

雷达探测群自主协同技术研究综述

胡佳^{*①②} 丁建江^① 周芬^① 张阳^{①②} 周超群^① 曲畅^{②③}

^①(空军预警学院 武汉 430019)

^②(信息支援部队工程大学 武汉 430030)

^③(国防科技大学研究生院 长沙 410073)

摘要: 在复杂电磁环境与多目标协同探测需求的驱动下,通过自主协同技术提升雷达探测群的综合效能,已成为雷达协同探测领域的重要研究方向。国内外围绕该方向开展了广泛研究,在理论创新、技术验证与装备应用等方面取得了丰硕成果。该文首先系统梳理了雷达探测群自主协同的概念内涵与核心特征,在此基础上深入剖析了其在工程化实现与效能优化过程中面临的关键技术瓶颈;随后,围绕体系架构设计、协同感知、智能协同决策控制及自主协同演化4个维度,对近年来的代表性研究成果与技术路径进行了综述;最后,对该领域未来发展趋势进行了展望,以期对相关理论研究与工程实践提供参考。

关键词: 雷达探测群自主协同;体系架构;协同感知;智能协同决策控制;自主协同演化

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)x-0001-32

DOI: 10.12000/JR26002

CSTR: 32380.14.JR26002

引用格式: 胡佳,丁建江,周芬,等. 雷达探测群自主协同技术研究综述[J]. 雷达学报(中英文),待出版. doi: 10.12000/JR26002.

Reference format: HU Jia, DING Jianjiang, ZHOU Fen, *et al.* A survey on autonomous coordination technology for radar networks[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR26002.

A Survey on Autonomous Coordination Technology for Radar Networks

HU Jia^{*①②} DING Jianjiang^① ZHOU Fen^① ZHANG Yang^{①②}
ZHOU Chaoqun^① QU Chang^{②③}

^①(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

^②(Information Support Force Engineering University, Wuhan 430030, China)

^③(Graduate School of National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Driven by complex electromagnetic environments and multi-target collaborative detection needs, enhancing the overall effectiveness of radar networks through autonomous coordination technology has become a key research area in radar collaborative surveillance. Extensive research has been conducted worldwide, yielding substantial advances in theoretical development, technical validation, and equipment application. This paper systematically discusses the foundational concepts and main features of autonomous coordination in radar networks, examining the primary technical challenges faced during implementation and performance optimization. It also reviews recent notable research findings and technological strategies, focusing on collaborative architecture design, sensing, intelligent decision-making and control, and autonomous evolution. Finally, this paper offers an outlook on future trends in the field and provides references for related theoretical

收稿日期: 2026-01-04; 改回日期: 2026-04-01; 网络出版: 2026-05-07

*通信作者: 胡佳 15629016325@163.com *Corresponding Author: HU Jia, 15629016325@163.com

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3005700), 乾元国家实验室基金(KYZZ-F-02-202405-0005)

Foundation Items: National Key Research and Development Program of China (2022YFC3005700), Qianyuan Laboratory Foundation (KYZZ-F-02-202405-0005)

责任主编: 严俊坤 Corresponding Editor: YAN Junkun

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

research and practical applications.

Key words: Autonomous coordination of radar networks; System architecture; Collaborative sensing; Intelligent collaborative decision-making and control; Autonomous collaborative evolution

1 引言

相较于单雷达系统, 雷达探测群具有更广的覆盖范围、更高的探测精度及更强的抗毁顽存能力^[1]。通过群内节点间的有效协同, 可进一步释放系统潜能, 实现更高的性能增益与系统弹性。2000年以来, 雷达探测群协同技术及其应用研究持续深化, 在理论创新、技术验证、装备运用等多个方面取得了显著进展^[2]。然而, 面对强敌全隐身、高超声速、强干扰、分布式新型突防能力, 以及强对抗、多时空、高动态的复杂空天探测环境^[3], 现有雷达探测群的协同能力仍显不足, 特别是在协同工作模式设计与信号参数的精细化控制方面, 仍存在“高效决策难、敏捷构群难、精准管控难、深度融合难”等现实难题, 严重制约了雷达探测群的敏捷性、灵活性与适应性, 阻碍了其群体效能的充分发挥。

自主协同依托自组织、自适应与自学习机制, 通过局部信息交互与分布式决策, 实现任务的动态规划、资源的优化调度及行为的实时协调, 最终涌现群体智能^[4]。该模式克服了传统集中控制在扩展性、鲁棒性及实时性方面的局限, 可有效应对复杂任务需求与动态环境变化。将其应用于雷达探测群, 对协同探测的任务规划、资源调度、行动控制及信息处理等关键环节进行优化, 能够充分释放探测群在强对抗环境下的协同潜能, 突破传统协同模式的作战样式边界^[5], 实现雷达探测群在多目标持续跟踪、复杂干扰对抗等任务中作战效能的跨越式提升^[6,7]。近年来, 随着认知雷达、频控阵雷达、软件化雷达等^[8-12]技术的快速发展, 雷达系统在环境感知、自主决策与系统重构等方面的智能化水平显著提升, 为雷达探测群自主协同的实现奠定了坚实的技术基础。因此, 深入开展雷达探测群自主协同理论与技术研究, 破解协同运用难题, 对提升雷达探测群集群化作战效能、应对未来复杂探测任务具有重要的理论价值与实践意义。

本文聚焦雷达探测群自主协同关键技术, 以“感知-决策-演化”闭环为主线, 在剖析其概念内涵的基础上, 围绕体系架构设计、协同感知、智能协同决策控制、自主协同演化4个维度, 系统梳理并归纳国内外最新研究进展, 凝练技术发展脉络与挑战, 并对未来趋势进行展望, 旨在为雷达探测群自主协同技术的理论创新与工程实践提供参考与借鉴。

2 雷达探测群自主协同

2.1 概念内涵

雷达探测群自主协同是一种面向复杂对抗环境的分布式智能协同探测新范式。它以高带宽、低时延、强韧性的信息网络为互联基础^[13], 将广域分布、功能异构的雷达节点动态联结为一部“逻辑上统一、可动态重构的智能探测系统”^[14]。系统中每个节点作为具备感知、决策与行动能力的智能体^[15], 基于实时共享的全局融合态势与局部交互信息, 依托预设规则或分布式算法, 实现从任务规划到参数管控的多层次深度协同, 构建起“感知-决策-演化”的群体智能闭环^[16]。最终形成具备自组织、自适应、自学习与自演化能力的有机整体, 在复杂对抗环境中实现“1+1>>2”的系统性能质变, 完成从网络化协作向智能化体系涌现的跨越。典型特征可归纳如下:

(1) 弹性可重构体系架构。系统以高韧性信息网络为纽带, 将广域分布、功能异构的节点聚合为逻辑统一的探测整体。其网络拓扑、资源与功能可根据任务需求与威胁态势动态重构, 具备即插即用、弹性扩展与抗毁自愈的能力, 为跨层级协同控制提供自适应的运行基底。

(2) 分布式自主协同决策。各雷达节点作为具有局部感知、决策与执行能力的智能体, 基于全局融合态势与有限局部交互, 通过分布式共识或多智能体学习算法, 在无中心或弱中心约束下自主生成与优化协同策略, 奠定系统自主性、鲁棒性与可扩展性的基础。

(3) 跨层级协同控制闭环。协同机制纵向贯通任务规划、资源调度与行动控制等多个层级, 形成“感知-决策-行动”的自适应控制闭环, 驱使系统依据实时态势, 动态精准调控节点行为, 实现从宏观任务分配到微观参数执行的无损传导与全局优化。

(4) 持续自主的智能进化。上述架构、决策与控制的多重耦合与迭代交互, 驱动系统整体性能演化, 最终催生超越个体能力简单叠加的体系智能。在与环境及对手的持续博弈与学习中, 系统可实现协同策略、网络构型乃至决策模型的自主进化, 达成探测效能的质变性跃升。

其与网络化雷达、认知雷达、分布式雷达、MIMO雷达等^[14,17-20]相关范式的对比如表1所示。

表 1 雷达协同范式对比分析

Tab. 1 The comparative analysis of radar collaborative paradigms

协同范式	核心特征	智能水平	网络化程度	物理分布形态	关联关系
自主协同雷达探测群	弹性可重构架构，分布式自主决策，跨层级控制闭环，持续智能进化	体系智能	深度协同网络	分布式、弹性可重构	深度整合其他范式的核心能力，具备体系智能与持续进化能力
分布式雷达	孔径合成，空间分集，灵活机动	基础智能	中等网络化	分布式	构成了自主协同的弹性可重构的物理分布与组网基础
MIMO雷达	波形多样，虚拟阵列，高自由度	信号智能	可网络化	共址或分布式	其波形协同与高自由度处理能力，为自主协同提供了实现信号层精密协同的关键技术手段
认知雷达	感知-行动循环，闭环学习，系统自适应	认知智能	可网络化	灵活可重构	为自主协同注入了“感知-行动”闭环与学习能力，是其智能决策与自主进化能力的核心来源
网络化雷达	信息融合，资源共享，协同优化	规则智能	高度网络化	分层模块化	提供了信息交互与资源调度的网络化基础设施，是技术演进的起点与对比基线

上述分析表明，雷达探测群自主协同并非对既有技术路径的替代，而是依托分布式雷达的弹性架构，深度融合MIMO雷达的波形协同能力与认知雷达的智能内核，借助分布式决策机制构建跨层级闭环协同，以突破复杂对抗环境下协同深度不足、自适应能力有限等瓶颈，从而驱动雷达系统从传统“探测装备”向具备弹性可重构、协同感知、自主决策与持续演化能力的“智能体集群”演进。

2.2 基础理论

雷达探测群自主协同的理论核心，在于建立能够刻画其“感知-决策-演化”全流程动态特性的数学描述与分析框架。为此，本节首先构建其统一的形式化模型，明确各要素的数学内涵与交互机制，进而梳理并归纳出支撑该协同范式实现的关键技术。

依据多智能体系统理论^[21]，可将由 N 个异构雷达节点构成的探测群抽象为时变动态图模型：

$$G(t) = (V, E(t), \mathbf{A}(t)) \quad (1)$$

其中， V 为节点集合，每个节点 $i \in V$ 对应一部具备独立探测、处理与通信能力的雷达。 $E(t)$ 为时变边集，表征节点间的动态通信连接关系。 $\mathbf{A}(t) = [a_{ij}(t)]$ 为时变加权邻接矩阵，其元素 $a_{ij}(t)$ 量化了节点 i 与节点 j 在时刻 t 的交互强度或信息可信度。雷达探测群协同问题可归结为在通信带宽、硬件资源与多目标任务等多重约束下，通过分布式信息交互与决策，实现系统整体效能的优化。其形式化描述如下：

$$\begin{aligned} & \max \mathcal{F}_t(\{J_i(\mathbf{x}_i(t), \mathbf{x}_{\mathcal{N}_i}(t)|\mathbf{h}_i(t), \mathbf{s}_i(t))\}_{i=1}^N, G(t)) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{x}_i(t) \in \mathbb{X}_i(t) \\ G(t) \in \mathbb{G}_c \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

其中， $\mathbf{x}_i(t)$ 为节点 i 在时刻 t 的局部决策向量，如发射功率、波束指向角、工作频率、任务分配权重、通信带宽、计算资源占比等； $\mathbf{x}_{\mathcal{N}_i}(t)$ 为其邻域节点

$\mathcal{N}_i = \{j|a_{ij}(t) > 0\}$ 的决策向量； $\mathbf{s}_i(t)$ 为节点 i 的局部状态感知向量，包括节点自身、邻域节点、目标及环境的状态信息； $\mathbf{h}_i(t)$ 为先验知识与历史经验集合，包含历史最优决策、历史协同增益、自适应学习参数及历史环境序列等； $J_i(\cdot)$ 为节点 i 的局部效能函数； $\mathcal{F}_t(\cdot)$ 为时变非线性合成函数，由任务需求、系统构型、探测目标及环境共同决定，其作用是将局部效能 $J_i(\cdot)$ 聚合成全局目标，以刻画“局部行为-全局涌现”的内在关联机制^[4]； $\mathbb{X}_i(t)$ 为节点 i 的局部决策可行域，包括硬件资源边界、任务需求约束、动态响应限制以及决策一致性约束等； \mathbb{G}_c 为系统通信拓扑的连通性约束集。

该模型为雷达探测群自主协同提供了统一的理论描述框架，将复杂体系协同问题转化为可解析的分布式约束优化问题。通过对模型变量及其关联关系的精准刻画，可实现与系统的体系架构及其感知、决策、演化等功能的映射。具体而言，体系架构由 $\mathbb{X}_i(t)$ 与 \mathbb{G}_c 共同定义， $\mathbb{X}_i(t)$ 划定了各雷达节点自主决策的物理与逻辑边界，构成协同的静态能力基础， \mathbb{G}_c 则规定了节点间动态连接与交互规则，构成协同信息流动的动态结构基础，二者共同赋予系统弹性可重构的架构形态。感知输入由 $\mathbf{s}_i(t)$ ， $\mathbf{h}_i(t)$ 双通道构成， $\mathbf{s}_i(t)$ 是对战场环境、目标状态等感知信息的数字化表征，构成触发决策的实时依据， $\mathbf{h}_i(t)$ 则存储先验知识与历史经验，为决策优化提供经验约束与指引。决策控制对应于模型的分布式求解过程，其核心任务是通过设计 $\mathcal{F}_t(\cdot)$ 支撑高层任务规划，进而求解 $\mathbf{x}_i(t)$ 完成资源调度与行为控制，实现从全局目标协同到节点指令执行的可靠映射。协同演化则通过全局目标与 J_i 之间的非线性耦合，驱动局部自主优化与全局协同涌现之间的动态博弈与协同进化。依据任务反馈，系统可通过 $\mathcal{F}_t(\cdot)$ ， $G(t)$ 的动态调整机制进行在线优化与重构。

围绕上述模型，国内外学者在4个关键层面展

开了深入研究,并持续向纵深发展。在体系架构层面,研究聚焦于约束集与拓扑结构优化,致力于将刚性物理连接转化为柔性、可编程的逻辑关联。通过发展分布式、集中-分布式混合等^[22]弹性架构,实现决策效率、系统鲁棒性与通信开销的动态平衡,从而有效拓展系统可行域,增强战场生存能力。在感知输入层面,研究以提高模型输入的精确性、完备性与时效性为核心,通过认知雷达前端自适应优化^[23]与多源信息融合算法^[24,25]的协同,增强系统对复杂动态作战环境的认知能力,为协同决策提供高质量信息输入。在决策控制层面,针对模型高维、非凸、强约束的特性,研究重点在于设计高效稳健的分布式优化与博弈求解算法,使各节点通过局部信息交互逼近全局最优或达成高效的纳什均衡^[26-28]。在协同演化层面,研究聚焦于系统运行过程中的自优化与自适应能力,通过融合在线学习、自适应控制及元优化等^[29,30]机制,使系统能够依据实时效能反馈,动态调整模型参数、约束边界乃至协同策略,推动协同范式从“基于预设规则的静态优化”向“基于经验反馈的动态自主协同”演进。

2.3 技术挑战

当前,人工智能、分布式计算与新一代网络通信技术的深度融合,正加速驱动雷达探测群协同向智能化、自主化与自适应方向演进。然而,现有研究仍主要聚焦于模型构建、算法设计与仿真验证阶段,实现从理论突破向成熟工程化应用的跨越,进而满足复杂对抗环境下高可靠、高可用的实战需求,仍面临一系列跨层次、系统性的挑战。这些挑战严重阻碍了自主协同效能从“理论最优”向“战场最优”的转化。如图1所示,从关键技术视角剖析,主要挑战可归纳如下。

(1) 动态多维异构数据的时空一致性与稳健融合

实现探测群的深度协同,要求广域分布、性能各异的节点间建立统一的时空与信息基准,这在动态对抗环境中面临严峻挑战。信号级协同处理需纳秒级时间与厘米级空间同步,而GNSS在强对抗下极易被拒止^[31]。TDOA, FDOA等协作式同步替代方案^[32],在节点机动、链路非理想传输及主动干扰下,易出现误差累积乃至同步失效。与此同时,多源传感数据在时空基准、统计特性与语义层级上存在固有异构性^[33]。传统依赖精确误差模型与理想关联假设的融合方法^[34],在目标密集、复杂电磁干扰及高虚警与漏检等高不确定场景下性能将急剧恶化。随机有限集理论^[35]虽为处理不确定性提供了系统框架,但其具体实现计算复杂,难以支撑大规模实时处理。更深层的挑战在于跨模态语义融合,即如何在观测残缺与欺骗干扰下,使机器理解雷达、光电、电子侦察及开源情报等多模态数据,并将其稳健关联至同一战术实体。现有跨模态表征与关联技术依赖大量标注数据学习模态间的联合分布,在小样本、强对抗场景下泛化能力不足,严重制约高置信度统一战场态势的生成^[36]。

(2) 大规模约束下实时任务规划与资源调度

将宏观任务规划分解为微观资源调度指令,要求系统在战术周期内在线求解高维、非凸、多目标优化问题。决策变量涵盖节点开关、工作模式、波形参数、波束指向、驻留时间、发射功率等多维状态^[15],且变量间存在强耦合约束,导致策略搜索空间随系统规模指数级增长,形成“维数灾难”。传统基于凸松弛或分解协调的优化方法^[37],因问题非凸常导致求解失效或仅能获得次优解。与此同时,战场态势毫秒级演进要求调度算法实时响应,与复

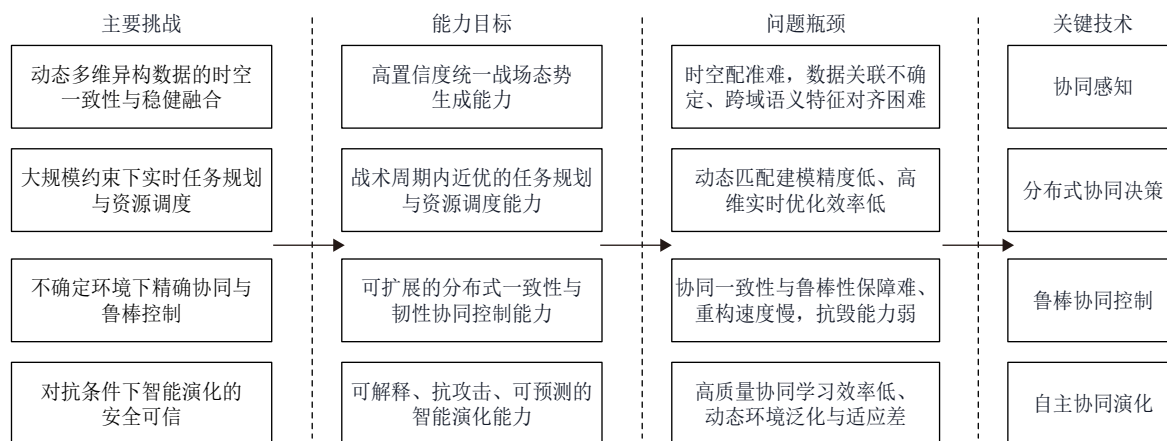


图1 雷达探测群自主协同技术挑战

Fig. 1 Technical challenges in autonomous collaborative surveillance of radar networks

杂优化所需的高昂计算成本形成根本矛盾。启发式规则虽能降低计算开销，但难以保证解的质量，而数据驱动策略需海量数据训练，且面对未预见的“长尾”态势可能表现失当^[38]。此外，决策过程中的协同通信开销与受限频谱资源相互制约，衍生出“为优化而通信”与“通信制约优化”的递归难题。

(3) 不确定环境下精确协同与鲁棒控制

实现闭环协同，需确保大规模节点在扰动下的行为精确一致与稳定。然而，实际通信链路中固有的传输时延与随机丢包，会破坏基于理想反馈假设的协同控制律的稳定性，引发系统振荡、行为失配或性能损失。例如，协同波束形成中微小的相位失准即可导致合成增益严重劣化^[39]。现有鲁棒控制方法虽能容忍一定的不确定性，但常以牺牲收敛速度或协同精度为代价^[40]。当关键节点失效时，系统应具备抗毁自愈能力，而现有重构策略多依赖预定义规则，尚不具备未知故障组合下在线自主重构与功能代偿的能力，难以达成真正的弹性与抗毁。

(4) 对抗条件下智能演化的安全可信

依赖数据驱动与在线学习的智能演化路径，在对抗条件下易引发严峻的安全与信任危机。系统面临“毒化攻击”与“规避攻击”^[41]，敌方可通过污染训练数据或扰动推断输入，诱导系统习得低效甚至有害策略。与此同时，深度神经网络的“黑箱”

特性^[42]，与军事应用对高可信、可解释的刚性要求构成深层矛盾。缺乏可解释性将严重削弱人机信任，尽管可解释人工智能已取得一定进展^[43]，但其解释自身的可靠性与可理解性仍存疑。由此可见，智能“涌现”出的群体行为具有内在的不可预测性，这既是体系能力的潜力之源，也构成了潜在的风险失控点。

3 研究进展

雷达探测群的自主协同标志着雷达系统从传统组网探测向智能化、自适应体系的重要跨越。其核心目标是构建一个能够主动感知目标与环境、自主生成决策并持续优化行为的智能协同系统。这一目标的实现，依托“感知-决策-演化”耦合式能力闭环，构成系统自主协同的内在逻辑与运行骨架，如图2所示。

在此闭环中，感知是系统的信息基础。其内涵不仅在于多源目标与环境信息的获取，更在于通过高效的信息融合与闭环增强机制，将碎片化、不确定的局部观测整合为统一、精确的综合态势，从而实现态势认知能力的跃升。决策是系统的智能中枢，贯通宏观任务规划、资源优化调度与微观行为控制，其目标是优化任务时序，高效分配时间、能量、频谱等关键资源，并精确协调波束指向、波形选择等节点操作，以保障全局意义上的协同效能最

