

激光与光电子学进展

无线紫外光通信干扰链路性能研究

赵太飞^{1,2*}, 马倩文¹, 赵毅¹¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;²陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710000

摘要 日盲无线紫外光系统进行通信时,若同时存在多条工作链路,则同时工作的链路会在空间中发生有效散射体的重叠,造成不同通信链路之间互相干扰,影响通信性能。本文针对典型的干扰模型建立了基于蒙特卡罗方法的无线紫外光非直视通信散射信道仿真实验,验证了该模型的正确性。并利用该模型仿真了无线紫外光通信中所存在的共面干扰、非共面干扰以及非共面且存在高度差干扰下的链路干扰模型。结果表明:影响信道误码率的因素主要有干扰端的位置以及有效散射体体积的大小;在非共面且存在高度差的干扰情况下,可以通过调整发射端仰角的大小减小链路间干扰,提高通信系统的性能。

关键词 散射; 日盲紫外光; 蒙特卡罗模型; 链路干扰; 非直视通信

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220810

Research on Performance of Wireless Ultraviolet Communication Interference Link

Zhao Taifei^{1,2*}, Ma Qianwen¹, Zhao Yi¹¹*School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;*²*Key Laboratory of Military-Civilian Joint Construction of Intelligent Collaborative Network of Shaanxi Province, Xi'an 710000, Shaanxi, China*

Abstract When solar-blind wireless ultraviolet light system is used to communicate, if multiple links are active at once, the active links will overlap with effective scatters in space, resulting in mutual interference and a reduction in communication performance. This study develops a method for simulating the wireless ultraviolet non-line-of-sight communication scattering channel and validates the model's accuracy by comparing it to a common interference model. And this model is used to simulate the co-planar interference, non-co-planar interference, and the link interference model under non-co-planar and height difference interference in wireless ultraviolet communication. The results show that the main factors affecting the bit error rate of the channel are the location of the interference terminal and the size of the effective scatterer, in the case of non-co-planar and height difference interference, the inter-link interference can be reduced by adjusting the transmitter elevation angle, and the performance of the communication system can be improved.

Key words scattering; solar blind ultraviolet light; Monte Carlo model; link interference; non-line-of-sight communication

1 引言

无线紫外光(UV)通信主要采用波长为 200~280 nm 的“日盲”无线紫外光进行通信,该波段的太阳辐射被臭氧分子强烈吸收,在近地太阳光谱中几乎没有此紫外光波段^[1],因此常用于强电磁环境下需要稳

定通信的系统中。

无线紫外光非直视(NLOS)通信中,发射端发出光信号,经过有效散射体散射传输后由接收端接收并解码^[2]。王正凤等^[3]提出了一种非共面情况下的紫外光非直视单次散射路径损耗(PL)模型,研究了非共面情况下无线紫外光的通信链路性能。Luo 等^[4]对比了

收稿日期: 2022-02-24; 修回日期: 2022-03-24; 录用日期: 2022-03-30; 网络首发日期: 2022-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(61971345)、陕西省重点研发计划一般项目(2021GY-044)、榆林市科技计划项目(2019-145)、西安市碑林区科技计划项目(GX1921)

通信作者: *DaisyM0604@163.com

数值分析法和蒙特卡罗(MC)模型仿真下的NLOS单次散射信道模型的路径损耗。马愈昭等^[5]采用蒙特卡罗法分析了单发单收(SISO)紫外光通信系统性能,并与其理论值的通信系统作对比,结果表明,通过分集接收可以有效改善雾天的紫外光通信性能。He等^[6]研究了紫外光NLOS共面链路存在中继节点的通信性能,并简单研究了链路干扰模型。宋鹏等^[7]采用遍历微元法对移动场景下的无线紫外光通信单次散射路径损耗进行仿真,通过分析收发端的几何参数以及节点相对位置变化,得到路径损耗与接收距离、收发仰角和视场角的影响。赵太飞等^[8-10]基于UV通信中同一水平面的三种干扰方式建立了基于蒙特卡罗的NLOS单次散射通信仿真模型,并合理地调整工作链路接收端的接收仰角和视场角以便更好地减小链路间干扰,提升通信系统的性能。并在此基础上研究了无线紫外光在散射湍流信道估计和MIMO通信线性注水功率分配的应用,验证了紫外光的隐秘性和稳定性。但以上文献并没有对更典型的非共面任意角度交叉链路进行深入研究,也没有考虑到可能存在高度差时的干扰模型情况。

