 \mu\text{m}$ , 假设激光波长选取  $10.6 \mu\text{m}$ , 可得尺度参数  $x = 2\pi r / \lambda > 0.1$ , 所以用 Mie 散射理论来计算雾滴粒子对激光的散射作用是适用的<sup>[10]</sup>。根据形成雾的地域和形成雾的机理, 可以把雾分成两大类: 平流雾和辐射雾。海雾通常为平流雾, 内陆雾通常为辐射雾。它们的雾滴谱分布可由单一的能见度  $V$  来确定<sup>[11]</sup>, 分别如公式(14)和(15)所示。

$$n(r) = 1.059 \times 10^7 V^{1.15} r^2 \cdot \exp(-8.359 V^{0.43} r) \quad (14)$$

$$n(r) = 3.104 \times 10^{10} V^{1.7} r^2 \cdot \exp(-4.122 V^{0.54} r) \quad (15)$$

式中:  $r$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $n(r)$  的单位为  $\text{m}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,  $V$  的单位为  $\text{km}$ 。

由上述雾滴谱分布以及 Mie 散射理论可以计算出雾滴粒子的散射和吸收系数。其中,  $10.6 \mu\text{m}$  红外波的水的复折射系数  $m = 1.178 - i0.071$ 。

利用上述模型进行仿真分析, 雾滴谱函数采用辐射雾雾滴谱函数, 不同能见度下散射系数和吸收系数由 Mie 散射理论计算得到。仿真参数如下: 接收机天线孔径  $10 \text{ cm}$ , 不对称度因子  $g = 0.91$ 。

当模型视场角较小时, 散射能量不易进入接收机, 这种情况近似满足朗伯-比尔定律。为了验证散射模型的合理性, 设视场角为  $0.1^\circ$ , 仿真结果与朗伯-比尔定律吻合较好。实际上, 接收机视场角越小, 仿真结果越接近朗伯-比尔定律, 两者吻合性越好。

为了验证模型的必要性, 取视场角为  $2^\circ$ 。这时散射能量会进入接收机, 实际损耗会比朗伯-比尔定律计算得到的损耗值要低, 且在通信距离较短时不能忽略, 如图 3 所示。随着通信距离增加, 接收机接收到的散射能量对接收总能量的影响逐渐减小, 当距离增加到一定程度时, 散射能量可以忽略。

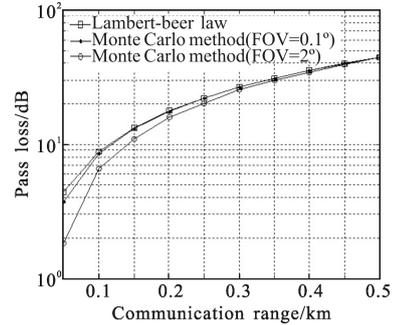


图 3 朗伯-比尔定律与蒙特卡洛方法对比  
(光束发散半角  $0.001^\circ$ , 能见度  $100 \text{ m}$ )

Fig.3 Comparison between Lambert-beer law and Monte Carlo simulation method(half beam divergence  $0.001^\circ$ , visibility  $100 \text{ m}$ )

实际工程应用中, 光束发散角、接收视场角以及接收机的孔径都会对链路损耗造成一定影响, 在能见度较低时还需要考虑散射作用。而朗伯-比尔定律是针对点对点的平行光的传输, 未包含光束发散角等实际系统中的参数, 且未考虑散射作用对接收机接收能量的贡献, 所以它的应用范围是有一定限制的。针对实际应用中不同能见度、接收视场角和光束发散角进行仿真, 分别如图 4~图 6 所示。

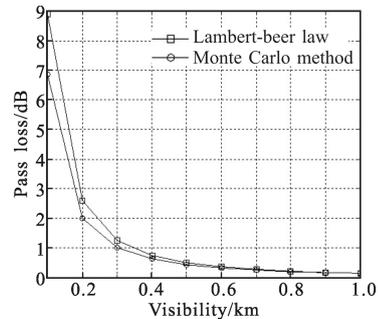


图 4 不同能见度下朗伯-比尔定律与蒙特卡洛方法对比  
(光束发散半角  $0.001^\circ$ , 视场角  $2^\circ$ , 通信距离  $100 \text{ m}$ )

Fig.4 Comparison between Lambert-beer law and Monte Carlo simulation method under different visibilities(half beam divergence  $0.001^\circ$ , FOV  $2^\circ$ , communication range  $100 \text{ m}$ )

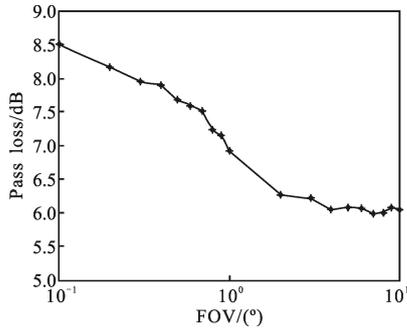


图 5 路径损耗随视场角的变化关系(光束发散半角  $0.001^\circ$ , 能见度 100 m, 通信距离 100 m)

Fig.5 Pass loss under different FOVs(half beam divergence  $0.001^\circ$ , visibility 100 m, communication range 100 m)

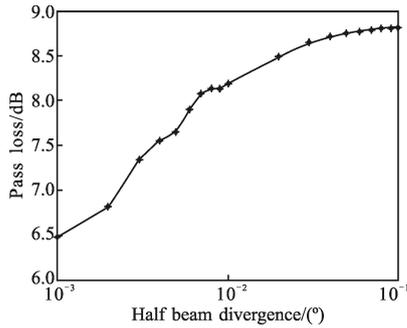


图 6 路径损耗随光束发散角变化关系(视场角  $2^\circ$ , 能见度 100 m, 通信距离 100 m)

