

## 雾环境下非视距散射光通信最佳链路分析

林 勇<sup>1</sup>, 徐智勇<sup>1</sup>, 汪井源<sup>1</sup>, 宋 超<sup>1</sup>, 王 荣<sup>1</sup>, 耿常锁<sup>2</sup>

- (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 61932 部队, 北京 100191)

**摘 要:** 基于概率论和随机迁移理论, 建立多次散射随机模型, 采用蒙特卡洛方法仿真分析了辐射雾条件下, 不同的通信距离条件时, 近红外信号光在大气传输信道中传输的路径损耗与能见度之间的关系, 指出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, 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。在通信距离、能见度给定的情况下, 针对大气散射通信几何构架中的各个参数的改变都会对非视距大气散射光通信链路路径损耗产生影响, 通过模型仿真, 提出辐射雾环境下最优化通信链路几何构架。仿真中采取 808 nm 波长的激光二极管(LD)作为光源。

**关键词:** 大气光学; 非视距链路; 蒙特卡洛; 路径损耗; 能见度

**中图分类号:** TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0705-06

## Optimization of link analysis for non-line-of-sight atmospheric scattering communication in fog weather

Lin Yong<sup>1</sup>, Xu Zhiyong<sup>1</sup>, Wang Jingyuan<sup>1</sup>, Song Chao<sup>1</sup>, Wang Rong<sup>1</sup>, Geng Changsu<sup>2</sup>

- (1. Laboratory of Photoelectric and Quantum Information Technology, Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. Troops 61932 of PLA, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The theoretically multiple scattering model was based on probabilistic theory and stochastically migrating theory. The relationship between transmission loss and visibility was analyzed in different communication distance in radiation fog weather with Monte Carlo simulation. The results demonstrate that there is 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 (FOV) are determined. Various parameters of schematic diagram of the atmosphere laser scattering communication geometric framework can affect transmission loss of link for non-line-of-sight atmospheric scattering communication when the communication range and the visibility are determined and an optimized link for non-line-of-sight atmospheric scattering communication was put forward through the model simulation. Laser Diode (LD) with wavelength 808 nm was chosen as the source light of simulation.

**Key words:** atmospheric optics; non-line-of-sight link; Monte Carlo; path loss; visibility

收稿日期: 2014-06-20; 修订日期: 2014-07-03

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);

“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: 林勇(1990-), 男, 硕士生, 主要从事无线光通信方面的研究。Email: 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。Email: njxzy123@163.com

## 0 引言

早在 20 世纪的六、七十年代,非视距散射光通信的概念就已经被人们提了出来,并且对其进行了初步的探索<sup>[1-2]</sup>。但是,由于受到当时光源以及探测器上的限制,非视距散射光通信并没有得到高速的发展。随着近年来科技的不断进步及大功率激光器和具有高灵敏度的检测技术的持续进步,散射光通信技术开始得到了越来越广泛的关注<sup>[3-7]</sup>。非视距散射光通信具有抗电磁干扰、适应恶劣地形环境以及绕障通信能力强等许多特点,在商业和军事上具有很强的应用前景。由于大气臭氧层对紫外线有着强烈的吸收作用,在近地面的大气中采用紫外光波进行散射光通信有利于通信系统信噪比的提高,加之大气对紫外波段的光信号具有较强的散射特性,更加有利于信号地探测接收。因此,在以往人们所做的研究都是基于紫外光的非视距散射通信系统。

