

非视距多次散射信道仿真分析

宋超 徐智勇 汪井源

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 基于概率分析理论,通过模仿光子在大气中发生散射时的随机迁移路径和方向,得到各阶散射路径损耗的理论表达式。通过模型仿真,得到不同阶次散射对总的接收信号能量的影响,给出了在指定发送、接收仰角等参数情况下预测的链路损耗值,并分别给出了接收信号中经历一阶、二阶、三阶散射的光子能量随通信距离的变化关系;通过蒙特卡罗仿真分析,发现在给定参数条件下,四阶及以上阶次散射对总的接收信号能量的贡献已十分微弱(相差10个量级以上),因此基本可以不考虑四阶及以上阶次散射对总的接收信号能量的影响。

关键词 大气光学;多次散射;相函数;路径损耗

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.070102

Multiple Scattering Model and Simulation for Non-Line-of-Sight Communication

Song Chao Xu Zhiyong Wang Jingyuan

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

Abstract The theoretic expressions of loss in different scattering orders are analysed by imitating random migrations of photons in free space. The predicted path loss under different elevation angles are presented and compared with relevant literature to validate it. It can be concluded from the simulation that under specific preferences, high orders of scattering (higher than four orders) contribute little to the total energy of received optical signal (at least 10 orders of magnitude smaller), and thus the effects caused by the 4th or higher orders of scattering can be neglected.

Key words atmospheric optics; multiple scattering; phase function; path loss

OCIS codes 010.1290; 010.1300; 010.1310

1 引言

由于半导体光源和光检测器的进步,无线光通信技术得到了越来越多的关注,其中散射光通信极具发展潜力。由于大气中存在大量的分子、尘埃及气溶胶粒子,对信号光具有较明显的散射作用,因此可利用大气信道传输特性实现非视距的散射光通信。如果采用红外光作为信号光源,由于其处于不可见光波段,因此保密性能好,军事应用前景广泛。本文重点分析了大气信道对信号光的散射及衰减特性,通过建立多次散射仿真模型得到大气链路损耗的理论表达式。以该模型为依据,在10 m至1000 m的范围内对大气链路损耗进行仿真并对结果进行了分析。

设计性能稳定的非视距通信系统面临的问题主要有两个方面,一是大气中的微粒及分子对信号光的散射作用,表现在发送信号光子与微粒、分子发生随机碰撞,改变光子的迁移方向,造成信号光在时间、空间、角度上的延展,表现为色散特性,色散的强弱由散射粒子的相函数决定。这些微粒尺寸分布范围广泛,主要有气溶胶微粒、云中的水滴和冰晶体等,前者直径变化范围在0.1 μm 到10 μm ,后者直径从微米到毫米不等^[1~3],这些微粒的几何结构复杂,使得信号光与微粒作用时的相函数分布发生变化;第二方面是信号衰减。

收稿日期: 2011-03-01; **收到修改稿日期**: 2011-03-08; **网络出版日期**: 2011-05-09

基金项目: 解放军理工大学预先研究基金(2009TX02)资助课题。

作者简介: 宋超(1985—),男,硕士研究生,主要从事长距离散射光通信方面的研究。E-mail: sniper10@126.com

导师简介: 徐智勇(1972—),男,博士,副教授,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: njxzy123@163.com

由于大气湍流导致接收信号光在强度和相位上发生随机波动,并且由于大气组成成分、温度、压力在各个方向分布的各向异性特性,使得信号光与微粒发生作用时的散射系数、吸收率等各不相同,这些因素将对系统性能产生重要影响^[4]。

本文主要研究了大气传输媒介对发送信号光产生的衰减和吸收效应,通过蒙特卡罗仿真得到在指定参数条件下大气链路损耗的预测值,在仿真过程中不考虑大气湍流等因素对信号光造成的衰减。与前人的结论相比较,本文更为详细地区分了经历不同阶次散射的光子对总的接收信号光能量的贡献。

2 蒙特卡罗随机路径损耗模型

由于大气中存在大量的分子、尘埃及气溶胶粒子,信号光在大气信道中传输时表现出较强的吸收和散射特性,对于非视距散射光通信系统来说,散射是完成非视距通信的最主要方式,到达检测器的散射光信号强度取决于通信链路的几何结构、大气的光传输特性(吸收、散射)和光子的随机迁移方向、距离的概率密度函数^[5~7]等。

