

# 基于无线紫外线通信的无人机集群防撞定位算法研究

刘涛\*, 贾遂民

郑州师范学院信息科学与技术学院, 河南 郑州, 450044

**摘要** 防撞定位算法对于无人机集群的安全飞行至关重要。针对紫外线通信范围广、抗干扰能力强的优点,提出了一种基于无线紫外线通信的无人机集群防撞定位算法。首先,构建了非视距(NLOS)通信模型,并提出了基于接收信号强度的无线紫外测距算法;然后,构建无线紫外线信标通信模型,并通过四节点定位算法实现了无人机的三维(3D)定位;最后,采用向量共享法实现多架无人机之间的有效避撞。仿真结果表明:当两架无人机之间的距离为 200 m 时,测距精度可达到 1.1 m;当参考节点超过 6 个时,3D 空间定位精度趋于稳定,约为 97%;向量共享法能够有效实现无人机集群的防撞。

**关键词** 遥感; 无线紫外线通信; 无人机; 防撞; 定位; 非视距; 向量共享法

中图分类号 TN92 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.212805

## Collision Avoidance Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle Group Based on Wireless Ultraviolet Communication

Liu Tao\*, Jia Suimin

School of Information Science and Technology, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou, Henan 450044, China

**Abstract** The collision avoidance positioning algorithm is very important for unmanned aerial vehicle (UAV) group safety. Aiming at the advantages of wide range and strong anti-interference ability of ultraviolet communication, a collision avoidance location algorithm for UAV group based on wireless ultraviolet communication is proposed. First, a non-line-of-sight (NLOS) communication model is constructed, and a wireless ultraviolet ranging algorithm based on the received signal strength is proposed. Second, a wireless UV beacon communication model is constructed, and the 3D positioning of the UAV is realized through a four-node positioning algorithm. Finally, a vector sharing method is used to achieve effective collision avoidance between multiple UAVs. Simulation results show that when the distance between two UAVs is 200 m, the range accuracy can reach 1.1 m; when there are more than six reference nodes, the 3D spatial positioning accuracy tends to be stable at approximately 97%. Therefore, the vector sharing method can effectively realize the collision avoidance of UAV group.

**Key words** remote sensing; wireless ultraviolet communication; unmanned aerial vehicle; collision avoidance; positioning; non-line-of-sight; vector sharing method

**OCIS codes** 280.3400; 280.3420

## 1 引言

近年来,随着无人机技术的不断发展,越来越多的机构、个人参与到无人机的研发和使用中来。与传统的单个无人机相比,无人机集群能够高效、快速地完成各类复杂任务<sup>[1]</sup>。目前,无人机集群的研究方向主要是无人机的定位与防撞等,研究内容涉及

到环境建模、编队控制系统、航迹规划等<sup>[2]</sup>。在无人机集群的防撞研究方面,文献[3]提出了一种结合分段自适应 B 样条(PABS)方法的领航-跟随策略,该策略可以确保多架无人机之间有序编队飞行;文献[4]将改进后的鸽群算法和无人机控制量相结合作为控制系统中的直接控制环,该控制系统能够有效控制紧密无人机编队飞行;文献[5]针对无人机编队

收稿日期: 2020-02-25; 修回日期: 2020-03-15; 录用日期: 2020-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61572447)

\* E-mail: he20100813008@163.com

控制系统中系统函数未知的情况,使用模糊逻辑系统逼近未知函数,设计了编队控制器,该控制器可确保集群内的无人机有序飞行。

实现无人机集群的定位与防撞,需要确保集群中各架无人机之间的有效通信,实时测量无人机之间的安全间距,从而防止无人机在飞行过程中出现碰撞<sup>[6]</sup>。紫外线通信是一种使用 200~280 nm 波长的紫外线作为信息载体的通信模式<sup>[7]</sup>。无线紫外线在大气中的散射使全天候操作和非视距(NLOS)通信成为可能。靠近地面的太阳盲紫外线的独特性,使其在可见度较差的条件下进行通信具有明显优势,因此,NLOS 紫外线通信被广泛应用于民用和军事领域<sup>[8]</sup>。

为了优化紫外线网络的覆盖范围、连通性和可生存性,文献[9]提出了三维无线紫外线通信网络(UVNN)的组网策略。文献[10]发现大气的散射使得 NLOS 情况下也能实现紫外线通信,并且两个终端即使在障碍物遮挡下仍可通信。

目前,国内外针对紫外线通信在无人机集群上的应用研究得较少,鉴于紫外线通信的优点,本文提出了一种基于无线紫外线通信的无人机集群防撞定位算法。该算法通过构建 NLOS 通信模型,利用无线紫外测距算法来实现无人机之间的测距。另外,在无线紫外信标通信模型的基础上,本文采用四节点定位算法实现了无人机的 3D 定位,并采用向量共享法实现了集群内无人机的有效防撞。

