

空对地链路日盲紫外光单次散射信道建模与通信性能分析

赵太飞^{1,2,3}, 刘佳辰^{1,3}

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学光子功率器件与放电调控陕西省高等学校重点实验室, 陕西 西安 710048;

3. 西安市无线光通信与网络研究重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了研究不同收发端配置对空对地链路日盲紫外光通信性能的影响, 解决传统蒙特卡罗方法计算效率低的问题, 首先针对发射端在空中垂直向下、接收端在地面的空对地链路场景进行建模, 依据单次散射理论利用三重积分方法计算公共散射体体积得到非视距链路下单次散射的路径损耗, 并推导三重积分上下限。计算机仿真结果表明, 不同收发端配置时三重积分方法与MC模拟方法的路径损耗均方根误差最大不超过1.7 dB, 路径损耗的2D分布与蒙特卡罗方法具有较好的一致性, 三重积分方法的计算时间较MC提高了50%以上。此外, 得到了路径损耗最低点所对应的收发端水平距离; 针对使用OOK调制的空对地链路紫外通信应用, 低于 10^{-5} 和 10^{-3} 误码率时的路径损耗应分别不高于105 dB和110 dB, 且最优的通信速率不大于60 kbit/s, 最后给出了空对地链路不同收发端配置的一些建议。

关键词: 空对地链路; 紫外光通信; 光散射; 误码率

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025191

Modeling and performance analysis of ultraviolet single-scattering channels for solar air-to-ground communication links

ZHAO Taifei^{1,2,3}, LIU Jiachen^{1,3}

1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. Shaanxi University Key Laboratory of Photonic Power Devices and Discharge Regulation, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

3. Xi'an Key Laboratory of Wireless Optical Communication and Network Research, Xi'an 710048, China

Abstract: To study how transceiver configuration influences NLOS UV air-to-ground links and bypass the slow Monte-Carlo approach, an airborne transmitter pointing straight down and a ground-level receiver was modeled. Single-scatter theory expressed the common scattering volume as a triple integral whose limits were derived analytically. Tests show the integral predicts path loss within 1.7 dB RMSE of MC, matches the two-dimensional loss map, and reduces computation time by roughly half. The horizontal separation that minimizes loss is reported. For on-off-keyed links, a bit-error-rate of 10^{-5} demands path loss no higher than 105 dB, 10^{-3} allows 110 dB, and the best rate stays below 60 kbit/s. Practical setup recommendations are included.

Keywords: air-to-ground link, ultraviolet optical communication, light scattering, BER

收稿日期: 2025-05-28; 修回日期: 2025-09-08

通信作者: 赵太飞, zhaotaifei@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61971345); 陕西省重点研发计划一般项目(No.2021GY-044); 西安市科技计划基金资助项目(No.23GXFW0060)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61971345), Shaanxi Province Key Research and Development Program General Project (No.2021GY-044), Xi'an Science and Technology Plan Project (No.23GXFW0060)

0 引言

近年来,各种小型无人机、直升机和其他飞行器越来越受欢迎,这些飞行器具有多种优势,包括灵活性高、视野开阔、不受地形限制等^[1-2]。空对地紫外光通信场景如图1所示,使用飞行器实现空对地协同并执行各种任务将大大提高作业效率。“日盲”频段的紫外信号具有多种优势,包括抗干扰、全天候能力和非视距(NLOS, non-line-of-sight)性能^[3-5]。由于大气对紫外光信号强烈的吸收作用,利用紫外光进行信息交换的链路可以保持较高的安全性^[6]。近地低空的太阳背景辐射被大气臭氧层吸收,导致紫外通信链路的背景噪声较低^[7-9]。因此,近地低空链路中的紫外光通信为电磁屏蔽场景中的军事通信以及电磁敏感环境中的民用通信提供了可行的选择^[10]。

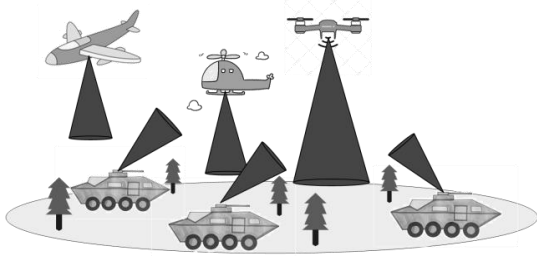


图1 空对地紫外光通信场景

针对紫外光通信信道的研究已成为一个重要的研究领域^[11-13]。蒙特卡罗(MC, Monte Carlo)模拟方法^[14]最初是为地面发射和接收场景开发的,该方法很好地模拟了不同收发端配置情况下的紫外散射信道,但计算复杂度高。在此方法的基础上,文献[15-16]详细分析了地面点对点模型中非共面单次散射的公共散射体积分上下限的范围,保证精度的同时进一步降低了计算复杂度。另外,通过遍历散射微元来计算路径损耗的方法也被提出^[17],但遍历过程的计算复杂度依旧较高。文献[18]针对小角度的发射端提出了一种地面短距离的紫外点对点通信路径损耗的计算方法,该方法对大角度发光二极管(LED, light emitting diode)普适性较差;除了积分方法,研究地面点对点的共面和非共面路径损耗的闭合表达式将快速得到路径损耗^[19-20],但精度较差且需要满足近似条件。文献[21]研究了MC方法中的二阶和三阶散射,提出了使用积分方法近似计算。文献[22]系统

