移动场景下无线紫外光通信单次散射路径损耗分析

宋鹏，刘春*，朱磊，张利剑，张晓丹
西安工程大学电子信息学院，陕西 西安 710048

摘要 路径损耗是评估系统传输性能的重要参数，基于非直视非共面紫外光单次散射传输模型，采用遍历微元法对移动场景下无线紫外光通信单次散射路径损耗进行仿真，分析收发端几何参数以及收发节点相对位置变化对系统路径损耗的影响。结果表明：路径损耗在除 180°方向外的其余方向上随着接收端移动距离的增大而增大；随着收发仰角增大，路径损耗增大，发射端仰角对路径损耗的影响更为显著；当视场角较大时，发散角变化对路径损耗的影响不大，而视场角的变化在非共面情况且移动距离较大时对路径损耗的影响较为明显，其余情况下则影响不大。

关键词 光通信；紫外光；单次散射；移动场景；遍历微元法；路径损耗
中图分类号 TN929.12 **文献标志码** A **doi**：10.3788/AOS202040.0406001

Analysis of Single-Scatter Path Loss in Wireless Ultraviolet Communication in Mobile Scene

Song Peng, Liu Chun*, Zhu Lei, Zhang Lijian, Zhang Xiaodan
School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, *China*

Abstract Path loss is an important parameter to evaluate the transmission performance of the system. Based on the non-line-of-sight non-coplanar ultraviolet single-scatter transmission model, the traversing tiny unit method (TTUM) is used to simulate the single-scatter path loss of wireless ultraviolet communication in mobile scenes, and the influence of the geometric parameters of the transceiver and the relative position change of the transceiver node on the path loss of the system is analyzed. The results show that path loss increases with the increase of the moving distance of the receiver in the other directions except 180°; with the increase of transceiver elevation angle, path loss increases, and the effect of transmitter elevation angle on path loss is more significant; when the field of view angle is large, the change of beam divergence angle has little effect on path loss, and change of field of view angle has a more obvious effect on path loss in non-coplanar case and large moving distance, while it has little effect in other cases.

Key words optical communications; ultraviolet; single-scatter; moving scene; traversing tiny unit method; path loss
OCIS codes 060.2605; 260.7190; 060.4510

1 引 言

无线光通信广泛应用于通信、导航、定位和测量等工程领域中[1-2]。近年来，随着“日盲”(波长为 200～280 nm)紫外 LED 和紫外探测技术的不断创新发展，无线紫外光(UV)通信因其本身具有非直视(NLOS)传输、低背景噪声、低窃听率、低辨位率等优势逐渐成为研究热点[3-4]。目前紫外光技术已经被应用在军事和民事领域中，如空间探测、军事通信、火灾探测[5]。早在 1979 年，Reilly 等[6]提出了经典的基于椭球坐标系的紫外光单次散射通信模型。1991 年，Luettgen 等[7]对文献[6]中的模型做出改进。在此基础上，越来越多的学者对无线紫外光通信模型及通信性能进行分析研究，促进了紫外光通信的快速发展。

路径损耗(PL)是反映通信系统性能优劣的一个重要参数。2011 年，Wang 等[8]给出紫外光非共面通信系统路径损耗的近似闭合解。2012 年，Zuo 等[9]提出非直视非共面紫外光单次散射路径损耗模型，所得路径损耗与蒙特卡罗(MC)法所得结果一致；同年，Tang 等[10]分析了不同能见度和速率对路径损耗的影响；赵太飞等[11]提出基于 MC 的紫外光

收稿日期：2019-07-02；**修回日期**：2019-09-15；**录用日期**：2019-10-21
基金项目：国家自然科学基金(61971345)、陕西省重点研发计划(2019GY-113)、陕西省科技厅自然科学基础项目(2018JQ4016)、西安市科技局科技指导项目(201805030YD8CG14(9))、西安市科技局高校人才服务企业项目(GXYD7.15)
* **E-mail**：liucc_116@163.com

非直视传输模型，模拟了三种散射方式的具体覆盖范围和多次散射的路径损耗，得出单次散射与多次散射路径损耗基本一致的结论；张海良等[12-13]建立了三维紫外光通信传输模型，重点分析了发射端与接收端之间斜程传输、无共同散射体以及绕障碍物传输特性，并研究了全双工紫外光通信技术和多用户通信网络的连通性与互干扰。2013 年，Zuo 等[14]在文献[9]的基础上给出紫外光非共面情况下路径损耗的近似闭合解，适用于任意收发指向角和小发散角或小视场角（FOV）紫外光非共面系统。2015 年，Xu 等[15-17]提出了基于 MC 法的散射通信模型，研究了不同障碍物对紫外散射通信的影响，得到路径损耗与障碍物形状的关系，随后在文献[14]的基础上改进了基于 MC 多次散射通信模型，研究了雾霾粒子浓度、尺寸等对系统路径损耗的影响，同年以积分方均值定理和散射相函数的曲线拟合方法为基础，提出路径损耗表达式，并通过实验验证其正确性；同年，Liao 等[18]通过实验得到在通信距离不超过 4 km 时的路径损耗和脉冲响应，并将现场测试数据与 MC 多散射信道模型进行比较。2016 年，Raptis 等[19]基于 MC 方法，仿真分析考虑散射效应时系统的路径损耗，将所得结果与实验数据进行比较。2017 年，Hu 等[20]提出了一种用于紫外通信系统的极性编码方案，通过仿真和实验验证了该方案，能够有效地克服路径损耗引起的系统性能恶化，计算复杂度相对较低。2018 年，宋鹏等[21-22]仿真分析雾霾粒子浓度及收发端几何参数变化对路径损耗和误码率的影响，通过实验进行对比。2019 年，Wu 等[23]提出了一种基于球面坐标系的单散射共面模型，通过数值计算，与 MC 法单散射模型进行了对比，验证所提模型的有效性，同时提出了一种估算近距离紫外光通信路径损耗的新方法；同年，赵太飞等[24]采用烟尘的团簇-团簇凝聚模型和离散偶极子近似方法，分析了紫外光在不同烟尘浓度和粒子半径下的单次和多次散射信道特性，以及散射角对散射光强的影响。

目前，对于无线紫外光通信的研究，通信节点均是固定的，而实际应用中通信节点通常是移动的，如作战过程中坦克之间的实时通信。对于近距离的紫外光通信系统，接收端接收到的能量主要是光子经过单次散射到达接收端的能量[25]。本文以文献[26]中所提出的遍历微元法（TTUM）为基本理论方法，结合文献[27]中对移动场景下脉冲展宽的研究思路，分析收发端相对移动位置和收发端几何参数变化对移动场景下无线紫外光单次散射路径损耗的影响，为提高移动场景下无线紫外光通信系统性能提供了理论基础。