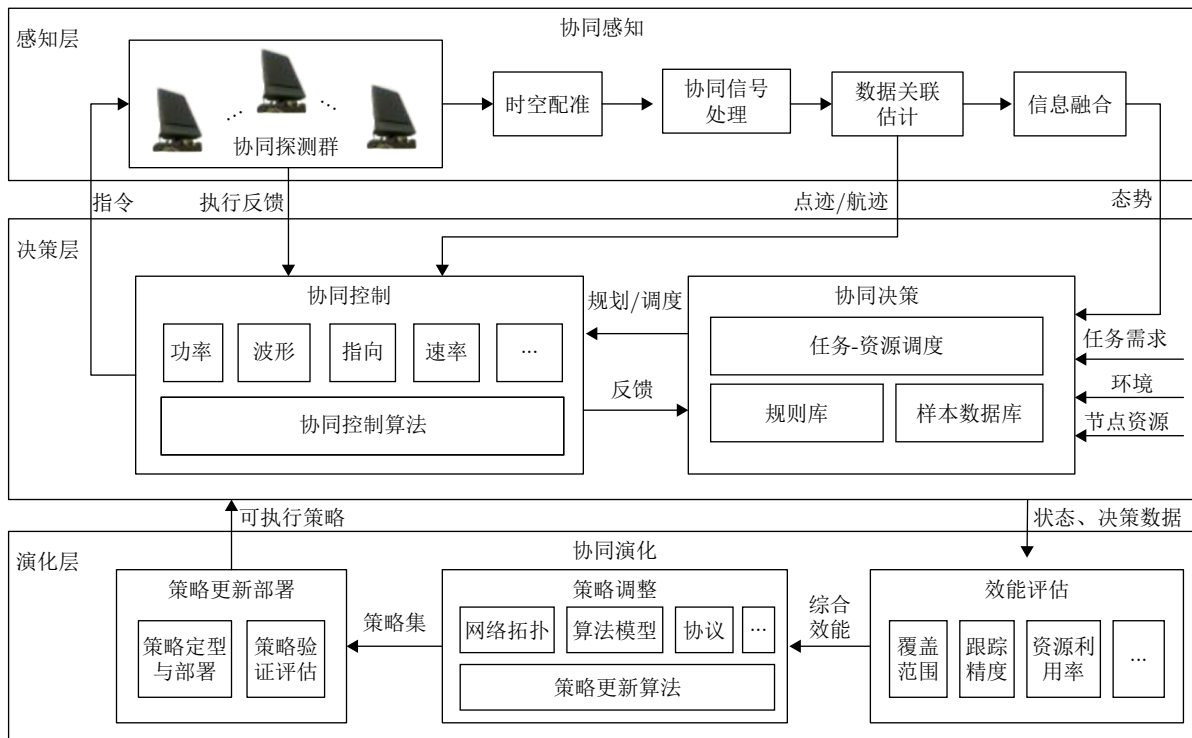


图 2 雷达探测群自主协同闭环模型

Fig. 2 Closed-loop model for autonomous collaborative surveillance in radar networks

优。演化则是系统持续进化的核心机制，通过任务执行中的在线学习与经验积累，动态优化协同策略与行为模型，使系统整体性能持续提升，并具备对新环境、新威胁的自主适应能力。

这三者并非独立模块，而是在体系架构的统筹下紧密耦合，形成一个动态交互、协同演进的有机整体。如图3所示，体系架构通过“资源使能”与“组织构建”，为感知、决策、演化提供基础运行平台与结构化空间。在架构的支撑下，系统通过节点间实时交互、任务协同、效能反馈与持续学习，驱动整体效能螺旋式上升。具体而言，感知与决策构成“态势-行动”实时闭环，实现任务与资源的动态适配；感知与演化构成“数据-模型”优化闭环，推动感知能力迭代升级；决策与演化则构成“经验-策略”进化闭环，推动决策智能持续精进。三大闭环在体系架构的约束与赋能下深度耦合、协同演进，最终使系统在多节点的分布式互动中，涌现出自适应、自学习、自组织的系统级智

能。基于上述逻辑，本节将以“感知-决策-演化”闭环为主线，系统梳理雷达探测群在体系架构设计、协同感知、智能决策控制与自主协同演化等方面的最新研究进展，旨在厘清核心技术发展脉络，为后续趋势展望奠定基础。

3.1 体系架构

雷达探测群的体系效能并非各节点性能的简单叠加，其上限与稳定性更大程度上取决于所采用的协同体系架构。作为系统协同能力的“内在骨架”，协同架构规定了信息流转路径、决策生成机制、资源调度策略以及系统对环境动态的自适应逻辑。近年来，相关研究正逐步从传统集中/分布式二元对立，向柔性化可重构、智能化、服务化等多元方向演进，如图4所示。

集中式架构凭借结构清晰、全局资源优化配置与协同决策一致性强的特点^[44]，在雷达协同探测发展初期及特定应用场景(如集中式MIMO雷达)中发

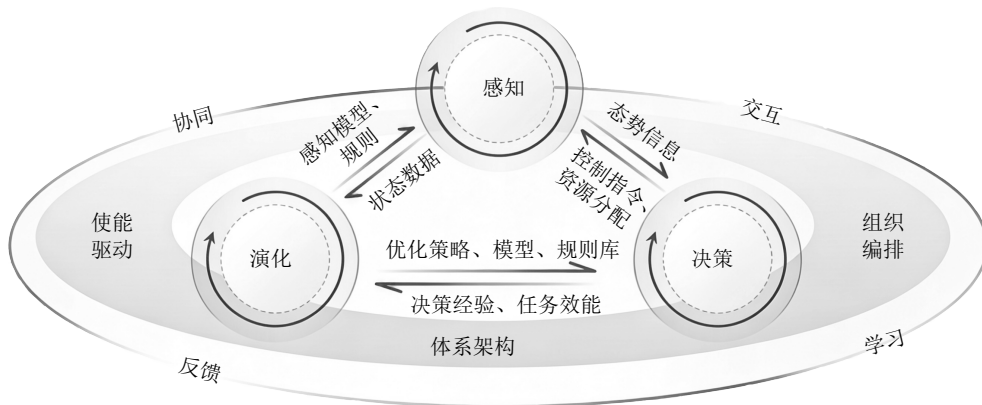


图3 闭环要素耦合关系

Fig. 3 The coupling mechanisms of the core closed-loop components

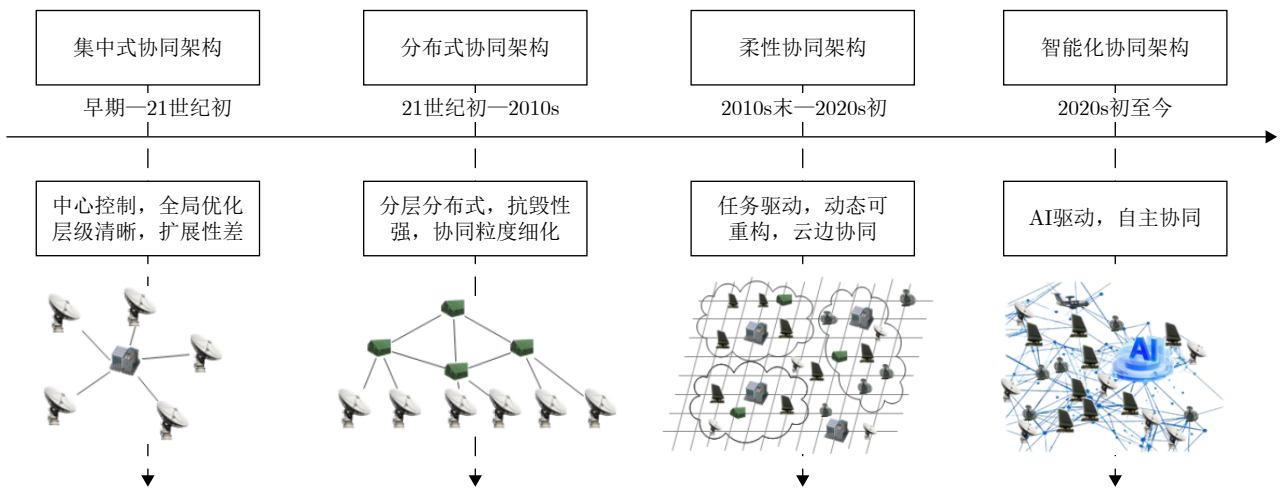


图4 雷达探测群协同架构发展历程

Fig. 4 Evolution of the architecture for autonomous collaborative surveillance in radar networks

挥了重要作用。该架构通过中央控制器实现统一调度与管理，有利于达成理论上的全局性能最优。然而，在现代战场高动态、强对抗及多任务冲突的挑战下，集中式架构固有的通信带宽瓶颈、中心计算压力、单点脆弱性以及动态响应迟滞等问题日益凸显^[1]。当前研究主要致力于通过算法优化降低通信负载，并探索与分布式元素融合的混合分层架构，以期突破其性能瓶颈^[15,45,46]。

分布式架构凭借其内在的抗毁性、良好的可扩展性及动态适应性，成为当前研究主流^[47]。诸多技术路径，如分布式MIMO雷达、数字阵列雷达网络、机/弹载雷达集群等，从不同维度诠释了分布式架构的多样化实现^[19,48-50]。早期研究多聚焦于分层分布式架构的构建与优化。例如，文献^[51]根据协同粒度将系统架构分为交战支持层、信息层与传感器层，通过多层次传感器管理实现从宏观任务规划到微观参数控制的闭环贯通，并以防空反导预警一体化应用验证了其在多样化任务中的有效性。文献^[52]则提出一种双层分布式协同架构，将组网协同与信号级相参处理相结合，提升了雷达网络的体系探测效能。为克服刚性分层架构管控层级多、灵活性差、环境适应性弱等问题，文献^[53]提出一种基于任务驱动的敏捷可重构柔性架构，使探测群能够依据任务需求动态调整组织结构与资源分配，增强了任务响应的敏捷性与复杂环境的适应能力。

尽管分布式架构优势显著，但仍面临通信开销大、一致性收敛速度慢、动态负载均衡困难等挑战。为应对上述挑战并进一步释放协同潜能，研究范式正逐步向差异化的架构形态拓展与融合，如表2所示。文献^[54]将云端的海量算力与泛在网络深度融合，提出了一种云边端协同架构，由边缘预处理数

据、云端融合决策，实现实时性与处理深度的均衡。文献^[55]提出了一种认知雷达网络协同架构，以多臂赌博机模型为决策引擎，通过动态调度主动雷达探测与被动信号感知资源，在降低系统功耗的同时提升了目标跟踪精度。针对无线雷达探测群协同问题，文献^[56]提出了一种基于OODA闭环的无线认知雷达组网协同架构，通过信息感知、多域决策、联合执行与性能评估的认知闭环，将分布式雷达节点组织为有机整体，提升了协同探测效率与系统韧性。为提升多源异构探测装备的一体化协同运用能力，文献^[57]提出了一种分布式网络化服务化协同探测架构，支持天基、空基、地基等异构装备的灵活集成、按需编排与协同管控，提升了系统集成效率与资源利用的灵活性。

随着人工智能技术的深入发展，其在雷达协同探测中的赋能作用日益凸显。AI驱动的协同架构有效提升了雷达探测的灵活性与任务适应性，为突破传统协同探测瓶颈提供了新的技术路径，已成为该领域的研究热点与前沿方向。文献^[3]系统探讨了雷达探测群的智能化协同问题，明确了其能力需求与设计规范，为解决协同难题提供了重要理论支撑与技术指引。文献^[58]提出了一种基于多智能体强化学习的分布式协同架构，通过集中训练-分散执行机制，实现雷达间波束与功率的动态协同，显著提升了复杂电磁环境下的跟踪连续性与精度。文献^[59]提出了一种基于多智能体联盟博弈的协同框架，通过节点自主协同与动态联盟，自发形成高效的分配结构，实现了多目标跟踪精度和资源消耗的协同优化。文献^[60]提出了一种基于联邦学习的协同架构，通过分布式训练与模型参数聚合实现知识共享，有效降低了协同探测的通信开销。此

表 2 典型的雷达探测群协同架构

Tab. 2 Typical architecture for autonomous collaborative surveillance in radar networks

架构类型	核心特征	主要优势	主要挑战	适用场景
集中式协同架构	1.中心节点统一调度与决策 2.全局信息感知与资源优化 3.结构层级清晰	1.全局寻优能力强，协同效率高 2.管控实现简单，决策一致性好 3.技术成熟度高，工程可实施性强	1.单点故障风险高，系统容错能力弱 2.通信带宽需求高，响应时延长 3.扩展性差，节点动态增删能力弱	任务模式可预定义的小规模协同探测
分布式协同架构	1.节点决策自治 2.控制与功能去中心化部署 3.基于局部交互的分布式协商	1.鲁棒性强，单点失效风险低 2.扩展性好，节点可动态加入/退出 3.通信与计算负载分散	1.协同一致性保障困难 2.通信开销大，收敛速度慢 3.动态负载均衡与资源调度复杂	大规模、广域部署的雷达网络
柔性可重构协同架构	1.任务/事件驱动 2.系统拓扑、资源、功能可动态重组	1.环境与任务适应能力强 2.资源按需分配，利用效率高 3.系统具备良好的弹性与韧性	1.重构机制复杂，实时保障难度大 2.动态资源调度与任务迁移复杂 3.对通信与计算资源要求高	1.多任务复杂场景 2.异构平台协同探测
智能化协同架构	1.以AI为核心驱动引擎 2.具备自主认知与协同决策能力	1.处理复杂不确定性问题能力强 2.支持动态非线性协同优化 3.具备数据驱动学习演进能力	1.强数据依赖，高质量样本获取困难 2.模型可解释性差，决策可信度存疑 3.计算开销大，实时部署门槛高	1.极端复杂电磁对抗环境 2.多目标、高机动目标的智能跟踪与识别
其他架构	探索跨学科协同新范式，突破传统架构局限	1.提供突破性协同思路与创新方案 2.可解决传统范式难以处理的复杂问题	1.理论成熟度不高 2.缺乏工程化实践经验与标准 3.与现有装备体系集成难度大	特定场景的复杂协同问题，如超大规模资源分配

外,受经济学、生物学及信息物理系统等跨学科思想启发,涌现出基于市场机制的分布式优化架构、生物启发的鲁棒协同架构以及数字孪生赋能的全生命周期设计与实时调优架构等新兴范式,为解决复杂协同问题提供了新的思路^[61,62]。

综上所述,在人工智能、分布式决策、云网融合等技术的推动下,雷达探测群的抗毁顽存性、任务适应性与智能化水平显著提升。然而,现有研究在多范式架构的深度融合与无缝切换、面向复杂对抗环境的鲁棒性设计,以及大规模动态系统的可扩展性验证等方面仍存在明显不足^[63]。多数先进成果仍处于仿真验证阶段,缺乏贴近实战环境的规模化检验^[57]。未来研究应聚焦于构建情境感知的混合多维自适应架构,发展跨域智能协同理论,并深化动态强对抗环境下群体的自主抗扰与快速重构机制研究,从而推动雷达探测群向全频谱协同、自主认知与韧性抗毁的方向演进,为构建下一代一体化联合感知体系奠定坚实基础。

3.2 协同感知

协同感知是指分布式部署的多个感知节点,通过信息交互、共享与融合,形成超越单节点能力的统一、精确全局态势,从而显著提升系统在复杂环

境下的综合感知能力。在雷达协同探测领域,其具体表现为多雷达节点通过信息共享与协同处理,实现对目标特性、电磁环境及系统资源状态的全局、动态与精细化感知,是提升探测群整体效能的关键。作为雷达协同最基本、最早发展的功能,协同感知正由“静态、后处理的数据交换”向“动态、实时、智能化的信息共生”方向演进,如图5所示。目前,该领域的研究主要聚焦于多源数据高效融合与闭环感知增强两大方向。

3.2.1 多源数据融合

多源数据融合作为协同感知系统的核心,历经数十年发展,已形成从理论奠基到工程实现的完整技术体系,积累了丰富的研究成果。现有研究通常按照层级划分为数据级、特征级与决策级3类^[64],并基于JDL模型、Bowman模型、Luo-Kay模型等经典框架构建融合过程^[65]。为揭示技术演进的内在逻辑与各环节间的耦合关系,本节以信息融合处理流程为切入点,采用纵向分析视角,将融合链路解构为时空配准、协同信号处理、数据关联与状态估计、信息融合等关键环节进行系统梳理,如图6所示。

时空配准是多雷达节点观测数据统一表征与融

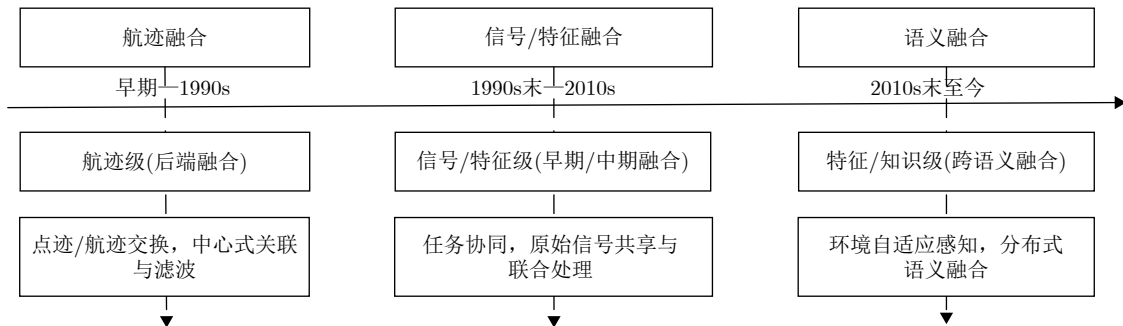


图5 协同感知技术发展历程

Fig. 5 Evolution of collaborative sensing in radar networks

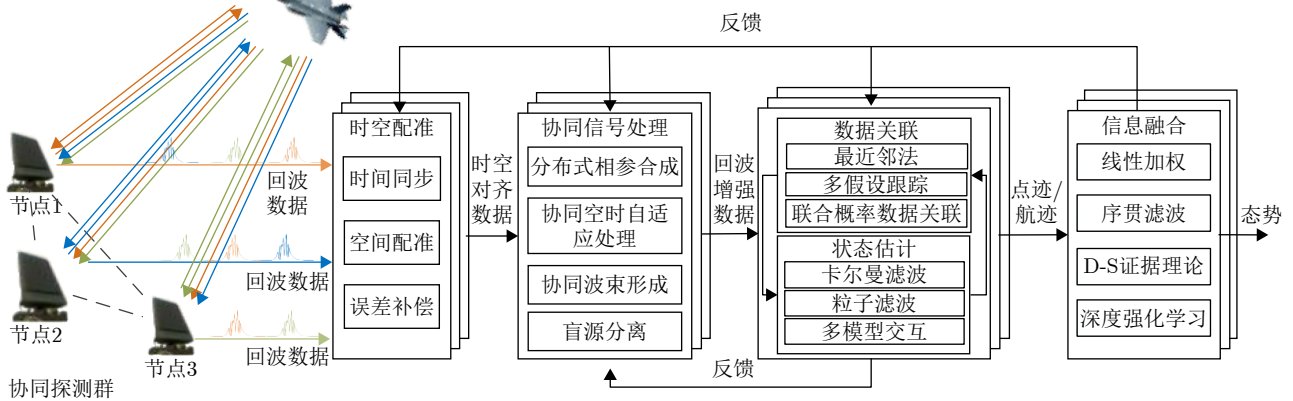


图6 协同感知数据处理流程

Fig. 6 Data processing chain for collaborative sensing

合处理的关键前置环节,旨在消除空间基准差异、时钟异步、平台动态及系统误差所引起的观测不一致性,将各节点量测映射至统一时空基准^[66]。现有方法可归纳为基于批处理优化的离线配准、基于贝叶斯递推滤波的在线配准、基于时变参数低维建模的配准以及基于数据驱动的配准等4类。基于批处理优化的配准方法通过构建时空偏差的代价函数,采用最小二乘或最大似然估计建立优化目标,并利用交替优化、约束优化、图优化等算法求解配准参数^[67-70]。该类方法理论成熟,无需外部辅助信息,适用于离线标校与非实时融合场景,但在应对时变偏差与动态平台方面存在局限。基于贝叶斯递推的配准方法将传感器系统误差扩展至状态空间,与目标状态在递推贝叶斯框架下联合求解,并采用扩展/无迹卡尔曼滤波、粒子滤波或联邦滤波等算法实现量测流驱动的实时偏差校正^[71-73]。此类方法支持在线运行,能够跟踪缓慢时变偏差,并与目标跟踪紧耦合,是雷达协同探测中最主流的实时配准算法,但其对初始先验信息的依赖性较强。基于时变参数低维建模的配准方法针对运动平台引发的时变空时误差,借助离散余弦变换基函数、多项式或样条函数对配准参数的时序演化进行稀疏表示^[74-76],将动态估计问题转化为基系数静态优化,降低了求解维度。该方法可兼容离线批处理与在线递推,兼顾运动平台、低通信速率与高精度要求,现已拓展至距离-多普勒域空间对齐及分布式相干合成中的空时联合同步。基于数据驱动的配准方法不依赖显式物理模型,通过深度学习、自监督学习等从样本中学习配准映射,如端到端网络、孪生网络、图神经网络及无监督域适应等^[77,78]。该类方法在非线性、非高斯、模型失配等复杂场景下具有显著优势,并具备拒止环境下自主智能配准能力。

