

文章编号 1004-924X(2017)09-2324-09

## 无线日盲紫外光测距定位方法

赵太飞<sup>1\*</sup>, 余叙叙<sup>1</sup>, 包鹤<sup>1</sup>, 宋鹏<sup>2</sup>

(1. 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:** 在无人机的自主飞行及着陆引导中, 测距与定位是其中的关键问题。本文提出了一种基于无线紫外光的测距定位方法, 对无线紫外光直视通信模型和非直视通信模型进行了分析, 推导出直视和非直视情况下的距离计算公式。根据四节点定位算法, 可以解出未知节点的位置坐标。使用波长为 255 nm 的“日盲”紫外 LED 及光电倍增管作为收发器件, 测距信号采用 10 kHz 的方波信号, 在不同天气情况下进行测距实验。实验结果表明: 在直视情况下, 被测距离真值为 0~100 m 的测距误差均小于 5 m; 在非直视情况下, 由于多径散射的影响, 有效测距距离降为 0~70 m。当发送仰角和接收仰角均小于 10° 时, 测距误差较小, 均小于 5 m, 当发送仰角和接收仰角均大于 10° 时, 随着发送仰角和接收仰角的增大, 有效测距距离明显降低。总的来说, 该算法有着较高的精度, 在 GPS 无法正常使用时能够为无人机提供导航数据, 基本能够满足自主降落和飞行引导的要求。

**关键词:** 光通信; 紫外光; 定位方法; 测距误差; 飞行引导

**中图分类号:** TN23 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2324

## Ranging and positioning method using wireless solar blind ultraviolet

ZHAO Tai-fei<sup>1\*</sup>, YU Xu-xu<sup>1</sup>, BAO He<sup>1</sup>, SONG Peng<sup>2</sup>

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

2. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing,  
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhaotaipei@163.com

**Abstract:** In order to solve the problem of positioning in UAV flight and landing guidance scene, this paper presented a ranging and positioning method based on wireless ultraviolet lights. The method analyzed communication models of wireless ultraviolet Line of Sight (LOS) and Non-Line-of-Sight (NLOS), thus deriving the distance algorithm for LOS and NLOS communications. The location coordinates of unknown nodes were solved by the four node localization algorithm. Using a 255 nm UV LED as the light source, a PMT as the receiving device and a 10 kHz square wave signal as the ranging signal, ranging experiments under different weather conditions were performed. The experimental results indicate that the ranging error is less than 5 m in LOS communication with the

**收稿日期:** 2017-05-18; **修订日期:** 2017-06-15.

**基金项目:** 国家自然科学基金-中国民航局民航联合研究基金资助项目 (No. U1433110); 西安市碑林区科技计划项目 (No. GX1617); 陕西省教育厅产业化培育项目 (No. 2013JC09); 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)开放课题基金资助项目 (No. 2016CP05)

ranging distance of 0~100 m. In NLOS communication, the effective ranging distance is reduced to 0~70 m due to the influence of multipath scattering. When the transmitting elevation and receiving elevation is less than  $10^\circ$ , the ranging error is less than 5 m, otherwise the effective distance decreased significantly with the increase of transmitting and receiving elevations. In general, the algorithm can provide navigation data for unmanned aerial vehicles with a high accuracy when the GPS cannot work normally, thus can meet the requirements of autonomous landing and flight guidance.

**Key words:** light communication; ultraviolet light; positioning method; ranging error; flight guidance

## 1 引言

无人机是一种具有动力、由无线电遥控操作或靠自备程序控制自主飞行的可携带多任务设备和执行多种任务的无人驾驶飞行器(UAV),其中无人直升机(UH)还具有垂直升降、空中悬停、低空贴地飞行等特点。因此,无人机在民用和军用领域都有极大的研究价值、不可估量的应用潜力以及不可替代的战略地位。

