

面向定位应用的无人机的悬停位置和飞行路径优化



赵晓薇 朱小军 韩周卿

南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 211106

(2806096134@qq.com)

摘要 无人机的一种典型应用是对地面目标进行定位。本文考虑,在无人机的飞行过程中,无人机在特定位置悬停,并广播信标信号。若地面节点与无人机悬停位置的距离满足通信范围,即可监测到无人机的信标信号,当地面节点监测到3个及以上不同悬停位置的信标信号时,即可使用多边定位法对自身进行定位。文中主要解决了如何选择悬停位置以及如何在悬停位置给定的情况下优化无人机飞行路径的问题,提出了两种无人机的悬停方案,并规划了两种方案下无人机的飞行路径,证明了两种悬停方案下提出的路径均为最短回路。通过模拟实验,验证了所提方案可以实现对待覆盖区域的完全覆盖,使任意地面节点均可实现定位;并且该方案可以通过调整无人机飞行高度和悬停方案中的网格大小,来提高定位精度。

关键词: 无人机;悬停位置;路径规划;地面目标定位;最短路径

中图分类号 TP393

Hover Location Selection and Flight Path Optimization for UAV for Localization Applications

ZHAO Xiao-wei, ZHU Xiao-jun and HAN Zhou-qing

College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract A typical application of UAV is to locate ground targets. This paper proposes to let a UAV hover at predetermined positions to broadcast beacon signals. When a ground node receives beacons from at least three hovering positions, it can localize itself. This paper mainly considers how to choose the hovering positions and how to optimize the flight path of the UAV. This paper proposes two hovering schemes, and gives two path planning algorithms for the hovering schemes to optimize the flight path of the UAV. We prove that the flight paths under the two hovering schemes are the shortest paths respectively. Through simulations, it is verified that the proposed scheme can achieve complete coverage of the area, so that any ground node can be localized. Simulations show that the proposed schemes can achieve higher localization accuracy by adjusting the flying height of the UAV or the grid size in the hovering schemes.

Keywords UAV, Hovering position, Path planning, Ground target localization, Shortest paths

1 引言

无人机具有低功耗、移动灵活等诸多优点,因此在各个领域得到了广泛的应用。一种典型的应用是将无人机作为空中基站(移动或非移动的)^[1-4],与地面上的目标节点交换数据,或将无人机作为路由中继,为传感器节点转发数据。如文献[1]将无人机作为空中基站,对如何使无人机的信号覆盖范围最大进行了研究;文献[2]用无人机作为中继以支持地面节点通信,考虑无人机的能耗和通信吞吐量,使能量效率最大化。另一种十分重要的应用是使用无人机对地面目标进行定位^[5-6],例如,在自然灾害发生时,使用无人机对某些经地面难以到达的地方进行搜索,从而进行救援工作,或是在战场上对敌人的位置进行侦查。

使用无人机技术对传感器节点进行定位的应用方案也被相继提出。有些研究者采用了各种不同的测距方法,如RSSI(Received Signal Strength Indication), TOA(Time of Arrival), TDOA(Time Difference of Arrival), AOA(Angle of Arrival), UWB(Ultra Wide Band)^[7-12]等,基于这些测距方法规划无人机的飞行路径,以完成定位。Grigulo等^[13]使用无人机作为信标节点广播信息,首先通过全球定位导航技术和RTK(Real Time Kinematic)技术获得较为准确的位置信息,有效提高了定位精度;然后利用几何原理即可实现对地面静态传感器节点的定位,但其对无人机的飞行路径没有进行充分的考虑。Xu等^[8]通过多架无人机使用AOA方法对目标进行定位,利用卡尔曼滤波器开发了基于梯度下降法的无人机路径优化算法。Wang等^[14]提出使用多架无人机,并基于

到稿日期:2020-10-20 返修日期:2021-03-08 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61972199);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfjj20201602)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61972199) and Open Research Fund for Graduate Student in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(kfjj20201602).

通信作者:朱小军(xzhu@nuaa.edu.cn)

TDOA 的方法进行定位,同时,优化了无人机的飞行路径。这些方法对于硬件都有一定要求,而 RSSI 技术对硬件要求较低,所以使用 RSSI 进行定位的研究较多。Sallouha 等^[15]基于相同距离时 RSS(Receive Signal Strength)相同的原理,提出了一种定位方法。Das 等^[16]使用安装在单个无人机上的射频信标进行定位,他们采用支持向量回归技术,通过使用射频信号的接收强度作为输入直接对传感器进行定位。使用 RSSI 的相对强弱也可以对目标进行定位,如利用移动信标节点^[17]或无人机^[18]。最强的信号对应于最近的位置,因此可以利用垂直相交的几何关系来计算节点位置,但是 RSSI 技术的定位精度有限。

不同于已有文献关注于具体的定位技术,本文研究如何在利用已有的定位技术的前提下,设计无人机的悬停点和规划无人机的路径。具体而言,在定位过程中,地面目标被动监听信号并使用测距技术测量其与无人机的距离,据此即可推测自身位置。无人机搭载信标节点飞行,在飞行过程中可以在预定位置悬停,其在悬停时作为测距模块的基站,地面节点观测到 3 次及以上测距信息时即可使用多边形定位方法(multilateration)进行定位(采用其他定位方法,如多角定位 multiangulation,亦可)。因受限于无人机的续航能力,所以需要无人机飞行路径进行优化。已有的无人机飞行路径优化研究工作不适用于本文的实验场景^[19],而且不同的定位方案下无人机的路径规划问题有不同的特征。例如,如果采用 RSSI 的相对强弱对地面目标提供定位服务,则其路径规划中不涉及悬停点的选择,从而导致路径规划问题的约束条件不同。因此本文提出了适用于本文研究场景的两种无人机悬停方案,并规划了两种悬停方案下无人机飞行的最优路径。

本文的主要贡献是给出了两种悬停方案和相应的飞行路径,并且证明了在两种悬停方案下,给出的路径是经过所有悬停点的最优路径。并通过模拟实验分析验证了本文提出的两种定位方案均具有较好的定位性能。

2 问题模型

2.1 地面节点定位

如图 1 所示的场景,在某区域内的地面上分布了一些节点,无人机以高度 H 在空中飞行。无人机搭载广播信标节点,当无人机悬停时,该广播信标会不断地广播无人机的位置信息。记广播信标信号的最大传输距离为 r ,在地面覆盖的最大信号半径为 R 。

