

引用格式:蔡忻怡,刘翼,张恩齐,等. 固定翼无人机两机同轨道协同探测与覆盖监视技术研究[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2026, 45(1): 114-118. [CAI X Y, LIU Y, ZHANG E Q, et al. Research on two-aircraft cooperative detection, coverage and surveillance technology for fixed-wing UAV in the same orbit[J]. Journal of Yan'an University(Natural Science Edition), 2026, 45(1): 114-118.] DOI:10.13876/J.cnki.ydnse.250091

固定翼无人机两机同轨道协同探测与覆盖监视 技术研究

蔡忻怡,刘翼,张恩齐,陈新庄*

(延安大学 数学与计算机科学学院,陕西 延安 716000)

摘要:针对多固定翼无人机协同区域覆盖监视存在的时空动态变化问题,提出一种基于空间联合探测概率与有效探测时间比的两机同轨道协同优化部署方法。首先,建立多无人机联合探测概率模型和协同区域覆盖模型,为协同部署提供理论依据;其次,针对圆形航迹下两机同轨道协同场景,推导有效覆盖区的解析计算方法,揭示航迹半径与有效覆盖范围之间的内在关系;最后,仿真结果表明,在两机同轨道最优协同部署下,覆盖监视范围提升了37.13%,有效提升了无人机探测监视能力,显著提高了对目标区域的监视效率与协同覆盖能力。

关键词:区域覆盖监视;固定翼无人机;多机协同;联合探测概率;同轨道

中图分类号:V279 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-602X(2026)01-0114-05

无人机凭借其成本低、机动灵活、贴近侦察等优势,并且在区域覆盖扫描任务中可显著提升作业效率,因此在军事领域的战场侦察以及民用领域的农业植保、野外搜救、林区监测等方面得到广泛应用^[1-2]。对于无人机自身动力有限并且扫描范围有限的问题,在协同作战场景下,无人机集群可以通过信息交互、相互配合,弥补单机的性能缺陷,具有更好的作战性能^[3-4]。旋翼无人机凭借其出色的视野、自主起降功能、悬停性能以及高机动性和敏捷性等显著优势,成为多无人机协同持续区域覆盖监测的首选方案^[5-8]。相比于旋翼无人机,固定翼在任务执行中展现出显著的高效性,其高速飞行性能、大载荷承载能力和长距离续航优势使其成为大范围作业的首选^[9]。特别地,小型固定翼无人机由于具有体积小、成本低、易使用的优点,能够快速实现多机协同部署,更适合需要高密度覆盖的集群化应

用场景^[10-13]。

基于固定翼无人机的多机协同持续区域覆盖监视有较多研究。文献[14]采用单元分解法实现飞行区域环境建模和无人机运动建模,将飞行区域离散化进行覆盖监视。文献[15]提出了一种与无人机性能特性相关的新型栅格地图构建方法,保证了相邻栅格节点之间的运动可达性,实施了无人机覆盖监视。现有无人机协同探测大多都考虑对并立轨道进行研究,文献[16]以盘旋圆半径为基础,设计了方形和六边形两种部署方案。这些方案通过合理安排无人机的飞行路径和位置,初步实现了对特定区域的有效覆盖。然而,随着研究的深入和技术的发展,在后续的研究工作中,文献[17]进一步提出了分层正方形布局的异构覆盖策略,这种策略不仅考虑了无人机的飞行特性,还引入了分层的概念,通过在不同高度层设置正方形布局,进一步

收稿日期:2025-09-04

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBMS-548);延安市科技计划项目(2022SLGYGG-007)