近些年,自主飞行和着陆引导工作始终是无人机研究的重点之一。常见的方法有全球定位系统(Global Positioning System, GPS)导航、惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)以及基于机器视觉的导航技术等。其中, GPS 代价昂贵,战时不可用,在局部地域内受地形条件的影响较大,且易受电磁干扰;INS 的误差随着时间的推移而不断加大,累计误差较大;机器视觉导航技术数据量较大,无法实现实时性处理。所以,上述几种方法都难以满足无人机自主飞行和着陆引导的要求。光电引导技术作为一种新技术,在无人机领域的发展很快。该技术通过不断地产生无人机的位置信息,能够实现高精度实时引导。目前的无人机光电引导主要有自动起降飞机控制方案<sup>[1]</sup>、激光规避预警系统实验平台<sup>[2]</sup>以及基于日盲区紫外成像的无人机自主着陆引导系统<sup>[3]</sup>。其中,无线“日盲”紫外光测距采用日盲波段(200~280 nm)的紫外 LED 作为光源,通过大气中的粒子、气溶胶、灰尘等微粒对“日盲”紫外光的散射作用进行测距。由于紫外光通信具有抗干扰能力强、全方位性、可用于非直视通信、无需对准和跟踪(APT)、全天候工作等优点。基于日盲无线紫外光的无人机导航系统能够满足不同天气、不同场景下的定位测距需要。

根据发射端光束的发散角和接收视场角的对应关系,无线紫外光直视通信模型<sup>[4]</sup>分为 3 种类型:宽发散角发送-宽视场角接收、窄发散角发送-宽视场角接收和窄发散角发送-窄视场角接收;无线紫外光非直视通信模型<sup>[5-7]</sup>也分为 3 种类型:NLOS(a)、NLOS(b)、NLOS(c)。

本文将紫外光通信技术运用到定位测距上,基于无线紫外光接收光功率表达式,推导了无线紫外光通信距离的计算公式,并建立了无线紫外光测距系统实验平台。实验结果表明,“日盲”无线紫外光测距方法精度较高,在 GPS 无法正常使用时,能够为无人机提供导航数据,基本能够满足自主降落和飞行引导的要求。

## 2 紫外光测距系统的构成及工作原理

### 2.1 紫外光测距系统的硬件构成

无线紫外光测距系统原理如图 1 所示。系统主要由信号发射机和信号接收机组成。信号发射机包括调制电路、驱动电路和紫外 LED;信号接收机包括光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)、功率测量电路和运算模块。

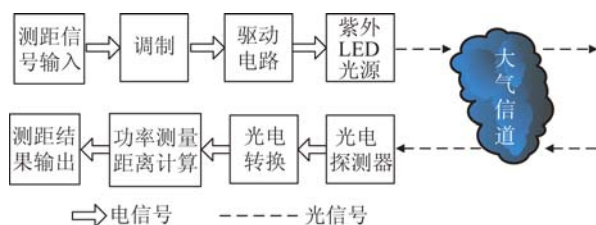


图 1 紫外光测距系统原理

Fig. 1 Schematic principle of ultraviolet ranging system

### 2.2 紫外光测距系统的工作原理

紫外光通信主要采用日盲波段的紫外光作为信息传输载体,利用大气中的粒子、气溶胶、灰尘

等微粒对紫外光的散射进行信息传递。在无线紫外光测距系统中,发射端发射某一固定光功率的测距信号,接收端在接收到测距信号后通过功率测量得到接收光功率。根据无线紫外光在大气信道中的衰减特性,推导出紫外光通信的距离计算公式,通过计算得到发射机相对接收机的距离。

无线“日盲”紫外光测距系统采用日盲波段(200~280 nm)的紫外 LED 作为光源,由于臭氧层的吸收作用,日盲波段紫外光在近地面受到背景的干扰很小。在直视情况下,采用窄视场发送-宽视场接收的通信方式;在非直视情况下,则采用窄视场发送-窄视场接收的通信方式。

### 3 无线紫外光测距定位关键算法

#### 3.1 四节点定位算法

在三维空间定位中,只需要知道 4 个锚节点的坐标和未知节点到 4 个锚节点的距离信息,就能够求出未知节点的三维坐标。空间四节点定位算法如图 2 所示。

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) & 2(z_2 - z_1) \\ 2(x_2 - x_3) & 2(y_2 - y_3) & 2(z_2 - z_3) \\ 2(x_4 - x_3) & 2(y_4 - y_3) & 2(z_4 - z_3) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + z_2^2 - z_1^2 + d_1^2 - d_2^2 \\ x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 + z_2^2 - z_3^2 + d_3^2 - d_2^2 \\ x_4^2 - x_3^2 + y_4^2 - y_3^2 + z_4^2 - z_3^2 + d_4^2 - d_3^2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

