

基于部分均匀采样的蒙特卡洛仿真模型

汤琦, 孟贤*

(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

摘要: 针对海面紫外光散射传输中存在的衰减问题, 提出了一种基于部分均匀采样的蒙特卡洛仿真模型。该模型考虑到海平面上空气中的粒子浓度较高导致能见度较低的情况, 对距离参数采用重要性采样方法, 而对方向参数中的天顶角则采用均匀采样方法。仿真结果表明: 与传统的蒙特卡洛仿真模型相比, 在保证相同性能的前提下, 所提出的模型能够显著提高计算效率, 计算效率提升了约 5 个数量级, 非常适合应用于海上千米量级的实际传输场景。

关键词: 紫外光通信; 多阶散射模型; 蒙特卡洛; 重要性采样; 部分均匀采样; 非视距通信

中图分类号: TN926 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)05-0086-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Monte Carlo simulation model based on partial uniform sampling

TANG Qi, MENG Xian*

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Aiming at the attenuation problem in the scattering transmission of ultraviolet light on the sea surface, a Monte Carlo simulation model based on partially uniform sampling is proposed. The model takes into account the low visibility caused by the high concentration of particles in the air at sea level, and adopts the importance sampling method for the distance parameter and the uniform sampling method for the zenith angle in the direction parameter. The simulation results show that compared with the traditional Monte Carlo simulation model, the proposed model significantly improves computational efficiency while maintaining the same performance. The computational efficiency is improved by approximately five orders of magnitude, making it very suitable for practical transmission scenarios involving distances on the order of kilometers at sea.

Key words: ultraviolet optical communications, multi-order scattering model, Monte Carlo, importance sampling, partial uniform sampling, non-line-of-sight communication

0 引言

无线光通信可分为视距 (LOS) 光通信和非视距 (NLOS) 光通信。在 LOS 光通信中, 发射端与接收端必须精确对准, 并且两者之间不能有任何障碍物阻挡。相比之下, NLOS 光通信不需要精确对准, 而是利用散

射效应进行通信。尤其在紫外光通信中, 大气中的粒子和气溶胶对紫外光的强烈散射使得 NLOS 通信成为可能。由于紫外光的强散射和吸收特性, 传输距离越长, 光强度衰减越快, 这有助于保护通信免受窃听^[1]。

“日盲”波段是指波长在 200~280 nm 的紫外光, 这个波段内的光几乎不会出现在地表的太阳光谱中, 因为它们会被臭氧层强烈吸收^[2-3]。这使得该波段的背景噪声极低, 并且能够实现全天候通信。这些特性使得紫外光通信非常适合用于 5~10 km 内的 NLOS 隐蔽通信^[4]。此外, 在大雾或强降雨等低能见度的恶劣天气条件下, 其它波段的光通信系统的性能会大幅下降, 而基于散射传输的紫外光通信系统仍然能够有效工作。因此, 紫外光通信在保密通信领域具有广阔的应用前景^[5]。

收稿日期: 2024-06-18。

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(批准号: 2019JM-305)资助; 国家自然科学基金(批准号: 61805199)资助。

作者简介: 汤琦(1975—), 男, 安徽枞阳县人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为阵列信号处理、通信信号处理算法及 FPGA、DSP 实现研究, 主持陕西省自然科学基金 1 项、教育厅专项科研计划 1 项、横向项目多项; 发表 SCI/EI 收录论文 20 余篇, 授权专利 7 项, 主编专著 1 部、国家行业标准 1 项(JJF0028-2019)。

* **通信作者:** 孟贤(2000—), 男, 河北省定州市人, 西安邮电大学硕士, 主要研究方向为紫外光通信。



紫外光 NLOS 通信信道模型主要分为解析类和概率类 2 种^[6-7]。解析类模型的优点在于计算速度快, 但仅适用于近距离或较为简单的场景。概率类模型能够模拟数百米至数千米范围内更为复杂的情景, 它通过蒙特卡洛方法对大量光子 (通常超过 6 个数量级) 的仿真结果进行平均处理^[9]。但是, 这类模型的计算效率不高。在研究过程中, 研究人员发现了采样方法对于提高计算效率至关重要, 随后提出不同方法, 并在蒙特卡洛仿真 (MCS) 模型中引入重要性采样技术, 使得计算效率能提升数倍^[8]。因此, 本文在深入研究基于重要性采样的蒙特卡洛仿真 (MCS-IS) 模型的基础上, 结合海洋大气的应用背景, 提出基于部分均匀采样的蒙特卡洛仿真 (MCS-PUS) 模型。