作者简介:蔡忻怡(2001—),女,硕士研究生,主要从事无人机协同搜索方面的研究。

*通信作者 E-mail:chenxzh@yau.edu.cn

优化了覆盖效果。以上方法虽考虑了无人机集群之间的协同,但都只是基于单机强效区的条件,并没有真正考虑多机协同探测所增加的效益,没有完全挖掘出无人机协同探测的能力。

无人机扫描覆盖正逐渐成为无人机自主控制研究的核心课题。文献[18]提出了通过最小圆覆盖法确定无人机在兴趣区域中的目标航迹点,进行多机协同任务规划,同时利用改进灰狼算法对任务分配模型进行求解,能够更加有效地解决区域覆盖问题。文献[19]采用“Z”型路径覆盖方法以及Dubins转弯路径,对各个无人机开展其子区域覆盖任务,建立了区域覆盖调用框架,能够对目标区域快速进行区域覆盖。但以上研究只对区域目标实现了单次扫描,无法满足动态威胁预警的时效性要求,存在检测盲区的安全。在作战环境日益复杂的情况下,无人机集群可以进行协同补盲,文献[20]提出强效区和弱效区相关定义,预警机探测强效区是指,预警机沿着航线巡逻时,在航线上的任意航迹点都能够探测到的区域;预警机探测弱效区是指,预警机沿着航线巡逻时,在航线上的有些航迹点可以探测到在有些航迹点探测不到的区域。

本文提出一种基于多机协同联合时空探测概率模型。针对两机盘旋飞行同轨道协同场景,考虑瞬时探测概率和允许的时间间隔,提出了最大化有效覆盖范围数学模型,设计出求解无人机有效覆盖范围的算法。确定了无人机两机同轨道最优部署,扩大了无人机有效探测面积覆盖范围,提高了无人机协同扫描能力。该方法为固定翼无人机在边境巡防、灾害救援等场景下的高效部署提供了新的理论依据。

1 多机协同区域覆盖监测概率模型

1.1 多机联合探测概率模型

当无人机在固定高度飞行时,其搭载的雷达、光电、红外等探测设备对目标的探测成功率会随着目标与无人机之间的水平距离的增加而逐渐下降。假设目标与无人机的水平距离为 d ,单机探测概率可表示为

$$p(d) = \begin{cases} 1, & d \leq d_{\min}, \\ f(d), & d_{\min} < d \leq d_{\max}, \\ 0, & d > d_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $f(d)$ 是关于 d 的减函数,且有 $f(d_{\min}) = 1$, $f(d_{\max}) = 0$ 。

当 n 架同类型无人机对目标点 A 进行联合探测

时,探测概率为

$$p^n(A) = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - p(d_k)), \quad (2)$$

其中, d_k 为第 k 架无人机与目标点 A 的距离。

在实际应用中,为了确保任务的顺利执行,探测概率必须高于一个预先设定的阈值 p^c 。对于单机探测而言,基于该探测概率阈值,可以确定一个以无人机为中心、半径为 d^c 的圆形区域,该圆内的区域即为有效探测区域^[21]。而在多机联合探测的情况下,有效探测区域则是联合探测概率大于阈值 p^c 的区域。

1.2 多机协同区域覆盖模型

在固定翼无人机进行区域覆盖监测时,通常沿着圆形或跑道形航线周期性巡逻。其中,始终处于探测范围内的区域称为强效区,部分时间处于探测范围内的区域称为弱效区。在实际应用中,某些点的可探测时间占比 η 大于设定阈值 η^c 时,也满足覆盖监测要求。因此,本文研究的有效覆盖区定义为

$$S_{\text{eff}} = \{A | \eta(A) \geq \eta^c\}, \quad (3)$$

其中, $\eta(A)$ 为目标点 A 被有效探测的时间占比。

在实际应用中,无人机采用跑道型航线进行区域覆盖监测时,其有效覆盖区会随着跑道直线长度的增加而显著减小。为了最大化无人机的有效覆盖区范围,本文聚焦于研究无人机沿圆形航线侦察的场景,以期通过优化航线设计,提升无人机的监测效率和覆盖范围。

单架无人机按照圆形轨迹飞行时,有效覆盖区 S_{eff} 的面积随着飞行轨迹半径的增加显著降低到0。多机协同监测可增加区域覆盖效率,通常采用多机同轨道协同和多机并立协同。多机同轨道协同时,无人机均匀分布在飞行航线上,同向飞行进行协同监测。如何计算同航线协同方式下的有效覆盖区是实现区域覆盖监测的关键^[21]。