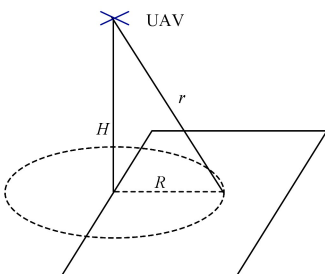


图 1 无人机对地面目标进行定位的方法

Fig. 1 Method for UAVs to locate ground targets

无人机飞行时在预定位置悬停,因此这些位置被称为悬停点。当无人机悬停时,信标节点会广播无人机的位置信息,此时地面节点接收广播信号的数据,即此时信标节点的位置信息,并借助测距模块测量与信标节点的距离。当地面节点获得 3 组及以上信标节点的位置信息和测距数据时,即可使用多边形定位方法。针对测距误差的情况,我们使用传统的最小二乘法进行求解。

无人机的悬停时间以确保地面节点能够接收到至少 1 次广播信号为准。例如,若地面节点采用低占空比调度方法,平均 1 s 唤醒一次,则无人机至少悬停 1 s。

本文考虑一般的测距方法,具体的测距技术可以是 TDOA, AOA, RSS, UWB 等。本文在模拟实验中采用的是 UWB 测距技术,同时本文提出的方案对其他测距技术也同样适用。

2.2 无人机悬停位置和路径规划问题

问题模型:给定待覆盖区域,选择一系列位置作为无人机的悬停点,使得待覆盖区域内任意点与至少 3 个悬停点的距离不超过 r (或者与悬停点在地面的投影不超过 R)。同时,规划无人机的飞行路径,使得路径为经过所有悬停点至少 1 次的回路。路径优化目标有两个,其一是最小化定位误差,其二是最小化无人机路径长度。

应当指出,这两个目标存在一定的冲突。悬停点越多、越密集,则测距数据越多、测距误差越小,从而定位误差越小,但同时意味着无人机路径越长;反之,定位误差越大,则无人机路径越短。

本文将提供两种悬停方案:一种基于等边三角形,一种基于正方形,并分别给出了相应路径规划方法。虽然一般的哈密尔顿路径问题为 NP 难问题,但是我们证明了在提出的悬停方案中,本文给出的哈密尔顿路径是经过该方案下所有悬停点的最优哈密尔顿路径。

为了便于叙述,在后文的悬停点选择和路径规划过程中,我们只考虑无人机悬停点和路径在二维平面的投影。

3 基于等边三角形的无人机悬停方案及路径规划

对于需要定位的区域,首先找到包含该区域的最小正方形区域,将其作为待覆盖区域,设其边长为 w ,然后待覆盖区域设计悬停点分布。

基于等边三角形的无人机悬停方案如图 2 所示,将待覆盖区域分为以广播信号半径(在地面的投影) R 为边长的多个等边三角形,广播信号在地面的覆盖范围包含 6 个等边三角形 3 个顶点的距离不超过 R ,因此在规划悬停点时,只需保证任意位置都被包含在某一个等边三角形中即可实现定位。因为待覆盖区域为正方形,所以可以利用正方形的两条邻边为 x 轴和 y 轴,并以这两条边的交点为原点,建立坐标系,如图 2 所示。需要注意的是,图 2 未标注待覆盖区域的边界,广播信号的覆盖范围与待覆盖区域不一定完全相同。下面来详细介绍本文提出的方案中待覆盖区域大小与等边三角形网格的分布之间的关系,确定等边三角形网格后,即可得到所有悬

停点的准确位置。

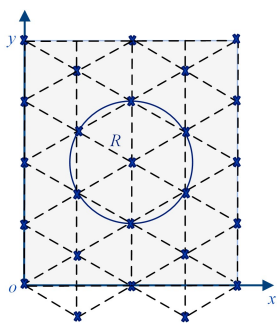


图2 基于等边三角形的无人机悬停方案

Fig. 2 UAVs' hovering scheme based on equilateral triangle

为了保证待覆盖区域内每一个位置都可以被定位,需满足广播信号的覆盖范围等于或大于待覆盖区域范围,并使得该范围内不存在接收到广播信号次数小于3的区域,即任意点都需要被包含在一个等边三角形网格中。同时要尽量减小无人机飞行路径的长度,减少不必要的信号覆盖。按照图2所示坐标系,假设横向x轴上等边三角形网格个数为s,纵向y轴上网格个数为t,待覆盖区域的边长为w,令 $s = \min\{s | s \times (\frac{\sqrt{3}}{2}R) \geq w\}$, $t = \min\{t | t \times R \geq w\}$,即可满足条件。

图3为x轴方向上等边三角形网格个数计算的示例图,当 $w = w_1$ 时,令 $s = 3$,满足 $s \times (\frac{\sqrt{3}}{2}R) = w$,则x轴方向的网格个数为3;当 $w = w_2$ 时,令 $s = 4$,满足 $s \times (\frac{\sqrt{3}}{2}R) > w$,则x轴方向的网格个数为4。

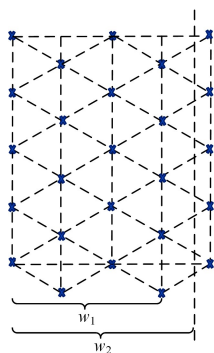


图3 基于等边三角形的悬停方案下,x轴方向网格个数的计算方法

Fig. 3 Calculation method of number of grids in x-axis direction, under hovering scheme of equilateral triangle

下面介绍y轴方向上等边三角形网格个数的计算方法,如图4所示, L_1, L_2 为y轴方向待覆盖区域的两条边界。图中两个黑色三角形区域位于待覆盖区域的下边缘,为了保证该区域中任意点都被包含在等边三角形中,需设置一行纵坐标为 $-\frac{R}{2}$ 的悬停点,如图4中最下侧一行中的两个点。根据w能否被R整除分为两种情况来具体讨论如何设置悬停点: 1)当 $t \times R = w$ 时,以图4为例,当 $w = w_3$ 时,令 $t = 3$,满足 $t \times R = w$,则y轴方向的网格个数为3,而此时灰色区域内的点就不能被包含在某个等边三角形中,所以我们设计偶数列的网格个数取4,则偶数列的网格比奇数列的网格多一个,同时

偶数列的悬停点个数为5,奇数列的悬停点个数为4。可得,该情况下,奇数列和偶数列的列数总是不同的。2)当 $t \times R > w$ 时,以图4为例,当 $w = w_4$ 时,令 $t = 4$,满足 $t \times R > w$,则y轴方向的网格个数为4,该情况下奇数列和偶数列的网格个数相同时,待覆盖区域内任意点均可实现定位。在图5中,当 $w = w_5$ 时, $t = 4$,满足 $t \times R > w$,若奇数列与偶数列的网格数相同,则仍存在部分区域内的点未被包含在某个等边三角形中,即图5中的灰色区域。因此,令偶数列网格比奇数列网格多一个,分别为5和4,悬停点个数分别为6和5,即可满足定位条件。该情况下,奇数列和偶数列的网格个数有时相同,有时不同。

