

紫外光移动自组网节点设计及通信性能分析

宋鹏^{1,3}, 周显礼¹, 赵太飞^{2,3}, 李云红¹, 苏彩霞¹

¹西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048;

²西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

³陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室(西安理工大学), 陕西 西安 710048

摘要 将无线紫外光通信与移动自组网技术相结合,可以有效扩展无线紫外光通信范围。基于空分复用原理设计一种收发一体的紫外光移动自组网通信节点装置,给出通信节点间捕获、对准、跟踪(APT)的方法,仿真分析捕获所需时间与节点转速之间的关系。基于非直视紫外光通信理论,用蒙特卡罗方法仿真分析设计节点中 2 节点间通过开关键控(OOK)调制、误码率为 10^{-5} 时的传输码速率。户外非直视紫外光通信实验结果表明,实验获得的码速率曲线与仿真结果具有相同的趋势。当发射功率为 50 mW、非直视通信的最大偏转角设定为 6° 、误码率为 10^{-5} 时,发射端传输码速率可达 1.64×10^6 Baud \cdot s⁻¹。

关键词 光通信; 紫外光通信; 捕获、对准、跟踪; 非直视

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0306004

Node Design and Analysis of Communication Performance Between Nodes in Ultraviolet Mobile Ad Hoc Networks

Song Peng^{1,3}, Zhou Xianli¹, Zhao Taifei^{2,3}, Li Yunhong¹, Su Caixia¹

¹College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

²School of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

³Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing,

Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract The combination of wireless ultraviolet (UV) communication and mobile ad hoc network technology can effectively expand communication range of wireless UV communication. Using space division multiplexing, we design a UV mobile ad hoc network communication node transceiver and propose the method of acquisition, pointing, and tracking (APT) among communication nodes. The relationship between the time of acquisition and the speed of the node is simulated and analyzed. Based on the non-line-of-sight (NLOS) UV communication theory, we simulate the transmission rate between the designed two nodes by the Monte Carlo method when the on off keying (OOK) modulation is used and the bit error rate is 10^{-5} . We do an outdoor NLOS UV communication experiment, and the experimental results show that the code rate curve and the simulation results have the same trend. When the transmit power is 50 mW, the maximum deflection angle of NLOS communication is set to 6° , and the bit error rate is 10^{-5} , the originating code rate can reach 1.64×10^6 Baud \cdot s⁻¹.

Key words optical communications; ultraviolet communication; acquisition, pointing, and tracking (APT); non-line-of-sight

OCIS codes 060.2605; 260.7190; 220.1080; 010.1310

收稿日期: 2017-05-16; 收到修改稿日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民航局民航联合研究基金(U1433110)、陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室(西安理工大学)开放课题(2016CP05)、陕西省科技厅工业科技攻关项目(2016GY-047)、陕西省科技厅自然科学研究计划-(重点项目)(2016JZ026)

作者简介: 宋鹏(1976—),男,博士,副教授,主要从事无线紫外光通信技术方面的研究。E-mail: pengsong916@126.com

1 引 言

紫外光(UV)通信是一种以“日盲区”(200~280 nm)紫外光为载体、以大气为传输媒介的通信技术^[1-2],具有保密性好、抗干扰能力强、可非直视(NLOS)通信等优点,在无人机的编队飞行、装甲集群以及舰队间的保密通信等方面有着广阔的应用前景^[3-6]。然而,目前商用级别的紫外 LED 发射功率较低,再加上臭氧等气体分子的吸收作用,以及空气中悬浮颗粒的散射作用和大气湍流的偏折作用,使得作为通信载体的紫外光传输距离较短^[7-10]。紫外光移动自组织网被认为是一种应用自由灵活,能够有效扩大紫外光通信范围的技术方案^[11]。因此,对紫外光移动自组织网相关技术进行研究,尤其是对移动自组织网节点结构、节点间通信性能开展研究具有重要意义。

目前,对紫外光组网的研究主要包括节点覆盖范围、链路间干扰、网络连通性和路由协议等。2011年,Vavoulas 等^[12-13]研究了紫外光组网的覆盖范围及多跳网络中的节点联通问题,指出适当选择节点传输范围是保证网络连接健壮性的关键,当传输范围小时,孤立的节点多,而传输范围大时又易受干扰,因此需要适当权衡节点密度和节点传输范围,以确保隔离节点数最少。2012年,赵太飞等^[14-15]基于蒙特卡罗方法建立非直视紫外光传输模型,该模型适用于近距离紫外光散射通信时的覆盖范围分析。2013年,Kashani 等^[16]探讨了如何确定串行和并行通信中继最佳位置的问题,目的是尽量减少中断概率,以改进性能,并指出最优的放置位置取决于系统和信道参数。2015年,李济波等^[17]针对紫外光通信中光源器件发射功率受限和大气信道严重衰减作用造成传输距离近的问题,提出一种用于非直视通信的抗干扰中继链路方法,提高了系统功率利用率。同年,杨刚等^[18]提出一种基于时分多址接入的紫外光通信定向邻居发现新算法,新算法在定向发送与接收算法的基础上采用退避时延机制,可以快速适应拓扑变化,解决了节点冲突问题。2016年,张曦文等^[19]采用一种基于空分复用的多信道紫外光通信定向信道接入协议,建立飞机间紫外光通信网络模型,解决了飞行编队利用紫外光定向通信时存在的“耳聋”问题。然而,关于紫外光移动自组网的节点设计和性能分析还未见报道。

