

雾环境下非视距大气散射传输特性研究

林 勇¹ 徐智勇¹ 汪井源¹ 宋 超² 王 荣¹ 陈亦望¹

(¹解放军理工大学通信工程学院光电与量子信息技术教研室, 江苏 南京 210007)
² 中国人民解放军 66284 部队, 北京 100000)

摘要 基于蒙特卡罗法建立了多次散射随机模型, 并利用该模型对雾环境下非视距大气散射光通信信道传输特性进行了模拟分析。由于大气对可见光波段或者红外光波段的信号光吸收损耗较小, 且大气分子对传输信号光产生的瑞利散射作用可以忽略, 同时, 该波段信号光子与大气中的雾滴粒子等尺度较大的粒子间会发生较强的米氏散射作用, 故在长距离散射光通信系统中一般采用该波段的信号光源。模拟时选择的光波长为 620 nm, 分析了在雾环境下通信距离条件不同时, 信号光传输的损耗与能见度的关系。结果表明, 在给定的通信距离以及给定的系统发送端发送仰角和发送光束束散角、接收端接收仰角和接收视场角等几何参数下, 存在一个能见度使得在该能见度条件下信号光传输的损耗最小。

关键词 大气光学; 非视距; 蒙特卡罗方法; 米氏散射; 光通信; 能见度

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0901001

Simulation Research on Non-Line-of-Sight Atmospheric Propagation in Fog Weather

Lin Yong¹ Xu Zhiyong¹ Wang Jingyuan¹ Song Chao² Wang Rong¹ Chen Yiwang¹

(¹ Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007 China
² Troops 66284 PLA, Beijing, 100000, China)

Abstract The multiple scattering propagation model with Monte Carlo method is established, and characteristics in non-line-of-sight (NLOS) atmospheric scattering optical communication channel in fog weather are simulated and analyzed by using the model. The absorption loss for visible light or infrared light is relatively low in atmosphere, and the Rayleigh scattering effect generated when visible light or infrared light barges up against air molecules can be ignored. At the same time, there will be a strong Mie scattering effect that occurs between the signal photon in visible light or infrared light wave band and fogdrop particles, so the visible light or infrared light is generally used in long distance scattering optical communication systems. The wavelength selected in simulation is 620 nm, and the relationship between transmission loss and visibility is analyzed in different communication distances in fog weather. The results demonstrate that there will be a visibility that can makes transmission loss lower when the communication range, the elevation angle, the transmitting beam-width divergence and the field-of-view are determined.

Key words atmospheric optics; non-line-of-sight; Monte Carlo method; Mie scattering; optical communications; visibility

OCIS codes 010.1300; 010.1310; 010.7295

1 引 言

无线激光通信技术凭借着通信容量大、成本低、保密性好等优点在近地面短距离通信及军事通信领域都有着广泛的应用, 并且越来越受到人们的关注。

激光在大气信道中传输, 由于大气信道的随机性, 通信质量会受到很大的影响, 大气中的气体分子、气溶胶粒子和雨雾雪等天气因素会使得激光信号能量衰减。本文在分析雾的物理特性、折射率以及雾滴粒

收稿日期: 2013-03-26; 收到修改稿日期: 2013-04-22

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)

作者简介: 林 勇(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: 724350824@qq.com

导师简介: 徐智勇(1972—), 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: linjxzy123@163.com

子的谱分布特性的基础上,利用米氏散射理论分析了雾滴粒子在可见光($\lambda = 620 \text{ nm}$)波段的散射特性,通过建立多次散射随机模型,研究讨论雾环境下激光传输的衰减特性,最后通过蒙特卡罗方法对模型进行仿真,得到一些定量的结论,对于研究雾环境下的激光衰减状况,评估衰减影响和提高雾天激光通信的质量方面的应用具有一定的指导意义。与近距离紫外散射光通信不同^[1-2],本文仿真中所采用的光源波长为 620 nm 。基于可见光以及红外光波段的信号光源的非视距大气散射具有诸如大气分子的传输衰减损耗可以忽略的特征^[3-4],同时,该波段信号光子与大气中的雾滴粒子等尺度较大的粒子间会发生较强的米氏散射作用。米氏散射所具有的明显的散射方向性、传输信号光的抗电磁干扰以及难以识别的特性,可以确保通信链路的安全性和保密性,有着广泛的军事应用前景^[5]。