在存在多条链路同时通信的情况下,紫外光通信系统的接收端在接收自身链路的信号时也会接收到其他链路所发出的紫外光信号,不仅占用接收端的带宽,还会降低该链路的通信质量。因此,本文研究了蜂群无人机之间可能存在的三种链路干扰模型,首先基于蒙特卡罗的无线紫外光NLOS散射模型,对比理论公式与模型仿真数据验证了该模型的正确性。进而研究共面干扰、非共面干扰以及非共面且存在高度差这三种情况下的链路性能,通过研究发射端和接收端各角度对链路路径损耗和误码率的影响,研究如何调整这些角度来减小链路间干扰。为后续研究机间尾流与大气湍流信道下的干扰情况提供理论基础。

2 基本原理

2.1 无线紫外光非直视通信

图1为无线紫外光NLOS通信模型,图中 T_x 为发送端, R_x 为接收端, ϕ_1 为发射端发散角, θ_1 为发送端仰角, ϕ_2 为接收端视场角, θ_2 为接收端仰角, V 为有效散

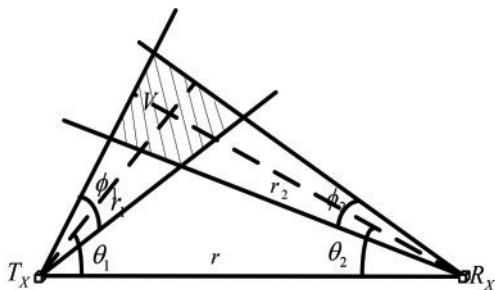


图1 紫外光NLOS链路^[11]
Fig. 1 UV NLOS link^[11]

射体, r 为发送端到接收端的距离, r_1 为发送端到有效散射的距离, r_2 为有效散射体到接收端的距离。紫外光信号由 T_x 发出,在 V 中发生散射,最终由 R_x 接收完成通信过程。

无线紫外光NLOS通信模型接收端所接收到的路径损耗的功率^[11]为

$$P_{\text{NLOS}} = \frac{P_t \cdot A_r \cdot K_s \cdot P_s \cdot \phi_2 \cdot \phi_1^2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 \cdot r \cdot \sin(\theta_1) \cdot [1 - \cos(\phi_1/2)]} \cdot \exp\left[-\frac{K_e \cdot r \cdot (\sin\theta_1 + \sin\theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}\right], \quad (1)$$

式中: P_t 为发射功率; A_r 为接收孔径面积; K_s 为散射系数; K_e 为衰减系数,其中 $K_e = K_a + K_s$, K_a 为吸收系数; P_s 为散射角 θ_s 的相函数; θ_s 为粒子在有效散射体中发生散射的角度; r 为发送端到接收端的距离。

2.2 无线紫外光干扰链路模型

无线紫外光NLOS通信共面干扰模型如图2所示,其中 T_{x1} 和 R_x 为一组共面的工作链路,工作链路的有效散射体为 V_1 , T_{x2} 为干扰链路的发射端,其与工作链路在同一平面,且与 R_x 的椎体相交于干扰散射体 V_2 ^[12-13]。