## 2 NLOS 紫外线通信与测距

无线紫外线通信主要有两种工作方式,即视距(LOS)和非视距(NLOS)<sup>[11]</sup>。目前,集群内无人机之间的通信系统多采用 LOS 通信,但 LOS 通信要求无线信号无遮挡地在发射端和接收端之间直线传播,在有障碍物遮挡的情况下,这种方式易导致无人机之间的通信断开<sup>[12]</sup>。鉴于此,本文采用 NLOS 紫外线通信,在该通信模式下,从发射器到接收器的传播路径上既有直射波又有反射波,可以有效解决障碍物对无人机集群的影响。

图 1 所示为 NLOS 紫外线通信链路,其中发射器  $T_x$  以光束发散角  $\phi_1$  向上发送信号,接收器  $R_x$  以视场角  $\phi_2$  接收信号。在图 1 中, $\theta_1$  为发射器的仰角, $\theta_2$  为接收器的仰角, $T_x$  和  $R_x$  之间的距离为  $r$ ,有效散射体  $V$  到  $T_x$  和  $R_x$  的距离分别为  $r_1$  和  $r_2$ ,发射器与接收器之间的夹角为  $\theta_s$ 。

在该模型中,NLOS 紫外线通信链路的接收功

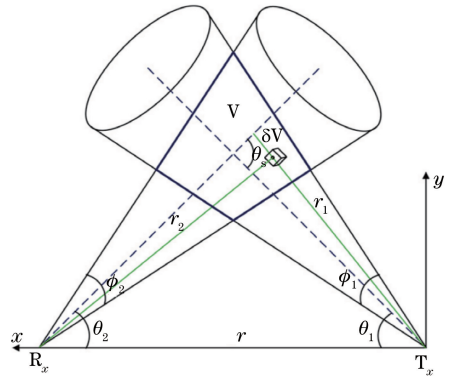


图 1 NLOS 紫外线通信模型

Fig. 1 NLOS UV communication model

率为

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

式中: $P_t$  为发射功率; $P_s$  为大气损耗功率; $A_r$  为接收面积; $K_e$  为大气消光系数( $K_e = K_a + K_s$ ,其中  $K_a$  为大气吸收系数, $K_s$  为大气散射系数)。将(1)式中的变量进行替换,即

$$\begin{cases} a = \frac{P_t A_r K_s P_s \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 \sin \theta_1 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2}\right)} \\ z = \frac{K_e (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \end{cases}, \quad (2)$$

此时(1)式可转换为

$$P_r = \frac{a}{r} \exp(-zr). \quad (3)$$

将(3)式转换成  $f(x) = x \cdot \exp(x)$  的形式,即

$$zr \exp(zr) = \frac{az}{P_r}. \quad (4)$$

由 Lambertw 函数可得到发射器与接收器之间的  $r$ ,即

$$r = \frac{\text{Lambertw}\left(\frac{az}{P_r}\right)}{z}. \quad (5)$$

将(2)式代入(5)式可得通信距离公式为

$$r = \frac{\text{Lambertw}\left[\frac{P_t A_r K_s P_s \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{P_r 32\pi^3 \sin \theta_1 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2}\right)}\right]}{\frac{K_e (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}}. \quad (6)$$

从(6)式可以看出,当  $P_t$ 、 $K_e$ 、 $A_r$  和  $P_r$  已知

时,可计算出接收器与发生器之间的距离。在实际测量中,接收信号的强度可表示为

$$P_r = \frac{EN_r}{T} = \frac{EI}{\eta_r \eta_t Ge}, \quad (7)$$

式中: $E = hc / \lambda$ , $h$  为普朗克常数, $c$  为光速, $\lambda$  为透射波长; $N_r$  为信号接收天线的增益; $\eta_r$  为量子效率; $\eta_t$  为紫外线过滤器的透光率; $G$  为光电倍增管(PMT)的增益; $e$  为单电子电荷量; $I$  为光电倍增管的输出电流。

在 NLOS 通信链路中,接收信噪比( $\sigma_{SNR}$ )的计算公式为

$$\sigma_{SNR} = \frac{\eta_r \lambda GP_t A_r}{8\pi r^2 hcR} \exp(-K_e r), \quad (8)$$

式中: $R$  为通信速率。由(7)式和(8)式可以看出,通

过所接收的信号强度,可以计算无人机之间的距离。

### 3 3D 紫外线定位算法

无人机集群实现防撞的另一个关键是确定无人机在三维(3D)空间中的位置,为此,本文构建了无线紫外线信标模型,以实现无人机的空间定位。

#### 3.1 无线紫外线信标模型

如图 2 所示为无线紫外线信标通信模型。紫外线信标的顶部是一个全向接收器,可以从任意角度接收信号。紫外线 LED 排成球形阵列结构,并且部分 LED 根据半球形结构以一定的规则排列。对每列分别编号,每层为一条纬线,每列为一条子午线,每条纬线和子午线与其基线之间有一个固定的  $\alpha$  角和  $\beta$  角。