协同信号处理通过多节点网络化协同与联合信号处理,在信号层面提升原始观测数据的质量和信度,为后续的目标检测、跟踪与识别奠定基础。分布式相参合成雷达(Distributed Coherent Aperture Radar, DCAR)是协同信号处理中最具代表性也最具挑战性的技术之一^[14]。其核心思想是将多个空间分离为相对小功率的雷达单元,通过精确的时频和相位控制,使电磁波在目标处或接收端实现同相叠加,从而等效形成巨大的虚拟孔径,实现能量的空间聚焦。理想的全相参模式下, N 部雷达理论上可获得 N^2 倍的功率增益与 N^3 倍的信噪比增益^[79-81]。然而,DCAR对节点间纳秒级时间同步、亚波长级相位同步的要求严苛,且存在计算复杂度高、系统误差敏感等固有局限,严重制约了其在动

平台系统中的推广应用^[82-84]。为应对上述非理想条件,稳健相干处理通过自适应相位误差估计与补偿、模型失配下的鲁棒算法,增强对非理想条件的适应性^[85],而低开销协同处理则采用信息量化压缩、分布式信源编码、稀疏信号处理等策略,在保证关键性能的同时降低通信、计算和同步开销,实现性能与资源消耗的优化平衡^[86-88]。针对干扰与杂波抑制问题,协同空时自适应处理(Collaborative Space-Time Adaptive Processing, C-STAP)通过多平台数据共享扩展独立同分布训练样本,缓解传统STAP在非均匀环境下因样本不足导致的杂波协方差矩阵估计性能下降问题,增强杂波抑制的稳健性,但其性能受限于多节点数据配准精度与异类干扰协同抑制能力,且面临数据融合复杂、通信开销巨大及计算压力高等工程风险^[89,90]。协同波束形成通过跨节点协作形成等效大口径虚拟阵列,在目标方向形成高增益主瓣、干扰方向形成深零陷,从而提升系统信噪比与抗干扰能力,但其性能依赖高精度信道状态获取,且存在阵列校准误差敏感、信号相消等风险^[91-93]。此外,当目标信号与干扰在信道中复杂混叠且先验信息缺失时,盲源分离技术利用源信号间的统计独立性或时频域稀疏性,直接解耦出目标信号分量,实现噪声基底重构与信号子空间分解,从而提升干扰抑制能力,尤其适用于复杂电磁环境下的信号处理,但其存在尺度模糊与排列模糊等局限^[94,95]。

数据关联与状态估计将多传感器、多时刻的测量数据与目标轨迹正确关联,进而精准估计目标状态。在协同探测中,由于各节点空间分散、观测视角各异,数据关联从2-D问题扩展为S-D关联问题^[66],复杂度显著提升,使得高可靠数据关联成为难点。尽管近年来涌现出多种智能算法,但联合概率数据关联(Joint Probabilistic Data Association, JPDA)与多假设跟踪(Multiple Hypothesis Tracking, MHT)作为该领域的经典算法,因其理论完备性和强可解释性,仍是当前研究重点。JPDA通过计算量测与目标间的关联概率实现多目标跟踪,但在密集杂波环境下计算负担显著增加^[96]。为此,研究者提出了NNJPDA, TJPDA, CSSJPDA等^[97,98]次优JPDA算法,通过近似计算平衡精度与效率。MHT则通过维护多假设轨迹以应对复杂跟踪场景,具有较强的鲁棒性,但也存在假设组合爆炸与计算复杂度高的问题^[99]。为克服传统算法的局限,人工智能技术被引入数据关联领域,将关联问题转化为模式识别或图结构推理,利用循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)、图神经网络

络(Graph Neural Network, GNN)、Transformer网络等^[100,101]模型从数据中学习复杂的关联模式,实现更加鲁棒、精准的关联。该类算法虽然降低了对运动模型和噪声模型的依赖,但仍存在数据依赖性强、可解释性差、泛化能力弱等短板。在状态估计方面,卡尔曼滤波及其扩展形式(如EKF, UKF, CKF)基于最小均方误差准则,在模型准确且满足高斯假设的条件下,能够兼顾估计性能与计算效率,广泛应用于多目标跟踪^[102,103]。然而,该类方法对模型精度依赖较强,在强非线性或非高斯场景下估计性能显著下降。相比之下,粒子滤波通过蒙特卡罗采样,摆脱了对系统线性和高斯假设的依赖,适用于强非线性、非高斯系统的状态估计,但其计算复杂度较高,限制了在实时系统中的应用^[104]。 H_∞ 滤波则着眼于最坏情况设计,不依赖精确噪声模型,在系统存在显著模型不确定性时表现出良好的鲁棒性,适用于高可靠性场景^[105]。针对非线性状态估计问题,量测转换卡尔曼滤波(Converted Measurement Kalman Filter, CMKF)提供了另一种解决思路。其核心思想是将雷达原始极坐标量测转换为直角坐标系下的等效量测,使线性卡尔曼滤波等标准算法能够直接应用,从而实现高效跟踪,如传统量测转换、去偏量测转换(Debiased CMKF, DCMKF)、无偏量测转换(Unbiased CMKF, UCMKF)等^[106]。其中,DCMKF利用泰勒展开估计并补偿偏差项,而UCMKF则从统计原理出发,构造乘性修正因子,使转换后量测的数学期望严格等于真实位置^[107]。此外,交互式多模型(Interactive Multiple Model, IMM)滤波通过多模型融合提升估计精度,与JPDA, MHT等数据关联方法结合,能够有效解决复杂环境下的多机动目标跟踪问题^[108]。除了上述经典框架外,随机有限集(Random Finite Set, RFS)理论将多目标状态与量测集合统一建模为随机有限集,将多目标跟踪转化为集合空间上的贝叶斯滤波问题,规避了显式的数据关联步骤,典型实现包括概率假设密度(Probability Hypothesis Density, PHD)滤波器、多伯努利(Multi-Bernoulli, MB)滤波器、广义标签多伯努利(Generalized Labeled Multi-Bernoulli, GLMB)滤波器等^[109]。RFS方法在处理目标数目变化、杂波和漏检方面具有优势,特别是其分布式融合形式能有效降低雷达协同的通信带宽压力,已成为近年来的重要研究方向。

信息融合是按照一定的准则对多源传感数据或局部目标信息进行综合,进而形成统一、精确、全面的态势图。基于线性加权的融合方法通过权值优化配置实现多源信息集成,具有结构简单、计算高效、可解释性强的特点,适用于高实时性场景,但

其权重设定多依赖经验,缺乏理论最优性^[110]。基于卡尔曼滤波的序贯融合方法在线性高斯场景下可实现理论最优性能,在非线性或非高斯条件下则需借助EKF, UKF等扩展形式,并结合自适应机制来增强其鲁棒性^[111]。D-S (Dempster-Shafer)证据理论通过基本概率赋值与证据合成规则实现不确定信息融合,能够有效刻画信息的不完备性、模糊性与冲突性,且无需依赖先验概率,但其计算复杂度随焦点数量呈指数增长,在处理高冲突证据时存在组合规则失效风险^[112]。近年来,基于深度学习的融合方法可自适应地从多源数据中学习融合策略,实现高维特征提取与全局优化,展现出显著的应用潜力^[113]。此外,基于模糊理论、联邦滤波等融合算法,以及由随机有限集理论发展而来的多目标融合方法,同样具有良好的应用前景^[114-116]。

随着探测群协同作战对感知信息多源性、实时性、抗干扰性等要求的不断提升,单纯依赖雷达回波数据的感知模式已难以应对日益复杂的任务需求。为获取更完整、精确的目标状态信息,进一步提升对目标与环境的综合感知能力,融合激光雷达、红外、电子支援措施等异构传感器数据,已成为协同感知领域发展的必然趋势^[117]。传统基于状态估计和概率推理的融合方法虽在理论严谨性、可解释性及实时性方面具有优势,但其高度依赖预设模型与规则,难以适应高动态、高维异构的复杂感知场景^[118]。基于人工智能的融合方法通过数据驱动的端到端学习机制,突破了传统方法模块化处理的流程限制,通过“关联-估计-融合”一体化设计实现数据、特征、决策等多个层次的跨模态信息的自适应提取与整合,在灵活性、鲁棒性及复杂环境适应性方面具有显著优势^[119]。文献^[120]提出了一种基于深度学习的多特征融合海面目标检测器,通过融合距离像和多普勒谱图的互补特征,增强目标与杂波的分度,在检测性能上优于CA-CFAR, GO-CFAR及SO-CFAR等方法。文献^[121]针对无交互条件下的多源异构数据融合问题,提出了一种基于联邦学习的融合算法,通过构建高维张量表征多类传感数据的内在关联特征,在提升融合效率的同时有效降低通信开销。注意力机制作为提高人工智能系统性能的关键技术,能够依据任务需求与数据特性自适应调整不同信息源的融合权重,实现更智能高效的融合。文献^[122]提出了一种基于Trans-Attention的融合方法,将Transformer的序列建模能力与注意力机制相结合,获得了比EKF, RNN及LSTM更高的融合精度。文献^[123]创新性引入Cross-Attention机制,可有效聚合来自不同传感器、不同视角的特征,构建出更鲁棒的多模态特征

表示。为进一步融合利用数据的多尺度特征，文献[124,125]通过引入多注意力机制，大幅提升了多源数据的融合精度。文献[126]采用分层多注意力策略，实现了从局部细节到全局语义的跨模态深度融合。

综上所述，在雷达协同探测领域，多源数据融合技术正与人工智能深度融合，逐步向系统认知层级演进。未来，雷达系统不仅应实现目标探测数据的时空对齐与融合[127]，更应面向电磁环境、资源状态与节点健康等多维异构信息，构建实时联合感知能力。通过构建深度特征提取网络[128]，对战场态势下的雷达效能衰减、资源竞争等潜在风险进行在线预测，为动态任务优先级重分配、抗干扰波形协同设计等[129,130]自适应调度算法提供决策依据，推动协同感知从“目标数据驱动”向“环境-资源-状态”联合感知的范式演进。

3.2.2 闭环感知增强

传统的协同感知系统多采用“开环”或被动工作模式，各传感器节点通常依据预设的固定策略独立执行探测任务，后端处理中心仅对上报数据进行融合处理。该模式下的资源配置与处理流程呈现静态固化特征，难以实现与动态战场环境和多样化任务需求的有效适配。而闭环感知增强技术则标志着协同感知从“开环/被动”向“主动/认知”范式的深刻转变。该技术通过构建以任务为导向的“感知-行动”动态闭环，将后端融合生成的高层认知作为关键反馈，实时前瞻性地指导前端协同信号处理与探测资源的优化配置，从而实现系统整体效能的自我迭代与持续提升。

认知跟踪是闭环感知增强机制的典型范例[131]。其核心在于，系统不仅利用融合信息更新目标状态估计，更将当前估计结果及其不确定性作为先验知识，通过性能预测模型定量评估不同资源配置策略的潜在收益，进而求解动态优化问题，主动调度资源以最大化下一时刻的信息增益。如文献[15,132]所述，闭环感知增强可解构为性能定量预测与资源动态优化两个相互耦合迭代的关键环节。

(1) 性能定量预测模型

建立精确的性能预测模型是闭环感知增强框架的基石。在多目标跟踪任务中，后验克拉美罗下界(Posterior Cramer-Rao Lower Bound, PCRLB)是性能预测中广泛采用的理论工具，为任何无偏状态估计器的均方误差提供了理论下界。在贝叶斯滤波框架下，下一时刻的PCRLB可表示为当前后验信息矩阵和资源配置的确定性函数，并通过递推式(3)计算：

$$\mathbf{F}_{k+1|k}(\mathbf{x}) = \mathbf{D}_k^{22} - \mathbf{D}_k^{21}(\mathbf{F}_{k|k} + \mathbf{D}_k^{11})\mathbf{D}_k^{12} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{F}_{k|k}$ 为当前时刻的后验信息矩阵， \mathbf{D}_k^{ij} 为由状态转移矩阵和观测矩阵导出的子矩阵，则下一时刻的PCRLB为

$$\text{PCRLB}_{k+1}(\mathbf{x}) = [\mathbf{F}_{k+1|k}(\mathbf{x})]^{-1} \quad (4)$$

资源配置向量 \mathbf{x} 通过影响观测矩阵及测量噪声矩阵来改变 \mathbf{D}_k^{ij} ，从而决定下一时刻性能下界。

(2) 资源动态优化

闭环系统的“增强”行为可具体化为求解一个在线动态优化问题，其目标是在满足资源、时间等约束的前提下，为下一时刻选择最优的资源配置向量 \mathbf{x}^* 。根据任务需求的不同，该优化问题通常可归纳为性能驱动型与质量约束型两种资源分配范式[132]。以多目标跟踪为例，两种范式可分别表述如下。

性能驱动型资源分配：

$$\begin{aligned} & \max \mathcal{F}(\{\text{PCRLB}_i(\mathbf{x})\}_{i=1}^M) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij}(\mathbf{x}) \leq C_{\text{total}} \\ \mathbf{x} \in \mathbb{X} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

质量约束型资源分配：

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij}(\mathbf{x}) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \text{tr}(\text{PCRLB}_i(\mathbf{x})) \leq T_i \\ \mathbf{x} \in \mathbb{X} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

其中， M 为系统需要跟踪的目标数量， N 为雷达的数量。 $\mathcal{F}(\cdot)$ 为效用函数，用于将各目标的跟踪性能映射为系统整体效用； $c_{ij}(\mathbf{x})$ 是第 i 部雷达对目标 j 的资源消耗函数； C_{total} 为系统总资源预算； \mathbb{X} 为决策变量 \mathbf{x} 的可行域； T_i 为对目标 i 的跟踪性能阈值。

综上，闭环增强模型最终可转化为在线优化问题。当问题结构规整且满足凸性条件时，凸优化、松弛技术等传统方法可实现高效求解[133,134]。然而，在实际的雷达探测群系统中，此类问题往往呈现非凸、混合整数的NP-hard特性，传统方法难以直接应用。启发式算法虽可通过全局搜索获取近似最优解[135-138]，但随着环境复杂性增加与节点规模扩大，决策维度急剧膨胀，其计算复杂度和参数敏感性显著增加，难以满足实时应用需求。近年来，以强化学习为代表的机器学习方法为高维动态优化问题提供了新的解决思路[139,140]，基于模型预测控制的优化策略也展现出应用潜力[141]。无论采用何种算法，面对高维决策空间和毫秒级响应要求，实时性是必须满足的硬性约束。为此，需综合运用问题分解、分层决策、离线训练与在线推理等策略，在保证求解有效性的前提下降低计算开销，提升实时响应能力。

3.3 智能协同决策控制

决策控制作为实现探测效能最大化与激发群智涌现的关键，需能根据节点之间的动态关联关系，制定有效的协同策略，整合任务执行过程中节点积累的知识与经验，动态调度探测资源，协同节点探测行为与时序，消解局部与全局之间的冲突，一致化全局目标，驱动探测群从分散式局部感知向一体化全局认知演进，从而持续提升整体探测效能。其演进路线正从“预设、静态、集中式”的决策控制模式向“自适应、动态、分布式”的智能决策控制方向发展，如图7所示。

雷达探测群的决策控制模型如图8所示。相比3.2节闭环感知增强中的局部资源调度与控制，该模型面向雷达探测群的整体任务与全域资源，实现从任务规划、资源调度到行动控制的全流程智能协同，是解决大规模整体优化问题的核心，包括任务规划、资源调度、行动控制3个紧密耦合的关键环

节，它们在决策粒度、控制对象、时间尺度及核心目标上各有侧重，共同构成完整的闭环控制体系，其层次关系如表3所示。

3.3.1 协同任务规划

任务规划是智能协同决策控制的顶层环节，旨在将雷达群高层作战意图分解为一系列具体、可执行的探测任务，并合理地分配给雷达群内的各节点或子群，同时确定任务的执行顺序与优先级，其目标是在满足任务约束与雷达群能力约束的前提下，最大化整体任务效能。具体而言，包括任务分解、任务分配、任务重规划等。

(1) 任务分解

任务分解是将复杂探测任务拆解为可并行执行的子任务，以适配雷达探测群分布式协同架构，确保子任务在空间、时间、资源上的协同性，同时兼顾任务间的依赖关系和可替代性。通常采用超图划分模型对任务分解问题进行建模。在超图

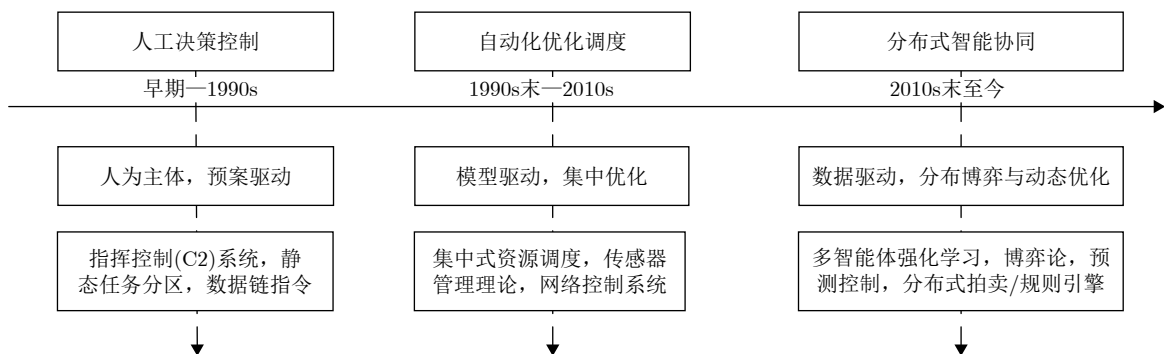


图7 决策控制发展历程

Fig. 7 Evolution of collaborative decision-making and control in radar networks

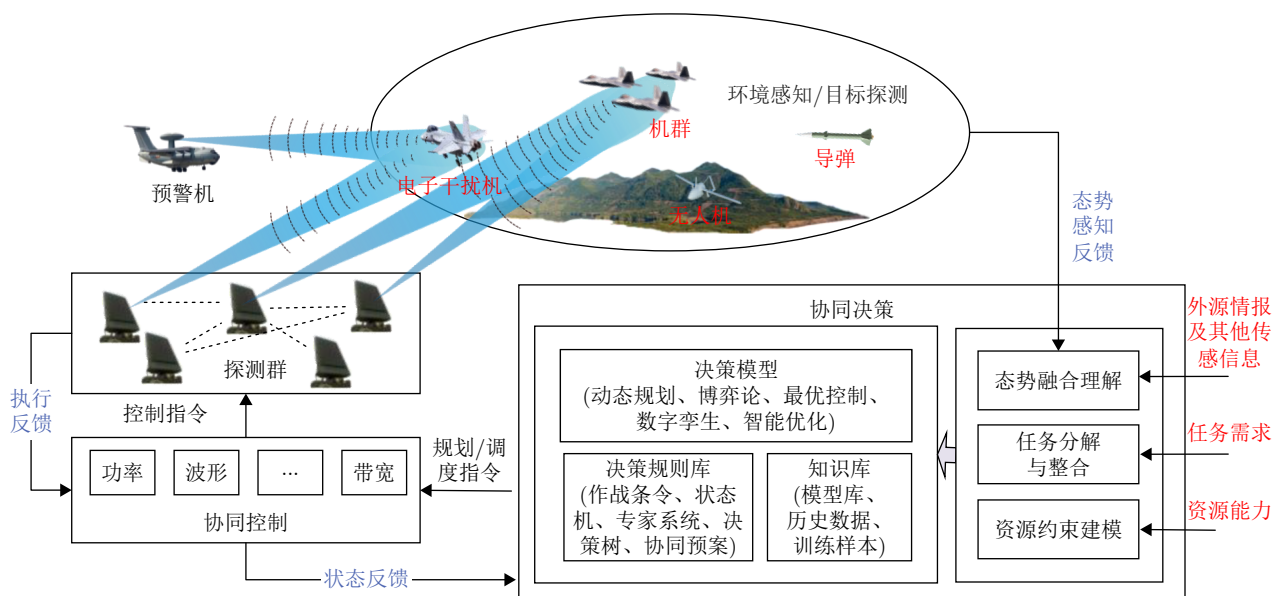


图8 协同决策控制模型

Fig. 8 Collaborative decision-making and control model in radar networks

表 3 协同决策控制层级对比分析

Tab. 3 Hierarchical comparison of collaborative decision-making and control

协同层级	决策粒度	控制对象	时间尺度	核心目标
任务规划	粗粒度	探测任务/子任务	分钟级/秒级	任务分解与节点分配, 实现任务覆盖
资源调度	中粒度	探测、计算、网络、存储等资源	秒级/百毫秒级	多节点资源协同配置, 实现任务意图与资源能力的精准匹配
行动控制	细粒度	波束, 波形, 时序, 平台位姿等	毫秒级/微秒级	底层动作的时空同步与参数匹配, 实现执行协同

$G = (V, E)$ 中, 顶点集 V 代表子任务或资源节点, 超边集 E 中的每个超边 e 连接一组顶点, 表示这些子任务之间存在的协作依赖、资源共享或耦合关系。超图划分的目标是将顶点划分为 N 个子集(对应雷达节点或子群), 使得被切割的超边加权和最小, 从而在分解任务时最大限度保持强耦合子任务的完整性, 降低跨节点协同的复杂度。其数学模型如下:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{e \in E} w(e) \cdot \text{cut}(e) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \bigcup_{i=1}^N \mathcal{T}_i = \mathcal{T} \\ \bigcup_{i=1}^N \mathcal{C}_i \supseteq \mathcal{T}_{\text{sp}} \\ |t_i - t_j| \leq \Delta t_{\text{max}} \\ \sum_{i=1}^M c(\mathcal{T}_i) \leq C_{\text{total}} \\ \text{dep}(\mathcal{T}_i, \mathcal{T}_j) \leq D_{\text{max}} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\text{cut}(e)$ 表示超边被划分的代价, $w(e)$ 为超边权重, $\bigcup_{i=1}^N \mathcal{T}_i = \mathcal{T}$ 为任务覆盖约束, \mathcal{T}_i 表示子任务, \mathcal{T} 表示总任务集合。 $\bigcup_{i=1}^N \mathcal{C}_i \supseteq \mathcal{T}_{\text{sp}}$ 为空间覆盖约束, \mathcal{C}_i 为雷达 i 的探测覆盖区域, \mathcal{T}_{sp} 为任务空间范围。 $|t_i - t_j| \leq \Delta t_{\text{max}}$ 为时间同步约束, t_i, t_j 为协同子任务执行时间, Δt_{max} 为最大时间差容忍度。 $\sum_{i=1}^M c(\mathcal{T}_i) \leq C_{\text{total}}$ 为资源约束, $c(\mathcal{T}_i)$ 为子任务 \mathcal{T}_i 的资源需求, C_{total} 为系统总资源。 $\text{dep}(\mathcal{T}_i, \mathcal{T}_j) \leq D_{\text{max}}$ 为任务依赖约束, D_{max} 为任务依赖阈值。

