

doi:10.3788/gzxb20164509.0906001

非直视紫外光通信组网多用户干扰问题

宋鹏, 宋菲, 李云红, 王建余, 熊扬宇

(西安工程大学 电子信息学院, 西安 710048)

摘 要:针对空分复用的紫外光通信网络中链路间多用户干扰的问题, 基于一组典型的通信链路模型, 采用紫外光多次散射理论, 应用蒙特卡洛方法对系统的误码率与通信节点间距离、链路间夹角、收发仰角等参量间的关系进行分析。结果表明: 误码率随着通信节点间距离的增大而增大, 发射功率为 100 mW 时, 通信距离应小于 120 m; 随着链路间夹角的增大, 误码率先减小后逐渐保持不变, 然后又增大, 链路间夹角在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 内取值; 接收端仰角和发射端仰角对误码率的影响几乎相同, 即随着收发仰角的增大, 误码率先减小后迅速增大, 15° 时误码率最小。

关键词: 大气光学; 光通信; 蒙特卡洛仿真; 紫外光; 多次散射; 非直视; 多用户干扰

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)09-0906001-8

Inter-link Multi-user Interference in Non-line-of-sight Ultraviolet Communication Network

SONG Peng, SONG Fei, LI Yun-hong, WANG Jian-yu, XIONG Yang-yu

(School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: The Ultraviolet (UV) communication network which is based on the space division multiplexing technique will be faced with the problem of inter-link multi-user interference. For a set of typical communication link models, based on the theory of multiple-scattering, and Monte Carlo method was used to analyze the relationships between the probability of error and the distance from transmitter to receiver, the angle between two links, transmitters' elevation angle and receivers' elevation angle, respectively. The results show that, the probability of error increases with the increase of the distance from transmitter to receiver, the communication distance should be less than 120 meters when emission power is 100 mW; with the increase of the inter-link angle, the probability of error decreases first, then remains the same gradually, and then increases, the inter-link angle should be within $60^\circ \sim 120^\circ$; the influence of the elevation angle of transmitter and receiver on the probability of error is almost the same, that is the probability of error decreases first and then increases rapidly with the increase of the elevation angle, the minimum probability of error at 15° .

Key words: Atmospheric optics; Optical communication; Monte Carlo simulation; Ultraviolet radiation; Multiple scattering; Non-line-of-sight; Multi-user interference

OCIS Codes: 060.2605; 010.1300; 060.4250; 290.4210

0 引言

紫外光(Ultraviolet, UV)通信是一种通过紫外光在大气中的散射来进行信息传输的新型无线光通

信^[1]。由于大气中存在大量粒子,光子在传输过程中遇到大气分子和这些粒子就会发生散射,使得无线紫外光能够进行非直视(Non-Line-of-Sight, NLOS)传输^[2]。非直视通信克服了光通信中须对准的约束,并

基金项目:国家自然科学基金(No. U1433110)、陕西省自然科学基金基础研究项目(No. 2013JC2-15)、陕西省教育厅科研项目(No. 14JK1319)、西安工程大学研究生创新基金(No. CX201603)和西安工程大学控制科学与工程学科群建设经费(No. 107090811)资助

第一作者:宋鹏(1976-),男,副教授,博士,主要研究方向为紫外光通信。Email: pengsong916@126.com

收稿日期:2016-03-20; **录用日期:**2016-05-25

<http://www.photon.ac.cn>

且在不同的环境中能够进行灵活的网络配置,从而适应复杂的地形环境. 由于臭氧层对日盲波段紫外光具有强烈的吸收作用,使得在近地太阳光谱中几乎没有该紫外光波段^[3]. 因此,利用日盲紫外光进行通信时几乎不受太阳光干扰,具有背景噪声小、保密传输、抗电磁干扰、适应恶劣地形环境、绕障通信能力强和全天候工作的特点^[4-6].

左勇团队^[7]基于球面坐标系提出了 NLOS 紫外光单次散射非共面信道模型,并仿真得到了通信链路路径损耗与收发端几何参量之间的关系,其团队在文献^[8]中,基于球面坐标系,在发射端发散角或接收端视场角小的条件下,给出了紫外光非共面通信链路路径损耗的近似闭合解. 文献^[7-8]的模型只考虑了紫外光单次散射的情况,在收发仰角较小的条件下是适用的. 当收发仰角大于 70° 时,多次散射的因素必须考虑. Drost 等人^[9-11]基于蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)方法提出紫外光通信多次散射模型,这是目前研究多次散射的主要方法. 张民等^[12]基于 MC 方法,研究了紫外光通信中不同调制方式的误码率问题. 龚晨等^[13]采用线性时不变泊松信道模型分析了紫外光通信中码间干扰问题. 文献^[12-13]都基于紫外光通信单一链路展开研究,没有涉及紫外光组网通信的问题. 由于近地大气分子和气溶胶微粒对日盲紫外光的强吸收作用,以及日盲紫外光通信中发射功率、散射信道等因素的影响,使得利用紫外光只能进行短距离通信,为了扩大通信范围,可以通过组建紫外光通信网络来实现^[14-15]. 徐正元团队^[16]建立了一个多节点串行链路中继模型来实现远距离传输,并考虑了通信过程中邻近节点间的干扰问题,但在该模型中,紫外光通信链路都是共面

的. 紫外光无线通信组网的拓扑结构通常有 3 种: 环形网、星形网和网状网结构. 在拓扑组网中多节点的多套收发装置可能同时工作,所以多用户干扰(Multi-User Interference, MUI)问题不可避免,如果各节点参量设置不当,可能会造成通信无法正常进行. 张民团队^[17]模拟了一个短程紫外光通信过程,通过改变干扰端的偏轴角来研究 MUI 问题,但该模型是一个单链路模型,并且只考虑了偏轴角的影响.