Fig.6 Pass loss under different beam divergences(FOV  $2^\circ$ , visibility 100 m, communication range 100 m)

图 4 给出了链路损耗随能见度的变化关系。由图中可以看出,在能见度较低时,朗伯-比尔定律与散射模型的损耗值相差较大。随着能见度增加,两者差别减小,直至可以忽略。这说明在能见度较低时,散射作用是不能忽略的,同样说明了散射模型的必要性。图 5 所示为路径损耗与视场角的变化关系。从图中可以看出,随着视场角变大,链路损耗降低。这是由于随着视场角变大,接收机接收到的散射能量变多。随着视场角进一步变大,链路损耗趋于稳定。图 6 所示为链路损耗随光束发散角的变化关系。可以看出,随着光束发散角变大,链路损耗变大,且逐渐趋于平稳,接近朗伯-比尔定律的计算值。这是由于发散角变大,进入接收机的散射能量会逐渐减小,这里为了体现散射的作用未考虑几何损耗。

图 7 为接收机接收到的不同阶次的散射能量占发射总能量的比例。从图中可以看到,随着散射次数的增加,所占比例逐渐减小。通信距离较近时,接收

机接收的 4 阶散射能量相比于接收的 0 阶散射(未经历散射)的能量差 6 个量级,几乎对检测结果无影响。随着通信距离增大,散射能量相比于未经历散射的能量所占比例逐渐减小。仿真时可根据具体的散射系数和通信距离来确定可以忽略的高阶次散射,提高仿真效率。

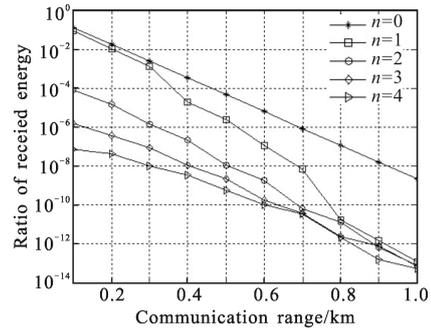


图 7 不同阶次散射能量占发射能量的比例(光束发散半角  $0.001^\circ$ , 视场角  $2^\circ$ , 能见度 100 m)

Fig.7 Ratio of received energy of different scattering orders (half beam divergence  $0.001^\circ$ , FOV  $2^\circ$ , visibility 100 m)

### 3 结论

针对朗伯-比尔定律的局限性,建立了包含多次散射作用的自用空间光通信信道传输模型,并针对  $10.6 \mu\text{m}$  长波红外在雾环境下的传输进行仿真,证明了该模型的合理性。仿真结果显示,当能见度较低、传输距离较近时,需考虑散射作用对接收机接收能量的贡献。综合考虑了光束发散角、接收视场角和接收机孔径等因素,使模型更加贴近实际应用。并且得到了链路损耗随传输距离、能见度、光束发散角、接收视场角的变化关系。给定文中仿真参数时,4 阶及其以上的高阶次的散射对接收能量的影响很小,几乎可以忽略不计。

### 参考文献:

[1] Bielecki Z, Mikolajczyk J, Nowakowski M, et al. Free-space optics second generation [C]//SPIE, 2008, 7124: 71240I-1-71240I-6.

[2] Gutowska M, Pierścińska D, Nowakowski M, et al. Transmitter with quantum cascade laser for free space optics communication system [J]. *Bull Pol Ac: Tech*, 2011, 59(4): 419-423.

[3] Paul Corrigan, Rainer Martini, Edward A Whittaker, et al. Quantum cascade lasers and the Kruse model in free space

- optical communication [J]. *Optics Express*, 2009, 17(6): 4355–4359.
- [4] Nowakowski M, Gutowska M, Szabra D, et al. Investigations of quantum cascade lasers for free space optics operating at the wavelength range of 8–12  $\mu\text{m}$ [J]. *Acta Physica Polonica A*, 2011, 120(4): 705–708.
- [5] Du Yongcheng, Yang Li, Zhang Xiufeng, et al. Study on the correctional method for the attenuation calculation of infrared radiation in the water fogs [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10): 2632–2635. (in Chinese)  
杜永成, 杨立, 张修峰, 等. 红外辐射在水雾中衰减计算的修正方法研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(10): 2632–2635.
- [6] Wang Haihua, Sun Xianming, Shen Jin, et al. Multiple scattering characteristic by a cluster of nano particles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1495–1498. (in Chinese)  
王海华, 孙贤明, 申晋, 等. 纳米级颗粒系对激光的多次散射特性[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1495–1498.
- [7] Drost Robert J, Moore Terrence J, Sadler Brian M. UV communications channel modeling incorporating multiple scattering interactions [J]. *Optical Society of America*, 2011, 28(4): 686–695.
- [8] Ding Haipeng, Chen Gang, Arun K, et al. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(9): 1535–1544.
- [9] Poole L R, Venable D D, Campbell J W. Semianalytic Monte Carlo radiative transfer model for oceanographic lidar systems [J]. *Appl Opt*, 1981, 20(20): 3653–3656.
- [10] Li Li, Gao Zhiyun, Wang Xia, et al. Effects of forward-scattering of fog on range-gated imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(6): 562–566. (in Chinese)  
李丽, 高雅允, 王霞, 等. 雾的前向散射对距离选通成像系统的影响[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(6): 562–566.
- [11] Ke Xizheng, Ma Dongdong, Liu Jiani. Study attenuation of laser transmission in fog [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2009, 21(2): 104–109. (in Chinese)  
柯熙政, 马东东, 刘佳妮. 激光在雾中传输的衰减研究[J]. *光散射学报*, 2009, 21(2): 104–109.