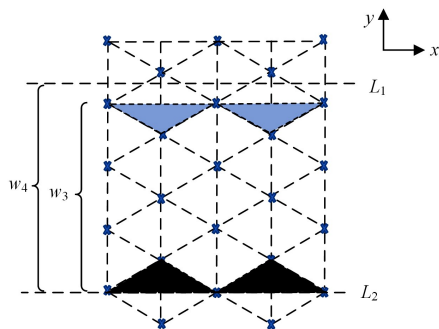


图4 基于等边三角形的悬停方案下,y轴方向网格个数的计算方法(I)

Fig. 4 Calculation method of number of grids in the y-axis direction, under hovering scheme of equilateral triangle(I)

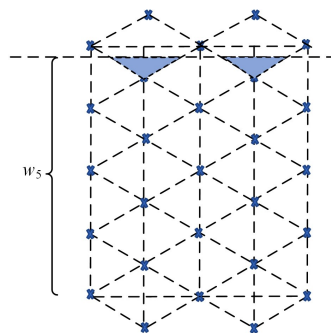


图5 基于等边三角形的悬停方案下,y轴方向网格个数的计算方法(II)

Fig. 5 Calculation method of number of grids in the y-axis direction, under hovering scheme of equilateral triangle(II)

本文通过 $s = \min\{s | s \times (\frac{\sqrt{3}}{2}R) \geq w\}$, $t = \min\{t | t \times R \geq$

$w\}$,初步得到x轴方向和y轴方向的网格个数。但是在基于等边三角形的悬停方案下,y轴方向的悬停点设置较特殊,需进一步判断是否存在某些区域无法实现定位。本文在进一步判断之后,将借助增加偶数列网格的方法,使待覆盖区域内任意位置均可实现定位。

3.1 基于等边三角形的无人机路径规划

假设基于等边三角形的无人机悬停方案下,x轴方向的悬停点个数为m,y轴方向为n。设该方案下所有悬停点均可以表示为 $P_{i,j}$,其二维坐标为 $(i \times \frac{\sqrt{3}}{2}R, j \times \frac{R}{2})$,当奇数列和

偶数列的网格个数相同时,可以得到悬停点组成的集合如下:

$$\left\{ P_{i,j} \mid P_{i,j}, (i,j) = \begin{cases} (i, 2k-1), & i \text{ 为奇数} \\ (i, 2k), & i \text{ 为偶数} \end{cases} \right. \\ 0 \leq i < m, 0 \leq k < n$$

当奇数列和偶数列的网格个数不同时,悬停点组成的集合如下:

$$\left\{ P_{i,j} \mid P_{i,j}, (i,j) = \begin{cases} (i, 2k-1), 0 \leq k \leq n, & i \text{ 为奇数} \\ (i, 2k), 0 \leq k < n, & i \text{ 为偶数} \end{cases} \right. \\ 0 \leq i < m$$

因为 x 轴方向悬停点的个数只需考虑奇偶两种情况,对其分情况讨论较简单;而 y 轴方向确定悬停点的个数较复杂,需确定奇数列和偶数列的网格个数相同或不同之后,才能进一步确定悬停点个数。所以本文中具体的路径规划方法,按照 m 的奇偶分情况讨论。而无论 m 是奇是偶, y 轴方向上奇数列和偶数列的网格个数相同和不同的情况均可能出现,因此本文对其进行了区分,分为了以下 4 种不同的情况。

当 m 为偶数,且奇数列和偶数列的网格个数相同时,路径规划方式如图 6 所示。基本思想为首先由原点出发,沿 y 轴正向飞行,到达 $P_{0,2(n-1)}$,然后遍历每一列最上侧的悬停点,到达 $P_{m-1,2(n-1)-1}$;再由该点沿 y 轴负向飞行一个网格边长的长度,到达 $P_{m-1,2(n-2)-1}$;之后可以将两列看作一组,依次遍历,所以当 m 为偶数时,必然可以回到原点。以具体情况为例,当 $m=6$ 时,路径规划如图 7 所示。

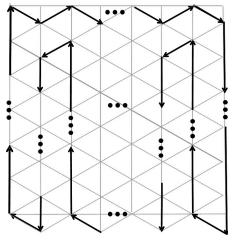


图 6 基于等边三角形的悬停方案下, m 为偶数且奇数列和偶数列的网格个数相同时的路径规划

Fig. 6 Path planning when m is an even number and number of grids in odd and even columns is the same, under hovering scheme based on equilateral triangle

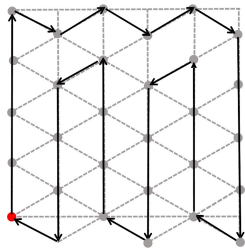


图 7 基于等边三角形的悬停方案下, $m=6$ 且奇数列和偶数列的网格个数相同时的路径规划

Fig. 7 Path planning when $m=6$ and number of grids in odd and even columns is the same, under hovering scheme based on equilateral triangle

当 m 为偶数,且奇数列和偶数列的网格个数不同时,路径规划思路类似,如图 8 所示。

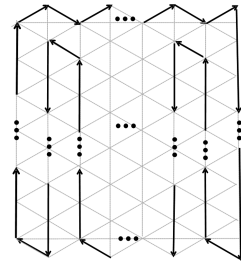


图 8 基于等边三角形的悬停方案下, m 为偶数且奇数列和偶数列的网格个数不同时的路径规划

Fig. 8 Path planning when m is an even number and number of grids in odd and even columns is different, under hovering scheme based on equilateral triangle

当 m 为奇数,且奇数列和偶数列的网格个数相同时,按照类似于 m 为偶数的思路,得到图 9 所示的结果,最终只需要特别处理第 2 列和第 3 列之间的路径规划。该情况下第 2 列和第 3 列的悬停点个数相同,本文给出的解决方式如图 10 所示。由此可得,该情况下完整路径规划如图 11 所示。以具体情况为例,当 $m=7$ 时,路径规划如图 12 所示。

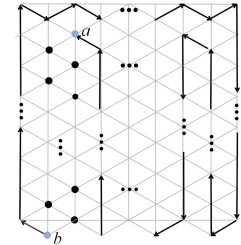


图 9 基于等边三角形的悬停方案下, m 为奇数且奇数列和偶数列的网格个数相同时的部分路径规划

Fig. 9 Partial path planning when m is an odd number and number of grids in odd and even columns is the same, under hovering scheme based on equilateral triangle