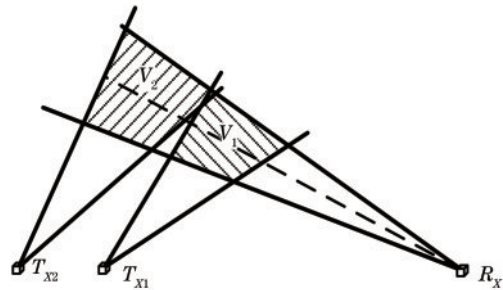


图2 NLOS通信共面干扰模型

Fig. 2 Coplanar interference model of NLOS communication

但是在实际通信中,通信节点往往是非共面的,尤其是干扰链路与工作链路基本不可能保持在同一平面,因此建立无线紫外光NLOS通信非共面干扰模型,如图3所示。

图中 T_{x1} 与 R_x 为一组共面的工作链路, T_{x2} 与 R_x

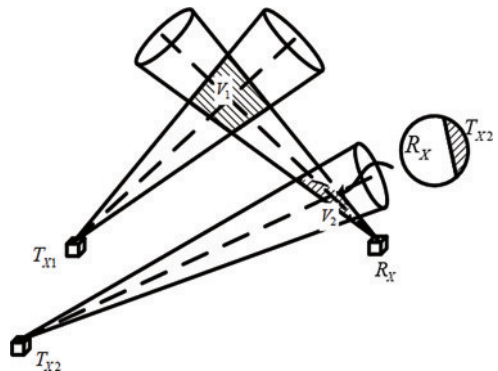


图3 NLOS通信非共面干扰模型^[8]

Fig. 3 NLOS communication non-coplanar interference model^[8]

处于非共面位置, T_{X2} 为干扰发射端, 与 R_X 的椎体相交于干扰散射体 V_2 , 图中的圆为 V_2 的截面。在此模型中, 若 T_{X1} - R_X 进行通信时 T_{X2} 也在发送信息, 且 R_X 同时处于 T_{X1} 和 T_{X2} 的通信覆盖范围内, 则 R_X 就会同时接收到 T_{X1} 和 T_{X2} 的信号, T_{X2} 对工作链路产生干扰。

以上两种模型的工作链路和干扰链路都处于同一水平面, 为了更好地模拟真实的应用场景, 对 T_{X2} 增加高度差的概念, 建立 T_{X1} 与 R_X 非共面, T_{X2} 与 R_X 处于不同高度差下的 NLOS 无线紫外光干扰链路, 如图 4 所示。

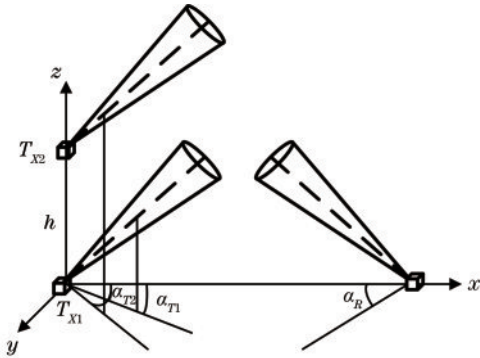


图 4 NLOS 通信非共面且存在高度差的干扰模型

Fig. 4 Interference model of NLOS communication with non-coplanarity and height difference

图中 T_{X1} 与 R_X 为同一水平面的非共面工作链路, 其中 α_{T1} 为发射端与 x 轴正方向的夹角, α_R 为接收端与 x 轴负方向的夹角。 T_{X2} 与 R_X 处于非共面且存在高度差的位置, α_{T2} 为 T_{X2} 与 x 轴正方向的夹角, T_{X2} 距离 T_{X1} - R_X 平面的高度为 h 。

2.3 蒙特卡罗模型

无线紫外光在大气中散射主要分为单次散射模型和多次散射模型。由于传统的单次散射模型是通过有效散射体进行三重积分求路径损耗, 但在仿真过程中难以计算复杂的三重积分。蒙特卡罗模型是一种采用抽样和产生随机数的方法进行概率统计的模型, 可以用来仿真单次散射通信过程, 也可以描述多次散射模型。

基于蒙特卡罗的无线紫外光 NLOS 多次散射步骤如下:

- 1) 初始化光子信息。
- 2) 发送端随机发射光子, 随机产生其偏转角、方位角以及方向余弦。
- 3) 判断光子是否还处于有效散射体内。如果处于, 则进行步骤 4, 否则判定光子丢失。
- 4) 光子与大气中的大气分子、气溶胶以及悬浮颗粒等发生散射, 根据散射粒子的大小判断散射类型, 并确定光子的下一个碰撞位置。
- 5) 判断光子的生存概率是否太小。如果太小, 则判定光子丢失, 否则光子继续发生散射。