(2) 任务分配

任务分配是任务规划的核心环节, 旨在将分解后的子任务优化配置给各雷达节点, 在满足资源约束的前提下最大化系统探测效能。该问题属于 NP-hard 组合优化问题, 通常可建模为 0-1 整数规划进行求解, 如式(8)所示。

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} U_{ij} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^N x_{ij} \geq 1 \\ \sum_{j=1}^M x_{ij} \mathbf{c}_{ij} \leq \mathbf{C}_i^{\text{max}} \\ x_{ij} \in \{0, 1\} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, N 为雷达节点数, M 为子任务数, x_{ij} 表示雷达 i 执行任务 j , U_{ij} 为雷达 i 执行任务 j 的效用值, \mathbf{c}_{ij} 表示雷达 i 执行任务 j 需占用的资源向量, $\mathbf{C}_i^{\text{max}}$ 为雷达 i 所拥有的资源。在环境变化、目标机动、节点失效等动态场景下, 需要实时调整任务分配方案, 进行重规划, 确保探测任务持续有效执行。

针对协同任务规划问题, 学术界和工业界已经提出多种求解算法。除动态规划、启发式算法等传统方法外, 近年来基于市场拍卖机制、博弈论和机器学习的方法成为研究热点。其中, 基于市场拍卖机制的算法将任务配置问题类比为市场经济活动, 将任务视为商品、雷达节点为理性竞标者, 通过拍卖与协商机制以分布式自组织方式实现任务的有效配置, 典型代表如基于共识的捆绑拍卖算法^[142]。此类算法具有灵活性高、鲁棒性强等优势, 天然适配分布式系统, 但其性能高度依赖节点间通信的可靠性, 且需精心设计效用函数, 以引导系统逼近全局目标。基于博弈论的方法将雷达节点建模为理性决策主体, 通过个体利益最大化实现任务分配, 如联盟博弈、对抗博弈等^[59,143]。该方法为理解和设计复杂交互下的协同策略提供了重要的理论支撑, 但其模型构建复杂, 且对参与者“完全理性”的假设在现实环境中可能难以严格成立。基于机器学习的方法, 特别是深度强化学习, 在多功能雷达任务调度中展现出优异性能。该方法能够在线学习并适应未知动态环境, 无需显式环境模型即可通过内部学习实现前瞻性规划, 其性能超越诸多传统基于规则或固定优先级的规划方法^[144]。在协同探测场景中, 由于存在多个自主决策的雷达节点, 问题自然演化为多智能体系统问题。通过设计合理的奖励函数与信息共享机制, 可以训练多个雷达智能体学会协同压制干扰, 或通过协同机制实现目标覆盖的最优化^[145,146]。

3.3.2 协同资源调度

协同资源调度负责对系统探测、计算、网络、存储等关键资源进行动态优化配置, 其效率直接影响系统的整体探测效能。当前研究主要围绕性能最优与资源消耗最小化两大准则展开^[15,132], 核心目标是在复杂约束下设计高效算法, 以快速逼近或获得

全局最优解。根据驱动机制的不同,现有调度方法可分为规则驱动、模型驱动、任务驱动、资源驱动及数据驱动等类别,具体对比分析如表4所示。

基于规则驱动的调度方法通过预设逻辑规则实现决策。雷达节点间通过通信链路共享状态信息,并根据全局或邻域信息,独立按照预设逻辑规则做出一致性或互补性决策,典型算法包括基于状态机、专家系统、决策树和协同预案等^[1,42,147]。该方法具有确定性高、实时性好、可解释性强等优点,但其高度依赖由人类经验构建的规则库,难以应对预期之外的状态变化。在复杂动态场景中,构建完备规则库的规模将呈指数级增长,严重制约资源调度的效率与准确性。尽管如此,规则驱动方法并未被完全摒弃,而是通过与其他技术融合实现迭代升级。文献^[148]利用模糊逻辑系统将专家知识转化为模糊规则嵌入PCRLB优化模型,实现了火控雷达的资源优化。文献^[149]则通过先验知识引导启发式搜索,实现了大规模防空资源的高效配置。

基于模型驱动的调度方法将多雷达系统的资源分配问题形式化为分布式或集中式数学模型,通过仿真推演与优化求解实现多节点资源的联合优化与协同配置。典型方法包括基于估计理论、动态规划、博弈论、最优控制及数字孪生等。其中,基于估计理论的调度通常以PCRLB为目标或约束,指导功率、节点、频率等资源分配,从理论上保障跟踪或定位精度的最优性^[150,151]。基于动态规划的调度将资源分配建模为多阶段序贯决策问题,如文献^[152]将波束调度问题建模为非平稳多臂老虎机问题,采用基于无迹采样的边际生产率指数策略,通过预测多步跟踪误差协方差实现非短视调度优化。基于博弈论的调度将雷达节点建模为博弈参与者,在非合作或合作框架下求解功率、波束等分配策略,实现分布式节点间的自主协同^[153,154]。基于最优控制的

调度方法将控制理论与博弈论相融合,对波束指向、发射功率、驻留时间等参数进行联合优化,适用于连续跟踪场景下的动态资源调控^[155]。基于数字孪生的调度则通过构建雷达-环境的虚拟镜像,结合仿真推演实现超前资源配置,为复杂场景下的资源调度提供预测性管理能力,如文献^[62]将图神经网络与数字孪生相结合,实现多无人机雷达网络的频谱与功率联合优化。基于模型驱动的资源调度方法通过动态建模与在线优化,能够在考虑节点间耦合与通信约束的前提下,适应环境与目标的动态变化,实现多雷达资源的优化配置。然而,该方法通常涉及复杂的模型求解或推理过程,计算资源消耗大,且分布式优化中的信息交互开销进一步制约了其在实时场景中的应用。因此,如何在保证模型精度的同时降低分布式计算复杂度与通信开销,仍是亟待解决的关键问题。

基于任务驱动的调度方法以任务效用最大化为目标,通过优化任务完成过程实现探测群资源的最优配置^[37]。文献^[156]针对复杂对抗场景下多雷达“资源-目标-环境”匹配问题,提出了一种任务驱动的协同探测资源动态优化配置方法,以满足任务性能需求为目标的多粒度动态联合优化模型生成调度方案,有效提升了多雷达协同探测效能。该方法通过任务需求与资源能力的耦合建模,能够显著提高任务执行的效率与成功率,确保关键任务优先执行,在复杂多变的环境中展现出较强的适应性。然而,当多个任务同时竞争有限资源时,易引发资源占用冲突,进而影响整体执行效率^[157]。因此,需要引入资源调度与任务优先级管理机制以提升系统效能。文献^[158]基于空间目标优先级评估,以最大化任务优先级之和为目标函数,求解多地基雷达协同探测的调度问题,在提高任务完成率的同时降低资源消耗。

表4 协同资源调度方法对比分析

Tab. 4 Comparative analysis of collaborative resource scheduling algorithms in radar networks

调度方法	核心特征	典型算法	主要优势	主要挑战	适用场景
规则驱动	基于预设逻辑规则一致性或互补性决策	状态机、专家系统、决策树、协同预案	可解释性强、实时性高、实现简单	适应性差、存在规则冲突、维护困难	逻辑简单、实时性要求高、确定性环境
模型驱动	形式化数学模型,通过仿真与优化求解	动态规划、博弈论、最优控制、凸优化	理论性能优、全局最优、可处理不确定性	计算复杂度高、模型失配敏感、实时性差	多阶段决策、对抗博弈、理论最优求解
任务驱动	以任务效用最大化为目标	组合优化、合同网协议	任务目标明确、系统效能高、支持动态重规划、可扩展性好	任务建模难、存在不可行解、受任务参数变化影响大	任务分配、多目标跟踪
资源驱动	以资源最优利用为目标	凸优化、雷达方程、对偶分解	资源利用率高、与硬件结合紧、可扩展性强	多维资源联合优化难、对环境变化响应慢	功率管理、波形捷变、波束调度
数据驱动	端到端机器学习	深度学习、强化学习	自适应强、能处理高维数据、端到端优化	样本数据数量和质量要求高、可解释性差、训练不稳定	复杂非线性环境、高维状态空间、在线快速推理

基于资源驱动的调度方法聚焦于雷达系统资源的最优利用，将发射功率、波束指向、时间片、带宽、节点开关状态等多维要素作为决策变量，通过优化调度实现节点间的资源最优配置与探测协同^[147]。该方法是协同探测领域的研究热点，其核心思想可概括为资源约束下探测性能最大化或性能约束下资源消耗最小化^[15]。在动态多任务场景中，该方法可显著提升系统在空间域与时间域内的探测性能，同时降低被敌方侦察截获的概率，实现探测资源的高效利用^[159]。随着分布式优化理论的发展，此类方法已能够通过线性规划、非线性规划及基于对偶分解的算法求解大规模资源分配问题，并具备良好的可扩展性与容错性。然而，多节点间的资源协调需频繁交互，显著增加系统通信开销^[160]；同时，对频段、带宽、波形、发射功率、方向图、波束驻留时间、工作周期等多种资源要素进行综合优化，会导致问题求解复杂度急剧上升。此外，计算资源与通信资源的强耦合性进一步加剧求解难度，严重制约了系统的实时性。

基于数据驱动的调度方法将复杂的在线优化问题转化为离线训练与在线推理相结合的方式，通过机器学习模型学习环境特征与调度策略之间的复杂非线性映射，从而提升复杂场景下资源调度的准确性与实时性。文献^[161]将雷达网络多目标3D成像的资源调度问题建模为马尔可夫决策过程，并采用A2C (Advantage Actor-Critic)深度强化学习方法进行求解，在保障成像质量的前提下提升了资源配置效率与调度收敛速度。文献^[162]针对分布式MIMO雷达系统的资源利用率优化问题，提出基于混合动作空间强化学习的资源分配方法，在给定资源约束下有效提升了目标定位性能。文献^[163]针对多目标跟踪中的时间资源管理问题，提出约束深度强化学习框架，通过深度Q网络与对偶变量的联合学习，在预算约束下最小化多目标跟踪成本，能适配动态环境变化与新目标加入场景。多智能体强化学习将各雷达节点建模为独立智能体，可通过局部信息交互实现全局资源的协同优化。文献^[164]针对雷达网络目标检测的低截获概率功率分配问题，提出分散式多智能体强化学习方法，通过局部邻域信息近似全局值函数，实现了大规模雷达网络的可扩展资源调度。针对雷达网络拓扑结构的复杂性，图神经网络被引入以增强智能体对节点间关系的建模能力。文献^[165]将图卷积网络与多智能体强化学习相结合，提升了多智能体协同效率。尽管基于数据驱动的方法在环境适应性、自主性和鲁棒性方面具有显著优势，但其对高质量训练数据、高算力计算资源

以及可靠通信带宽的强依赖性，仍是制约其在复杂大规模场景中应用部署的主要瓶颈^[166]。

随着智能化战争形态的持续演进及无人化装备的广泛应用，未来空天探测环境将呈现高度复杂与动态变化的特征。在此背景下，单一调度方法难以应对雷达探测群日益复杂的协同需求。因此，亟须合规则、模型、任务、资源及数据等多重要素，通过多方法的智能化融合提升资源调度模型的灵活性、适应性及鲁棒性，实现对战场态势、探测目标与资源状态的实时响应，满足多约束条件下的复杂探测任务需求。文献^[162]通过理论性能建模与数据驱动策略学习的深度融合，实现了逼近理论最优的资源分配。文献^[167]将不确定性建模与启发式优化相结合，实现了鲁棒资源分配。文献^[168]基于模型驱动优化框架，融合障碍函数与循环最小化算法，在非理想检测条件下实现了雷达网络的协同资源分配。文献^[169]基于多模型加权资源分配框架，利用先验信息引导雷达发射资源的优化分配，在同等资源消耗下提升了多机动目标的综合跟踪精度。文献^[170]在模型驱动框架下融合任务约束规则与先验信息，实现了机载雷达网络协同目标跟踪的资源分配。此外，人-机智能决策融合为多方法融合提供了更高层级的实现路径，通过构建人-机融合决策的交互模型，可有效提升雷达探测群在复杂战场环境下的协同效能与智能化博弈能力^[5]。未来研究应进一步探索规则、模型、数据等多要素深度融合机制，重点突破物理知识嵌入的深度学习、因果推理与强化学习融合等技术，以应对极端复杂战场环境下的协同探测需求^[42]。

3.3.3 协同行动控制

协同行动控制是指在分布式架构下，各雷达节点在无中心/弱中心干预条件下，通过低时延信息交互与实时状态反馈，实现波束指向、波形参数、发射时序、平台位姿等底层操作的时空同步与参数匹配，并将动作执行误差约束在系统允许的范围内，从而保障多节点协同探测的相干性、互补性与有效性。以波束指向一致性控制为例，其核心目标在于使各节点的波束指向角随时间演化趋于一致，该过程可采用二阶一致性模型进行描述，如式(9)所示。

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i(t) = \omega_i(t) \\ \dot{\omega}_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i(t)} a_{ij}(t)[(\theta_j(t) - \theta_i(t)) \\ + b_{ij}(t)(\omega_j(t) - \omega_i(t))] + \mu_i(t) \end{cases} \quad (9)$$

其中， $\theta_i(t)$ 和 $\omega_i(t)$ 分别表示节点*i*在时刻*t*的波束指

向角及其角速度; $\mathcal{N}_i(t)$ 为节点*i*的通信邻域,反映其时变拓扑连接关系; $a_{ij}(t)$ 和 $b_{ij}(t)$ 为时变加权系数,表征节点间的耦合强度,通常依据链路质量、节点信任度或任务优先级动态调整; $\mu_i(t)$ 为误差补偿控制输入,用于抵消电磁干扰、机械偏差、网络波动等因素带来的指向漂移。通过上述控制协议,各节点的波束指向角可渐近收敛至一致状态,从而实现空间指向的精确协同。在实际系统中,该连续模型可通过离散化处理(如欧拉法)转化为迭代更新形式,以适应数字控制器的实现需求。从技术实现维度划分,协同控制算法可包括一致性协同控制、鲁棒协同控制、非线性协同控制等,其对比分析如表5所示。

一致性协同控制是指群内各节点通过局部信息交互与行为协调,使系统在状态、输出或决策变量等特定维度上达成全局一致。在雷达探测群中,多部雷达基于分布式一致性协议可实现时间同步、频率校准、目标状态估计等协同任务。针对多部雷达协同的异步测量误差不一致问题,文献[69]提出基于多站协同数据处理的航迹误差校准方法,提升了复杂多目标场景下融合航迹的一致性。文献[171]面向空地多域协同场景中的异步测量与通信延迟,提出一种自适应一致性多源信息融合方法,获得了优于传统一致性方法的跟踪精度与稳定性。在分布式融合估计方面,文献[127]将一致性机制引入分布式天基雷达组网,通过因子图建模与非参数信度传播,实现了目标高度估计的一致融合。在多目标协同跟踪方面,文献[172]研究了基于算术平均的一致性滤波方法,在分布式信息交互中实现了多目标密度的一致收敛。针对通信受限条件下的协同控制问题,事件触发机制是重要研究方向。文献[173]将动态事件触发机制引入分布式序贯一致性融合滤波,设计了基于最小协方差的触发策略,在保证滤波精度的同时有效降低了传感器网络的通信频次。文献[174]则面向机动目标跟踪场景,提出了一种有限时间事件触发分布式容积信息滤波算法,通过一致性协同机制实现了多传感器对机动目标的高精度跟踪。

尽管一致性协同控制研究已取得显著进展,但受系统模型不确定性、持续外部扰动及网络参数时变性的影响,实现严格一致性仍面临诸多挑战。为此,研究者围绕集群系统的鲁棒控制问题展开深入研究,主要方法有 H_∞ 控制、滑模控制、扰动观测控制等。针对外部扰动下的协同控制问题,文献[175]将一致性理论应用于舰载相控阵雷达网的分布式协同控制,通过节点间信息迭代抑制估计偏差与传输噪声,实现了多雷达资源分配的全局协同。文献[176]融合干扰观测控制与主动抗扰技术,提出一种抗扰动鲁棒分布式均值跟踪算法,有效克服了虚假数据注入攻击与外部干扰的影响。针对幅相误差引起的分布式雷达主瓣干扰抑制性能下降问题,文献[177]提出基于干扰样本的幅相误差补偿方法,提升了非理想条件下抗扰动的鲁棒性。除外部扰动外,系统内部不确定性同样影响协同控制性能。在集群系统中,单个节点的局部不确定性可能通过网络传播放大,威胁全局稳定性。针对此类问题,文献[178]设计了一种正态-伽马非线性雷达扩展目标跟踪滤波器,增强了量测不确定性条件下跟踪稳定性。文献[179]针对机载外辐射源雷达多目标跟踪问题,提出鲁棒自适应跟踪算法以应对杂波干扰与量测不确定性。文献[180]在合成孔径雷达干涉测量任务中引入绝对值分数阶幂函数优化滑模面,实现了星载平台姿态的鲁棒控制。文献[181]将扰动观测器应用于电子扫描阵列雷达导引头,通过滤除平台运动干扰,实现了量测不确定性及参数摄动下的鲁棒性。此外,形式化方法也被引入鲁棒控制研究,如可达集分析、障碍函数等^[182,183],为系统安全性与稳定性提供严格的理论保障。

由于执行器饱和、环境干扰及目标运动耦合与机动不确定性等因素,雷达探测群系统呈现显著的非线性特性。因此,非线性协同控制成为该领域的研究重点。非线性协同控制旨在解决系统动力学、任务需求或环境约束呈现强非线性时,节点间稳定、高效协同的根本性难题,将协同控制理论从简化的线性模型扩展至更贴近实际的复杂工程系统,是实现雷达探测群高性能协同的关键技术路径。典

表5 协同行动控制算法对比分析

Tab. 5 Comparative analysis of collaborative action control algorithms in radar networks

名称	核心特征	典型算法	主要优势	主要挑战	适用场景
一致性协同控制	使所有节点状态渐近趋同	平均一致性、二阶一致性、事件触发一致性	简单易实现、通信开销小、理论成熟	对干扰敏感、通信延迟影响大、线性假设局限	时钟同步、分布式平均共识、数据融合、线性近似有效系统
鲁棒协同控制	在不确定/扰动下保持稳定与一致	H_∞ 、滑模控制、扰动观测控制	抗干扰能力强、可靠性高、适用范围广	设计复杂、可能产生抖振、需不确定性边界信息	未知扰动环境、模型参数不确定系统
非线性协同控制	针对非线性系统实现复杂协同任务	反馈线性化、反步法、滑模控制、智能控制	贴合实际物理系统、控制性能优、灵活性高	设计难度大、稳定性证明困难、对模型精度要求高	非完整约束系统、复杂机械系统、强非线性耦合系统

型算法包括反步法、滑模控制、自适应控制等[184]。文献[185]提出一种基于分层滑模的自适应控制方法，通过模糊逻辑系统与自适应律在线逼近未知动态与补偿集总不确定性，实现了系统的稳定控制。文献[186]将滑模控制与神经网络相结合，设计了融合RBF与BP神经网络的滑模控制器，提高了系统协同精度和抗干扰能力。近年来，融合强化学习、深度神经网络等人工智能方法处理环境约束下的协同控制问题成为研究热点。文献[187]针对扫频干扰问题，提出了一种基于深度强化学习的抗干扰控制机制，实现了多雷达频谱资源的分布式协同，有效抑制了外部干扰和雷达间的互扰。文献[188]提出了一种基于在线学习的雷达网络节点协同控制方法，提高了系统对动态目标的跟踪精度。文献[189]针对频控阵-多输入多输出(Frequency Diverse Array MIMO, FDA-MIMO)雷达，提出了一种基于强化学习的功率控制方法，采用深度确定性策略梯度算法与干扰机进行动态博弈，使雷达系统获得了最大信噪比。文献[190]提出的分层多智能体深度确定性策略梯度算法，提高了雷达探测的成功率。

尽管基于人工智能的协同控制在提升系统自主性与环境适应性方面展现出显著优势，但在实际应用中仍面临诸多挑战，主要表现为多约束条件下的最优控制问题、高维状态空间下的控制策略寻优困难，以及高动态对抗环境中的协同稳定性不足等。未来，雷达探测群协同控制研究将更加注重跨

域融合与复杂环境适应性，如何在强干扰、高不确定性及极端任务条件下保障协同控制的全局稳定性与可靠性，将成为研究的核心方向。

3.4 自主协同演化

协同演化是指群组内个体通过竞争、合作与交互学习，持续优化协同策略，实现对动态复杂环境与任务的自主适应[191]，其闭环工作流程如图9所示。与传统聚焦于静态最优解的优化算法不同，协同演化算法强调多节点或组件之间的动态交互机制，能够在更大策略空间中探索更具鲁棒性的协同策略，从而高效求解大规模、高维度的动态复杂问题[192]。根据实现机制的不同，协同演化算法可分为基于种群的协同演化、基于博弈的协同演化、基于多智能体的协同演化等类型，各算法的对比分析如表6所示。