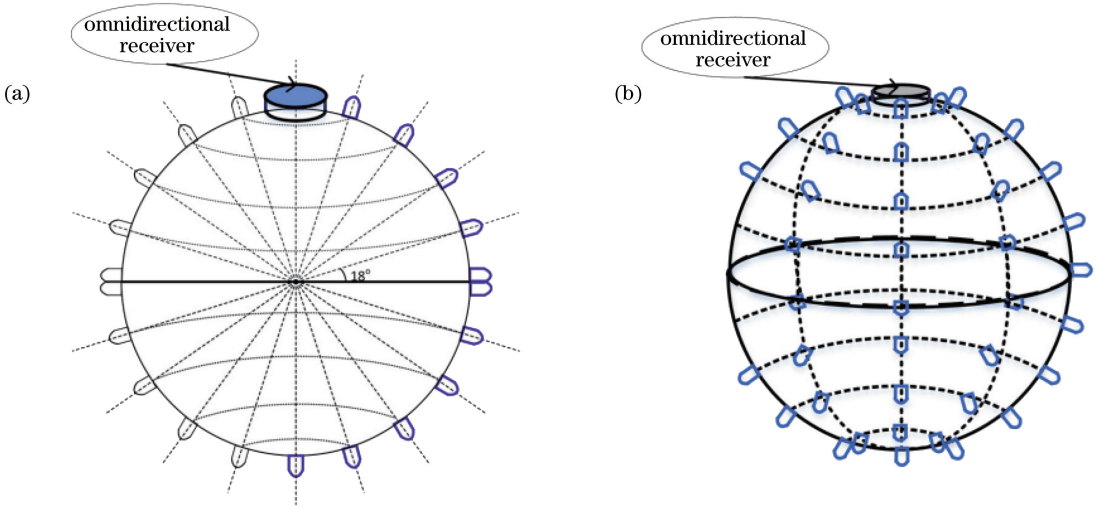


图 2 紫外线信标通信模型。(a)二维模型;(b)三维模型

Fig. 2 UV beacon communication model. (a) Two-dimensional model; (b) three-dimensional model

纬线与子午线相交处的每个 LED 都有独立的 ID 号, ID 号的前一部分代表子午线编号,后一部分代表纬线编号。当每个 LED 点亮时,LED 会通过某种编码发送包含其自身 ID 的信息。半球形信标可以在 3D 空间中向任意方向发送信号,接收器可以在不同

方向上接收强紫外线信号,从而实现可靠的通信。

如图 3 所示为无线紫外线信标节点在 2D 和 3D 空间中的通信覆盖范围。在无人机集群通信网络中,球形无线紫外线发射端的作用是使相邻节点的接收端在不同方向上接收强无线紫外线信号。发射

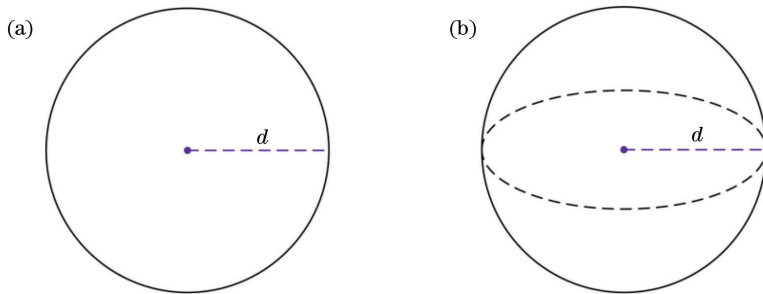


图 3 无线紫外线信标节点在 2D 和 3D 空间中的通信覆盖范围。(a) 2D 空间;(b) 3D 空间

Fig. 3 Communication coverage of a wireless UV beacon node in two- and three-dimensional spaces.

(a) Two-dimensional space; (b) three-dimensional space

器使用波形发生器将二进制序列馈送到为紫外线 LED 供电的电流驱动器电路上。发射端与接收端之间的距离可以通过(6)式来计算。

### 3.2 四节点定位算法

图 4 所示为四节点定位模型。在 3D 空间定位中,如果已知 4 个参考节点的坐标,并且能够计算未知节点与参考节点之间的距离,就可以获得未知节点的 3D 坐标。未知节点与参考节点之间距离的计算公式为

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_m - x_1)^2 + (y_m - y_1)^2 + (z_m - z_1)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_m - x_2)^2 + (y_m - y_2)^2 + (z_m - z_2)^2} \\ d_3 = \sqrt{(x_m - x_3)^2 + (y_m - y_3)^2 + (z_m - z_3)^2} \\ d_4 = \sqrt{(x_m - x_4)^2 + (y_m - y_4)^2 + (z_m - z_4)^2} \end{cases}, \quad (9)$$