2 雾滴粒子的分布特性

雾出现在贴地的气层中,是接地的云,它是由悬浮在近地面空气中缓慢沉降的微小水滴或冰晶等组成的一种胶体系统,是贴地气层中水汽凝结的产物。雾的稳定程度和发展趋势是由其粒子的大小和尺寸分布所标识的。一般来说,对于刚刚形成的雾,其粒子大小分布比较均匀,而对于已经存在很长时间或即将消散的雾,其粒子尺度谱分布较宽。雾滴粒子半径一般都在 $1 \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$ 之间,在刚刚形成或者趋

于消散的过程中雾滴粒子的半径一般小于 $15 \text{ }\mu\text{m}$ 。重雾条件下,即能见度 $V < 50 \text{ m}$ 时雾滴半径可达到 $20 \sim 30 \text{ }\mu\text{m}$;当能见度 $V > 100 \text{ m}$ 时,雾滴粒子的半径大多小于 $8 \text{ }\mu\text{m}$ ^[6]。

在雾环境下,长波长信号光在大气信道中进行传输的时候会与雾滴粒子发生相互作用,由于雾滴粒子尺寸与信号光波长相当,所以雾滴粒子对于传输信号光的影响主要体现在米氏散射方面。信号光子与微粒发生作用时,该光子被散射或者被吸收由消光系数决定的,而碰撞后光子新的迁移方向则是由散射相函数决定。散射相函数与消光系数又是由粒子的浓度、尺度分布以及对给定光源波长的复折射系数决定的。

由于雾滴一般是由水滴构成,所以通常使用水的折射率来代替雾滴的折射率。水滴对于波长为 620 nm 的信号光,其复折射系数 $m = 1.3333585 + i \times 1.36 \times 10^{-8}$ ^[7]。根据形成雾的不同地理位置以及形成雾的机理,可以把雾大致分为两个大类,即平流雾和辐射雾。对于雾滴粒子的尺寸分布,目前比较通用的是广义 Gamma 分布,其表达式为^[6]

$$n(r) = ar^{-\alpha} \exp(-br^{\beta})m^{-4}, \quad (1)$$

式中 r 为雾滴粒子的半径, $n(r)$ 是雾滴粒子的谱分布函数, a, b, α, β 为确定雾滴粒子尺寸分布的参数。利用能见度与雾液态含水量的关系可以推出平流雾和辐射雾的尺寸分布^[6]:

$$\begin{cases} n(r) = 1.059 \times 10^7 \times V^{1.15} \times r^2 \exp(-0.8359V^{0.43}r), & \text{advection fog} \\ n(r) = 3.104 \times 10^{10} \times V^{1.7} \times r^2 \exp(-4.122V^{0.54}r), & \text{radiation fog} \end{cases}, \quad (2)$$

式中能见度 V 的单位为千米。

根据大气物理学,当满足独立散射条件,即相邻粒子之间的距离相比较粒子半径大三倍以上时,单位体积内的粒子的总散射强度为各个粒子散射强度之和,故雾滴粒子的总的衰减系数、散射系数和吸收系数为^[8]

$$k_i = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_i(r, \lambda, m) n(r) dr, \quad (3)$$

$i = \text{ext, sca or abs,}$

式中 $Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n)$, $Q_{\text{sca}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)$, $Q_{\text{abs}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{sca}}$, x

为粒子尺度参数, $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$, a_n, b_n 为米氏散射系数。

