

文章编号: 1000-7032(2023)12-2277-10

## 可见光通信中无人机搜寻通信光源的优化方法

肖 华<sup>1</sup>, 王艳菊<sup>2</sup>, 王湛朗<sup>3</sup>, 郭 闯<sup>1</sup>, 姜淇予<sup>1\*</sup>

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088;

2. 新加坡南洋理工大学 电子与电气工程学院, 新加坡 639798; 3. 湘潭大学 数学与计算科学学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 提出了一种解决无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)在可见光通信(Visible-light communication, VLC)中光源定位不准确的方法,该方法基于扩大及规律缩小搜索路径的方法,最终找到光源以及最佳通信位置。为了提高本方法的搜索成功率( $\eta$ ),本文针对通信光源的光分布对 $\eta$ 、搜索总路程的影响,以及光电探测器的探测位置、探测接收角对接收光功率、 $\eta$ 的影响作出了分析。得到了在满足UAV探测功率阈值的条件下,光源提供的三维覆盖范围随光源朗伯系数的变化情况,可用于预估UAV在不同发光条件下的 $\eta$ 。以等边六边形搜索路径为例,在理想朗伯体条件下,UAV在光源覆盖半径最大为0.78 m时, $\eta$ 最高可高达0.74。本方法理论上避免了UAV定位不准确导致的无法实现可见光通信的问题,并提出通过优化搜索路径和光源的出光设计提高光源搜索成功率的方案,为UAV可见光通信的实现提出了解决方案。

**关键词:** 可见光通信; 无人机; 光分布; 优化方法

中图分类号: TN929

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230223

## Optimization Methods for UAVs to Search Light Source in VLC

XIAO Hua<sup>1</sup>, WANG Yanju<sup>2</sup>, WANG Zhanlang<sup>3</sup>, GUO Chuang<sup>1</sup>, JIANG Haoyu<sup>1\*</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Department of Electrical &amp; Electronic Engineering, Nanyang Technological University, 639798, Singapore;

3. School of Mathematics and Computing, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

\* Corresponding Author, E-mail: john\_h\_y\_walter@163.com

**Abstract:** We proposed a method to solve the problem of inaccurate positioning for unmanned aerial vehicles (UAVs) in visible-light communication (VLC). To sense the light source and find the optimum position for communication, the proposed method expands the search path first and then regularly narrows the search path. In order to improve the success rate ( $\eta$ ) of this method, we analyzed the influence of light distribution of the light source on  $\eta$  and the searching distance, and also studied the influence of the position and the receiving angle of the photodetector on the receiving power and  $\eta$ . Three-dimensional (3D) coverage range of the light source, which is determined by the Lambert coefficient and the threshold optical power that can be sensed by the photodetector, is obtained to estimate  $\eta$  of UAV under different circumstances. Taking the searching path of the equilateral hexagonal for example,  $\eta$  can reach up to 0.74 with the covering radius of the light source of 0.78 m by using idea Lambert-distributed light source. The proposed method avoids the inaccurate positioning of UAV, which causes the problem for the UAV to find the communication position in VLC. We theoretically proposed a solution to improve  $\eta$  by light-emission designing and path optimizing, providing the solution for UAVs to realize VLC.

收稿日期: 2023-09-30; 修订日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(62304054); 广东省教育厅青年创新人才项目(2020KQCX026); 广东省教育厅特色创新项目(2022KTSCX050); 湛江市海洋青年人才创新项目(2022E05003); 广东海洋大学科研启动经费资助项目(060302112101)  
Supported by National Natural Science Foundation of China(62304054); Youth Talent Program by Education Department of Guangdong Province(2020KQCX026); Characteristic Innovation Program of The Education Department of Guangdong Province(2022KTSCX050); Marine Young Talent Innovation Program of Zhanjiang City(2022E05003); Program for Scientific Research Start-up Funds of Guangdong Ocean University(060302112101)

**Key words:** visible light communication; unmanned aerial vehicles; light distribution; optimization method

## 1 引 言

由于无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)具备机动性强、操作便捷、续航时间长、成本可控等多种优势,近年来在目标攻击、天气监视、空中预警、地形侦察等军事领域以及智慧农业、建筑检查、航空摄影等民用领域都得到了快速发展以及广泛应用<sup>[1]</sup>。在数据采集和性能监控过程中,UAV与控制器之间的数据传输必不可少。除了微波和射频波之外,近年来,可见光(380~780 nm)已在很多场合作为载波用于数字信号传输。可见光通信(Visible-light communication, VLC)具有绿色环保、节能减排、不受电磁干扰、保密性强、设备简单等优点,有望成为 UAV 实现数据相互传输的新途径<sup>[2]</sup>。

UAV 可见光通信有望成为 UAV 在数据采集、绿色通信、保密通信等领域展开应用的关键技术。然而,该新通信模式的可行性很大程度上取决于信号光源以及 UAV 携带的光电探测器(Photoelectric detector, PD)之间的空间位置匹配性。在 UAV 飞行、信息传送过程中,由于天气、风力变化等因素造成的 UAV 抖动和定位不准确,往往会导致光源与 PD 的位置不匹配、PD 难以长时间对准光源等问题,最终容易造成信号中断、误码率上升。

为解决光通信效果不理想的问题,研究人员分别从光源调制带宽的提升、光源二次出光设计、优化算法性能提升、均衡技术等不同方面对通信链路进行改良。例如,阿卜杜拉国王科技大学 Ooi 课题组<sup>[3]</sup>,南方科技大学孙小卫、王恺课题组以及吉林大学张宇课题组<sup>[4-5]</sup>等对 CdSe/ZnS 量子点、钙钛矿等多种纳米发光材料在可见光通信中的调制带宽做出了分析与计算;华中科技大学罗小兵课题组<sup>[6]</sup>对用于 LED 光源二次出光设计、不同远程荧光粉涂覆结构对出光均匀度分布的影响做了广泛研究,为 LED 用于 VLC 提供了借鉴;兰州理工大学贾科军课题组<sup>[7]</sup>针对室内可见光通信提出了自适应比特-功率加载算法,在保证误码率性能时,相比等比特加载方法可节约 15% 的光功率和 30% 的电功率;中国科学院陈雄斌课题组<sup>[8]</sup>通过基于电路设计的预均衡、后均衡、模拟均衡等