假设光子与大气分子间的散射或者吸收事件是随机发生的,并且在经历过确定次数的散射后,光子的随机迁移方向、距离、能量损失和能否被检测器捕获仍旧是随机的。通过仿真光子在多散射媒介中的迁移路径,得到并区分经历不同阶次散射的光子对最终检测器接收到的信号光能量的影响。类似的方法已经应用于建立激光雷达在有云的大气中传输时发生强散射时的回波模型中^[8~11]。

2.1 大气的光传输特性

对于以多次散射方式到达检测器的光子,其在大气中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。其中 r_i 为相邻散射体间的距离; θ_i 为散射角,代表局部坐标系中 z_i 与 z_{i-1} 轴线之间的夹角; ϕ_i 为空间方位角,代表散射平面相对于入射光路径的旋转角度。如图 1 所示,光子的所有散射点 S_1, \dots, S_n 构成了该光子的迁移轨迹,通过对这些轨迹进行概率统计,就可以得到链路损耗等的预测值,为此,要首先得到散射点坐标中的三个变量(r_i, θ_i, ϕ_i) 的概率密度函数。

从通信的角度出发,散射和吸收是光子与大气中的微粒等作用的主要方式。为此,记瑞利分子散射系数为 k_s^R ,米氏悬浮微粒散射系数为 k_s^M ,大气吸收系数为 K_a 。散射相函数为瑞利散射和米氏散射的线性加权和,记为

$$p(\theta) = \frac{k_s^R}{k_s^R + k_s^M} p^R(\theta) + \frac{k_s^M}{k_s^R + k_s^M} p^M(\theta), \quad (1)$$

式中 θ 为光子散射角, $p^R(\theta)$ 为瑞利散射相函数,遵循广义的瑞利函数, $p^M(\theta)$ 为米氏散射相函数,本文采用 Henyey-Greenstein(H-G)相函数近似,其表达式分别为^[12]

$$p^R(\theta) = \frac{3[1 + 3\gamma + (1 - \gamma)\cos^2\theta]}{16\pi(1 + 2\gamma)}, \quad (2)$$

$$p^M(\theta) = \frac{1 - g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1 + g^2 - 2g\mu)^{1.5}} + f \frac{(3\cos^2\theta - 1)}{2(1 + g^2)^{1.5}} \right]. \quad (3)$$

对于非归一化的相函数,其在立体角范围内的积分值应为 1,即

$$\int_{4\pi} p(\theta) d\Omega(\theta, \varphi) = \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} p(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi = 1. \quad (4)$$

由于空间方位角 ϕ 是在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的一个随机变量^[13],其与散射角 θ 之间相互独立,故有

$$2\pi \cdot \int_0^{\pi} \frac{p(\theta) \sin(\theta)}{4\pi} d\theta = \int_0^{\pi} p(\theta) \cdot \frac{\sin(\theta)}{2} d\theta = 1. \quad (5)$$

因此,通过(5)式就可以得到散射角 θ 的概率密度函数与散射相函数 $p(\theta)$ 之间的关系为

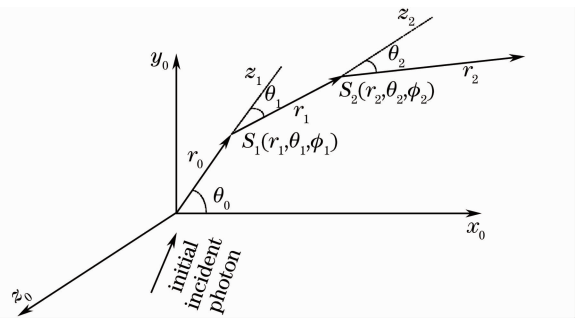


图 1 光子在空间中的迁移轨迹

Fig. 1 Trajectory of a photon as it travels through the space

$$f_{\theta}(\theta_i) = p(\theta_i) \cdot \frac{\sin(\theta_i)}{2}. \quad (6)$$

对于相邻散射体之间的距离 r_i , 其概率密度函数为^[7]