6) 判断收到的光子数是否达到预定值。如果是, 则结束循环, 统计接收到光子的数量和生存概率, 否则产生新的光子, 转步骤 2。

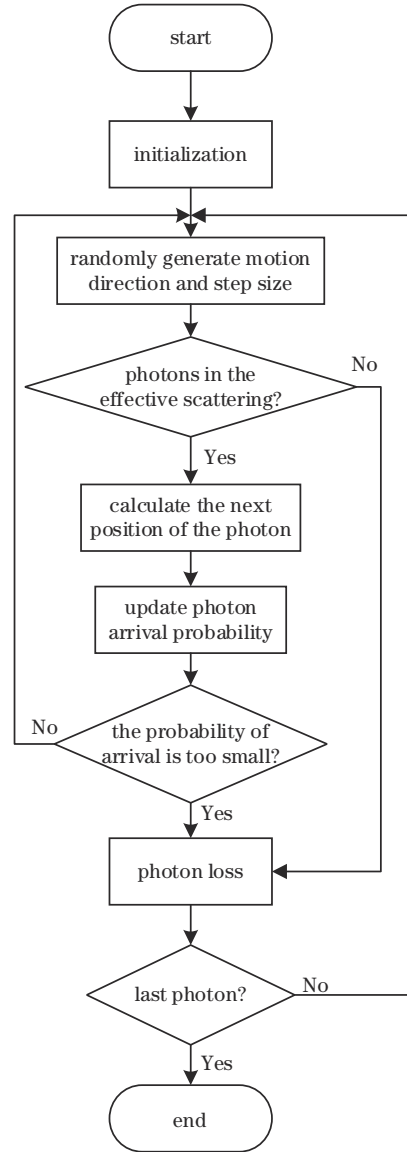


图 5 蒙特卡罗多次散射算法流程

Fig. 5 Flow of Monte Carlo multiple scattering algorithm

3 仿真结果与分析

3.1 验证蒙特卡罗模型在 UV NLOS 通信的正确性

为验证蒙特卡罗模型在无线紫外光 NLOS 通信的正确性, 对比由式(1)计算得到的路径损耗结果与蒙特卡罗仿真下的路径损耗结果, 仿真参数的取值如表 1 所示。

图 6 为蒙特卡罗模型和理论公式的结果对比图。图中 FC 为公式计算的结果, MC 为蒙特卡罗模型的仿真结果。图 6(a) 计算并仿真了 T_X 发散角的角度 ϕ_1 对路径损耗的影响, 设置发送仰角 θ_1 为 30° , 接收视场角 ϕ_2 为 30° , 接收仰角 θ_2 为 90° 。结果表明, 采用蒙特卡罗

表 1 系统模型参数^[4]

Table 1 System model parameters^[4]

Parameter	Value
Simulated photon number	10^6
Area of receiving aperture A_r / m^2	1.77×10^{-4}
Absorption coefficient K_a / m^{-1}	0.802×10^{-3}
Mie scattering coefficient $K_s^{\text{Mie}} / \text{m}^{-1}$	0.284×10^{-3}
Rayleigh scattering coefficient $K_s^{\text{Ray}} / \text{m}^{-1}$	0.266×10^{-3}
Rayleigh phase function scattering parameter γ	0.017
Mie phase function asymmetry parameter g	0.72
f	0.5

模型仿真的结果与公式计算法得到的结果基本一致,两者差值最大不超过 1 dB,传输路径越短仿真效果越贴近理论值。

图 6(b)计算并仿真了 T_x 发送仰角的角度 θ_1 对路径损耗的影响,设置发散角 ϕ_1 为 30° ,接收视场角 ϕ_2 为 30° ,接收仰角 θ_2 为 90° 。结果表明,采用蒙特卡罗模型仿真的结果与公式计算法得到的曲线趋势基本一致,且随着通信距离 r 的增加,路径损耗持续增大。

图 6(c)计算并仿真了 R_x 视场角的角度 ϕ_2 对路径损耗的影响,设置发散角 ϕ_1 为 30° ,发送仰角 θ_1 为 20° ,接收仰角 θ_2 为 90° 。可以明显看出,蒙特卡罗模型仿真的结果与公式计算基本一致,且随着接收视场角的增大,信道的路径损耗持续减小。