2　基于遍历微元法的非直视非共面紫外光单次散射模型

遍历微元法具有计算速度快、精度高和收发端可以在适用条件下任意指向的优点，主要思想[26]是在球坐标系下，把包含公共散射体的某个封闭自由空间分割成许多微小单元，计算光子经过单个微小单元散射到达接收端的能量，遍历所有的微小单元，最后对所有经微小单元散射到达接收端的能量累加求和，得到经公共散射体单次散射到达接收端的总能量，进而得到紫外光通信系统的路径损耗。

非直视非共面紫外光单次散射模型如图 1 所示，其中 TX 是以 T 为中心点的发射锥体，RX 是以 R 为中心点的接收锥体，TE 是发射锥体的中轴线，RF 是接收锥体的中轴线，TE' 和 RF' 分别为 TE 和 RF 在 x-y 平面上的投影，θ_t 为发端仰角，θ_r 为收端仰角，ϕ_t 为发射端发散角半角，ϕ_r 为接收端视场角半角（下文所提发散角和视场角均为半角值），α_t 为发射端的偏轴角，α_r 为接收端的偏轴角，收发端之间的距离为 d。

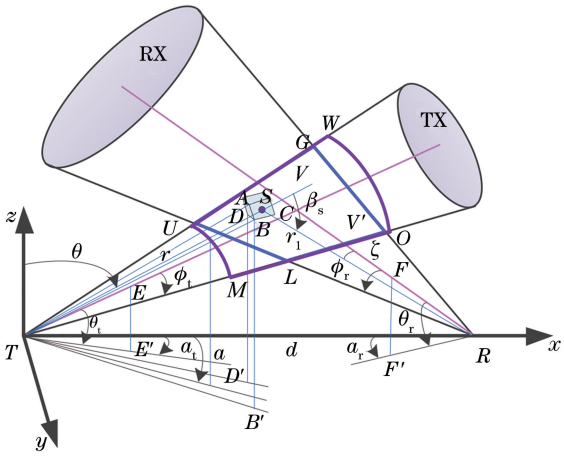

图 1　非直视非共面紫外光单次散射模型

Fig. 1　NLOS UV single-scatter propagation model in non-coplanar geometry

定义图 1 中粗线圈不规则多面体 $OGUL$ 为公共散射体 V，即 TX 和 RX 的公共部分，线圈 $OWUM$ 为包含公共散射体 V 的闭合区域 V'。发端发出的光子经过 V 中任意一散射点 S 发生散射后到达接收端，定义 β_s 为散射角，ζ 为散射点 S 与 R

的连线与接收端锥体中心轴的夹角，r 为 T 到 S 的距离，r_1 为 S 到 R 的距离。在球面坐标系下，散射点 S 可以用顶角 θ，方位角 α 和径向距离 r 表示，由 (θ,α,r) 唯一确定。

公共散射体 V 中的散射点与发射端距离越近，经过该散射点到达接收端的能量在接收端收到的总能量中占比越大，因此在包含公共散射体 V 的闭合区域 V' 中对于极径 r 的分割，越靠近发射端时对于 r 的分割程度应该越密集，相反，距离发射端越远时分割应越稀疏。所以对于极径 r 的分割采用非线性分割的方法，即按指数的规律进行分割，对于顶角 θ 和方位角 α 进行等间隔划分。

三重积分变量 r、θ 和 α 上下限的设定是遍历微元法中非常重要的参数设定，文献[26]对 r、θ 和 α 上下限的设定只考虑了一般情况，为适应在实践中可能出现的情况，在文献[26]的基础上给出更加全面的 r、θ 和 α 上下限的设定算法。具体情况如图 2 和图 3 所示。

1) 对于 r 积分上下限的确定分为两种情况。如图 2(a)所示，当 $\theta_t>\phi_t$ 且 $\theta_r>\phi_r$ 时，有 $r_{min}=\log[\min(UT,MT)]$，$r_{max}=\log[\max(WT,OT)]$；如图 2(b)所示，当 $\theta_t>\phi_t$ 且 $\theta_r<\phi_r$ 成立，有 $r_{min}=0$，$r_{max}=\log[\max(WT,OT)]$。

2) 对于 θ 和 α 的积分上下限确定分为两种情况。如图 3(a)所示，当 $90°-\theta_t>\phi_t$ 时，有 $\theta_{min}=90°-\theta_t-\phi_t$，$\theta_{max}=90°-\theta_t+\phi_t$，$\alpha_{min}=\alpha_t-\arctan\cdot\left(\frac{\tan\phi_t}{\cos^2\theta_t}\right)$，$\alpha_{max}=\alpha_t+\arctan\left(\frac{\tan\phi_t}{\cos^2\theta_t}\right)$；如图 3(b)所示，当 $90°-\theta_t<\phi_t$ 时，有 $\theta_{min}=0$，$\theta_{max}=90°-\theta_t+\phi_t$，$\alpha_{min}=0$，$\alpha_{max}=2\pi$。

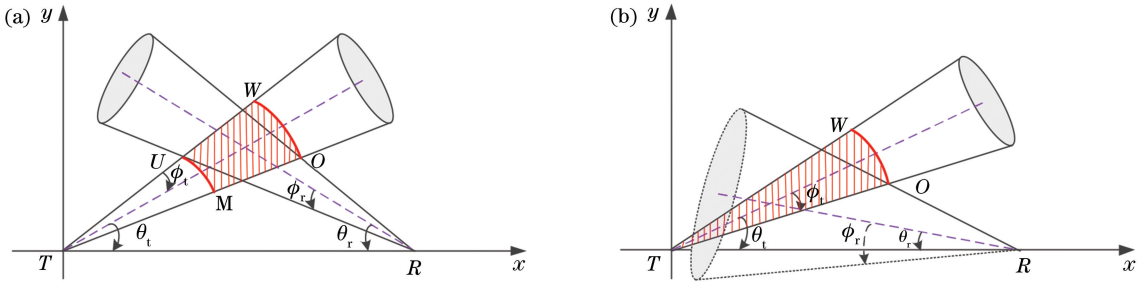

图 2　确定 r 的积分上下限。(a)情况一；(b)情况二

Fig. 2　Determine the upper and lower limits of r. (a) Situation 1; (b) situation 2