针对紫外光组网中同一个节点同时进行两路通信,两个链路之间相互干扰的问题,本文基于紫外光通信多次散射理论,应用 MC 方法,建立了一组紫外光通信收发链路模型,并根据该模型讨论了各个参量对 MUI 问题的影响,给出了紫外光通信组网收发节点的设计建议.

1 NLOS 紫外光通信系统及多次散射传输模型

1.1 NLOS 紫外光通信系统

紫外光通信的基本原理^[1]是将紫外光作为信息传输的载体,把需要传输的信息加载到紫外光上,以实现信息的发送和接收,常见的紫外光通信系统框图如图 1. 基于多次散射的非直视紫外光通信系统主要由发射、信道和接收 3 部分组成^[18]. 发射部分包括信源、调制和编码、光源驱动电路、紫外光源. 接收部分包括光电探测器、接收电路、解调和解码、信宿. 本文主要研究的是图 1 虚线框内包含的部分,采用二进制通断键控(On-Off Keying, OOK)调制方法,基于紫外光信道特性,对紫外光通信链路中存在的 MUI 问题进行了研究.

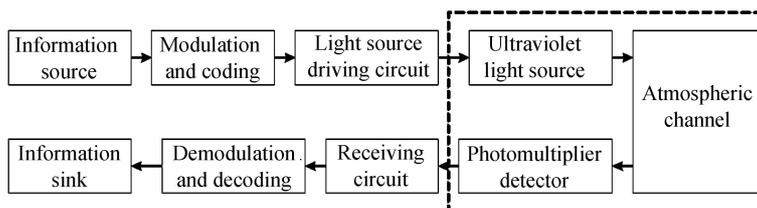


图 1 非直视紫外光通信系统框图

Fig. 1 Block diagram for the NLOS UV communication system

1.2 紫外光多次散射传输模型

NLOS 紫外光多次散射收发示意图如图 2. C_t 和 C_r 分别表示发射端 T_x 的发射光束圆锥和接收端 R_x 的视场角(Field of View, FOV)圆锥. θ_t 和 Φ_t 分别是椎体 C_t 的仰角和发散角,同样的, θ_r 和 Φ_r 对应的是椎体 C_r 的仰角和 FOV. α_t 是 C_t 的偏轴角, α_r 是 C_r 的偏轴角. d 是从 T_x 到 R_x 的直线距离. S_1 、 S_2 和 S_n 是散射点.

NLOS 紫外光大气传输的理论模型采用的主要方法有单次散射近似法和 MC 方法. 经典的单次散射模

型^[9]通过对公共散射体进行三重积分进而求出通信系统的路径损耗(Path Loss, PL),但是在仿真过程中复杂的三重积分难以实现. 如果用简化近似公式来代替三重积分,要求公共散射体是闭合的^[10, 19-20],发散角和接收视场角较小,近似公式的使用条件较为严苛. MC 方法是一种以概率统计理论为基础的计算方法,通过 MC 方法不仅可以仿真单次散射传输过程,还可以描述光子多次散射现象,MC 仿真算法流程图如图 3. 该方法的基本思想是:初始化,发射端发射大量光子,每一个光子初始出射方向是随机的,光子沿着出射方向

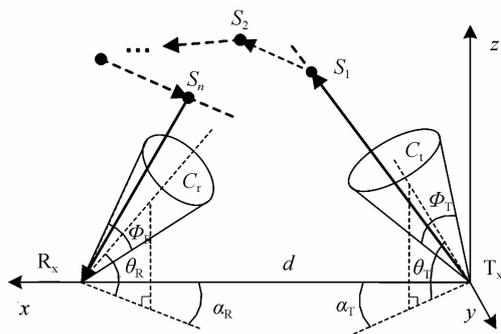


图2 非直视紫外光多次散射传输模型

Fig. 2 NLOS UV multiple scattering propagation model in noncoplanar geometry

运动. 运动随机步长后,遇到第一个散射点 S_1 ,发生散射,光子运动方向将发生改变,光子沿着新的方向继续运动,随后光子可能被接收端接收,或者继续运动,直到遇到第二个散射点 S_2 ,发生散射,多次散射的情况以此类推,当光子的到达概率或存活概率很小时,光子丢弃. 用 MC 方法最终可以计算出一个光子能到达接收端的平均概率,进一步可以计算出系统的路径损耗. MC 方法的详细步骤见文献[12].

