

多雷达组网抗干扰中的若干关键难题

廖胜男*, 陈燕, 鲁耀兵, 王德伍, 袁耀辉

(北京无线电测量研究所, 北京 100854)

摘要: 雷达干扰因其实现了对雷达时、空、频等多域覆盖,且具有对雷达信号变化快速跟随能力,使单部雷达在干扰条件下靠自身抗干扰技术达到的作战效能被大大压缩。在体系化作战思维牵引下,利用多雷达组网工作是复杂干扰条件下提高雷达探测能力的有效途径之一,基于对雷达干扰的抗干扰技术途径分析,以多雷达组网探测为基础,分析了双/多雷达控制、状态、信息互联互通关系,重点提出了指挥控制关系、时空同步设计、信息互联等设计方法。同时参考开放式射频系统架构,提出了可动态配置的资源调度框架和流程,为多雷达组网在干扰条件下工作性能提升提供支撑。

关键词: 雷达干扰;多雷达组网;时空同步;双多基地雷达

中图分类号:TN957 文献标志码:A 文章编号:1004-7859(2024)09-0079-06

引用格式:廖胜男,陈燕,鲁耀兵,等.多雷达组网抗干扰中的若干关键难题[J].现代雷达,2024,46(9):79-84.

LIAO Shengnan, CHEN Yan, LU Yaobing, et al. Some key problems in jamming suppression of multi-radar network [J]. Modern Radar, 2024, 46(9): 79-84.

Some Key Problems in Jamming Suppression of Multi-radar Network

LIAO Shengnan*, CHEN Yan, LU Yaobing, WANG Dewu, YUAN Yaohui

(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: The radar jamming achieves multi-domain coverage of radar time, space and frequency, and has the ability to quickly follow the radar signal changes, so that the combat effectiveness of single radar under the condition of jamming is greatly compressed. Under the guidance of systematic operational thinking, using multi-radar networking is one of the effective ways to improve radar detection capability under complex jamming conditions. In this paper, based on the analysis of the anti-jamming technology of the radar interference, based on the multi-radar network detection, the relationship between dual/multi-radar control, state and information interconnection is analyzed, and the design methods such as command and control relationship, spatio-temporal synchronous design and information interconnection are put forward. At the same time, based on the open RF system architecture, a dynamic configurable resource scheduling framework and process are proposed to support the performance improvement of multi-radar networking under the condition of interference.

key words: radar jamming; multi-radar network; spatio-temporal synchronization; bistatic/multistatic radar

0 引言

雷达干扰结合了大带宽信号采集与快速转发、有源装置自由空间释放与飞行、相参信号转发与调制等技术,从时、空、频等多域影响雷达,单部雷达独立探测,以期仅依靠自身时、空、频自由度达到有效对抗干扰难度巨大。基于体系化思维,打破干扰机与雷达“多对一”的非平等对抗关系的多雷达组网抗干扰技术应运成为诸多学者关注的热点。立足于常规单站雷达体系化赋能,构建组网探测雷达新形态,研究探讨多雷达组网探测抗干扰中的关键难题,并提出解决方案具有重要意义。

雷达组网探测涉及内容范围较广,当前主要的技术研究主要集中在三个方面:包括雷达组网探测资源

的管理与任务规划方面、雷达组网探测基础支持方面以及组网探测技术的应用方面。

雷达组网探测资源管理与任务规划方面,针对导弹防御中多部雷达跟踪多个目标的问题,一种基于任务分解-方案聚合以及0-1整数规划的多传感器协同探测任务规划方法被提出^[1],以最佳时间序列、工作方式等准则提高截获概率、识别准确性、跟踪稳定性与连续性。文献[2]在总结组网协同探测的优势以及策略规划时应考虑的关键点的基础上,提出了在调度间隔中寻找与任务驻留长度相近的时间碎片来插入任务的优化模型。雷达组网协同在机群编队作战中同样重要,利用神经网络对组网探测模式的决策逻辑进行建模,可实现编组机群雷达的协同策略自主控制^[3]。基于优化极小化框架、半正定规划、凸松弛优化等方法^[4-6],提出了网络化雷达协同探测与管理问题中收