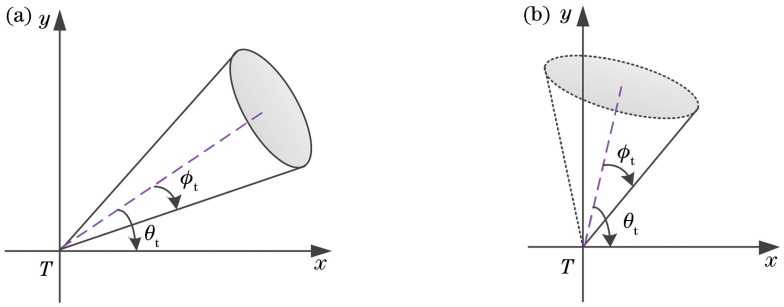

图 3　确定 θ 和 α 的积分上下限。(a)情况一；(b)情况二

Fig. 3　Determine the upper and lower limits of θ and α. (a) Situation 1; (b) situation 2

根据遍历微元法，公共散射体 V 的体积可表示为

$$|V|_{\mathrm{TTUM}}=\sum_{S_{(i,j,k)}\in V'}|V''|_{(i,j,k)},\tag{1}$$

式中：$|V''|_{(i,j,k)}$ 为中心点在公共散射体内的微元 V'' 的体积，可以计算为

$$|V''|=\int_{r_B}^{r_C}\int_{\alpha_D}^{\alpha_B}\int_{\theta_A}^{\theta_B}r^2\sin\theta\delta\theta\delta\alpha\delta r=\frac{(r_C^3-r_B^3)(\cos\theta_A-\cos\theta_B)(\alpha_B-\alpha_D)}{3},\tag{2}$$

其中：r_B 和 r_C 分别为点 B 和点 C 的径向距离；α_B 和 α_D 分别为点 B 和点 D 的方位角；θ_A 和 θ_B 分别为点 A 和点 B 的顶角。

闭合区域 V' 被分割成 M^3 个微小单元 V''，如图 4所示，“*”为微元的中心点，当被分割的微小单元的中心点在公共散射体 V 内时，经微小单元 V'' 散射的能量才能被接收端接收，将接收端接收的经一个微小单元散射的能量表示为[26]

$$E_{V''r}=\int_{r_B}^{r_C}\int_{\alpha_D}^{\alpha_B}\int_{\theta_A}^{\theta_B}\sin\theta\exp[-k_e(r+r_1)]\delta\theta\delta\alpha\delta r\cdot\frac{E_tA_rk_sP(\cos\beta_s)\cos\zeta}{4\pi\Omega_tr_1^2}=$$

$$\frac{E_tA_rk_sP(\cos\beta_s)\cos\zeta}{4\pi\Omega_tr_1^2k_e\exp[k_e(r_1+r_B+r_C)]}(\cos\theta_B-\cos\theta_A)\cdot(\alpha_B-\alpha_D)[\exp(k_er_B)-\exp(k_er_C)],\quad(3)$$

式中：k_s 为大气散射系数，等于瑞利散射系数 k_s^R 与米氏散射系数 k_s^M 之和，即 $k_s=k_s^R+k_s^M$；k_e 为大气消光系数，等于大气吸收系数 k_a 和散射系数 k_s 之和，即 $k_e=k_s+k_a$；$P(\cos\beta_s)$是散射相函数；E_t 为发射端发射的能量；A_r 为接收端的有效面积；$\zeta=\angle SRF$；$r_1=|\overrightarrow{SR}|$；$\Omega_t$ 为发端的立体角，$\Omega_t=2\pi(1-\cos\phi_t)$。

接收端接收的总能量为

$$E_r=\sum_{S_{(i,j,k)}\in V}E_{V''_{(i,j,k)}r},\quad(4)$$

式中 $E_{V''_{(i,j,k)}r}$ 可由(3)式求得。

路径损耗定义为

$$L=10\lg\left(\frac{E_t}{E_r}\right)=10\lg\left(\frac{E_t}{\sum\limits_{S_{(i,j,k)}\in V}E_{V''_{(i,j,k)}r}}\right)。\quad(5)$$

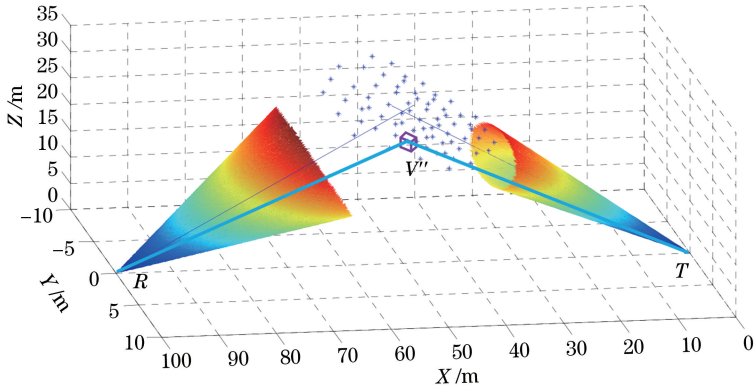

图 4　非直视非共面紫外光单次散射模型中微小单元 V'' 中心点示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the center point of micro element V'' in the non-line-of-sight non-coplanar ultraviolet single-scatter transmission model

3　研究思路

研究移动场景下无线紫外光通信单次散射路径损耗的基本方法是“化动为静”，即将通信节点移动情况转变为固定情况，然后分析在通信节点固定时收发端几何参数变化以及通信节点位置相对变化对通信信道路径损耗的影响，最后“串静表动”，即将节点固定场景串接起来反映出移动场景下的信道路径损耗变化情况。

研究思路如图 5 所示，将发射端固定在原点(0，0，0)处，接收端以点(100，0，0)为中心向四周 8 个方向进行移动，向 0°和 180°方向进行移动时，收发端锥体处于共面情况，向其他方向移动为非共面情况。图中所建坐标系与地面水平，移动时接收端进行平移，锥体朝向保持不变。首先固定收发端的几何参数，在 8 个方向上调整接收端的位置，分析节点相对位置变化对系统路径损耗的影响。然后分析收发端仰角变化、发散角变化、视场角变化以及节点相对位置变化对系统路径损耗的影响。