#### 3.2 直视情况下的测距算法

无线紫外光直视链路在大气自由空间中的功率衰减呈指数衰减。自由空间路径损耗和  $r^2$  成反比,即  $\left[\frac{\lambda}{4\pi r^2}\right]$ 。大气衰减可表示为  $e^{-K_e r}$ ,探测器的接收增益为  $\frac{4\pi A_r}{\lambda^2}$ 。直视情况下无线紫外光通信链路的接收光功率为:

$$P_{r,LOS} = \frac{P_t A_r}{4\pi r^2} e^{-K_e r}. \quad (2)$$

式(2)变形得到:

$$r^2 e^{K_e r} = \frac{P_t A_r}{4\pi P_{r,LOS}}. \quad (3)$$

两边同乘以  $K_e^2$ ,并对公式两边同时开根号,得:

$$K_e r e^{\frac{1}{2}K_e r} = \sqrt{\frac{P_t A_r K_e^2}{4\pi P_{r,LOS}}}. \quad (4)$$

将式(4)变形为 Lambertw 函数的形式,即:

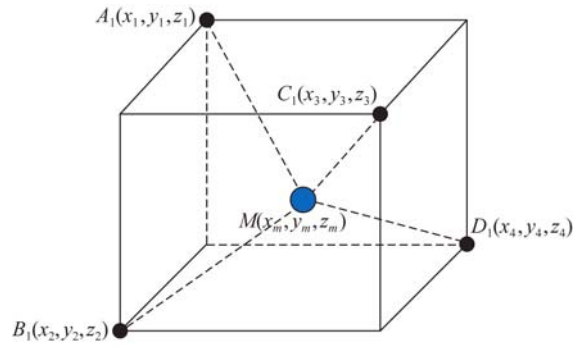


图 2 四节点定位算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of four-node location algorithm

在图 2 中,已知 4 个锚节点的坐标分别为  $A_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $B_1(x_2, y_2, z_2)$ ,  $C_1(x_3, y_3, z_3)$ ,  $D_1(x_4, y_4, z_4)$ 。未知节点到 4 个锚节点  $A_1, B_1, C_1, D_1$  的距离分别为  $d_1, d_2, d_3, d_4$ ,设未知节点  $M$  的坐标为  $(x_m, y_m, z_m)$ ,则可以求得未知节点的坐标为:

$$\frac{1}{2} K_e r e^{\frac{1}{2}K_e r} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_t A_r K_e^2}{4\pi P_{r,LOS}}}. \quad (5)$$

根据朗伯函数  $W$  的求反法则,可得发射机到接收机之间的距离计算公式:

$$r = \frac{2 \text{Lambertw}\left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{P_t A_r K_e^2}{\pi P_{r,LOS}}}\right)}{K_e}. \quad (6)$$

由式(6)可知,在发射功率  $P_t$  等参数已知的前提下,只要测得接收端的光功率,就能够求出发射机与接收机之间的距离  $r$ 。

#### 3.3 非直视情况下的测距算法

大气的散射作用使得紫外光通信能够在非直视情况下工作,通信中的两个终端即使在障碍物的阻挡下仍然能够完成通信<sup>[8]</sup>。由于接收端接收到的能量主要来自光子的单次散射,在忽略二次或多次散射影响的情况下,紫外光传输的信道模型如图 3 所示。

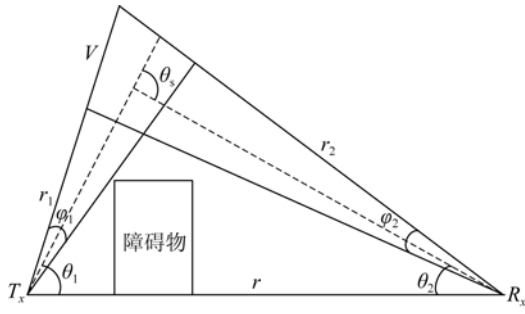


图 3 非直视紫外光通信单次散射模型

Fig. 3 Single scattering model in NLOS UV communication

图 3 中:  $\theta_1$  是发射机的仰角;  $\theta_2$  是探测接收机的仰角;  $\varphi_1$  是发射光束孔径角;  $\varphi_2$  是接收视场角;  $V$  是发射仰角和接收仰角交叉部分的有效散射体体积;  $r$  是发射机  $T$  到探测接收机  $R$  的距离;  $r_1$  是发射机到  $V$  的距离;  $r_2$  是探测接收机到  $V$  的距离; 散射角  $\theta_s$  是  $\theta_1$  与  $\theta_2$  的夹角, 且  $\theta_s = \theta_1 + \theta_2$ 。