本文设计了一种收发一体的紫外光移动自组网通信节点装置,提出一种用于主从节点间捕获、对

准、跟踪(APT)的方法,仿真分析了基于该方法完成捕获所需的时间。仿真分析及实验验证了误码率为 10^{-5} 条件下不同通信距离主从节点间的信息传输速率,所得仿真和实验结果对紫外光移动自组网通信的进一步研究具有一定的实际意义。

2 节点设计及节点间捕获、对准、跟踪的方法

2.1 紫外光移动自组网的节点设计

基于空分复用原理,收发一体的紫外光移动自组网通信节点设计如图1所示。图1中:“×”表示紫外光发射器件,如紫外 LED;“○”表示紫外光光电转换器件,如光电倍增管(PMT)。为了避免发射光信号对自身光电转换器件的干扰,借鉴文献^[20]中的研究结果“链路间夹角应该设置为 $60^\circ\sim 120^\circ$ 之间”,本节点设计中发光器件和光电转换器件呈 90° 正交布局,即同一个节点上2条链路间的夹角为 90° 。载有发光器件和光电转换器件的四棱柱的中心轴固定在伺服电机的转轴上,由伺服电动机驱动。主节点的四棱柱顺时针转动,从节点的四棱柱逆时针转动且与主节点转速相同。主节点发光器件的发散角为 ϕ_1 ,从节点光电转换器件的视场角为 ϕ_2 。经过相同时间,主从节点旋转的角度(偏转角)分别为 θ_1 和 θ_2 ,由于主从节点转速相同,因此 $\theta_1 = \theta_2$ 。此节点设计可以实现紫外光直视(LOS)通信和非直视通信的无缝切换,直视通信如图1中实线阴影所示,非直视通信如图1中虚线阴影所示。

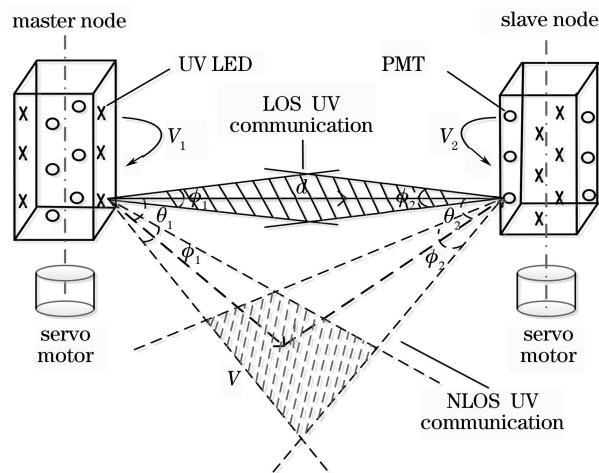


图1 收发一体的紫外光移动自组网通信节点设计
Fig. 1 Node design of UV mobile ad hoc network communication node transceiver

紫外光直视通信和非直视通信切换过程如图2所示。紫外LED的发散角约为 6° ,光电倍增管的视

场角约为 80° 。假设主节点上的紫外 LED 和从节点上的光电倍增管已经对准,可以实现主节点发、从节点收的单工通信。从图 2(a)可见,当主从节点的偏转角 $\theta_1 = \theta_2 < \phi_1/2$ 时,从节点的光电倍增管处于主节点的发散角照射范围内,主节点 LED 发出的光子可经过直视路径传输到达从节点的光电倍增管,这样主从节点间就可以实现紫外光直视通信。从图 2(b)可见,当主从节点的偏转角 $\theta_1 = \theta_2 = \phi_1/2$ 时,从节点的光电倍增管处于主节点发射光锥的边缘,此时主从节点间处于紫外光直视和非直视通信的临界状态。从图 2(c)可见,当主从节点的偏转角 $\theta_1 = \theta_2 > \phi_1/2$ 时,从节点的光电倍增管不在主节点的发散角照射范围内,主节点 LED 发出的光子只能经过单次或者多次散射传输到达从节点的光电倍增管,这样主从节点间只能实现紫外光非直视通信;当 $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$ 时,从节点上的紫外 LED 和主节点上的光电倍增管对准,可以实现从节点发、主节点收的单工直视通信;当偏转角继续增大时,主从节点间的直视通信和非直视通信切换过程与图 2 所示类似。