1 MCS-IS 模型

MCS-IS 仿真模型如图 1 所示。在发送端, 每个光子的初始发射方向是随机的。光子按照这一方向前进直到到达第一个散射点 S_1 , 并在该点发生散射, 导致其运动方向即刻发生变化。接下来, 计算光子首次被接收端检测到的概率。随后, 光子沿着新的方向继续前进, 直至到达第二个散射点 S_2 , 并在此处散射。此时, 再次计算光子被接收的概率。重复这一过程, 直到光子完成预定的散射次数。最终, 统计所有光子被接收的概率, 并计算平均值。这样就可以得出单个光子被接收的平均概率, 并据此计算系统的路径损耗。图 1 中, 设发送端 TX 在 ZYX 坐标系原点位置, 接收端 RX 在 X 轴距离坐标原点 r 处的正半轴上。 θ_T 为光子出射时的散射天顶角, β_T 和 β_R 分别为初始出射时的发散半角和接收时的接收视场半角, α_T 和 ϕ_T 分别表示初始出射的发射仰角和发射方位角, 相应的 α_R 和 ϕ_R 分别为接收端接收视场的接收仰角和接收方位角, θ_i 、 ϕ_i 分别为光子第 i 次散射后的天顶角与方位角, d_i 表示光子

经过第 i 次散射后的行进距离, S_i 和 r_i 分别表示散射点和散射点与接收端之间的距离。假设光子初始出射时的天顶角和方位角分别为 θ_0 、 ϕ_0 , 且在发射锥体内, TX 均匀发射光子。天顶角 θ_0 在 (θ_0, β_R) 均匀分布, 方位角 ϕ_0 在 $(0, 2\pi)$ 均匀分布, 光子的初始发射方向角度由式 (1)、式 (2) 得出。

$$\theta_0 = \arccos[1 - \varepsilon^{(0)}(1 - \cos\phi_0)] \quad (1)$$

$$\phi_0 = 2\pi\varepsilon^{(\phi)} \quad (2)$$

其中, $\varepsilon^{(\theta)}$ 和 $\varepsilon^{(\phi)}$ 为在 $[0, 1]$ 服从均匀分布的随机数^[8]。 θ_i 由散射相函数决定, ϕ_i 在 $(0, 2\pi)$ 均匀分布, 则 θ_i 、 ϕ_i 可由以下公式得出。

$$\varepsilon^{(s)} = 2\pi \int_{-1}^{\cos(\theta_i)} f_\theta(\theta_i) d\theta_i \quad (3)$$

$$\phi_i = 2\pi\varepsilon^{(\phi)} \quad (4)$$

其中, $\varepsilon^{(s)}$ 是 $[0, 1]$ 均匀分布的随机变量, $f_\theta(\theta_i)$ 是瑞利散射相函数和米氏散射相函数的加权求和^[9]。