从图 6 可以看出,蒙特卡罗模型和理论公式的仿真结果在发射端的接收端的不同角度下都基本吻合,验证了蒙特卡罗模型的正确性。

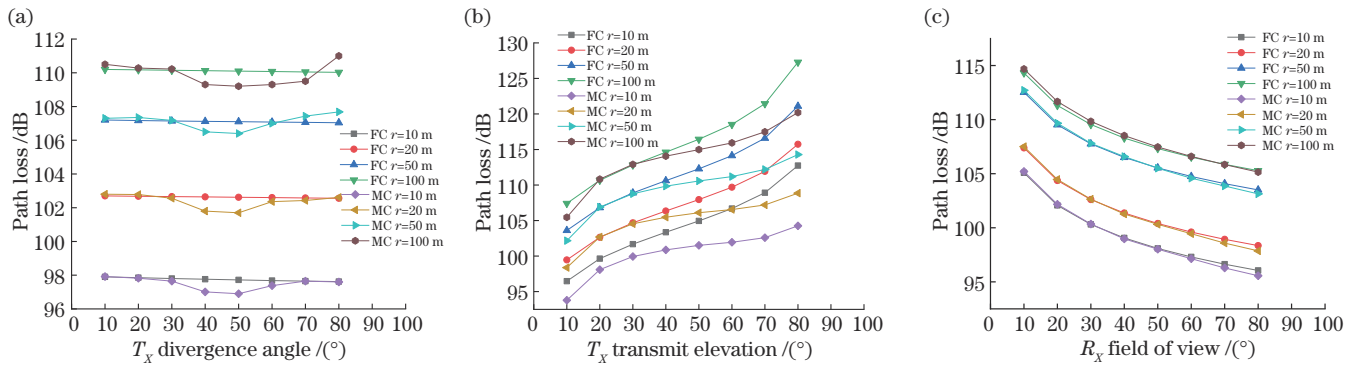


图 6 蒙特卡罗和理论公式的仿真结果。(a) 发散角对路径损耗的影响; (b) 发送仰角对路径损耗的影响; (c) 接收视场角对路径损耗的影响

Fig. 6 Simulation results of Monte Carlo and theoretical formulations. (a) Effect of divergence angle on path loss; (b) effect of transmit elevation angle on path loss; (c) effect of receiving field of view on path loss

3.2 无线紫外光干扰链路通信性能仿真结果

无线紫外光通信系统的误码率 (BER) 指单位时间内出现错误的比特数量除以传输的总比特数,可通过对接收端的探测计算得到。计算公式^[14]为

$$R_{\text{BER}} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{m_T} \frac{(\lambda_s + \lambda_i)^k \exp[-(\lambda_s + \lambda_i)]}{k!} + \frac{1}{2} \sum_{k=m_T+1}^{\infty} \frac{\lambda_i^k \exp(-\lambda_i)}{k!}, \quad (2)$$

式中: m_T 为最佳阈值, 设为 10^{-5} ; λ_s 为单位时间内接收端接收到的平均光子数; λ_i 为单位时间内到达接收端的平均干扰光子数。 λ_s 和 λ_i 的计算公式分别为

$$\lambda_s = \frac{\eta_1 \eta_2 P_t}{L_T R_{bT} h \nu}, \quad (3)$$

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^K \frac{\eta_1 \eta_2 P_{ij}}{L_{ij} R_{bij} h \nu}, \quad (4)$$

式中: η_1 为接收器的探测效率; η_2 为过滤器的过滤效率; P_t 为发射端功率; L_T 为传输过程中的路径损耗; R_{bT} 是发射端的比特率; h 是普朗克常量; ν 是发射端发射光子的频率; K 是干扰端的光子数量; P_{ij} 是第 j 个干扰端的发射功率; L_{ij} 是第 j 个干扰端到接收端的路径

损耗; R_{bij} 是第 j 个干扰端的比特率, 在只存在一条干扰链路的模型中 j 取 1。

由于模型一的非共面情况和模型二的非共面情况两种干扰模型均可由第三种模型的特殊角度、特殊高度获得, 因此本文以模型三的非共面且存在高度差情况为例, 研究基于蒙特卡罗模型的信道误码率。图 7 为非共面且存在高度差情况下链路的误码率, 分别针对