$$f_r(r_i) = k_s \exp(-k_s \cdot r_i). \quad (7)$$

由于空间方位角 ϕ_i 与变量 r_i, θ_i 之间相互独立, 并且变量 ϕ 为 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机变量, 故其概率密度函数为^[13,14]

$$f_{\phi}(\phi_i) = \frac{1}{2\pi}. \quad (8)$$

2.2 路径损耗理论表达计算

假设信号光源为 LED, 其发送光束束散角为 α_1 , 那么该光源的光束立体角为 $2\pi\left(1 - \cos \frac{\alpha_1}{2}\right)$ 。如果光子在发送光束全角内被均匀地发射出来, 可以认为所有光子在光束立体角内均匀分布, 因此其概率密度函数为 $\frac{1}{2\pi\left(1 - \cos \frac{\alpha_1}{2}\right)}$ 。某一光子从原点出发迁移至第一个散射点 $S_1(r_1, \theta_1, \phi_1)$, 这期间既没有被吸收也没有发生

散射, 并在到达 S_1 点后的下一个微元距离 dr_0 发生散射, 朝向立体角微元 $d\Omega_0 = \sin(\theta_0) d\theta_0 d\phi_0$ 迁移的概率为 $\exp(-k_a r_0) f_{r_0}(r_0) \sin(\theta_0) d\theta_0 d\phi_0 dr_0$, 因此, 该光子到达 S_1 点的概率为

$$dp_0 = \frac{1}{2\pi\left(1 - \cos \frac{\alpha_1}{2}\right)} \exp(-k_a r_0) f_r(r_0) \sin(\theta_0) d\theta_0 d\phi_0 dr_0. \quad (9)$$

之后光子在 S_1 点以 (r_1, θ_1, ϕ_1) 为方向向 S_2 点迁移, 如图 2 所示, 光子相对于入射方向以 θ_1 角发生偏移, 此时空间中该光子的下一步迁移方向完全由变量 ϕ_1 决定。光子下一步可能的迁移路径为沿图 2 所示的锥面, 因此光子以 (r_1, θ_1, ϕ_1) 为方向迁移到点 S_2 , 在迁移过程中没有被吸收的概率为 $dP_1 = \exp(-k_a r_1) f_r(r_1) f_{\theta}(\theta_1) f_{\phi}(\phi_1) \sin(\theta_1) d\theta_1 d\phi_1 dr_1$ 。该分析可以应用于点 S_1 至点 S_{n-1} 的情况, 所以, 光子迁移至第 i ($1 \leq i \leq n-1$) 个散射点的概率为

$$dP_i = \exp(-k_a r_i) f_r(r_i) f_{\theta}(\theta_i) f_{\phi}(\phi_i) \sin(\theta_i) d\theta_i d\phi_i dr_i. \quad (10)$$

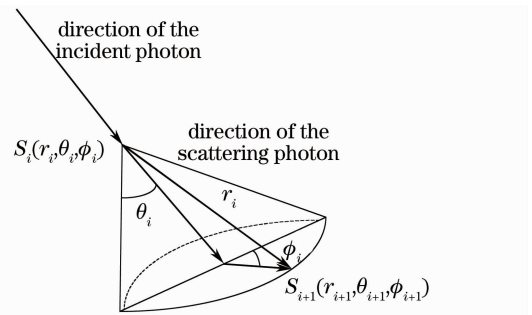


图 2 第 i 次散射事件

Fig. 2 The i -th scattering event

设检测器接收视场角的取值范围为 $\left[\beta_2 - \frac{\alpha_2}{2}, \beta_2 + \frac{\alpha_2}{2}\right]$ 。当光子到达散射点 S_n 之后, 通过 S_1 至 S_{n-1} 点的坐标计算出 S_n 点的坐标, 记为 $S_n(x_n, y_n, z_n)$, 只有当点 S_n 位于检测器立体角范围之内时, 该光子在到达 S_n 点后才有可能被检测器接收到, 定义函数 H_{ψ} , 当满足上述条件时其值为 1, 否则为 0。那么, 光子到达 S_n 点并最终被检测器成功接收的概率为

$$dp_n = H_{\psi} \exp(-k_a r_n) f_{\theta}(\theta_n) f_{\phi}(\phi_n) \sin(\theta_n) d\theta_n d\phi_n. \quad (11)$$