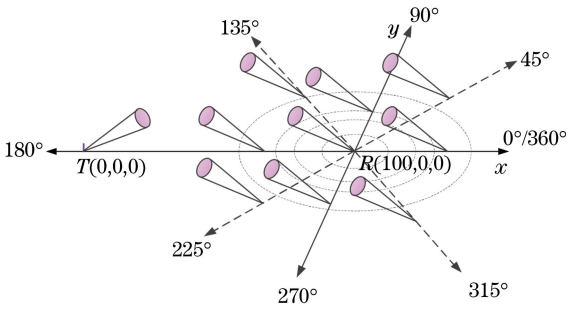

图 5　研究思路示意图

Fig. 5　Schematic diagram of research

4　仿真分析

4.1　节点相对位置变化对路径损耗的影响

固定收发端几何参数，接收端在以点(100，0，0)为中心的 8 个方向上移动，分析收发端节点相对位置变化对路径损耗的影响。部分仿真参数如表 1 所示，发端初始能量为 1 J，收发端仰角均为 20°，发射端发散角为 10°，接收端视场角为 40°。

表 1　部分仿真参数

Table 1　Part of simulation parameters

Parameter	Value
Wavelength λ /nm	266
Rayleigh scattering coefficient $k_s^R/(10^{-3}\ \mathrm{m}^{-1})$	0.24
Mie scattering coefficient $k_s^M/(10^{-3}\ \mathrm{m}^{-1})$	0.25
Absorption coefficient $k_a/(10^{-3}\ \mathrm{m}^{-1})$	0.74
Rayleigh phase function scattering parameter γ	0.017
Mie phase function asymmetry parameter g	0.72
Mie phase function parameter f	0.5
Speed of light c /$(10^8\ \mathrm{m\cdot s^{-1}})$	3
Receiving aperture radius r /$(10^{-2}\ \mathrm{m})$	1.5
Division times M	10

仿真结果如图 6 所示，由图中可以看出，除了 180°方向，在其余方向上随着接收端移动距离的增大，系统路径损耗均增大。这是因为路径损耗主要受发端到收端的传输距离和公共散射体的体积的影响，光子传输距离增加，路径损耗将增大，公共散射体体积增大，路径损耗将减小。当接收端在 180°方向上移动时，公共散射体体积变化如表 2 所示，可以发现光子传输距离和公共散射体均变小，但是距离的减小较为显著，因此路径损耗呈现下降趋势。除此之外还发现 8 个方向上的趋势以 x 轴为对称轴上下一一对称，在之后的研究中则只对 x 轴及 x 轴以上的方向进行分析。

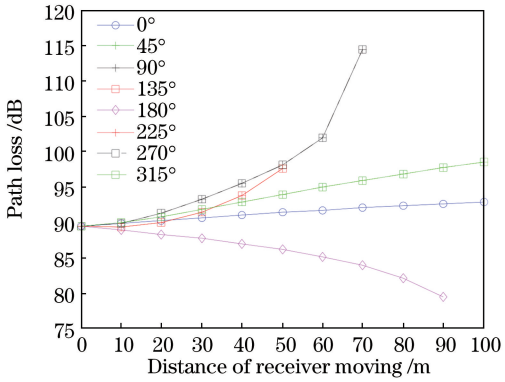

图 6　节点位置变化对路径损耗的影响

Fig. 6　Influence of node's position change on path loss

4.2　TTUM 性能验证

文献[26]中通过对比实验实测的路径损耗与 TTUM 仿真得到的路径损耗值，验证了 TTUM 的有效性。为进一步验证TTUM针对无线紫外光通信信道特性仿真的精准性，将 TTUM 仿真结果与 MC 法所得结果进行对比，文献[28]中研究非直视非共面紫外光系统中的脉冲展宽效应，对 MC 法进行了详细的介绍。对比结果如图 7 所示，仿真参数设置与 4.1 节一致，仿真光子数设为 20 万。可以看到 TTUM 在每个方向上的趋势与 MC 法一致，仿真结果几乎重合，在 0°方向上移动距离为 100 m 时存在 0.4 dB 误差，在 90°方向上移动距离为 70 m 时最大误差也仅有 1.98 dB。所以使用 TTUM 仿真分析无线紫外光通信信道特性是可行的，且准确度较高。

表 2　接收端在 180°方向上移动时 V 的大小

Table 2　Value of V when the receiver moves in 180° direction

Moving distance R /m	Communication distance /m	V /m^3
0	100	24858.05
10	90	18121.51
20	80	12727.31
30	70	8526.29
40	60	5369.31
50	50	3107.23
60	40	1590.89
70	30	671.14
80	20	198.83
90	10	24.83

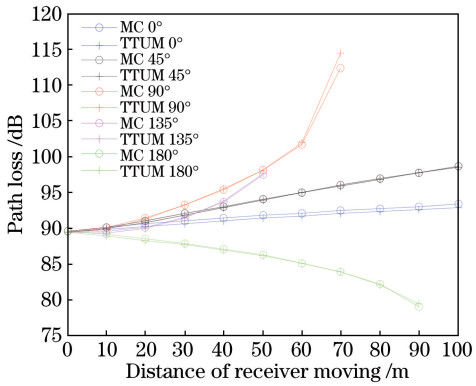

图 7　TTUM 与 MC 法仿真结果对比图

Fig. 7　Comparison of simulation results between TTUM and MC method

以 45°方向为例，将 TTUM 和 MC 法仿真所需时间进行对比。用 CPU 为奔腾双核 E5300，内存为 4.0 GB 的台式计算机进行仿真，仿真参数与 4.1 节一致，将 TTUM 分割次数设为 10，MC 法仿真光子数设为 20 万，结果如表 3 所示。可以看出在相同参

数下 TTUM 的仿真时间与 MC 法所用时间相比大大减小，路径损耗相差不大，进一步验证 TTUM 计算精度高且计算速度快的优点。

表 3　TTUM 与 MC 对比数据

Table 3　Contrast data between TTUM and MC

Moving distance R /m	Simulation time /s		Time difference /s	PL /dB		PL difference /dB
	TTUM	MC		TTUM	MC	
0	8.7138	49.6100	40.8962	89.3430	89.5740	0.2310
10	8.6954	49.5782	40.8828	89.8757	90.1228	0.2471
20	8.7205	49.5948	40.8743	90.7685	91.0046	0.2361
30	8.6407	49.8603	41.2196	91.7916	91.9781	0.1865
40	8.5837	49.5648	40.9811	92.8565	92.9945	0.1380
50	8.6085	49.3622	40.7537	93.8808	93.9924	0.1116
60	8.5550	49.6127	41.0577	94.9377	94.9909	0.0532
70	8.5222	49.3575	40.8353	95.9082	95.9698	0.0616
80	8.4867	49.2829	40.7962	96.8087	96.8688	0.0601
90	8.4919	49.4206	40.9287	97.6365	97.7406	0.1041
100	8.4516	49.1736	40.7220	98.4788	98.5698	0.0910