基于种群的协同演化算法通过模拟自然界生物的捕食、进化、迁徙等行为机制，以差分迭代方式搜索最优策略，典型方法包括遗传算法、粒子群优化算法、蚁群算法、人工蜂群算法等。在雷达协同探测领域，不同雷达节点或功能组件可视为独立种群，通过群间信息共享与协同交互实现系统探测策略、资源分配方式及协同关系的持续演化和效能提升。如文献[193]提出的动态异构多粒子群优化算法，通过维度突变、多群并行演化和群淘汰机制，实现了动态变量维度下多目标问题的高效求解，提

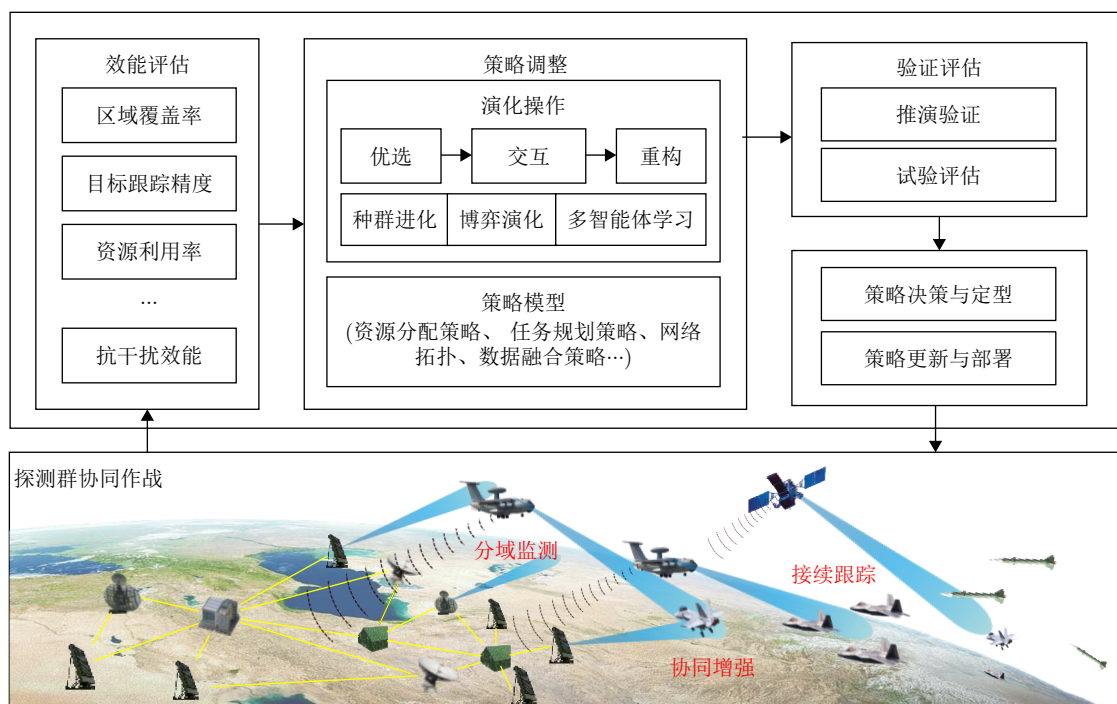


图 9 协同演化的闭环工作流程

Fig. 9 Closed-loop model for collaborative evolution in radar networks

表6 协同演化算法对比分析

Tab. 6 Comparative analysis of collaborative evolution algorithms in radar networks

名称	核心特征	典型算法	主要优势	主要挑战	适用场景
基于种群的协同演化	通过多个种群的协同进化优化雷达探测策略	遗传算法、粒子群、蚁群、人工蜂群等	全局搜索能力强,能有效避免局部最优解	计算复杂度高,收敛速度慢,参数设置敏感,难以处理实时性高的场景	简单场景下的探测任务优化及全局最优解要求高的场景
基于博弈的协同演化	将演化过程建模为多方博弈,通过策略互动实现系统均衡	非合作博弈、联盟博弈、扩展式博弈	可解释性强,策略均衡性好,鲁棒性与可扩展性强	模型设计复杂,均衡求解计算开销大,部分观测下性能下降	对抗性电子战环境,多雷达系统间存在竞争与合作的场景
基于多智能体的协同演化	将雷达系统建模为多智能体系统,通过智能体间的交互与学习实现策略优化	强化学习、分布式优化	分布式处理能力突出,适用性强,可快速响应环境变化,可扩展性好	通信开销大,非平稳环境下学习收敛慢,智能体间信任机制设计困难	动态环境下实时响应要求高的场景

升了复杂电磁环境中频谱分配的效率。文献[194]提出的期望最大化多群协同粒子群优化算法,采用主从式多群协作结构,解决了强非线性条件下期望最大化优化难题,实现了对临近空间高机动目标的精确跟踪。文献[195]将蚁群算法与神经网络相结合,构建去中心化的雷达群对抗框架,通过蚁群刺激-响应模型实现子群动态优选,并利用级联神经网络进行群间知识共享与融合,提升了集群系统的整体认知与对抗能力。基于种群的协同演化算法在处理高维非线性问题方面具备较强优势,但其参数配置多依赖经验调优,缺乏自适应调节机制。在高动态环境下,该类算法需通过重新初始化或引入多样性维持策略来适应环境变化,增加了实际应用的复杂性。

基于博弈的协同演化算法将雷达协同探测问题建模为多方博弈过程,各雷达节点作为理性决策者,通过策略交互与协同学习实现动态演化与系统均衡。文献[196]基于非合作博弈模型,将智能干扰环境下的组网雷达功率分配问题建模为多节点策略博弈,通过迭代学习实现功率策略的动态演化,有效提升了探测性能和资源调度效率。文献[153]将雷达间的协作关系建模为联盟博弈,提出基于二次规划的三步迭代算法,使雷达群在群组划分、功率配置与跟踪精度之间协同演化,实现了多目标间的策略耦合与整体优化。该类算法采用分布式决策机制,各节点仅需局部信息即可通过博弈交互实现策略协同,具有较强的鲁棒性与可扩展性,特别适用于节点间既存在合作又存在竞争的协同场景。然而,传统博弈模型通常假设节点能够获取其他节点的完整策略与效用信息,这一强假设在信息不完全的实战环境中难以满足,制约了其在实际部署中的效能发挥。针对此问题,文献[197]基于扩展式博弈理论,提出了一种部分观测信息下的组网雷达功率分配方法,通过多轮博弈交互与在线学习迭代优化功率分配策略,使系统在与敌方干扰的动态博弈中持续演化,提升了系统对突防目标的检测概率。

基于多智能体的协同演化算法将雷达协同探测系统建模为分布式人工智能系统,各雷达节点作为具备自主决策能力的智能体,通过智能体间的交互与学习实现协同策略优化。多智能体系统凭借其自治性、社会性、反应性与主动性等特征,能够有效应对网络拓扑动态变化、节点故障及复杂环境等挑战,在分布式雷达网络协同探测的建模与实现中展现出显著优势^[198]。文献[199]提出一种基于多智能体强化学习的多雷达任务动态分配算法,采用随机特征逼近效用函数,大幅缩短了任务分配策略的寻优时间,在保障跟踪精度的前提下降低了系统资源消耗,增强了多雷达系统对动态环境的适应能力。文献[190]进一步提出基于分层多智能体强化学习的雷达协同抗干扰策略优化算法,引入稀疏奖励累积与分类经验回放机制,有效提升了复杂干扰环境下多雷达协同探测的成功率。尽管多智能体协同演化算法在提升雷达探测群协同决策效能方面具有巨大潜力,其实际应用仍面临非平稳环境、一致性收敛、冲突消解及通信效率等多重挑战。特别是在大规模协同任务与高动态复杂场景中,智能体间的协调难度与通信开销呈指数级增长,导致算法收敛速度下降,难以获取全局最优解。针对上述问题,研究者引入元学习机制以加速学习过程,使智能体能够利用先验知识快速适应新环境。文献[200]将在线贝叶斯元学习应用于认知雷达跟踪,通过构建元结构进行策略学习,实现了对目标行为与环境变化的快速适配。文献[201,202]进一步提出元认知雷达概念,通过整合多个认知策略提升系统的灵活性与适应性,以应对复杂多变的探测环境。此外,联邦学习、迁移学习等^[203]方法亦被用于优化多智能体协同演化性能,成为该领域的研究热点。

尽管协同演化在持续动态优化问题求解中展现出独特优势,但随着问题维度增加、目标函数多模态特征凸显及动态环境不确定性增强,其在搜索效率、收敛速度及多样性保持等关键性能指标上逐渐暴露出瓶颈^[204]。当前,该领域研究正朝着多学科融

合的方向发展,融合利用强化学习、深度神经网络、数字孪生等前沿技术成为研究热点。文献[205]提出融合LSTM的多智能体强化学习框架,实现了基于实时波束调度的搜索策略自主演化。文献[62]将数字孪生与图神经网络相结合,构建了多无人机雷达网络的虚拟映射与实时资源分配框架。文献[206]进一步探索了多雷达数据融合与数字孪生场景建模的融合路径,为大范围连续检测提供了新思路。此外,基于人-机智能融合的协同演化机制亦广受关注。通过引入领域专家知识、动态偏好反馈以及经验规则注入,可实现人类智慧与算法优化能力的互补,增强算法对复杂任务的适应性,并提升其知识积累与跨任务泛化能力[207]。

4 发展趋势

随着人工智能、自主控制、云网融合、边缘计算、大数据等新兴技术在雷达领域的深度融合与渗透,雷达系统的网络化架构与智能化水平得到显著提升,其协同探测与任务执行能力持续增强。自主协同作为集群协同技术的高级形态,不仅是智能化时代群体协作的重要范式,更是雷达协同探测技术发展的核心目标。尽管当前雷达协同领域的研究已广泛涉及自主协同相关议题,但学术界尚未就其技术演进路径与发展趋势形成系统性共识。

本节立足于技术视角,聚焦自主协同闭环的核心环节,系统梳理当前研究热点,凝练提升雷达探测群自主协同可用性的有效策略与实施路径,以期后续研究提供理论参考与借鉴。

(1) 多模态融合处理

在复杂环境感知与协同探测场景中,雷达探测群感知效能的提升不仅依赖于多雷达节点的协同优化,更需与搭载视觉成像、激光雷达等多类传感器的节点实施跨模态感知协同,通过对多源传感数据的深度融合,实现对目标与环境的全域、高精度感知。然而,这些数据常以文本、图像、音频、视频及专用传感格式等多种模态海量涌现,在数据结构、特征维度、时空分辨率及语义表征上存在显著异构性,构成了信息融合的根本性挑战。如何构建适配异构数据的融合框架,实现来源多样、特性迥异、时空异质数据的有效关联与对齐,是亟须解决的关键难题。此外,在跨行业、跨部门协同场景下,受限于体系架构、运行机制及决策逻辑的固有差异,如何实现决策级的跨域多模态信息协同理解与一致性语义表达,成为多模态融合领域亟待探索的另一关键科学问题。未来,多模态数据融合应以构建原生统一的多模态表征架构为核心,推动数据

融合从感知层向认知推理层延伸,借助大模型、多智能体等技术,实现从多源数据融合到智能决策的全链路赋能。

(2) 轻量化智能决策

雷达探测群在执行目标搜索、跟踪与识别等任务过程中,会持续生成海量高维度传感数据。若将这些数据全部回传至中心节点进行集中式处理与决策,势必会占用巨大的通信带宽,产生难以承受的传输时延,无法满足联合作战对决策响应的实时性要求。将数据处理与决策功能从中心化云端迁移部署至网络边缘的雷达节点,实现数据的就近处理与智能研判,可有效降低系统对通信链路的依赖、缩短决策时延,并提升系统在复杂对抗环境中的生存能力。然而,边缘雷达节点,尤其是搭载于机动平台的雷达传感设备,通常面临计算资源、功耗预算与存储容量的严格约束。因此,如何在资源受限条件下部署高效轻量化智能算法,以保障目标识别、威胁评估与协同决策的实时性,是当前亟须解决的关键问题。

尽管学术界已在边缘计算与模型轻量化方面展开了广泛研究,但针对雷达协同探测这一特定应用场景,其专用平台架构、适配模型算法、标准化性能基准及实实验证数据集仍存在明显缺失。未来研究应聚焦于面向雷达探测任务的轻量化神经网络架构设计、模型量化与剪枝优化、专用边缘计算芯片研发等关键技术,以支撑高动态环境下低时延自主协同决策的实现。

(3) 异构装备鲁棒控制

雷达探测群通常由工作频段、体制类型及机动性能各异的异构雷达节点构成,在拓展系统功能边界的同时,也为协同控制带来了严峻挑战。此外,在任务执行过程中,节点可能因恶意攻击、硬件故障或恶劣环境干扰而失效,通信链路亦面临中断风险。系统需同时应对参数的不确定性、外部动态扰动及节点故障或战损所造成的功能降级问题。因此,构建具备异构鲁棒控制与容错能力的协同机制,确保探测群在复杂动态环境及局部故障条件下仍能稳定执行任务,成为保障系统任务连续性与控制稳定性的核心需求。多智能体系统控制理论为应对上述挑战提供了潜在路径,但在实际应用中仍面临传感器噪声、通信时延及量化误差等非理想因素的限制,尤其在智能干扰与欺骗性攻击等对抗条件下,如何保障系统的控制稳定性与决策可信度,仍是亟待突破的关键难题。

围绕上述问题,应着力突破异构平台分布式鲁棒协同控制理论,构建统一的异构多智能体系统模

型与参数自适应分布式控制协议,发展融合在线故障诊断与动态任务重分配的主动容错控制机制,引入学习与优化相融合的混合控制架构,实现学习策略与传统控制的协同,提升系统在复杂对抗环境下的协同控制性能与生存能力。

(4) 自适应敏捷构群

面向复杂电磁环境与高动态对抗场景,雷达探测群需在高度不确定的作战条件下持续执行任务,节点动态接入、退出甚至失效已成常态。这对系统的敏捷构群能力提出了极高要求,亟须实现组织结构与任务分配的快速自适应调整,且全过程无须人工干预或系统重置。当前,针对雷达探测群自适应构群机制的研究尚不充分,已成为制约其协同效能提升的关键瓶颈。

后续研究应从构群算法、接口标准、网络适配等方面实现突破。在构群算法方面,研究基于任务驱动的雷达节点自主分配机制,通过优化节点空间布局与工作参数配置,实现任务子群的动态生成与性能调优。在接口标准方面,需构建统一的雷达探测群标准化体系,制定通用接口协议、资源能力描述规范及统一标识机制,以实现异构雷达节点的即插即用,确保能够无缝融入现有协同网络。在网络动态适配方面,可融合软件定义网络(Software-Defined Networking, SDN)、功能虚拟化(Network Functions Virtualization, NFV)等技术,实现网络拓扑重构、数据路由优化及资源调度的动态可编程能力,从而适应探测群组织结构的实时变化。此外,还应研究雷达节点可信认证与动态访问控制机制,通过身份动态验证与行为审计,防范恶意节点非法接入与数据篡改风险。

(5) 跨语义通信

为构建全域统一、高精度的战场态势感知图景,雷达网络节点需通过高频探测数据交互、实时节点状态同步与协同指令分发,实现信息的高效共享与精准联动。然而,传统面向比特级可靠传输的通信机制,在带宽受限或强干扰环境下,面临传输延迟甚至关键信息丢失的风险。对于雷达协同探测这类时间敏感型任务,延迟不仅可能导致目标跟踪窗口错失,更可能使关键战术信息失效,进而引发灾难性后果。为实现高效的协同探测,亟须推动通信模式从“数据传输”向“语义传递”的深层次跃迁。

在雷达协同探测领域,语义通信技术仍处于探索阶段,成熟的协议架构与经过实证的应用案例仍较为稀缺。借助深度学习等人工智能前沿技术构建信源-信道联合编码器,可将高维雷达探测数据高效压缩为与任务强相关的紧凑型语义信息,接收端

经译码后可直接支撑任务执行,有望从根本上缓解数据规模与带宽资源之间的矛盾,为构建高效鲁棒的雷达协同探测网络提供新的技术路径。

(6) 引导式平行演进

自主协同演化借助多智能体、群体智能等技术,赋予雷达探测群在动态对抗条件下环境适应与自主协同能力。然而,现有依赖数据驱动与在线学习的智能演化路径具有显著的不可预测性,与军事应用的高可信、可解释性刚性要求存在根本冲突,严重制约了其向实战化应用的落地转化。引导式平行演进技术通过构建与物理系统高保真映射、双向交互并持续演化的平行系统,对装备物理特性、信号处理逻辑、行为交互模型及动态对抗环境进行精确建模,支撑协同规则、决策模型等的大规模、低成本、高效率动态推演与迭代优化。借助知识引导机制,可有效解决传统进化方法的盲目性与低效率问题,为实现高可信、可解释的协同演化提供了可行路径。未来研究应聚焦精准化引导、高效化平行、智能化融合及探测群适配等关键问题,重点突破多源知识融合、自适应协同管理、虚实实时闭环等核心技术,构建跨域融合的多尺度演进机制,最终形成面向多场景大规模应用的高可信安全演进能力,为雷达探测群自主协同的实战化应用提供核心支撑。

5 结语

协同探测是提升雷达探测群整体效能的关键途径,但其常受制于装备体制差异、复杂电磁环境及通信链路抖动等因素,易引发控制指令传输延迟、控制权限分配失效、系统状态反馈中断及回波数据共享阻塞等问题,进而导致任务协同响应滞后、资源调度效率降低、行为同步精度下降,最终制约系统整体作战效能的发挥。自主协同通过节点自组织、自适应与自学习机制实现分布式协作,能够显著增强雷达探测群的探测性能与系统弹性,为构建体系化、高效能的雷达协同作战能力提供关键支撑。

本文系统梳理了雷达探测群自主协同技术的研究现状,深入剖析了其概念内涵与核心挑战,重点阐述了体系架构、协同感知、智能协同决策控制、自主协同演化等关键技术的研究进展。未来,随着人工智能、边缘计算、云计算等技术的深度融合与规模化应用,雷达探测群自主协同将向控制智能化、体系协同化、环境自适应方向持续演进,以应对日趋复杂的战场环境挑战,为联合作战提供更加高效、全面的战场态势感知与情报支援。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参 考 文 献

- [1] 齐崇英, 贺峰, 陈超. 多雷达组网与协同探测关键技术研究[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(6): 42–46. doi: [10.3969/j.issn.1673-3819.2023.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3819.2023.06.007).
QI Chongying, HE Feng, and CHEN Chao. Research on key technology of multi-radar network and cooperative detection[J]. *Command Control & Simulation*, 2023, 45(6): 42–46. doi: [10.3969/j.issn.1673-3819.2023.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3819.2023.06.007).
- [2] 丁建江, 周芬, 吕金建, 等. 雷达组网协同运用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2025: 1–47.
DING Jianjiang, ZHOU Fen, LV Jinjian, *et al.* Synergetic Operation Technology in Radar Netted System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2025: 1–47.
- [3] 丁建江. 敏捷组网对智能管控技术的需求[J]. 现代雷达, 2023, 45(6): 1–7. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.001).
DING Jianjiang. Demand for intelligent management and control technology in agile networking[J]. *Modern Radar*, 2023, 45(6): 1–7. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.001).
- [4] SEMWAL A, SHIKALGAR S, and SOLANKI D R. The use of artificial intelligence in swarm drones[J]. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2023, 11(7): 1052–1057. doi: [10.22214/ijraset.2023.54799](https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.54799).
- [5] 丁建江. 人机决策融合复杂性机理及应用研究[J]. 现代雷达, 2024, 46(9): 1–8. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.001).
DING Jianjiang. A study on the complexity mechanism and application of human-computer decision fusion[J]. *Modern Radar*, 2024, 46(9): 1–8. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.001).
- [6] ZHANG Chudi, LIU Houwei, WANG Yu, *et al.* A cooperative jamming decision-making method via deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, 61(3): 5644–5658. doi: [10.1109/TAES.2024.3516711](https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3516711).
- [7] STRINGER A, DOLINGER G, HOGUE D, *et al.* A metacognitive approach to adaptive radar detection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(1): 168–185. doi: [10.1109/TAES.2023.3274101](https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3274101).
- [8] BELL K L, BAKER C J, SMITH G E, *et al.* Cognitive radar framework for target detection and tracking[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9(8): 1427–1439. doi: [10.1109/JSTSP.2015.2465304](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2015.2465304).
- [9] GORADIA N L K, DHILLON H S, and BUEHRER R M. Multi-target detection for cognitive MIMO radar networks[EB/OL]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.18381>, 2025.
- [10] 王沙飞, 朱梦韬, 李云杰, 等. 对先进多功能雷达系统行为的识别、推理与预测: 综述与展望[J]. 信号处理, 2024, 40(1): 17–55. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2024.01.002](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2024.01.002).
WANG Shafei, ZHU Mengtao, LI Yunjie, *et al.* Recognition, inference and prediction of advanced multi-function radar system behaviors: Overview and prospects[J]. *Journal of Signal Processing*, 2024, 40(1): 17–55. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2024.01.002](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2024.01.002).
- [11] 王文钦, 张顺生. 频控阵雷达技术研究进展综述[J]. 雷达学报, 2022, 11(5): 830–849. doi: [10.12000/JR22141](https://doi.org/10.12000/JR22141).
WANG Wenqin and ZHANG Shunsheng. Recent advances in frequency diverse array radar techniques[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(5): 830–849. doi: [10.12000/JR22141](https://doi.org/10.12000/JR22141).
- [12] TEISBERG T O, BROOME A L, and SCHROEDER D M. Open Radar Code Architecture (ORCA): A platform for software-defined coherent chirped radar systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5109411. doi: [10.1109/TGRS.2024.3446368](https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3446368).
- [13] LIU Guangyi, XI Rongyan, JIANG Tao, *et al.* Feasibility study of cooperative sensing: Radar cross section, synchronization, cooperative cluster, performance and prototype[J]. *Science China Information Sciences*, 2025, 68(5): 150302. doi: [10.1007/s11432-024-4377-0](https://doi.org/10.1007/s11432-024-4377-0).
- [14] 刘兴华, 王国玉, 徐振海, 等. 分布式孔径相参合成原理、发展与技术实现综述[J]. 雷达学报, 2023, 12(6): 1229–1248. doi: [10.12000/JR23195](https://doi.org/10.12000/JR23195).
LIU Xinghua, WANG Guoyu, XU Zhenhai, *et al.* Review of principles, development and technical implementation of coherently combining distributed apertures[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(6): 1229–1248. doi: [10.12000/JR23195](https://doi.org/10.12000/JR23195).
- [15] 易伟, 袁野, 刘光宏, 等. 多雷达协同探测技术研究进展: 认知跟踪与资源调度算法[J]. 雷达学报, 2023, 12(3): 471–499. doi: [10.12000/JR23036](https://doi.org/10.12000/JR23036).
YI Wei, YUAN Ye, LIU Guanghong, *et al.* Recent advances in multi-radar collaborative surveillance: Cognitive tracking and resource scheduling algorithms[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(3): 471–499. doi: [10.12000/JR23036](https://doi.org/10.12000/JR23036).
- [16] HOWARD W W, MARTONE A F, and BUEHRER R M. Timely target tracking: Distributed updating in cognitive radar networks[J]. *IEEE Transactions on Radar Systems*, 2024, 2: 318–332. doi: [10.1109/TRS.2024.3373535](https://doi.org/10.1109/TRS.2024.3373535).
- [17] 崔国龙, 余显祥, 杨婧, 等. 认知雷达波形优化设计方法综述[J]. 雷达学报, 2019, 8(5): 537–557. doi: [10.12000/JR19072](https://doi.org/10.12000/JR19072).
CUI Guolong, YU Xianxiang, YANG Jing, *et al.* An overview of waveform optimization methods for cognitive