2 两机同轨道协同有效覆盖区计算

假设 n 架无人机的飞行航线是半径为 r 的圆,无人机均匀分布在盘旋圆上,单机探测概率按照式(1)计算。由于无人机按照圆形轨迹飞行,任意时刻探测的区域形状相同,因此两机协同覆盖强效区和有效覆盖区均为圆形。

1)单架无人机的强效区和有效覆盖区的半径计算

如图1所示,若强效区的范围是以 O 为圆心、半径为 R^q 的圆 c^q ,当无人机在 A 点时,那么 T 为 A 点确

定的强效区边界点,对 T 点有

$$p(T) = f(r + R^a) = p^c, \quad (4)$$

其中, r 为无人机圆形航迹半径, p^c 为探测概率阈值。通过求解式(4)即可得到强效区的半径。

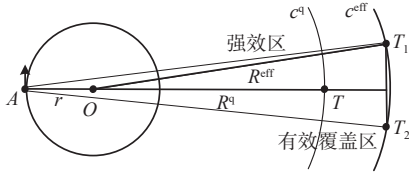


图1 单机强效区和有效覆盖区

若有效覆盖区的范围是以 O 为圆心、半径为 R^{eff} 的圆 c^{eff} , 当无人机在 A 点时, 点 T_1 和 T_2 探测概率等于 p^c , 两点之间的点为无人机无法探测区域, 且弧线 T_1T_2 在圆 c^{eff} 占比为 $(1 - \eta^c)/2$, 即

$$\begin{cases} \angle T_1OT_2 = 2\pi(1 - \eta^c) \triangleq 2\alpha, \text{ 于是有} \\ d_{AT_1}^2 = (R^{\text{eff}} + r)^2 + (R^{\text{eff}} \sin(\alpha))^2, \\ f(d_{AT_1}) = p^c, \end{cases} \quad (5)$$

其中, d_{AT_1} 表示 T_1 到 O 的距离, OT_1 长度为 R^{eff} 。方程组(5)无法给出显示解, 可以采用二分法给出对应的解, 设置 d 的初始范围为 $0 \leq d \leq r + R^a$, 其中, R^a 为强效区的半径。

2) 两机同轨道协同有效覆盖区范围的计算

两机同轨道串接协同场景下, 有效覆盖区范围也为圆形区域, 并且边界点由瞬时协同概率的阈值确定。如图2所示, AB 两机始终在盘旋圆的对称位置, 由联合概率公式(2)可知, 在以 O 为圆心、 R^a 为半径的圆上, 点 T 的联合探测概率最小。因此, 通过计算最远 T 的位置可确定强效区范围。

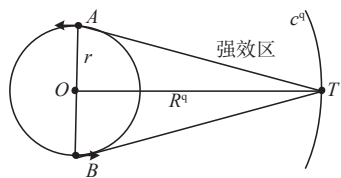


图2 两机协同区域监测强效区

假设 T 为强效区边界, 结合式(1)和(2)有

$$p(T) = 1 - (1 - f(d_{AT}))^2 = p^c, \quad (6)$$

其中, $d_{AT}^2 = r^2 + (R^a)^2$ 。因此, 强效区的半径 R^a 满足下式:

$$f(\sqrt{(R^a)^2 + r^2}) = 1 - \sqrt{1 - p^c}, \quad (7)$$

其中, p^c 为探测概率阈值。

若有效覆盖区 S_{eff} 的阈值为 η^c , 则有效覆盖区的边界圆 c^{eff} 可由图3所示的关系确定。由式(3), 若

点 T_1 和 T_2 为临界点, 即其联合探测概率为 p^c , 且圆 c^{eff} 中弧线 T_1T_2 内的点联合探测概率小于 η^c 。由于在右侧有段与弧线 T_1T_2 对称的弧线, 两段弧线长度之和与圆周长的比为 η^c 。由弧长和圆心角关系, 令 $\alpha \triangleq \angle T_1OT_2/2 = \pi(1 - \eta^c)/2$, 基于余弦定理和联合概率公式(2)有

$$\begin{cases} d_{AT_1}^2 = (R^{\text{eff}})^2 + r^2 - 2rR^{\text{eff}} \cos(\pi/2 - \alpha), \\ d_{BT_1}^2 = (R^{\text{eff}})^2 + r^2 - 2rR^{\text{eff}} \cos(\pi/2 + \alpha), \\ 1 - (1 - f(d_{AT_1}))(1 - f(d_{BT_1})) = p^c, \end{cases} \quad (8)$$