但是,近地面对紫外光有强烈的衰减,这使得紫外光传输距离非常有限,且紫外散射光通信受天气的影响非常明显,这些都对紫外光散射系统的应用造成了限制。文中采用的信号光源为 808 nm 的近红外光,大气对该波段信号光吸收损耗较小,在相同的功率下,可以传输更长的距离,同时信号光子与大气中的气溶胶粒子,云滴雾滴粒子等尺度较大的粒子之间会发生较强的米散射作用,也有利于信号的接收。文中利用 Mie 散射理论分析了雾滴粒子在波长为 808 nm 时的散射特性,依据参考文献[8]建立的多次散射随机分析模型,首先分析了在辐射雾条件下,不同的通信距离条件时,近红外信号光在大气传输信道中传输的路径损耗与能见度之间的关系;其次,在通信距离、能见度给定的情况下,分析大气散射通信几何构架中的各个参数对于大气信道传输路径损耗的影响,并通过模型仿真,分析得到最优化通信链路几何构架,为实际链路的设计提供了理论指导。

## 1 雾滴粒子的分布特性及最优能见度分析

雾是由悬浮在近地面空气中缓慢沉降的微小水滴或冰晶组成的一种胶体系统,是近地面层空气中水汽凝结或凝华的产物。在大气物理中,习惯把通过

大气能分辨远处目标物的程度分为 10 个等级,称之为能见度,每一个等级都和一定的能见距相对应。根据能见度  $V$  的不同可以将雾分为 5 个等级,其中  $V < 0.05$  km 时为极浓雾,  $0.05$  km  $< V < 0.2$  km 时为浓雾,  $0.2$  km  $< V < 0.5$  km 时为中雾,  $0.5$  km  $< V < 1.0$  km 时为轻雾,  $1.0$  km  $< V < 2.0$  km 时为薄雾。雾滴粒子的半径通常处于 1~10  $\mu\text{m}$  之间,但是在刚刚形成或是在消散过程中可能会小于 15  $\mu\text{m}$ 。当  $V < 0.05$  km 时,即极浓雾条件下,雾滴粒子的半径可以达到 20~30  $\mu\text{m}$ ,在能见度  $V > 100$  m 时,雾滴粒子的半径大多都小于 8  $\mu\text{m}$ <sup>[9-10]</sup>。

根据形成雾的地域的不同以及形成雾的机理的不同,可以把雾分为两大类,即平流雾与辐射雾。一般情况下,内陆雾通常为辐射雾,而海雾通常为平流雾。文中所做的分析主要基于内陆雾即辐射雾的条件下进行的。目前,雾滴尺寸分布中使用最多的是广义 Gamma 分布,表达式为<sup>[9-10]</sup>:

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

式中: $r$  为雾滴粒子的半径; $n(r)$  是雾滴粒子的谱分布函数。 $a$ 、 $b$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  为确定雾滴粒子尺寸分布的参数。利用雾滴粒子的含水量和能见度的关系,可以得到平流雾和辐射雾的尺度谱分布函数<sup>[9-10]</sup>:

$$\begin{cases} n(r) = 1.059 \times 10^7 \times V^{1.15} \times r^2 \times \exp(-0.8359V^{-0.43}r) \\ \text{the advection fog} \\ n(r) = 3.104 \times 10^{10} \times V^{1.7} \times r^2 \times \exp(-0.4122V^{0.54}r) \\ \text{the radiation fog} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $V(\text{km})$  为能见度。

由于雾滴粒子的尺寸与信号光波长相当,故在雾环境下,雾滴粒子对于信号光的影响主要体现在米散射上。根据米散射理论,可以得到雾滴粒子的总的衰减系数、散射系数和吸收系数为:

$$k_x = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_x(r, \lambda, m) n(r) dr, x = \text{sca, ext or abs} \quad (3)$$

其中, $Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n)$ ,  $Q_{\text{sca}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)$ ,  $Q_{\text{abs}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{sca}}$ ,  $x$  为粒子尺度参数,  $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$ ,  $a_n$ 、 $b_n$  为米散射系数<sup>[11]</sup>。

在散射相函数的选取上,不同天气条件下,选取的散射相函数也不同,雾环境下,选择修正的 Henyey-Greenstein 函数可以更好地拟合米氏散射,其表达式为<sup>[12]</sup>:

$P(\theta, g) = 1.5 \times (1 - g^2)(2 + g^2)^{-1}(1 + \cos^2 \theta)(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{-3/2} (4)$   
 式中:  $\theta$  为散射方向角;  $g$  为非对称因子, 不同天气条件下, 非对称因子的选取同样也不同, 其中, 正常天气、霾天、雾天以及雨天下  $g$  的选取分别为 0.7、0.8、0.9 和 0.93<sup>[12]</sup>。

由于雾滴粒子一般是由水滴构成, 故选取水滴对于 808 nm 波长的信号光的复折射系数  $m = 1.329 + i \times 1.25 \times 10^{-7}$  来代替雾滴粒子的复折射系数<sup>[13]</sup>, 图 1 为波长为 808 nm 的信号光在辐射雾条件下散射系数与能见度的变化关系。

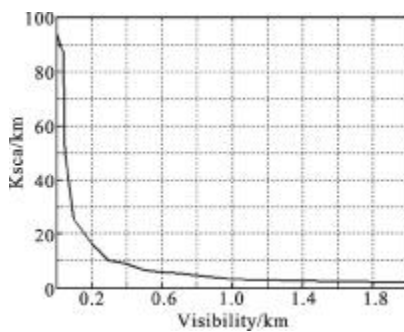


图 1 波长为 808 nm 的信号光在辐射雾下散射系数与能见度的变化关系

Fig.1 Scattering coefficient vs visibility of 808 nm laser

仿真中主要是采用蒙特卡洛法对雾环境下的大气传输信道特性进行数值估算<sup>[14]</sup>。在仿真中所选取的信号光波长为 808 nm, 设定的追踪光子数为  $10^6$  个, 具体的通信构架参数设置为发送仰角和接收仰角分别为  $2^\circ$  和  $5^\circ$ , 发送光束束散角和接收视场角分别为  $0.3^\circ$  和  $1.3^\circ$ , 检测器光敏面半径为 1 cm。图 2 为在辐射雾传输条件下, 通信距离为 100 m、500 m、1 km 和 2 km 时大气传输信道的路径损耗与能见度之间的关系。

从图 2 中可以看出, 在辐射雾条件下, 在通信距离给定时, 随着能见度的增加, 大气传输信道的路径损耗的变化趋势是先减小后增大, 存在一个能见度使得在这个能见度下路径损耗最小, 并非能见度越高, 损耗越小。当通信距离为 100 m 时, 能见度  $V$  在 0.05 km 时的路径损耗最低; 当通信距离为 500 m 时, 能见度  $V$  在 0.5 km 时的路径损耗最低; 当通信距离为 1 km 时, 能见度  $V$  在 0.9 km 时的路径损耗最低; 当通信距离为 2 km 时, 在仿真中所选取的最大能见度 2 km 下还未达到最小值<sup>[10]</sup>。

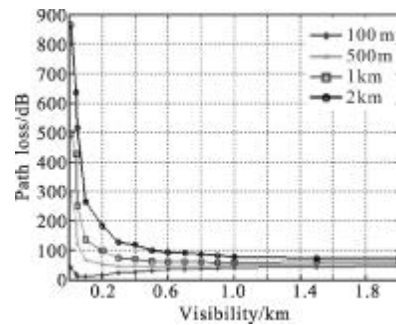


图 2 辐射雾传输条件下, 通信距离为 100 m、500 m、1 km 和 2 km 时大气传输信道的路径损耗与能见度之间的关系

Fig.2 Path loss of atmospheric transmission channel vs visibility through the radiation fog when communication distance is 100 m, 500 m, 1 km and 2 km

上述结论的原因是: 在雾环境下, 若能见度很低, 单位体积内的雾滴粒子的浓度很大, 即在散射路径上会有大量的雾滴粒子, 经过多次散射, 能够到达接收端的光子会变少, 散射通信的传输路径损耗必然会很大; 若能见度很高, 则在散射路径上的雾滴粒子会变少, 即可供光子进行散射的媒介变少, 这种情况下能够到达接收端得光子同样会变少, 故在这种情况下路径损耗也会变大, 因此在这其中会存在一个能见度值使得在这个能见度下路径损耗最小。