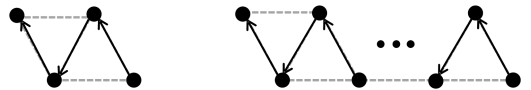


图 10 基于等边三角形的悬停方案下, m 为奇数且奇数列和偶数列的网格个数相同,第 2 列和第 3 列的连接方式

Fig. 10 Connection method of the second and third columns when m is an odd number and number of grids in odd and even columns is the same, under hovering scheme based on an equilateral triangle

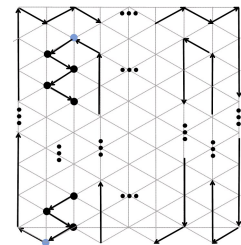


图 11 基于等边三角形的悬停方案下, m 为奇数且奇数列和偶数列的网格个数相同时的路径规划

Fig. 11 Path planning when m is an odd number and number of grids in odd and even columns is the same, under hovering scheme based on equilateral triangle

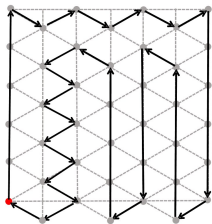


图 12 基于等边三角形的悬停方案下, $m=7$ 且奇数列和偶数列的网格个数相同时的路径规划

Fig. 12 Path planning when $m=7$ and number of grids in odd and even columns is the same, under hovering scheme based on equilateral triangle

当 m 为奇数, 且奇数列和偶数列的网格个数不同时, 按照类似于 m 为偶数时的路径规划方式, 得到图 13 所示的情况。该情况下第 2 列的悬停点比第 3 列多一个, 本文给出的解决方式如图 14 所示。可得该情况下的完整路径规划如图 15 所示。

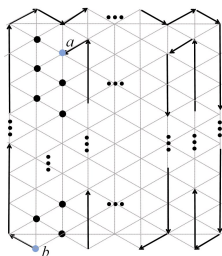


图 13 基于等边三角形的悬停方案下, m 为奇数且奇数列和偶数列的网格个数不同时的部分路径规划

Fig. 13 Partial path planning when m is an odd number and number of grids in odd and even columns is different, under hovering scheme based on equilateral triangle



图 14 基于等边三角形的悬停方案下, m 为奇数且奇数列和偶数列的网格个数不同时, 第 2 列和第 3 列的连接方式

Fig. 14 Connection method of the second and third columns when m is an odd number and number of grids in odd and even columns is different, under hovering scheme based on an equilateral triangle

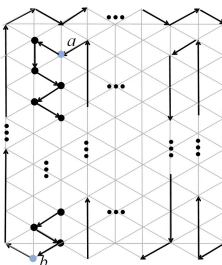


图 15 基于等边三角形的悬停方案下, m 为奇数且奇数列和偶数列的网格个数不同时的路径规划

Fig. 15 Path planning when m is an odd number and number of grids in odd and even columns is different, under hovering scheme based on equilateral triangle

于等边三角形的悬停方案下无人机的飞行算法。该算法给出了当奇数列和偶数列的网格个数相同时的路径规划。奇数列和偶数列的网格个数不同的情况与该算法类似, 按照路径规划方案即可得到相应算法, 在本文算法 1 中没有说明该情况, 是为了在保证该算法有效性的同时, 增加易读性。

算法 1 基于等边三角形的悬停方案下无人机的飞行算法

1. fly from $P_{0,0}$ to $P_{0,2(n-1)}$;
2. if m is even then;
3. $k \leftarrow \frac{m}{2} - 1$;
4. else
5. $k \leftarrow \frac{m-1}{2}$;
6. end if
7. $x \leftarrow 0$;
8. while $k > 0$ do
9. fly from $P_{x,2(n-1)}$ to $P_{x+1,2(n-1)-1}$;
10. fly from $P_{x+1,2(n-1)-1}$ to $P_{x+2,2(n-1)}$;
11. $x \leftarrow x+2, k \leftarrow k-1$;
12. end while
13. if m is even then
14. //now, UAV's location is $P_{m-2,2(n-1)}$;
15. fly from $P_{m-2,2(n-1)}$ to $P_{m-1,2(n-1)-1}$;
16. fly from $P_{m-1,2(n-1)-1}$ to $P_{m-1,2(n-2)-1}$;
17. else
18. //now, UAV's location is $P_{m-1,2(n-1)}$;
19. fly from $P_{m-1,2(n-1)}$ to $P_{m-1,2(n-2)}$;
20. end if
21. $x \leftarrow m-1$;
22. if m is even then
23. $k \leftarrow \frac{m}{2} - 1$;
24. while $k > 0$ do
25. fly from $P_{x,2(n-2)-1}$ to $P_{x,1}$;
26. fly from $P_{x,1}$ to $P_{x-1,0}$;
27. fly from $P_{x-1,0}$ to $P_{x-1,2(n-2)}$;
28. fly from $P_{x-1,2(n-2)}$ to $P_{x-2,2(n-2)-1}$;
29. $x \leftarrow x-2, k \leftarrow k-1$;
30. end while
31. else
32. $k \leftarrow \frac{m-1}{2} - 1$;
33. while $k > 0$ do
34. fly from $P_{x,2(n-2)}$ to $P_{x,0}$;
35. fly from $P_{x,0}$ to $P_{x-1,-1}$;
36. fly from $P_{x-1,-1}$ to $P_{x-1,2(n-2)-1}$;
37. fly from $P_{x-1,2(n-2)-1}$ to $P_{x-2,2(n-2)}$;
38. $x \leftarrow x-2, k \leftarrow k-1$;
39. end while
40. end if
41. if m is even then
42. //now, UAV's location is $P_{1,2(n-2)-1}$;
43. fly from $P_{1,2(n-2)-1}$ to $P_{1,-1}$;
44. fly from $P_{1,-1}$ to $P_{0,0}$;
45. // Complete the flight;
46. else
47. //now, UAV's location is $P_{2,2(n-2)}$;
48. $k \leftarrow n-1, y \leftarrow 2(n-2)$;
49. while $k > 0$ do

按照上述全部路径规划方式, 本文在算法 1 中给出了基

```

50. fly from  $P_{2,y}$  to  $P_{1,y-1}$ ;
51. fly from  $P_{1,y-1}$  to  $P_{2,y-2}$ ;
52.  $y \leftarrow y-2, k \leftarrow k-1$ ;
53. end while
54. //now, UAV's location is  $P_{2,0}$ 
55. fly from  $P_{2,0}$  to  $P_{1,-1}$ ;
56. fly from  $P_{1,-1}$  to  $P_{0,0}$ ;
57. //Complete the flight;
58. end if