阐述了紫外通信系统传输模型,包括所提出的非共面单次散射积分方法。

以上研究都是基于地面场景中的共面或非共面情况。在空对地链路场景中,文献[23]提出了一种空对地链路通信模型,其中发射端由无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)携带并水平朝向前方飞行,接收器垂直放置在地面上,该研究分析了所提模型的通信性能,但该模型不能灵活配置,大大限制了其应用场景。文献[24]研究了紫外通信中继无人机的部署问题以最大化信道容量,所提模型与文献[23]的模型类似,进行了最优无人机位置部署和信道容量优化,但模型的灵活配置问题依旧受到限制。此外,文献[25]讨论了应用于地对空场景考虑紫外光通信网络中的连接性分析和用户接入设计的影响因素,为空对地组网提供了解决思路,但作者考虑使用复杂的MC方法得到非视距紫外路径损耗,这将使系统实时性受到限制。文献[26]解决了空对地环境中存在障碍物时的紫外反射问题,以及发射端和接收器之间的高度差异问题,并使用经典障碍物反射理论分析空对地环境的紫外光通信性能,提供了较为全面的理论推导,更符合实际应用场景。针对紫外通信方案,近年来的研究包括大视场1.1 km的紫外阵列LED通信^[27],其采用开关键控(OOK, on-off keying)调制,最高实现了1.25 Mbit/s数据传输速率;基于墙面反射的NLOS紫外光通信实时音频传输系统^[28],实现了围绕障碍物的清晰稳定的实时音频传输;在光子计数域中运行的基于LED的NLOS通信系统^[29],采用4脉冲相位调制,实现了71.4 kbit/s的数据传输速率;演示视距(LOS, line-of-sight)紫外通信系统^[30],采用OKK调制实现大发散角1 km的紫外通信;大角度的非视距紫外通信^[31]采用OOK调制实现仰角为85°时,误码率(BER, bit error rate)为 10^{-3} ,仰角为50°时,误码率为 10^{-5} 的非视距紫外通信系统。此外,还有对紫外反射辅助通信的研究^[32-33]。

1 系统模型

非视距空对地链路可以分为发射端覆盖内的非视距链路和发射端覆盖外的非视距链路。在本文中仅考虑非视距模型不考虑接收端垂直朝上时的视距链路。

1.1 发射端覆盖内的非视距链路

当接收端靠近发射端时,它会落在发射端的光束覆盖范围内,模型如图2所示,位于原点处的接

收端表示为 R_x , 具有接收视场角 ϕ_R 和仰角 θ_R , 指向 x 轴正方向。位于 (x_0, y_0, h) 处的发射端标记为 T_x , 其垂直光束发散角定义为 ϕ_T 。视距覆盖范围是一个圆, 其半径 $d_{\text{cov_max}} = \frac{\tan(\frac{\phi_T}{2})}{h}$ 。

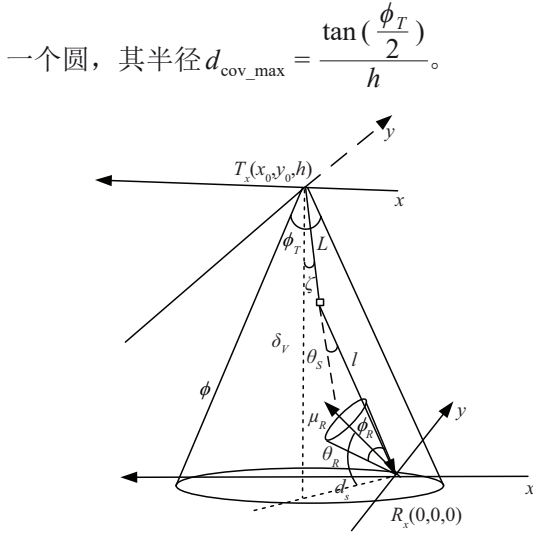


图2 发射端覆盖内的非视距链路模型

采用计算公共散射体的方法计算单次散射的接收能量^[16-17]为

$$E_r = \int_V \frac{P_t A_r k_s P(\cos(\theta_s)) \cos(\zeta)}{\Omega^2 L^2} e^{-k_e(l+L)} \delta V \quad (1)$$

其中, P_t 为发射功率, δV 对应图2中散射体的积分微元, l 为散射点 δV 到接收器 R_x 的距离, L 为散射点 δV 到发射端 T_x 的距离, θ_s 为 T_x 到散射点 δV 的矢量与散射点 δV 到 R_x 的矢量之间的夹角, ζ 为 T_x 到散射点 δV 的矢量与 T_x 方向轴 $[0, 0, -1]$ 的夹角, $P(u)$ 为散射相函数^[34], 表示为

$$P_{\text{ray}}(\mu) = \frac{3[1 + 3\gamma + (1 - \gamma)\mu^2]}{16\pi(1 + 2\gamma)} \quad (2)$$

$$P_{\text{mic}}(\mu) = \frac{1 - g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1 + g^2 - 2g\mu)^{\frac{3}{2}}} + f \frac{0.5(3\mu^2 - 1)}{(1 + g^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (3)$$

总的散射相函数为

$$P(\mu) = \frac{k_{s,r}}{k_s} P_{\text{ray}}(\mu) + \frac{k_{s,m}}{k_s} P_{\text{mic}}(\mu) \quad (4)$$

其中, $k_e = k_s + k_a$ 为消光系数, $k_s = k_{s,r} + k_{s,m}$ 为散射系数, $k_{s,r}$ 和 $k_{s,m}$ 分别为瑞利散射系数和米散射系数, k_a 为吸收系数, 本文不考虑湍流的影响。 γ 是由去极化因子确定的参数, g 和 f 是 2 个可调参数, 当 $g=0.5$, $f=0.72$ 时, 式(1)与通过 Mie 理论获得的紫外相位函数非常接近^[35]。 $\Omega = 2\pi[1 - \frac{\cos\phi_T}{2}]$, 根据