非直视无线紫外光单次散射链路接收光功率定义为<sup>[9]</sup>:

$$P_r = \frac{P_t A_r K_s P_s \varphi_2 \varphi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 r \sin\theta_1 \left(1 - \cos \frac{\varphi_1}{2}\right)} e^{-\frac{K_e r \left(\frac{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}\right)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}}, \quad (7)$$

其中:  $P_r$  是接收功率;  $P_t$  是发送功率;  $P_s$  是散射相函数;  $A_r$  是接收机孔径的面积;  $r$  是通信距离;  $K_e$  是大气衰减系数, 由 Rayleigh 散射系数  $K_{SR}$ 、Mie 散射系数  $K_{SM}$  和大气吸收系数  $K_a$  组成 ( $K_e = K_a + K_{SM} + K_{SR}$ )。

然后进行变量代换, 令:

$$a = \frac{P_t A_r K_s P_s \varphi_2 \varphi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 \sin\theta_1 \left(1 - \cos \frac{\varphi_1}{2}\right)}, \quad (8)$$

$$z = \frac{K_e (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}. \quad (9)$$

式(7)转化为:

$$P_r = \frac{a}{r} e^{-zr}, \quad (10)$$

变形为:

$$zre^{zr} = \frac{az}{P_r}. \quad (11)$$

根据朗伯函数  $W$  的求反法则, 可得:

$$r = \frac{\text{lambertw}\left(\frac{az}{P_r}\right)}{z}. \quad (12)$$

将  $a, z$  的值带回到式(12)中可得到非直视情况下发射机到接收机之间的距离的计算公式,

即有:

$$r = \frac{\text{lambertw}\left(\frac{P_t A_r K_s P_s \varphi_2 \varphi_1^2 K_e (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{P_r 32\pi^3 \sin\theta_1 \left(1 - \cos \frac{\varphi_1}{2}\right)}\right)}{\frac{K_e (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}}. \quad (13)$$

由式(13)可知, 在发射功率  $P_t$  等参数已知的前提下, 求出接收端接收的光功率就能够求出非直视情况下发射机到接收机的距离。

### 3.4 PMT 接收光功率计算方法

实验采用 R7154 型 PMT 作为接收器件, 通过计算可以得到接收光功率。PMT 信号以电流的形式输出, 输出电流表达式<sup>[10]</sup>为:

$$I = \frac{N_r \eta_d \eta Ge}{t}, \quad (14)$$

式中:  $N_r$  为接收到的光子数,  $\eta_d$  为 PMT 的光电转换效率,  $\eta$  为紫外滤光片对紫外光的透射率,  $G$  为 PMT 的增益,  $e$  为单电子所带的电荷量 ( $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ),  $t$  为时间。可得入射光子数量为:

$$N_r = \frac{It}{\eta_d \eta Ge}. \quad (15)$$

单个光子的能量  $E = h\nu$ ,  $h$  为普朗克常量,  $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $\nu$  为频率  $\left[\nu = \frac{c}{\lambda}\right]$ , 则接收光功率为:

$$P_r = \frac{EN_r}{t} = \frac{EI}{\eta_d \eta Ge}. \quad (16)$$

由式(16)可知, 只要测得 PMT 输出端电流就能计算出接收光功率。实验中, 电流  $I$  可通过测量接收端电压值  $U$  得到, 接收端串联了一个精密电阻  $R (R = 10 \text{ k}\Omega)$ , 则接收端的输出电流为  $I = U/R$ 。

激光具有高亮度、高方向性、高单色性和高相干性等特点, 因此激光测距精度较高<sup>[11-12]</sup>。与激光通信相比, 无线紫外光在大气传输过程中衰减较大且由于 PMT 自身特性的影响, 在计算接收光功率时需要对接收光功率进行修正, 修正后的接收光功率表达式为:

$$P_{r, \text{cor}} = \frac{kEN_r}{t} = \frac{kEI}{\eta_d \eta Ge}. \quad (17)$$

目前, 紫外光通信中大多采用紫外 LED 作为光源, 通信距离较短。随着紫外光通信技术的研究和调制编码的发展<sup>[13-15]</sup>, 若采用紫外激光器作为信息光源, 能够有效提高通信距离。

#### 4 无线紫外光测距实验及结果分析

实验选取空旷场地,无线紫外光测距系统实验平台如图 4 所示。



图 4 紫外光测距系统

Fig. 4 Wireless ultraviolet ranging system

硬件平台主要使用 R7154 型 PMT(滨松光子学株式会社,日本)和 UVTOP 系列 LED(SET 公司,美国),测距信号为 10 kHz 的方波信号。PMT 和 LED 的具体参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 R7154 型 PMT 的主要参数