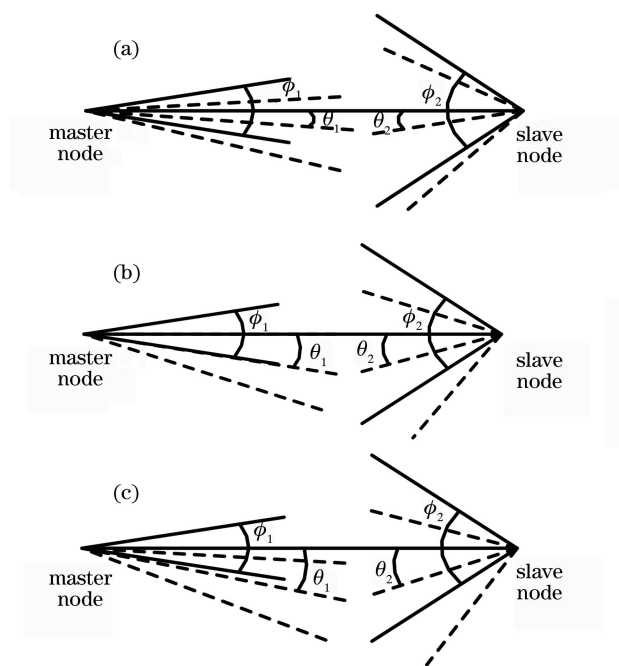


图 2 紫外光直视和非直视通信切换过程。

(a) 直视通信; (b) 临界状态; (c) 非直视通信

Fig. 2 Switching process of LOS and NLOS UV communication.

(a) LOS communication;

(b) critical state; (c) NLOS communication

2.2 紫外光移动自组网节点间捕获、对准、跟踪的方法

捕获就是从节点能收到主节点发送的数据,获得主节点的实时转速、相位等信息。主从节点完成

捕获前的相对位置关系如图 3 所示。从节点可能从水平面的任意方向靠近主节点,此时主节点发光器件的初始相位和从节点光电转换器件的初始相位均是任意的,二者的初始相位差在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 随机分布。主从节点捕获过程为:主节点转速固定,如 $1 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$,从节点转速以某一加速度线性增加,如转动加速度为 $1 \text{ r} \cdot \text{s}^{-2}$,在主从节点任意相对位置和任意初相位差的条件下,主节点的发光器件能和从节点的光电转换器件在较短的时间对上,从节点将收到主节点发送的实时相角、转速等信息,完成捕获。

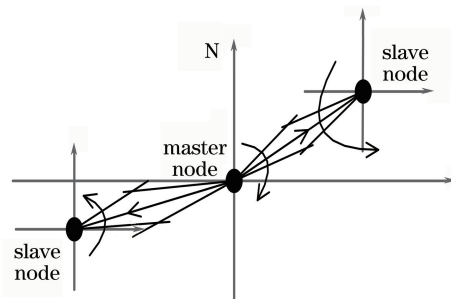


图 3 主从节点完成捕获前的相对位置关系

Fig. 3 Relative position relationship between master and slave nodes before acquisition

对准就是当主从节点完成捕获后,从节点对收到的信息进行处理,得出收到主节点信号电压最大值的时刻 t ,以及该时刻主节点发射端的相角 ϕ_1 和从节点接收端的相角 ϕ_2 ,主节点的发射端将在主节点旋转一个周期后重新指向相角 ϕ_1 ,从节点据此调整转速,并且在主节点旋转一个或几个整周期后,从节点接收端指向相角 ϕ_2 。最终使从节点的转速与主节点转速一致,并且让从节点在特定的时间达到特定的相角,实现主从节点的紫外光直视通信。

跟踪就是在主从节点完成捕获、对准后,微调从节点转速,使主从节点的紫外光收发装置始终保持一个较好的动态对准状态。主从节点跟踪的流程图如图 4 所示。在从节点旋转的每个周期内,从节点接收装置的相位适度超前;如果检测到接收的主节点信号幅度增大,则从节点接收装置的相位就继续超前;否则,从节点接收装置的相位则要适度滞后。如果外部干扰太大,主从节点长时间不能对准,那么主从节点将重新开始捕获、对准和跟踪过程;如果在规定时间内完成主从节点的对准,则本次追踪结束。