球坐标系, 空间中任意一点均可以采用 $s = (l \sin \theta \cos \psi, l \sin \theta \sin \psi, l \cos \theta)$ 表示, $\delta V = \sin \theta d\theta d\psi dl$, 则式(1)可以改写为

$$E_r = \iiint \frac{P_t A_r k_s P(\cos(\theta_s)) \cos(\zeta) \sin(\theta)}{\Omega L^2} e^{-k_e(l+L)} dl d\psi d\theta \quad (5)$$

可以看出, 该积分变量是 (θ, ψ, l) , 因此根据图2中的几何关系, 可以得出参数 L 、 $\cos \theta_s$ 和 $\cos \zeta$ 关于积分变量的表达式, 分别表示为

$$L = (l^2 + d_s^2 - (2x_0 l \sin \theta \cos \psi) - (2y_0 l \sin \theta \sin \psi) - (2lh \cos \theta) + h^2)^{-1} \quad (6)$$

$$\cos \theta_s = \frac{x_0 \sin \theta \cos \psi + y_0 \sin \theta \sin \psi + h \cos \theta - l}{L} \quad (7)$$

$$\cos \zeta = \frac{h - l \cos \theta}{L} \quad (8)$$

接下来, 分析 (θ, ψ, l) 的积分上下限, 在发射端覆盖内的非视距链路, θ, ψ 的积分上下限表示为

$$\theta_{\min} = \frac{\pi - \theta_R - \phi_R}{2}, \theta_{\max} = \frac{\pi - \theta_R + \phi_R}{2} \quad (9)$$

$$\psi_{\min} = -\frac{\phi_R}{2}, \psi_{\max} = \frac{\phi_R}{2} \quad (10)$$

l 是任意 θ, ψ 时对应的长度, 由于接收端在发射端覆盖范围内, l 的积分下限为 0, 积分上限可以通过将 s 点带入发射端锥体光束方程求解得到。

$$\cos\left(\frac{\phi_T}{2}\right) = \frac{(h - z)}{\sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (h - z)^2}} \quad (11)$$

1.2 发射端覆盖外的非视距链路

图3为发射端覆盖外的非视距链路散射模型, 依旧可以使用式(1)计算得到接收端能量 E_r , 需要注意的是, δV 对应图3中散射体的积分微元, l 表示任意一条散射光线从接收器 R_x 到与接收锥面交点 A 或 B 的距离, L 表示散射点 δV 到发射端 T_x 的距离, 其他变量表述与图2一致, 其余参数 L 、 $\cos \theta_s$ 和 $\cos \zeta$ 关于积分变量的表达式与式(6)~式(8)一致。

为了计算接收端能量 E_r , 需要得到 (θ, ψ, l) 的积分上下限。

1) θ 的范围计算

θ 定义为任何散射光线与 z 轴的角度, 如图3所示, 该角度范围为 $\theta \in \left[\theta_{\min} = \frac{\pi}{2} - \theta_R - \frac{\phi_R}{2}, \theta_{\max} = \frac{\pi}{2} - \theta_R + \frac{\phi_R}{2} \right]$ 。假设发射端始终位于地面之上, 即 $\theta_{\max} <$

$\frac{\pi}{2}$ 。随着发射端 T_x 和接收端 R_x 之间水平距离 d_s 的增加, 如图 3 中的场景 2 和场景 3 所示, θ_{\min} 逐渐接近 $\tan^{-1}(\frac{d_s}{h})$, 为了确保单次散射的有效性, 需要 $d_{s_max} \leq h \tan \theta_{max}$, 这也是单次散射的水平极限距离。

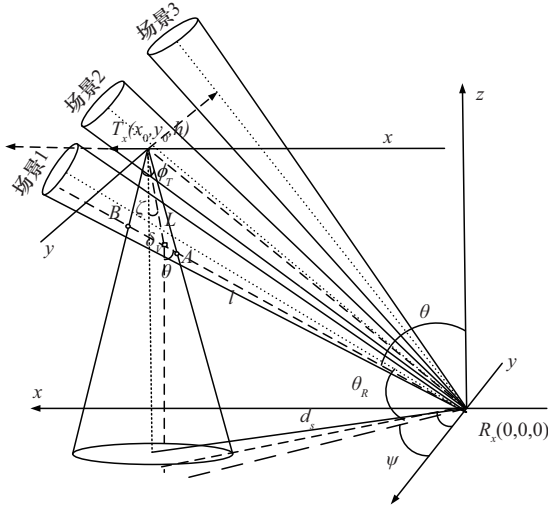


图 3 发射端覆盖外的非视距链路散射模型

2) ψ 的范围计算

在角度 θ 时接收端的横截面可以近似为一个圆形, 其半径为发射端与接收端的水平距离 d_s , 该横截面圆 S_1 可以表示为

$$d_s^2 = x_0^2 + y_0^2 \quad (12)$$

发射端在角度 θ 处的横截面圆 S_2 , 其方程式为

$$\left[\tan\left(\frac{\phi_T}{2}\right)\left(h - \frac{d_s}{\tan(\theta)}\right) \right]^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (13)$$

根据式(12)和式(13), 找到在 θ 处 2 个圆的交点 $\kappa_1(x_1, y_1)$ 和 $\kappa_2(x_2, y_2)$, ψ 的范围表示为 $+\psi = \arctan\left(\frac{x_1}{y_1}\right)$, $-\psi = \arctan\left(\frac{x_2}{y_2}\right)$ 。

此外, ψ 也将受到接收视场角的限制, 接收端视场角最大为 ϕ_R , ψ 不能大于 ϕ_R , 即 $+\psi_{max} \leq \frac{\phi_R}{2}$, $-\psi$ 也受到同样的限制。