发节点优化选择以及多人多出(MIMO)雷达分布式闭环跟踪的解决方案。

雷达组网探测基础支持方面,针对雷达观测到目标的雷达截面积(RCS)起伏差异,通过改进检测融合算法,提供组网探测雷达联合检测概率计算模型,并估计其组网探测范围,可为雷达组网探测布阵提供参考^[7]。在引入定位精度几何稀释参数作为评价指标的基础上^[8],可分析得到关于组网协同探测系统在满足战场定位精度需求下基线长度和时间同步误差的要求。针对分布式相参合成雷达,可从回波相关、信号相参、目标分辨和阵面遮挡等方面提出雷达基线选择原则^[9]。在协同探测波形设计方面,一种基于MM原理的近端乘子法算法,可实现具有良好自相关电平的探测波形设计^[10],并可利用该波形应对多主瓣干扰对抗问题。在协同探测技术的发展中,组网协同相关的仿真训练同样重要,训练场景编辑、雷达主控、训练台、数据融合与训练结果评价等模块组成训练系统,并从协同抗干扰、目标跟踪与职手综合表现等三方面进行训练考核,该训练方法对协同探测的工程推广具有积极意义^[11]。

组网探测技术的应用方面,分布式孔径相参合成雷达^[12-14]除系统设计与试验研究技术的研究,与分布式孔径相参雷达的预警探测应用等研究成果外,还完成了原理样机的验证,获取了接收相参、收发相参合成增益的实测数据,是组网探测为单部雷达赋能的成功应用案例。协同探测技术同样被提出用于临近空间目标等新型威胁对象的跟踪探测^[15]。当然关注度最广泛的应用还是协同探测抗干扰应用技术,包括利用多基地雷达空间分置特点、借鉴单站雷达旁瓣对消的理念对抗主瓣压制干扰^[16]、利用多站或分布式MIMO体制对抗欺骗干扰等^[17-18]。

本文基于对雷达干扰的工作机理分析,给出相应的抗干扰技术途径,并结合当前主流的相控阵雷达,以其具有一定软件化程度,独立信息接入能力与自定位授时能力为前提,研究多雷达组网探测抗干扰可能涉及的共性关键难题,并提出一些解决方案建议。

1 抗干扰技术途径

干扰机主要由收发天线、变频、数字采样、存储、可变频率综合器、信号处理器、控制管理器等组成,构成由侦察功能模块、控制功能模块以及干扰功能模块组成的闭合系统架构。其中,侦察功能模块完

成战场环境威胁信号侦收,控制功能模块完成信号分选识别与干扰策略选择,干扰功能模块完成干扰信号辐射。双站协同系统在抗干扰方面的主要优势是空间视角以及可同时支配的频率、波形资源的自由度显著提升。基于干扰机的工作机理与多雷达组网系统的空间、频率、波形等方面优势,主要抗干扰技术途径包括多站掩护、双/多基地模式、多站对消以及相参合成等。

多站掩护抗干扰以破坏干扰机控制功能模块的侦察、干扰策略选择为目的,多部雷达通过发射时序与工作频率的控制,使干扰机信号分选环节出现饱和或信息遗漏,进而使干扰机控制功能模块对可编程频综的控制顾此失彼。多站掩护可视为一种主动抗干扰措施。

双/多基地抗干扰是双/多基地雷达系统技术在抗干扰上的应用,一方面是能够有效利用电磁波的前向散射特性,获得探测后向散射RCS很小的隐身目标的优势;另一方面是能够利用干扰机侦察功能模块存在接收灵敏度限制的工作机理,通过发射站的合理部署,使得发射站电磁波到达干扰机侦察功能模块的功率低于干扰机灵敏度,获得发射站对干扰机“静默”的优势。双/多基地抗干扰中的雷达主要是长基线分置模式,当双多基地系统仅利用电磁波前向散射特性提高对隐身目标的探测性能时,双/多基地抗干扰是一种被动抗干扰措施。当双/多基地系统进一步实现发射站对干扰机的静默时,双/多基地抗干扰是一种主动抗干扰措施。