定义光子经历 n 次散射后到达检测器的概率为 P_n , 则有

$$P_n = \iiint \cdots \int dp_0 \times dp_1 \cdots dp_n, \quad (12)$$

式中的 dp_i 由(10), (11) 式给出。进一步, 假设信号光源发送总能量为 E_t , 检测器接收到的所有经历 n 次散射的光子能量为 $E_r = \sum_{i=1}^n P_i E_t$, 所以, n 次散射的路径损耗为

$$L(\text{dB}) = 10 \lg \left(\frac{E_t}{E_r} \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n P_i} \right). \quad (13)$$

3 仿真结果分析

(12)式以 n 重积分的形式给出了经历 n 阶散射的光子被探测器成功接收的概率,但(12)式中包含 $(3n+2)$ 维积分,并不能给出给定条件下光子经历 n 次散射后到达探测器概率的数值表达。此时可以采用蒙特卡罗方法进行数值估算,通过对被积函数变量区间进行随机均匀抽样,然后对抽样点的被积函数值进行数值平均,进而得到多重函数积分的近似值^[15~19]。

仿真的主要参数取值如下:探测器光敏面半径 1 cm,大气吸收系数 $k_a=0.972$,瑞利散射系数 $k_s^R=0.266$,米氏散射系数 $k_s^M=0.284$,不对称度因子 $g=0.72$ 。

图 3 给出了在发送和接收仰角分别为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 情况下接收信号能量比随通信距离的变化关系。可以看出,接收信号能量比随发送仰角的增大而减小,但变化并不明显,在通信距离增大 100 倍(10 m 到 1000 m)时,接收信号能量下降约 2 个数量级,证明信号衰减是影响散射通信距离的主要因素。通过接收信号能量可以进一步得到链路损耗的预测值,图 4 所示为链路损耗随通信距离的变化关系。从图中可以看出,当通信距离从 10 m 变化到 1000 m 时,链路损耗的变化范围为 90 dB 到 110 dB。为了进一步区分不同阶次

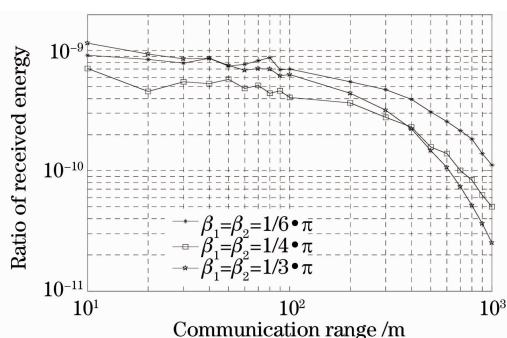


图 3 不同发送、接收仰角时的接收信号能量比
Fig. 3 Ratio of received energy under different elevation angles

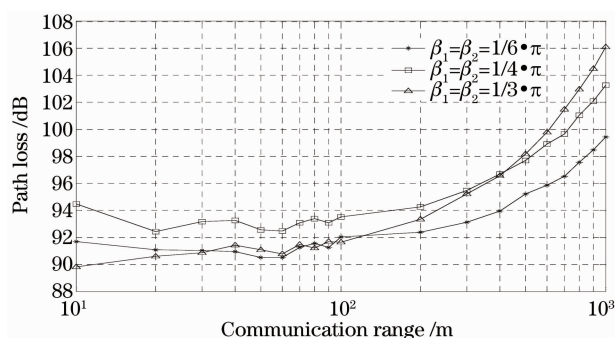


图 4 路径损耗随通信距离的变化关系
Fig. 4 Predicted path loss for different communication ranges

散射对总的接收信号能量的贡献,记 $n=1, 2, 3$ 分别为仅发生一阶、二阶、三阶散射并最终到达检测器的光子, $n=1+2, 1+2+3$ 分别为所有发生一阶和二阶散射、所有发生一阶二阶和三阶散射并到达检测器的光子总和。从图 5 可以看出,一阶散射光子能量占总的接收能量的绝大部分,二阶、三阶散射光子能量与其分别

