

doi: 10.7690/bgzd.2024.03.003

# 水面舰艇与无人机协同雷达侦察技术

刘丽明, 王琪, 杨卓

(中国人民解放军 91336 部队, 河北 秦皇岛 066326)

**摘要:** 为提高雷达侦察能力, 对无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)与水面舰艇协同运用该技术进行研究。分析实际使用中, 舰载雷达侦察设备作战能力的主要影响因素; 根据不同作战需求, 提出区域补充侦察、定点增程侦察和高威胁强化侦察 3 种舰载无人机使用策略; 讨论水面舰艇与无人机协同雷达侦察的关键技术。仿真结果表明: 协同作战能提高水面舰艇雷达侦察能力, 对侦察具有积极意义。

**关键词:** 雷达侦察; 无人机; 协同运用

**中图分类号:** E843; TN959 **文献标志码:** A

## Collaborative Radar Reconnaissance Technology of Surface Ships and UAV

Liu Liming, Wang Qi, Yang Zhuo

(No. 91336 Unit of PLA, Qinhuangdao 066326, China)

**Abstract:** In order to improve radar reconnaissance capability, how to collaboratively using the technology of surface ships and UAV is researched. The main factors that can be affected upon the ability of the shipborne radar reconnaissance equipment in practice are analyzed. According to the different operational requirements, three kind of shipborne UAV using strategies are proposed including the regional supplementary reconnaissance, the fixed-point increase reconnaissance and the high threat intensification reconnaissance. The key technologies of the collaborative radar reconnaissance technology of surface ships and UAV are discussed. The simulation results show that the UAV has positive significance for improving the radar reconnaissance ability of surface ships.

**Keywords:** radar reconnaissance; UAV; collaborative application

## 0 引言

雷达侦察是水面舰艇电子对抗系统的重要组成部分, 其高灵敏的侦察能力使其成为单舰作战体系中威胁目标预警的第一效能环。随着低功雷达如低截获概率雷达(low probability intercept, LPI)的运用, 以及地物遮挡、地球曲率和其他作战环境等因素的影响<sup>[1]</sup>, 单舰平台的雷达侦察设备在某些条件下性能受限, 无法满足“先敌发现”作战要求。随着无人机(UAV)逐步受到各兵种的重视并陆续投入使用, 遂行电子侦察、目标识别、电子对抗、通信接力和火力打击等任务<sup>[2]</sup>, 大幅提升了水面舰艇的综合作战能力。笔者以单舰为对象, 探讨与无人机协同开展雷达侦察的作战样式、能力范围和运用条件等。

## 1 水面舰艇雷达侦察作战能力分析

### 1.1 实际灵敏度

通常, 在满足能量条件的前提下, 水面舰艇能够在视距内发现处于海面或地面的目标, 在大于雷

达作用距离的位置发现空中目标<sup>[3]</sup>。发现目标的最大距离与接收灵敏度相关。

对于每一个实际装备, 由于各功能单元器件个体差异、调试或标校等问题, 使其实际性能出现不均衡性, 如雷达侦察设备实际灵敏度与理想性能指标的差异, 使其对目标的侦收能力出现变化, 这就导致雷达侦察设备在某些频点或方位, 对辐射源的探测能力“近视”或“远视”。

### 1.2 LPI 雷达

根据截获概率因子  $\alpha$  定义<sup>[4]</sup>:

$$\alpha = R_f / R_r \quad (1)$$

式中:  $R_f$  为雷达侦察设备能发现雷达辐射信号的最大距离;  $R_r$  为雷达对雷达侦察设备搭载平台的最大发现距离。

LPI 雷达普遍采用高占空比、发射功率控制、波形编码积累<sup>[5]</sup>、提高接收灵敏度等技术措施, 降低雷达的被发现概率。根据式(1), 对于截获概率因子  $\alpha < 1$  的 LPI 雷达, 雷达侦察设备仅能在雷达发现己方搭载平台之后发现对方, 文献[6]表明, 荷兰

收稿日期: 2023-11-30; 修回日期: 2023-12-25

第一作者: 刘丽明(1978—), 男, 辽宁人。

的“领航员”(Pilot)雷达能在 20 km 内发现目标，而基于瞬时测频技术的雷达侦察设备(工作在电子支援侦察模式)仅能在 2.5 km 处检测到“领航员”的雷达信号。