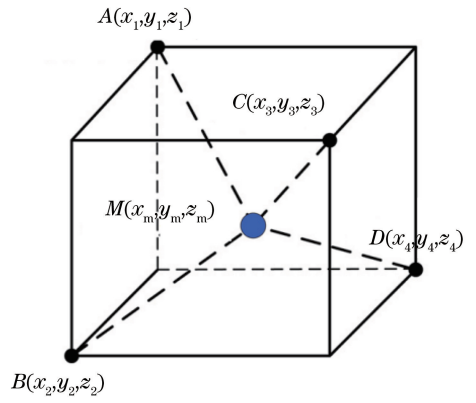


图 4 四节点定位模型

Fig. 4 Four-node positioning model

式中:  $(x_m, y_m, z_m)$  为位置节点的 3D 坐标。

在图 4 中,  $M(x_m, y_m, z_m)$  为未知节点的 3D 坐标,即无人机的空间位置。其坐标为

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1)2(y_2 - y_1)2(z_2 - z_1) \\ 2(x_2 - x_1)2(y_2 - y_3)2(z_2 - z_3) \\ 2(x_2 - x_1)2(y_4 - y_3)2(z_4 - z_3) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + z_2^2 - z_1^2 + d_1^2 - d_2^2 \\ x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 + z_2^2 - z_3^2 + d_3^2 - d_2^2 \\ x_4^2 - x_3^2 + y_4^2 - y_3^2 + z_4^2 - z_3^2 + d_3^2 - d_4^2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

## 4 多架无人机防撞方法

在无人机集群飞行时,重点需要解决的是各架无人机之间的碰撞问题。在实现各架无人机测距与定位的基础上,本文采用向量共享法实现多架无人机的防撞。以下以两架无人机为例进行分析。两架无人机能够通过无线紫外线通信实时掌握对方的方位和飞行速度;在经过相撞检测后,若两架无人机存在相撞的可能性,则采用向量共享法对两架无人机的飞行航向角进行调整,以避免两者相撞。

### 4.1 相撞检测

通过两架无人机的相对运动来分析判断它们是否会发生碰撞。如图 5 所示, A 和 B 为两架航向不同的无人机,  $v_A$  为无人机 A 的速度向量,  $v_B$  为 B 的速度向量,  $v_r$  表示相对速度向量。此时可通过最接近时间  $\tau$  以及两架无人机之间的脱靶距离  $r_m$  来检测两架无人机是否会发生碰撞,计算公式为

$$\tau = -(\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_r) / (\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{v}_r), \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{r}$  为两架无人机之间的相对距离。若  $\tau > 0$ , 则  $|\mathbf{r}|$  减小, 此时 A 和 B 可能会发生碰撞, 需要进一步进行判断。如图 5 所示为两架无人机的运动轨迹, 从图中可以得到它们之间的脱靶距离为

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{r} + \mathbf{v}_r \cdot \tau. \quad (12)$$

在(12)式中,若  $|\mathbf{r}_m| < r_{safe}$ , 则 A 与 B 会相撞, 其中  $r_{safe} = r_{A, safe} + r_{B, safe}$ 。图 5 所示  $P_{CA}$  为两架无人机的最接近点。

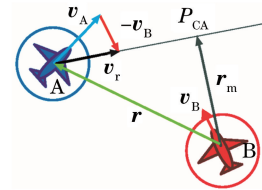


图 5 两架无人机的运动状态

Fig. 5 Movement status of two drones

### 4.2 防撞方法

当两架无人机可能发生相撞时,需要改变无人机的飞行速度以及航向,从而增大脱靶距离。图 6 所示为向量共享法示意图,其中:  $\mathbf{r}_{vs,A}$  为无人机 A 的共享向量,与  $\mathbf{r}_m$  方向相同;  $\mathbf{r}_{vs,B}$  为无人机 B 的共享向量,与  $\mathbf{r}_m$  方向相反。共享向量表达式为

$$|\mathbf{r}_{vs,A}| + |\mathbf{r}_{vs,B}| + |\mathbf{r}_m| \geq r_{safe}. \quad (13)$$

无人机 A 共享向量的计算公式为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{vs,A} = \frac{|\mathbf{v}_B|}{|\mathbf{v}_A| + |\mathbf{v}_B|} \cdot \frac{r_{safe} - |\mathbf{r}_m|}{|\mathbf{r}_m|}, \\ \mathbf{U}_A = \mathbf{v}_A \cdot \tau + \mathbf{r}_{vs,A} \end{cases}, \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{U}_A$  表示为了避免两架无人机相撞进行调整后

的无人机 A 的速度方向。

无人机 B 的共享向量计算公式为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{VS,B} = \frac{|\mathbf{v}_A|}{|\mathbf{v}_A| + |\mathbf{v}_B|} \cdot \frac{r_{safe} - |\mathbf{r}_m|}{|\mathbf{r}_m|}, \\ \mathbf{U}_B = \mathbf{v}_B \cdot \tau + \mathbf{r}_{VS,B} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $\mathbf{U}_B$  表示为避免两架无人机相撞进行调整后的无人机 B 的速度方向。