其中, d_{AT_1} 和 d_{BT_1} 分别表示 T_1 到点 A 和 B 的距离, OT_1 长度为 R^{eff} 。求解方程组(8)即可得到有效覆盖区的半径 R^{eff} 。

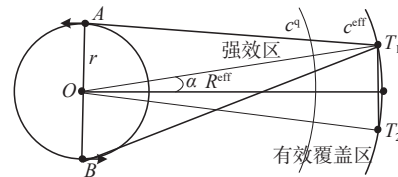


图3 两机协同区域监测有效覆盖区边界

由式(7)和(8)确定的方程(组)无法给出显示解, 可以采用二分法给出对应的解, 设置 d 的初始范围为 $0 \leq R^{\text{eff}} \leq M$, 其中, M 为较大的数。

两机同航线串接协同比单机覆盖监测效果更好。针对单机探测概率公式(1)中 $d_{\text{min}}=100 \text{ km}$, $d_{\text{max}}=200 \text{ km}$, $f(d)$ 为线性函数, p^c 和 η^c 分别取值 95% 和 98% 的场景, 图4给出了无人机在不同飞行半径下有效覆盖区的变化趋势。结果显示, 相同飞行半径下, 两机协同探测范围更广; 并且飞行半径在一定范围变大时, 两机协同探测范围变化更小。

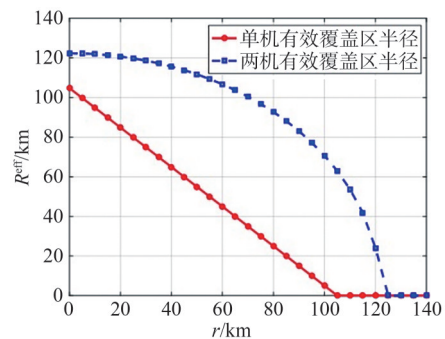


图4 有效覆盖区范围和飞行半径关系

3 仿真实验

下面通过仿真实验验证本文所设计的两机同轨道协同策略, 并与传统的强效区覆盖进行对比。

假设某型号固定翼无人机的飞行速度为 100 m/s ,

最小转弯半径为 2 km,飞行半径 $r=100$ km 探测能力由式(1)定义,其中, $d_{\min}=420$ km, $d_{\max}=600$ km, $f(d) = 3 - d/20$,探测概率阈值 $p^c = 80\%$, $\eta^c = 80\%$ 。

在建立的场景中,采用我方侦察机飞行中能否检测到敌方的角度来看待我方侦察机所检测到的覆盖范围和概率,设一个 P 点(敌方侦察机)遍历整个地图(1 200*1 200),每 1km^2 为一个被探测区域,利用式(1)得出蓝色部分(图 5)概率为 100%,无人机飞行中覆盖的区域。