方法,有效地提高了白光 LED 的通信传输速率。此外,复旦大学迟楠课题组<sup>[9]</sup>对基于 RGB LED 以及荧光粉 LED 的不同光通信复用技术进行了详细研究。

除上述因素之外,UAV 能否通过可见光实现数据的快速传输,较大程度上取决于 UAV 的定位系统。常用的 UAV 定位技术包括基于图像识别的视觉定位、全球定位系统(GPS)、基于载波相位差分(RTK)定位、基于超声波传感器的定位和基于气压计的定位等<sup>[10-12]</sup>。由于 UAV 仅能获得与地面的相对高度,图像识别法主要用于二维平面的定位。如表 1 所示,GPS 是 UAV 常用的定位方法之一,其定位误差约  $\pm 2$  m 范围内,受天气和电磁干扰的影响较大,因此,GPS 的精度无法满足 VLC 的要求<sup>[14]</sup>。超声波传感器和气压计一般用于 UAV 的高度定位,其误差在  $\pm 0.6$  m 范围内,较难满足 VLC 的要求<sup>[15]</sup>。采用 RTK 技术可以将垂直定位误差控制在约  $\pm 5$  cm 以内,水平定位误差控制在约  $\pm 3$  cm 以内,然而,由于 RTK 设备体积大,费用高,RTK 在 UAV 中的应用范围相对较窄<sup>[12]</sup>。基于当前技术,UAV 难以实现在 VLC 中的精确定位,也难以实现通信光源与 PD 的长时间对准,这对实现稳定的 VLC 数据传输是巨大的挑战。

表 1 常用无人机定位传感器<sup>[13]</sup>

Tab. 1 Conventional positioning sensor for UAVs<sup>[13]</sup>

传感器	优点	缺点
GPS	基于卫星的全局定位	易受天气干扰
TPK	基于载波相位差分的精确定位	价格昂贵 对 UAV 有较高要求
超声波	低成本、低载荷 抗干扰	精度低 作用范围有限
气压计	高度信息准确	受天气影响较大 易受到遮挡干扰
UWB	快速准确实施距离测量	多径效应明显
激光雷达	测距精度高 有光照鲁棒性	易受天气影响

为了解决定位不准确的问题,Wang 等<sup>[16]</sup>基于最小全局位置信息共享算法,提出了一种针对低成本固定翼 UAV 的精确飞行控制导航控制方法,并采用圆形路径进行数值模拟和实验飞行测试验证该方法的鲁棒性和可靠性。与传统 UAV 收集高度重叠的图像、拼接图像以获得正交图像的视觉定位方法不同,Feng 等<sup>[17]</sup>为了提高定位效率,通

过特征检测与匹配、几何变换矩阵计算、图像位置分配和映射等方法提出了一种接近实时的、基于单幅图像的视觉定位方法,为智慧农业提供了新渠道。Muthanna 等<sup>[18]</sup>为了解决 UAV 群在天气不佳条件下的定位问题,提出了将“开展数据采集的 UAV 群定位”视为一个多目标优化问题,通过路径规划、Mayfly 优化算法等手段在 UAV 通信实现了更高的服务质量、可靠性和节能效率。上述技术在一定程度上提高了 UAV 的定位精度,但需要复杂的计算系统,且无法消除定位误差。

为消除定位不准确对 UAV 实现光信号传输的影响,本文提出了一种通过规划 UAV 路径以规律地扩大、缩小光源搜索范围的方法,使得 UAV 通过持续感知周边光强来实现准确的通信光源位置搜索。研究综合考虑了通信光源的光分布对搜

索成功率、搜索总路程的影响,以及 PD 的探测位置、探测接收角对接收光功率、搜索成功率的影响。提出了通过优化搜索路径和光源的出光设计提高光源搜索成功率的解决方案。

## 2 理 论

理论部分包括本文提出的一种通信光源的搜索方法的实施方法以及 UAV 的接收光功率等参数的计算方法。

### 2.1 通信光源搜索方法

在理想条件下,UAV 在通信前应位于光源下方(A 位置),在完成身份互认后,利用机身上方的 PD 接收来自光源的光信号。然而在实际条件下,UAV 由于定位不准确,可能位于 B 位置(光源侧面)、C 位置(光源远处)、D 位置(光源上方)等,皆无法感知光源的存在(图 1(a))。