3 仿真分析

3.1 主从节点的捕获时间

主节点转速设定为 $1 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$,主节点发光装置

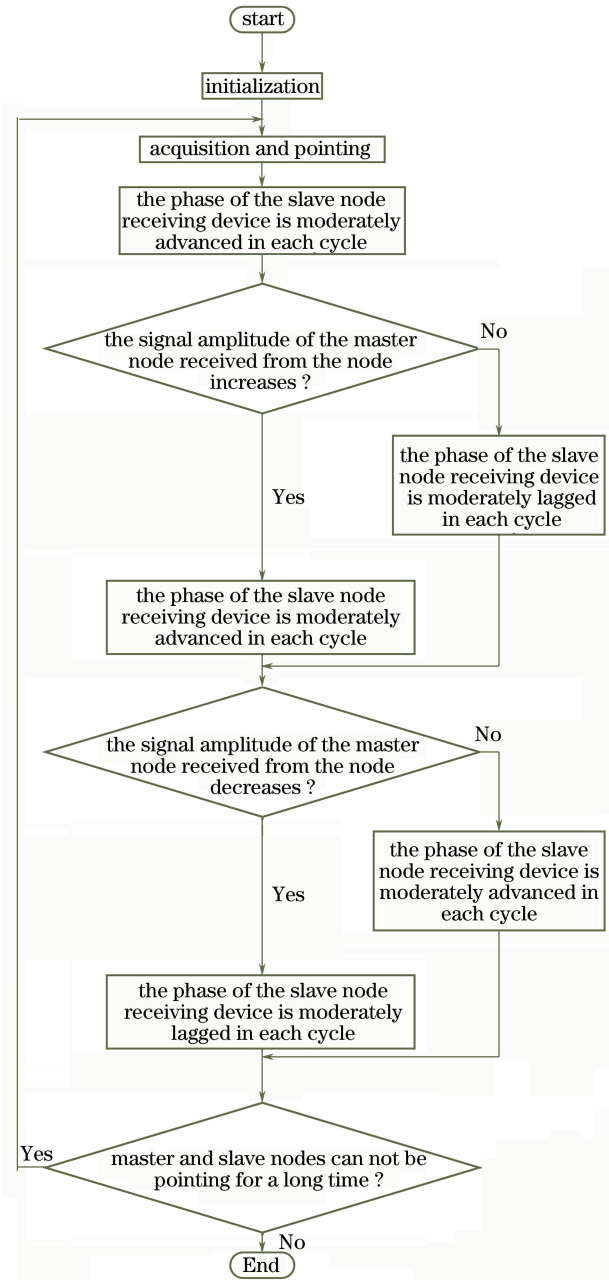


图 4 主从节点跟踪流程图

Fig. 4 Flow chart of master-slave node tracking

初始相位为 0° ，从节点从静止状态开始加速转动，且其接收装置的初始相位在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 中取值。主从节点完成捕获所需时间与主从节点初始相位差之间的关系如图 5 所示，随着从节点转动加速度增大，完成捕获的最大时间和最小时间都逐渐减小。

主从节点完成捕获所需的平均时间与从节点转动加速度的关系如图 6 所示，当从节点转动加速度大于 $0.8 \text{ r} \cdot \text{s}^{-2}$ 时，主从节点完成捕获所需的平均时间小于 10 s。

3.2 主从节点间的通信性能

紫外光发射端采用开关键控(OOK)调制方式，

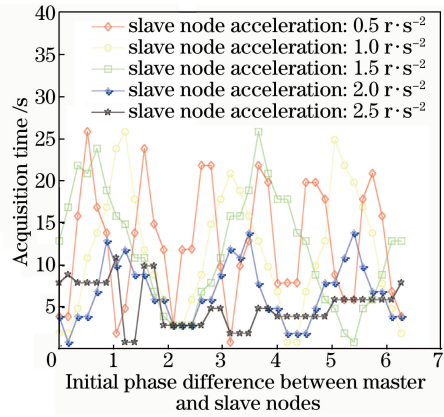


图 5 主从节点完成捕获所需时间与主从节点初始相位差的关系

Fig. 5 Acquisition time of master and slave nodes versus initial phase difference between master and slave nodes

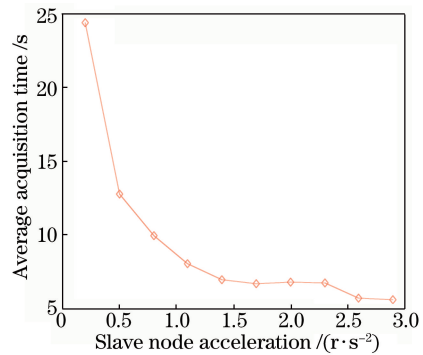


图 6 主从节点完成捕获所需平均时间与从节点转动加速度的关系

Fig. 6 Average acquisition time of master and slave nodes versus acceleration of slave node

假设节点间通信是单发单收，接收端直接检测，不考虑其他链路间的干扰，在调制信号的每个时隙，光子到达接收端的数量呈泊松分布，则系统的误码率可表示为

$$P_e = \exp(-\lambda_s)/2, \quad (1)$$

式中 λ_s 为每一个脉冲间隔时隙内到达接收端的光子数，表示为

$$\lambda_s = \eta_1 \eta_2 P_t / (LR_B E), \quad (2)$$

式中， η_1 为光电倍增管的检测效率； η_2 为滤光片的效率； P_t 为发射端光功率； R_B 为发射端所加调制信号的码速率； $E = h\nu$ 为一个光子所携带的能量， h 为普朗克常数， $\nu = c/\lambda$ ， c 为光速， λ 为波长； L 为系统的路径损耗。