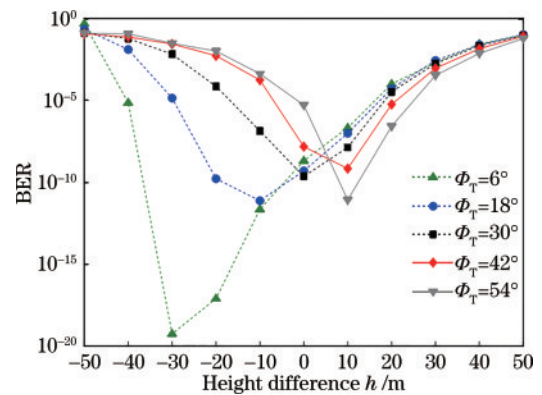


图 7 发射端和接收端高度差对误码率的影响

Fig. 7 Influence of height difference between transmitter and receiver on BER

不同收发端高度差以及在不同高度差下发射端仰角、接收端仰角、发射端偏轴角和接收端偏轴角对 BER 的影响。仿真系统模型参数的取值如表 2 所示。

表 2 仿真参数
Table 2 Simulation parameters

Parameter	Value
Height difference h / m	-10
Elevation angle of transmitter θ_T / ($^\circ$)	20
Receiver elevation angle θ_R / ($^\circ$)	20
Transmitter off-axis angle α_{T1} / ($^\circ$)	30
Interference end off-axis angle α_{T2} / ($^\circ$)	20
Receiving end off-axis angle α_R / ($^\circ$)	30
Divergence angle Φ_T / ($^\circ$)	12
Field of view Φ_R / ($^\circ$)	30
Wavelength λ / nm	260
Distance d / m	100
Information rate R_b / (kb/s)	64
Transmit power P_t / mW	100
PMT detection efficiency η_1 / %	35
Optical filter efficiency η_2 / %	30

首先考虑发射端的不同高度差对无线紫外光通信系统的误码率的影响。设置接收端高度为 0, 横坐标为发射端高度 h 。如图 7 所示, 发散角 Φ_T 在取不同的角度时 BER 具有相同的趋势, 均为先减小后增大, 但达到最小值的高度 h 不同。当 Φ_T 为 6° 时, h 在 -30 m 时达到最小值; 当 Φ_T 为 18° 时, h 在 -10 m 时 BER 达到最小值; 当 Φ_T 为 30° 时, h 在 0 m 时达到最小值; 当 Φ_T 为 42° 和 54° 时, h 均在 10 m 时达到最小值点。当 h 为正, 即干扰链路在工作链路上方时, BER 随 Φ_T 的增大而减小; 当 h 为负, 即干扰链路在工作链路下方时, BER 随 Φ_T 的增大而增大。

图 8 为不同高度差 h 下蒙特卡罗模型的仿真与实

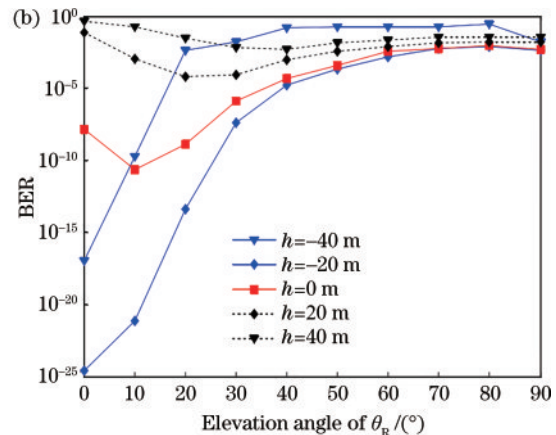
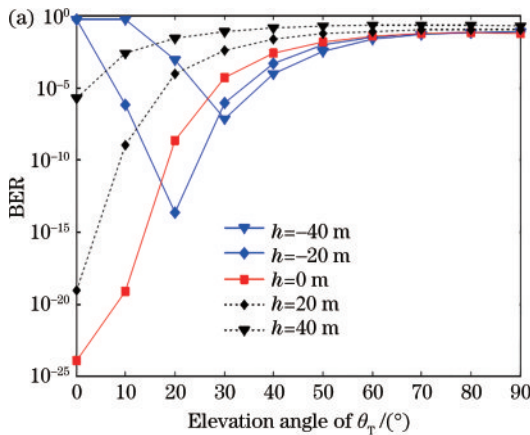


图 9 非共面且存在不同高度差下收发端仰角对误码率的影响。(a) 发射端仰角 θ_T ; (b) 接收端仰角 θ_R

Fig. 9 Influence of the transmitter and receiver elevation angles on BER under non-coplanar and different height differences.