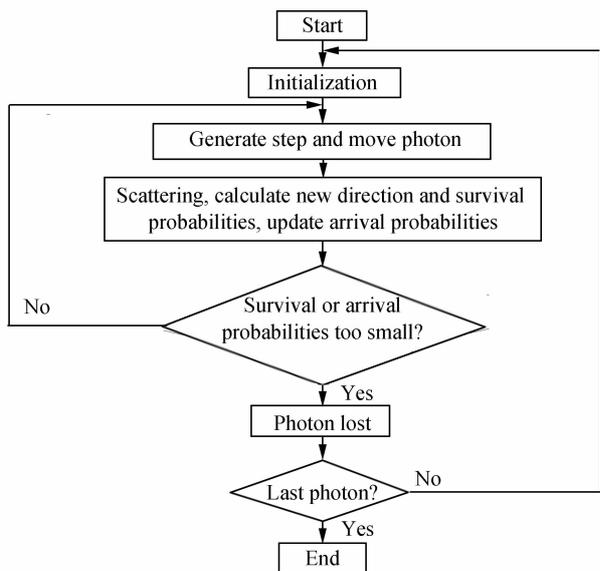


图3 蒙特卡洛仿真算法流程

Fig. 3 Monte Carlo model simulation diagram

1.3 蒙特卡洛仿真和实验结果对比

为了进一步验证紫外光通信系统的性能,搭建如图4的实验平台. 图4中的阴影部分是发射端发射光束与接收端视场角的相交区域,称为公共散射体,公共散射体的大小会对系统的性能产生影响.

采用 MC 方法,通过 MATLAB 进行仿真,并通过图4的实验平台展开实验,进行对比分析. 实验当天最低温度为 22°C ,最高温度为 34°C ,风速为 1.7 m/s ,相对湿度为 33% ,能见度为 30 km . 实验的主要器材为 UV LED 光源(UVTOP255)和高灵敏度的光电倍增管(Photomultiplier, PMT, HAMAMATSU R7154).

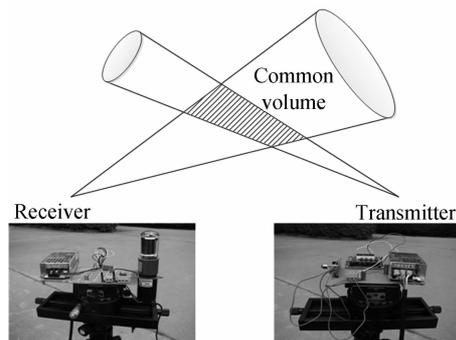


图4 非直视紫外光通信实验平台

Fig. 4 LED-based NLOS UV communication testbed

实验参量设置如下:发射功率为 0.3 mW ,发散角为 6° ,视场角为 30° ,收发仰角均为 20° ,收发偏轴角均为 0° ,发射端与接收端之间的距离,由 5 m 开始,以 5 m 为间隔,依次增加到 40 m . 实验结果如图5. 由图5可以看出,MC 仿真结果与实验结果趋势相同,但是实验得到的路径损耗相对较小,这主要是由实验环境、噪声条件、大气分子的复杂性以及设备的准确度造成的.

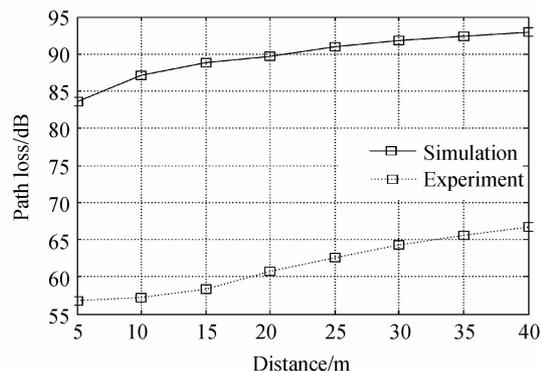


图5 不同距离下仿真和实验结果对比

Fig. 5 Experimental and simulated PL for different distance

2 NLOS 紫外光通信链路间干扰模型

为了分析基于空分复用的 NLOS 紫外光通信网络中存在的 MUI 问题,基于 3 种常见的组网拓扑结构,设计了一组收发链路模型,评估了各个参量对误码率(Probability of error, P_e)的影响,并且这些模型可以应用于不同组网模型的相似场景. 如图6.

对于每个接收端,存在一个信号源和一个干扰源. 发射端 $2(T_2)$ 是接收端 $1(R_1)$ 的干扰源,发射端 $1(T_1)$ 是接收端 $1(R_1)$ 的信号源. 同样地, T_1 是 R_2 的干扰源, T_2 是 R_2 的信号源. T_1 和 R_1 共面, T_2 和 R_2 共面,而 T_1 和 R_2 以及 T_2 和 R_1 则是非共面的. 定义从 T_1 到 R_1 的通信链路为 link1,从 T_2 到 R_2 的通信链路为 link2,link1 与 link2 之间的夹角为 β . 图6(a)是情况一,在该情况中 T_1 和 R_2 是共址的,文献[21]指出,只要合理的设置系统几何参量,共址的收发设备是可行的,只会存在很小的后向散射干扰. 图6(b)是情况二,

在该情况中 T_1 和 T_2 是共址的. 图 6(c)是情况三, 在该情况中 R_1 和 R_2 是共址的. 这 3 种情况在实际的通信中均可能存在.