光子经过第 i 次散射 ($i=0$ 时为光子初始出射) 后行进的距离 d_i ^[10] 为

$$d_i = -\frac{\ln \varepsilon^{(i)}}{k_e} \quad (5)$$

其中, $\varepsilon^{(i)}$ 为 $[0, 1]$ 内的随机数; k_e 为消光系数, $k_e = k_s^{LR} +$

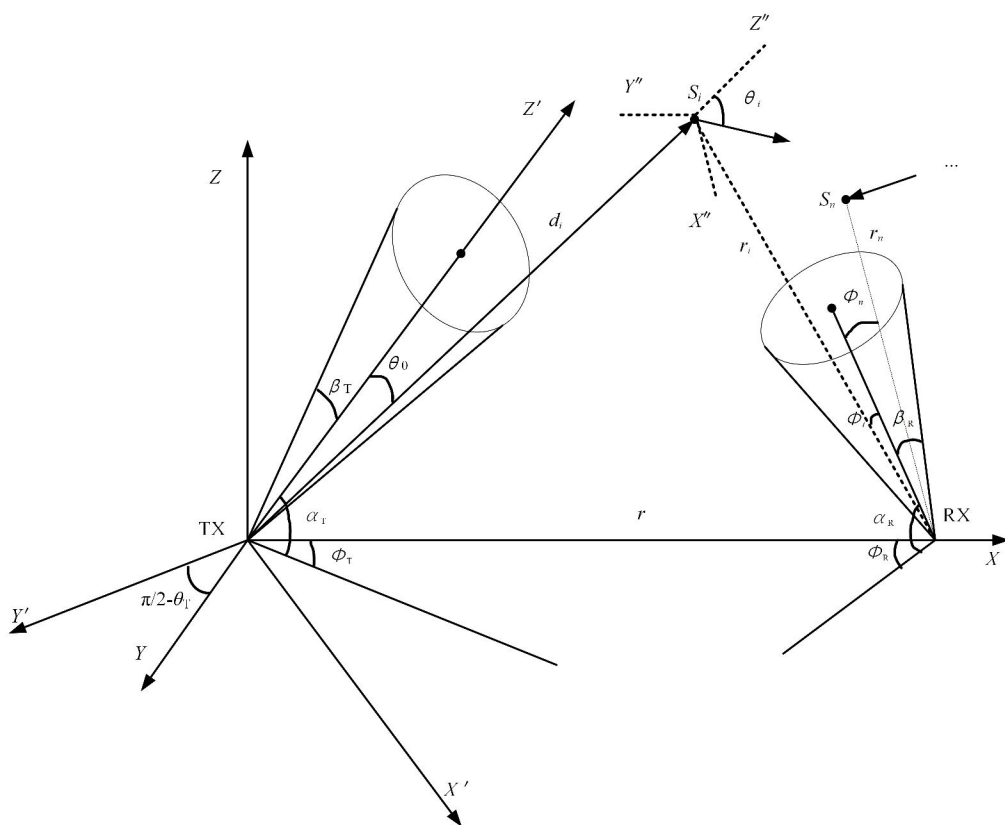


图 1 MCS-IS 仿真模型

汤琦,孟贤;基于部分均匀采样的蒙特卡洛仿真模型

$k_s^M + k_a^{[1]}$, k_s^{LR} , k_s^M , k_a 分别为瑞利散射系数、米氏散射系数和吸收系数。

紫外光多阶散射的路径损耗 $P_L^{[12]}$ 表达式如式(6)所示。

$$P_L = 10 \lg \frac{1}{P_T} \quad (6)$$

其中, P_T 为光子总的接收概率。

2 MCS-PUS 模型

目前, MCS-IS 模型对于光子的天顶角、方位角和移动距离均采用了重要性采样的方法,但该方法在计算接收光子的概率时会消耗大量时间。鉴于本文的应用背景(海洋大气)湿度高,且海平面空气中粒子浓度极大,导致能见度较低,可以将光子的散射近似为均匀分布。对于多阶散射信道模型而言,最终的接收概率主要取决于光子总的移动距离。因此,影响 MCS 模型收敛性的关键因素是光子移动距离的采样方式^[13]。基于此,本文考虑对天顶角采用均匀采样,而对方位角、移动距离采用重要性采样,即光子散射方位角、移动距离的采样函数仍然分别如式(4)、式(5)所示,而对天顶角的采样函数改为

$$\theta = \begin{cases} \varepsilon^{(s)} \beta_r, i=0 \\ \varepsilon^{(s)} \pi, i=1, 2, \dots, n-1 \end{cases} \quad (7)$$

MCS-PUS 模型算法流程图如图 2 所示。经过对 MCS-IS 模型的天顶角采用均匀采样处理后,极大地提高了模型的计算效率。

3 结果分析

本文采用的基本实验仿真参数如表 1 所示。

3.1 计算效率

MCS-IS 模型和 MCS-PUS 模型的计算效率对比情况如图 3 所示。可以看出,在同样进行 4 阶散射的情况下, MCS-IS 模型的计算时间高达 21 629 s,而 MCS-PUS 模型的计算时间缩短到了 0.16 s。这意味着 MCS-PUS 模型的计算效率比 MCS-IS 模型提高了 1.35×10^5 倍。

3.2 不同参数下的路径损耗

改变散射阶次在不同通信距离下的路径损耗如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,当散射阶次固定时,随着通信距离由 100 m 增加到 500 m, 路径损耗均呈现出较大的增幅。当通信距离这 100 m 时,散射阶次为 1 次时的路径损耗为 88 dB,而当散射阶次增加至 2 和 3 次时,路径损耗分别降低至 86 dB 和 85 dB。随着散射