多站对消一定程度上参考了单站雷达利用辅助天线对抗旁瓣压制干扰的方法。在多站组网探测系统中,由于各雷达节点的空间分置性和目标的散射特性,只要各雷达站之间距离 L 、目标尺寸 D 与目标距离 R 满足 $L > \lambda R/D$,那么雷达站接收到的目标回波信号是去相关的,此时,可以通过多站对消的方式抑制干扰^[16]。多站对消也是一种被动抗干扰方法。

相参合成即雷达采用分布式孔径雷达相参探测体制,协同探测雷达采用长基线或短基线方式部署,多个单元雷达在部署时还可考虑阵列布局(一维或二维布阵)。组网工作的雷达波束指向相同目标或相同区域,实现信号级相参合成,通过提高雷达功率孔径的方式提高雷达在受干扰后的探测能力,是一种被动抗干扰措施。

干扰机工作机理与多雷达组网抗干扰的原理如图1所示。

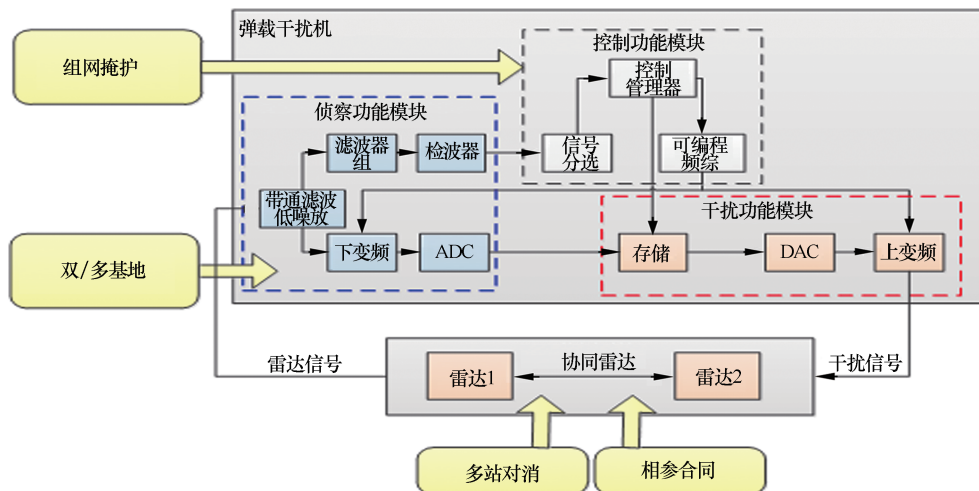


图 1 干扰机工作机理与雷达组网抗干扰原理示意图
Fig. 1 Working mechanism of jammer and anti-jamming principle of radar network

2 主要关键难题

2.1 信息互联

信息互联是多雷达的基础,信息互联主要解决组网探测系统中雷达站之间控制与状态交互信息、探测数据、采样信号之间的互联互通问题,主要包括信息互联网络的构建以及信息传输协议的制定两方面。组网探测的工作模式分为数据级联通与信号级联通两种模式。数据级联通情况下,雷达通过跟踪探测点迹的融合使用提高功能效能,此时雷达之间传输的信息为目标跟踪点迹数据与航迹数据、目标特征数据、雷达主要调度控制信息以及协同调度策略信息,对传输延时的要求较低。信号级联通情况下,雷达通过信号级的合成、对消等处理提高工作性能,此时雷达之间需在数据级联通的基础上传输回波采样信号等。

1) 信息互连网络

站间的信息互连有搭建“局域网”以及构建“开放式组网”两种方式。由于互连的各设备间光纤接口需要以“一对一”的方式设计,那么当组网的雷达数量较多时,局域网接入方式的架构缺陷凸显,即每部装备均需要留有 N 路光纤接口;而通过“开放式组网”的方式,信息互连网络具有动态、总成的特点,可实现一个硬件端口通过传输数据的报文标识完成 N 个设备的动态互连的能力。

