

近中远红外光在雾中的传输损耗研究

丛日进¹ 汪井源¹ 王 荣¹ 徐智勇¹ 程慕春² 张启玮³

¹解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

²中国人民解放军 68036 部队, 陕西 西安 710061

³中国人民解放军 75234 部队, 广东 东莞 523638

摘要 利用光子追踪法建立了红外大气信道传输模型,并给出传输损耗理论表达式。分别采用朗伯-比尔定律和蒙特卡罗仿真方法计算传输损耗,并将两个结果进行对比分析。结果显示,在能见度较低,通信距离较近时接收机接收到的散射能量不能被忽略。分析了近红外、中红外及远红外在不同能见度、通信距离下的传输损耗。结果显示,在辐射雾条件下,波长为 10.6 μm 的远红外光传输损耗最小;在平流雾条件下,能见度小于 200 m 时,波长为 0.85 μm 的近红外光传输损耗较小,能见度大于 200 m 时,波长为 10.6 μm 的远红外光传输损耗最小。

关键词 自由空间光通信;蒙特卡罗法;米散射;雾

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.080603

Study on the Attenuation of Different Infrareds Transmission in Fog

Cong Rijin¹ Wang Jingyuan¹ Wang Rong¹ Xu Zhiyong¹

Cheng Muchun² Zhang Qiwei³

¹*Institute of Communication Engineering, PLA University of Science & Technology,
Nanjing, Jiangsu 210007, China*

²*Unit 68036 of PLA, Xi'an, Shaanxi 710061, China*

³*Unit 75234 of PLA, Dongguan, Guangdong 523638, China*

Abstract An infrared atmospheric transmission model is established based on photon tracing, and the theoretical equation for pass loss has also been derived. Through comparing pass losses calculated by Lambert-Beer law and Monte-Carlo method we know that the scattering energy received by the receiver cannot be ignored. The transmission characteristics of near infrared, mid-infrared and far infrared under different visibilities and communication ranges are achieved. The results reveal that the pass loss of 10.6 μm is the minimum under the radiation fog. While under the advection fog, 0.85 μm has the minimum pass loss when the visibility is below 200 m, and 10.6 μm has the minimum pass loss when the visibility is over 200 m.

Key words free space optical communications; Monte-Carlo method; Mie scattering; fog

OCIS codes 010.1290; 010.1300; 010.1310

1 引言

大气效应是自由空间光通信面临的十分重要的问题,包括大气衰减效应和大气湍流效应。大气衰减是由大气中的分子和微粒对红外光的吸收和散射引起的。为了减小大气衰减效应,自由空间光通信所选取的波长都位于大气窗口内。现已普遍商用的自由空间光通信系统采用的波长大都在近红外大气窗口,如 0.85 μm 和 1.55 μm 。但是,对于波长较短的近红外光,大气效应特别是雾、霾等恶劣天气对其影响较大,严重制约了自由空间光通信系统的通信距离和可靠性。

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-02-24; 网络出版日期: 2014-06-28

基金项目: 江苏省科技支撑计划(BE2011177)、江苏省自然科学基金(BK2011114, BK2012509)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2013GZKF031304)

作者简介: 丛日进(1988—),男,硕士研究生,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: 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。E-mail: wjwyy2011@163.com

理论分析和实验研究表明,同近红外光相比,远红外光具有对人眼安全、大气湍流效应和大气衰减效应较小、对雾霾等天气穿透性好等优势,故远红外光自由空间光通信被称为第二代自由空间光通信^[1-2]。随着远红外波段的激光器(量子级联激光器)和探测器(碲镉汞探测器、量子阱探测器、量子级联探测器等)的小型化和成熟化,远红外自由空间光通信发展的障碍逐渐被克服,使远红外自由空间光通信系统实用化成为可能^[3-4]。

已有研究远红外大气传输效应的方法主要是通过 Kruse 等经验模型对其进行简单分析^[5-6],通过建立模型详细对比分析近中远红外光大气传输特性的研究尚未见报道。本文采用光子追踪法,模拟光子在大气中传输的随机迁移路径及方向。引入光束发散角、接收视场角和接收机孔径等参数,建立贴近实际工程应用的自由空间光通信信道传输模型。运用蒙特卡罗仿真方法,分析了雾环境下处于大气窗口的近红外光(波长 0.85 μm)、中红外光(波长 3.6 μm)及远红外光(波长 10.6 μm)的传输损耗,并与朗伯-比尔定律计算值进行对比分析。文中还研究了三个波长红外光在辐射雾和平流雾中的传输特性。