4.3　仰角变化对路径损耗的影响

在 4.1 节中，仿真分析了固定收发端几何参数时收发端相对位置变化对路径损耗的影响，本节中改变收发端仰角，分析仰角变化以及收发端相对位置变化对路径损耗的影响。

首先改变发射端仰角，发射端仰角依次设为 20°、45°、70°，分析发射端仰角对路径损耗的影响。设置接收端仰角为 20°，发散角为 10°，视场角为 40°。仿真结果如图 8 所示，5 个方向上的变化趋势与图 6 一致。发端仰角由 20°增大到 70°时，随着发射端仰角的增大，路径损耗也随之增大。从图 8(c)和图 8(d)中看到，路径损耗分别在移动距离为60 m 和 50 m 后，发射端仰角为大角度时的路径损耗反而小于仰角为小角度时的路径损耗。以 90°方向为例进行说明：当接收端在 90°方向移动时，光子传输距离增大，公共散射体体积减小，路径损耗增大。而当发射端仰角较小时，公共散射体体积相对于较大仰角情况减小的速度快，即路径损耗增长速率较大(这在其他方向上也可以看出)，在移动一定距离后路径损耗则大于大仰角情况。

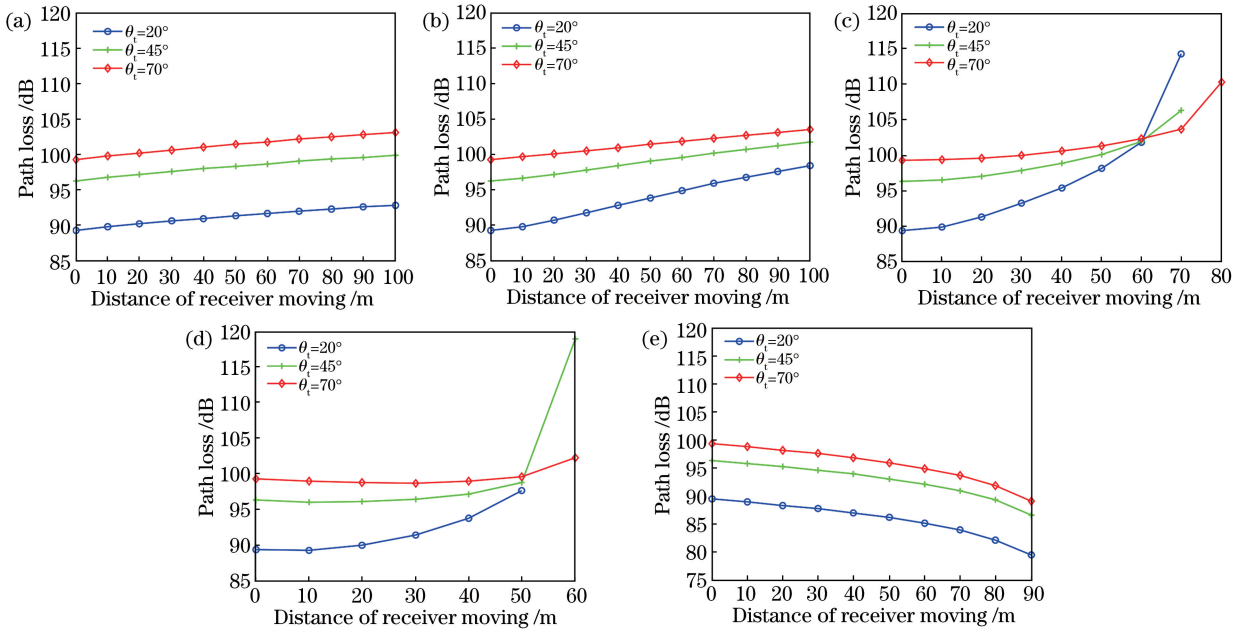

图 8　发射端仰角变化对路径损耗的影响。(a) 0°方向；(b) 45°方向；(c) 90°方向；(d) 135°方向；(e) 180°方向

Fig. 8　Influence of elevation angle change of transmitter on path loss. (a) 0° path; (b) 45° path; (c) 90° path; (d) 135° path; (e) 180° path

为分析接收端仰角变化对路径损耗的影响，固定发射端仰角为 20°，发散角为 10°，视场角为 40°，接收端仰角依次设为 20°、45°、70°，仿真结果如图 9 所示。得到路径损耗与接收端移动距离的关系与图 6一致。此外，随着接收端仰角的增大，路径损耗也增大。在图 9(a)100 m 处，接收端仰角从 20°增大到 70°，路径损耗由 92.8920 dB 增大到 96.7638 dB，增加了 3.8718 dB；在图 8(a)100 m 处，发射端仰角从 20°增大到 70°，路径损耗由 92.8920 dB增大到 103.0784 dB，增加了10.1864 dB。在图 9(e)0 m 处，接收端仰角从 20°增大到 70°，路径损耗由 89.3430 dB增大到 93.0756 dB，增加了 3.7326 dB；在图 8(e)0 m 处，发射端仰角从 20°增大到 70°，路径损耗由 89.3430 dB 增大到99.2809 dB，增加了9.9379 dB。对比发现，与接收端仰角相比，发射端仰角变化对路径损耗的影响更大。这主要是因为发散角较小，视场角较大，与增大接收端仰角相比，增大发射端仰角时，公共散射体体积和光子传输距离增大得更快，从而引起的路径损耗变化更为显著。