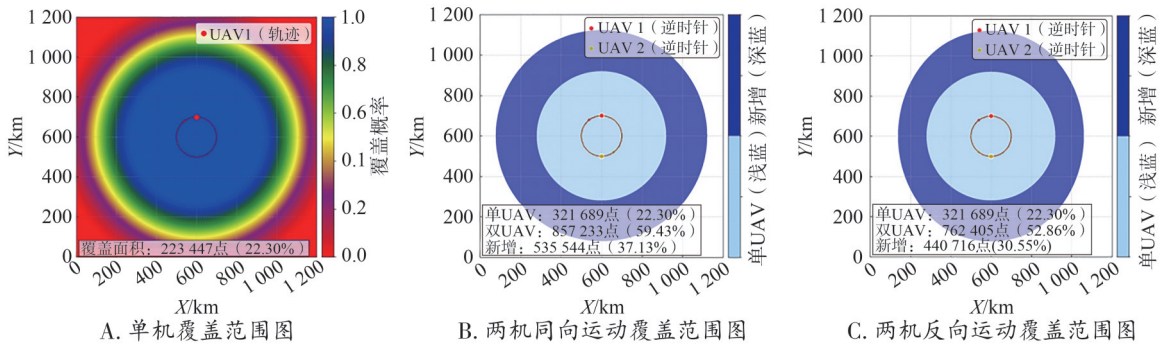


图 5 无人机运动全覆盖分布图

综上所述,无人机两机协同场景下,其扫描能力显著提升,有效扩大了区域覆盖范围,但两机部署位置及其运动方向也会对无人机探测能力造成影响。

以盘旋圆圆心建立坐标系,固定一无人机初始位置在 90° ,可以得到另一无人机任意位置出发,保持相同或相反方向,两机协同扫描场景下区域覆盖范围,如图 6 所示。无人机同轨道同向运动时,另一无人机最佳部署点为 270° ,此场景下两机联合探测能力最强,其区域覆盖范围面积达到 59.43%;当无人机同轨道反向运动时,另一无人机最佳部署点为 262.80° ,此场景下两机探测能力最强,其区域覆盖范围面积达到 52.86%。综上所述,当两无人机位差为 180° 且为同向运动时,协同探测能力最强,区域覆盖范围为 59.43%。

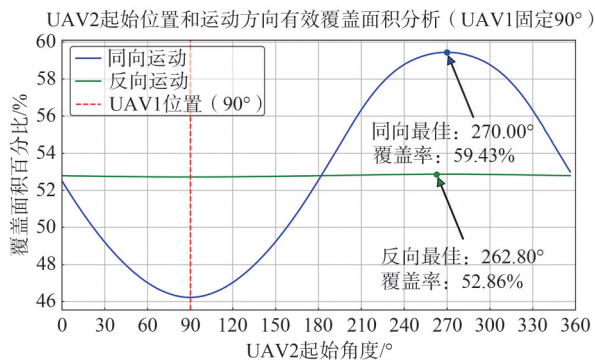


图 6 无人机两机最佳部署点

图 5 给出了 3 种情况下无人机扫描区域覆盖情况。无人机单机进行区域扫描时,区域覆盖面积为 22.30%,其扫描能力有限,如图 5A 所示。当两机同轨道呈对称位置部署时,运动方向保持一致,其区域扫描覆盖面积为 59.43%,相较于单机,区域新增覆盖面积为 37.13%,如图 5B 所示。当两机同轨道呈对称位置部署时,运动方向保持相反,其扫描覆盖面积区域达到 52.86%,相较于单机,区域新增覆盖面积为 30.55%,如图 5C 所示。

4 结束语

固定翼无人机进行覆盖监视时存在空间上和时间上的动态变化特征,导致多机协同区域覆盖范围难以精确刻画的问题。本文提出了基于空间探测概率和有效监视时间比的协同覆盖分析方法,系统研究了两机同轨道协同场景下的有效覆盖区建模与计算问题。通过建立联合探测模型与覆盖分析框架,明确了盘旋半径与有效覆盖范围之间的定量关系,并在此基础上提出了相应的部署优化思路。仿真结果表明,通过合理放宽空间探测概率或延长允许的监视间隔,可显著提升系统协同覆盖范围。本研究为动态监视场景下的多机协同任务规划提供了理论依据,对边境巡防、应急救援与军事侦察等实际应用具有参考价值。后续工作将进一步研究多机协同及区域全覆盖策略,以增强系统整体鲁棒性与任务容错能力。

参考文献:

[1]孙伟昌,罗志浩,石建迈,等. 无人机覆盖路径规划方法综述[J/OL]. 控制理论与应用,1-21[2025-9-4]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1240.TP.20241130.0849.004>.
 [2]贾永楠,田似营,李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. 航空学报,2020,41(S1):4-14.
 [3]杨晨,张少卿,孟光磊. 多无人机协同任务规划研究[J]. 指挥与控制学报,2018,4(3):234-248.