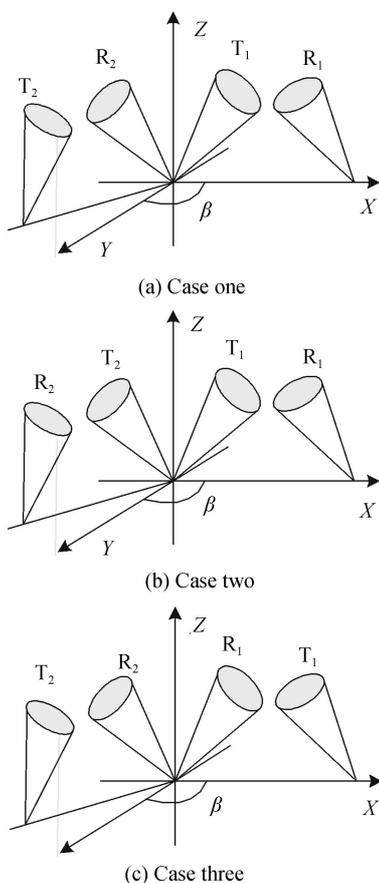


图 6 非直视紫外光通信链路图

Fig. 6 NLOS UV communication links

采用 OOK 调制方法, 在每个调制间隔内光子到达接收端的数量遵循泊松分布, 相应的误码率为^[22]

$$P_e = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{m_T} \frac{(\lambda_s + \lambda_i)^k e^{-(\lambda_s + \lambda_i)}}{k!} + \frac{1}{2} \sum_{k=m_T+1}^{\infty} \frac{\lambda_i^k e^{-\lambda_i}}{k!} \quad (1)$$

式中, λ_s 是每个脉冲间隔内到达接收端的平均信号光子数, λ_i 是每个脉冲间隔内到达接收端的平均干扰光子数, m_T 是最佳阈值. 为了实现正常通信, 误码率必须要小于 10^{-5} , 如果误码率能达到 10^{-3} , 通信也能够实现, 但噪声会比较大. 这 3 个参量的表达式分别为

$$\lambda_s = \frac{\eta_1 \eta_2 P_i}{L_T R_{bT} h\nu} \quad (2)$$

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^K \frac{\eta_1 \eta_2 P_{ij}}{L_{ij} R_{bij} h\nu} \quad (3)$$

$$m_T = \left\lfloor \frac{\lambda_s}{\ln(1 + \lambda_s / \lambda_i)} \right\rfloor \quad (4)$$

式中, η_1 是 PMT 的效率, η_2 是光学过滤器的效率. P_i 是发射端的发射功率, L_T 是从发射端到接收端的路径损耗, R_{bT} 是发射端的比特率, 就是比特持续时间的倒数. 对于不归零脉冲, $1/R_{bT}$ 就是 OOK 调制的脉冲长度. 每个光子的能量为 $h\nu$, 其中 h 是普朗克常量, ν

是发射端的频率, $\nu = c/\lambda$, λ 是波长, c 是光速. K 是干扰的数量, P_{ij} 是第 j 个干扰的发射功率, L_{ij} 是第 j 个干扰到达接收端的路径损耗, R_{bij} 是第 j 个干扰的比特率.

如图 6 所示, 对于接收端只存在一个干扰, 干扰端发射功率为 P_i , 所以 λ_i 可以简化为

$$\lambda_i = \frac{\eta_1 \eta_2 P_i}{L_i R_{bi} h\nu} \quad (5)$$

如果不存在 MUI 问题, 也就是 $\lambda_i = 0$ 或最佳阈值 $m_T = 0$, 此时误码率的表达式为

$$P_e = \frac{1}{2} \exp(-\lambda_s) \quad (6)$$

为了实现正常通信, 使多路信号能实现空分复用, 受到实际场景和几何对称性的限制, β 的变化范围为 $[\beta_{\min}, 180^\circ]$, 其中 β_{\min} 为

$$\beta_{\min} > \frac{1}{2} (\Phi_T + \Phi_R) \quad (7)$$

3 仿真结果和分析

误码率可以直接反映系统的性能, 并以此确定链路是否能够实现通信. 设定 link1 和 link2 的各个参量, 通过改变紫外光收发链路相关参量, 发射端到接收端的距离、链路间夹角、以及发射端和接收端的仰角, 分析这些参量对 P_e 的影响, 得到相应的系统性能, 并将所得到的系统性能与无干扰时的结果进行比较. 在这种设定下, 对紫外光通信系统中的 MUI 问题展开研究. 系统模型参量的取值如表 1.

表 1 仿真参量

Table 1 System parameters for simulation

Parameter	Value
T_1, T_2 elevation angle θ_T	20°
R_1, R_2 elevation angle θ_R	20°
T_1, T_2 full-beam angle Φ_T	30°
R_1, R_2 FOV angle Φ_R	30°
Angle β	135°
Wavelength λ	260 nm
Distance d	100 m
Information rate R_b	64 kbps
Emission power P_i	100 mW
The PMT detection efficiency η_1	35%
The optical filter efficiency η_2	30%

3.1 距离对误码率的影响

首先, 考虑距离 d 对误码率的影响. 在实际情况中, 紫外 LED 光源的发射功率非常小, 所以传输距离很有限. 设定距离 d 的变化范围为 $20 \sim 200$ m, 其他的参量值与表 1 相同. 由图 7 可以看出, 不论干扰是否存在, 随着距离增大, 误码率逐渐增大. 图 7(a)为情况一中, 距离对误码率的影响. 由图 7(a)可以看出当干扰不存在时, R_1 和 R_2 接收到的信号的误码率均在 10^{-8}