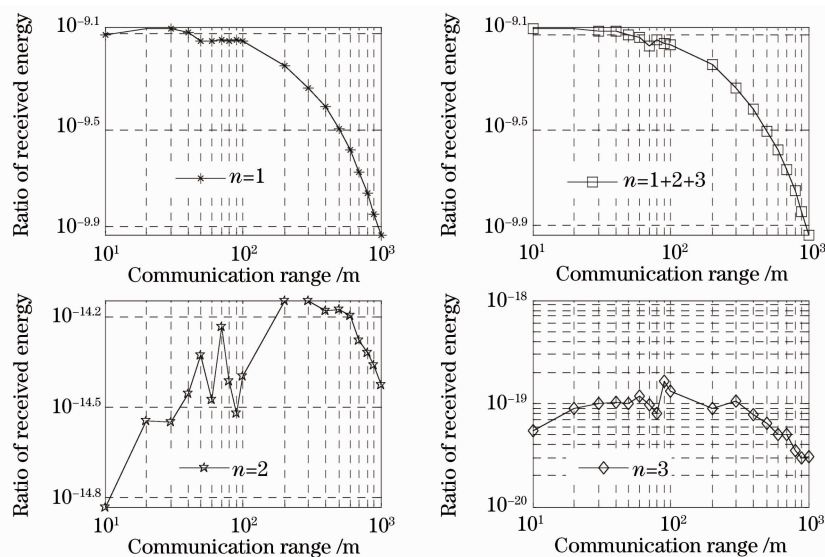


图 5 $\beta_1 = \beta_2 = 20^\circ$ 时不同阶次散射在总的接收信号能量中所占的比例

Fig. 5 Contribution of different scattering orders to the total received energy for $\beta_1 = \beta_2 = 20^\circ$

至少相差 5 个数量级和 9 个数量级;接收信号中一阶散射光子能量随着通信距离的增大而减小,最大相差约 1 个数量级;相反,接收信号中二阶散射光子能量随着通信距离的增大而增大,最大相差约 1 个数量级;三阶散射光子能量基本保持不变。图 6 给出了考虑四阶散射、五阶散射时总的链路损耗,由于四阶、五阶散射相比较于仅仅考虑一阶至三阶散射时的情况,在能量上相差至少 10 个量级以上,几乎没有对总的接收信号能量产生影响,所以,可以忽略四阶及以上阶次散射光子对总的接收信号光能量的贡献。当散射系数固定而吸收系数变化时,如图 7 所示,这是在散射系数较小的情况下得到的,当粒子浓度和散射系数值增大,吸收系数值减小,发送、接收仰角增大时,相邻散射体间的平均距离减小,在通信距离增大的情况下,高阶散射(四阶、五阶)对总的接收信号能量的贡献相比较于图 3~5 情况而言增大,所以能否忽视高阶散射(四阶、五阶)对链路损耗的影响应视实际的散射系数而定。

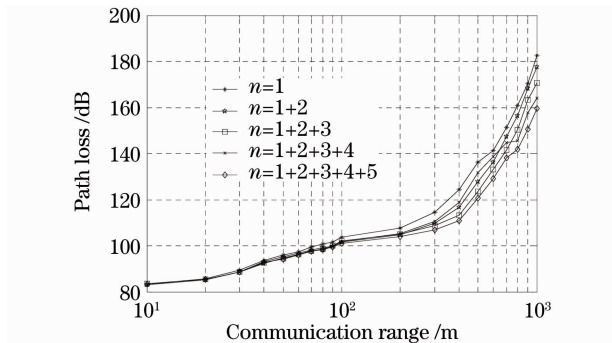


图 6 $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$ 考虑 1 阶到 5 阶散射时的链路损耗

Fig. 6 Predicted path loss when $n=1$ to $n=5$ are taken into consideration for $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$

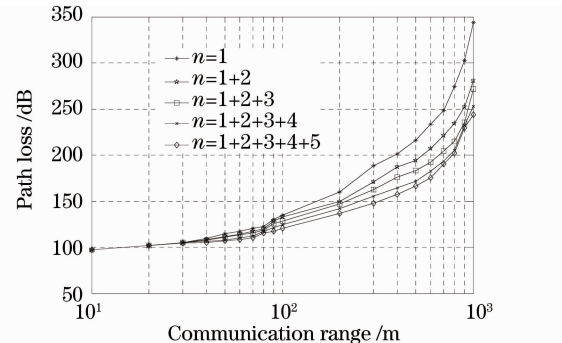


图 7 $\beta_1 = \beta_2 = 90^\circ$ 且大散射系数时的链路损耗图

Fig. 7 Predicted path loss when scattering coefficient is quite large for $\beta_1 = \beta_2 = 90^\circ$