Tab.1 Parameters of R7154 PMT

Parameter	Value
Spectral response/nm	160~320
Maximum response wavelength/nm	230
Effective area/m <sup>2</sup>	8×24
Gain	10 <sup>7</sup>
Cathode sensitivity	62 mA/W(at 254 nm)
Anode sensitivity	6.2×10 <sup>5</sup> A/W(at 254 nm)
Quantum efficiency/%	25

表 2 UVTOP255 型 LED 的主要参数

Tab.2 Parameters of UVTOP255 LED

Parameter	Value
Peak wavelength/nm	255
Typical optical power/mW	0.30
Power dissipation/mW	150
Minimum optical power/mW	0.18
Lens type	HS
Typical emission pattern/(°)	6

实验参数选取如下:大气吸收系数  $K_a = 1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ , 温度  $T$  为 0 °C 左右,测试选取室外空旷场地,重雾霾天气、严重雾霾天气和极严重雾霾天气的能见度分别为 3, 2.5, 2.0 km。由于实验中没有加滤光片,为了降低背景干扰,实验时间选取在夜间。当温度变化时,LED 的输出光功率特性和 PMT 的特性会有相应的变化,这些特性的变化规律可以通过器件的特性曲线得到,会对测距范围有一定的影响,但不会有太大的波动。

使用一个常用的模型来估算紫外光的大气气溶胶散射系数  $K_{SM}$ ,其表达式为<sup>[16-17]</sup>:

$$K_{SM} = \frac{3.91}{R_v} \times \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q, \quad (18)$$

其中: $R_v$  表示能见度, $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ ,  $q = 0.585 R_v^{1/3}$  为修正因子。使用 Rayleigh 散射的经典计算公式来估计 Rayleigh 散射系数  $K_{SR}$ ,表达式为:

$$K_{SR} = 2.677 \times 10^{-17} \frac{P\gamma^4}{T}, \quad (19)$$

其中: $P$  为大气压强, $T$  为绝对温度, $\gamma$  为波数。在重雾霾天气、严重雾霾天气和极严重雾霾天气的天气条件下,大气消光系数  $K_e$ 、大气吸收系数  $K_a$ 、Mie 散射系数  $K_{SM}$  和 Rayleigh 散射系数  $K_{SR}$  如表 3 所示。

表 3 实验参数设置

Tab.3 Experimental parameter setting

实验条件	PM2.5/( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$K_a$	$K_{SM}$	$K_{SR}$	$K_e$
重雾霾	363	1.00	0.68	0.33	2.02
严重雾霾	454	1.00	0.85	0.33	2.18
极严重雾霾	500	1.00	0.85	0.33	2.18

注:光散射系数和吸收系数的单位均为  $\text{km}^{-1}$ 。

测距误差定义为距离测值与被测距离真值之差,测距误差能够准确反应测量精度的高低。设距离测值为  $d_{\text{det}}$ ,被测距离真值为  $d_r$ ,测距误差为  $d_e$ ,则有  $d_e = d_{\text{det}} - d_r$ 。

##### 4.1 直视情况下的测距实验及结果

实验中采用单颗 LED 进行实验,功耗为 150 mW,典型的发光功率为 0.3 mW,由于紫外光在大气信道中的衰减较严重,所以测距距离有

限(0~100 m)。直视情况下,分别在重雾霾(PM2.5 浓度为 363  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )、严重雾霾(PM2.5 浓度为 454  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )和极严重雾霾(PM2.5 浓度为 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )的天气下进行多组无线“日盲”紫外光测距实验。

表 4 直视情况下不同天气的测距误差

Tab. 4 Ranging errors in different weather conditions under LOS (m)

被测距离 真值	测距误差		
	重雾霾天气	严重雾霾天气	极严重雾霾天气
10	1.85	0.18	3.60
20	2.36	0.10	1.67
30	3.35	2.03	3.08
40	4.65	4.72	2.53
50	4.11	3.71	4.94
60	1.51	3.99	1.09
70	0.50	4.03	1.94
80	4.48	2.18	4.95
90	4.51	2.84	3.60
100	1.08	4.44	3.97

重雾霾天气(PM2.5 浓度为 363  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )情况下,修正系数  $k=3.0$ ;严重雾霾天气(PM2.5 浓度为 454  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )情况下,修正系数  $k=1.42$ ;极严重雾霾天气(PM2.5 浓度为 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )情况下,修正系数  $k=0.92$ 。直视情况下不同天气的测距结果如图 5 所示。