图 1 和图 2 分别为波长为 620 nm 的信号光在平流雾和辐射雾条件下散射系数与能见度的变化关系。

散射相函数是指对于给定波长的信号光,在某个指定的方向上单位立体角中散射能量和其在所有方向上平均的单位立体角中的散射能量之比。其描述了光子在新的散射方向与入射方向之间的角度改变量上的强度分布。对于大气散射通信,不同天气条件下所选择的散射相函数也不同,在雾环境下,修正的 Henyey-Greenstein 函数可以更好地拟合米氏散射,其表示式为^[9]

$$P(\theta, g) = 1.5(1 - g^2)(2 + g^2)^{-1}(1 + \cos^2\theta) \times (1 + g^2 - 2g\cos\theta)^{-3/2}, \quad (4)$$

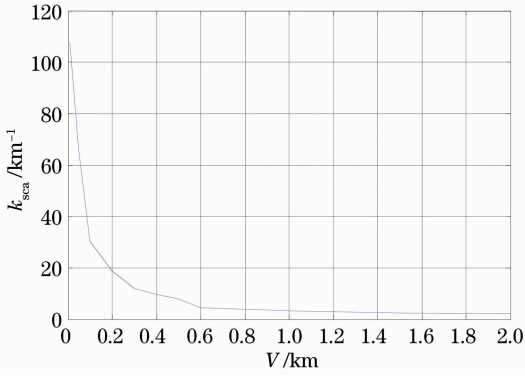


图 1 波长为 620 nm 的信号光在平流雾下散射系数与能见度的变化关系

Fig. 1 Curve of scattering coefficient of 620 nm laser versus visibility through the advection fog

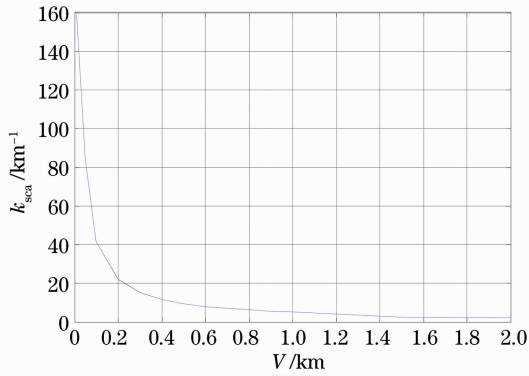


图 2 波长为 620 nm 的信号光在辐射雾下散射系数与能见度的变化关系

Fig. 2 Curve of scattering coefficient of 620 nm laser versus visibility through the radiation fog

式中 θ 为散射方向角, g 为非对称因子, 雾环境下米氏散射相函数中的非对称因子为 0.9。

3 多次散射随机模型的建立

假设光子与雾滴粒子碰撞后发生散射或者吸收事件是随机的, 忽略光子与大气中存在的分子、尘埃等粒子的碰撞, 仅仅考虑雾滴粒子对于散射光通信的影响, 并且在经历过给定次数的散射后, 光子的随机迁移方向以及能否被检测器捕获仍旧是随机的。对于采取多次散射方式到达检测器的光子, 其发生散射的点的位置坐标可以用 $S_i(r_i, \theta_i, \phi_i)$ 来表示, 如图 3 所示。其中, r_i 表示光子从第 i 个散射点到第 $(i+1)$ 个散射点之间的迁移距离; θ_i 为散射角, 即光子第 i 次散射前的迁移方向和第 i 次散射后的迁移方向之间的夹角; ϕ_i 为空间方位角, 即散射平面相对于入射光子路径的旋转角度。这样, 光子的迁移路径就可以通过所有的散射点 S_1, S_2, \dots, S_n 表示。通