## 2 最优化链路的分析与设计

针对辐射雾条件下大气信道传输特性问题, 在通信距离, 大气散射通信几何构架各个参数给定的情况下, 通过改变能见度, 可以得到随着能见度的增加, 大气传输信道的路径损耗的变化趋势是先减小后增大, 存在一个最优能见度使得在这个能见度下路径损耗最小。在通信距离, 能见度给定的情况下, 可以继续考虑大气散射通信几何构架参数对于大气信道传输路径损耗的影响, 大气激光散射通信几何构架如图 3 所示, 其中,  $\beta_1$  为发送仰角,  $\beta_2$  为接收仰角,  $\alpha_1$  为发送光束束散角,  $\alpha_2$  为接收视场角。在给定一个能见度的情况下, 通过改变发送仰角、接收仰角、发送光束束散角、接收视场角中的任意一个参数、固定剩余的三个参数来分析大气传输信道路径损耗的变化情况<sup>[15]</sup>。图 4 为发送仰角固定为  $2^\circ$ , 发送光束束散角为  $0.3^\circ$ , 接收视场角为  $1.3^\circ$  时, 改变接收仰角时的路径损耗的变化情况, 其中, 能见度  $V$  固

定选取为 1 km,通信距离选取为 100 m、500 m、1 km 和 2 km。

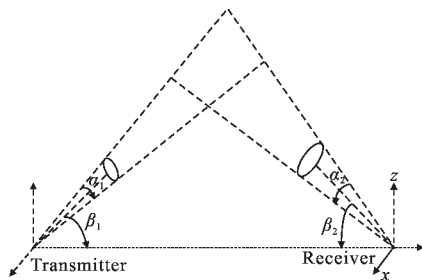


图 3 大气激光散射通信几何构架图

Fig.3 Schematic diagram of the atmosphere laser scattering communication geometric framework

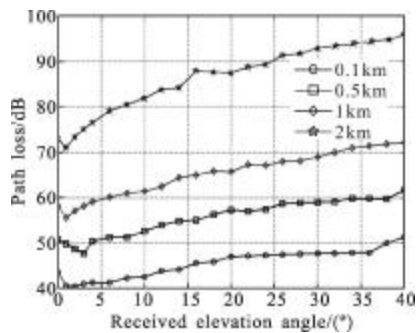


图 4 辐射雾传输条件下,通信距离为 100 m、500 m、1 km 和 2 km 时大气传输信道的路径损耗与接收仰角的变化关系

Fig.4 Path loss of atmospheric transmission channel vs received elevation angle through the radiation fog when communication distance is 100 m, 500 m, 1 km and 2 km

图 5 为接收仰角固定为  $5^\circ$ , 发送光束束散角为  $0.3^\circ$ , 接收视场角为  $1.3^\circ$  时, 改变发送仰角时的路径损耗的变化情况, 通信距离与能见度选取同上。

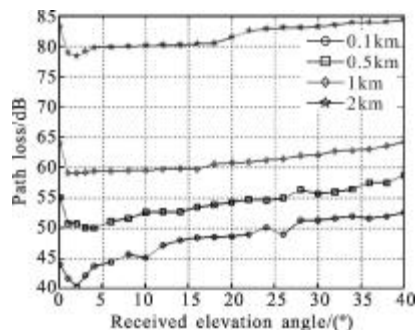


图 5 辐射雾传输条件下,通信距离为 100 m、500 m、1 km 和 2 km 时大气传输信道的路径损耗与发送仰角的变化关系

Fig.5 Path loss of atmospheric transmission channel vs transmitting elevation angle through the radiation fog when communication distance is 100 m, 500 m, 1 km and 2 km