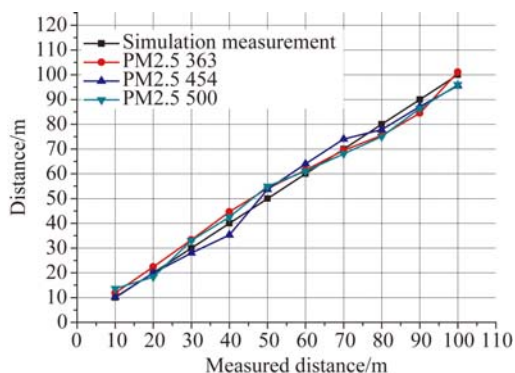


图 5 直视情况下不同天气的测距结果

Fig. 5 Results for different weather conditions under LOS

从表 4 和图 5 可知,在直视通信时,无线紫外光测距误差较小,在恶劣的大气环境中,测距误差较小。接收光功率差值在 0.1~1 个量级以内,符合预期规律。在直视情况下,被测距离真值为 0~100 m 内的测距误差均低于 5 m,测距精度较高。对于无人机助降引导和无线紫外光 mesh 网络中的节点定位有重要的意义。

#### 4.2 非直视情况下的测距实验及结果

在非直视情况下,由于紫外光在大气信道中的衰减较严重,所以有效测距距离相比于直视情况有所降低。分别在严重雾霾(PM2.5 为 454  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),极严重雾霾(PM2.5 为 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )的天气下进行了多组无线“日盲”紫外光测距实验,在两种不同的天气情况下,改变通信中的发送仰角  $\theta_1$  和接收仰角  $\theta_2$ 。当输出信号的电压幅值小于门限值 10 mV 时,信号很微弱,几乎淹没在背景噪声中。为了保证测距结果的准确性,在进行实验结果处理时剔除了输出信号电压幅值小于门限值 10 mV 时的结果,便于后期处理。

严重雾霾天气情况下测距误差的平均值如表 5 所示。

表 5 严重雾霾天气的测距误差

Tab. 5 Ranging errors in severe haze weather (m)

距离 真值	测距误差			
	$\theta_1=10^\circ$	$\theta_1=20^\circ$	$\theta_1=30^\circ$	$\theta_1=40^\circ$
	$\theta_2=10^\circ$	$\theta_2=20^\circ$	$\theta_2=30^\circ$	$\theta_2=40^\circ$
10	0.23	4.67	3.05	4.79
20	2.36	2.36	3.76	
30	4.10	1.44		
40	3.76	2.86		
50	2.77			
60	3.39			
70	3.17			

在非直视情况下,严重雾霾天气情况、不同收发仰角下的修正系数  $k=4.5$ 。严重雾霾天气情况下测距平均值与测距真值的关系如图 6 所示。

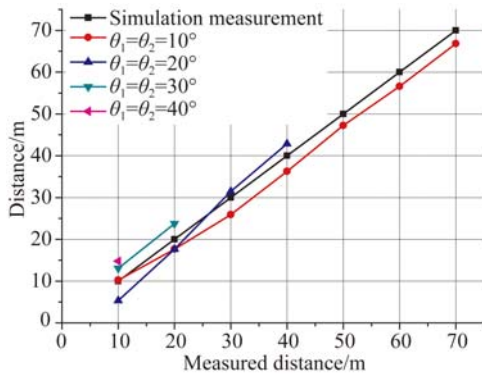


图 6 非直视严重雾霾天气的测距结果

Fig. 6 Ranging result in severe haze weather and NLOS

在非直视通信严重雾霾天气情况下,有效测距范围有所降低,这是因为在非直视情况下,光功率衰减较大。非直视情况下无线紫外光的有效测距距离降低为 0~70 m。从表 5 和图 6 的实验结果可知,在收发仰角  $\theta_1 = \theta_2 = 10^\circ$  时,测距效果较好,多次实验的测距误差平均值小于 5 m,实验测距结果与仿真结果拟合得很好,近似趋于线性。

极严重雾霾天气情况下的测距误差平均值如表 6 所示。

表 6 极严重雾霾天气的测距误差

Tab 6 Ranging errors in extremely severe haze weather (m)