为保证主从节点在完成捕获、对准、跟踪后能够正常通信，要求误码率小于 10^{-5} 。依据 (1) 式、(2) 式，当主从节点的偏转角 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 、接收信号误码率为 10^{-5} 时，发射端传输信号码速率可表示为

$$R_{B,\theta} = -\eta_1 \eta_2 P_t / [L_\theta \ln(2 \times 10^{-5}) E], \quad (3)$$

式中 L_θ 为主从节点的偏转角 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 时的路径损耗,可用蒙特卡罗方法仿真求得。蒙特卡罗方法仿真计算路径损耗的详细步骤请见参考文献[20-21]。

$$L_\theta = \frac{P_t}{P_r} = \frac{ME}{PME} = \frac{1}{P}, \quad (4)$$

式中, M 为发射端发射的光子数, P_r 为接收端光功率, P 为发射端发射一个光子能到达接收端的平均概率,可表示为

$$P = \sum_{m=1}^M (P_N)_m / M, \quad (5)$$

其中 $(P_N)_m$ 为第 m 个光子最多经过 N 次散射能到达接收端接收面的总概率。

为了接收端检测信号的方便,主从节点通信时发射端发送信息的码速率应该固定。当主从节点旋转过程中偏转角小于 $\pm\theta$ 时,主从节点间的路径损耗小于 L_θ ,所以当主从节点旋转过程中以固定的码速率 $R_{B,\theta}$ 发送数据时,接收端接收信号的误码率小于 10^{-5} ,能满足正常的通信要求。

在假定节点转速均匀并且发送码速率为 $R_{B,\theta}$ 的条件下,主从节点转动一周所耗时间设为 t ,当主从节点的偏转角小于 $\pm\theta$ 时,主从节点间可以实现误码率小于 10^{-5} 的直视或者非直视单工通信,即主从节点转动一周的过程中能实现通信的有效角度为 2θ ,有效通信时间为 $2\theta t / 360$,则主从节点间能传输的信息量为 $Q_\theta = 2\theta t \times R_{B,\theta} / 360$,主从节点间信息传输速率可表示为

$$R_{B,\theta} = \frac{Q_\theta}{t} = \frac{2\theta}{360} R_{B,\theta} = \frac{\theta \eta_1 \eta_2 P_t}{180 \times L_\theta \ln(2 \times 10^{-5}) E} \quad (6)$$

部分仿真参数设置如表 1 所示,其他参数为:发射功率 $P_t = 50 \text{ mW}$;发散角为 6° ,视场角为 80° ,收端仰角为 0° ,收发端偏转角从 4° 增大到 20° ,步进为

表 1 部分仿真参数

Table 1 Part of simulation parameters

Parameter	Value
Wavelength λ /nm	260
Absorption coefficient k_a / km^{-1}	0.802
Rayleigh scattering coefficient k_s^R / km^{-1}	0.266
Mie scattering coefficient k_s^M / km^{-1}	0.284
Receiving aperture area A / cm^2	1.92
Mie phase function parameter f	0.5
Number of transmitted photons M	10^6
Number of multiple scattering N	5
Mie phase function asymmetry parameter g	0.72
Rayleigh phase function scattering parameter γ	0.017

2° ;光电倍增管的检测效率 $\eta_1 = 30\%$,滤光片的效率 $\eta_2 = 30\%$;通信距离为 $20 \sim 70 \text{ m}$,间隔 10 m 。