由图 4、图 5 可以看出,在不同的通信距离上,发送仰角、接收仰角的改变对于辐射雾条件下大气传输信道的路径损耗的影响趋势基本一致。在其余参量不变的情况下,固定发送仰角和接收仰角中的一个,不同距离上的路径损耗会随着另一个仰角的增大而出现先减小后增大的现象。其中,在能见度固定为 1 km 时,固定发送仰角,在通信距离为 100 m, 路径损耗于接收仰角为  $2^\circ$  时达到最小值;在通信距离为 500 m, 路径损耗于接收仰角为  $3^\circ$  时达到最小值;在通信距离为 1 km, 路径损耗于接收仰角为  $1^\circ$  时达到最小值;在通信距离为 2 km, 路径损耗于接收仰角为  $1^\circ$  时达到最小值;在能见度固定为 1 km, 固定接收仰角,在通信距离为 100 m, 路径损耗于发送仰角为  $2^\circ$  时达到最小值;在通信距离为 500 m, 路径损耗于发送仰角为  $4^\circ$  时达到最小值;在通信距离为 1 km, 路径损耗于发送仰角为  $2^\circ$  时达到最小值;在通信距离为 2 km, 路径损耗于发送仰角为  $2^\circ$  时达到最小值。产生上述现象的原因为:传输的距离越长,光子迁移的路径也越长,路径损耗也会随之越来越大,在给定传输距离的情况下,选择较小的发送和接收仰角会使得光子迁移的路径长度减小,可以有效地降低路径损耗。因此,在雾环境下大气散射光通信最佳链路设计中应选择较小的发送与接收仰角。

图 6 为发送仰角固定为  $2^\circ$ , 接收仰角固定为  $5^\circ$ , 接收视场角为  $1.3^\circ$  时, 改变发送光束束散角时的路径损耗的变化情况, 通信距离与能见度选取同上。

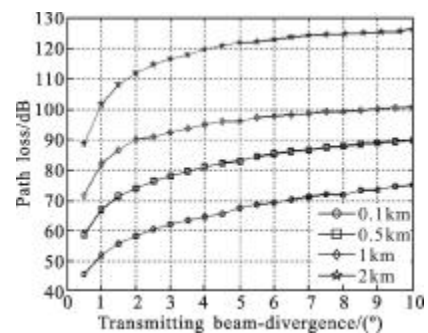


图 6 辐射雾传输条件下,通信距离为 100 m、500 m、1 km 和 2 km 时大气传输信道的路径损耗与发送光束束散角的变化关系

Fig.6 Path loss of atmospheric transmission channel vs transmitting beam-divergence through the radiation fog when communication distance is 100 m, 500 m, 1 km and 2 km

图 7 为发送仰角固定为  $2^\circ$ , 接收仰角固定为  $5^\circ$ , 发送光束束散角为  $0.3^\circ$  时, 改变接收视场角时的路径损耗的变化情况, 通信距离与能见度选取同上。

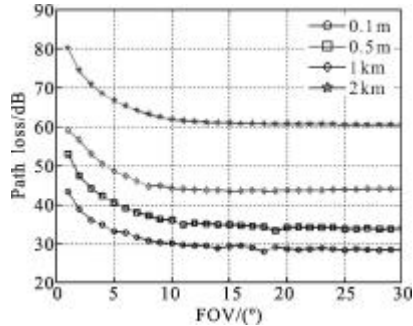


图 7 辐射雾传输条件下, 通信距离为 100 m、500 m、1 km 和 2 km 时大气传输信道路径损耗与接收视场角的变化关系

Fig.7 Path loss of atmospheric transmission channel vs FOV through the radiation fog when communication distance is 100 m, 500 m, 1 km and 2 km

由图 6、图 7 可以看出, 在不同的通信距离上, 发送光束束散角、接收视场角的改变对于雾环境下大气传输信道的路径损耗的影响趋势基本一致。大气传输信道的路径损耗随着发送光束束散角的增大而呈指数型增大, 而随着接收视场角的增大呈指数型衰减。