```

3.2 路径规划的最优性分析

考虑到无人机的续航能力,确定悬停点之后,需最小化飞行路径长度。本节将证明上一节介绍的路径规划得到的是最短回路。

引理 1 经过基于等边三角形的悬停方案下的所有悬停点的任何哈密顿回路的路径长度至少为 $n \times R$, 其中, n 为悬停点的个数, R 为等边三角形的边长。

证明:由哈密顿回路的定义可知,每个点只经过一次,并最终回到起点。设该哈密顿回路为 $H = v_0 v_1 v_2 \cdots v_{n-1} v_0$, 包含点的个数为 n (实际可能经过某些节点多次,从而比 n 多), 则路径长度 $L = L_{0,1} + L_{1,2} + L_{2,3} + \cdots + L_{i,i+1} + \cdots + L_{n-1,0}$, 其中 $L_{i,i+1}$ 表示第 i 个点到第 $i+1$ 个点之间的距离。因为任意两点的距离至少为 R , 由此可得 $L_{i,i+1} \geq R, i = 0, 1, 2, 3, \cdots, n-1$, 所以 $L \geq n \times R$, 得证。

定理 1 在基于等边三角形的悬停方案中, 3.1 节中规划的路径是经过所有悬停点的最短路径。

证明:对基于等边三角形的悬停方案, 3.1 节中规划的飞行路径构成了哈密顿回路, 所以路径中所包含的边的条数等于悬停点个数。在该悬停方案下, 注意每条边的边长都等于等边三角形网格的边长 R , 即任意两点之间的最短距离。因而路径总长度 $L = n \times R$ 。按照引理 1, 可推出该路径长度为最短路径长度。证毕。

4 基于正方形的无人机悬停方案及路径规划

基于正方形的无人机悬停方案如图 16 所示, 网格的对角线长度为 R , 与广播信号的半径相等, 设网格边长为 $d, d = \frac{\sqrt{2}}{2}R$, 无人机飞行高度为 H , 广播信号在地面的覆盖范围包含 4 个正方形网格。地面上任意位置的节点, 都至少与某个正方形的 4 个顶点的距离不超过 R , 即任意点都需要被包含在一个正方形网格中。同样, 图 16 中的坐标系是以待覆盖区域相邻垂直的两条边为 x 轴、 y 轴, 其交点为原点建立的。

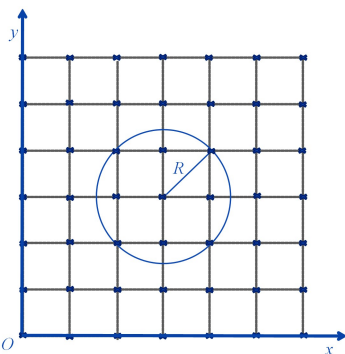


图 16 基于正方形的无人机悬停方案

Fig. 16 UAVs' hovering scheme based on square

为了保证待覆盖区域内每一个位置都可以被定位, 需满足广播信号的覆盖范围等于或大于待覆盖区域范围, 使任意点都被包含在一个正方形网格中。已知基于正方形的悬停方案下, x 轴方向和 y 轴方向的正方形网格个数相同, 设为 s , 设待覆盖区域边长为 w ; 则令 $s = \min\{s | s \times d \geq w\}$, 即可满足定位条件。则 x 轴方向和 y 轴方向的悬停点个数相同, 均为 $s+1$ 。

当 w 无法整除 d 时, 有一部分悬停点落在待覆盖区域之外, 广播信号的范围会有一部分浪费, 并且会增大无人机的飞行路径长度。此时, 有两种优化方案。第一种方案是对于超出待覆盖区域的悬停点, 将其位置调整至待覆盖区域内最近的点; 另外一种方案是, 将网格的边长缩小, 使得 w 恰好是新边长的整数倍。具体而言, 当 w 无法整除 d 时, 调整网格边长为 $w/\lceil w/d \rceil$, 其中 $\lceil \cdot \rceil$ 为取上整操作。易验证, 两种方案均不会增加网格的个数, 但会缩短无人机的飞行路径长度。我们通过实验发现第二种方案对无人机路径的缩短效果更明显, 因此本文采用第二种方案。为了便于叙述, 下文只考虑 w 可以整除 d 的情况。

4.1 基于正方形的无人机路径规划

基于正方形的方案下, x 轴方向和 y 轴方向的网格个数相同, 所以无论按照 x 轴方向还是按照 y 轴方向进行分类讨论的结果都是相同的。因此, 与基于等边三角形的方案相比, 该方案下的路径规划的情况讨论比较简单。

设基于正方形的无人机悬停方案下, x 轴方向和 y 轴方向悬停点个数为 $m, m = s+1$, 该方案下所有悬停点均可以表示为 $P_{i,j}$, 其二维坐标为 $(i \times d, j \times d)$, 可得悬停点组成的集合为 $\{P_{i,j} | P_{i,j}, 0 \leq i < m, 0 \leq j < m\}$ 。下面按照 m 的奇偶, 对两种情况分别进行路径规划。

m 为偶数时, 路径规划方式如图 17 所示。基本思想如下, 首先由原点出发, 沿 y 轴正向飞行, 遍历最左侧所有悬停点, 到达 $P_{0,m-1}$; 然后沿 x 轴正向飞行, 遍历最上侧所有悬停点, 到达 $P_{m-1,m-1}$; 再由该点沿 y 轴负向飞行一个网格边长的长度, 到达 $P_{m-1,m-2}$; 之后可以以两列为一组进行遍历, 那么当 m 为偶数时, 必然可以回到起点。以具体情况为例, 当 $m=6$ 时, 路径规划如图 18 所示。

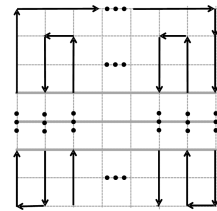


图 17 基于正方形的悬停方案下, m 为偶数时的路径规划

Fig. 17 Path planning when m is an even number under hovering scheme based on square

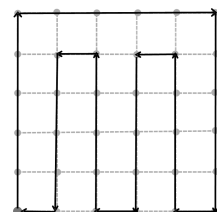


图 18 基于正方形的悬停方案下, $m=6$ 时的路径规划

Fig. 18 Path planning when $m=6$ under hovering scheme based on square

m 为奇数时,按照 m 为偶数时的规划思路,得到最终需要处理的是第 2 列和第 3 列之间的路径规划,如图 19 所示。而观察得到,第 2 列和第 3 列的剩余点的个数相同,且总为偶数,此时本文提出的解决方法如图 20 所示。综上可得,当 m 为奇数时,完整的路径规划如图 21 所示。以具体情况为例,当 $m=7$ 时,路径规划如图 22 所示。