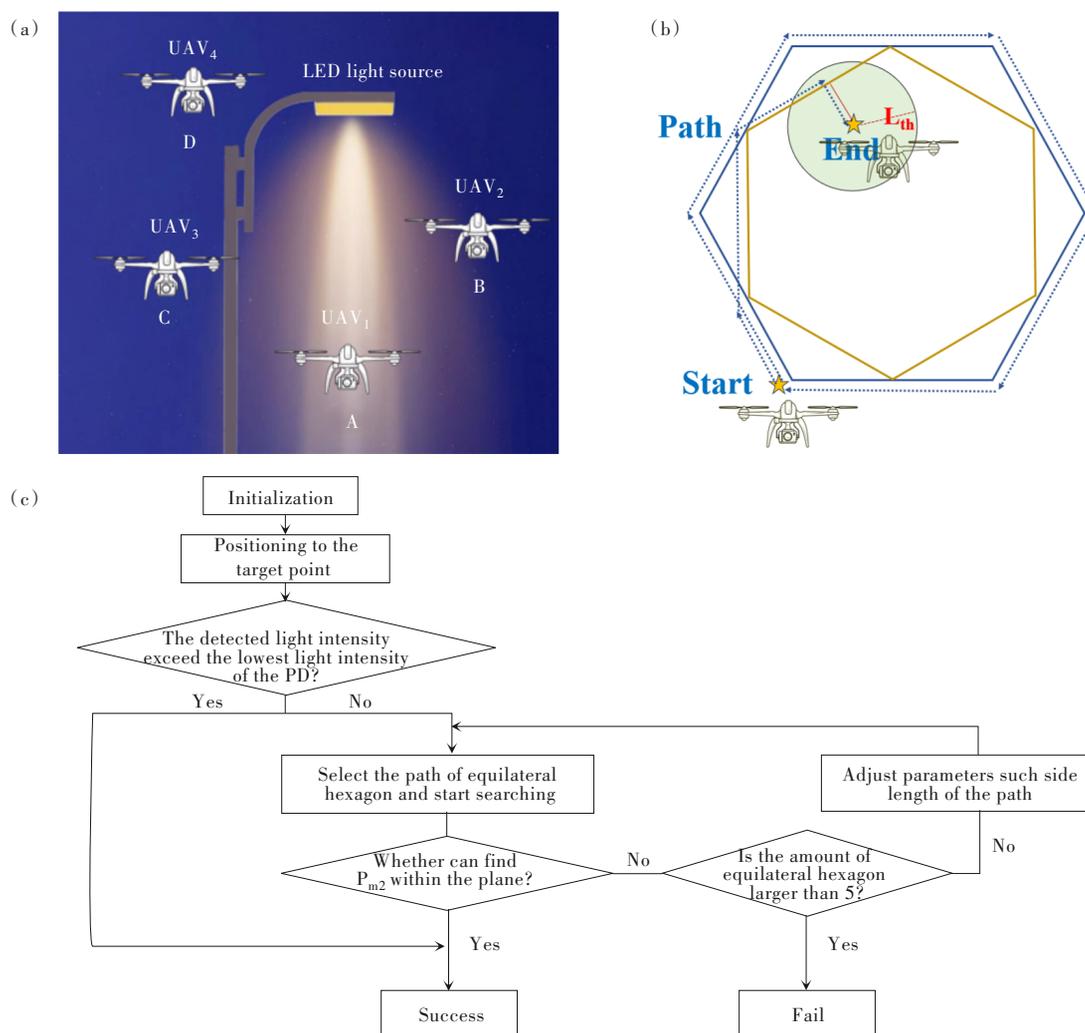


图 1 (a)UAV 在 VLC 中的定位场景示意图;(b)基于等边六边形的通信光源搜索路径示意图;(c)UAV 的搜索流程图。

Fig.1 Schematic diagrams of positioning process of UAVs before data transmission in VLC (a), light-source searching path based on the equilateral hexagon(b), and the flow chart of UAV searching(c).

本文提出一种方法,在 UAV 检测通信光源失败之后,采用多边形路径进行搜索——先扩大搜索范围,再有序缩小搜索范围以实现光源的搜索。本方法以等边六边形为例,在默认 UAV 位于光源下方的某个位置的前提下进行搜索,若搜索不成功再调整搜索策略。根据图 1(b)中的路径示意图以及图 1(c)中的流程图,本方法具体实施步骤如下:

(1) UAV 携带的 PD 对目标波长以外的光波长进行滤除,一旦 PD 获取了光源发射的携带光源身份信息的光信号,则可开启身份验证和通信模式;若检测到的目标光信号低于 PD 的最低阈值,则开启光源搜寻模式。

(2) UAV 以通信目标定位点为质心,在水平坐标对应的平面上设置边长为  $a$  m 的等边六角形 A1,  $a$  的值根据光源强度、无人机定位模块的定位精度来设置;如果该 UAV 的定位模块精度较低,  $a$  值适当取大一点,以保证该等边六角形 A1 范围覆盖光源的光通信范围。

(3) 将 UAV 定位到等边六角形 A1 上的任意一个坐标点后,使 UAV 沿等边六角形 A1 的其中一个边长飞行,飞行方向可为顺时针或者逆时针。

(4) 如果 UAV 沿着等边六角形 A1 飞行一周后没有探测到通信光源的光强,则在等边六角形 A1 六个边长的中点分别取六个坐标点作为等边六角形 A2 六个角的坐标。

(5) UAV 的飞行路径维持原飞行方向不变,并就近从等边六角形 A1 的某个边长的中点过渡到等边六角形 A2,并沿着等边六角形 A2 持续飞行。如果 UAV 飞行一周后没有探测到通信光源的光强,则再以同样的方法设置等边六角形 A3。

(6) 如果 UAV 在飞行的过程中突然探测到目标光信号光强,则 UAV 继续沿着该边飞行,并找到光强最大值  $P_{m1}$  对应的坐标点;在平面内作出一条通过该点并垂直于飞行边长的直线, UAV 在该垂线上找到最强光强  $P_{m2}$  对应的坐标点。

(7) UAV 在垂直坐标轴上找到避障模块限制的最高点位置坐标,并将该坐标位置的光强  $P_{m3}$  定义为 UAV 可获取的空间最大光强值  $P_{max}$  对应的坐标点,该坐标点即为 UAV 在空间范围内实现可见光通信需要悬停的坐标点。

采用多边形路径进行光源搜索的方法优点在于可以规律地扩大、缩小搜索范围,搜索效率高。本方法可推广并用于其他形状的搜索路径以展开光源搜索,如四边形、五边形、圆形等。

## 2.2 UAV 接收光功率计算

图 2 为 VLC 中的光视距传输链路示意图。LED 到 PD 的直接距离定义为  $d$ ; LED 与 PD 接收平面之间的高度为  $h$ ; LED 发射方向与 PD 的距离为  $l$ ;  $\theta$  为 LED 发射方向与 LED-PD 连线的夹角;  $\phi$  为 PD 的入射角; FOV 为 PD 的视场角,代表接收光的最大角度范围,其大小取决于 PD 的封装形式。

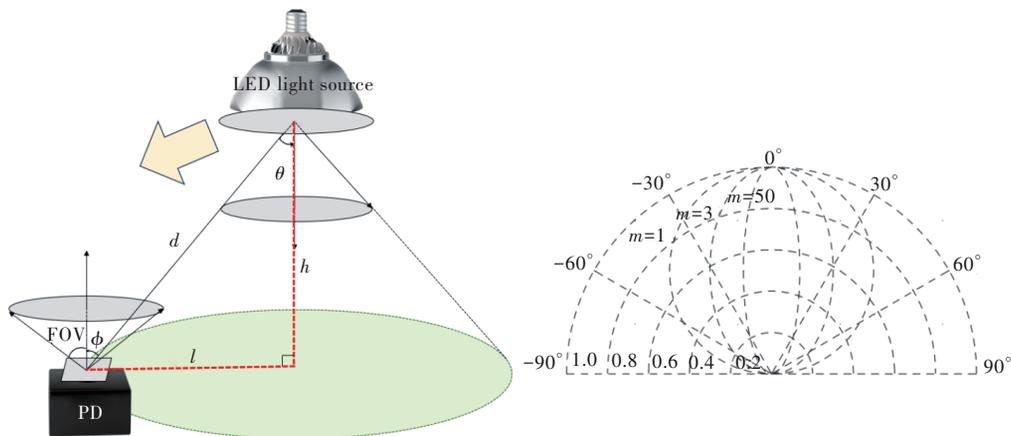


图 2 VLC 中的 LED 和 PD 之间的光视距传输链路以及不同  $m$  条件下的朗伯分布示意图

Fig.2 The line-of-sight(LOS) propagation link between the LED and the PD in VLC and the Lambert distribution with different values of  $m$