仿真得到通信距离与路径损耗的关系。如图 7 所示。当收发端偏转角相同时,路径损耗随通信距离的增大而增大;当通信距离一定时,路径损耗随收发端偏转角的增大而增大。

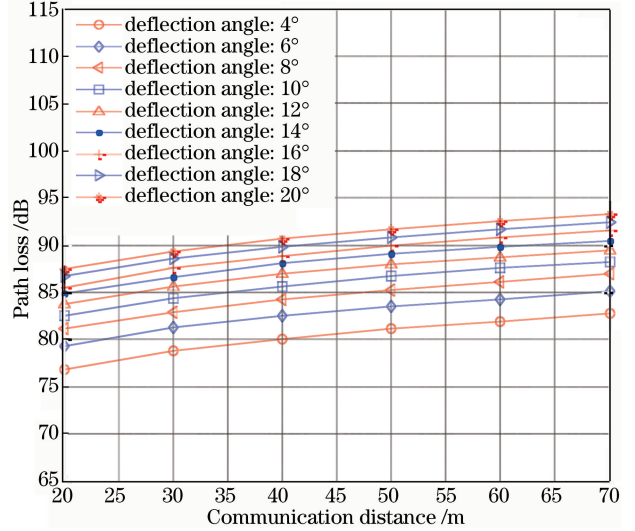


图 7 通信距离与路径损耗的关系

Fig. 7 Relationship between communication distance and path loss

对于不同的通信距离,接收信号误码率为 10^{-5} 时,由(3)式、(6)式分别求得收发端偏转角与发射端码速率、信息传输速率的关系,如图 8 所示。

由图 8(a)可见,当收发端偏转角相同时,通信距离越小,发射端可传输信号的码速率越大;通信距离一定时,收发端偏转角越大,发射端可传输信号的码速率越小。当通信距离为 70 m 、主从节点偏转角 $\theta_1 = \theta_2 = 6^\circ$ 、接收信号误码率为 10^{-5} 时,发射端传输信号码速率约为 $1.64 \times 10^6 \text{ Baud} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由图 8(b)可见,当主从节点收发端偏转角相同时,随着通信距离减小,节点间可传输的信息速率逐渐增大;当通信距离一定时,随着节点间收发端偏转角增大,节点间可传输的信息速率逐渐减小。当发射端传输信号的码速率选为 $1.64 \times 10^6 \text{ Baud} \cdot \text{s}^{-1}$ 、主从节点间有效通信的最大偏转角选定为 $\theta_1 = \theta_2 = 6^\circ$ 、 70 m 通信距离内接收信号误码率小于 10^{-5} 时,主从节点间信息传输速率约为 $5.47 \times 10^4 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$,可以满足主从节点间正常通信要求。

4 实验验证

4.1 实验条件

实验地点为西安工程大学金花校区田径场,时

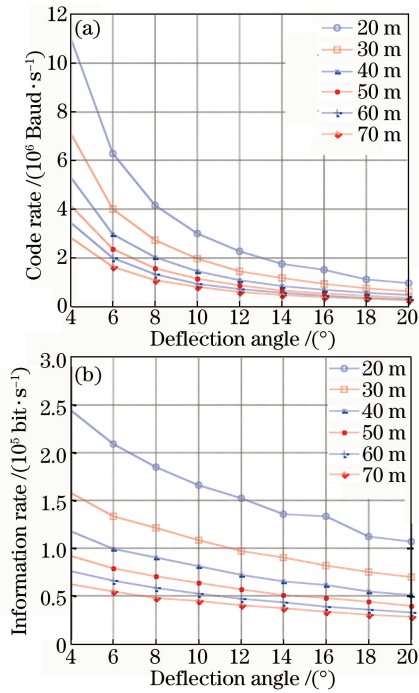


图8 收发端偏转角与(a)发射端码速率及(b)信息传输速率的关系

Fig. 8 Relationship between deflection angle and

(a) transmitted code rate and (b) information transmission rate

间为2017年1月16日晚上08:00—11:00。实验过程中所测得的温度为1℃,相对湿度为54%,大气压强为 1.017×10^5 Pa,风速为1.5 m/s,能见度5~10 km。实验中通信距离20~70 m,间隔10 m。收发端仰角都为0°,在每个不同距离点,收发端偏转角从5°~20°向同一方向同时改变,步进为5°。

搭建的紫外光通信实验平台如图9所示。图中紫外光接收机、发射机包含的关键器件分别是滨松高灵敏度光电倍增管(R7154)和中心波长为255 nm的紫外LED(UVTOP255)。以光电倍增管作为光信号检测器件,通过其输出信号可估算出入射光功率,其输出电流表达式为

$$I = N_r \eta_1 \eta_2 Ge / t, \quad (7)$$

式中 N_r 为入射到接收端光电倍增管的光子数,因实验中未使用滤光片,此处 $\eta_2 = 1$, G 为光电倍增管增益, e 为电子所带电荷量, t 为电流持续时间。实验中光电倍增管的输出端串接电阻为 $R = 10$ k Ω ,将电流信号转变为电压信号 U ,以方便示波器对数据进行采集,此时 $I = U/R$,因此实验中接收光功率可表示为

$$P_r = \frac{EN_r}{t} = \frac{UE}{R\eta_1\eta_2Ge}. \quad (8)$$

最终得出实验中的路径损耗为

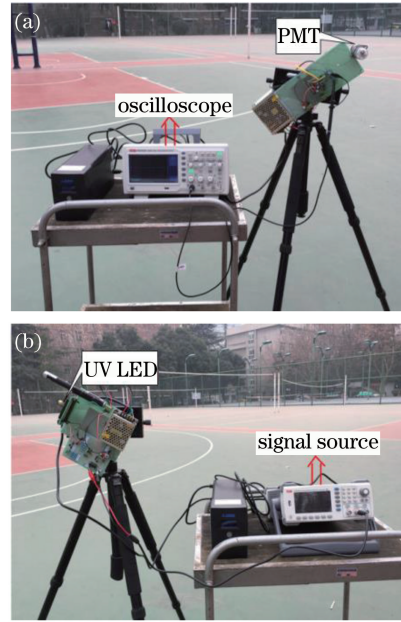


图9 紫外光通信实验装置。

(a) 紫外光接收机;(b) 紫外光发射机

Fig. 9 Experimental device for UV communication.