2 激光在雾中的衰减

2.1 雾的特性

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,雾对激光具有强烈的散射和吸收作用^[7],雾的存在严重影响了自由空间光通信系统的可靠性。液态的雾滴粒子由于其自身重力和表面张力的作用,基本呈球形或椭球形,半径一般在 1~60 μm ,对于波长分别为 0.85、3.6、10.6 μm 的红外光,尺度参数 $x = 2\pi r/\lambda$, x 大于 0.1。因此,在研究激光在雾中传输时大气分子对激光的散射和吸收可以忽略,只需考虑雾滴粒子的散射与吸收作用^[8-9]。

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 $n(r)$ 可由单一的能见度 V 来确定^[10],表示为

$$\begin{cases} n(r) = 1.059 \times 10^7 V^{1.55} r^2 \cdot \exp(-0.8359 V^{0.43} r) \\ n(r) = 3.104 \times 10^{10} V^{1.7} r^2 \cdot \exp(-4.122 V^{0.54} r) \end{cases}, \quad (1)$$

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

2.2 朗伯-比尔定律

基于 Mie 散射理论及雾滴谱分布可由

$$k_x = \int_0^{\infty} Q_x(r, \lambda, m) n(r) dr \quad (2)$$

计算得到激光在雾中传输的散射系数 k_s 、吸收系数 k_a 和消光系数 k_e ,其中 $x = s, a, e$, $k_e = k_s + k_a$ 。(2)式中 Q_s 、 Q_a 和 Q_e 分别为粒子散射截面、吸收截面和消光截面; m 为水的复折射系数,波长分别为 0.85、3.6、10.6 μm 的红外光对水的复折射系数分别为 $1.329 - i2.93 \times 10^{-7}$ 、 $1.385 - i0.00515$ 、 $1.178 - i0.071$ ^[11]。

计算红外光在粒子群中的衰减,最常用的方法为朗伯-比尔定律^[12]:

$$\tau(L) = P_r/P_t = \exp(-k_e L), \quad (3)$$

式中 $\tau(L)$ 为大气透射率, P_r 为接收功率密度, P_t 为发射功率密度, L 为传输距离。由此可得传输损耗为

$$A = 10 \lg(\tau) = 4.343 k_e L \quad (\text{dB/m}). \quad (4)$$

通过朗伯-比尔定律可以计算得到激光在雾中传输时的损耗,但朗伯-比尔定律成立的条件是假设接收机的视场角为 0° ,散射的能量无法进入接收机而都被认为是损耗。实际工程应用中,接收机是有一定视场角的,部分被认为衰减掉的能量是可以进入接收机的,因此需要考虑散射作用对接收接收能量的贡献^[13]。且朗伯-比尔定律是一次散射的近似,在能见度较低的雾天,还需考虑多次散射的作用。因此,在雾环境下朗伯-比尔定律不能很好地反映实际情况。

2.3 蒙特卡罗信道模型

红外光在雾中传输的过程,实际上就是光子与雾滴粒子随机碰撞的过程。采用光子追踪法模拟光子在大气信道中的传输,如图 1 所示。

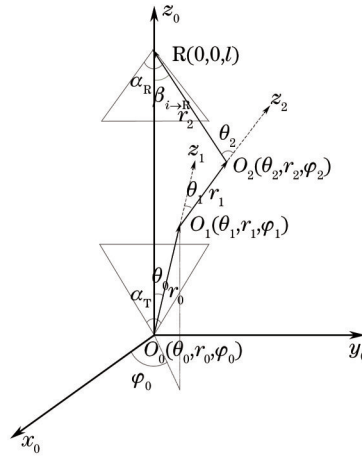


图1 大气信道中光子传输示意图

Fig.1 Transmission of photon in atmospheric channel

图1中,光发射机位于初始坐标系 (x_0, y_0, z_0) 的原点 O_0 处,光接收机位于初始坐标系 $R(0,0,l)$ 处。光发射机的光束发散角为 α_T ,光接收机的接收视场角为 α_R 。光子从发射机出射的初始方位角为 θ_0 ,随机迁移步长为 r_0 ,偏转角为 ϕ_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 (θ_i, r_i, ϕ_i) 。