(a) Transmitter elevation angle of θ_T ; (b) receiver elevation angle of θ_R

图 9(b) 中, 设置 θ_T 为 30° , Φ_T 为 30° , Φ_R 为 30° 。当 h 为负时, 信道的 BER 随 θ_R 的增大先减小后增大; 当 h

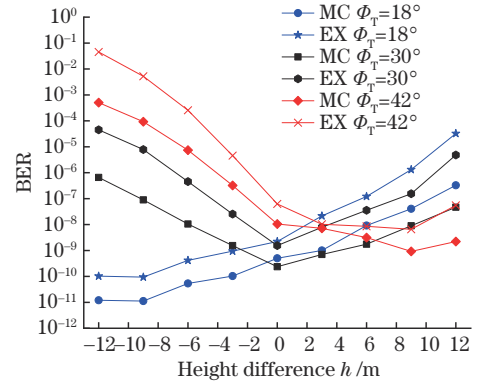


图 8 仿真结果与实验验证结果

Fig. 8 Simulation results and experimental verification results

验验证的结果, 图中横坐标为发射端到接收端的高度差, 纵坐标为误码率。从图 8 可以看到, 实验测得的误码率均大于仿真结果, 且随着高度差绝对值的增大, 实验测量值与仿真值的差值逐渐增大, 但总体趋势一致。在高度差取 -12~12 m 之间: 发散角 Φ_T 取 18° 时, 误码率随着高度差的增大逐渐增大; 发散角 Φ_T 取 30° 时, 误码率随着高度差的增大先减小后增大, 且在高度差为 0 即收发端在同一平面上时达到最小; 发散角 Φ_T 取 42° 时, 误码率随着高度差的增大先减小后增大, 在高度差为 9 m 时达到最小。

考虑到实际信道中散射粒子对光信号的吸收作用, 以及噪声条件、实验环境、设备的精度、大气微粒的复杂性, 认为实验中测得的误码率较大是合理的, MC 仿真结果与实验结果趋势相同。

图 9 为不同高度差 h 下, 发射端仰角 θ_T 和接收端仰角 θ_R 对紫外信道误码率的影响。图 9(a) 中, 横坐标为发射端仰角 θ_T , 设置 θ_R 为 30° , Φ_T 为 30° , Φ_R 为 30° 。可以看出: 当 h 为负时, 信道的 BER 先减小后增大; 当 h 为正时, 信道的 BER 随 θ_T 的增大逐渐增大。

为正时, 信道的 BER 随 θ_R 的增大先减小后增大且逐渐趋于平缓; 当 h 为 0 时, 信道的 BER 随 θ_R 的增大先减小

后增大,在 $\theta_R=10^\circ$ 处达到最小值。

为探究高度差对信道误码率的影响,研究通信链路的剖面图如图 10 所示,设 T_{X1} 、 T_{X2} 、 T_{X3} 分别为 h 为负、 h 为 0 和 h 为正的三种状态。 V_1 为 T_{X1} 与 R_X 相交的有效散射体,可以看出由于散射角的大小,发射光束未完全

包含于接收视场内; V_2 为 T_{X2} 与 R_X 相交的有效散射体,发射光束与接收视场相嵌; V_3 为 T_{X3} 与 R_X 相交的有效散射体,发射光束完全包含于接收视场内。随着 h 的逐渐增大,剖面图中发射光束的光斑逐渐变小,公共散射体先增大后减小,因此会对信道的 BER 产生影响。

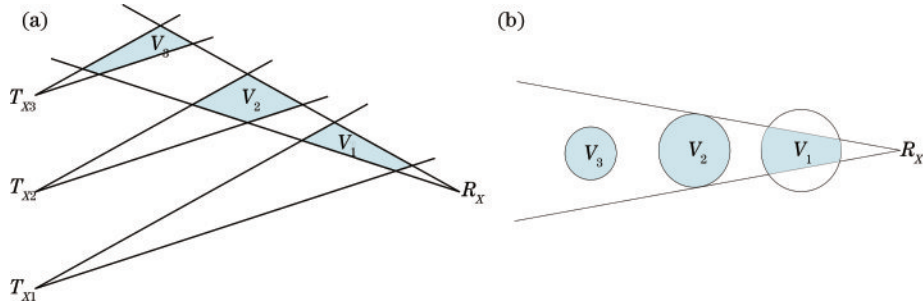


图 10 通信链路状态关于 h 变化剖面图

Fig. 10 Cross-sectional views of communication link status with respect to h change