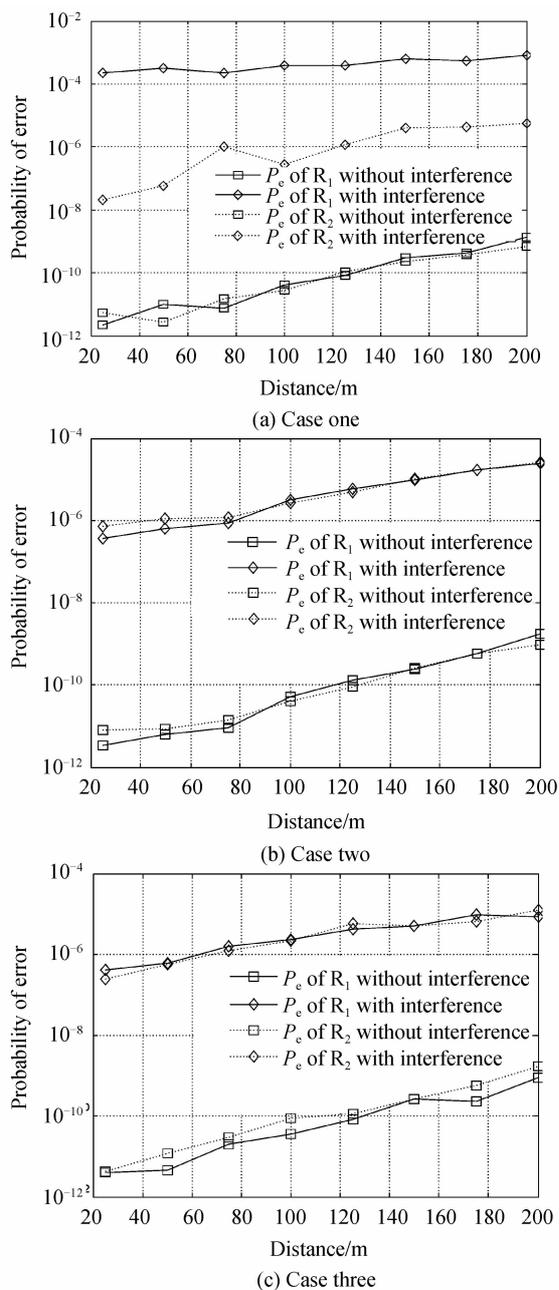


图7 距离对误码率的影响

Fig. 7 Probability of error dependence on distance

以下。当干扰存在时, R_2 接收到的信号的误码率基本上都在 10^{-5} 以下, 而 R_1 接收到的信号的误码率都大于 10^{-4} 。由图 6(a) 可知, T_1 对 R_2 的影响主要来自后向散射, 干扰很小, 而 T_2 和 R_1 之间存在公共散射体, T_2 对 R_1 的干扰大。这说明如果参量设置不当, 用户之间的干扰会非常大, 最终导致通信无法实现。图 7(b) 和图 7(c) 的误码率变化情况基本相同, 干扰不存在时, 误码率均在 10^{-8} 以下, 通信质量好。干扰存在时, 误码率也都在 10^{-4} 以下, 基本能实现通信。由于几何对称性, link1 和 link2 的误码率变化曲线基本重合, 本文采用 MC 方法进行仿真, 光子传输过程具有随机性, 故两条曲线不能完全重合。干扰存在时, 图 7(b) 和图 7(c) 中

接收端 R_1 的误码率小于图 7(a) 中的接收端 R_1 的误码率, 这是由情况一中 T_2 锥体和 R_1 锥体构成的公共散射体的体积更大造成的。

3.2 链路间夹角对误码率的影响

从式(7)可知, 在本文中 β 的值必须大于 30° , 又由于几何对称性, 所以选取的 β 的值的范围为 $31^\circ \sim 180^\circ$, 其他的参量值与表 1 相同。在 3 种情况下, 链路间夹角 β 对误码率的影响如图 8。由图 8 可以看出, 在 3 种情况下, 当干扰不存在时, R_1 和 R_2 接收到的信号的误码率均在 10^{-10} 左右。图 8(a) 为情况一中, 误码率的变化曲线。当干扰存在时, 随着夹角 β 逐渐增大, R_2