假设从光源出射的光子在光束立体发散角 α_T 内是均匀分布的,由此可得光子初始方位角和偏转角 (θ_0, ϕ_0) 所服从的概率密度函数,表示为

$$f_T(\theta_0, \phi_0) = \begin{cases} \frac{\sin \theta_0}{2\pi[1 - \cos(\alpha_T/2)]} & 0 \leq \theta_0 \leq \alpha_T/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

当光子离开发射机后,光子以初始角度 (θ_0, ϕ_0) 在大气中迁移,光子在大气中迁移距离 r (光子迁移距离 r 既没有被散射也没有被吸收)的概率密度函数表示为^[14]。

$$f_i(r) = k_e \exp(-k_e r) \quad (6)$$

由(6)式可得到光子在大气中迁移距离 r 的概率为

$$P_r(r) = \exp(-k_e r) \quad (7)$$

光子在到达接收机所在平面之前可能没有经历碰撞,也可能经历若干次碰撞。光子与雾滴粒子发生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 。

光子与微粒发生碰撞后,如果发生散射,则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。但在实际应用中,直接用 Mie 散射理论计算散射相函数十分复杂,并且得到的相函数是幂级数的形式,不易抽样得到散射方向。实际应用中通常采用 H-G 散射相函数来代替理论值,表示为

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

式中 g 为不对称度因子。

接收机接收到的光子包括未经历散射直接到达接收机的光子和经历 i 次散射后到达接收机的光子两个部分。光子在经历 i 次散射后到达接收机时,要想被检测器检测到还必须满足第 i 次散射点到接收机的迁移向量 $r_{i \rightarrow R}$ 与发射机到接收机的向量 l 之间的夹角小于接收机的半视场角 $\alpha_T/2$, 即 $\beta_{i \rightarrow R} \leq \alpha_T/2$ 。定义函数 P_R 为

$$P_R = \begin{cases} 1 & \beta_{i \rightarrow R} \leq \alpha_T/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

由此可以得到光子发生第 i 次散射后能够到达接收机并被检测器检测到的概率为

$$p_{i \rightarrow R} = \frac{k_s}{k_e} P_r(r_i) \cdot f_{H-G}(\theta_i) \cdot 2\pi \left[1 - r_i (r_i^2 + S/\pi)^{-1/2} \right] \cdot P_R, \quad (10)$$

(10)式中 S 为接收机面积。

假设某光子到达接收机前未经历碰撞,则该光子能够到达接收机并被检测器检测到的概率为

$$P_0 = \iint f_T(\theta_0, \phi_0) f_r(r_0) d\Omega_0 dr_0, \quad (11)$$

这里假设到达接收机的光斑面积小于接收机面积,即不考虑出现几何损耗的情况。

假设光子到达接收机之前经历一次散射,则该光子被检测器检测到的概率为

$$P_1 = \iint f_T(\theta_0, \phi_0) f_r(r_0) p_{1 \rightarrow R} d\Omega_0 dr_0. \quad (12)$$

假设光子到达接收机之前经历 i ($i \geq 2$)次散射,则该光子被检测器检测到的概率为

$$P_i = \iint \cdots \int f_T(\theta_0, \phi_0) f_r(r_0) \left[\prod_{n=1}^{i-1} \frac{k_n}{k_c} f_r(r_n) f_{H-G}(\theta_n) \right] p_{i \rightarrow R} d\Omega_0 \cdots d\Omega_{i-1} dr_0 \cdots dr_{i-1}. \quad (13)$$

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 $E_r = \sum_{i=0}^n P_i E_i$,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

$$L(\text{dB}) = 10 \lg \left(\frac{E_t}{E_r} \right) = 10 \lg \left(1 / \sum_{i=0}^n P_i \right). \quad (14)$$