- [4]刘圣洋,宋婷,冯浩龙,等. 无人机集群协同搜索研究综述[J]. 指挥控制与仿真, 2024, 46(1): 1-10.
- [5]张世勇,张雪波,苑晶,等. 旋翼无人机环境覆盖与探索规划方法综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(3): 513-529.
- [6]代君,管宇峰,任淑红. 多旋翼无人机研究现状与发展趋势探讨[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2016, 32(16): 22-24.
- [7]王成,杨杰,姚辉,等. 四旋翼无人机飞行控制算法综述[J]. 电光与控制, 2018, 25(12): 53-58.
- [8]徐辉,崔国增,李泽. 多四旋翼无人机分布式固定时间自适应编队控制[J]. 系统科学与数学, 2022, 42(9): 2245-2257.
- [9]高洪波,苏周,张兆海. 垂直起降固定翼无人机发展趋势分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(22): 232+237.
- [10]王祥科,刘志宏,丛一睿,等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 20-45.
- [11]朱学平,杨军,袁博,等. 固定翼无人机编队集结控制算法研究[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(5): 128-133.
- [12]伍友利,叶圣涛,方洋旺,等. 固定翼无人机群的集群和避障控制[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(5): 103-110.
- [13]周伟,马培洋,郭正,等. 基于翼尖链翼的组合固定翼无人机研究[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 606-622.
- [14]时浩,田聪玲,任意,等. 基于稀疏A*算法的微小固定翼无人机航迹规划[J]. 兵工自动化, 2021, 40(3): 14-18+39.
- [15]王安,张可,罗巍,等. 固定翼无人机飞行环境栅格化方法与路径规划[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(8): 20-28.
- [16]SHRIWASTAV S, SONG Z. Coordinated coverage and fault tolerance using fixed-wing unmanned aerial vehicles [C]//2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Piscataway IEEE, 2020: 1231-1240.
- [17]SHRIWASTAV S, SONG Z. Heterogeneous fixed-wing aerial vehicles for resilient coverage of an area [C]//AIAA Scitech 2021 Forum. online, 2021: 1004.
- [18]向庭立,王红军,史英春. 区域覆盖的多机协同探测任务分配策略[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(6): 33-38+71.
- [19]戴健,许菲,陈琪锋. 多无人机协同搜索区域划分与路径规划[J]. 航空学报, 2020, 41(S1): 149-156.
- [20]王国师,李强,代科学,等. 基于防空警戒任务的多预警机协同补盲[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 941-946.
- [21]蔡忻怡,刘翼,张恩齐,等. 固定翼无人机协同区域覆盖监视优化部署[J]. 航天控制, 2025, 43(5): 34-41.

[责任编辑 毕伟]

Research on two-aircraft cooperative detection, coverage and surveillance technology for fixed-wing UAV in the same orbit

CAI Xinyi, LIU Yi, ZHANG Enqi, CHEN Xinzhuang*

(College of Mathematics and Computer Science, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: Aiming at the spatiotemporal dynamic variation problem existing in cooperative regional coverage surveillance of multiple fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAVs), a two-UAV co-orbital cooperative optimal deployment method based on spatial joint detection probability and effective detection time ratio is proposed in this paper. Firstly, a multi-UAV joint detection probability model and a cooperative regional coverage model are established to provide a theoretical foundation for cooperative deployment. Secondly, focusing on the scenario of two-UAV co-orbital cooperation under circular flight trajectories, an analytical calculation method for the effective coverage area is derived to reveal the intrinsic relationship between the trajectory radius and the effective coverage range. Finally, simulation results demonstrate that under the optimal co-orbital cooperative deployment of the two UAVs, the coverage surveillance range is improved by 37.13%, effectively enhancing the detection and surveillance capability of UAVs, and significantly improving the surveillance efficiency and cooperative coverage capability for the target area.

Key words: area coverage surveillance; fixed-wing UAV; multi-UAV collaboration; joint detection probability; same-track