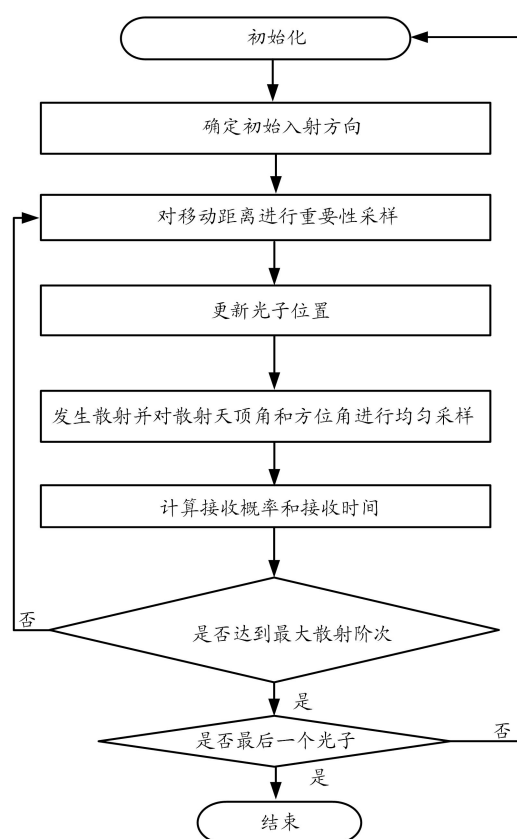


图 2 MCS-PUS 模型算法流程

表 1 仿真参数

参数	取值
接收端接受孔径的面积 A/m^2	1.77×10^{-4}
瑞利散射系数 k_s^{LR}/m^{-1}	0.266×10^{-3}
米氏散射系数 k_s^M/m^{-1}	0.284×10^{-3}
吸收系数 k_a/m^{-1}	0.802×10^{-3}
模型参数 h	0.924
发射的光子数 N 个	10^6
散射次数 i 次	5
发射半角 β_r	$\pi/20$
接收视场半角 β_R	$\pi/12$
发射仰角 α_r	$\pi/5$
接收仰角 α_R	$\pi/4$
发射方位角 ϕ_r	$\pi/2$
接收方位角 ϕ_R	$-\pi/2$

阶次继续增加到 4 和 5 次时, 路径损耗之间的差距变得更小。由此可见, 路径损耗随着散射阶次的增加而减小, 这表明多次散射模型相比于单次散射模型更为精确。从图 4(b)可以看出, 当通信距离由 400 m 增加到 2 000 m 时, 在散射阶次为 5 次的情况下, 路径

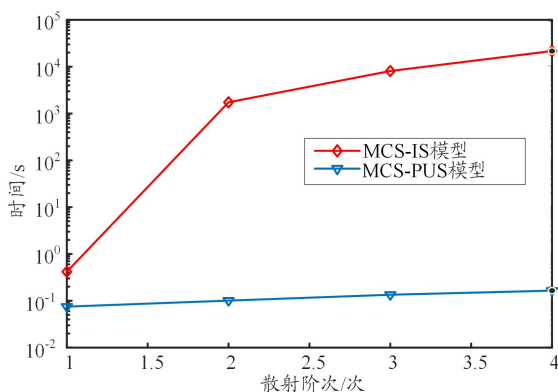
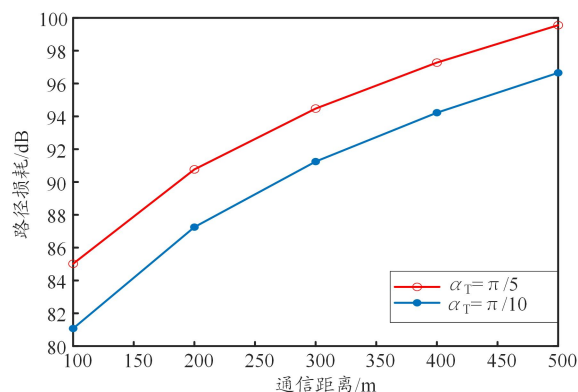
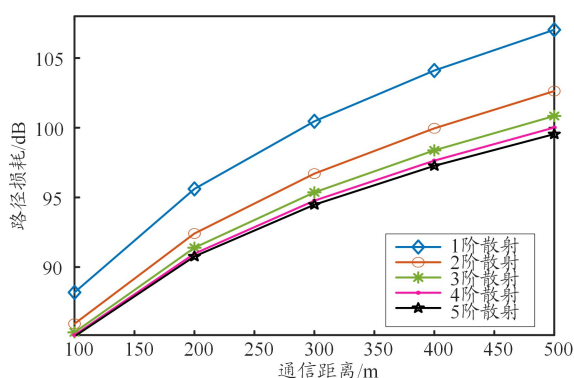