开放式组网方式可以认为是开放式系统方案在协同探测领域的应用,射频系统开放式系统架构^[19]说明中,指出开放式射频系统实现的技术途径是:由具有清晰的功能与接口定义的模块化单元组成,基于以太网架构进行数据交互,在通用开放式系统基础上扩展射频链路需要的强信号、低时延数据传输需求。开放式射频系统架构如图 2 所示。

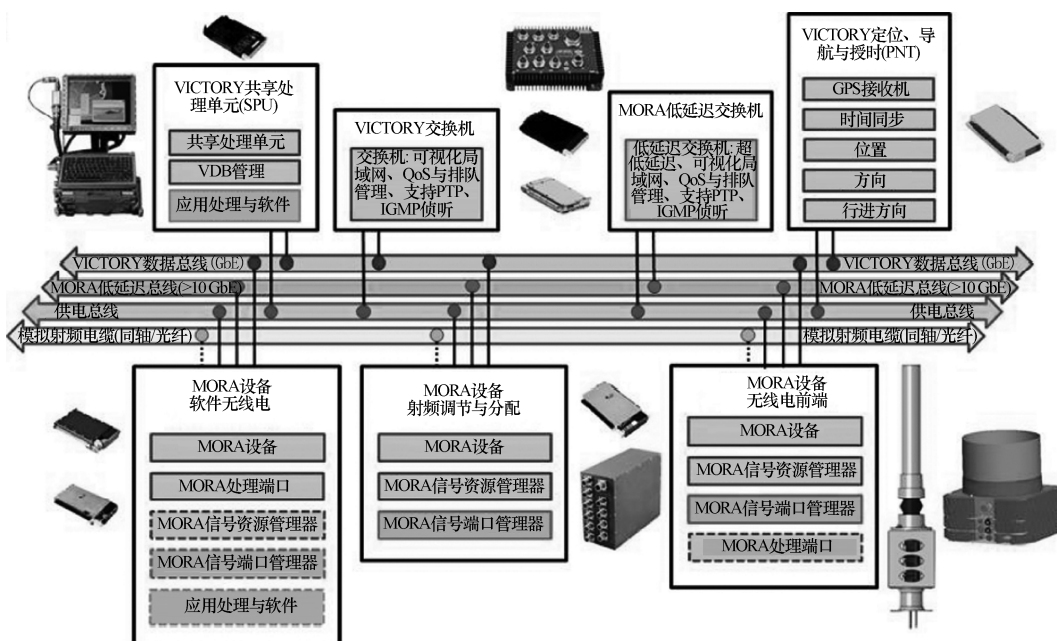


图 2 开放式射频系统架构框图
Fig. 2 Block diagram of open RF system architecture

可以看出,雷达数据级信息、控制与状态交互信息可采用主站形式的以太网实现互联,当只涉及数据级联通时,仅通过该层网络即可完成通信互联。当涉及信号级联通时,在物理链路在上述指挥控制信息网络共用的基础上,需要通过自定义光纤接口的方式,进一步搭建高速信号传输用网络层。

2) 信息传输协议

基于开放式系统思想,组网探测信息传输可采用报文标识+信息内容(长度可变)的格式,报文标识包括报文序号、类型(数据/信号)、报文长度、时间信息、信息源编号等;信息内容包括雷达状态信息、控制信息、量测信息等。其中,雷达状态信息包括雷达点位、阵面姿态、用频信息、健康状态;控制信息包括同步校准控制、波束控制、波形控制、采样控制与传输控制等;量测信息包括数量、序号、位置信息、速度信息、特征信息等。

2.2 指挥控制

1) 指挥层级

在组网探测系统中,除原有指挥上级与单站雷达之间的任务级指挥外,还涉及信号级联通调度的控制,综合考虑系统架构简洁合理、系统工作稳健的设计原则,组网探测系统在源任务级指挥层级基础上,增加信号级联通指挥层级关系。信号级联通指挥由组网探测中的雷达主站完成。