- radar[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(5): 537–557. doi: [10.12000/JR19072](https://doi.org/10.12000/JR19072).
- [18] 何子述, 程子扬, 李军, 等. 集中式MIMO雷达研究综述[J]. *雷达学报*, 2022, 11(5): 805–829. doi: [10.12000/JR22128](https://doi.org/10.12000/JR22128).
HE Zishu, CHENG Ziyang, LI Jun, *et al.* A survey of colocated MIMO radar[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(5): 805–829. doi: [10.12000/JR22128](https://doi.org/10.12000/JR22128).
- [19] 齐铖, 谢军伟, 张浩为, 等. 基于防空目标探测与跟踪的雷达资源管理技术研究综述[J]. *信号处理*, 2024, 40(11): 1972–1989. doi: [10.12466/xhcl.2024.11.004](https://doi.org/10.12466/xhcl.2024.11.004).
QI Cheng, XIE Junwei, ZHANG Haowei, *et al.* Review of radar resource management technology for air defense target detection and tracking[J]. *Journal of Signal Processing*, 2024, 40(11): 1972–1989. doi: [10.12466/xhcl.2024.11.004](https://doi.org/10.12466/xhcl.2024.11.004).
- [20] JAVADI S H and FARINA A. Radar networks: A review of features and challenges[J]. *Information Fusion*, 2020, 61: 48–55. doi: [10.1016/j.inffus.2020.03.005](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.03.005).
- [21] HADY M A, HU Siyi, PRATAMA M, *et al.* Multi-agent reinforcement learning for resources allocation optimization: A survey[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2025, 58(11): 354. doi: [10.1007/s10462-025-11340-5](https://doi.org/10.1007/s10462-025-11340-5).
- [22] JING Xinchun, SU Hongtao, LI Ze, *et al.* Weak moving target detection in distributed MIMO radar with hybrid data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(6): 9291–9306. doi: [10.1109/TAES.2024.3442777](https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3442777).
- [23] NAGHSHVARIANJAHROMI M, KUMAR S, and DEEN M J. Natural intelligence as the brain of intelligent systems[J]. *Sensors*, 2023, 23(5): 2859. doi: [10.3390/s23052859](https://doi.org/10.3390/s23052859).
- [24] MILEMBOLO MIANTEZILA J, GUO Bin, WU Jinshuang, *et al.* Multistatic passive radar for drone detection based random finite state[J]. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 2024, 12(1): 22–47. doi: [10.24003/emitter.v12i1.825](https://doi.org/10.24003/emitter.v12i1.825).
- [25] WU Yuwen. Fusion-based modeling of an intelligent algorithm for enhanced object detection using a deep learning approach on radar and camera data[J]. *Information Fusion*, 2025, 113: 102647. doi: [10.1016/j.inffus.2024.102647](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102647).
- [26] PHILLIPS C V, HEBB A N, and ADVE R S. MARL to choose actions on-the-fly in a cognitive radar system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, 61(5): 12613–12627. doi: [10.1109/TAES.2025.3575738](https://doi.org/10.1109/TAES.2025.3575738).
- [27] FENG Cheng, FU Xiongjun, WANG Ziyi, *et al.* An optimization method for collaborative radar antijamming based on multi-agent reinforcement learning[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(11): 2893. doi: [10.3390/rs15112893](https://doi.org/10.3390/rs15112893).
- [28] LARRENIE P, BURON C L R, and BARBARESCO F. Tracking multiple targets with multiple radars using distributed auctions[C]. 2023 24th International Radar Symposium (IRS), Berlin, Germany, 2023: 1–10. doi: [10.23919/IRS57608.2023.10172431](https://doi.org/10.23919/IRS57608.2023.10172431).
- [29] ZHANG Huan, DING Jinliang, FENG Liang, *et al.* Solving expensive optimization problems in dynamic environments with meta-learning[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2024, 54(12): 7430–7442. doi: [10.1109/TCYB.2024.3443396](https://doi.org/10.1109/TCYB.2024.3443396).
- [30] WANG Yimeng, ZHAO Jiaying, XIE Hongbin, *et al.* MetaGen: Self-evolving roles and topologies for multi-agent LLM reasoning[EB/OL]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.19290>, 2026.
- [31] YIZENGAW E. The impact and sources of radio frequency interference on GNSS signals[J]. *Radio Science*, 2024, 59(12): e2024RS008109. doi: [10.1029/2024RS008109](https://doi.org/10.1029/2024RS008109).
- [32] ZHANG Yue, HE Fen, ZHANG Honglei, *et al.* TDOA and FDOA hybrid positioning of mobile radiation source with receiver position errors[J]. *Wireless Personal Communications*, 2024, 137(1): 199–220. doi: [10.1007/s11277-024-11387-7](https://doi.org/10.1007/s11277-024-11387-7).
- [33] YANG Nan, YANG Li, DU Xingzhou, *et al.* Blockchain based trusted execution environment architecture analysis for multi-source data fusion scenario[J]. *Journal of Cloud Computing*, 2023, 12(1): 122. doi: [10.1186/s13677-023-00494-8](https://doi.org/10.1186/s13677-023-00494-8).
- [34] 林锋, 卜石哲, 张广磊. 多机协同探测偏差校准与融合方法[J]. *电光与控制*, 2025, 32(11): 78–83. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2025.11.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2025.11.012).
LIN Feng, BU Shizhe, and ZHANG Guanglei. Bias calibration and data fusion for multi-agent collaboration detection systems[J]. *Electronics Optics & Control*, 2025, 32(11): 78–83. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2025.11.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2025.11.012).
- [35] DA Kai, LI Tiancheng, ZHU Yongfeng, *et al.* Recent advances in multisensor multitarget tracking using random finite set[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(1): 5–24. doi: [10.1631/FITEE.2000266](https://doi.org/10.1631/FITEE.2000266).
- [36] LI Songtao and TANG Hao. Multimodal alignment and fusion: A survey[EB/OL]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.17040>, 2024.
- [37] 袁野, 杨剑, 刘辛雨, 等. 基于任务效用最大化的多雷达协同任务规划算法[J]. *雷达学报*, 2023, 12(3): 550–562. doi: [10.12000/JR23013](https://doi.org/10.12000/JR23013).
YUAN Ye, YANG Jian, LIU Xinyu, *et al.* Multiradar collaborative task planning based on task utility maximization[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(3): 550–562. doi: [10.12000/JR23013](https://doi.org/10.12000/JR23013).
- [38] 李浩情, 余点, 潘常春, 等. 基于模型知识融合的图神经网络多雷达协同任务调度算法[J]. *雷达学报(中英文)*, 2025,

- 14(2): 470–485. doi: [10.12000/JR24222](https://doi.org/10.12000/JR24222).
- LI Haoqing, YU Dian, PAN Changchun, *et al.* Multiradar collaborative task scheduling algorithm based on graph neural networks with model knowledge embedding[J]. *Journal of Radars*, 2025, 14(2): 470–485. doi: [10.12000/JR24222](https://doi.org/10.12000/JR24222).
- [39] WAN Fuhai, XU Jingwei, and ZHANG Zhenrong. Robust beamforming based on covariance matrix reconstruction in FDA-MIMO radar to suppress deceptive jamming[J]. *Sensors*, 2022, 22(4): 1479. doi: [10.3390/s22041479](https://doi.org/10.3390/s22041479).
- [40] SON J, KANG H, and KANG S H. A review on robust control of robot manipulators for future manufacturing[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2023, 24(6): 1083–1102. doi: [10.1007/s12541-023-00812-9](https://doi.org/10.1007/s12541-023-00812-9).
- [41] 台建玮, 杨双宁, 王佳佳, 等. 大语言模型对抗性攻击与防御综述[J]. 计算机研究与发展, 2025, 62(3): 563–588. doi: [10.7544/issn1000-1239.202440630](https://doi.org/10.7544/issn1000-1239.202440630).
- TAI Jianwei, YANG Shuangning, WANG Jiajia, *et al.* Survey of adversarial attacks and defenses for large language models[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2025, 62(3): 563–588. doi: [10.7544/issn1000-1239.202440630](https://doi.org/10.7544/issn1000-1239.202440630).
- [42] HASHMI U S, AKBAR S, ADVE R, *et al.* Artificial intelligence meets radar resource management: A comprehensive background and literature review[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2023, 17(2): 153–178. doi: [10.1049/rsn2.12337](https://doi.org/10.1049/rsn2.12337).
- [43] LU Ziyang, GURSOY M C, MOHAN C K, *et al.* Explainable AI for radar resource management: Modified LIME in deep reinforcement learning[C]. 2025 IEEE International Conference on Machine Learning for Communication and Networking (ICMLCN), Barcelona, Spain, 2025: 1–6. doi: [10.1109/ICMLCN64995.2025.11140538](https://doi.org/10.1109/ICMLCN64995.2025.11140538).
- [44] HAN Qinghua, PAN Minghai, LONG Weijun, *et al.* Joint adaptive sampling interval and power allocation for maneuvering target tracking in a multiple opportunistic array radar system[J]. *Sensors*, 2020, 20(4): 981. doi: [10.3390/s20040981](https://doi.org/10.3390/s20040981).
- [45] 胡明春. 开放式相控阵概念与系统架构[J]. 雷达学报, 2023, 12(4): 684–695. doi: [10.12000/JR23103](https://doi.org/10.12000/JR23103).
- HU Mingchun. Concept and system architecture of open phased array[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(4): 684–695. doi: [10.12000/JR23103](https://doi.org/10.12000/JR23103).
- [46] YAO Shanliang, GUAN Runwei, PENG Zitian, *et al.* Exploring radar data representations in autonomous driving: A comprehensive review[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, 26(6): 7401–7425. doi: [10.1109/TITS.2025.3554781](https://doi.org/10.1109/TITS.2025.3554781).
- [47] SAMMARTINO P F. A comparison of processing approaches for distributed radar sensing[D]. [Ph.D. dissertation], University College London, 2009.
- [48] LAI Yangming, YI Wei, WYMEERSCH H, *et al.* Joint detection and localization of multiple moving targets in a distributed radar system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(17): 27914–27925. doi: [10.1109/JSEN.2024.3432636](https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3432636).
- [49] 薛琛衍. 数字阵列雷达资源管理研究[D]. [博士学位论文], 南京航空航天大学, 2023.
- XUE Chenyan. Research on resource management of digital array radar[D]. [Ph.D. dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [50] 王楚涵, 李小龙, 望明星, 等. 一种机载分布式MIMO雷达节点位置与路径分步优化管控方法[J]. 信号处理, 2024, 40(7): 1249–1265. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2024.07.007](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2024.07.007).
- WANG Chuhan, LI Xiaolong, WANG Mingxing, *et al.* A stepwise optimization and control method for the node location and path of airborne distributed MIMO radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2024, 40(7): 1249–1265. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2024.07.007](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2024.07.007).
- [51] 周琳. 雷达组网协同探测系统技术架构设计[J]. 现代雷达, 2020, 42(12): 19–23, 39. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.004](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.004).
- ZHOU Lin. Technical architecture design of radar network cooperative detection system[J]. *Modern Radar*, 2020, 42(12): 19–23, 39. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.004](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.004).
- [52] 张同宣, 郁成阳. 雷达组网协同探测系统工程设计与实现[J]. 现代雷达, 2024, 46(9): 49–55. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.007](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.007).
- ZHANG Tongxuan and YU Chengyang. Engineering design and implementation of radar network cooperative detection system[J]. *Modern Radar*, 2024, 46(9): 49–55. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.007](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.007).
- [53] 向龙, 丁建江, 周芬, 等. 协同探测群柔性架构分析与设计[J]. 现代雷达, 2022, 44(4): 1–5. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2022.04.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2022.04.001).
- XIANG Long, DING Jianjiang, ZHOU Fen, *et al.* Analysis and design for the flexible architecture of synergy-netted detection cluster[J]. *Modern Radar*, 2022, 44(4): 1–5. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2022.04.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2022.04.001).
- [54] 蔡兴雨, 王亚军, 王旭, 等. 一种基于云边端架构的雷达组网协同系统设计方案[J]. 现代雷达, 2024, 46(9): 37–48. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.006](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.006).
- CAI Xingyu, WANG Yajun, WANG Xu, *et al.* A design scheme for collaborative system of netted radar based on cloud-edge-end architecture[J]. *Modern Radar*, 2024, 46(9): 37–48. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.006](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.006).
- [55] HOWARD W W, SHEBERT S R, KIRK B H, *et al.* Mode selection and target classification in cognitive radar

- networks[EB/OL]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.17006>, 2023.
- [56] WU Qin hao, WANG Hong qiang, ZHANG Bo, *et al.* Wireless networked cognitive radar system: Overview and design guidelines[J]. *China Communications*, 2024, 21(12): 1–27. doi: [10.23919/JCC.f.2022-0295.202412](https://doi.org/10.23919/JCC.f.2022-0295.202412).
- [57] 李博骁, 包钊源, 陆泽健, 等. 面向空天预警的多源异构装备一体化协同探测技术研究[J]. *现代雷达*, 2023, 45(6): 51–56. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.007](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.007).
- LI Boxiao, BAO Zhaoyuan, LU Zejian, *et al.* A study on integrated cooperative detection technology of multi-source heterogeneous equipment for air-space early warning[J]. *Modern Radar*, 2023, 45(6): 51–56. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.007](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.007).
- [58] LIU Pengfei, SHAN Zhao, WANG Lei, *et al.* An anti-jamming beam and power allocation strategy for multistatic radar system via multi-agent deep reinforcement learning[C]. 2024 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP), Zhuhai, China, 2024: 1–6. doi: [10.1109/ICSIDP62679.2024.10868073](https://doi.org/10.1109/ICSIDP62679.2024.10868073).
- [59] XIONG Kui, ZHANG Tianxian, CUI Guolong, *et al.* Coalition game of radar network for multitarget tracking via model-based multiagent reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(3): 2123–2140. doi: [10.1109/TAES.2022.3208865](https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3208865).
- [60] 叶成基, 谢坚, 张兆林, 等. 基于联邦学习的多站雷达信号智能分选算法[J]. *电子与信息学报*, 待出版. doi: [10.11999/JEIT251355](https://doi.org/10.11999/JEIT251355).
- YE Chengji, XIE Jian, ZHANG Zhaolin, *et al.* Intelligent sorting algorithm for multi-station radar signals based on federated learning[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, in press. doi: [10.11999/JEIT251355](https://doi.org/10.11999/JEIT251355).
- [61] 蒋李兵, 杨庆伟, 郑舒予, 等. 基于拍卖理论的组网雷达多轨道目标ISAR成像资源分配算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2025, 47(1): 81–93. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2025.01.09](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2025.01.09).
- JIANG Libing, YANG Qingwei, ZHENG Shuyu, *et al.* Multi-orbit targets ISAR imaging resource allocation algorithm for netted radar based on auction theory[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2025, 47(1): 81–93. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2025.01.09](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2025.01.09).
- [62] LUO Jihao, FEI Zesong, WANG Xinyi, *et al.* GNN-based resource allocation for digital twin-enhanced multi-UAV radar networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(11): 3137–3141. doi: [10.1109/LWC.2024.3456247](https://doi.org/10.1109/LWC.2024.3456247).
- [63] 伍光新, 李归. 综合射频一体化系统技术发展综述[J]. *现代雷达*, 2023, 45(5): 1–14. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.001).
- WU Guangxin and LI Gui. Overview of technological development of integrated RF system[J]. *Modern Radar*, 2023, 45(5): 1–14. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.001).
- [64] ABDU F J, ZHANG Yixiong, FU Maozhong, *et al.* Application of deep learning on millimeter-wave radar signals: A review[J]. *Sensors*, 2021, 21(6): 1951. doi: [10.3390/s21061951](https://doi.org/10.3390/s21061951).
- [65] LI Xinde, DUNKIN F, and DEZERT J. Multi-source information fusion: Progress and future[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(7): 24–58. doi: [10.1016/j.cja.2023.12.009](https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.12.009).
- [66] 曾雅俊, 王俊, 魏少明, 等. 分布式多传感器多目标跟踪方法综述[J]. *雷达学报*, 2023, 12(1): 197–213. doi: [10.12000/JR22111](https://doi.org/10.12000/JR22111).
- ZENG Yajun, WANG Jun, WEI Shaoming, *et al.* Review of the method for distributed multi-sensor multi-target tracking[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(1): 197–213. doi: [10.12000/JR22111](https://doi.org/10.12000/JR22111).
- [67] CONG Xiaoyu, HAN Yubing, SHENG Weixing, *et al.* Spatio-temporal alignment and trajectory matching for netted radar without prior spatial information and time delay[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 126965–126976. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3008437](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3008437).
- [68] PAN Jianghuai. Modified maximum likelihood space registration method for shipborne multi-radar signal processing[J]. *Journal of Engineering Research*, 2025, 13(1): 185–197. doi: [10.1016/j.jer.2023.09.035](https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.09.035).
- [69] 袁博洋, 王峰. 一种多站雷达协同时空误差配准方法研究[J]. *现代雷达*, 2024, 46(6): 92–96. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.06.015](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.06.015).
- YUAN Boyang and WANG Feng. A study on spatiotemporal error alignment data processing method of multi-station radar collaboration[J]. *Modern Radar*, 2024, 46(6): 92–96. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.06.015](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.06.015).
- [70] 董云龙, 张焱. 雷达系统偏差精确配准技术研究综述[J]. *现代雷达*, 2024, 46(3): 1–8. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.03.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.03.001).
- DONG Yunlong and ZHANG Yan. A review of radar system deviation accurate registration technology[J]. *Modern Radar*, 2024, 46(3): 1–8. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.03.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.03.001).
- [71] KENNEY R H, METCALF J G, and MCDANIEL J W. Digital synchronization of distributed radar networks using the unscented Kalman filter[C]. 2025 IEEE Radar Conference, Kraków, Poland, 2025: 703–708. doi: [10.1109/RADARCONF2559087.2025.1120506](https://doi.org/10.1109/RADARCONF2559087.2025.1120506).
- [72] CHAI Lei, YI Wei, LI Wujun, *et al.* Distributed multi-object tracking and registration with LMB filter in multistatic radar systems[C]. 2020 IEEE Radar Conference, Florence, Italy, 2020: 1–6. doi: [10.1109/RadarConf](https://doi.org/10.1109/RadarConf)