3) l 的范围计算

如图 3 所示, 长度 l 的范围是从交点 A 到交点 B 的距离。交点 A 和 B 位于发射端锥体光束的任意横截面圆上。此外, 这些交点也在接收视场内, 将 s 代入发射端锥体光束方程式(11), 能够推导出关于 l 的一元二次方程, 如式(14)所示。

$$al^2 + bl + c = 0 \quad (14)$$

其中, $a = \cos^2\left(\frac{\phi_T}{2}\right) - \cos^2\theta$, $b = 2h \cos\theta - \cos^2\left(\frac{\phi_T}{2}\right) \cdot (2x_0 \sin\theta \cos\psi + 2y_0 \sin\theta \sin\psi + 2h \cos\theta)$, $c = \cos^2\left(\frac{\phi_T}{2}\right) \cdot (x_0^2 + y_0^2 + h^2) - h^2$ 。

使用求根公式, 得到 2 个根 l_{\min} 和 l_{\max} , 他们分别对应接收器 R_x 到交点 A 和 B 的距离, 至此可以使用本文所分析的积分上下限计算得到非视距空地对地链路紫外光路径损耗。

图 4 给出了三重积分算法流程, 收发端输入相关配置参数后, 若接收端位置在发射端覆盖范围内, 则直接使用式(8)和式(9)得到 θ 和 ψ , 否则需要判断收发端位置是否处于图 3 中场景 2 状态, 若处于 θ_{\min} 则使用 $\tan^{-1}(\frac{d_s}{h})$ 计算, 否则 θ 使用式(8)计算, 之后对于任意的 θ 所对应的 ψ 使用式(12)和式(13)计算后判断其是否符合接收视场的条件。针对任意的 θ 和 ψ , 根据式(14)计算长度 l_{\min} 和 l_{\max} , 若 $l_{\min} > l_{\max}$ 或 $l_{\max} < 0$ 则不符合接收现场条件, 由于长度不能小于 0, 所以若 $l_{\min} < 0$ 则 l_{\min} 设置为 0。最后根据式(1)和式(6)~式(8)计算接收端能量。

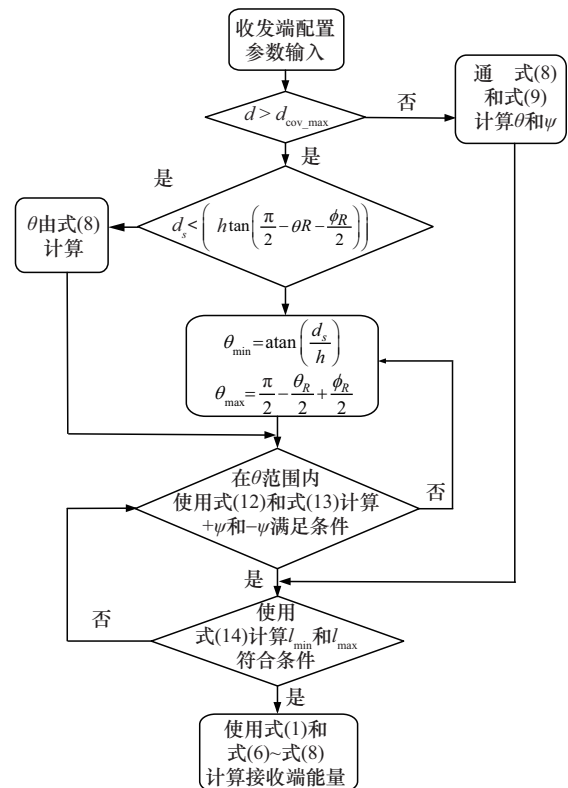


图 4 三重积分算法流程

2 仿真分析

本节分析了不同收发端配置参数对空对地链路紫外光非视距单次散射路径损耗的影响,具体仿真参数^[14]如表 1 所示,路径损耗的计算式为

$$PL = -10\lg\left(\frac{E_r}{P_t}\right) \quad (15)$$

表 1 仿真参数设置	
参数	值
P_t/mW	100
A_r/cm^2	1
$k_{s,j}/\text{km}^{-1}$	0.266
$k_{s,m}/\text{km}^{-1}$	0.284
k_d/km^{-1}	0.802
γ	0.017
f	0.5
g	0.72

2.1 不同接收仰角 θ_R 的影响

图 5 表示接收端 θ_R 在 $(30^\circ, 45^\circ, 60^\circ)$ 时对路径损耗的影响,此时收发端配置 (ϕ_T, ϕ_R, h, y_0) 的参数为 $(60^\circ, 30^\circ, 50 \text{ m}, 0)$,横坐标表示 x_0 。本文所提三重积分方法(即单次散射(SC, single scattering))与 MC 方法在不同 θ_R 时的均方根误差(RMSE, root mean square error)分别为 0.61 dB、0.84 dB 和 1.77 dB,与 MC 方法具有较好的一致性。此外,路径损耗随 x_0 的增大存在先减小后增大的趋势,对比分析图 2 和图 3 可以看出, x_0 的增大使接收端更能与发射端对准,其路径损耗最小点所对应的收发端水平距离 $x_{\text{PL}_{\min}}$ 大致为 $x_{\text{PL}_{\min}} = \frac{h}{\tan(\theta_R + \frac{\phi_R}{2})}$ 。

这也是图 3 中从场景 1 向场景 2 转变时 x_0 的值,需要注意的是,一旦 x_0 超过 $x_{\text{PL}_{\min}}$ 后, θ_R 越大路径损耗增大越快,单次散射的水平极限距离 $d_{s,\text{max}}$ 越小,因此大 θ_R 更适用于短距离应用,长距离应用时应尽量减小 θ_R 。

图 6 为发射端不同高度 h 对路径损耗的影响,此时收发端配置 $(\phi_T, \phi_R, \theta_R, y_0)$ 的参数为 $(60^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 0)$,横坐标表示 x_0 。本文方法与 MC 方法在不同高度时的 RMSE 分别为 0.74 dB、0.84 dB 和