距离 真值	测距误差			
	$\theta_1 = 10^\circ$	$\theta_1 = 20^\circ$	$\theta_1 = 30^\circ$	$\theta_1 = 40^\circ$
	$\theta_2 = 10^\circ$	$\theta_2 = 20^\circ$	$\theta_2 = 30^\circ$	$\theta_2 = 40^\circ$
10	0.90	4.80	2.79	4.57
20	1.27	2.13	3.18	
30	3.64	1.67		
40	3.81	3.02		
50	4.92			
60	1.69			
70	0.17			

在非直视情况下,极严重雾霾天气、不同收发仰角下的修正系数  $k=4.2$ 。严重雾霾天气情况下测距平均值与测距真值的关系如图 7 所示。

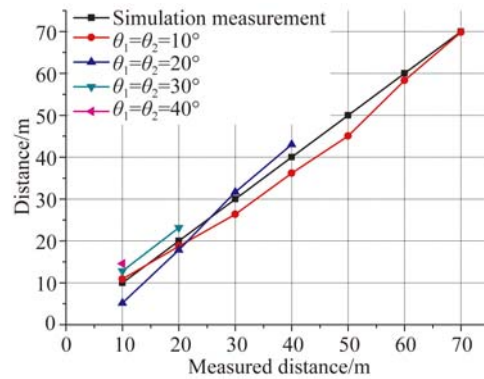


图 7 非直视极严重雾霾天气的测距结果

Fig. 7 Ranging result in extremely severe haze weather and NLOS

在非直视通信极严重雾霾天气情况下,有效测距范围有所降低,这是因为在非直视情况下,光功率衰减较大。非直视情况下无线紫外光的有效测距距离降低为 0~70 m。从表 6 和图 7 的实验结果可知,在收发仰角  $\theta_1 = \theta_2 = 10^\circ$  时,测距效果较好,多次实验的测距误差平均值小于 5 m,实验测距结果与仿真结果拟合得很好,近似趋于线性。

由表 5 和表 6,图 6 和图 7 的结果可知,在非直视通信时,当发射仰角和接收仰角较小时(发送仰角和接收仰角均小于  $10^\circ$  时),有效测距距离为 0~70 m,测距误差较小,测距结果趋于线性且与被测距离真值的偏差较小。当发射仰角逐渐增大时,在重度雾霾天气中气溶胶粒子浓度较高,多次散射不可忽略,多次散射使得测距误差增大,测距结果线性度降低。当发送仰角和接收仰角增大时,虽然测距误差能够满足要求,但是有效测距范围明显下降。发送仰角和接收仰角为  $20^\circ$  时,有效测距距离为 0~40 m;发送仰角和接收仰角为  $30^\circ$  时,有效测距距离为 0~20 m;发送仰角和接收仰角为  $40^\circ$  时,有效测距距离为 0~10 m。

## 5 结 论

本文针对无线“日盲”紫外光通信的特点,设计了一种基于无线紫外光测距的定位方法,并在不同天气下进行了多组无线“日盲”紫外光测距实验。实验结果表明,基于无线紫外光传输模型的测距方法是可行的。在直视情况下,被测距离真

值为10~100 m时的测距误差均值均小于5 m。在非直视情况下,由于受天气条件的影响较大,在严重雾霾天气时,粒子的多次散射比较严重,有效测距范围降低。在发送仰角和接收仰角较低,即发送仰角 $\theta_1$ 和接收仰角 $\theta_2$ 在 $10^\circ$ 时,有效测距距离为0~70 m,测距误差小于5 m;当发送仰角 $\theta_1$ 和接收仰角 $\theta_2$ 大于 $20^\circ$ 时,由于气溶胶粒子的散射作用,

光功率衰减较大,有效测距范围明显降低。

本文采用单颗LED进行实验,功耗为150 mW,典型的发光功率为0.3 mW,所以测距范围有限。如果使用LED阵列或者大功率的紫外光源,能够提高测距范围。由于PMT本身的特性,使得测距会有一定的误差,随着器件稳定性的不断提升,无线紫外光的测距精度会大幅度地提高。