- 2043947.2020.9266480.
- [73] MACDONALD S, PROUDLER I, DAVIES M E, *et al.* Performance evaluation of simultaneous sensor registration and object tracking algorithm[C]. 2022 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Bedford, United Kingdom, 2022: 1–6. doi: [10.1109/MFI55806.2022.9913857](https://doi.org/10.1109/MFI55806.2022.9913857).
- [74] YAO Junwen, MUELLER J, and WANG J L. Deep learning for functional data analysis with adaptive basis layers[C]. The 38th International Conference on Machine Learning, Online, 2021: 11898–11908.
- [75] RODRIGUES R T, TSIOGKAS N, PASCOAL A, *et al.* Online range-based SLAM using B-spline surfaces[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 1958–1965. doi: [10.1109/LRA.2021.3060672](https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3060672).
- [76] CONG Xiaoyu, HAN Yubing, GUO Shan hong, *et al.* Spatio-temporal alignment for networked radars on moving platforms based on discrete cosine transform[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(5): 6608–6621. doi: [10.1109/TAES.2024.3408801](https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3408801).
- [77] MENG Han, PENG Yuexing, XIANG Wei, *et al.* Semantic feature-enhanced graph attention network for radar target recognition in heterogeneous radar network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(7): 6369–6377. doi: [10.1109/JSEN.2023.3250708](https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3250708).
- [78] CHOLAKKAL H H, ARRIGONI S, and BRAGHIN F. RLCNet: An end-to-end deep learning framework for simultaneous online calibration of LiDAR, RADAR, and Camera[EB/OL]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.08262>, 2025.
- [79] LUO Meng, HUANG Baotao, and XING Wenge. Detection performance of distributed coherent aperture radar[C]. 2023 24th International Radar Symposium (IRS), Berlin, Germany, 2023: 1–10. doi: [10.23919/IRS57608.2023.10172464](https://doi.org/10.23919/IRS57608.2023.10172464).
- [80] WANG Yuanhao, YANG Qi, and WANG Hongqiang. Moving target detection using a moving platform-based distributed coherent aperture radar system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 8502017. doi: [10.1109/TIM.2025.3529054](https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3529054).
- [81] KORDIK A M, METCALF J G, CURTIS D D, *et al.* Graceful performance degradation and improved error tolerance via mixed-mode distributed coherent radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(5): 5251–5262. doi: [10.1109/JSEN.2023.3236487](https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3236487).
- [82] 王元昊, 王宏强, 刘兴华, 等. 分布式相参雷达相参效率及相参景深研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2024, 46(5): 1573–1582. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2024.05.12](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2024.05.12).
- WANG Yuanhao, WANG Hongqiang, LIU Xinghua, *et al.* Research on coherent synthesis efficiency and coherent depth of field of distributed coherent aperture radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2024, 46(5): 1573–1582. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2024.05.12](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2024.05.12).
- [83] ZHOU Dingsen, YANG Minglei, LIAN Hao, *et al.* Moving target detection with SNR diversity for distributed coherent aperture radar on moving platforms[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(4): 6346–6359. doi: [10.1109/TVT.2024.3505615](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3505615).
- [84] LIU Xiaochuan, ZHOU Dongming, GAO Hongwei, *et al.* A receive-coherent detector for airborne distributed coherent aperture radar under heterogeneous clutter and random phase errors[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2025, 2025(1): 16. doi: [10.1186/s13634-025-01217-8](https://doi.org/10.1186/s13634-025-01217-8).
- [85] ZHANG Yuxuan, WU Jianxin, ZHANG Lei. Joint multierror calibration by merging errors in distributed coherent aperture radar using strong scatter echoes[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(1): 1148–1158. doi: [10.1109/TAES.2023.3335186](https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3335186).
- [86] WANG Xueqian. Study on Signal Detection and Recovery Methods with Joint Sparsity[M]. Singapore: Springer, 2023: 1–12. doi: [10.1007/978-981-99-4117-9](https://doi.org/10.1007/978-981-99-4117-9).
- [87] DOU Fabing, ZHANG Man, ZHOU Shenghua, *et al.* Distributed radar target detection with Doppler channel maximum quantization[C]. 2024 International Radar Conference, Rennes, France, 2024: 1–6. doi: [10.1109/RADAR58436.2024.10993953](https://doi.org/10.1109/RADAR58436.2024.10993953).
- [88] 全英汇, 吴耀君, 段丽宁, 等. 基于稀疏恢复的雷达信号处理研究综述[J]. *雷达学报(中英文)*, 2024, 13(1): 46–67. doi: [10.12000/JR23211](https://doi.org/10.12000/JR23211).
- QUAN Yinghui, WU Yaojun, DUAN Lining, *et al.* A review of radar signal processing based on sparse recovery[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(1): 46–67. doi: [10.12000/JR23211](https://doi.org/10.12000/JR23211).
- [89] LIU Rang, LI Ming, and LIU Qian. Joint space-time adaptive processing and beamforming design for cell-free ISAC systems[C]. 2025 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Hyderabad, India, 2025: 1–5. doi: [10.1109/ICASSP49660.2025.10887688](https://doi.org/10.1109/ICASSP49660.2025.10887688).
- [90] ESMAELBEIG Z, MISHRA K V, and SOLTANALIAN M. Space-time adaptive processing for radars in connected and automated vehicular platoons[C]. 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Seoul, Korea, 2024: 13056–13060. doi: [10.1109/ICASSP48485.2024.10448351](https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024.10448351).
- [91] GAO Yongchan, JING Pucheng, LIAO Guisheng, *et al.* A robust beamforming for MIMO radar against virtual array steering vector mismatch[J]. *Electronics Letters*, 2023, 59(9): e12800. doi: [10.1049/ell2.12800](https://doi.org/10.1049/ell2.12800).

- [92] HOU Yudian and WANG Wenqin. Robust adaptive beamforming with interference-plus-noise covariance matrix reconstruction for FDA-MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2025, 232: 109929. doi: [10.1016/j.sigpro.2025.109929](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2025.109929).
- [93] CHENG Gaoyuan and XU Jie. Coordinated transmit beamforming for multi-antenna network integrated sensing and communication[C]. 2023 IEEE International Conference on Communications, Rome, Italy, 2023: 3528–3533. doi: [10.1109/ICC45041.2023.10279088](https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10279088).
- [94] 聂千祁, 沙明辉, 朱应申, 等. 基于盲源分离结合奇异谱分析的雷达多分量信号识别方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2025, 47(4): 1168–1175. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2025.04.13](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2025.04.13). NIE Qianqi, SHA Minghui, ZHU Yingshen, *et al.* Radar multi-component signal recognition method based on blind source separation combined with singular spectrum analysis[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2025, 47(4): 1168–1175. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2025.04.13](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2025.04.13).
- [95] WANG Dahu, LIU Chang, and WANG Chao. An advanced scheme for radar clutter suppression scheme based on blind source separation[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(9): 1544. doi: [10.3390/rs16091544](https://doi.org/10.3390/rs16091544).
- [96] LI Jimin, WU Panlong, LI Xingxiu, *et al.* Hybrid-driven multiple target tracking using pulse description word from targets' radar sensors[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 8509717. doi: [10.1109/TIM.2025.3569903](https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3569903).
- [97] LIANG Shuang, ZHU Yun, GONG Maoguo, *et al.* Cauchy-Schwarz divergence-based set joint probabilistic data association filter for tracking multiple objects in cluttered environment[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5100915. doi: [10.1109/TGRS.2023.3343115](https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3343115).
- [98] CHEN Qiang, WANG Pingbo, and WEI Hongkai. An algorithm for multi-target tracking in low-signal-to-clutter-ratio underwater acoustic scenes[J]. *AIP Advances*, 2024, 14(10): 105121. doi: [10.1063/5.0221725](https://doi.org/10.1063/5.0221725).
- [99] XU Hong, LIU Xinrui, HUANG Libin, *et al.* Multiscan multitarget tracking based on a hybrid message-passing method[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(11): 18185–18195. doi: [10.1109/JSEN.2024.3392485](https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3392485).
- [100] WANG Chun, YANG Yuhao, and ZHANG Qiang. Data association for multiple radar targets using graph neural network[C]. 2023 5th International Conference on Electronic Engineering and Informatics, Wuhan, China, 2023: 562–565. doi: [10.1109/EEI59236.2023.10212706](https://doi.org/10.1109/EEI59236.2023.10212706).
- [101] 代睿, 李洁, 何立火, 等. 基于轻量化BiLSTM的多源雷达多目标跟踪点航数据互联算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2026, 52(4): 1139–1147. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0013](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0013).
- DAI Rui, LI Jie, HE Lihuo, *et al.* Light-weight BiLSTM-based data association between echoes and tracks for multi-radar multi-target tracking[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2026, 52(4): 1139–1147. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0013](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0013).
- [102] TIAN Feng, GUO Xinzhaohao, and FU Weibo. Target tracking algorithm based on adaptive strong tracking extended Kalman filter[J]. *Electronics*, 2024, 13(3): 652. doi: [10.3390/electronics13030652](https://doi.org/10.3390/electronics13030652).
- [103] ZHANG Jiaju, ZUO Zhen, BEI Sun, *et al.* UKF-EC: Combining the Unscented Kalman Filter and the Maximum Weight Algorithms for Moving Target Tracking in Marine Radar Images[M]. FU Wenxing, GU Mancang, and NIU Yifeng. Proceedings of 2022 International Conference on Autonomous Unmanned Systems (ICAUS 2022). Singapore: Springer, 2023: 1830–1844. doi: [10.1007/978-981-99-0479-2_170](https://doi.org/10.1007/978-981-99-0479-2_170).
- [104] SINGH H, CHATTOPADHYAY A, and MISHRA K V. Inverse particle filter[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2025, 73: 1922–1938. doi: [10.1109/TSP.2025.3556702](https://doi.org/10.1109/TSP.2025.3556702).
- [105] PALE RAMON E G, IBARRA-MANZANO O G, ANDRADE-LUCIO J A, *et al.* H_∞ filtering of uncertain predictive models: Gain computation using LMI and performance evaluation[J]. *Results in Control and Optimization*, 2025, 19: 100581. doi: [10.1016/j.rico.2025.100581](https://doi.org/10.1016/j.rico.2025.100581).
- [106] BORDONARO S V, LUGINBUHL T E, and WALSH M J. A generalized converted measurement Kalman filter[EB/OL]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.08375>, 2025.
- [107] 程婷, 曹聪冲, 何子述. 基于二阶泰勒展开的量测转换滤波算法[J]. *信号处理*, 2024, 40(11): 2018–2029. doi: [10.12466/xhcl.2024.11.007](https://doi.org/10.12466/xhcl.2024.11.007). CHENG Ting, CAO Congchong, and HE Zishu. Converted measurement filter algorithm based on second-order Taylor expansion[J]. *Journal of Signal Processing*, 2024, 40(11): 2018–2029. doi: [10.12466/xhcl.2024.11.007](https://doi.org/10.12466/xhcl.2024.11.007).
- [108] WANG Xiaoqian, FENG Hui, XU Haixiang, *et al.* An adaptive radar surface vessel tracking method with interacting multiple model and gated memory[J]. *Measurement*, 2025, 255: 117798. doi: [10.1016/j.measurement.2025.117798](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117798).
- [109] DONG Xudong, ZHAO Jun, SUN Meng, *et al.* A modified δ -generalized labeled multi-bernoulli filtering for multi-source DOA tracking with coprime array[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(12): 9424–9437. doi: [10.1109/TWC.2023.3270622](https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3270622).
- [110] 王楠, 刘增文, 鲍中凯. 基于动态加权的雷达数据融合算法[J]. *现代雷达*, 2023, 45(7): 56–59. doi:

- 7859.2023.07.010.
WANG Nan, LIU Zengwen, and BAO Zhongkai. Radar fusion algorithm based on dynamic weighting[J]. *Modern Radar*, 2023, 45(7): 56–59. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.07.010](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.07.010).
- [111] CHEN Ye, CUI Qirui, and WANG Shungeng. Fusion ranging method of monocular camera and millimeter-wave radar based on improved extended Kalman filtering[J]. *Sensors*, 2025, 25(10): 3045. doi: [10.3390/s25103045](https://doi.org/10.3390/s25103045).
- [112] QIAO Shuanghu, SONG Baojian, FAN Yunsheng, et al. A fuzzy Dempster-Shafer evidence theory method with belief divergence for unmanned surface vehicle multi-sensor data fusion[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(8): 1596. doi: [10.3390/jmse11081596](https://doi.org/10.3390/jmse11081596).
- [113] QI Jiadi, LU Xiaoke, and SUN Jinping. Multi-radar track fusion method based on parallel track fusion model[J]. *Electronics*, 2025, 14(17): 3461. doi: [10.3390/electronics14173461](https://doi.org/10.3390/electronics14173461).
- [114] 孙景荣, 刘思奇, 张华, 等. 一种基于模糊理论的雷达与视频融合交通目标跟踪方法[J]. *电讯技术*, 2023, 63(10): 1567–1573. doi: [10.20079/j.issn.1001-893x.221107006](https://doi.org/10.20079/j.issn.1001-893x.221107006).
SUN Jingrong, LIU Siqi, ZHANG Hua, et al. A radar and video fusion traffic target tracking method based on fuzzy theory[J]. *Telecommunication Engineering*, 2023, 63(10): 1567–1573. doi: [10.20079/j.issn.1001-893x.221107006](https://doi.org/10.20079/j.issn.1001-893x.221107006).
- [115] YI Wei and CHAI Lei. Heterogeneous multi-sensor fusion with random finite set multi-object densities[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 3399–3414. doi: [10.1109/TSP.2021.3087033](https://doi.org/10.1109/TSP.2021.3087033).
- [116] LI Na, ZOU Lei, and WANG Chenxi. Multi-sensor fusion estimation subject to random sensor failures under binary encoding scheme: A federated-filtering-based method[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2898(1): 012029. doi: [10.1088/1742-6596/2898/1/012029](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2898/1/012029).
- [117] 王志坚. 异类传感器协同探测跟踪技术研究[J]. *现代雷达*, 2023, 45(4): 55–59. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.04.008](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.04.008).
WANG Zhijian. A study on heterogeneous sensors cooperative detection and tracking technology[J]. *Modern Radar*, 2023, 45(4): 55–59. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.04.008](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.04.008).
- [118] PIETKIEWICZ T. Fusion of identification information from ESM sensors and radars using Dezert-Smarandache theory rules[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(16): 3977. doi: [10.3390/rs15163977](https://doi.org/10.3390/rs15163977).
- [119] DAI Shenghong, JIANG Shiqi, YANG Yifan, et al. Babel: A scalable pre-trained model for multi-modal sensing via expandable modality alignment[C]. The 23rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Irvine, USA, 2025: 240–253. doi: [10.1145/3715014.3722068](https://doi.org/10.1145/3715014.3722068).
- [120] 汪翔, 汪育苗, 陈星宇, 等. 基于深度学习的多特征融合海面目标检测方法[J]. *雷达学报(中英文)*, 2024, 13(3): 554–564. doi: [10.12000/JR23105](https://doi.org/10.12000/JR23105).
WANG Xiang, WANG Yumiao, CHEN Xingyu, et al. Deep learning-based marine target detection method with multiple feature fusion[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(3): 554–564. doi: [10.12000/JR23105](https://doi.org/10.12000/JR23105).
- [121] 莫慧凌, 郑海峰, 高敏, 等. 基于联邦学习的多源异构数据融合算法[J]. *计算机研究与发展*, 2022, 59(2): 478–487. doi: [10.7544/issn1000-1239.20200668](https://doi.org/10.7544/issn1000-1239.20200668).
MO Huiling, ZHENG Haifeng, GAO Min, et al. Multi-Source heterogeneous data fusion based on federated learning[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2022, 59(2): 478–487. doi: [10.7544/issn1000-1239.20200668](https://doi.org/10.7544/issn1000-1239.20200668).
- [122] 王兴隆, 尹昊, 丁俊峰. 基于Trans-Attention的飞行区航空器监视数据融合方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2025, 51(4): 1215–1223. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0234](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0234).
WANG Xinglong, YIN Hao, and DING Junfeng. Aircraft surveillance data fusion method in flight area based on Trans-Attention[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2025, 51(4): 1215–1223. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0234](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0234).
- [123] QI Zhangshuo, CHENG Luqi, ZHOU Zijie, et al. LRFusionPR: A polar BEV-based LiDAR-radar fusion network for place recognition[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2025, 10(11): 11784–11791. doi: [10.1109/LRA.2025.3614062](https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3614062).
- [124] ZHANG Xiucui, HE Lei, CHEN Junyi, et al. Multiattention mechanism 3D object detection algorithm based on RGB and LiDAR fusion for intelligent driving[J]. *Sensors*, 2023, 23(21): 8732. doi: [10.3390/s23218732](https://doi.org/10.3390/s23218732).
- [125] MIAO Zehua, LI Yinbei, WU Zizhuo, et al. A multi-level multi-attention mechanism millimeter-wave radar and camera fusion method for 3D object detection[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2025, 19(6): 490. doi: [10.1007/s11760-025-03976-1](https://doi.org/10.1007/s11760-025-03976-1).
- [126] DAI Song, SONG Dongmei, WANG Bin, et al. CCEnd-Net: Cross-modal cascaded encoder-decoder network for multisource data fusion classification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 5625323. doi: [10.1109/TGRS.2025.3572805](https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3572805).
- [127] 王增福, 邵毅, 祁登亮, 等. 一种基于一致性的分布式天基雷达组网空中目标高度估计与定位方法[J]. *雷达学报*, 2023, 12(6): 1249–1262. doi: [10.12000/JR23157](https://doi.org/10.12000/JR23157).
WANG Zengfu, SHAO Yi, QI Dengliang, et al. Consistency-based air target height estimation and location in distributed space-based radar network[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(6): 1249–1262. doi: [10.12000/JR23157](https://doi.org/10.12000/JR23157).
- [128] 陈小龙, 何肖阳, 邓振华, 等. 雷达微弱目标智能化处理技术

- 与应用[J]. 雷达学报(中英文), 2024, 13(3): 501–524. doi: [10.12000/JR23160](https://doi.org/10.12000/JR23160).
- CHEN Xiaolong, HE Xiaoyang, DENG Zhenhua, *et al.* Radar intelligent processing technology and application for weak target[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(3): 501–524. doi: [10.12000/JR23160](https://doi.org/10.12000/JR23160).
- [129] HAN Ruiqing, ZHANG Tianxian, HU Baozhu, *et al.* Distributed auction-based adaptive task assignment and re-assignment for multi-UAV suppressive jamming[J/OL]. *Defence Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.11.012>, 2025.
- [130] ZHU Peikun, LIANG Jing, LUO Zihan, *et al.* Cognitive radar target tracking using intelligent waveforms based on reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5107315. doi: [10.1109/TGRS.2023.3298355](https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3298355).
- [131] GURBUZ S Z, GRIFFITHS H D, CHARLISH A, *et al.* An overview of cognitive radar: Past, present, and future[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2019, 34(12): 6–18. doi: [10.1109/MAES.2019.2953762](https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2953762).
- [132] YAN Junkun, JIAO Hao, PU Wenqiang, *et al.* Radar sensor network resource allocation for fused target tracking: A brief review[J]. *Information Fusion*, 2022, 86/87: 104–115. doi: [10.1016/j.inffus.2022.06.009](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.06.009).
- [133] REGGIANI L and SPALVIERI A. Energy optimization for time-of-arrival based tracking[EB/OL]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.19166>, 2025.
- [134] YAN Junkun, DAI Jinhui, PU Wenqiang, *et al.* Target capacity based resource optimization for multiple target tracking in radar network[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 2410–2421. doi: [10.1109/TSP.2021.3071173](https://doi.org/10.1109/TSP.2021.3071173).
- [135] LUO Meng, XING Wenge, LI Gui, *et al.* Research on an improved networked radar algorithm for integrated detection and communication[C]. 2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP), Chengdu, China, 2023: 1214–1218. doi: [10.1109/ICMSP58539.2023.10170964](https://doi.org/10.1109/ICMSP58539.2023.10170964).
- [136] 尧泽昆, 王超, 施庆展, 等. 基于改进离散模拟退火遗传算法的雷达网协同干扰资源分配模型[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(3): 824–830. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2024.03.07](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2024.03.07).
- YAO Zekun, WANG Chao, SHI Qingzhan, *et al.* Cooperative jamming resource allocation model for radar network based on improved discrete simulated annealing genetic algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2024, 46(3): 824–830. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2024.03.07](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2024.03.07).
- [137] 刘俊贤, 王宏强, 陶新龙. 基于改进多目标粒子群优化算法的雷达资源分配方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(6): 549–556, 565. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2022.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2022.06.005).
- LIU Junxian, WANG Hongqiang, and TAO Xinlong. Radar resource allocation method based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2022, 17(6): 549–556, 565. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2022.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2022.06.005).
- [138] DAM T M, TRUONG L V, BUI H V, *et al.* Efficient radar scheduling using genetic algorithms and stochastic heuristic initialization[C]. 25th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning, Valencia, Spain, 2024: 192–201. doi: [10.1007/978-3-031-77731-8_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-77731-8_18).
- [139] LU Ziyang, GURSOY M C, MOHAN C K, *et al.* Adaptive resource management in cognitive radar via deep deterministic policy gradient[C]. 2025 IEEE International Radar Conference (RADAR), Atlanta, USA, 2025: 1–6. doi: [10.1109/RADAR52380.2025.11031621](https://doi.org/10.1109/RADAR52380.2025.11031621).
- [140] THORNTON C E, KOZY M A, BUEHRER R M, *et al.* Deep reinforcement learning control for radar detection and tracking in congested spectral environments[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 6(4): 1335–1349. doi: [10.1109/TCCN.2020.3019605](https://doi.org/10.1109/TCCN.2020.3019605).
- [141] DE BOER T, SCHÖPE M I, and DRIESSEN H. Radar resource management for multi-target tracking using model predictive control[C]. 2021 IEEE 24th International Conference on Information Fusion (FUSION), Sun City, South Africa, 2021: 270–277. doi: [10.23919/FUSION49465.2021.9626897](https://doi.org/10.23919/FUSION49465.2021.9626897).
- [142] LARRENIE P, BURON C, and BARBARESCO F. Collaborative multi-radar tracking by distributed auctions[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2205.05334>, 2022.
- [143] WANG Dan, LI Kaiming, ZHANG Qun, *et al.* A cooperative task allocation game for multi-target imaging in radar networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6): 7541–7550. doi: [10.1109/JSEN.2021.3049899](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3049899).
- [144] AKBAR S, ADVE R S, DING Zhen, *et al.* Task scheduling in cognitive multifunction radar using model-based DRL[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, 61(2): 2434–2449. doi: [10.1109/TAES.2024.3475991](https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3475991).
- [145] LI Dongcheng, HOU Qiang, ZHAO Man, *et al.* Reliable task planning of networked devices as a multi-objective problem using NSGA-II and reinforcement learning[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 6684–6695. doi: [10.1109/ACCESS.2022.3141912](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3141912).
- [146] XUE Chenbao, CAI Han, GEHLI S, *et al.* Review of sensor tasking methods in space situational awareness[J].