可以从双站组网的信息闭合主源角度定义组网探测系统中的主、从站关系。主站即信息在组网抗干扰策略中,布站或雷达信息属性满足探测主源要求的雷

达,如双/多基地雷达对消中的被对消雷达站、接收站等,从站即用于配合主站完成跟踪测量任务的雷达,如双/多基地雷达中的对消信号采集雷达、发射站等^[20]。建议每部雷达均具有作为主雷达站的能力,即能够完成中心处理单元相关计算、调度功能。指挥调度层级设置如图3所示。

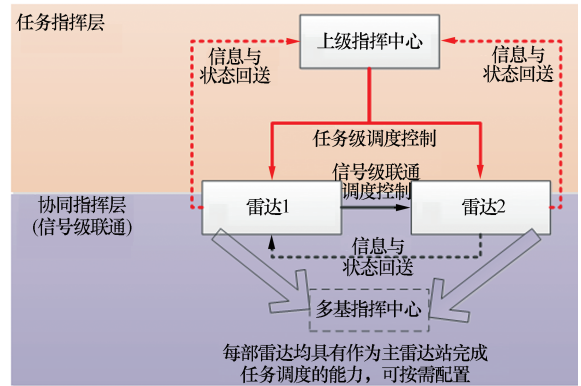
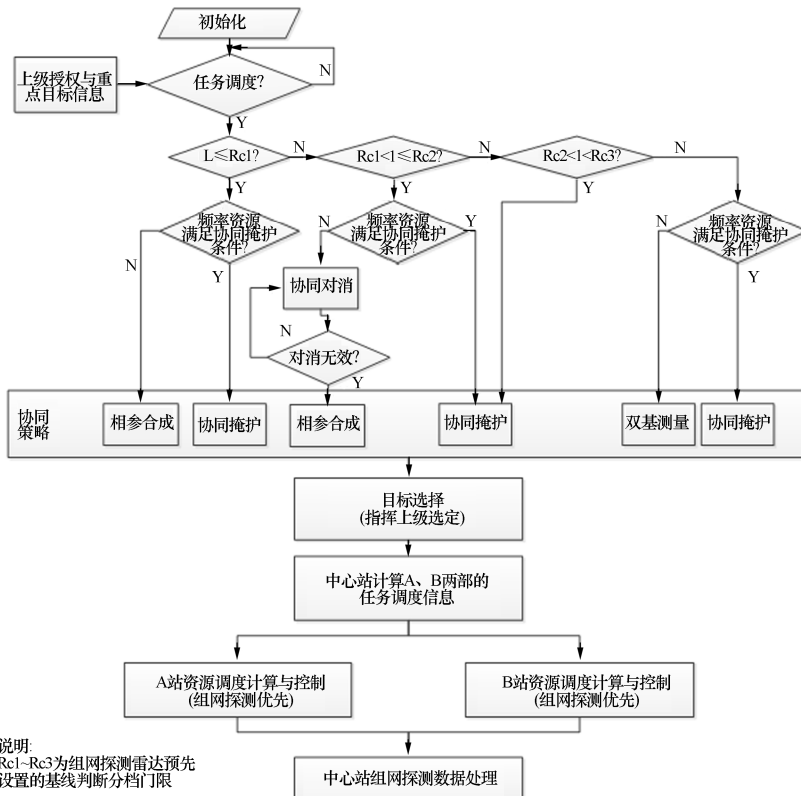


图3 指挥调度层级示意图
Fig.3 Hierarchy diagram of command and dispatch

2) 任务调度

任务调度主要完成组网抗干扰措施的选择,以及主、从站雷达工作状态的控制。由于本文探讨的多雷达组网主要考虑应用于对抗干扰,因此,任务调度的总体原则是确保能够选择到组网抗干扰效能最佳的抗干扰措施,并发出主、从站的控制调度。任务调度过程如图4所示。