0.81 dB,2 种方法的一致性较好。在收发端水平距离 x_0 不超过 $x_{\text{PL}_{\min}}$ 时,高度越高,路径损耗越大,但其水平极限距离 $d_{s,\text{max}}$ 也越大,在实际应用过程中应权衡发射端高度与收发端水平距离。

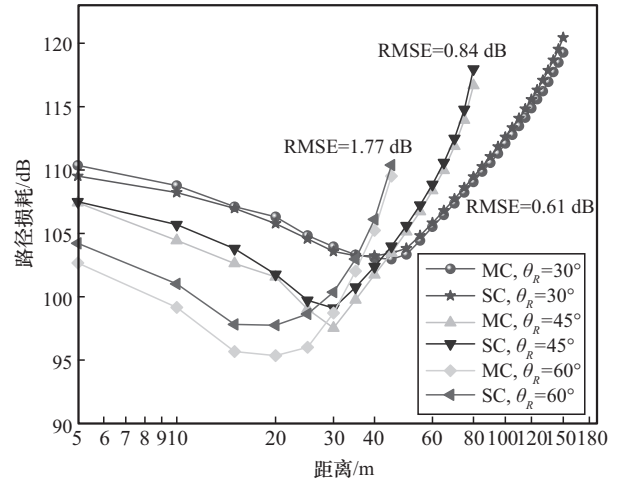


图 5 接收端不同 θ_R 对路径损耗的影响

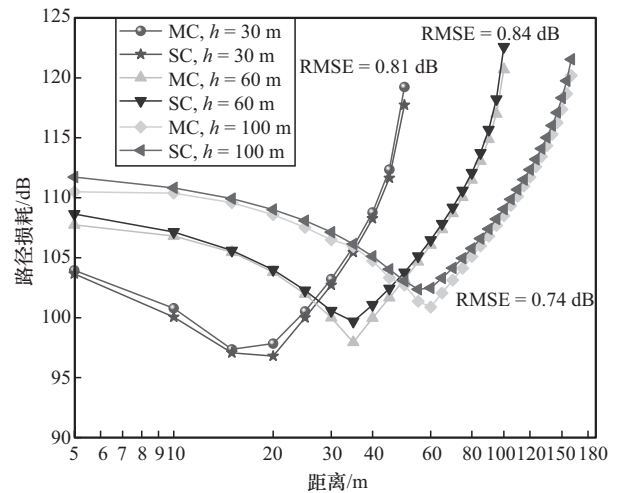


图 6 发射端不同高度 h 对路径损耗的影响

图 7 和图 8 展示了在不同发射端发散角和接收端视场角对路径损耗的影响,此时收发端配置 (h, θ_R, y_0) 的参数为 $(50 \text{ m}, 45^\circ, 0)$,横坐标表示 x_0 。图 7 中 $\phi_R = 30^\circ$,可以看出,当收发端水平距离 $x_0 < x_{\text{PL}_{\min}}$ 时,发射光束角 ϕ_T 越小,路径损耗越小,这是因为大光束角导致能量发散使路径损耗变大;当 $x_0 > x_{\text{PL}_{\min}}$ 时,路径损耗与发散角基本无关,这是由于从场景 1 向场景 2 转变后,公共散射体受 x_0 的变大急剧减小,大发散角对公共散射体的贡献微乎其微。图 8 中 $\phi_T = 30^\circ$,可以看出,接收视场角 ϕ_R 越小,其路径损耗越大,虽然路径

损耗受到场景 1 向场景 2 转变的影响，总体来看大视场拥有最小的路径损耗且有最大的水平极限距离 $d_{s,max}$ ，但实际应用中仍要考虑设备体积、造价等多方面影响因素。

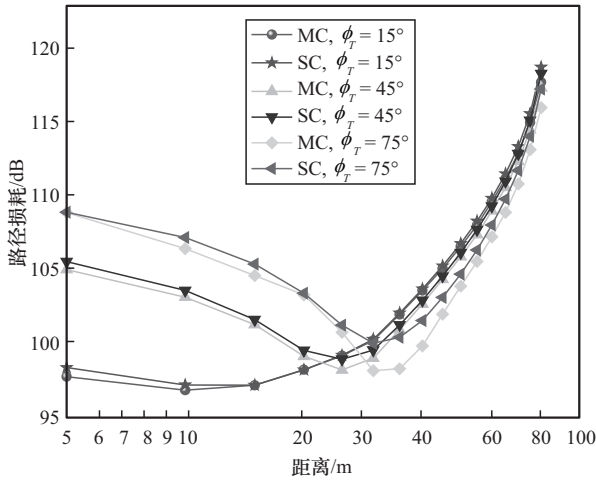


图 7 发射端不同 ϕ_T 对路径损耗的影响

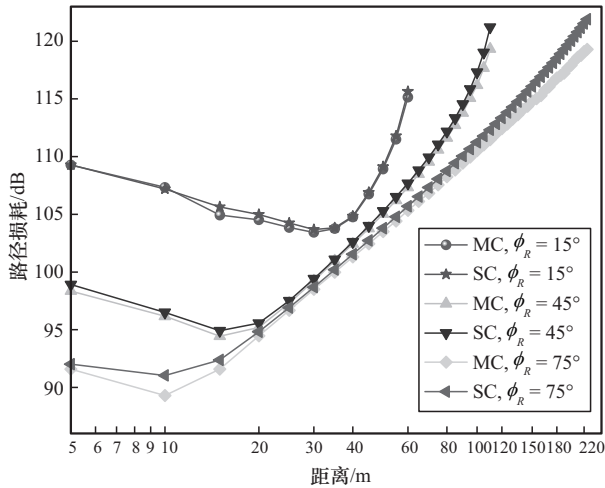


图 8 接收端不同 ϕ_R 对路径损耗的影响

图 9 和图 10 分别为 MC 方法和三重积分方法的 2D 路径损耗分布图，此时收发端配置 $(\phi_T, \phi_R, \theta_R, h)$ 的参数为 $(60^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 50 \text{ m})$ ，白色网格部分表示单次散射不能探测到的位置，只能通过二阶或更高阶散射才能到达，对比图 9 和图 10 可以看出，三重积分方法与 MC 方法计算的路径损耗分布基本相同，尤其是针对 120 dB 以下的路径损耗范围，这表明三重积分方法在 y_0 不同时仍能保持较好的计算鲁棒性。另外，随着 y_0 增大，收发端公共散射体迅速减小甚至消失，导致路径损耗呈现出急剧上升趋势。针对 105 dB， y_0 可移动