令 FOV 远大于  $\phi$ ,且 LED 的光辐射服从朗伯分布条件。朗伯辐射系数  $m$  与光源的半功率角 ( $\varphi_{1/2}$ ) 满足下述条件:

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos \varphi_{1/2})}, \quad (1)$$

如图 2 右图所示,LED 的光功率主要分布在  $\varphi_{1/2}$  范

圈内。 $m$  越大, 光的指向性越强, 发散角越小; 当  $m=1$  时, 即在  $\varphi_{1/2}=60^\circ$  时, LED 的光信号强度下降为垂直出射方向的一半, 此时 LED 可视为理想的朗伯体, 在接收平面实现均匀辐射。在视距链路中单位面积的信号强度  $P(\theta)$  可以表示为发射角  $\theta$  的函数:

$$P(\theta) = P_0 \cos^m \theta, \quad (2)$$

其中  $P_0$  为 LED 的中心光信号强度。当 LED 与 PD 距离为  $d$  时, 面积为  $A_i$  的 PD 的接收信号功率 ( $P_R$ ) 可计算为<sup>[19]</sup>:

$$P_R = \frac{(m+1)A_i g}{2\pi d^2} \cos^m \theta \cos \phi \cdot P(\theta), \quad (3)$$

其中  $g$  为透镜和滤光器等的增益,  $A_i$  为 PD 的有效接收截面。在本文计算中假设  $g=1$ ,  $P_0=1$  W,  $A_i=10^{-6}$  m<sup>2</sup>。由于 UAV 在光源搜寻过程中基本保持水平运行, 则  $\theta=\phi$ 。由于  $\cos \theta = h/\sqrt{l^2 + h^2}$ , 则  $l$  与  $h$  的比例对  $P_R$  起到重要作用。假设  $h = \beta l$ , 则公式 (3) 可描述为

$$\begin{aligned} P_R &= \frac{(m+1)A_i g}{2\pi d^2} \cos^{m+1} \theta \cdot P(\theta) \\ &= \frac{(m+1)A_i g}{2\pi d^2} \cos^{2m+1} \theta P_0 \\ &= \frac{(m+1)A_i g}{2\pi d^2} \cdot \left(\frac{h}{\sqrt{l^2 + h^2}}\right)^{2m+1} P_0 \\ &= \frac{(m+1)A_i g}{2\pi(1+\beta^2)l^2} \cdot \left(\frac{\beta}{\sqrt{1+\beta^2}}\right)^{2m+1} P_0 \\ &= \frac{(m+1)A_i g}{2\pi l^2} \cdot \frac{\beta^{2m+1}}{(1+\beta^2)^{(2m+3)/2}} P_0, \end{aligned} \quad (4)$$

当  $P_R$  达到功率感应阈值 ( $P_{th}$ ) 时, PD 刚好可以检测到光信号, 此时的阈值  $l$  以及  $h$  ( $l_{th}$  和  $h_{th}$ ) 可以表示为

$$l_{th} = \sqrt{\frac{(m+1)A_i g P_0}{2\pi P_{th}} \frac{\beta^{2m+1}}{(1+\beta^2)^{(2m+3)/2}}}, \quad (5)$$

以及

$$h_{th} = \sqrt{\frac{(m+1)A_i g P_0}{2\pi P_{th}} \frac{\beta^{2m+3}}{(1+\beta^2)^{(2m+3)/2}}}, \quad (6)$$

根据公式 (4), 在满足  $P_{th}$  条件下,  $l$  与  $h$  的关系可表示为

$$l = \sqrt{\left(\frac{(m+1)A_i g P_0 h^{2m+1}}{2\pi P_{th}}\right)^{2/(2m+3)} - h^2}. \quad (7)$$

本文以提出的通信光源搜索方法和光源光分布计算方法为理论指导, 以 Matlab 软件为计算工具, 对不同光分布和搜索路径条件下本方法的搜

索成功率、总路程等参数的动态变化进行了详细计算及成因分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 $l_{th}$ 和 $a$ 对搜索成功率的影响

为了保证无人机具备一定的搜索范围以及搜索效率, 本文将等边六边形的最大个数设置为 5, 即超过 5 次设置等边六边形则默认该次搜索失败, 可重新设置搜索条件展开搜索。根据常规雪崩二极管探测器的噪声功率和饱和功率的范围,  $P_{th}$  在计算中设置为  $10^{-7}$  W。由于 UAV 的搜索成功率很大程度上取决于给定平面内光线的覆盖范围, 因此  $l_{th}$  作为有效光覆盖半径, 对搜索成功率影响非常大。本工作用  $\eta$  描述 UAV 的搜索成功率, 定义为多次搜索光源的过程中, 成功搜索次数除以总搜索次数的商。

图 3(a) 描述了在光源和 UAV 距离 2 m 的条件下, 选择等边六边形路径, 朗伯辐射系数  $m$  为 1, 总搜索次数为  $10^4$  时, 等边六边形边长  $a$  在 0.1~1.0 m 的条件下,  $\eta$  随  $l_{th}$  增加的变化趋势。当  $a$ 、 $l_{th}$  较小时,  $\eta$  随  $l_{th}$  的增加呈近似线性增长趋势。随着  $l_{th}$  不断增大,  $\eta$  迅速达到最大值 1。当  $\eta=1$  时, 即在任意条件下, UAV 一定能感知到光源的位置。对于  $a$  较大的情况, 如  $a=1.0$  m,  $\eta$  能更快达到极值。产生这种现象的原因是: 较高的  $a$  可以促进 UAV 扩大搜索区域, 在相同  $l_{th}$  的条件下增加 UAV 感知光源的搜索距离和可能性。由于  $l_{th}$  的变化并不唯一取决于  $h$ , 因此图 3(a) 的结果和 UAV 的垂直高度无关。