过计算光子以各阶次散射的方式到达检测器的概率, 就可以得到检测器所接收到的总的能量, 进而得到雾环境下大气散射信道的路径损耗^[10]。

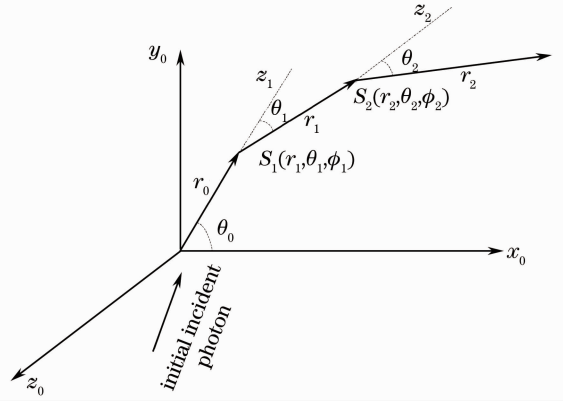


图 3 光子的迁移路径

Fig. 3 Trajectory of a photon as it travels through the space

定义大气光散射通信的散射模型如图 4 所示。其中光源的发送光束束散角和发送仰角分别为 α_1, β_1 , 检测器的接收视场角和接收仰角分别为 α_2, β_2 。假设信号光源发送的光子在发送光束束散角内被均匀地发射出来, 由此可以认为其概率密度函数为 $\frac{1}{2\pi(1 - \cos \frac{\alpha_1}{2})}$ 。某一光子从原点迁移至 $S_1(r_1, \theta_1, \phi_1)$, 这其中没有发生散射或者吸收, 在到达 S_1 点后的下一个 dr_0 的距离发生散射, 向着立体角微元 $d\Omega_0 = \sin \theta_0 d\theta_0 d\phi_0$ 迁移的概率为^[11-12]

$P = \exp(-k_{abs} r_0) f_r(r_0) \sin \theta_0 d\theta_0 d\phi_0 dr_0$, (5)

式中 $f_r(r_i) = k_{sca} \exp(-k_{sca} r_i)$ 为相邻散射体之间距离 r_i 的概率密度函数。所以, 光子到达 S_1 点的概率为^[11-12]

$$dP_0 = \frac{1}{2\pi(1 - \cos \frac{\alpha_1}{2})} \exp(-k_{abs} r_0) f_r(r_0) \times \sin \theta_0 d\theta_0 d\phi_0 dr_0. \quad (6)$$

之后光子将以 (r_1, θ_1, ϕ_1) 为方向由 S_1 点向 S_2 点迁移, 此过程中没有被吸收的概率为^[10-11]

$$P_1 = \exp(-k_{abs} r_1) f_r(r_1) f_\theta(\theta_1) f_\phi(\phi_1) \times \sin \theta_1 d\theta_1 d\phi_1 dr_1, \quad (7)$$

式中 $f_\theta(\theta_i) = p(\theta_i) \frac{\sin(\theta_i)}{2}$ 为散射角 θ 的概率密度函数, 而 $f_\phi(\phi_i) = \frac{1}{2\pi}$ 为空间方位角 ϕ 的概率密度函数。依此类推, 光子到达第 S_i 点的概率为^[11-12]

$$P_i = \exp(-k_{\text{abs}} r_i) f_r(r_i) f_\theta(\theta_i) f_\phi(\phi_i) \times \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i dr_i. \quad (8)$$

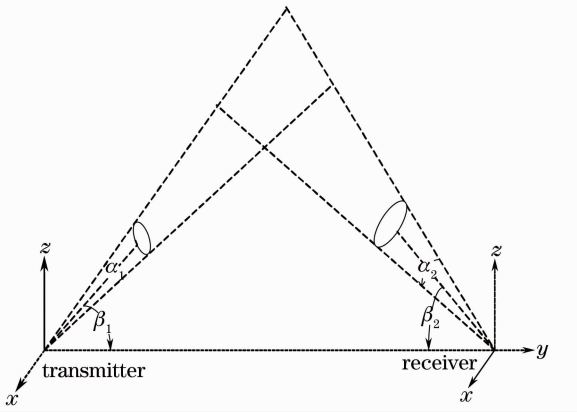


图 4 大气激光散射通信几何构架图

Fig. 4 Schematic diagram of the atmosphere laser scattering communication geometric framework

由于接收端的接收视场角有限,所以只有当光子最后落在检测器立体角范围 Ω 内时才能被检测到,因此,需要定义一个条件函数 H_c ,其表达式为^[10-11]

$$H_c = \begin{cases} 1, & \alpha_1, \alpha_2 \in \Omega \\ 0, & \alpha_1, \alpha_2 \notin \Omega \end{cases}. \quad (9)$$