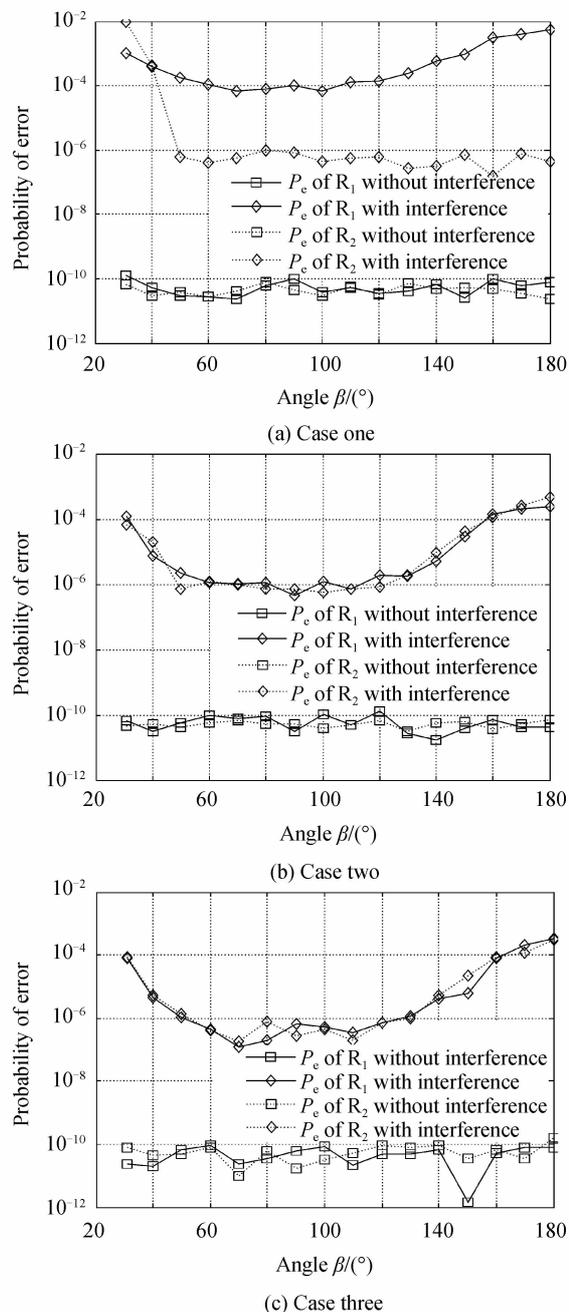


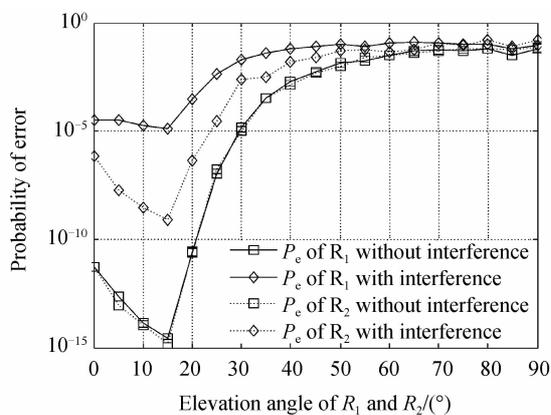
图8 链路间夹角 β 对误码率的影响

Fig. 8 Probability of error dependence on the angle β

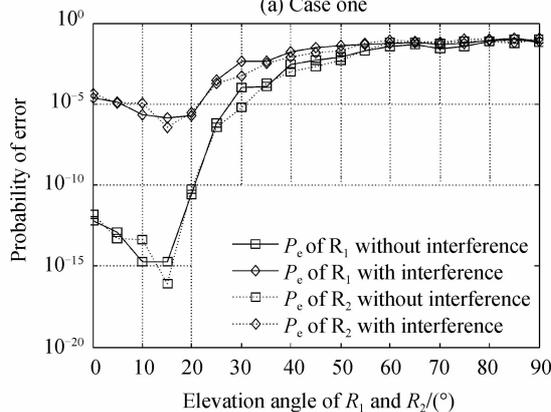
接收到的信号的误码率在逐渐减小,当夹角 β 达到 50° 后,误码率基本保持不变,在 10^{-6} 左右. 当 β 大于 30° 小于 50° ,虽然 T_1 锥体和 R_2 锥体之间没有公共散射体,但是此时两个锥体的距离非常近,从 T_1 发射的光子到达 R_2 的概率较大,对 R_2 的干扰也较大. 对于 R_1 ,随着夹角 β 逐渐增大, R_1 接收到的信号的误码率在逐渐减小,当夹角 β 达到 60° 后,误码率基本保持不变,在 10^{-4} 左右,当 β 大于 120° 以后,误码率又逐渐增大,这主要是由 T_2 锥体与 R_1 锥体之间构成的公共散射体的体积以及光子从 T_2 能够到达 R_1 的距离决定的. 随着夹角 β 的增大,公共散射体的体积先减小后增大,光子到达接收端的距离逐渐增大. 图 8(b)和图 8(c)分别为情况二和情况三中,误码率的变化曲线. 当干扰存在时,由于几何对称性,link1 和 link2 的误码率变化曲线基本重合,随着夹角 β 逐渐增大, R_1 和 R_2 接收到的信号的误码率在逐渐减小,当夹角 β 达到 50° 后,误码率基本保持不变,在 10^{-6} 左右,当 β 大于 120° 以后,误码率又在逐渐增大. 造成这一结果的原因同样和锥体之间构成的公共散射体的体积以及光子从干扰端能够到达接收端的距离有关. 在本文的场景以及参量设置下,为了实现较好的通信,夹角 β 的值应该在范围 $60^\circ \sim 120^\circ$ 内.