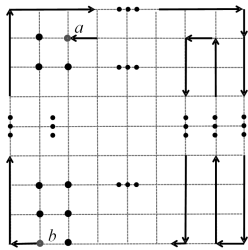


图 19 基于正方形的悬停方案下, m 为奇数时的部分路径规划

Fig. 19 Partial path planning when m is an odd number under the hovering scheme based on square



图 20 基于正方形的悬停方案下, m 为奇数时,第 2 列和第 3 列的连接方式

Fig. 20 Connection method of the second and third columns, when m is an odd number, under hovering scheme based on square

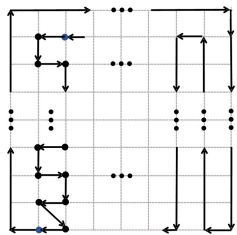


图 21 基于正方形的悬停方案下, m 为奇数的路径规划

Fig. 21 Path planning when m is an odd number under hovering scheme based on square

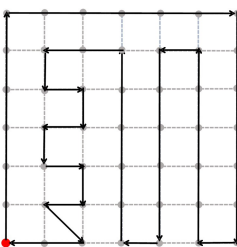


图 22 基于正方形的悬停方案下, $m=7$ 时的路径规划

Fig. 22 Path planning when $m=7$ under hovering scheme based on square

按照上述路径规划方式,本文在算法 2 中给出了详细的基于正方形的悬停方案下无人机的完整飞行算法。

算法 2 基于正方形的悬停方案下无人机的飞行算法

1. fly from $P_{0,0}$ to $P_{0,m-1}$;
2. fly from $P_{0,m-1}$ to $P_{m-1,m-1}$;
3. fly from $P_{m-1,m-1}$ to $P_{m-1,m-2}$;
4. if m is even then
5. $k \leftarrow \frac{m}{2} - 1$;

6. else
7. $k \leftarrow \frac{m-1}{2} - 1$;
8. end if
9. $x \leftarrow m-1$;
10. while $k > 0$ do
11. fly from $P_{x,m-2}$ to $P_{x,0}$;
12. fly from $P_{x,0}$ to $P_{x-1,0}$;
13. fly from $P_{x-1,0}$ to $P_{x-1,m-2}$;
14. fly from $P_{x-1,m-2}$ to $P_{x-2,m-2}$;
15. $x \leftarrow x-2, k \leftarrow k-1$;
16. end while
17. if m is even then
18. //now, UAV's location is $P_{1,m-2}$;
19. fly from $P_{1,m-2}$ to $P_{1,0}$;
20. fly from $P_{1,0}$ to $P_{0,0}$;
21. // Complete the flight;
22. else
23. //now, UAV's location is $P_{2,m-2}$;
24. $k \leftarrow \frac{m-3}{2}, y \leftarrow m-2$;
25. while $k > 0$ do
26. fly from $P_{2,y}$ to $P_{1,y}$;
27. fly from $P_{1,y}$ to $P_{1,y-1}$;
28. fly from $P_{1,y-1}$ to $P_{2,y-1}$;
29. fly from $P_{2,y-1}$ to $P_{2,y-2}$;
30. $y \leftarrow y-2, k \leftarrow k-1$;
31. end while
32. //now, UAV's location is $P_{2,1}$;
33. fly from $P_{2,1}$ to $P_{1,1}$;
34. fly from $P_{1,1}$ to $P_{2,0}$;
35. fly from $P_{2,0}$ to $P_{0,0}$;
36. // Complete the flight;
37. end if

4.2 路径规划的最优性分析

对于基于正方形的无人机悬停方案,4.1 节给出了无人机飞行路径。下面将证明 4.1 节给出的飞行路径是经过所有悬停点的最短路径。

定理 2 在基于正方形的悬停方案中,4.1 节规划的飞行路径是经过所有悬停点的最短路径。

证明:当 m 为偶数时,因为构成哈密顿回路,所以该路径中包含的边的条数等于悬停点的个数,设为 u ;同时,每条边的长度都等于网格的边长 d ,即任意两点之间的最短距离,得到路径总长度 $L = u \times d$ 。类似于定理 1,基于正方形的悬停方案下, m 为偶数时,本文提出的无人机飞行路径为最短回路路径。

当 m 为奇数时,边的条数同样为悬停点的个数 u ;但与 m 为偶数时有所不同,这种情况下,存在一条边,其长度不等于网格的边长,而等于正方形网格的对角线长度 R ,其余边的长度均等于网格的边长。所以得到路径总长度 $L = (u-1) \times d + R$ 。下面证明该路径长度也为最短路径长度。

现假设存在这样一条路径,其长度为 $n \times d$,即任意两点之间的距离都等于正方形网格的边长。基于图论,设每一个悬停点都是顶点,每个顶点之间的连接是边,按照路径的规划

在图 24(a)中两种悬停方案下,随着 H 的增加,定位误差均逐渐增大,其原因在于无人机飞行高度 H 的增加,使得悬停点距离目标节点的距离增大,所以测距误差变大,进而定位误差增大。如图 24(b)所示,随着 H 的增加,两种悬停方案下的无人机飞行路径长度均呈增加趋势,其原因在于,随着无人机飞行的高度增加,信号覆盖范围在地面的投影半径(即 d)缩小,使方案中的网格变小,所以无人机的悬停点个数增多,间接导致无人机的飞行路径长度增加。基于等边三角形的悬停方案下,飞行路径之所以会有局部缩减,是因为该方案在待覆盖区域的边长无法整除三角形网格的边长时,会额外在区域外布置悬停点,当无人机飞行高度增加时,额外布置的悬停点间距减小,从而导致了整体路径长度减少。类似情况在基于正方形的方案中也会出现,由于我们调整了正方形网格的大小(见第 4 节),从而使得基于正方形的方案下无人机的飞行路径长度在一定的范围内维持不变。

5.2 待覆盖区域大小对性能的影响

待覆盖区域为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的正方形,设边长长度从 50 m 增加至 200 m ,间隔长度为 5 m , H 为 30 m ,待覆盖区域边长的变化,对于整个定位方案来说,改变的是网格的个数。待覆盖区域大小对性能的影响如图 25 所示。在图 25 中,随着待覆盖区域边长逐渐增加,定位误差无明显变化趋势,这是因为在保持无人机飞行高度不变时,待覆盖区域的增大,改变的只是方案中网格的个数,而地面上任意位置与接收到广播信号时的无人机的距离没有发生变化,所以测距误差无明显变化,从而对定位误差没有影响。