### 1.3 自然环境的影响

地球曲率、地物遮挡、多径效应、杂波干扰<sup>[7]</sup>等，对电磁波的传播产生直接影响，使雷达辐射源信号在传输过程中有一定程度的损耗。一旦到达雷达侦察设备接收天线口面的信号衰减至实际灵敏度以下，则无法进入接收机<sup>[8]</sup>。

### 1.4 复杂电磁环境的影响

复杂电磁环境，对雷达侦察装备产生较大的影响，如雷达干扰信号，导致接收通道阻塞或增批，雷达侦察设备的性能下降较大，严重时产生丢批现象，已经无法正常侦察<sup>[9]</sup>。

实际灵敏度无法满足侦察需求、战场环境影响等因素导致舰艇单平台的雷达侦察作战能力某些时候达不到预期，当侦收能力明显下降时，利用搭载雷达侦察载荷的无人机，能够有针对性提高水面舰艇对雷达辐射源的感知能力<sup>[10]</sup>。

## 2 雷达侦察无人机及其使用策略

考虑水面舰艇远海执行作战训练任务的需要，采用随舰搭载的无人机作为载机平台，包括舰面和飞行器 2 个分系统。舰面分系统是舰载无人机的指挥控制中心，承担舰机协同控制、指令下达、数据传输、信息处理和无人机出动回收等任务；飞行器分系统是空中电子侦察的执行部，承担执飞前出、雷达侦察和听令返回等任务<sup>[11]</sup>。其组成如图 1 所示。

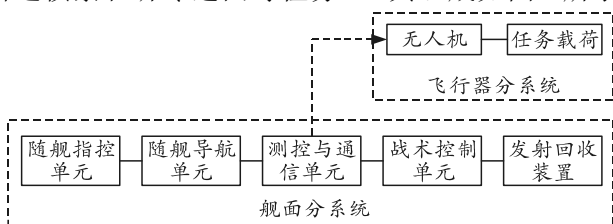


图 1 舰载雷达侦察无人机系统组成

通过舰载雷达侦察无人机与舰艇协同，能够强化灵敏度不够、地物遮挡和复杂电磁环境影响 3 种情况带来的能力“短板”，有效提高舰艇编组整体雷达侦察能力，设定 3 种作战使用策略。

### 2.1 区域补充侦察

在预警探测阶段，当舰艇需要进一步确定海域威胁状况时，可出动 2 架或多架长航时无人机，搭

载宽频段雷达侦察载荷，以较高的巡航高度进行区域补充侦察。如图 2，无人机可前出舰艇侦察视距标线，双(多)机切向(相对于载机舰艇)对飞。

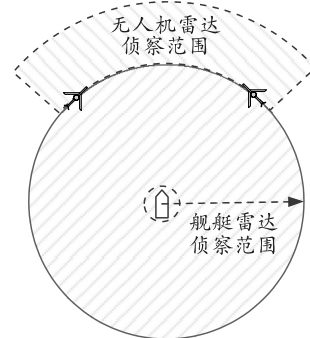


图 2 区域补充侦察运用

### 2.2 定点增程侦察

在复杂地理环境下，大型地物遮挡或低截获概率雷达会造成舰艇雷达侦察在某些方位点上的“盲区”，可出动一架高速无人机，搭载宽频带侦察载荷，高速机动，采用越飞或绕飞方式对地物前方开展快速侦察，如图 3 所示。

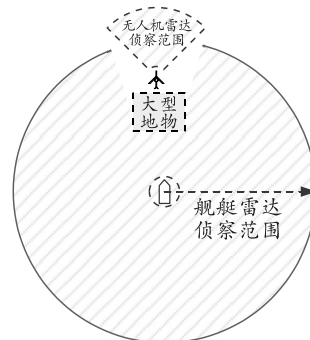


图 3 定点增强侦察运用

### 2.3 高威胁强化侦察

在复杂作战条件下，当电磁信号密集，雷达侦察设备接收分选能力受影响，可根据实际作战情况，采用轻型无人机集群，搭载窄带雷达侦察载荷，快速出动至主要威胁方向布防，保持对高威胁目标的侦察，如图 4 所示。

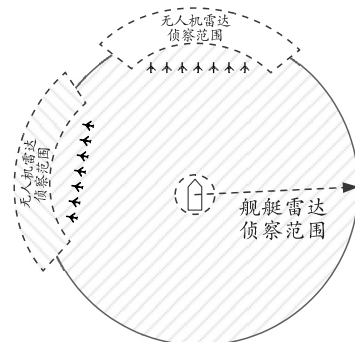


图 4 高威胁强化侦察运用

### 3 关键技术

#### 3.1 侦察航路规划

无人机海空域航路规划与地表作战有明显的差异，受地理环境影响较小，在宽阔海域可采用 Dijkstra 算法、人工势场法<sup>[12]</sup>、双向快速扩展随机树(RRT-Connet)<sup>[13]</sup>等，力求快速、准确到达任务执行点位。对于高威胁强化侦察应用模式，需要多架无人机同时到达指定区域，可以表征为在 2 维平面内作直线运动的多个质点：