3 仿真分析

通过以上分析得到了激光在大气中的传输损耗表达式,但由于表达式中含有多重积分,无法得到传输损耗的数值解,这里采用蒙特卡罗仿真方法对损耗进行数值估算,即对被积函数的变量区间进行随机均匀抽样,然后计算抽样点的被积函数值并进行数值平均,从而得到多重积分的近似数值解。仿真参数设置为:光束发散角 0.001° ,接收机视场角 2° ,接收机孔径 10 cm ,不对称度因子 $g=0.91$ 。

由于朗伯-比尔定律未考虑接收机接收到的散射能量,且只是一次散射的近似,无法准确计算红外光在大气中的传输损耗。图2所示为不同通信距离下波长 $3.6 \mu\text{m}$ 的中红外光在雾中传输时朗伯-比尔定律损耗值和蒙特卡罗方法仿真的损耗值的对比。从图中可以看到,蒙特卡罗方法得到的损耗值要比朗伯-比尔定律计算的损耗值小,且当通信距离较近时,它们之间的差值不能被忽略。随着通信距离的增加,两者的差别逐渐减小,直至可以忽略。这是因为随着传输距离的增加,光子经历碰撞的次数变多,散射作用和吸收作用使光子经历散射进入接收机的概率减小。

图3所示为不同能见度下波长为 $3.6 \mu\text{m}$ 的中红外光分别用朗伯-比尔定律和蒙特卡罗方法得到的传输损耗值的对比。从图中可以看到,蒙特卡罗方法得到的传输损耗值比朗伯-比尔定律得到的损耗值要小,且在能见度较低时,它们之间的差值不能忽略。随着能见度的增加,两者差别逐渐减小,直至可以忽略。这是由于随着能见度的提高,光子发生碰撞的概率减小,从而导致进入接收机的散射能量减小。

通过图2和图3可以看到,以波长为 $3.6 \mu\text{m}$ 的中红外光为例,在能见度较低,通信距离较近时,接收机

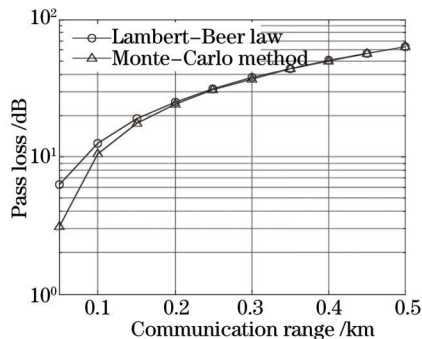


图2 不同通信距离下朗伯-比尔定律与蒙特卡罗方法对比
(能见度为 100 m)

Fig.2 Comparison between Lambert-Beer law and Monte-Carlo method under different communication ranges (Visibility is 100 m)

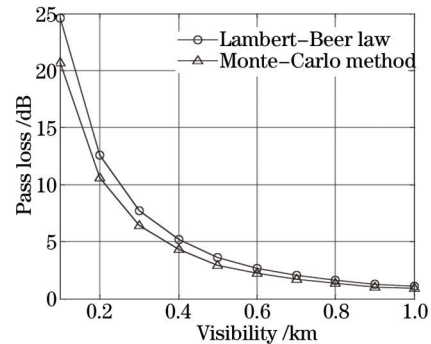


图3 不同能见度下朗伯-比尔定律与蒙特卡罗方法对比
(通信距离为 100 m)

Fig.3 Comparison between Lambert-Beer law and Monte-Carlo method under different visibilities (Communication range is 100 m)

接收到的散射能量相对于接收的总能量是不能被忽略的。其他两个波长的红外光可以得到同样的结论。充分说明了在雾条件下,采用蒙特卡罗方法分析红外传输特性的必要性。

图4所示为不同波长的红外光在辐射雾中的传输特性。从图中可以看到,波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的远红外光在不同能见度下的传输损耗均小于波长为 $0.85\ \mu\text{m}$ 的近红外光和波长为 $3.6\ \mu\text{m}$ 的中红外光传输损耗。

图5所示为不同波长的红外光在平流雾中的传输特性。从图中可以看出,能见度小于 $200\ \text{m}$ 时,波长为 $0.85\ \mu\text{m}$ 的近红外光传输损耗较小,能见度大于 $200\ \text{m}$ 时,波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的远红外光传输损耗最小。且它们损耗之间的差值较辐射雾中的损耗差值要小。在实际工程应用中,可以根据实际情况选取通信波长,以提高通信系统的可靠性,增加通信距离。