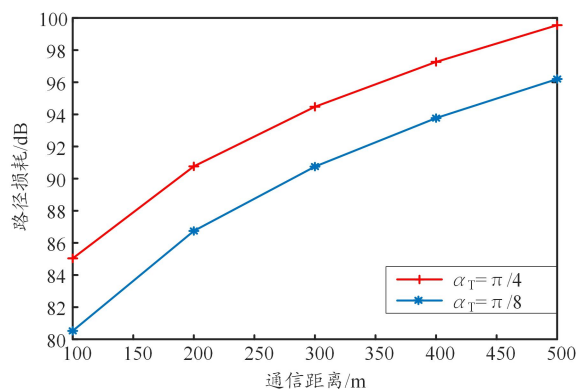
图3 2种模型的计算效率对比



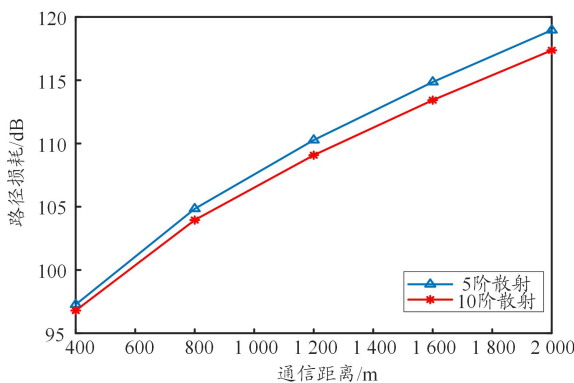
(a) 改变发射仰角



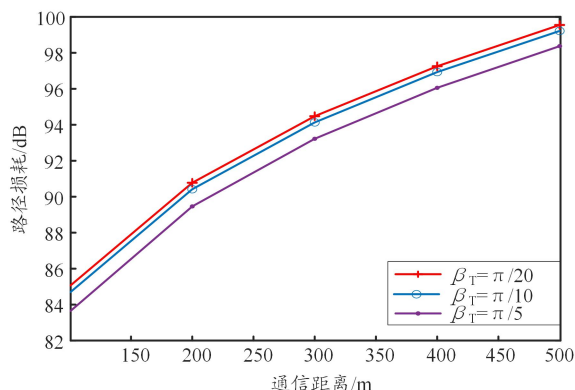
(a) 短距离通信



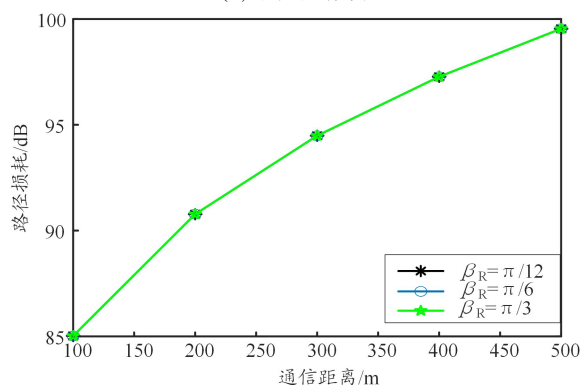
(b) 改变接收仰角



(b) 远距离通信



(c) 改变发射半角



(d) 改变接收视场半角

图4 改变散射阶次在不同通信距离下的路径损耗

损耗仍保持在 120 dB 以下;而当散射次数增加到 10 次时,路径损耗为 115~120 dB。这一结果表明,在通信距离达到千米量级时,该模型所预测的路径损耗依然较低,非常适合于海上的实际应用场景。