(a) Receiver;(b) transmitter

$$L' = 10 \lg \frac{P_t}{P_r} = 10 \lg \frac{P_t R \eta_1 \eta_2 G e}{U E}. \quad (9)$$

4.2 实验结果及分析

信号源给紫外LED提供占空比为50%、频率分别为10 kHz和100 kHz的方波信号,依据紫外LED的工作电流和环境温度,当输入方波信号为高电平时,紫外LED发出的光功率 $P_t = 0.6$ mW。接收端示波器的输出信号波形如图10所示。图10(a)为50 m处、收发端偏转角为5°、发射频率为10 kHz的方波时,示波器输出信号波形,波形较为规整,可以抽样判决;图10(b)为50 m处、收发端偏转角为5°、发射频率为100 kHz方波时,示波器输出信号波形,波形畸变较为严重,但依然可以抽样判决。实验中未使用滤光片,从输出波形可知,背景噪声约为70 mV,因此在进行相关数据计算时,应去除该背景噪声。

对比图10(a)、(b),选用10 kHz的输出波形进行路径损耗相关计算,由(9)式求得通信距离与路径损耗的关系,如图11所示。当偏转角一定时,路径损耗随着通信距离的增大而增大;当通信距离一定时,路径损耗随偏转角的减小而减小。

当发射功率 $P_t = 50$ mW、接收信号误码率为 10^{-5} 时,由图11中实验所得路径损耗和(9)式、(3)式、(6)式分别求得收发端偏转角与发射端码速率、信息传输速率的关系,如图12所示。

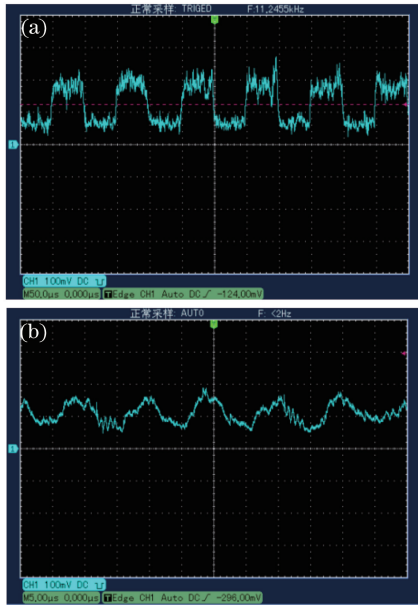


图 10 发射频率为(a)10 kHz 和(b) 100 kHz 方波时接收端示波器输出信号波形

Fig. 10 Receiver oscilloscope output signal waveform with (a) 10 kHz and (b) 100 kHz transmission frequency square wave

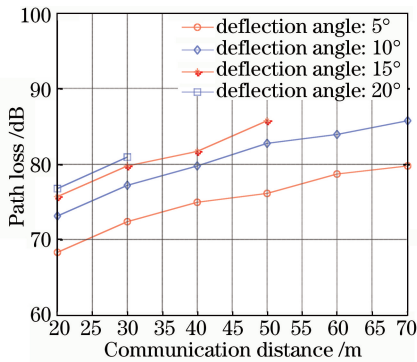


图 11 实验中通信距离与路径损耗的关系

Fig. 11 Relationship between communication distance and path loss in experiment

分别对比图 8 和图 12 可见,在相同发射功率和误码率条件下,实验和仿真所得收发端偏转角与码速率、信息速率关系曲线具有相同的趋势:即随着收发端偏转角的增大,码速率和信息速率都减小。当收发端偏转角设定为 6° 、通信距离为 70 m 时,实验所得发射端传输信号码速率和主从节点间信息传输速率分别约为 $1.6 \times 10^7 \text{ Baud} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $5.33 \times 10^5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$,仿真所得发射端传输信号码速率和主从节点间信息传输速率分别约为 $1.64 \times 10^6 \text{ Baud} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $5.47 \times 10^4 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$,可知实验所得码速率和信息传输速率约是仿真所得码速率和信息传输速率的 10 倍。造成该差异的主要原因是本次实验在晚上进行,为了

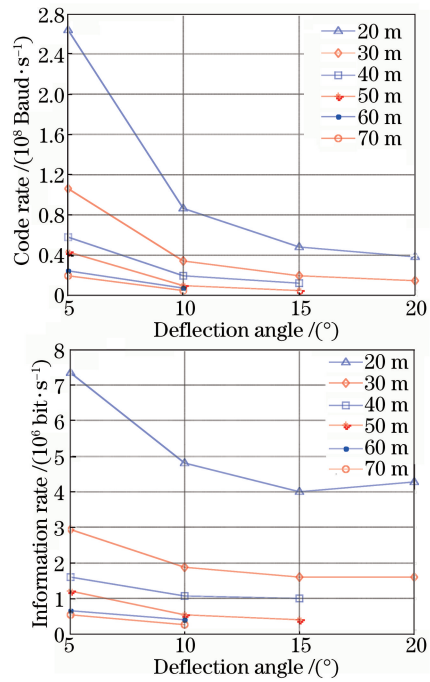


图 12 实验所得收发端偏转角与(a)发射端码速率及(b)信息传输速率的关系

Fig. 12 Relationship between deflection angle and (a) transmitted code rate and (b) information transmission rate obtained in the experiment