的范围约为 10 m；针对 110 dB， y_0 可移动的范围约为 15 m。

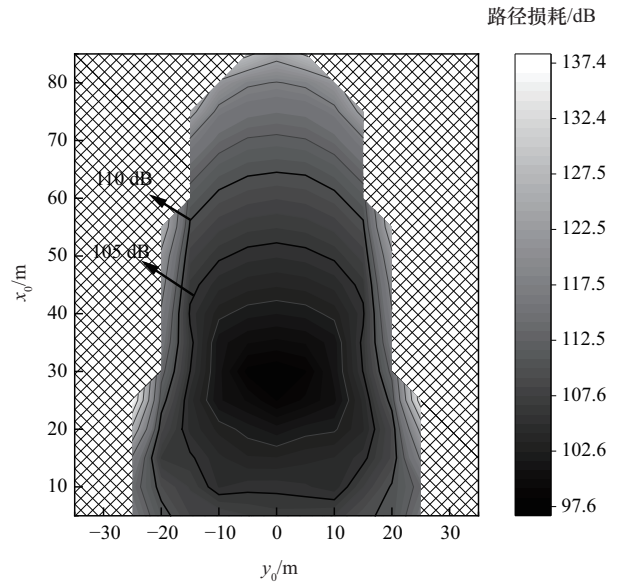


图 9 MC 方法的 2D 路径损耗分布

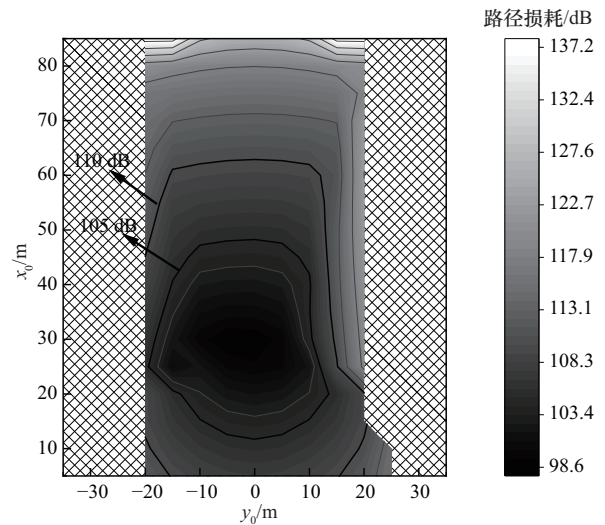


图 10 三重积分方法的 2D 路径损耗分布

2.2 空对地非视距链路通信性能分析

假设使用 OOK 调制，采用光子计数法在接收端接收到的信号光子数量为^[16]

$$\lambda_s = \frac{P_t P_{\text{loss}} \eta_f \eta_r c}{R h_s \lambda} \quad (16)$$

其中， P_t 表示发射端的功率， P_{loss} 表示通信链路路径损耗， η_f 表示滤波器效率， η_r 表示倍增管的量子检测效率， R 表示信号传输速率， c 表示光速， λ 表示波长， h_s 表示普朗克常数。假设太阳背景中的噪

声光子计数率为单位时间内检测到的噪声光子个数, 记为 λ_b , 可以得到最佳光子检测阈值 m_T 如式(17)所示, 接收端光子分布服从离散泊松分布^[36], BER 如式(18)所示^[20,29]。

$$m_T = \frac{\lambda_s}{\ln(1 + \frac{\lambda_s}{\lambda_b})} \quad (17)$$

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{m_T} \frac{(\lambda_s + \lambda_b)^k \exp(-(\lambda_s + \lambda_b))}{k!} + \frac{1}{2} \sum_{k=m_T+1}^{\infty} \frac{(\lambda_b)^k \exp(-\lambda_b)}{k!} \quad (18)$$

紫外非视距单次散射误码率仿真参数如表 2 所示。

表 2 误码率仿真参数	
参数	值
P/mW	100
η_f	0.3
η_r	0.3
λ/nm	260
$\{\phi_T, \phi_R, \varphi\}$	$\{10^\circ, 30^\circ, 0^\circ\}$
$\lambda_b/(\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1})$	5
h_s	6.626×10^{-34}
$c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3×10^8

图 11 为不同收发端配置条件下的非视距紫外光通信误码率与水平距离的关系, 发散角 ϕ_T 为 60° , 设置信号传输速率 R 为 10 kbit/s, 10^{-5} 和 10^{-3} 分别表示文本通信和语音通信时的极限误码率, 从图中可以看出误码率的变化呈现出与路径损耗相似的变化趋势, 即最小路径损耗位置拥有最低的误码率, 当收发端水平距离 $x_0 < x_{\text{PL_min}}$ 时, θ_R 和 ϕ_R 变大能够显著降低误码率, 发射端高度变大会使误码率变高; 当 $x_0 > x_{\text{PL_min}}$ 时, θ_R 越大, 误码率随 x_0 的变大急剧升高, 发射端高度越小, 误码率随 x_0 的变大而快速升高。此外, 在 $x_{\text{PL_min}}$ 处, 图 11 中的所有收发端配置能满足文本通信的误码率要求, 通过对比路径损耗, 文本通信时的极限误码率 10^{-5} 所对应的路径损耗阈值不超过 105 dB, 语音通信时的极限误码率 10^{-3} 所对应的路径损耗阈值不超过 110 dB。