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_i(t) &= v_i(t) \\ \dot{V}_i(t) &= a_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $i=1, 2, \dots, n$  为无人机架次编号； $x_i(t)$  为  $t$  时刻第  $i$  架无人机的飞行距离； $v_i(t)$  为  $t$  时刻第  $i$  架无人机的飞行速度； $a_i(t)$  为  $t$  时刻第  $i$  架无人机的加速度。

采用一阶一致性分布式控制策略<sup>[14]</sup>可以实现协同搜索航路规划，表示为：

$$\left. \begin{aligned} v_i^c(t) &= v_i(t) - \frac{u_i(t) \cdot v_i(t)}{a_{vi} \cdot \gamma_i(t)} \\ u_i(t) &= -\sum_{j=1}^n a_{ij} (\sigma_i(t) - \sigma_j(t)) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $v_i^c(t)$  为第  $i$  架无人机自动驾驶仪的速度控制指令； $u_i(t) \in R$  为  $t$  时刻第  $i$  架无人机的一阶一致性控制协议； $a_{vi}$  为第  $i$  架无人机的自动驾驶仪速度通道系数； $\gamma_i(t)$  为  $t$  时刻第  $i$  架无人机剩余到达时间； $a_{ij}$  为无人机  $i$  到无人机  $j$  的通信权重； $\sigma_i$  为多机同时到达的一致性协调变量。

#### 3.2 多信源目标融合与处理

无人机载雷达侦察作为早期预警的补充手段，仅能够提供较为粗略的辐射源信息，包括信号频率、方位、到达时间和幅度等，其精度和准确度取决于任务载荷的功能性能；因此，需要将无人机提供的雷达侦察结果与舰船雷达侦察、雷达等传感器<sup>[15]</sup>，甚至其他平台提供的战场态势数据融合，为指挥人员提供符合要求的作战信息<sup>[16]</sup>。

#### 3.3 舰机协同任务分配

根据作战要求，对舰艇和无人机的雷达侦察任务行动进行规划和分配，从而达到低风险、高质效的目的，需要综合考虑任务触发条件、侦察对象、任务要求、无人机选型和飞行环境等因素。协同任务分配的关键在于任务分配算法，主要有蚁群算法、

粒子群算法和遗传算法等<sup>[17]</sup>，文献[18]将异构目标多无人机协同侦察任务分配描述为多 Dubins 旅行商问题，建立了异构目标多无人机协同侦察任务分配模型，提出双染色体编码和多变异算子的反向学习遗传算法，改进求解异构目标协同侦察任务分配问题的有效性。舰机协同任务分配可将舰艇作为一个慢速且具备高效完成任务的“无人机”考虑。

#### 3.4 着舰引导控制

无人机着舰是一个复杂的问题，不仅是在着舰过程中舰船始终处于运动中，而且受着舰区域的尺寸大小、气流强弱、甲板起伏等影响<sup>[19]</sup>。根据出动的机型及其着舰轨迹，需要为无人机提供稳定、持续、精确的着舰触点位置、飞行姿态、甲板 3 维姿态等信息，以满足高动态复杂海况下动平台相对定位引导的需求；因此，采用雷达、光电、卫星定位等技术的综合着舰引导技术，能够满足高海况、全天候、复杂电磁环境等使用条件，以及多机型的着舰需求。

### 4 仿真实验

采用具有交战级仿真模型的某全数字仿真系统，对区域补充侦察、定点增程侦察和高威胁强化侦察的效能进行仿真实验，设定水面舰艇与无人机协同运用场景如图 5 所示。无人机及侦察载荷如表 1。