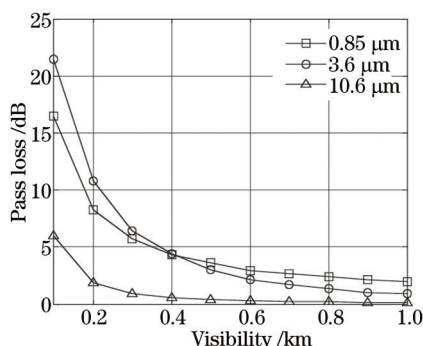


图4 辐射雾条件下不同波长的传输损耗
(通信距离为 $100\ \text{m}$)

Fig.4 Pass losses of different wavelengths under the radiation fog (Communication range is $100\ \text{m}$)

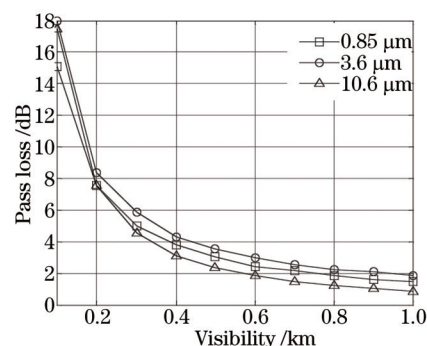


图5 平流雾条件下不同波长的传输损耗
(通信距离为 $100\ \text{m}$)

Fig.5 Pass losses of different wavelengths under the advection fog (Communication range is $100\ \text{m}$)

图6、7、8所示分别为波长为 0.85 、 3.6 、 $10.6\ \mu\text{m}$ 的红外光在辐射雾和平流雾中传输损耗的对比。从图中可以看到,对于 $0.85\ \mu\text{m}$ 的近红外光,辐射雾中的传输损耗大于平流雾中的传输损耗;对于 $3.6\ \mu\text{m}$ 的中红外光,当能见度小于 $400\ \text{m}$ 时,辐射雾中的传输损耗大于平流雾中的传输损耗,当能见度大于 $400\ \text{m}$ 时,辐射雾中的传输损耗小于平流雾中的传输损耗;对于 $10.6\ \mu\text{m}$ 的远红外光,辐射雾中的传输损耗小于平流雾中的传输损耗。

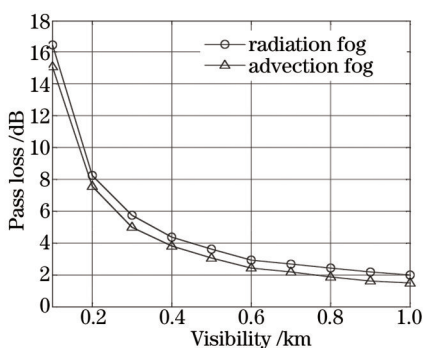


图6 波长 $0.85\ \mu\text{m}$ 红外光在两种雾中的传输损耗
(通信距离为 $100\ \text{m}$)

Fig.6 Pass losses of $0.85\ \mu\text{m}$ infrared under two types of fog (Communication range is $100\ \text{m}$)

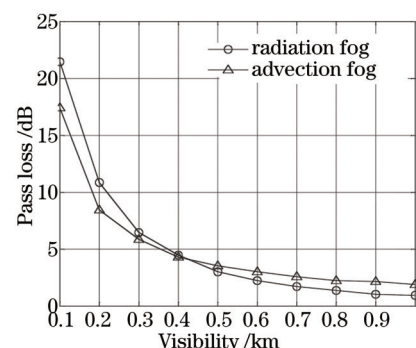


图7 波长 $3.6\ \mu\text{m}$ 红外光在两种雾中的传输损耗
(通信距离为 $100\ \text{m}$)

Fig.7 Pass losses of $3.6\ \mu\text{m}$ infrared under two types of fog (Communication range is $100\ \text{m}$)