扩大通信距离,没有使用滤光片,实验中紫外光的散射传播易受大气复杂粒子的影响,加之接收机光电倍增管波长响应范围有一定的宽度,光电倍增管实际的接收光功率偏大,使得实验中紫外光通信节点间路径损耗小于蒙特卡罗方法理论计算的路径损耗。

5 结 论

基于空分复用原理,设计一种紫外光移动自组网通信节点装置,提出适用于所设计通信节点间捕获、对准、跟踪的方法。通信节点间捕获时间的仿真结果表明:采用主节点转速固定、从节点转速增加的方式,能快速实现主从节点任意相对位置和任意初始相位情况下的捕获。实验和仿真所得收发端偏转角与发射端码速率、信息传输速率的关系表明:当发射功率为 50 mW、主从节点间的有效通信最大偏转角设定为 6° 、发射端码速率为 $1.64 \times 10^6 \text{ Baud} \cdot \text{s}^{-1}$ 、70 m 通信距离内误码率小于 10^{-5} 时,收发端信号传输速率可达 $5.47 \times 10^4 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$,可以满足主从节点间的正常通信要求。

参 考 文 献

[1] Wang L, Xu Z, Sadler B M. Non-line-of-sight

- ultraviolet link loss in noncoplanar geometry[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1263-1265.
- [2] He H, Ke X 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.
- [3] Xu Z, Sadler B M. Ultraviolet communications: potential and state-of-the-art[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(5): 67-73.
- [4] Yuan R, Ma J. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. *China Communications*, 2016, 13(6): 63-75.
- [5] Shaw G A, Siegel A M. Field testing and evaluation of a solar-blind UV communication link for unattended ground sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5417: 250-261.
- [6] 孙庆. 紫外光通信在未来战场中的应用[C]. 中国青年光学学术研讨会, 2007.
- [7] Ding H, Chen G, Majumdar A K, *et al.* Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8038: 80380J.
- [8] Zuo Y, Xiao H, Wu J, *et al.* Effect of atmospheric turbulence on non-line-of-sight ultraviolet communications[C]. *International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, IEEE, 2012, 11(4): 1682-1686.
- [9] Wang P, Xu Z. Characteristics of ultraviolet scattering and turbulent channels[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(15): 2773-2775.
- [10] Ardakani M H, Heidarpour A R, Uysal M. Non-line-of-sight ultraviolet communications over atmospheric turbulence channels[C]. *International Workshop on Optical Wireless Communications*, IEEE, 2015: 55-59.
- [11] 柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 36-39.
- [12] Vavoulas A, Sandalidis H G, Varoutas D. Connectivity issues for ultraviolet UV-C networks[J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2011, 3(3): 199-205.
- [13] Vavoulas A, Sandalidis H G, Varoutas D. Node isolation probability for serial ultraviolet UV-C multi-hop networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, 3(9): 750-757.
- [14] Zhao T F, Ke X Z. Monte Carlo method simulates the non-line-of-sight ultraviolet scattering coverage[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(11): 285-296.
赵太飞, 柯熙政. 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): 285-296.
- [15] Zhao T F, Zhang A L, Jin D, *et al.* Research on the inter-link interference model in wireless ultraviolet NLOS communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706023.
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.
- [16] Kashani M A, Safari M, Uysal M. Optimal relay placement and diversity analysis of relay-assisted free-space optical communication systems[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(1): 37-47.
- [17] Li J B, Wu X J, Wang H X, *et al.* Analysis of anti-jamming relay link method and its power requirement for non-line-of-sight ultraviolet communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 030601.
李济波, 吴晓军, 王红星, 等. 紫外光非直视通信抗干扰中继链路方法及其功率需求分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 030601.
- [18] Yang G, Li X Y, Chen M, *et al.* A new time-multiple access algorithm for neighborhood discovery of ultraviolet self-organizing networks[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(6): 1074-1080.
杨刚, 李晓毅, 陈谋, 等. 一种新的紫外光自组织网络的时间多址接入邻居发现算法[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(6): 1074-1080.
- [19] Zhang X W, Zhao S H, Li Y J, *et al.* Diversified MAC protocol for multi-channel inter-cell UV communication based on space division multiplexing[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(3): 451-455.
张曦文, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于空分复用的多信道机间紫外光通信定向 MAC 协议[J]. *激光技术*, 2016, 40(3): 451-455.
- [20] Song P, Ke X, Song F, *et al.* Multi-user interference in a non-line-of-sight ultraviolet communication network[J]. *IET Communications*, 2016, 10(13): 1640-1645.
- [21] Song P, Ke X Z, Xiong Y Y, *et al.* Pulse broadening effect of none-line-of-sight viewing ultraviolet in non-coplanar 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.