说明
Rc1-Rc3为组网探测雷达预先设置的基线判断分档门限

图4 双站雷达组网探测调度逻辑
Fig.4 Dual-radar network detection scheduling logic

2.3 同步技术

与单部雷达跟踪探测相比, 组网探测还需要解决“三大同步”问题^[19], 即空间、时间、频率和相位同步, 而组网探测系统中的同步需求应视具体抗干扰措施而定。总的来讲, 任务级与数据级联通需要解决时间与空间同步问题, 信号级联通需要进一步解决频率和相位同步问题。

时间同步旨在为组网探测系统提供统一的高精度时间基准, 既是雷达测距所必须的, 也是空间同步的基础。常用的时间同步方法有微波链路双向传递法、光纤链路双向传递法、卫性链路双向传递同步法以及激光同步法, 综合考虑灵活性、经济性与精度等因素, 建议优先考虑卫星链路双向传递同步法。空间同步旨在实现双站之间发射波束或接收波束同时指向同一目标。频率与相位同步旨在保证回波信号与接收机良好的匹配性、多普勒测量准确性、信号相参合成效率、频率因子与相位因子补偿的准确性。常用的有直接同步法与间接同步法。直接同步法即将发射机的频率基准信号经数字传输通道直接送至接收机; 间接同步法是通过在收、发站各设置相同的高稳定度频率基准信号去解调接收机要处理的信号, 如利用收发两站的原子钟分别为发射机与接收机提供高稳定度的频率和相位相参基准信号。

3 结束语

本文重点分析多雷达组网探测技术在对抗干扰方面的优势, 并基于雷达装备体系化赋能的设计思想, 给出多站掩护、双/多基地模式、多站对消以及相参合成等干扰条件下雷达工作性能提升的技术途径, 并进一步给出多雷达组网抗干扰研究中需要注意的关键技术点, 包括信息互联、指挥控制与同步技术等。特别地, 参考开放式射频系统架构, 提出了具有开放式、可动态配置的双站信息互联与指挥控制架构, 为多雷达组网探测技术为雷达装备赋能, 解决雷达干扰对抗技术难题提供了有益的支撑。

参考文献 (References)

- [1] 董晨, 刘兴科, 周金鹏, 等. 导弹防御多传感器协同探测任务规划[J]. 现代防御技术, 2018, 46(6): 57-63.
DONG Chen, LIU Xingke, ZHOU Jinpeng, et al. Cooperative detection task programming of multi sensor for ballistic missile defense[J]. Modern Defence Technology, 2018, 46(6): 57-63.
- [2] 李靖舒, 高贵明, 廖卫东, 等. 相控阵雷达协同探测任务调度研究[J]. 现代防御技术, 2017, 45(6): 95-100.
LI Jingsu, GAO Guiming, LIAO Weidong, et al. Research on coordinated detection mission scheduling of phased array radar[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(6): 95-100.
- [3] 谢金华, 钮伟, 王永坤. 基于神经网络的组网雷达协同探测模式控制[J]. 指挥控制与仿真, 2021, 43(2): 20-24.
XIE Jinhua, NIU Wei, WANG Yongkun. Research on control of netted radar co-detection mode based on neural network[J]. Command Control & Simulation, 2021, 43(2): 20-24.
- [4] 鲁彦希. 网络化雷达协同探测与资源管理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
LU Yanxi. Research on networked radar cooperative detection and resource management[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [5] LU Y, HE Z, LIU S, et al. Communication-awareness joint beams and power allocation scheme of radar network for manoeuvring targets tracking[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 12(2): 207-215.
- [6] LU Y, HAN C, HE, et al. Adaptive JSPA in distributed collocated MIMO radar network for multiple targets tracking[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 13(3): 410-429.
- [7] 胡小全, 刘钦, 孙建军. 雷达组网协同探测范围研究[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(3): 223-227.
HU Xiaoquan, LIU Qin, SUN Jianjun. Study on cooperative detection coverage of radar network[J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(3): 223-227.
- [8] 尹瑞, 徐斐, 沈伟. 时间同步对双多基地协同探测精度的影响[J]. 现代雷达, 2015, 37(7): 12-14.
YIN Rui, XU Fei, SHEN Wei. The influence of time synchronization degree on the precision of dual-multi-base cooperative detection[J]. Modern Radar, 2015, 37(7): 12-14.
- [9] 周宝亮, 高红卫, 文树梁, 等. 分布式相参雷达基线选择与标定误差分析[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(11): 2438-2443.
ZHOU Baoliang, GAO Hongwei, WEN Shuliang, et al. Distributed coherent radar baseline selection and calibration error analysis[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(11): 2438-2443.
- [10] 余显祥, 路晴辉, 杨婧, 等. 短基线收发分置频域协同波形设计方法[J]. 雷达学报, 2022, 11(2): 227-239.
YU Xianxiang, LU Qinghui, YANG Jing, et al. Frequency domain cooperative waveform design method for short baseline transceiver[J]. Journal of Radars, 2022, 11(2): 227-239.
- [11] 吕可. 复杂电磁环境下海军岸基雷达组网协同仿真训练方法研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(1): 59-62.
LÜ Ke. Research on the training method of naval shore-based radar network co-simulation under complex electromagnetic environment[J]. Electronic Measurement Tech-