#### 参考文献:

- [1] SHENG S Z, MIAN A A, ZHAO C, *et al.*. Autonomous takeoff and landing control for a prototype unmanned helicopter [J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(9):1053-1059.
- [2] RAMASAMY S, GARDI A, LIU A, *et al.*. A laser obstacle detection and avoidance system for manned and unmanned aircraft applications [C]. 2015 *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, IEEE, 2015:526-533.
- [3] 张磊, 杨甬英, 张铁林, 等. 基于日盲区紫外成像的无人机着陆引导技术研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7):168-177.
- ZHANG L, YANG Y Y, ZHANG T L, *et al.*. Research of UAV landing guidance technology based on solar-blind ultraviolet imaging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7):168-177. (in Chinese)
- [4] XU Z Y. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links [C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, IEEE, 2007:577-580.
- [5] XU Z Y, CHEN G, ABOU-GALALA F, *et al.*. Experimental performance evaluation of non-line-of-sight ultraviolet communication systems [J]. *SPIE*, 2007, 6709:67090Y.
- [6] CHEN G, ABOU-GALALA F, XU Z Y, *et al.*. Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links [J]. *Optics Express*, 2008, 16(19):15059-15068.
- [7] ZUO Y, XIAO H F, WU J, *et al.*. Closed-form pathloss model of non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12):2116-2118.
- [8] ZHANG H L, YIN H W, JIA H H, *et al.*. Study of effects of obstacle on non-line-of-sight ultraviolet communication links [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22):21216-21226.
- [9] 何华, 柯熙政, 赵太飞, 等. 无线“日盲”紫外光网格网中的定位研究[J]. *激光技术*, 2010, 34(5):607-610.
- HE H, KE X ZH, ZHAO T F, *et al.*. Research of position in the wireless “solar-blind” ultraviolet mesh network [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5):607-610. (in Chinese)
- [10] 赵太飞, 刘一杰, 王秀峰. 直升机降落引导中无线紫外光通信性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6):93-99.
- ZHAO T F, LIU Y J, WANG X F. Analysis of wireless ultraviolet communication performance in application of helicopter landing assistance [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6):93-99. (in Chinese)
- [11] 徐正平, 沈宏海, 姚园, 等. 直接测距型无扫描激光主动成像验证系统[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2):251-259.
- XU ZH P, SHEN H H, YAO Y, *et al.*. Scannerless laser active imaging validating system by directly ranging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2):251-259. (in Chinese)
- [12] 周俊鹏, 陈健, 李焱, 等. 舰载光电跟踪设备的目标预测算法研究[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2):519-528.
- ZHOU J P, CHEN J, LI Y, *et al.*. Research on target prediction algorithm of shipboard photoelectric tracking equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2):519-528. (in Chinese)
- [13] 宋鹏, 柯熙政, 熊扬宇, 等. 紫外光非直视非共面通信中脉冲展宽效应研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(11):1106004.
- SONG P, KE X ZH, XIONG Y Y, *et al.*. Study of ultraviolet pulse broadening in non-line-of-sight communication in noncoplanar geometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11):1106004. (in Chinese)
- [14] WANG K, GONG C, ZOU D F, *et al.*. Demon-

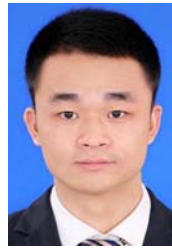


- stration of a 400 kbps real-time non-line-of-sight laser-based ultraviolet communication system over 500 m [J]. *Chinese Optical Letters*, 2017, 15(4): 040602.
- [15] QIN H, ZUO Y, ZHANG D, *et al.*. Received response based heuristic LDPC code for short-range non-line-of-sight ultraviolet communication [J]. *Optics Express*, 2017, 25(5):5018-5030.
- [16] 唐义, 倪国强, 蓝天, 等. “日盲”紫外光通信系统传输距离的仿真计算[J]. *光学技术*, 2007, 33(1):27-30.
- TANG Y, NI G Q, LAN T, *et al.*. Simulation and evaluation of transmission distance in solar-blind UV communication systems [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1):27-30. (in Chinese)
- [17] 陈君洪, 杨小丽. 非视线“日盲”紫外通信的大气因素研究[J]. *激光杂志*, 2008, 29(4):38-39.
- CHEN J H, YANG X L. Research of the atmospheric factors of solar blind ultraviolet communication [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(4):38-39. (in Chinese)

#### 作者简介:



赵太飞(1978—),男,河南浚县人,博士,教授,2007年于成都电子科技大学获得博士学位,2008—2010年完成西安理工大学电子科学与技术博士后流动站工作,主要从事紫外光通信技术、路由技术、网络抗毁性技术、物联网技术等方面的研究。E-mail: zhaotaifei@163.com



余叙叙(1991—),男,河南信阳人,硕士研究生,2015年于西安理工大学获得学士学位,主要从事紫外光通信技术、物联网技术的研究。E-mail: yxx@xaut.edu.cn