那么,光子经历 i 次散射后最终到达检测器的概率为 $P = H_c \times \int \dots \int dp_0 dp_1 \dots dp_i$.最后,假设信号光源发送总能量为 E_t ,检测器接收到的总的光子能量为^[11-12]

$$E = \sum_{n=1}^i P_n E_t. \quad (10)$$

因此,路径损耗为

$$T = 10 \lg \left(\frac{E_t}{E} \right). \quad (11)$$

4 仿真结果分析

在对雾环境下大气传输特性的模拟中,由于不能给出给定条件下光子经历 n 次散射后到达检测器概率的准确数值表达,故此时采用蒙特卡罗方法对其进行数值估算^[13].仿真中所选取的信号光波长为 620 nm,发送仰角和接收仰角分别为 2° 和 5° ,发送光束束散角和接收视场角分别为 0.3° 和 1.3° ,检测器光敏面半径为 1 cm,追踪的光子数为 10^6 个.图 5 为在平流雾传输条件下,通信距离为 0.1、0.5、1、2 km 时大气传输信道的路径损耗与能见度之间的关系;图 6 为在辐射雾传输条件下,通信距离为 0.1、0.5、1、2 km 时大气传输信道的路径损耗与能

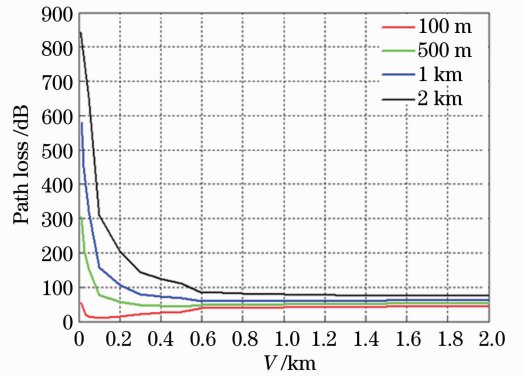


图 5 平流雾下通信距离为 0.1、0.5、1、2 km 时路径损耗和能见度之间的变化关系

Fig. 5 Curves of path loss versus visibility through the advection fog when communication distances are 0.1, 0.5, 1, 2 km

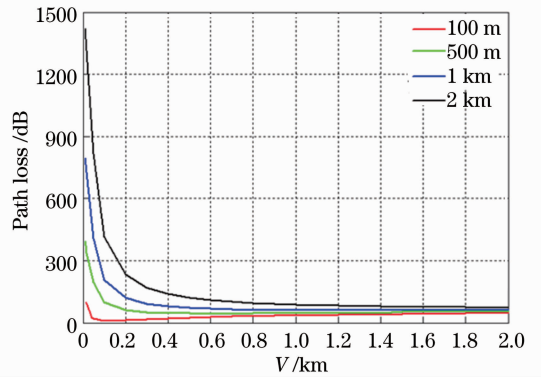


图 6 辐射雾下通信距离为 0.1、0.5、1、2 km 时路径损耗与能见度之间的变化关系

Fig. 6 Curves of path loss versus visibility through the radiation fog when communication distances are 0.1, 0.5, 1, 2 km

能见度之间的关系。

从图 5 和图 6 中可以看出:1)在雾环境下,随着能见度越来越大,通信距离对路径损耗的影响会越来越小;2)通信距离越短,通信系统受天气情况(能见度)影响越小;3)通过在平流雾传输条件下对大气传输信道的路径损耗与能见度之间的关系进行仿真,可以得到在通信距离给定时,随着能见度的增大,其路径损耗变化趋势是先下降至一个最低点再逐步地变大。当通信距离为 100 m 时,能见度 V 为 0.1 km 时的路径损耗最低;当通信距离为 0.5 km 时,能见度 V 为 0.5 km 时的路径损耗最低;当通信距离为 1 km 时,能见度 V 为 0.8 km 时路径损耗最低;当通信距离为 2 km 时,在仿真所选取的最大能见度 2 km 范围内还未能达到最低点。同样地,对于辐射雾传输条件,通信距离为 0.1、0.5、1 km,能