- nology, 2018, 41(1): 59-62.
- [12] 周宝亮, 周东明, 高红卫, 等. 分布式孔径相参合成雷达系统设计与试验研究[J]. 现代防御技术, 2018, 46(3): 112-119.
ZHOU Baoliang, ZHOU Dongming, GAO Hongwei, et al. Research on the distributed aperture coherence-synthetic radar system design and experiment[J]. Modern Defence Technology, 2018, 46(3): 112-119.
- [13] 刘兴华. 分布式多雷达认知协同探测技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
LIU Xinghua. Research on distributed multi-radar cognitive cooperative detection technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [14] 周宝亮, 雷子健, 周东明, 等. 分布式孔径相参雷达预警探测技术[J]. 信号处理, 2018, 34(11): 1130-1138.
ZHOU Baoliang, LEI Zijian, ZHOU Dongming, et al. Distributed aperture coherent radar early warning detection technology[J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(11): 1130-1138.
- [15] 付强, 王刚, 郭相科, 等. 临空高速目标协同探测跟踪需求分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(4): 757-762.
FU Qiang, WANG Gang, GUO Xiangke, et al. Requirements analysis of collaborative detection and tracking of near space high-speed targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(4): 757-762.
- [16] 徐斐, 蒋敏. 多基地雷达系统协同抗主瓣干扰方法研究[J]. 空天预警研究学报, 2023, 37(2): 116-118.
XU Fei, JIANG Min. Research on the method of multi-base radar system to resist main lobe interference[J]. Journal of Air & Space Early Warning Research, 2023, 37(2): 116-118.
- [17] 李强. 多站雷达抗有源欺骗式干扰方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
LI Qiang. Study on active deception ECCM in multiple-radar systems[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [18] 干鹏, 周生龙, 李贵显, 等. 分布式MIMO雷达欺骗干扰抑制算法研究[J]. 航天电子对抗, 2019, 35(2): 25-32.
GAN Peng, ZHOU Shenglong, LI Guixian, et al. Research of algorithm against deceptive interference based on distributed MIMO radar[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2019, 35(2): 25-32.
- [19] BROCKZKOWSKI V, BROCKZKOWSKI J, BAILEY D, et al. Modular open RF architecture (MORA): standardizing the RF chain[C]// 2019 NDIA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium. Novi, Michigan: NDIA Press, 2019.
- [20] 艾小锋, 赵峰. 双/多基地雷达目标探测与识别[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
AI Xiaofeng, ZHAO Feng. Dual/multi-base radar target detection and recognition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.

作者简介:

廖胜男 女,1984年生,硕士,研究员,研究方向为雷达系统总体设计与抗干扰技术;

陈燕 女,1973年生,硕士,研究员,研究方向为雷达系统总体设计与体系化应用;

鲁耀兵 男,1965年生,博士,研究员,博士生导师,研究方向为雷达系统总体设计;

王德伍 男,1988年生,硕士,研究员,研究方向为雷达系统总体设计;

袁耀辉 男,1995年生,硕士,工程师,研究方向为雷达系统总体设计。