- Progress in Aerospace Sciences*, 2024, 147: 101017. doi: [10.1016/j.paerosci.2024.101017](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2024.101017).
- [147] 丁建江. 组网协同探测闭环与预案的设计[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(1): 7–13. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2021.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2021.01.002).
DING Jianjiang. Design of the closed-loop and pre-arranged planning for synergy-netted detection[J]. *Radar Science and Technology*, 2021, 19(1): 7–13. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2021.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2021.01.002).
- [148] TUNCER O and CIRPAN H A. Target priority based optimisation of radar resources for networked air defence systems[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2022, 16(7): 1212–1224. doi: [10.1049/rsn2.12255](https://doi.org/10.1049/rsn2.12255).
- [149] LI Wenhua, WANG Rui, HENG Yong, *et al.* Knowledge-guided evolutionary optimization for large-scale air defense resource allocation[J]. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 2024, 5(12): 6267–6279. doi: [10.1109/TAI.2024.3375263](https://doi.org/10.1109/TAI.2024.3375263).
- [150] SHI Chenguang, ZHANG Xinrui, SHI Zhao, *et al.* Joint detection threshold optimization and multidimensional resource allocation scheme for multitarget tracking in radar networks based on low probability of intercept[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, 61(2): 1433–1453. doi: [10.1109/TAES.2024.3455323](https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3455323).
- [151] 时晨光, 董璟, 周建江. 频谱共存下面向多目标跟踪的组网雷达功率时间联合优化算法[J]. 雷达学报, 2023, 12(3): 590–601. doi: [10.12000/JR22146](https://doi.org/10.12000/JR22146).
SHI Chenguang, DONG Jing, and ZHOU Jianjiang. Joint transmit power and dwell time allocation for multitarget tracking in radar networks under spectral coexistence[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(3): 590–601. doi: [10.12000/JR22146](https://doi.org/10.12000/JR22146).
- [152] HAO Yuhang, WANG Zengfu, NIÑO-MORA J, *et al.* Non-myopic beam scheduling for multiple smart-target tracking in phased array radar networks[J]. *Sensors*, 2024, 24(23): 7755. doi: [10.3390/s24237755](https://doi.org/10.3390/s24237755).
- [153] SHI Chenguang, SUN Xuezhong, DAI Xiangrong, *et al.* Game-theoretic joint coalition formation and power allocation strategy for multitarget tracking in distributed radar network[J]. *IEEE Systems Journal*, 2025, 19(1): 234–245. doi: [10.1109/JSYST.2024.3522100](https://doi.org/10.1109/JSYST.2024.3522100).
- [154] WU Jiale, SHI Chenguang, ZHOU Jianjiang, *et al.* Distributed design of joint transmit and receive beamforming for MIMO radar networks using game theory[J]. *IEEE Systems Journal*, 2025, 19(2): 459–470. doi: [10.1109/JSYST.2025.3565289](https://doi.org/10.1109/JSYST.2025.3565289).
- [155] CHEN Zhaoyang, BECKER G, MEYER B, *et al.* Optimizing signal interference in airborne radar systems: A systems-of-systems analysis[C]. AIAA Science and Technology Forum and Exposition, Orlando, USA, 2025. doi: [10.2514/6.2025-1355](https://doi.org/10.2514/6.2025-1355).
- [156] 葛建军, 刘光宏, 易伟, 等. 动态任务驱动的多雷达协同探测资源优化管控方法[J]. 现代雷达, 2023, 45(6): 35–41. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.005](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.005).
GE Jianjun, LIU Guanghong, YI Wei, *et al.* Resource optimization and control method for dynamic task driven multi-radar cooperative detection[J]. *Modern Radar*, 2023, 45(6): 35–41. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.005](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.06.005).
- [157] YI Qi, WANG Lei, WANG Ziang, *et al.* Joint task selection and resource allocation for multi-target tracking under suppression jamming in networked radar systems[C]. 2025 IEEE International Radar Conference, Atlanta, USA, 2025: 1–6. doi: [10.1109/RADAR52380.2025.11032051](https://doi.org/10.1109/RADAR52380.2025.11032051).
- [158] 龙洗, 蔡伟伟, 杨乐平. 空间目标探测多传感器协同规划[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(4): 37–44. doi: [10.11887/j.cn.202404004](https://doi.org/10.11887/j.cn.202404004).
LONG Xi, CAI Weiwei, and YANG Leping. Multi-sensor cooperative planning of space objects detection[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2024, 46(4): 37–44. doi: [10.11887/j.cn.202404004](https://doi.org/10.11887/j.cn.202404004).
- [159] 廖晓容, 孙国皓, 钟苏川, 等. 面向多任务动态场景的雷达与干扰空时协同波束联合优化方法[J]. 雷达学报(中英文), 2024, 13(3): 613–628. doi: [10.12000/JR23243](https://doi.org/10.12000/JR23243).
LIAO Xiaorong, SUN Guohao, ZHONG Suchuan, *et al.* Joint optimization of radar and jammer space-time cooperative beamforming for a multitasking dynamic scene[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(3): 613–628. doi: [10.12000/JR23243](https://doi.org/10.12000/JR23243).
- [160] YUAN Ye, LIU Xinyu, LI Wujun, *et al.* Decentralized resource allocation for multi-radar systems based on quality of service framework[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 1189–1204. doi: [10.1109/TSP.2024.3367278](https://doi.org/10.1109/TSP.2024.3367278).
- [161] YAO Huan, LOU Hao, WANG Dan, *et al.* A resource scheduling algorithm for multi-target 3D imaging in radar network based on deep reinforcement learning[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(23): 4472. doi: [10.3390/rs16234472](https://doi.org/10.3390/rs16234472).
- [162] ZHU Jin, LIU Wenxu, LYU Feifei, *et al.* Resource allocation of distributed MIMO radar based on the hybrid action space reinforcement learning[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 19593. doi: [10.1038/s41598-025-02698-1](https://doi.org/10.1038/s41598-025-02698-1).
- [163] LU Ziyang and GURSOY M C. Resource allocation for multi-target radar tracking via constrained deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2023, 9(6): 1677–1690. doi: [10.1109/TCCN.2023.3304634](https://doi.org/10.1109/TCCN.2023.3304634).
- [164] SUTTLE W A, SHARMA V K, and SADLER B M. Signal attenuation enables scalable decentralized multi-agent reinforcement learning over networks[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2505.11461v1>, 2025.
- [165] CHEN Zeyu, SUN Jian, HUAN Zhengda, *et al.* Research

- on vehicle joint radar communication resource optimization method based on GNN-DRL[J]. *Computers, Materials & Continua*, 2026, 86(2): 1–17. doi: [10.32604/cmc.2025.071182](https://doi.org/10.32604/cmc.2025.071182).
- [166] 罗彪, 胡天萌, 周育豪, 等. 多智能体强化学习控制与决策研究综述[J]. *自动化学报*, 2025, 51(3): 510–539. doi: [10.16383/j.aas.c240392](https://doi.org/10.16383/j.aas.c240392).
LUO Biao, HU Tianmeng, ZHOU Yuhao, *et al.* Survey on multi-agent reinforcement learning for control and decision-making[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2025, 51(3): 510–539. doi: [10.16383/j.aas.c240392](https://doi.org/10.16383/j.aas.c240392).
- [167] HAN Qinghua, LONG Weijun, YANG Zhen, *et al.* Resource allocation of netted opportunistic array radar for maneuvering target tracking under uncertain conditions[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(18): 3499. doi: [10.3390/rs16183499](https://doi.org/10.3390/rs16183499).
- [168] 时晨光, 唐志诚, 周建江, 等. 非理想检测下多雷达网络节点选择与辐射资源联合优化分配算法[J]. *雷达学报(中英文)*, 2024, 13(3): 565–583. doi: [10.12000/JR23081](https://doi.org/10.12000/JR23081).
SHI Chenguang, TANG Zhicheng, ZHOU Jianjiang, *et al.* Joint collaborative radar selection and transmit resource allocation in multiple distributed radar networks with imperfect detection performance[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(3): 565–583. doi: [10.12000/JR23081](https://doi.org/10.12000/JR23081).
- [169] 焦浩, 严俊坤, 郝佳, 等. 面向多机动目标的资源分配与精细化跟踪算法[J]. *雷达学报(中英文)*, 2026, 15(1): 292–306. doi: [10.12000/JR25037](https://doi.org/10.12000/JR25037).
JIAO Hao, YAN Junkun, HAO Jia, *et al.* Resource allocation and precise tracking algorithm for multiple maneuvering targets[J]. *Journal of Radars*, 2026, 15(1): 292–306. doi: [10.12000/JR25037](https://doi.org/10.12000/JR25037).
- [170] YAN Junkun, HE Tao, MA Lin, *et al.* Maneuvering resource allocation for coordinated target tracking in airborne radar network[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2023, 71: 1563–1573. doi: [10.1109/TSP.2023.3265882](https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3265882).
- [171] DING Changwen, ZHOU Di, LI Siyuan, *et al.* Adaptive consensus-based multi-domain collaborative asynchronous multi-target tracking[C]. 2025 IEEE 7th International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE), Guangzhou, China, 2025: 1087–1093. doi: [10.1109/CISCE65916.2025.11065894](https://doi.org/10.1109/CISCE65916.2025.11065894).
- [172] GUAN Xin and LU Yu. Distributed multi-target tracking via consensus-based arithmetic average fusion[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2024, 18(12): 2480–2496. doi: [10.1049/rsn2.12657](https://doi.org/10.1049/rsn2.12657).
- [173] LIU Weicheng, CHENG Guorui, MA Xiaolei, *et al.* Dynamic event-triggered distributed sequential consensus fusion filtering for sensor networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(7): 8497–8507. doi: [10.1109/JIOT.2024.3500022](https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3500022).
- [174] ZHANG Zheng, LI Qingdong, YV Jianglong, *et al.* Finite-time robust cooperative distributed estimate with sensor network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(9): 14737–14749. doi: [10.1109/JSEN.2024.3376678](https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3376678).
- [175] 杨善超, 田康生, 吴长飞. 舰载相控阵雷达组网资源管理的一致性算法[J]. *兵工学报*, 2019, 40(10): 2096–2104. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2019.10.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2019.10.015).
YANG Shanchao, TIAN Kangsheng, and WU Changfei. Consistency algorithm for resource management of shipborne phased array radar network[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(10): 2096–2104. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2019.10.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2019.10.015).
- [176] GAO Lan, LU Hao, WANG Jianliang, *et al.* Robust distributed average tracking with disturbance observer control[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, 22: 970–983. doi: [10.1109/TASE.2024.3357527](https://doi.org/10.1109/TASE.2024.3357527).
- [177] 蒲伟铭, 梁振楠, 陈新亮, 等. 一种鲁棒的分布式雷达主瓣干扰抑制方法[J]. *信号处理*, 2022, 38(2): 250–257. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.02.004](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.02.004).
PU Weiming, LIANG Zhennan, CHEN Xinliang, *et al.* A robust method for mainlobe interference suppression based on distributed array radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(2): 250–257. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.02.004](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.02.004).
- [178] 陈辉, 王秋菊, 连峰, 等. 正态-伽马非线性雷达扩展目标跟踪滤波器[J]. *控制理论与应用*, 2025, 42(10): 1894–1903. doi: [10.7641/CTA.2024.30705](https://doi.org/10.7641/CTA.2024.30705).
CHEN Hui, WANG Qiuju, LIAN Feng, *et al.* Normal-Gamma nonlinear radar extended target tracking filter[J]. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(10): 1894–1903. doi: [10.7641/CTA.2024.30705](https://doi.org/10.7641/CTA.2024.30705).
- [179] 单靖原, 卢雨, 凌寒羽. 鲁棒自适应的机载外辐射源雷达多目标跟踪算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2024, 46(9): 2902–2915. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2024.09.02](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2024.09.02).
SHAN Jingyuan, LU Yu, and LING Hanyu. Robust adaptive multi-target tracking algorithm for airborne passive bistatic radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2024, 46(9): 2902–2915. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2024.09.02](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2024.09.02).
- [180] YANG Cheng, XIA Lurui, and LI Sen. Fractional-order power function sliding mode control for multi-spacecraft attitude under switching topology[C]. 2025 Joint International Conference on Automation-Intelligence-Safety (ICAIS) & International Symposium on Autonomous Systems (ISAS), Xi'an, China, 2025: 1–8. doi: [10.1109/ICAISISAS64483.2025.11052188](https://doi.org/10.1109/ICAISISAS64483.2025.11052188).
- [181] MUHURY A, SADHU S, and GHOSHAL T K. Guidance signal extraction in an ESA based RF seeker by

- disturbance observer[C]. 2021 2nd International Conference on Range Technology, Chandipur, India, 2021: 1–6. doi: [10.1109/ICORT52730.2021.9581773](https://doi.org/10.1109/ICORT52730.2021.9581773).
- [182] BADINGS T, ROMAOL L, ABATE A, *et al.* Robust control for dynamical systems with non-Gaussian noise via formal abstractions[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2023, 76: 341–391. doi: [10.1613/jair.1.14253](https://doi.org/10.1613/jair.1.14253).
- [183] XIAO Wei, WANG T H, HASANI R, *et al.* BarrierNet: Differentiable control barrier functions for learning of safe robot control[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(3): 2289–2307. doi: [10.1109/TRO.2023.3249564](https://doi.org/10.1109/TRO.2023.3249564).
- [184] 高焕丽, 李玮, 孟伟, 等. 基于自适应分布式滤波观测器的多智能体系统编队控制[J]. *控制理论与应用*, 2024, 41(4): 729–737. doi: [10.7641/CTA.2023.20639](https://doi.org/10.7641/CTA.2023.20639).
- GAO Huanli, LI Wei, MENG Wei, *et al.* Formation control of multiagent systems based on adaptive distributed filtering observer[J]. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(4): 729–737. doi: [10.7641/CTA.2023.20639](https://doi.org/10.7641/CTA.2023.20639).
- [185] YUE Shuai, XU Ning, ZHANG Liang, *et al.* Observer-based event-triggered adaptive fuzzy hierarchical sliding mode fault-tolerant control for uncertain under-actuated nonlinear systems[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2025, 27(4): 1303–1320. doi: [10.1007/s40815-024-01834-9](https://doi.org/10.1007/s40815-024-01834-9).
- [186] 杨永刚, 申郑茂, 宋泽. 基于RBF与BP神经网络的四旋翼编队滑模控制[J]. *电光与控制*, 2023, 30(7): 21–27. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2023.07.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2023.07.004).
- YANG Yonggang, SHEN Zhengmao, and SONG Ze. Sliding mode control of quadrotor formation based on RBF and BP neural network[J]. *Electronics Optics & Control*, 2023, 30(7): 21–27. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2023.07.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2023.07.004).
- [187] 智永锋, 邱璐莹, 张龙, 等. 基于强化学习的多雷达抗干扰算法研究[J]. *现代雷达*, 2024, 46(2): 131–137. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.02.017](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.02.017).
- ZHI Yongfeng, QIU Luying, ZHANG Long, *et al.* A study on reinforcement learning for multi-radar coexistence anti-jamming[J]. *Modern Radar*, 2024, 46(2): 131–137. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.02.017](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.02.017).
- [188] HOWARD W W, MARTONE A F, and BUEHRER R M. Distributed online learning for coexistence in cognitive radar networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(2): 1202–1216. doi: [10.1109/TAES.2022.3198038](https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3198038).
- [189] 丁梓航, 谢军伟, 齐钺. 基于强化学习的频控阵-多输入多输出雷达发射功率分配方法[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(2): 550–557. doi: [10.11999/JEIT211555](https://doi.org/10.11999/JEIT211555).
- DING Zihang, XIE Junwei, and QI Cheng. Transmit power allocation method of frequency diverse array-multi input and multi output radar based on reinforcement learning[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(2): 550–557. doi: [10.11999/JEIT211555](https://doi.org/10.11999/JEIT211555).
- [190] 王子怡, 傅雄军, 董健, 等. 基于分层多智能体强化学习的雷达协同抗干扰策略优化[J]. *系统工程与电子技术*, 2025, 47(4): 1108–1114. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2025.04.07](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2025.04.07).
- WANG Ziyi, FU Xiongjun, DONG Jian, *et al.* Optimization of radar collaborative anti-jamming strategies based on hierarchical multi-agent reinforcement learning[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2025, 47(4): 1108–1114. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2025.04.07](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2025.04.07).
- [191] 葛建军, 唐思琦, 李明强, 等. 复杂感知系统信息理论与构建方法[J]. *雷达学报(中英文)*, 2025, 14(3): 651–663. doi: [10.12000/JR25078](https://doi.org/10.12000/JR25078).
- GE Jianjun, TANG Siqi, LI Mingqiang, *et al.* Information theory and construction methods of complex perception systems[J]. *Journal of Radars*, 2025, 14(3): 651–663. doi: [10.12000/JR25078](https://doi.org/10.12000/JR25078).
- [192] DE ZARZÀ I, DE CURTÒ J, ROIG G, *et al.* Emergent cooperation and strategy adaptation in multi-agent systems: An extended coevolutionary theory with LLMs[J]. *Electronics*, 2023, 12(12): 2722. doi: [10.3390/electronics12122722](https://doi.org/10.3390/electronics12122722).
- [193] CHEN Xinran, FENG Xiaoxue, JIANG Xinyi, *et al.* A dynamic heterogeneous multi-swarm PSO for multi-objective frequency assignment problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 289: 128295. doi: [10.1016/j.eswa.2025.128295](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128295).
- [194] XU Yue, PAN Quan, WANG Zengfu, *et al.* A self-learning refined model and tracking for near space hypersonic vehicle by space-based radar[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2026, 39(5): 103840. doi: [10.1016/j.cja.2025.103840](https://doi.org/10.1016/j.cja.2025.103840).
- [195] 肖世昂, 束坤, 李迪, 等. 群智结合级联神经网络在集群电子对抗中的应用[J]. *现代雷达*, 2025, 47(8): 63–70. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.20240421001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.20240421001).
- XIAO Shiang, SHU Kun, LI Di, *et al.* Application of swarm intelligence combined cascade neural network in cluster electronic countermeasures[J]. *Modern Radar*, 2025, 47(8): 63–70. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.20240421001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.20240421001).
- [196] HE Bin. Power allocation between a distributed multistatic radar network and a smart jammer based on non-cooperative game theory[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 48788–48796. doi: [10.1109/ACCESS.2024.3384408](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3384408).
- [197] 叶方, 戚昌龙, 孙柳晴, 等. 基于扩展式博弈的组网雷达功率分配方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2025, 47(6): 1803–1815. doi: [10.11999/JEIT241131](https://doi.org/10.11999/JEIT241131).
- YE Fang, QI Changlong, SUN Liuqing, *et al.* Research on power allocation method for networked radar based on extended game theory[J]. *Journal of Electronics &*

- Information Technology*, 2025, 47(6): 1803–1815. doi: [10.11999/JEIT241131](https://doi.org/10.11999/JEIT241131).
- [198] DU H, THUDUMU S, NGUYEN H, *et al.* A comprehensive survey on context-aware multi-agent systems: Techniques, applications, challenges and future directions[EB/OL]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.01968>, 2025.
- [199] WANG Jieling, LIU Yanfei, LI Chao, *et al.* A cooperative jamming mode adjustment method based on multi-agent reinforcement learning[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2025, 16(11): 103672. doi: [10.1016/j.asej.2025.103672](https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103672).
- [200] THORNTON C E, BUEHRER R M, and MARTONE A F. Online Bayesian meta-learning for cognitive tracking radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(5): 6485–6500. doi: [10.1109/TAES.2023.3275552](https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3275552).
- [201] MISHRA K V, SHANKAR M R B, RANGASWAMY M. Next-Generation Cognitive Radar Systems[M]. London: SciTech Publishing, 2023: 613–624. doi: [10.1049/SBRA552E](https://doi.org/10.1049/SBRA552E).
- [202] MARTONE A F, BUEHRER R M, and MCNAMARA D M. Emerging trends in radar: Metacognitive radar networks for the next generation of intelligent sensing[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2025, 40(6): 114–120. doi: [10.1109/MAES.2025.3539607](https://doi.org/10.1109/MAES.2025.3539607).
- [203] SHARMA P and SARMA K K. Collaborative and distributive intelligence in radar systems: Enhancing electronic jamming discrimination[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2025, 124: 110357. doi: [10.1016/j.compeleceng.2025.110357](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2025.110357).
- [204] LONG Changqing, MENG Wenchao, LI Shizhong, *et al.* Distributed resource allocation and coordinated scheduling for End-Edge-Cloud collaborative computing[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2026, 25(1): 961–976. doi: [10.1109/TMC.2025.3599885](https://doi.org/10.1109/TMC.2025.3599885).
- [205] LI Xiaoyang, WANG Teng, WANG Yongkun, *et al.* Intelligent decision-making algorithm for multi-UAV radar cooperative guided search task based on multiagent reinforcement learning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(15): 31042–31063. doi: [10.1109/JIOT.2025.3572395](https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3572395).
- [206] HOU Suxin, ZHU Chen, YANG Zhaohui, *et al.* Target perception and digital reconstruction for low altitude economy based on multi-radar data fusion[C]. 2025 IEEE International Conference on Communications Workshops, Montreal, Canada, 2025: 732–738. doi: [10.1109/ICCWorkshops67674.2025.11162394](https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops67674.2025.11162394).
- [207] ZHANG Jing, WANG Ning, and TANG Ming. Human-AI coordination for large-scale group decision making with heterogeneous feedback strategies[J/OL]. *Journal of the Operational Research Society*. <https://doi.org/10.1080/01605682.2025.2466677>, 2025.

作者简介

胡 佳, 助理研究员, 主要研究方向为雷达协同探测、预警装备论证等。

丁建江, 教授, 主要研究方向为雷达系统发展论证、试验评估、雷达协同运用等。

周 芬, 副教授, 主要研究方向为预警装备论证、雷达组网运用、试验评估等。

张 阳, 讲师, 主要研究方向为雷达资源管控、预警装备协同运用等。

周超群, 博士, 主要研究方向为雷达资源管控、雷达组网运用等。

曲 畅, 高级工程师, 主要研究方向为雷达组网运用、预警装备论证等。

(责任编辑: 于青)