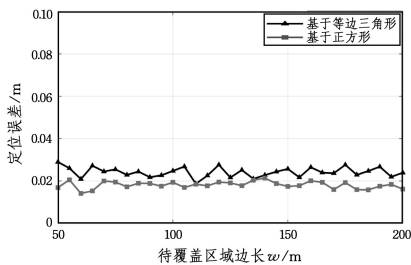


图 25 待覆盖区域大小对定位误差的影响

Fig. 25 Influence of the size of the area to be covered on the localization error

5.3 基于等边三角形的悬停方案下的误差分析

观察图 24、图 25 可以看出,基于等边三角形的悬停方案下的误差总是比基于正方形的悬停方案下的误差大。对于这一问题,本文以类似于 2.2 节中两个优化目标之间存在冲突的原因来进行分析,即测距数据越多、测距误差越小,则定位误差越小,猜测是因为基于等边三角形的悬停方案下地面节点平均监测到的悬停点个数较少,所以定位误差较大。通过实验计算,得到基于等边三角形的悬停方案下,地面节点平均监测到的悬停点个数为 3.58,而基于正方形的悬停方案下,悬停点个数为 7.22,明显相差较大。为了进一步验证,本文设计了两个实验,一个为观察不同类型的观测点的定位误差分布,不同类型指的是监测到的悬停点个数不同。另一个为保证信号半径 R 不变,在基于等边三角形的悬停方案下,修改等边三角形网格的大小,观察其对定位误差的影响。

5.3.1 地面节点监测到的悬停点个数对定位误差的影响

在基于等边三角形的悬停方案下,待覆盖区域为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, $R=36\text{ m}$,设置 3 种地面节点的观测点各 120 个。第一种为等边三角形网格的顶点,该类观测点可监测到 7 个悬停点;第二种为等边三角形网格任意边的中点,该类观测点可监测到 4 个悬停点;第三种为等边三角形网格的重心,该类观测点可监测到 3 个悬停点。计算定位误差,观察定位误差分布,结果如图 26 所示。观察可得,监测到的悬停点个数为 7 的观测点的定位误差波动较小,全部在 $0 \sim 0.1$ 之间;而另外两种观测点的定位误差波动较大,误差范围较大,观察不到明显区别。但是根据实验计算,监测到的悬停点个数为 4 和 3 的观测点的平均定位误差分别为 0.06708 和 0.07529 ,符合测距数据越少,平均定位误差越大。

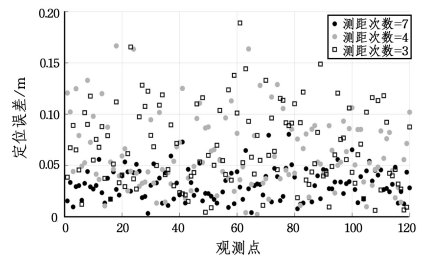


图 26 不同类型观测点的定位误差分布

Fig. 26 Localization error distribution of different types of observation points

在基于等边三角形的悬停方案下,监测到的悬停点个数不同的地面节点不方便区分,也不方便选择,因此为了能够观察地面节点平均监测到的悬停点个数连续变化时,定位误差的变化,本文进行了下一个实验。该实验通过修改该方案下的等边三角形网格的大小,扩大地面节点平均监测到的悬停点个数的变化范围,进而观察定位误差的变化,以证实我们的猜测。

5.3.2 基于等边三角形的悬停方案下网格大小对定位误差的影响

确定无人机飞行高度 H 为 30 m ,广播信号半径 R 为 40 m ,等边三角形网格的边长 x 从 10 m 增加至 40 m ,间隔长度为 1 m ,该变化范围下的 x 值均满足定位要求,即任意点的监测到的悬停点个数至少为 3 个。随着 x 的变化,定位误差和地面节点平均监测到的悬停点个数的变化如图 27 所示。

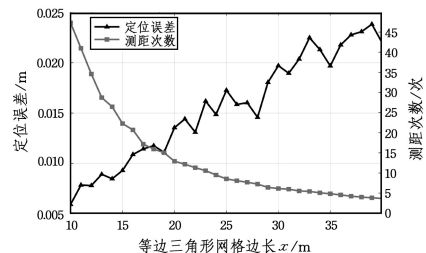


图 27 三角形网格边长对定位误差的影响

Fig. 27 Impact of equilateral triangle side length on localization error

观察可得,随着 x 的增加,地面节点平均监测到的悬停点个数逐渐减少;而定位误差逐渐增大,误差在增大过程中有些起伏,是因为定位误差数值总体较小,数值的些许变化都会呈

现出较大起伏。由此可以得到,地面节点平均监测到的悬停点个数与定位误差呈负相关,间接得到本文两种方案下定位误差差异的主要原因是地面节点平均监测到的悬停点个数的不同,符合前文的猜测。这与本文使用的定位方法有关。本文所提方案中,无人机搭载信标节点广播信息,地面节点至少与3个悬停点的距离不超过 R ,即地面节点平均监测到的悬停点个数至少为3,然后使用多边定位法进行定位,求出地面节点的位置信息的最优解。因此,地面节点平均监测到的悬停点个数越多,测距数据越多,在求最优解时,可以提供的方程越多,求得的最优解也就越准确;相反,测距数据越少,求得的最优解的误差就越大。

在第4节中,为了优化基于正方形的悬停方案下的飞行路径,当 w 无法整除 d 时,通过将网格的边长缩小,使得 w 恰好是新边长的整数倍。这种优化方法与本实验中使用的缩小等边三角形网格的方法类似。因此使用该方法,不仅可以优化无人机飞行路径,还可以提高定位精度。

5.4 实验总结

综合上述实验可得,无人机的飞行高度越高,定位方案的定位误差越大,飞行路径就越长;待覆盖区域大小对定位误差无影响,但会影响无人机的飞行路径长度。对比两种定位方案,基于正方形的悬停方案下的定位误差较小,基于等边三角形的悬停方案下的定位误差较大,其主要原因是基于等边三角形的悬停方案下的地面节点平均监测到的悬停点个数较少,即在使用多边定位法计算最优解时,其得到的最优解的准确率较低。但本文提出的方法保证信号半径 R 不变,即确定无人机的飞行高度 H ,缩小方案中网格的大小,便可改变地面节点平均监测到的悬停点个数,进而减小定位误差,但此操作会增加无人机飞行路径长度。

综上,若采用基于正方形的悬停方案,选择合适的无人机飞行高度,可以达到较高的定位精度;若采用基于等边三角形的悬停方案,通过调整等边三角形网格大小,亦可以达到较高的定位精度。