3.3 接收端仰角和发射端仰角对误码率的影响

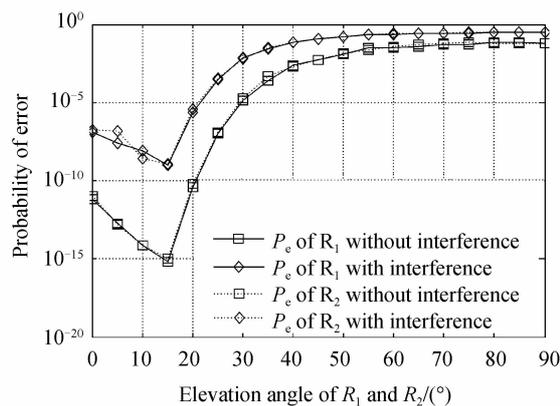
如图 9 所示,考虑接收端仰角的变化对误码率的影响. 在图 9 的 3 幅图中,无干扰时,当接收端仰角为



(a) Case one



(b) Case two



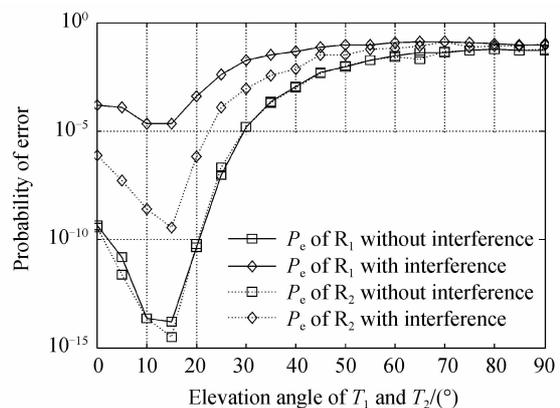
(c) Case three

图 9 接收端仰角对误码率的影响

Fig. 9 Probability of error dependence on elevation angle of receiver

15° 时,接收端接收到的信号的误码率最小. 之后随着接收端仰角的增大,误码率在逐渐增大. 这说明将接收端仰角设置为 15° 左右比较合适,并且从图中可知,存在干扰时,接收端仰角为 15° 时的误码率也是最小的. 图 9(a)为情况一中,误码率的变化曲线. 由图 9(a)可以看出, T_2 对 R_1 产生的影响要大于 T_1 对 R_2 产生的影响. 由图 9(b)可以看出,在情况二中,干扰信号对接收端的影响越来越小,有干扰时的误码率曲线逐渐向无干扰时的误码率曲线靠近,这是由于干扰端锥体与接收端锥体构成的公共散射体体积越来越小造成的. 由图 9(b)与图 9(c)对比可见,在接收仰角较小时,在情况二中,干扰信号对接收端误码率的影响较大,在接收仰角较大时,在情况三中,干扰信号对接收端误码率的影响较大. 这是因为随着接收端仰角的增大,情况二中干扰端锥体与接收端锥体构成的公共散射体体积逐渐减小,而情况三中干扰端锥体与接收端锥体构成的公共散射体体积逐渐增大.

如图 10 所示,考虑发射端仰角变化对误码率的影响. 由图 10 也可以看出将发射端仰角设置为 15° 左右比较合适,并且从图中可知,当干扰存在时,此时的误码率也几乎是最小的. 由图 10(a)同样可以看出, T_2



(a) Case one

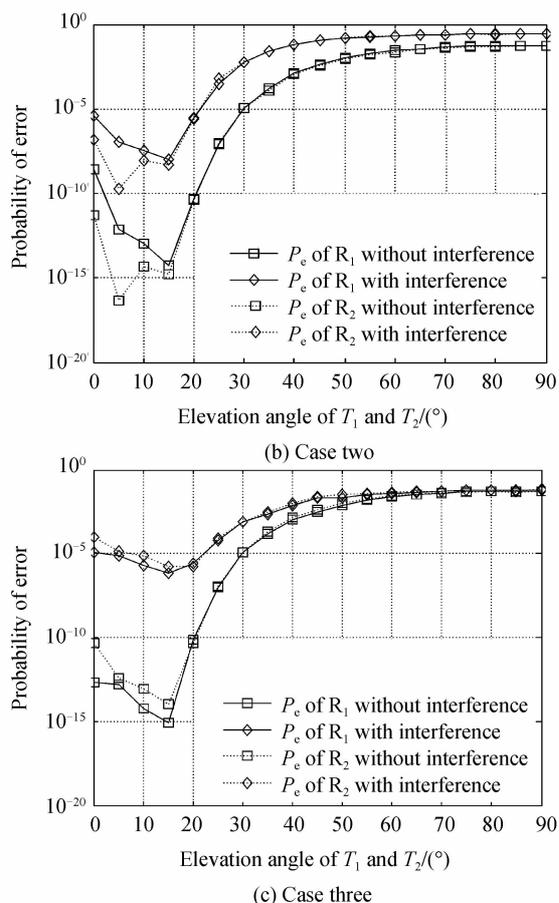


图 10 发射端仰角对误码率的影响

Fig. 10 Probability of error dependence on elevation angle of transmitter

对 R_1 产生的影响要大于 T_1 对 R_2 产生的影响。由图 10(b)与图 10(c)对比可见,在接收仰角较小时,在情况三中,干扰信号对接收端误码率的影响较大,在接收仰角较大时,在情况二中,干扰信号对接收端误码率的影响较大。这是因为随着发射端仰角的增大,情况二中干扰端锥体与接收端锥体构成的公共散射体体积逐渐增大,而情况三中干扰端锥体与接收端锥体构成的公共散射体体积逐渐减小。

4 结论

本文讨论了紫外光组网通信中存在的 MUI 问题。通过对仿真结果的分析,得出:

1) 误码率随着通信距离的增大而增大,为了保证通信质量,当发射功率一定时,应该选择在合适的距离内进行通信,对于本文,当发射功率为 100mW 时,通信距离应小于 120 m;

2) 随着链路间夹角的增大,误码率先减小,然后逐渐保持不变,后又增大。为了实现通信链路空分复用的最大化,应该在保证正常通信的前提下选择尽量小的链路间夹角。在本文的场景以及参量设置下,链路间夹角应在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 内取值;

3) 收发端仰角对误码率的影响几乎相同,随着收发仰角的增大,误码率先减小后增大。由于紫外光的多重散射特性,并不是直视通信时误码率最小。在本文的场景以及参量设置下,收发仰角在 15° 附近误码率最小。

本文研究紫外光组网通信性能时认为系统噪声主要来自于链路间的干扰,忽略了背景噪声的影响。下一步工作,将针对紫外光通信网络路由协议展开研究。

参考文献

- [1] 柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] HAN Da-hai, FAN Xing, ZHANG Kai, *et al.* Research on multiple-scattering channel with Monte Carlo model in UV atmosphere communication[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(22): 5516-5522.
- [3] HARVEY G L. A survey of ultraviolet communication systems[R]. Naval Research Laboratory Technical Report, Washington D. C., 1964.
- [4] KE Xi-zheng, HE Hua, CHEN Xiang. A new backoff algorithm of MAC layer in UV adhoc communication network[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(7): 1002-1006.
柯熙政, 何华, 陈祥. 一种新的紫外光自组织通信网络 MAC 层避退算法[J]. *光电子 • 激光*, 2010, **21**(7): 1002-1006.
- [5] DING Ying, FAN Jan-tao, TONG Shou-feng, *et al.* Approach of distance improving of atmospheric UV communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1047-1052.
丁莹, 范静涛, 佟首峰, 等. 大气信道紫外光通信系统通信距离的增程方法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(9): 1047-1052.
- [6] LIN Yong, XU Zhi-yong, WANG Jin-yuan, *et al.* Analysis of effect of multiple scattering on non-line-of-sight scattering communication in fog weather[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 225-228.
林勇, 徐智勇, 汪井源, 等. 雾天气下多次散射对非视距散射光通信的影响[J]. *光子学报*, 2014, **43**(S1): 225-228.
- [7] ZUO Yong, XIAO Hou-fei, WU Jian, *et al.* A single-scatter path loss model for non-line-of-sight ultraviolet channels[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(9): 10359-10369.
- [8] ZUO Yong, XIAO Hou-fei, WU Jian, *et al.* Closed-form path loss model of non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(12): 2116-2118.
- [9] 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.
- [10] DING Hai-peng, CHEN Gang, 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.
- [11] XU Chang-ming, ZHANG Hong-ming, CHENG Ju-lian. Effects of haze particles and fog droplets on NLOS ultraviolet communication channels[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(18): 23259-23269.
- [12] LUO Peng-fei, ZHANG Min, HAN Da-hai, *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.
- [13] GONG Chen, XU Zheng-yuan. Channel estimation and signal

- detection for optical wireless scattering communication with inter-symbol interference[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, **14**(10): 5326-5337.
- [14] ZHAO Tai-fei, KE Xi-zheng, FENG Yan-ling. Technology research in the solar blind ultraviolet wireless network[J]. *Optical Communication Technology*, 2010, **34**(7): 50-53.
赵太飞, 柯熙政, 冯艳玲. 大气日盲紫外无线光组网技术研究[J]. *光通信技术*, 2010, **34**(7): 50-53.
- [15] ZHAO Tai-fei, KE Xi-zheng. Research on technologies in solar blind ultraviolet Ad hoc network [J]. *Application Research of Computers*, 2010, **27**(6): 2204-2207.
赵太飞, 柯熙政. 基于日盲紫外光通信的自组织网络技术研究[J]. *计算机应用研究*, 2010, **27**(6): 2204-2207.
- [16] HE Qun-feng, XU Zheng-yuan, SADLER B M. Non-line-of-sight serial relayed link for optical wireless communications [C]. *Military Communications Conference, 2010-MILCOM 2010 IEEE*, 2010: 1588-1593.
- [17] JIANG Xing-jian, LUO Peng-fei, ZHANG Min. Performance analysis of none-line-of-sight ultraviolet communications with multi-user interference [C]. *ICCC, 2013 IEEE/CIC International Conference on 2013*: 199-203.
- [18] 冯平兴. 紫外光通信信道散射模型研究及实验系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [19] XU Zheng-yuan, DING Hai-peng, SADLER B M, *et al.* Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links [J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(16): 1860-1862.
- [20] WANG Lei-jie, XU Zheng-yuan, 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.
- [21] WANG Lei-jie, LI Yi-yang, XU Zheng-yuan, *et al.* Wireless ultraviolet network models and performance in noncoplanar geometry[C]. *IEEE Globecom 2010 Workshop on Optical Wireless Communications*, 2011: 1037-1041.
- [22] GAGLIARDI R M, KARP S. *Optical communications*[M]. New York: Wiley, 1995.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(No. U1433110), the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (No. 2013JC2-15), the Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (No. 14JK1319), the Graduate Innovation Fund of Xi'an Polytechnic University (No. CX201603) and the Control Science and Engineering Group Construction of Xi'an Polytechnic University (No. 107090811)