能见度 V 分别在 0.1、0.6、1.1 km 时路径损耗最低; 并且在通信距离为 2 km 的情况下, 在仿真所选取的最大能见度 V 为 2 km 条件下也还未能达到最小值。

5 结 论

通过建立多次散射随机模型, 提出了信号光在大气传输信道中传输时的路径损耗理论表达, 分析了在雾环境下给定波长的信号光在大气信道中传输的特性。仿真模型基于蒙特卡罗方法, 充分考虑了多次散射, 详细地分析了在雾环境下, 不同的通信距离条件时, 信号光传输损耗与能见度之间的关系。结果表明, 在给定的通信距离下以及给定的系统发送端发送仰角和发送光束束散角、接收端接收仰角和接收视场角等几何参数下, 会存在一个能见度使得在这个能见度条件下信号光传输的损耗最小, 为光传输系统全面的性能评估提供了一些很好的理论支持, 也为在下一步的工作中对红外波段的信号光进行数值仿真并分析比较这两种波长下的传输特性打下了基础。

参 考 文 献

- 1 Zhengyuan Xu, Haipeng Ding, B M Sadler. Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(16): 1860–1862.
- 2 Zhengyuan Xu. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links [C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2007, 3: III 577–III 580.
- 3 H C Hulst. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: Dover Publication, 1981. 330–350.
- 4 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.*. *Atmospheric Physics* [M]. Beijing: Peking 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.

- 5 Song Chao, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan, *et al.*. Optimization of link analysis and design for long-range non-line-of-sight atmospheric scattering communication [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0913003.
宋 超, 徐智勇, 汪井源, 等. 非视距大气散射光通信最优优化链路分析与设计[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0913003.
- 6 Wang Rui. Study on the Characteristics of Laser Propagation and Attenuation Through the Fog [D]. Xi'an: Xidian University, 2007. 5–15.
王 瑞. 激光在雾媒质中的传播衰减特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007. 5–15.
- 7 G M Hale, M R Querry. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region [J]. *Appl Opt*, 1972, 12(3): 555–563.
- 8 Li Hao, Sun Xuejin, Tang Liping. Characteristics of atmospheric volume scattering intensity in visible and infrared band [J]. *J Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(4): 328–332.
李 浩, 孙学金, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气散射强度特性[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(4): 328–332.
- 9 Xu Zhiyong, Shen Lianfeng, Wang Jingyuan, *et al.*. Study on the ultraviolet scatter propagation characteristics in wireless optical communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2009, 33(11): 56–59.
徐智勇, 沈连丰, 汪井源, 等. 无线光通信中紫外散射传播特性的研究[J]. *光通信技术*, 2009, 33(11): 56–59.
- 10 Li Yuquan, Zhu Yong, Wang Jiangping. *The Theory and Technology of Optical Communication* [M]. Beijing: Science Press, 2006. 315–317.
李玉权, 朱 勇, 王江平. *光通信原理与技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 315–317.
- 11 Song Chao, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan. Multiple scattering model and simulation for non-line-of-sight communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(7): 070102.
宋 超, 徐智勇, 汪井源. 非视距多次散射信道仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(7): 070102.
- 12 Song Chao, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan. Cloud-scattering model and channel transmission characteristics analysis [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0213001.
宋 超, 徐智勇, 汪井源. 云散射模型与信道传输特性分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0213001.
- 13 Jia Honghui, Chang Shengli, Lan Yong, *et al.*. Non-line-of-sight light propagation model based on Monte Carlo method [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2007, 18(6): 690–693.
贾红辉, 常胜利, 兰 勇, 等. 大气光通讯中基于蒙特卡罗方法非视线光传输模型[J]. *光电子•激光*, 2007, 18(6): 690–693.

栏目编辑: 王晓琰