如果无人机 A 和 B 的速度与  $\mathbf{U}_A$ 、 $\mathbf{U}_B$  相同，则  $|\mathbf{r}_{VS,A}| + |\mathbf{r}_{VS,B}| + |\mathbf{r}_m| = r_{safe}$ ，此时 A 和 B 的最小航向改变量为

$$\begin{cases} \Delta\phi_{A,\min} = \frac{\mathbf{v}_A \cdot \mathbf{U}_A}{|\mathbf{v}_A \cdot \mathbf{U}_A|} \\ \Delta\phi_{B,\min} = \frac{\mathbf{v}_B \cdot \mathbf{U}_B}{|\mathbf{v}_B \cdot \mathbf{U}_B|} \end{cases} \quad (16)$$

只有 A 和 B 的航向改变量大于等于最小航向改变量时，才能避免两者相撞。此外，还需要讨论无人机在改变航向时如何避免相撞的问题。若无人机改变航向时，其转弯距离为最小转弯半径，此时需要满足

$$|\mathbf{r}| > r_{safe} + 2\rho_A + 2\rho_B, \quad (17)$$

式中： $\rho_A$ 、 $\rho_B$  分别为 A、B 的最小转弯半径。航向改变之后，A 和 B 以新的速度飞行，即  $\mathbf{v}_{A,\text{new}} = \mathbf{v}_A \cdot \mathbf{U}_A / |\mathbf{U}_A|$ ， $\mathbf{v}_{B,\text{new}} = \mathbf{v}_B \cdot \mathbf{U}_B / |\mathbf{U}_B|$ 。此时，使用 (11) 式对最接近时间进行计算，如果  $\tau > 0$ ，则表明 A 和 B 之间开始远离，即两无人机实现避撞。

另外，除了要考虑无人机之间的相撞问题外，还要考虑无人机在飞行过程中存在的障碍物。为防止无人机在改变航向过程中与障碍物相撞，可以通过增加航向改变量来解决。如图 6 所示，为了避开路径上的障碍物，需要增加航向改变量  $\Delta\phi_A$ 、 $\Delta\phi_B$ ，将速度方向改变至  $\mathbf{U}'_A$ 、 $\mathbf{U}'_B$ 。

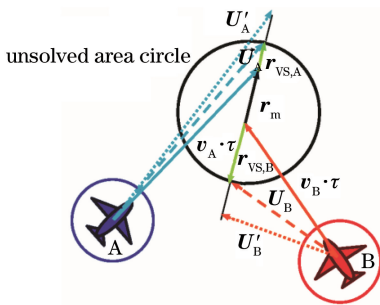


图 6 向量共享法防撞

Fig. 6 Vector sharing method for collision avoidance

## 5 实验结果与分析

为了验证本文提出的基于无线紫外线通信的无

人机集群防撞定位算法的性能，进行了无人机群避撞与定位仿真实验。实验硬件环境为 Intel(R)Core (TM) i5-3337U Duo CPU1.8 GHz/8 GH 内存；软件运行环境为 MATLAB 2013a。系统模型参数如表 1 所示。

表 1 系统模型参数

Tab 1 System model parameters

Parameter	Value
Wavelength $\lambda$ /nm	255
Average power $T_x$ /mW	50
Effective area	$8 \times 24$
$A_r$ /mm	
Typical Gain of PMT G	$10^7$
Quantum efficiency $\eta_r$ /%	25
Beam divergence angle of the transmitter $\phi_1$ /( $^\circ$ )	6
Field of View of the receive $\phi_2$ /( $^\circ$ )	80
Atmospheric absorption coefficient $K_a$ /km $^{-1}$	0.74
Mie scattering coefficient $K_m$ /km $^{-1}$	0.25
Rayleigh scattering coefficient $K_r$ /km $^{-1}$	0.24
Atmospheric scattering coefficient $K_s$ /km $^{-1}$	0.49
Atmospheric extinction coefficient $K_e$ /km $^{-1}$	1.23

### 5.1 紫外线测距

为了验证 NLOS 通信方式下紫外线测距的性能，将其与 LOS 紫外测距、TDOA 测距<sup>[13]</sup> 以及 RSSI 测距<sup>[14]</sup> 进行对比。其中，TDOA 主要利用信号到达监测站的时间进行测距，RSSI 主要利用接收无线电信号的强度实现测距。