4 结 论

主要提出了一个基于随机分析的大气信道多次散射路径损耗预测模型,建立了大气链路非视距传输时的路径损耗的理论表达,通过模型仿真,比较了不同阶散射对链路损耗的贡献,发现链路损耗对发送、接收仰角的变化并不敏感。当通信距离增大或者发送、接收仰角增大时,经历二阶、三阶散射的光子能量对总的接收信号光能量的贡献逐渐增大,证明单次散射假设并不能准确估算长距离、大角度的非视距散射光通信的链路损耗。当散射系数较小时,经历四阶及以上阶次散射的光子能量已十分微弱,对总的接收信号光能量的影响十分微弱,因此可基本忽略四阶及以上阶次散射对总的链路损耗的影响。

参 考 文 献

- 1 Binbin Wu, Zeinab Hajjarian, Mohsen Kavehrad. Free space optical communications through clouds; analysis of signal characteristics[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(17): 3168~3176
- 2 W. S. Ross, R. S. Kennedy. An investigation of atmospheric optically scattered non-line-of-sight communication links[R]. Army Research Office Project Report, Research Triangle Park, NC, Jan. 1980
- 3 Zhuanhong Jia, Qinglin Zhu, Faliang Ao. Atmospheric attenuation analysis in the FSO link[R]. Military Pre-Research Project under Grant No. D200109
- 4 Debbie Kedar, Shlomi Arnon. Non-line-of-sight optical wireless sensor network operating in multiscattering channel[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(33): 8454~8461
- 5 Mark R. Luetzgen, Jeffrey H. Shapiro. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **8**(12): 1964~1972
- 6 Brusca Ion P., Zaccanti G., Bianco S. D.. Monte Carlo for multiple scattering and non-spherical particles[C]. *SPIE*, 2004, **5237**: 223~227
- 7 H. Ding, G. Chen, A. K. Majumdar, B. M. Sadler *et al.*. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2009, **27**(9): 1535~1544
- 8 D. T. Gillespie. Stochastic-analytic approach to the calculation of multiply scattered lidar returns[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**(8): 1307~1324
- 9 Haipeng Ding, Zhengyuan Xu, Brian M. Sadler. A path loss model for non-line-of-sight ultraviolet multiple scattering channels[J].

- EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, 2010, Article ID 598572
- 10 S. A. Prah, M. Keijzer, S. L. Jacques, A. J. Welch. A Monte Carlo model of light propagation in tissue[C]. *SPIE*, 1989, **IS 5**: 102~111
 - 11 Daniel T. Gillespie. Calculation of n -scattered lidar returns for large n in an idealized cloud[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(3): 455~464
 - 12 Adrian C. Selden. Attenuation and impulse response for multiple scattering of light in atmospheric clouds and aerosols[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(13): 3144~3151
 - 13 Gang Chen, Feras Abou-Galala, Zhengyuan Xu *et al.*. Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 15059~15068
 - 14 Gang Chen, Zhengyuan Xu, Haipeng Ding *et al.*. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3929~3940
 - 15 Zeinab Hajjarian, Mohsen Kavehrad. Channel modeling in wireless optical communications using markov chains[C]. CCECE/CCGEI', May 5~7 2008 Niagara Falls, Canada
 - 16 Z. Xu, H. Ding, B. M. Sadler *et al.*. Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(16): 1860~1862
 - 17 Z. Xu, G. Chen, F. Abou-Galala *et al.*. Experimental performance evaluation of non-line-of-sight ultraviolet communication systems[C]. *SPIE*, 2007, **6709**: 67090Y
 - 18 G. Chen, F. Abou-Galala, Z. Xu *et al.*. Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 15059~15068
 - 19 R. Frühwirth, M. Liendl. Mixture models of multiple scattering: computation and simulation[J]. *Comput. Phys. Commun.*, **141**(2): 230~246