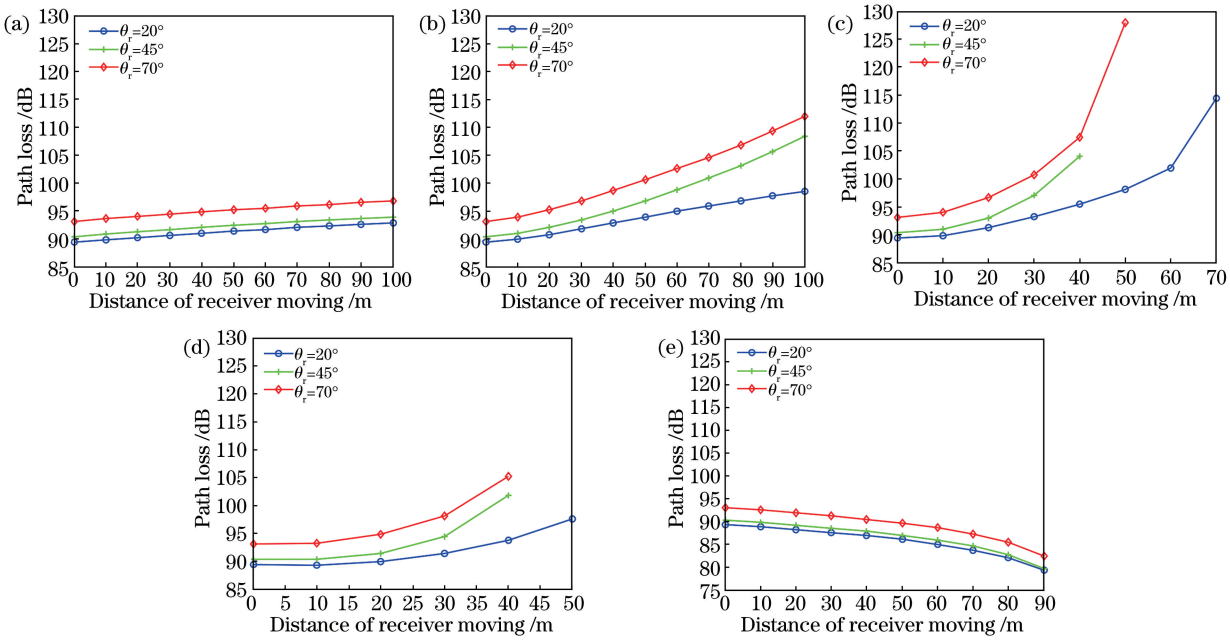

图 9　接收端仰角变化对路径损耗的影响。(a) 0°方向；(b) 45°方向；(c) 90°方向；(d) 135°方向；(e) 180°方向

Fig. 9　Influence of elevation angle change of receiver on path loss. (a) 0° path; (b) 45° path; (c) 90° path; (d) 135° path; (e) 180° path

为分析收发端仰角同时变化对路径损耗的影响，设定发散角为 10°，视场角为 40°，收发端仰角依次一致设置为 20°、45°、70°，仿真结果如图 10 所示。随着收发端仰角的同时增大，路径损耗增大。在 5 个子图的 0 m 处，收发端仰角同时由 20°增大到 70°时，路径损耗增加了 9.3572 dB。图 10(a)100 m 处，收发仰角同时为 20°、45°和 70°时，对应的路径损耗分别为 92.8920 dB、99.8427 dB、103.3376 dB。图 10(c)和图 10(d)趋势出现的原因与图 8 相同，在此不再说明。

通过分析发射端仰角变化、接收端仰角变化以及收发端仰角同时变化对路径损耗的影响，得到以下结论：随着收发端仰角增大，路径损耗是增大的，与接收端仰角相比，发射端仰角变化对路径损耗的影响更大一些；仰角度数越小，随着接收端移动距离的增大，路径损耗增大的速度越快。

4.4　发散角变化对路径损耗的影响

固定收发端仰角为 20°，视场角为 40°，发散角依次设为 5°、10°、15°，分析发射端发散角的变化对路径损耗的影响，结果如图 11 所示。随着接收端移动距离的增大，路径损耗变化趋势与图 6 相同。发散角为 5°、10°和 15°时，路径损耗随着发散角的增大而变小，这是因为，此时视场角较大，发散角增大引起公共散射体增大，路径损耗则减小。但减小的程度非常小，图 11(c)移动距离为 0 m 和 70 m 处，发散角从 5°增大到 15°，对应的路径损耗减小值为 1.1497 dB和 2.2467 dB。图 11(e)90 m 处，随着发散角的增大，路径损耗减小了 1.0409 dB。

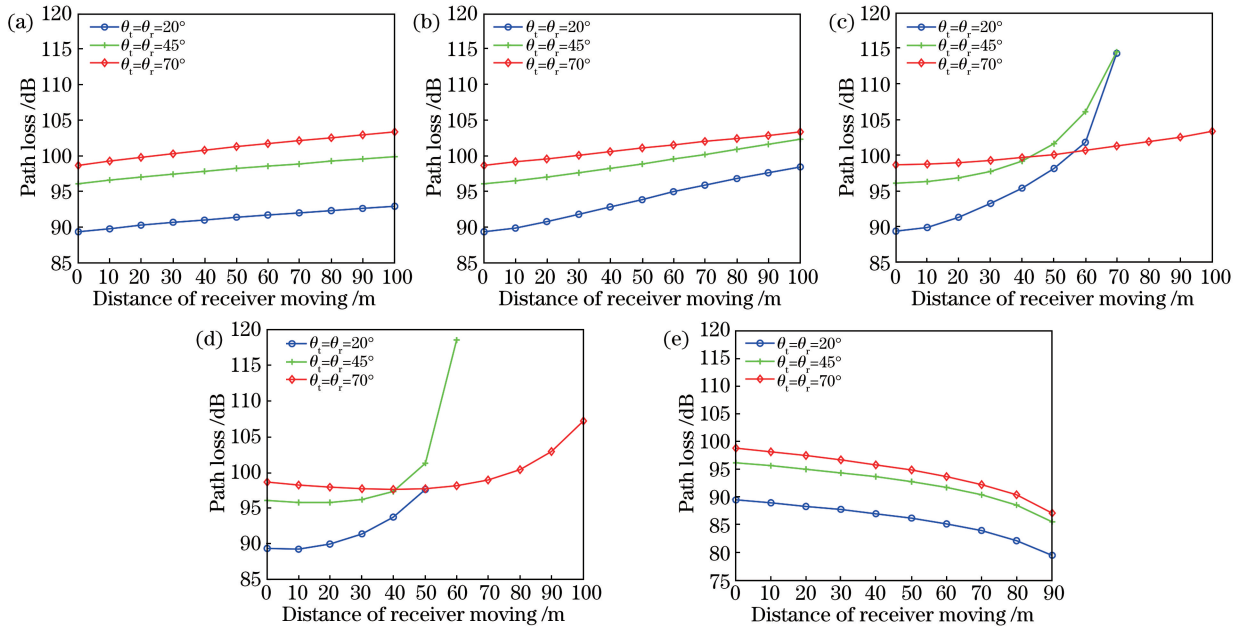

图 10　收发端仰角一致变化对路径损耗的影响。(a) 0°方向;(b) 45°方向;(c) 90°方向;(d) 135°方向;(e) 180°方向

Fig. 10　Influence of elevation angle consistent change of transceiver on path loss. (a) 0° path; (b) 45° path; (c) 90° path; (d) 135° path; (e) 180° path