结束语 本文研究了利用无人机对地面目标定位时的悬停点选择和路径规划问题。悬停点选择的要求是待覆盖区域中任意位置均能够接收到至少3个悬停点的广播信号。路径规划的要求是在保证定位精度的前提下,最小化无人机的飞行路径长度。本文提出了两种悬停方案以及相应的路径规划方法,并且证明了路径规划方法所得路径是经过所有悬停点的最优路径。通过模拟实验,分析了方案中无人机飞行高度和待覆盖区域大小两个参数对性能的影响,并对比了两种方案的特点,验证了所提方法的有效性。基于正方形的方案可以达到较高的定位精度,基于等边三角形的方案也可以实现有效定位,不过其定位精度相对低一点,但可以通过调整网格大小来提高定位精度。

本文方案尚有不足之处。基于等边三角形的方案下的无人机飞行路径较长,如果为了提高定位精度而缩小网格大小,则意味着路径长度会增加,因此需要在定位精度和路径长度之间进行权衡。并且该方案下存在大量的广播信号覆盖范围和路径长度的浪费,相比于基于正方形的

方案,优化该方案的难度较大。

根据本文中基于正方形和等边三角形的方案的设计思路以及相关的实验结果,推广到基于正六边形也可以得到类似的结论。基于正六边形的方案下,在正六边形的每个顶点处都设置无人机悬停点,那么任意正六边形区域内的地面节点都至少接收到6个顶点处的信标信号,所以该方案下地面节点平均监测到的悬停点个数会多于基于正方形的方案,则定位效果会更好。但其缺点在于,悬停点增多会导致路线规划更为复杂,增加了无人机的飞行难度和路径长度。因此我们建议实际中采用基于正方形的方案。需要注意的是,无法设计基于正五边形的悬停方案,因为正五边形的每一个内角为 108° ,无法严密排列实现对待覆盖区域的完全覆盖。同理,正七边形、正八边形等边数大于6的正多边形均无法实现完全覆盖。

在后续的工作中,我们考虑将本文提出的基于等边三角形和正方形的无人机悬停方案和路径规划应用于实际进行测试,以获得更加准确的数据,并进行进一步的评估。

参 考 文 献

- [1] LI B, CHEN C, ZHANG R, et al. The energy-efficient uav-based bs coverage in air-to-ground communications[C]// Proceedings of IEEE Sens Array Multichannel Signal Process Workshop. 2018:578-581.
- [2] AHMED S, CHOWDHURY M Z, JANG Y M. Energy-Efficient UAV Relaying Communications to Serve Ground Nodes[J]. IEEE Commun Lett, 2020, 24(4): 849-852.
- [3] WANG W, ZHAO J J, PENG L, et al. Research on Energy-saving Strategy of Mobile IoT Long-distance Communication Based on UAV [J]. Chinese Journal of Electronics, 2018, 46(12): 2914-2922.
- [4] FENG J X, LUAN S S, LIU J M, et al. An Unmanned Aerial Vehicle Trajectory Planning Method with High Throughput [J]. Computer Engineering, 2021, 47(1): 172-181.
- [5] KOPFSTEDT T, MUKAI M, FUJITA M, et al. Control of Formations of UAVs for Surveillance and Reconnaissance Missions [C]// Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control. 2008:5161-5166.
- [6] DEMIANE F, SHARAFEDDINE S, FARHAT O. An optimized UAV trajectory planning for localization in disaster scenarios [J]. Computer Networks, 2020, 179: 107378.
- [7] YOUSSEF A, YOUSSEF M. A Taxonomy of Localization Schemes for Wireless Sensor Networks[C]// Int. Conf. Wirel Networks. 2007:444-450.
- [8] XU S, DOGANCA Y K, HMAM H. Distributed path optimization of multiple UAVs for AOA target localization[C]// Proceedings of IEEE Int. Conf. Acoust Speech Signal Process. 2016:3141-3145.
- [9] WANG Z, ZHANG H, LU T, et al. Cooperative RSS-Based localization in wireless sensor networks using relative error estimation and semidefinite programming[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2019, 68(1): 483-497.

- [10] KARANAM C R, KORANY B, MOSTOFI Y. Magnitude-Based Angle-of-Arrival Estimation, Localization, and Target Tracking [C] // Proceedings of 17th ACM/IEEE Int Conf Inf Process Sens Networks. 2018:254-265.
- [11] DRUTAROVSKY M, KOCUR D, SVECOVA M, et al. Real-time wireless UWB sensor network for person monitoring[C] // Proceedings of the 14th International Conference on Telecommunications. 2017:19-26.
- [12] KOCUR D, PORTELEKY T, SVECOVA M. UWB Radar Tested System for Localization of Multiple Static Persons [C] // Proceedings of IEEE Sensors. 2019:8-11.
- [13] GRIGULO J, BECKER L B. Experimenting Sensor Nodes Localization in WSN with UAV Acting as Mobile Agent [C] // IEEE Int Conf Emerg Technol Fact Autom. 2018:808-815.
- [14] WANG W, BAI P, LIANG X, et al. Performance analysis for TDOA localization using UAVs with flight disturbances [C] // 20th Int. Conf. Inf. Fusion. 2017:1-6.
- [15] SALLOUHA H, AZARI M M, POLLIN S. Energy-Constrained UAV Trajectory Design for Ground Node Localization [C] // 2018 IEEE Glob Commun. Conf. . 2018:1-7.
- [16] DAS K, GHOSE D, LIMA R. Support vector regression based sensor localization using UAV [C] // Proceedings of ACM Symp Appl Comput. . 2019:938-945.
- [17] GUO Z, GUO Y, HONG F, et al. Perpendicular intersection; Locating wireless sensors with mobile beacon [J]. IEEE Trans Veh. Technol. ,2010,59(7):3501-3509.
- [18] WANG Y, ZHU X, XU L. Flight Path Optimization for UAVs to Provide Location Service to Ground Targets [C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2020:1-6.
- [19] MAEDA K, DOKI S, FUNABORA Y, et al. Flight path planning of multiple UAVs for robust localization near infrastructure facilities [C] // Proceedings of 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2018:2522-2527.
- [20] JI Y, DONG C, ZHU X, et al. Fair-energy Trajectory Planning for Multi-target Positioning Based on Cooperative Unmanned Aerial Vehicles [J]. IEEE Access, 2019, 8:9782-9795.
- [21] BELLUSCI G, JANSSEN G J M, YAN J, et al. Model of distance and bandwidth dependency of TOA-Based UWB ranging error [C] // Proceedings of 2008 IEEE Int Conf Ultra-Wideband. 2008:193-196.



ZHAO Xiao-wei, born in 1998, postgraduate, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include IoT and UAV networks.



ZHU Xiao-jun, born in 1986, Ph.D, associate professor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include UAV networks, smartphone system, RFID system and vehicular networks.