改变角度在不同通信距离下的路径损耗如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,当发射仰角为 $\pi/5$ 时路径损耗为 85 dB,将发射仰角减小到 $\pi/10$ 时,路径损耗降低了大约 5 dB。从图 5(b)可以看出,当接收仰角为 $\pi/4$ 时,路径损耗接近 85 dB;将接收仰角减小到 $\pi/8$

图5 改变角度在不同通信距离下的路径损耗

汤琦,孟贤;基于部分均匀采样的蒙特卡洛仿真模型

时,路径损耗降低到了约 80 dB。从图 5(c)可以看出,当发射半角从 $\pi/5$ 减小到 $\pi/10$ 时,路径损耗的变化不大。从图 5(d)可以看出,改变接收视场半角时,路径损耗并无明显变化。由此可见,当改变发射和接收两端的仰角时,路径损耗对角度的变化非常敏感。这是因为发射和接收仰角的减小使得光子更容易被接收,从而产生更低的路径损耗。因此,在一些具有重要背景噪声的实际应用场景中,可以通过优化接收端的设计,使接收机信噪比最大化,进而使误码率达到最小^[14]。

4 结束语

紫外光通信因其独特的优点,在保密和安全通信领域展现出广泛的应用前景,正逐渐成为研究的热点之一。本文研究了紫外光通信的 MCS-IS 模型,并在此基础上提出了 MCS-PUS 模型。通过仿真实验可知,采用均匀采样方法处理天顶角,并对光子移动距离使用重要性采样方法是可行的。仿真结果表明:对于 4 阶散射,与 MCS-IS 模型相比,MCS-PUS 模型使得计算效率提高了 1.35×10^5 倍,并且非常适合海上千米量级的实际传输应用场景;多阶散射模型相比于单阶散射模型更为精确;当改变收发两端的仰角时,路径损耗对角度的变化非常敏感。因此,MCS-PUS 模型在相同条件下展现出更优的性能。

参考文献:

- [1] 靳伟,孙宇航,徐军华,等. 紫外光非视距通信技术简介[J]. 西安邮电学院学报,2012,17(S1):10-15.
- [2] YUAN R, MA J. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. 中国通信:英文版,2016(6):63-75.
- [3] 李海涛,李晓毅,叶永桢,等. 紫外光通信及其军事应用前景[J]. 信息通信,2016,(12):60-62,66.
- [4] TANG Y. Research progress and prospect of ultraviolet communication [C]//IEEE. Proceedings of 2021 IEEE 6th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). Chengdu: IEEE, 2021: 987-992.
- [5] 袁仁智,王志峰,彭木根. 紫外光通信散射信道模型分析与发展现状[J]. 电信科学,2021,37(6):45-54.
- [6] YUAN R, MA J, SU P, et al. An integral model of two-order and three-order scattering for non-line-of-sight ultraviolet communication in a narrow beam case[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12): 2366-2369.
- [7] 彭木根,袁仁智,王志峰,等. 紫外光通信:原理、技术与展望[J]. 北京邮电大学学报,2022,45(3):13-18.
- [8] YUAN R, MA J, SU P, et al. An importance sampling method for Monte-Carlo integration model for ultraviolet communication [C]//IEEE. Proceedings of 2019 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking, Rabat. Morocco: IEEE, 2019: 1-6.
- [9] ROBERT J D, BRIAN M S. Survey of ultraviolet non-line-of-sight communications [J]. Semiconductor Science and Technology, 2014, 29 (8): 084006-1-084006-11.
- [10] ZHANG Q, ZHANG X, WANG L, et al. Performance modeling of ultraviolet atmospheric scattering of different light sources based on Monte Carlo method[J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3564-1-3564-14.
- [11] DING H, CHEN G, XU Z, et al. Characterization and modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering communication channels [C]//CSNDSP. Proceedings of 2010 7th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing, Newcastle: CSNDSP, 2010: 593-597.
- [12] YAN W, TANG Y, LIU C, et al. Analysis of UV multiple scattering based on improved MCI-PIS model[J]. IEEE Access, 2022 (10): 121784-121790.
- [13] YUAN R, MA J, SU P, et al. Monte-Carlo integration models for multiple scattering based optical wireless communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(1): 334-348.
- [14] DING H, XU Z, SADLER M B. A path loss model for non-line-of-sight ultraviolet multiple scattering channels[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010(Pt.2): 598572-1-598572-12.