综合以上结果可知:当 h 为负时,随着 θ_R 的增大,光子在大气信道中的传输距离也在不断增大,因此 BER 逐渐增大;当 h 为正时,随着 θ_R 的增大,公共散射体的体积也逐渐增大;当 θ_T 的角度较小时, h 的大小会剧烈影响公共散射体的体积,因此 BER 变化得比较快;当 θ_T 的角度较大时,光子的传输距离成为影响 BER 的主要因素。因此,可以通过调节发射端仰角来减小 BER。

4 结 论

本文简单介绍了无线紫外光 NLOS 通信的基本原理,建立了基于蒙特卡罗的无线紫外光 NLOS 通信仿真模型并验证了该模型的正确性。然后,在此基础上分析了无线紫外光 NLOS 通信的三种干扰模型,并基于蒙特卡罗模型研究了发射端和接收端的高度差对误码率的影响,结果表明,干扰端的高度差对误码率的影响较大。最后,研究了发射端仰角和接收端仰角在不同高度差下的误码率,发现影响误码率的主要因素是干扰端的位置导致的有效散射体的体积大小。

参 考 文 献

- [1] Ding H P, Chen G, Majumdar A K, et al. Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8038: 195-202.
- [2] Luetgten M R, Reilly D M, Shapiro J H. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1991, 8(12): 1964-1972.
- [3] 王正凤, 付秀华, 张静, 等. 日盲紫外告警系统中成像滤光片的研制[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1207002. Wang Z F, Fu X H, Zhang J, et al. Research of imaging filter in solar blind ultraviolet alarm system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(12): 1207002.
- [4] Luo P F, Zhang M, Han D H, et al. Performance analysis of short-range NLOS UV communication system using Monte Carlo simulation based on measured channel parameters[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23489-23501.
- [5] 马愈昭, 程飞帆, 贾惠婷, 等. 雾天环境下 SIMO NLOS 紫外光通信系统性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1106007. Ma Y Z, Cheng F F, Jia H T, et al. Performance of SIMO NLOS UV communication system in a foggy environment[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1106007.
- [6] He Q F, Xu Z Y, Brian M S. Non-line-of-sight serial relayed link for optical wireless communications[C]// 2010-MILCOM 2010 Military Communications Conference, October 31-November 3, 2010, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1588-1593.
- [7] 宋鹏, 刘春, 朱磊, 等. 移动场景下无线紫外光通信单次散射路径损耗分析[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0406001. Song P, Liu C, Zhu L, et al. Analysis of single-scatter path loss in wireless ultraviolet communication in mobile scene[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0406001.
- [8] 赵太飞, 张爱利, 金丹, 等. 无线紫外光非视距通信中链路间干扰模型研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706023. Zhao T F, Zhang A L, Jin D, et al. Research on the inter-link interference model in wireless ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706023.
- [9] 赵太飞, 史海泉, 梁浩, 等. 无线紫外光 MIMO 通信线性注水功率分配方法[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2206002. Zhao T F, Shi H Q, Liang H, et al. Linear water-filling power allocation method in wireless MIMO ultraviolet communication[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2206002.
- [10] 赵太飞, 吕鑫喆, 孙玉歆, 等. 基于神经网络的紫外光散射湍流信道估计方法[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2406001. Zhao T F, Lü X Z, Sun Y X, et al. Neural-network-based estimation method for ultraviolet scattering channel

- under turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2406001.
- [11] Xu Z Y. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links[C]//2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-ICASSP'07, April 15-20, 2007, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2007: 577-580.
- [12] 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.
- [13] Ding H P, Chen G, Xu Z Y, et al. Characterization and modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering communication channels[C]//2010 7th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP 2010), July 21-23, 2010, Newcastle Upon Tyne, UK. New York: IEEE Press, 2010: 593-597.
- [14] 宋鹏, 宋菲, 李云红, 等. 非直视紫外光通信组网多用户干扰问题[J]. *光子学报*, 2016, 45(9): 0906001.
- Song P, Song F, Li Y H, et al. Inter-link multi-user interference in non-line-of-sight ultraviolet communication network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(9): 0906001.