图 7 所示为 4 种不同测距方式下的信号接收强

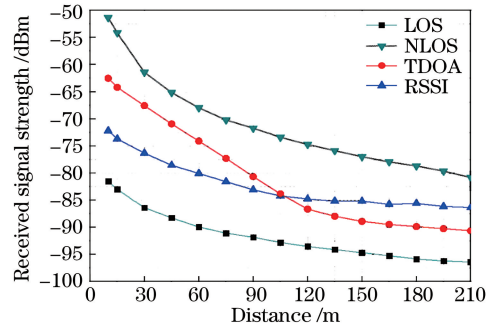


图 7 4 种测距方式下的信号接收强度

Fig. 7 Received signal strength of four ranging methods

度(RSS)与测距距离之间的关系。可以看出:随着测距距离增加,4种测距方式的信号接收强度均逐渐递减,其中NLOS信号的接收强度最好,LOS信号的接收强度最差。

根据文献[15],在紫外线通信中,信号接收强度与大气消光系数  $K$  有关。阴霾天气下,大气消光系数增加,紫外线信号衰减加快,导致通信距离衰减。需要说明的是,本次实验是在晴天条件下进行的,测距距离较阴霾天气下的更远。

图8所示为NLOS通信方式下发射器和接收器在不同仰角下的信号接收强度。从图8中可以看出,随着发射器的仰角( $\theta_1$ )和接收器的仰角( $\theta_2$ )增加,信号衰减得越来越快。总而言之,在实际工程应用中应考虑天气条件和通信距离,以便选择合适的发射功率。

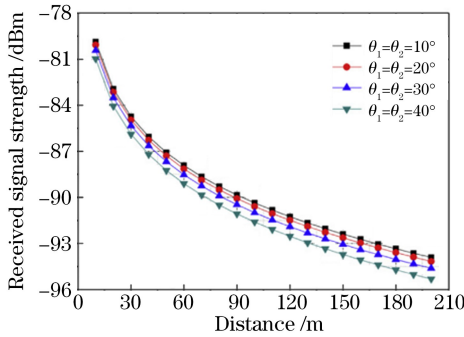


图8 NLOS下不同发射和接收角度下的信号接收强度  
Fig. 8 Received signal strength of different transmitting and receiving angles under NLOS

图9所示为4种不同测距模式下的测距误差比较。很显然,在4种测距方式下,随着距离增加,测距误差逐渐增加。在距离为200 m时,NLOS测距模式下的误差为1.1 m,LOS测距模式下的误差为2.9 m,TDOA测距模式下的误差为1.26 m,RSSI测距模式下的误差为2.48 m。由此可以看出,NLOS模式具有良好的测距性能。

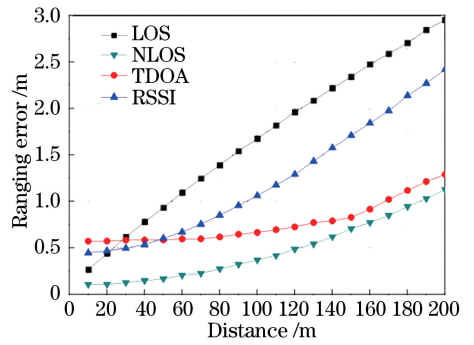
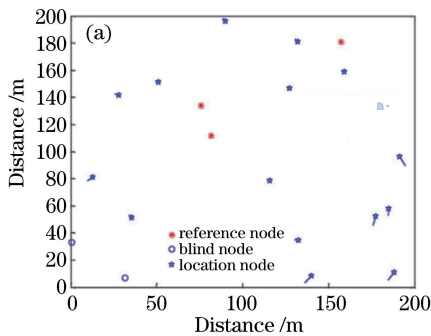


图9 不同测距模式下的紫外线测距误差  
Fig. 9 UV ranging error at different ranging modes

### 5.2 紫外线定位

定位策略:具有相邻参考节点的未知节点仅使用参考节点进行定位,没有相邻参考节点的未知节点使用已定位的节点进行定位。

定位精度可定义为

$$L_{ac} = N_{loc} / N_{un}, \quad (18)$$

式中: $L_{ac}$  为定位精度; $N_{loc}$  为可以定位的未知节点的数量; $N_{un}$  为未知节点的数量。

实验中,为了比较紫外线定位算法的性能,分别选取2D和3D空间进行实验。在2D空间中,选取20个节点,并将这些节点随机部署在200 m × 200 m的空间中,紫外线通信覆盖范围是半径为100 m的圆形区域。随机选择3个节点作为参考节点,此时可以使用3个参考节点来定位未知节点。图10(a)所示为2D空间的节点定位结果,其中有2个节点无法定位,为盲节点,定位算法的精度为82.4%,平均节点定位误差小于10 m。仿真结果验证了本文所提定位算法的准确性。

在3D空间中,选取20个节点,并将这些节点随机部署在200 m × 200 m × 200 m的空间中,然后随机选择4个节点作为参考节点,此时可以使用4个参考节点来定位未知节点。图10(b)所示为3D空间的节点定位结果,其中存在1个无法定位的节

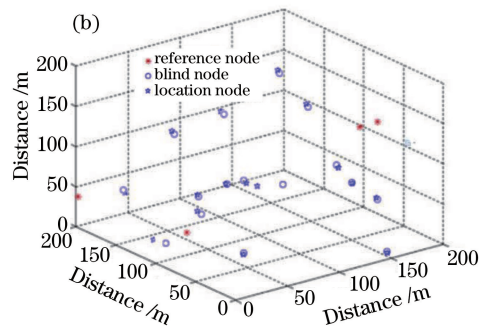


图10 2D和3D空间的定位结果。(a) 2D空间;(b) 3D空间

Fig. 10 Positioning results of two- and three-dimensional spaces. (a) Two-dimensional space; (b) three-dimensional space