图 3(b) 描述了不同  $l_{th}$  条件下,  $\eta$  随  $a$  的变化特性曲线。在任意  $l_{th}$  的条件下,  $\eta$  随  $a$  的增加, 都呈现先上升后下降的趋势。当  $l_{th}=0.1$  m、 $a=2.0$  m 时,  $\eta$  达到最大值 0.41, 然后逐渐减小。 $l_{th}$  变化时,  $\eta$  在不同  $a$  条件下的最大值及其对应的  $a$  值不同。例如, 当  $l_{th}=0.5$  m 时,  $\eta$  的最大值 0.83 在  $a=1.8$  m 取得; 而当  $l_{th}=1.0$  m 时,  $\eta$  的最大值 1.0 在  $a=1.2$  m 取得。值得注意的是, 随着  $l_{th}$  的增加,  $\eta$  倾向于更早达到极值, 并保持在最大值 1 一段时间, 继而出现接近呈线性趋势下降的现象。该现象的产生是由于搜索路径的覆盖面积和搜索周长增加对搜索成功率产生了双重影响。当  $a$  和  $l_{th}$  都较大的情况下, UAV 设置的搜索路径可以较早感知到光源, 并将光源覆盖范围的一部分包含在路径的

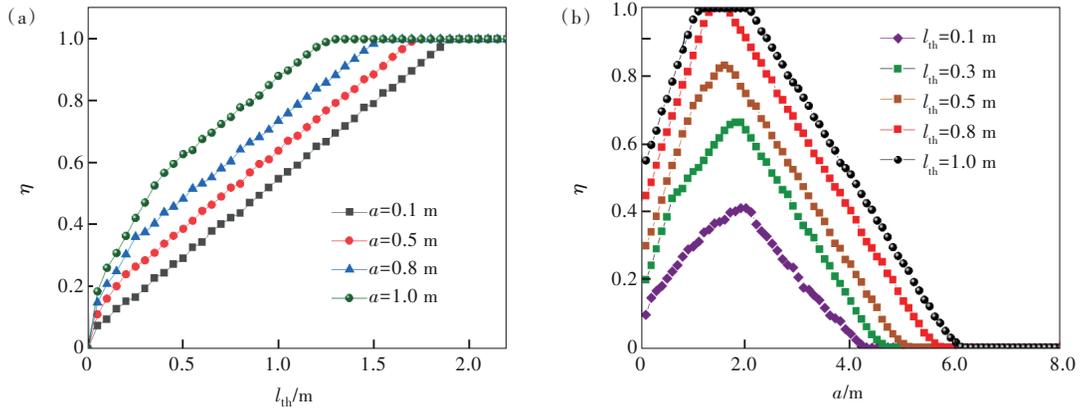


图3 (a)不同 $a$ 条件下, $\eta$ 随 $l_{th}$ 增加的变化趋势;(b)不同 $l_{th}$ 条件下, $\eta$ 随 $a$ 增加的变化趋势。

Fig.3 (a)The variation of  $\eta$  with the increasing of  $l_{th}$ , under different values of  $a$ . (b)The variation of  $\eta$  with the increasing of  $a$ , under different values of  $l_{th}$ .

搜索总范围之内,从而明显提高 $\eta$ 。然而,随着 $a$ 的增大,搜索覆盖面积和搜索周长越来越大,增大了探测不到通信光源的无效面积,导致 $\eta$ 值降低。

### 3.2 $l_{th}$ 和 $a$ 对搜索路程的影响

如图4(a)所示,当 $a$ 一定时, $l_{th}$ 的变化会明显改变UAV的搜索距离( $S_D$ )。如图4(a)所示, $S_D$ 随着 $l_{th}$ 的增加呈现阶梯状减小的趋势,即 $l_{th}$ 的增加导致光源有效覆盖面积的扩大可以有效节省搜索

距离。根据光源搜索规则,“阶跃”形状的出现是由于 $l_{th}$ 的小范围增加使得光源有效覆盖面积增加,然而并没有改变UAV的搜索路线,因此 $S_D$ 保持不变。当 $l_{th}$ 连续增加时,不同 $a$ 对应的搜索路径都存在接近0的最小 $S_D$ 值。 $S_D$ 最小值获得的前提条件是UAV在搜寻路径的起点即感应到光源。因此, $S_D$ 的最小值为搜索路径的起点到光源的距离。由于路径范围不同,不同 $a$ 对应的最小 $S_D$ 值不同。

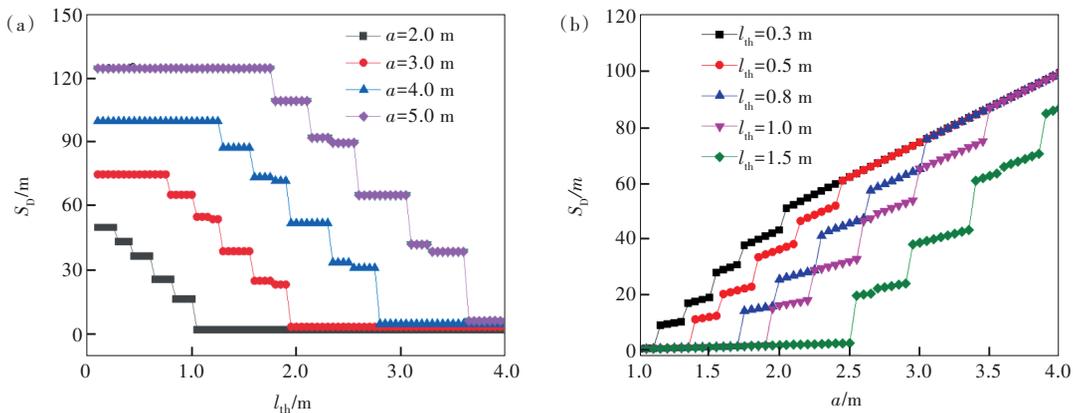


图4 (a)不同 $a$ 条件下, $S_D$ 随 $l_{th}$ 增加的变化趋势;(b)不同 $l_{th}$ 条件下, $S_D$ 随 $a$ 增加的变化趋势。

Fig.4 (a)The variation of  $S_D$  with the increasing of  $l_{th}$ , under different values of  $a$ . (b)The variation of  $S_D$  with the increasing of  $a$ , under different values of  $l_{th}$ .