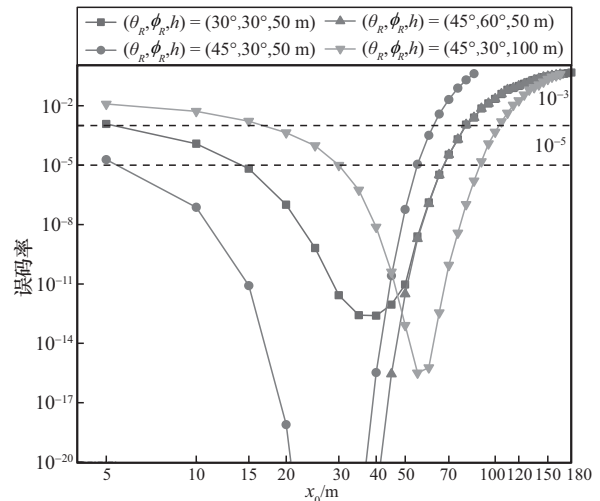


图 11 不同收发端配置紫外光通信误码率与水平距离的关系

图 12 为不同收发端配置条件下的非视距紫外光通信误码率与通信速率的关系, 设置收发端水平距离为 x_0 为 50 m, 根据图 11 可知, 10 kbit/s 通信速率误码率均在 10^{-5} 以下, 增加通信速率使误码率逐步升高, 且不同收发端配置对误码率的影响减小, 在保证语音通信的条件下, 图示收发端所有配置的最优通信速率不超过 60 kbit/s。

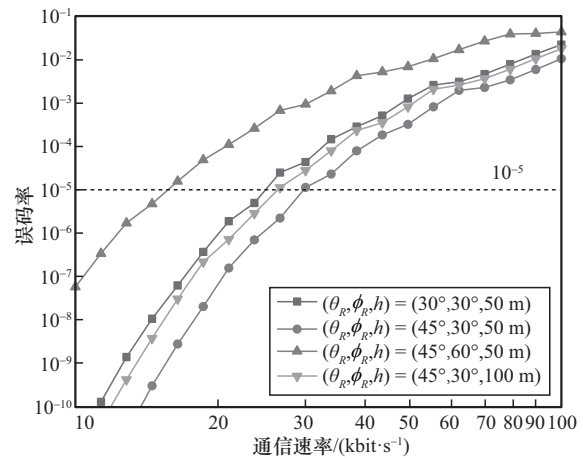


图 12 不同收发端配置紫外光通信误码率与通信速率的关系

2.3 计算时间

为了评估本文方法的计算效率, 比较了 MC 方法和三重积分方法之间的计算时间, 所有模拟实验在 3.4 GHz CPU 和 32 GB RAM 的台式计算机上使用 Matlab R2023a 取 10 次计算时间平均后得到的, MC 方法中的光子数设置为 $N = 10^6$, 具体参数设置 $(h, \phi_T, \varphi, \phi_R, \theta_R, A_r, d_s)$ 分别取 $(50 \text{ m}, 10^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 30^\circ,$

1 cm², 100 m), MC 方法的计算时间为 14.71 s, 三重积分方法的计算时间为 6.07 s, 相较于 MC 方法, 本文方法在计算时间方面提高了 58%。通过改变其他参数, 如 d_s 、 h 等, 本文方法在计算时间方面依旧提高了 50% 以上。

3 结束语

在本文中, 根据推导的紫外光非视距链路三重积分上下限, 分析了不同收发端配置对非视距空地链路紫外光路径损耗的影响, 找出不同收发端配置时路径损耗最低点所对应的收发端水平距离 x_{PL_min} , 当收发端水平距离较近时, 增大接收端仰角和视场角能够更好地与发射端对准, 减小发射端发散角和高度能够更好地将光能量集中, 使路径损耗更小。如果要进行远距离应用, 接收端仰角和发射端高度应尽可能大, 保证收发端存在公共散射体, 更大的接收端视场能够获得更多的紫外光能量, 但其设计体积更大和成本更昂贵, 故在实际应用时应当进行权衡。此外, 接收端与发射端应尽量在一条水平直线上, 较大的偏转使公共散射体迅速减小甚至消失, 除了收发端配置, 增大接收孔径面积、增大发射光功率也能有效减小路径损耗。最后分析了 OOK 调制时的空对地链路紫外光非视距误码率情况, 对于文本通信时的极限误码率 10^{-5} 所对应的路径损耗不能超过 105 dB, 语音通信时的极限误码率 10^{-3} 所对应的路径损耗不能超过 110 dB, 最优的通信速率不超过 60 kbit/s。本文为空对地链路的紫外光通信提供了有价值的理论参考。未来的工作可以集中在优化空对地网络覆盖范围上。

参考文献:

- [1] CHEN G Z, WU T F, YANG F, et al. Ultraviolet-based UAV swarm communications: potentials and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(5): 84-90.
- [2] FAN B K, LI Y, ZHANG R Y, et al. Review on the technological development and application of UAV systems[J]. Chinese Journal of Electronics, 2020, 29(2): 199-207.
- [3] XU Z Y, SADLER B M. Ultraviolet communications: potential and state-of-the-art[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(5): 67-73.
- [4] YUAN R Z, MA J S. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. China Communications, 2016, 13(6): 63-75.
- [5] DROST R J, SADLER B M. Survey of ultraviolet non-line-of-sight communications[J]. Semiconductor Science and Technology, 2014, 29(8): 084006.
- [6] WEISMAN M J, DAGEFU F T, MOORE T J, et al. Analysis of the low-probability-of-detection characteristics of ultraviolet communications[J]. Optics Express, 2020, 28(16): 23640-23651.
- [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.
PENG M G, YUAN R Z, WANG Z F, et al. Ultraviolet communication: principle, techniques, and prospects[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(3): 13-18.
- [8] WANG L N, BAI M M, QI Z Q, et al. Full-duplex wireless deep ultraviolet light communication[J]. Optics Letters, 2022, 47(19): 5064-5067.
- [9] ARDAKANI M H, HEIDARPOUR A R, UYSAL M. Performance analysis of relay-assisted NLOS ultraviolet communications over turbulence channels[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(1): 109-118.
- [10] LI C, XU Z Y, WANG J Y, et al. Ultraviolet network coverage based on non-line-of-sight channel[J]. IEEE Photonics Journal, 2024, 16(1): 7300810.
- [11] DING H P, CHEN G, MAJUMDAR A K, et al. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 1535-1544.
- [12] DROST R J, MOORE T J, SADLER B M. UV communications channel modeling incorporating multiple scattering interactions[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(4): 686-695.
- [13] 张颖, 王沸钢, 何华, 等. 紫外光非直视通信研究进展[J]. 光通信研究, 2024(2): 125-134.
ZHANG Y, WANG F G, HE H, et al. Research progress of ultraviolet non-direct communication[J]. Study on Optical Communications, 2024(2): 125-134.
- [14] YUAN R Z, MA J S, 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.
- [15] 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.
- [16] WANG L J, XU Z Y, SADLER B M. Non-line-of-sight ultraviolet link loss in noncoplanar geometry[J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1263-1265.
- [17] 宋鹏, 苏彩霞, 赵太飞, 等. 基于遍历微小单元法非直视非共面紫外光通信信道容量分析[J]. 通信学报, 2019, 40(5): 144-152.
SONG P, SU C X, ZHAO T F, et al. Channel capacity analysis of non-line-of-sight ultraviolet communication in noncoplanar geometry based on traversing tiny unit method[J]. Journal on Communications, 2019, 40(5): 144-152.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] ZUO Y, XIAO H F, ZHANG W B, et al. Approximate performance study of non-line-of-sight ultraviolet communication links in noncoplanar geometry[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Communications and Networking in China. Piscataway: IEEE Press, 2012: 296-300.
- [21] YUAN R Z, MA J S, 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.
- [22] 肖后飞. 紫外光通信系统传输模型研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014: 3-4, 129-130.
- XIAO H F. Study on propagation models of ultraviolet communication systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014: 3-4, 129-130.
- [23] TADAYYONI H, UYSAL M. Ultraviolet communications for ground-to-air links[C]//*Proceedings of the 2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [24] 孙磊, 龚晨, 王超, 等. 紫外通信中继无人机部署位置分析与优化[J]. *光通信研究*, 2024: 1-10.
- SUN L, GONG C, WANG C, et al. Analysis and optimization of deployment position of relay UAV in ultraviolet relay communication[J]. *Study on Optical Communications*, 2024: 1-10.
- [25] SUN L, GONG C, XU Z Y. Connectivity analysis and user access design of ground-to-air ultraviolet communication networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2024, 16(10): 1006-1017.
- [26] WU T F, YANG F, SONG J, et al. Modeling of UV diffused-LOS communication channel incorporating obstacle and its applicability analysis[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(18): 4578-4581.
- [27] WANG S S, LI Z X, XU Z Y, et al. A large FoV UV LED array transmitter enabling optical wireless communication over 1.1 km[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2025, 37(10): 563-566.
- [28] CHEN Z Y, TANG X K, WEI Z X, et al. Real-time audio transmission system using NLOS UV communication based on wall reflections[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE 15th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 177-181.
- [29] HE N, SHAN T, CHENG J L. Demonstration of a 900m non-line-of-sight UV communication system using an LED array[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 132-137.
- [30] WANG M Y, CAO T, CHEN S H, et al. A 1 km line-of-sight ultraviolet communication system with a data rate of 26.6kbps[C]//*Proceedings of the 2023 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 394-397.
- [31] DU A X, WANG Y H, ZHANG J, et al. Implementation of large angle low error non-line-of-sight ultraviolet communication system[J]. *Optics Communications*, 2024, 558: 130227.
- [32] KUROSAWA H, TSUZUKI S, TANIGUCHI M, et al. Solar-blind optical wireless communications over 80 meters using a 265-nm high-power single-chip DUV-LED over 500 mW in sunlight[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, 15(3): 7302605.
- [33] WU T F, YANG F, CAO T, et al. Modeling of UV NLoS communication channels: from atmospheric scattering and obstacle reflection perspectives[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2025, 43(5): 1590-1606.
- [34] LIU J C, ZHAO T F, GAO Z Y, et al. Modeling and application of array light sources in ultraviolet communication systems[J]. *Optics Communications*, 2025, 574: 131190.
- [35] CAO T, SONG J, PAN C Y. Simplified closed-form single-scatter path loss model of non-line-of-sight ultraviolet communications in noncoplanar geometry[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2021, 57(2): 6100209.
- [36] SHAN T, HE N, CHENG J L. Standoff boundary in ultraviolet non-line-of-sight covert communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(10): 8101-8113.

[作者简介]



赵太飞 (1978-), 男, 河南浚县人, 博士, 西安理工大学教授, 主要研究方向为紫外光散射通信技术、路由技术、网络抗毁性技术、物联网技术等。



刘佳辰 (1999-), 男, 山东济南人, 西安理工大学博士生, 主要研究方向为紫外光通信和定位。