点,定位算法的精度为 81.25%,平均节点定位误差小于 10 m。

图 11 所示为 2D 和 3D 空间的定位精度。可以看出:随着参考节点数量增加,两种空间下的定位精度均逐渐增加,并最终趋于稳定;2D 空间中的定位精度最终约为 87%,3D 空间中的定位精度最终约为 97%,显然 3D 空间中的定位效果更好;当参考节点数少于 4 个时,2D 空间的定位效果较 3D 空间更佳。另外,由图 11 还可以看出,在实际的无人机集群定位时,选取 6 个参考节点可以获得较好的定位效果。

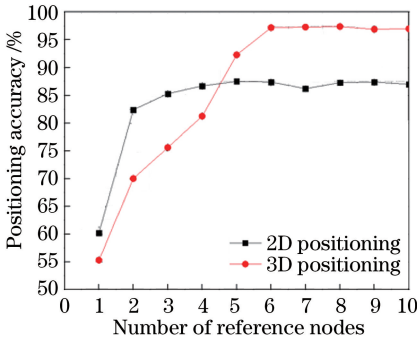


图 11 2D 和 3D 空间定位精度

Fig. 11 2D and 3D spatial positioning accuracy

### 5.3 两无人机避障防撞

假设在两架无人机的飞行路线上有 4 个障碍物 ( $O_1, O_2, O_3, O_4$ ),障碍物坐标分别为  $O_{obs1} = (35 \text{ m}, 10 \text{ m}), O_{obs2} = (35 \text{ m}, 23 \text{ m}), O_{obs3} = (49 \text{ m}, 31 \text{ m}), O_{obs4} = (35 \text{ m}, 45 \text{ m})$ ,障碍物半径分别为 3, 4.2, 0.8, 3.2 m。状态采样频率设置为 20 Hz。设置无人机 A 和 B 的起始位姿和目标位姿分别为:  $q_{A,s} = (30 \text{ m}, 0 \text{ m}, 60^\circ), q_{A,f} = (55 \text{ m}, 60 \text{ m}, 60^\circ), q_{B,s} = (0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 30^\circ), q_{B,f} = (80 \text{ m}, 65 \text{ m}, 30^\circ)$ 。

如图 12 所示,当无人机 A 到达  $q_{A,4}$ 、无人机 B 到达  $q_{B,1}$  时,为避免两者相撞,无人机 A 顺时针改变航向、无人机 B 逆时针改变航向继续飞行。在不考虑障

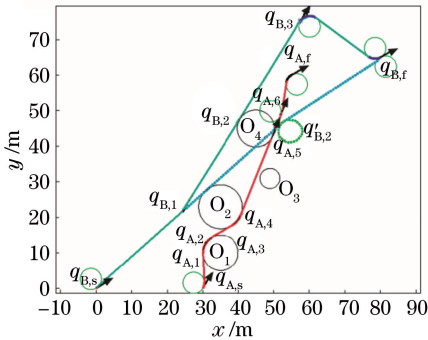


图 12 两无人机碰撞路径

Fig. 12 Two UAV collision avoidance paths

碍物的情况下,无人机 B 的飞行轨迹为图 12 中的虚线,此时其飞行轨迹与障碍物  $O_4$  相交,则该路径存在一定不安全性。因此,在  $q_{B,1}$  时,无人机 B 应增大航向角的改变量,以避免与  $O_4$  碰撞,如图 12 绿色实线所示;最终当无人机 B 达到  $q_{B,3}$  时,A、B 不会相撞,此时再使用路径规划算法,无人机 B 达到  $q_{B,f}$ 。无人机 A 的飞行路径规划如红色实线所示。

如图 13 所示为无人机 A 和 B 之间距离的曲线图。由图 13 可知,在 5.5 s 时,A 和 B 的距离小于安全距离,即 A 和 B 会相撞。为了避免这种情况,采用防撞方法,在 2.85 s 时改变航向角,最终得到虚线所示的相对距离曲线,此时 A 和 B 之间的最小距离为 13.15 m,远远大于最小安全距离,避免了两者的相撞。

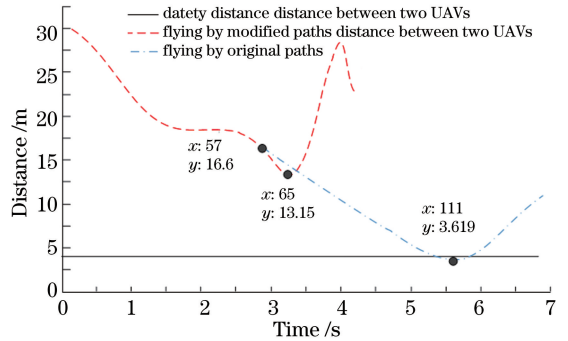


图 13 两架无人机之间的距离

Fig. 13 Distance between two UAVs

## 6 结 论

本文提出了一种基于无线紫外线通信的无人机集群防撞定位算法,该算法采用紫外线 NLOS 通信方式实现无人机的测距与定位。通过实验得出了以下结论:

1) NLOS 模式在不同距离情况下的测距精度要明显高于 LOS 模式;这两种模式下的测距误差均随着距离的增加而增大;在测距距离为 200 m 时,紫外线 NLOS 测距误差仅为 1.1 m。

2) 在相同的参考节点下,3D 空间的定位精度更佳,且随着参考节点数增多,定位精度逐渐增加最后趋于稳定;当参考节点超过 6 个时,3D 空间定位精度趋于稳定,约为 97%。

3) 采用向量共享法能够有效实现两架无人机之间的避撞。

紫外线通信信号接收强度对无人机的安全飞行至关重要,其信号接收强度受大气消光系数的影响,而本文忽略了消光系数对接收信号强度的影响。因

此,后续将重点研究不同天气情况、不同通信距离下,发射功率与接收信号强度之间的关系。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao C H, Zhang H M, Song J. Fingerprint based visible light indoor localization method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0806002.  
赵楚韩, 张洪明, 宋健. 基于指纹的室内可见光定位方法[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0806002.
- [2] Bai Y, Zhang L C, Shi Y S, et al. Study of shape matching and localization algorithm based on polygon fitting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041501.  
白宇, 张李超, 史玉升, 等. 基于多边形拟合的形状匹配与定位算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041501.
- [3] Razmi H, Afshinfar S. Neural network-based adaptive sliding mode control design for position and attitude control of a quadrotor UAV[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 91: 12-27.
- [4] Dong W. Multi-target visual positioning technology of four-wing UAV based on VI-SLAM[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(11): 224-227, 232.  
董巍. 基于 VI-SLAM 的四翼无人机多目标视觉定位技术[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(11): 224-227, 232.
- [5] Mustafah Y M, Azman A W, Akbar F. Indoor UAV positioning using stereo vision sensor[J]. Procedia Engineering, 2012, 41: 575-579.
- [6] Shen R, Zhang J, Wang D. Indoor location method and the Cramer-Rao bound estimation based on visible light communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090604.  
沈芮, 张剑, 王鼎. 基于可见光通信的室内定位算法及相应参数估计克拉美罗界[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090604.
- [7] Dong W J, Wang X D, Wu N. A hybrid RSS/AOA algorithm for indoor visible light positioning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 050603.  
董文杰, 王旭东, 吴楠. 基于 RSS/AOA 混合的室内可见光定位算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 050603.
- [8] Ma Y, Wu A G, Du C Y. Vision based localization algorithm for unmanned aerial vehicles in flight[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(11): 42-46.  
马园, 吴爱国, 杜春燕. 基于视觉的无人机飞行过程定位算法研究[J]. 电光与控制, 2013, 20(11): 42-46.
- [9] Daakir M, Pierrot-Deseilligny M, Bossier P, et al. Lightweight UAV with on-board photogrammetry and single-frequency GPS positioning for metrology applications[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 127: 115-126.
- [10] Liu Y F, Noguchi N, Liang L G. Development of a positioning system using UAV-based computer vision for an airboat navigation in paddy field[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 126-133.
- [11] Yang C C, Chen J H, Liu D L, et al. Indoor joint localization algorithm based on time and angle of arrival[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 222802.  
杨超超, 陈建辉, 刘德亮, 等. 基于到达时间和到达角度的室内联合定位算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 222802.
- [12] Yang R F, Luo C B, Zhang Z C, et al. UAV positioning based on extended Kalman filter algorithm[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(1): 60-66.  
杨润丰, 骆春波, 张智聪, 等. 基于扩展卡尔曼滤波算法的无人机定位[J]. 电讯技术, 2016, 56(1): 60-66.
- [13] Xu Y S, Tan L. A modified quasi Newton-KNN algorithm for TDOA localization[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(10): 1578-1583.  
徐耀松, 谭亮. 基于改进拟牛顿-K 近邻的 TDOA 定位算法[J]. 传感技术学报, 2018, 31(10): 1578-1583.
- [14] Le Z W, Wang H, Xie X J. Localization algorithm based on RSSI obstacles potential energy correction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2): 200-207.  
乐志伟, 王浩, 谢小军. 基于 RSSI 障碍势能矫正的定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 200-207.
- [15] Yang S, Cheng H, Li T, et al. UAV reconnaissance images targeting method and accuracy analysis[J]. Infrared Technology, 2016, 38(10): 825-831.  
杨帅, 程红, 李婷, 等. 无人机图像侦察目标定位方法及精度分析[J]. 红外技术, 2016, 38(10): 825-831.