产生上述现象的原因是发送光束束散角越小, 即光束的能量越集中, 光束在传输过程中会产生的发散损耗会越小, 因此接收能量会越大, 大气传输信道的路径损耗就越小; 而接收视场角越大, 接收到的信号能量肯定也会随之逐步增大, 但在实际情况下, 接收视场角越大也意味着接收到的散射光信号的时延也越大, 同时也会引入更多的背景光噪声, 故在实际的情况中, 接收视场角的选取需要在考虑到时延和噪声影响的基础上尽可能地选择较大的视场角, 不能盲目地选取。

### 3 结 论

通过采用参考文献[8]建立的多次散射随机模型, 首先分析了在辐射雾条件下, 不同的通信距离条件时, 近红外信号光在大气传输信道中传输的路径损耗与能见度之间的关系, 通过仿真分析得到在给定的通信距离下以及给定的大气散射通信几何构架的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, 会存在一个最佳能见度使

得在这个能见度条件下信号光传输的损耗最小; 其次, 针对辐射雾条件下大气信道传输特性问题, 继续分析大气散射通信几何构架参数对于大气信道传输路径损耗的影响, 通过模型仿真, 最终分析得到在通信距离和能见度给定的情况下, 为了使传输路径损耗降低, 在辐射雾条件下大气散射光通信链路的通信几何构架中各个参数最佳值的选取情况, 为实际链路的建立提供了一定的理论指导。

### 参考文献:

- [1] Lerner M, Holland E A. The optical scatter channel [J]. IEEE, 1970, 58(10): 1547-1563.
- [2] Reilly M D, Warde C. Temporal characteristics of single-scatter radiation [J]. Journal of the Optical Society of America, 1979, 69(3): 464-470.
- [3] Xu Z, Chen G, Abou-Galala F, et al. Experimental performance evaluation of non-line-of-sight ultraviolet communication systems[C]//SPIE, 2007, 6709: 67090Y.
- [4] Yin H, Yang J, Chang S, et al. Analysis of several factors influencing range of non-line-of-sight UV transmission[C]// SPIE, 2007, 6783: 67833E.
- [5] Shaw A G, Siegel M A, Model J, et al. Recent progress in short-range ultraviolet communication[C]//SPIE, 2005, 5796: 214-225.
- [6] Shaw A G, Nischan M. Short-range NLOS ultraviolet communication test bed and measurements [C]//SPIE, 2001, 4396: 31-40.
- [7] 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 (in Chinese)  
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.
- [8] Song Chao, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan. Cloud-scattering model and channel transmission characteristics analysis [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 0213001. (in Chinese)  
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.
- [9] Wang Rui. Study on the characteristics of laser propagation and attenuation through the fog [D]. Xi'an: Xidian University, 2007: 5-15. (in Chinese)  
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.

- [10] Lin Yong, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan, et al. Simulation research on Non-Line-of-sight atmospheric propagation in fog weather [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0901001. (in Chinese)  
林勇, 徐智勇, 汪井源, 等. 雾环境下非视距大气散射传输特性研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0901001.
- [11] Li Hao, Sun Xuejin, Tang Liping. Characteristics of atmospheric volume scattering intensity in visible and infrared band[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(4): 328-332. (in Chinese)  
李浩, 孙学金, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气体散射强度特性[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(4): 328-332.
- [12] 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. (in Chinese)  
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.
- [13] Hale G M Querry. Optical constants of water in the 200nm to 200um wavelength region [J]. *Applied Optics*, 1972, 12(3): 555-563.
- [14] Jia Honghui, Chang Shengli. Non-line-of-sight light propagation model based on monte carlo method[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2007, 18(6): 690-693. (in Chinese)  
贾红辉, 常胜利. 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.
- [15] 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 Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 0913003. (in Chinese)  
宋超, 徐智勇, 汪井源, 等. 长距离非视距大气散射光通信最优化链路分析与设计 [J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0913003.