4 结 论

通过多次散射模型与朗伯-比尔定律的对比,发现红外光在能见度较低、通信距离较近的情况下传输时,接收机接收的散射能量不能被忽略。详细分析了 0.85 、 3.6 、 $10.6\ \mu\text{m}$ 在辐射雾和平流雾中的传输特性。结果显示,在辐射雾中 $10.6\ \mu\text{m}$ 的远红外光的传输损耗明显低于其他两个波长的红外光,在平流雾中,能见度小于 $200\ \text{m}$ 时,波长为 $0.85\ \mu\text{m}$ 的近红外光传输损耗最小,能见度大于 $200\ \text{m}$ 时,波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的

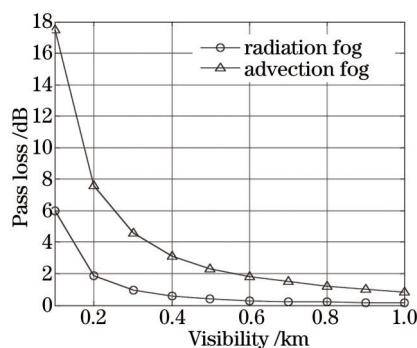


图8 波长 10.6 μm 红外光在两种雾中的传输损耗(通信距离为 100 m)

Fig.8 Pass losses of 10.6 μm infrared under two types of fog (Communication range is 100 m)

远红外光传输损耗最小。该结论对实际工程应用中根据不同情况选取通信波长具有一定的指导意义。

参考文献

- 1 T Plank, E Leitgeb, P Pezzei, *et al.*. Wavelength-selection for high data rate free space optics (FSO) in next generation wireless communications[C]. Proceedings of NOC, 2012, doi: 10.1109/NOC.2012.6249909.
- 2 E Leitgeb, T Plank, M S Awan, *et al.*. Analysis and evaluation of optimum wavelengths for free-space optical transceivers[C]. Proceedings of ICTON, 2010. Th.B3.1.
- 3 Chen Guichu, Fan Guanghan, Chen Lianhui. Circuit simulation for modulation characteristics of quantum cascade semiconductor laser[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(10): 1344-1348.
陈贵楚, 范广涵, 陈练辉. 量子级联激光器调制特性的电路模拟[J]. 光学学报, 2004, 24(10): 1344-1348.
- 4 M Gutowska, D Pierscińska, M Nowakowski, *et al.*. Transmitter with quantum cascade laser for free space optics communication system[J]. Bull Pol Ac: Tech, 2011, 59(4): 420-423.
- 5 Paul Corrigan, Rainer Martini, Edward A Whittaker, *et al.*. Quantum cascade lasers and Kurse model in free space optical communication[J]. Opt Express, 2009, 17(6): 4355-4359.
- 6 Z Bielecki, J Mikolajczyk, M Nowakowski, *et al.*. Free-space optics second generation[C]. SPIE, 2008, 7124: 71240I.
- 7 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.*. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Beijing University Press, 2003.
盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- 8 M Saleem Awan, E Leitgeb, S Sheikh Muhammad, *et al.*. Distribution function for continental and maritime fog environments for optical wireless communication[C]. Proceedings of CSNDSP08, 2008. 260-264.
- 9 Song Xueping, Liu Feng, Qin Yifan. Influence of multi-scattering of cloud to making laser scattering signal [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s1): 433-435.
宋雪平, 刘 锋, 覃一凡. 云雾多次散射对激光散射信号生成的影响[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(s1): 433-435.
- 10 Ke Xizheng, Ma Dongdong, Liu Jiani. Study Attenuation of laser transmission in fog[J]. Journal of Light Scattering, 2009, 21(2): 104-109.
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.
- 11 George M Hale, Marvin R Query. Optical constants of water in the 200-nm to 200-m wavelength region[J]. Appl Opt, 1973, 12(3): 555-563.
- 12 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.
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.
- 13 Liu Xichuan, Gao Taichang, Liu Zhitian. Effect of atmospheric aerosols on laser transmission attenuation[J]. Journal of Atmospheric and Environment Optics, 2012, 7(3): 181-190.
刘西川, 高太长, 刘志田. 大气气溶胶对激光传输衰减的影响研究[J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(3): 181-190.
- 14 Robert J Drost, Terrence J Moore, Brian M Sadler. UV communications channel modeling incorporating multiple scattering interactions[J]. J Opt Soc Am A, 2011, 28(4): 686-695.