如图4(b)所示,在不同 $l_{th}$ 条件下,边长 $a$ 的增加导致 $S_D$ 整体呈阶梯式增长趋势。 $l_{th}$ 较小时取得的 $S_D$ 高于 $l_{th}$ 较大时取得的 $S_D$ ,说明在光源有效覆盖面积较大时,UAV可以用较少的时间和路程搜寻到光源位置。与图4(a)不同,图4(b)中 $S_D$ 随 $a$ 增加时呈现的“阶梯”状具有一定斜率,且随着 $a$ 的增加,“阶梯”的长度呈增加趋势。该现象产生的原因是:随着 $a$ 的增加UAV的搜索总距离增加,

导致图4(b)中 $S_D$ 的数值呈现一定斜率下规律地增长。

另外,由于 $a$ 的持续增长,使得UAV在搜索过程中需要增加等边六边形的个数来搜寻光源,在增加等边六边形的个数时 $S_D$ 产生了阶跃式的增加,从而导致 $S_D$ 呈“阶梯”状增长。另外,当搜索面积覆盖光源的总面积且 $a$ 固定时,不同 $l_{th}$ 条件下的UAV搜索路径不受 $l_{th}$ 影响,且都是相同的。

### 3.3 $\beta$ 、 $l$ 、 $h$ 对接收光功率的影响

作为描述光分布的关键参数,  $\beta$ 、 $l$ 、 $h$ 、 $P_R$  存在关联关系。当  $P_R$  大于  $P_{th}$  时, PD 可以检测目标发光波段的光功率; 当  $P_R$  小于  $P_{th}$  时, 即使距离光源很近, PD 也检测不到目标光功率。如图 5(a) 所示,  $\beta$  的持续增加导致  $P_R$  呈快速增长、缓慢下降的趋势。该现象出现的原因是: 当  $l$  一定时,  $\beta$  从 0 开

始增加使得 PD 与光源的夹角  $\theta$  增大, 提高了  $P_R$  的值,  $P_R$  一定条件下可以超过  $P_{th}$ ; 当  $\beta$  继续增加时, PD 与光源的距离  $h$  持续增加,  $P_R$  在  $h$  和  $\theta$  的双重作用下, 上升达到最大值后开始下降。在不同  $l$  的条件下,  $P_R$  的最大值都在  $\beta=1.3$  时获得, 即  $l$  对  $P_R$  最大值对应的  $\beta$  没有影响。在相同  $\beta$  的条件下,  $l$  的增加导致  $P_R$  急剧下降。

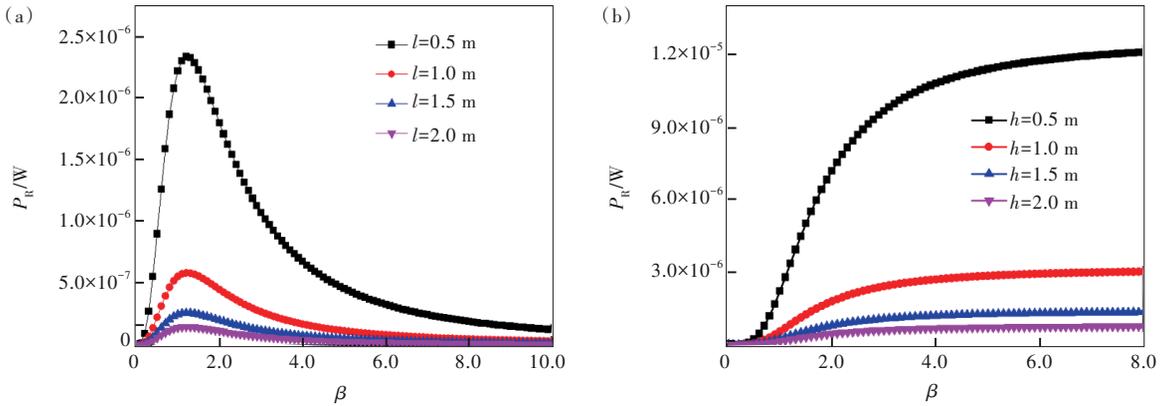


图 5 (a)不同  $l$  条件下,  $P_R$  随  $\beta$  增加的变化趋势; (b) 不同  $h$  条件下,  $P_R$  随  $\beta$  增加的变化趋势。

Fig.5 (a) The variation of  $P_R$  with the increasing of  $\beta$ , under different values of  $l$ . (b) The variation of  $P_R$  with the increasing of  $\beta$ , under different values of  $h$ .

以  $l=2$  m 为例,  $P_R$  的最高值可达  $2.3 \times 10^{-6}$  W; 当  $l$  持续增加时, 最低的  $P_R$  值趋于零。与图 5(a) 不同, 图 5(b) 中选择  $h$  作为变量时,  $P_R$  呈现增加并趋于饱和的趋势。  $P_R$  趋于饱和可获得的最大值随  $h$  的变化而变化。相同  $\beta$  下, 随着  $h$  的增加,  $P_R$  值迅速降低。以  $h=0.5$  m 为例, 最高的  $P_R$  可以达到  $1.2 \times 10^{-5}$  W, 远远高于  $P_{th}$ 。当  $\beta < 0.45$  时,  $P_R$  小于  $P_{th}$ , 不满足 PD 的探测条件。

取值一定时, 随着  $l$  的增大,  $P_R$  呈减小趋势;  $l$  越大,  $P_R$  减小的趋势越慢, 最终趋于零。相比不同  $\beta$  取值下的结果, 较高  $\beta$  下获得的  $P_R$  值较低。这是由于  $\beta$  增加时, PD 相对于光源的夹角减小, 但在一定  $l$  条件下,  $h$  呈增加趋势, 降低了 PD 的接收光功率。图 6(b) 中,  $P_R$  的下降趋势与图 6(a) 相似。不同的是, 相同  $h$  条件下, 图 6(b) 中的  $P_R$  与  $\beta$  成正比。这是由于  $\beta$  较小时,  $h$  一定的条件下,  $\beta$  的增加代表  $l$  的降低, 即 PD 更加接近光源发光的中心区域。因此, 在该区域,  $P_R$  随着  $\beta$  的增加而上升。此

当  $\beta$  一定时, PD 的接收光功率  $P_R$  随接收位置所在的  $l$  或  $h$  的增加而变化。如图 6(a) 所示, 在  $\beta$