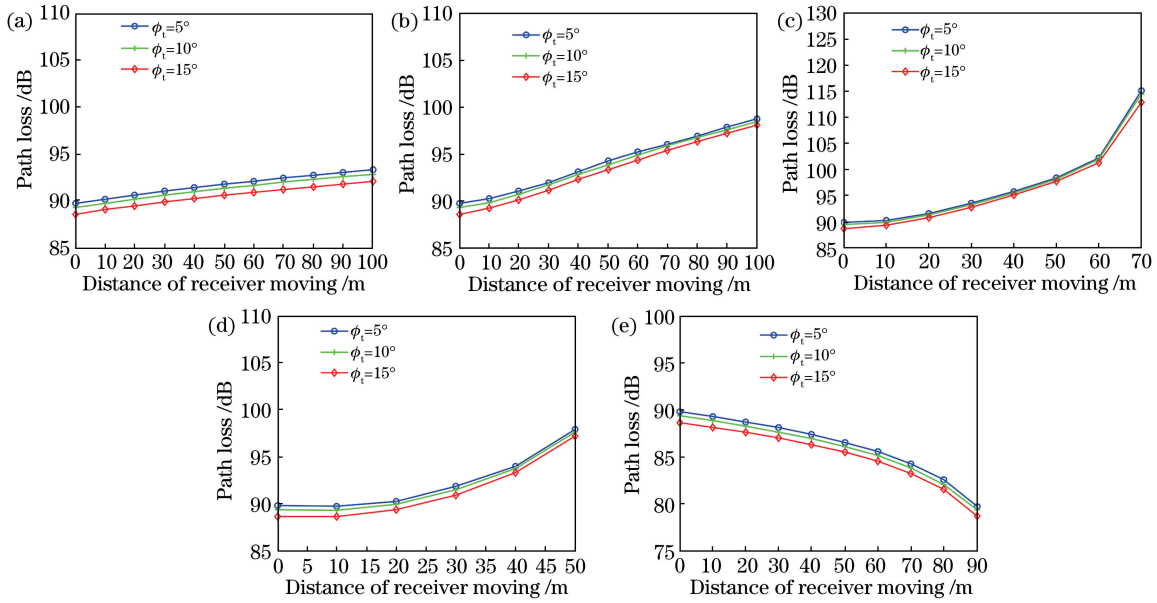

图 11　发散角变化对路径损耗的影响。(a) 0°方向;(b) 45°方向;(c) 90°方向;(d) 135°方向;(e) 180°方向

Fig. 11　Influence of beam divergence angle change on path loss. (a) 0° path; (b) 45° path; (c) 90° path; (d) 135° path; (e) 180° path

4.5　视场角变化对路径损耗的影响

收发端仰角均为 20°,发散角为 10°,分析视场角从 30°开始以 10°为间隔增大至 50°对路径损耗的影响,仿真结果如图 12 所示。可以看出视场角变化对路径损耗的影响不大,原因是发散角固定不变,视场角变化对公共散射体体积影响不大。图 12(a)中移动距离为 100 m 处,随着视场角从 30°增大到 50°,路径损耗由 93.0350 dB 减少为 92.7997 dB,变化值为 0.2353 dB。从图 12(b)、图 12(c)和图 12(d)中可以看出,接收端移动距离变大时,视场角为 50°的路径损耗小于视场角为 30°的路径损耗,原因是接收端移动后,收发锥体为非共面情况,此时随着视场角的增大,公共散射体体积增大,则路径损耗变小。当视场角为 30°时,随着移动距离的增大,公共散射体快速变小,因此路径损耗很快就变为无穷大。

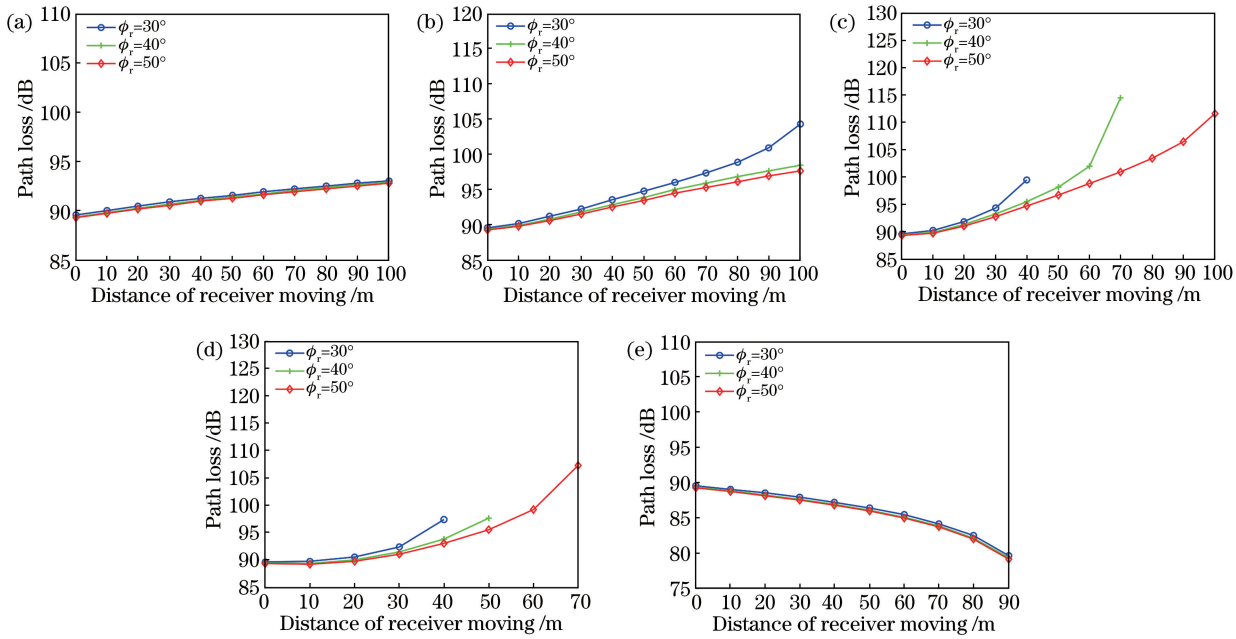

图 12　视场角变化对路径损耗的影响。(a) 0°方向；(b) 45°方向；(c) 90°方向；(d) 135°方向；(e) 180°方向

Fig. 12　Influence of FOV angle change on path loss. (a) 0° path; (b) 45° path; (c) 90° path; (d) 135° path; (e) 180° path