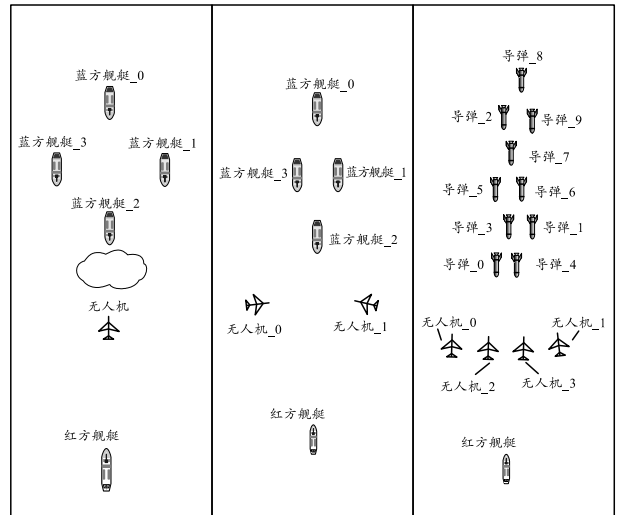


图 5 仿真实验作战场景

表 1 无人机及侦察载荷

策略	无人机			载荷性能		
	飞行高度/m	机型	出动架次	频带	灵敏度/dB	角度范围/(°)
区域补充侦察	500	固定翼	2	宽	38	45
定点增程侦察	500	固定翼	1	宽	38	45
高威胁强化侦察	30	旋翼	4	窄	46	15

根据仿真数据分析,在无无人机和有无人机支援条件下,对3种应用策略的目标发现时间和发现距离进行对比,如表2所示。

表2 雷达侦察能力对比

策略	背景环境辐射源数	威胁目标数	无无人机支援			有无人机支援		
			发现目标数	平均发现距离/km	漏警数	发现目标数	平均发现距离/km	漏警数
区域补充侦察	12	6	4	31.2	2	6	43.8	0
定点增程侦察	10	3	0	—	3	3	38.4	0
高威胁强化侦察	6	10	6	10.3	4	9	15.6	1

仿真结果表明,在不同作战场景下,合理地应用无人机辅助水面舰艇雷达侦察,能提高水面舰艇复杂海域、复杂电磁环境下对威胁目标的发现能力。

## 5 结束语

笔者讨论无人机为水面舰艇提升雷达侦察能力的策略和方法。在实际使用中,还涉及到和搭载电子对抗、火力打击、通信中继等载荷的无人机的协同运用,实现对综合作战效能的“倍增”作用。

## 参考文献:

- [1] 左洪浩. 雷达对抗侦察距离的计算方法[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(2): 125-129.
- [2] 刘振兴, 戴耀. 舰载无人机系统电子对抗作战运用研究[J]. 飞航导弹, 2017, 3: 53-56.
- [3] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012: 114-117.
- [4] 张文恒. 低截获概率雷达技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [5] 王阳. 一种低截获概率的波位编排方法[J]. 电讯技术, 2020, 60(9): 1064-1068.
- [6] 曹军亮, 杨网成, 夏琦. 低截获概率雷达在反ESM系统中的应用[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(1): 36-39.
- [7] SKOLNIK M I. 雷达手册[M]. 2版. 王军, 林强, 米慈中, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 41-63.
- [8] 刘丽明, 姚啸, 樊鸿. 典超视距雷达侦察装备试验条件分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2018, 33(4): 363-366.
- [9] 刘丽明, 李辉, 张靖. 雷达有源干扰信号对雷达侦察装备的影响[J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(4): 359-362.
- [10] 闫明松. 舰载无人机作战使用及关键技术综述[J]. 航空电子技术, 2020, 51(2): 16-20.
- [11] 彭鹏菲, 黄亮, 姜俊. 舰载无人机系统及作战运用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 10-13.
- [12] 闫怡汝, 王寅. 基于鸽群优化的复杂环境下无人机侦查航迹优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(4): 15-19.
- [13] 张顺, 谢习华, 陈定平. 基于改进RRT-Connect的无人机航迹规划算法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(12): 146-156.
- [14] 刘培宾, 盛怀洁. 反辐射无人机协同搜索航路规划[J]. 电光与控制, 2020, 27(3): 65-68.
- [15] 赵齐民, 陈晨. 舰载无人机集群系统作战构想[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(5): 1-6.
- [16] 韩卫国, 尹晓燕, 蔡文彬. 跨平台多传感器目标统一态势生成分布式融合算法研究[J]. 雷达与对抗, 2019, 39(3): 20-31.
- [17] 庞强伟, 胡永江, 李文广, 等. 多无人机协同侦察任务规划方法研究综述[J]. 电讯技术, 2019, 59(6): 741-748.
- [18] 王祝. 多无人机协同规划控制的关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- [19] 梁磊, 肖静, 邓扬晨. 舰载无人机着舰技术现状及发展趋势[J]. 西安航空学院学报, 2020, 38(5): 23-28.