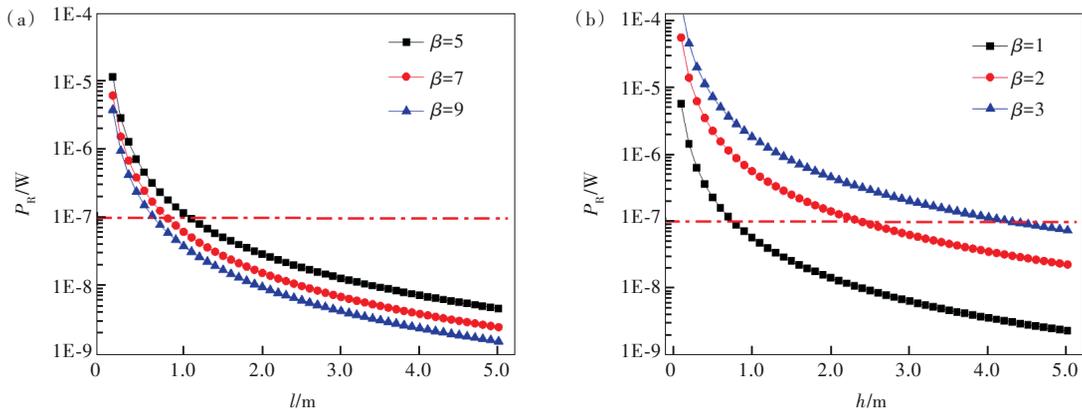


图 6 (a)不同  $\beta$  条件下,  $P_R$  随  $l$  增加的变化趋势; (b) 不同  $\beta$  条件下,  $P_R$  随  $h$  增加的变化趋势。

Fig.6 (a) The variation of  $P_R$  with the increasing of  $l$ , under different values of  $\beta$ . (b) The variation of  $P_R$  with the increasing of  $h$ , under different values of  $\beta$ .

外,图6(a)、(b)的红色虚线上方的 $P_R$ 值代表高于 $P_{th}$ 的接收光功率,其对应的 $\beta$ 和 $l$ (或 $h$ )值可为寻找有效信息传输位置提供借鉴。

### 3.4 $P_{th}$ 一定的条件下 UAV 的有效三维探测区域

根据公式(7)可获得一定条件下, $P_{th}$ 一定的条件下 UAV 的有效三维探测区域。如图7(a)所示,当 $m=1$ 时, $P_{th}$ 在三维空间中呈较宽范围的类球形分布,当 $h$ 增加时, $l_{th}$ 呈急剧增宽、缓慢减小的总趋势。该趋势能较好地匹配图5(a)中 $P_R$ 急剧上升、缓慢减小的现象。 $l_{th}$ 可覆盖的最大范围

为 0.78 m 左右,对应的高度位置 $h$ 约为 0.95 m。根据图3(a)的研究结果,当 $l_{th}=0.78$  m、 $a=1.0$  m 时,UAV 的搜索成功率最高可达 0.74。当 $m$ 增加到 5 时, $P_{th}$ 在三维空间中呈两头较尖、中间较宽的类橄榄球形分布(图7(b))。不难看出, $m$ 的变化引起的光分布变化会导致通信光源的最大覆盖光斑所在平面的高度位置产生改变,继而影响某一高度条件下 UAV 搜寻光源的成功率。因此,不同光照条件下的光斑动态调整对 UAV 实现 VLC 具有重要作用。

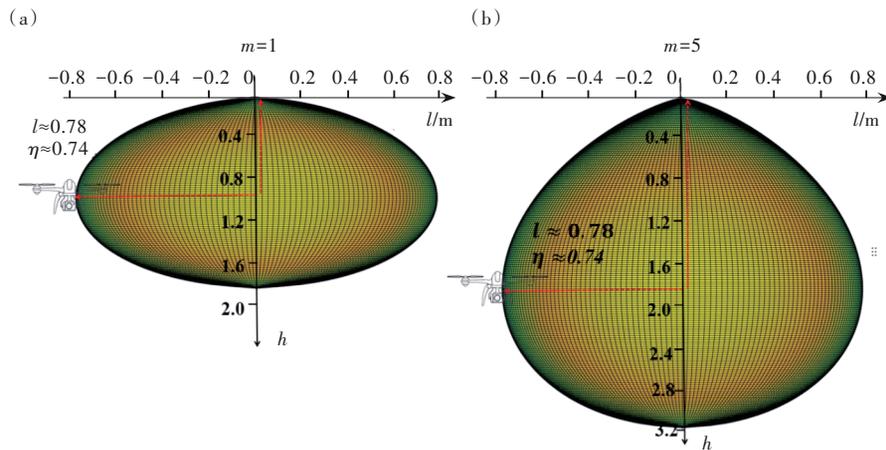


图7 (a) $m=1$ 时 $P_{th}$ 的三维分布图;(b) $m=5$ 时 $P_{th}$ 的三维分布图。

Fig.7 (a)The 3D distribution figure for  $P_{th}$  when  $m=1$ . (b)The 3D distribution figure for  $P_{th}$  when  $m=5$ .

上述内容分别从光源覆盖范围、UAV 搜索路径等对通信光源的搜索成功率、搜索总路程的影响进行了分析和讨论。此外,光源发光角度、探测角度、PD 与光源的水平距离等都会影响 PD 探测所得信号光功率,从而影响光源搜索的成功率。建议根据天气、UAV 的定位精确度、光源本身光分布情况等优化 UAV 搜索光源的路径,以提高 VLC 中最佳通信位置的搜索效率。

## 4 结 论

针对 UAV 在 VLC 中定位精度不满足光通信需求的问题,提出了一种有序扩大、缩小搜索区域,优化搜索路径以感知和寻找通信光源的方法。本文以等边六边形为例设置搜索路径,并对通信光源展开搜索。为了提高搜索成功率,讨论了通

信光源的光分布对 $\eta$ 、 $S_D$ 的影响,以及 PD 的探测位置、探测接收角对 $P_R$ 、 $\eta$ 的影响。研究得到了 UAV 在探测功率阈值条件下光源所提供的三维覆盖范围,可用于预估 UAV 在不同条件下的搜索成功率。在理想朗伯体条件下,UAV 在光源覆盖半径最大为 0.78 m 时,最高搜索成功率可达 0.74。虽然采用 UAV 实现稳定、快速的可见光通信还有较多问题亟待解决,但本文提出的方法从理论上解决了 UAV 定位不准确的问题,大大提高了 UAV 在光源下搜索最佳通信位置点的成功率,为 UAV 可见光通信的实现提出了解决方案。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230223>.