5　结　　论

基于非共面非直视紫外光单次散射模型，采用遍历微元法研究移动条件下无线紫外光单次散射通信的路径损耗特性，提出化动为静的研究思路，主要研究了收发端仰角、发散角、视场角以及收发端节点相对位置变化对系统路径损耗的影响。仿真结果表明，随着接收端移动距离的增大，除了 180°方向外其余方向上路径损耗均为增大趋势。收发端仰角增大均会引起路径损耗的增大，相比接收端仰角，发射端仰角的变化对路径损耗的影响更大。在视场角较大的情况下，发散角较大时的路径损耗略微小于发散角较小时的情况，视场角的变化在非共面情况且移动距离较大时对路径损耗的影响较为明显，在其他情况下则影响不大。因此在紫外光通信系统中可以通过调小收发端仰角、增大发散角和视场角，来减小路径损耗值，从而保证较好的通信质量。

参　考　文　献

[1] Wang H Q, Wang Y G, Cao M H, et al. Influence of atmospheric visibility on laser pulse delay and broadening in sand and dust weather[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0701002.
王惠琴, 王彦刚, 曹明华, 等. 沙尘天气下能见度对光脉冲时延和展宽的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0701002.

[2] Zhao F, Zhang X, Zhao J J, et al. 3D ship deformations measurement method based on free-space optical communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0404003.
赵芳, 张骁, 赵建军, 等. 基于无线光通信的舰船三维变形测量方法[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0404003.

[3] Yuan R Z, Ma J S. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. China Communications, 2016, 13(6): 63-75.

[4] Drost R J, Sadler B M. Survey of ultraviolet non-line-of-sight communications[J]. Semiconductor Science and Technology, 2014, 29(8): 084006.

[5] Ke X Z. Ultraviolet ad hoc network theory[M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-25.
柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-25.

[6] Reilly D M, Warde C. Temporal characteristics of single-scatter radiation[J]. Journal of the Optical Society of America, 1979, 69(3): 464-470.

[7] Luettgen M R, Shapiro J H, Reilly D M. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1991, 8(12): 1964-1972.

[8] Wang L J, Xu Z Y, Sadler B M. An approximate closed-form link loss model for non-line-of-sight ultraviolet communication in noncoplanar geometry[J]. Optics Letters, 2011, 36(7): 1224-1226.

[9] Zuo Y, Xiao H F, Wu J, et al. A single-scatter path loss model for non-line-of-sight ultraviolet channels[J]. Optics Express, 2012, 20(9): 10359-10369.

[10] Tang Y N, Xie X P, Zhao W. Simulation research of short range non-line-of-sight ultraviolet communication performance[C]//2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), April 21-23, 2012, Yichang, China. New York: IEEE, 2012: 567-570.

[11] Zhao T F, Ke X Z. Monte Carlo simulations for non-line-of-sight ultraviolet scattering coverage area[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(11): 114208.
赵太飞, 柯熙政. Monte Carlo 方法模拟非直视紫外光散射覆盖范围 Monte Carlo 方法模拟非直视紫外光散射覆盖范围[J]. 物理学报, 2012, 61(11): 114208.

[12] Zhang H L, Yin H W, Jia H H, et al. The characterization of non-line-of-sight ultraviolet communication in non-common-scattering volume [J]. Optics Communications, 2012, 285(7): 1771-1776.

[13] Zhang H L. Study on the characteristics of propagation of ultraviolet communication system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012: 28-70.
张海良. 紫外光通信系统传输特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012: 28-70.

[14] Zuo Y, Xiao H F, Wu J, et al. Closed-form path loss model of non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation[J]. Optics Letters, 2013, 38(12): 2116-2118.

[15] Xu C M, Zhang H M. Monte-Carlo based modeling for ultraviolet non-line-of-sight communication channels with typical obstacles[C]//2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), October 15-17, 2015, Nanjing, China. New York: IEEE, 2015: 15636571.

[16] Xu C M, Zhang H M, Cheng J L. Effects of haze particles and fog droplets on NLOS ultraviolet communication channels[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23259-23269.

[17] Wang P, Zhang H M, Xu Z Y. Simplified model and experimental validation for ultraviolet single-scattering channels [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(8): 080603.

[18] Liao L C, Drost R J, Li Z N, et al. Long-distance non-line-of-sight ultraviolet communication channel analysis: experimentation and modelling [J]. IET Optoelectronics, 2015, 9(5): 223-231.

[19] Raptis N, Pikasis E, Syvridis D. Power losses in diffuse ultraviolet optical communications channels [J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4421-4424.

[20] Hu W X, Zhang M, Han D H, et al. Research on channel-related polar code with an optimum code length for wireless ultraviolet communications[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28630-28642.

[21] Song P, Wan J F, Chen C, et al. Effects of fog and haze on ultraviolet communication [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(5): 0506004.
宋鹏, 万杰峰, 陈冲, 等. 雾霾天气对紫外光通信的影响[J]. 光子学报, 2018, 47(5): 0506004.

[22] Zhao T F, Leng Y X, Zhao S T, et al. Research on ultraviolet scattering characteristics of haze particles [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(3): 837-843.
赵太飞, 冷昱欣, 赵思婷, 等. 雾霾粒子的紫外光散射特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(3): 837-843.

[23] Wu T F, Ma J S, Su P, et al. Modeling of short-range ultraviolet communication channel based on spherical coordinate system [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(2): 242-245.

[24] Zhao T F, Leng Y X, Yang L Y, et al. Characteristics of ultraviolet light scattering by soot cluster particles [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 050103.
赵太飞, 冷昱欣, 杨黎洋, 等. 紫外光在烟尘团簇粒子中的散射特性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 050103.

[25] He H, Ke K Z, Zhao T F. Research of ultraviolet non-line-of-sight single scattering link model[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3148-3152.
何华, 柯熙政, 赵太飞. 紫外光非视距单次散射链路模型的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3148-3152.

[26] Song P, Zhou X L, Song F, et al. Riemann sum method for non-line-of-sight ultraviolet communication in noncoplanar geometry[J]. Optics Communications, 2017, 405: 400-405.

[27] Song P, Liu C, Zhao T F, et al. Research on pulse response characteristics of wireless ultraviolet communication in mobile scene[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 10670-10683.

[28] Song P, Ke X Z, Xiong Y Y, et al. Pulse broadening effect of non-line-of-sight ultraviolet in noncoplanar communication system [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1106004.
宋鹏, 柯熙政, 熊扬宇, 等. 非直视紫外光在非共面通信系统中的脉冲展宽效应[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1106004.