## 参 考 文 献:

- [1] 唐翰玲,李勇军,李怡,等. 大气湍流和指向误差对无人机激光通信误码率的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1306002.

- TANG H L, LI Y J, LI Y, *et al.* Influence of atmospheric turbulence and pointing error on bit error rate of unmanned aerial vehicle laser communication [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2022, 59(13): 1306002. (in Chinese)
- [ 2 ] 陈勇, 吴志倩, 刘焕淋, 等. 基于神经网络的可见光通信系统信道估计方法 [J]. *光学学报*, 2023, 43(7): 0706004.
- CHEN Y, WU Z Q, LIU H L, *et al.* Neural-network-based channel estimation method for visible light communication systems [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2023, 43(7): 0706004. (in Chinese)
- [ 3 ] DURSUN I, SHEN C, PARIDA M R, *et al.* Perovskite nanocrystals as a color converter for visible light communication [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(7): 1150-1156.
- [ 4 ] 肖华, 陈万里, 肖翔天, 等. 量子点 LED 用于可见光通信的调制带宽研究进展 [J]. *发光学报*, 2022, 43(4): 598-607.
- XIAO H, CHEN W L, XIAO X T, *et al.* Progress on modulation bandwidth of quantum-dot LED in visible light communication [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(4): 598-607. (in Chinese)
- [ 5 ] 赵越, 高旭鹏, 路坡, 等. 量子点白光 LEDs 及其在智慧照明中的应用 [J]. *液晶与显示*, 2021, 36(1): 187-202.
- ZHAO Y, GAO X P, LU P, *et al.* Quantum dot-based white LEDs and their applications of smart lighting [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2021, 36(1): 187-202. (in Chinese)
- [ 6 ] XIE B, CHEN W, HAO J J, *et al.* Structural optimization for remote white light-emitting diodes with quantum dots and phosphor: packaging sequence matters [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(26): A1560-A1570.
- [ 7 ] 贾科军, 靳斌, 郝莉. 室内可见光通信 OFDM 自适应比特功率加载算法性能分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(3): 030603.
- JIA K J, JIN B, HAO L. Performance analysis of optical OFDM adaptive bit-power loading in indoor visible light communications [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2019, 56(3): 030603. (in Chinese)
- [ 8 ] RUAN C, ZHANG Y, LU M, *et al.* White light-emitting diodes based on AgInS<sub>2</sub>/ZnS quantum dots with improved bandwidth in visible light communication [J]. *Nanomaterials*, 2016, 6(1): 13.
- [ 9 ] NIU W Q, XU Z Y, LIU Y, *et al.* Key technologies for high-speed Si-substrate LED based visible light communication [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2023, 41(11): 3316-3331.
- [ 10 ] HAO Y, HE M F, LIU Y Z, *et al.* Range-visual-inertial odometry with coarse-to-fine image registration fusion for UAV localization [J]. *Drones*, 2023, 7(8): 540.
- [ 11 ] KIM H, HYUN C U, PARK H D, *et al.* Image mapping accuracy evaluation using UAV with standalone, differential (RTK), and PPP GNSS positioning techniques in an abandoned mine site [J]. *Sensors*, 2023, 23(13): 5858.
- [ 12 ] 崔凤利, 杨立志. 六旋翼飞行器平稳着陆方法研究 [J]. *江苏理工学院学报*, 2014, 20(6): 38-41.
- CUI F L, YANG L Z. Safe landing method study of six rotor aircraft [J]. *J. Jiangsu Univ. Technol.*, 2014, 20(6): 38-41. (in Chinese)
- [ 13 ] 王洲, 杨明欣, 王新媛. 基于多传感器融合的多旋翼无人机近地面定位算法 [J]. *成都信息工程大学学报*, 2018, 33(3): 261-267.
- WANG Z, YANG M X, WANG X Y. Location algorithm based on multi-sensor fusion for multi-rotor aerial vehicle to flight near the ground [J]. *J. Chengdu Univ. Inf. Technol.*, 2018, 33(3): 261-267. (in Chinese)
- [ 14 ] 王均晖, 孙蕊. 面向城市无人机的 GPS/北斗融合高精度定位方法 [J]. *指挥信息系统与技术*, 2022, 13(5): 23-26.
- WANG J H, SUN R. GPS/Beidou combined high accuracy positioning method for urban drones [J]. *Command Inf. Syst. Technol.*, 2022, 13(5): 23-26. (in Chinese)
- [ 15 ] 黄婷, 徐明. 基于超声波测距和多普勒测速的室内无人机跟踪定位算法 [J]. *弹箭与制导学报*, 2021, 41(3): 105-108.
- HUANG T, XU M. Tracking and localization algorithm of indoor UAV based on ultrasonic ranging and doppler velocimetry [J]. *J. Projectiles, Rockets, Missiles Guid.*, 2021, 41(3): 105-108. (in Chinese)
- [ 16 ] WANG R, LUNGU M H, ZHOU Z, *et al.* Least global position information based control of fixed-wing UAVs formation flight: Flight tests and experimental validation [J]. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2023, 140: 108473.
- [ 17 ] FENG A J, VONG C N, ZHOU J, *et al.* Developing an image processing pipeline to improve the position accuracy of single UAV images [J]. *Comput. Electron. Agric.*, 2023, 206: 107650.

- [ 18 ] MUTHANNA M S A, MUTHANNA A, NGUYEN T N, *et al.* Towards optimal positioning and energy-efficient UAV path scheduling in IoT applications [J]. *Comput. Commun.* , 2022, 191: 145-160.
- [ 19 ] SHARMA R, KUMARI A C, AGGARWAL M, *et al.* Down-link performance of an LED based visible light communication system through dynamic control of semi-angle [J]. *Phys. Commun.* , 2019, 33: 222-230.



肖华(1989-),女,湖南邵阳人,博士,讲师,硕士生导师,2020年于中国香港城市大学获得博士学位,主要从事半导体发光器件、可见光通信、纳米材料、光电器件失效分析等方面的研究。  
E-mail: oliviash@gdou.edu.cn



姜溟予(1989-),男,湖北潜江人,博士,副教授,硕士生导师,2017年于浙江大学获得博士学位,主要从事光电测量与自主无人系统的研究。  
E-mail: john\_h\_y\_walter@163.com