

机载雷达组网 射频隐身技术

RADIO FREQUENCY STEALTH TECHNOLOGY
FOR AIRBORNE RADAR NETWORK



■ 时晨光 周建江 汪飞 李海林 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

机载雷达组网射频 隐身技术

时晨光 周建江 汪 飞 李海林 著

国防工业出版社

·北京·

内容简介

本书主要研究机载雷达组网系统的射频隐身技术,从发射功率控制及分配、资源管理、波形优化设计等方面,对机载雷达组网系统的射频隐身性能进行了深入地研究,并探讨了基于外辐射源机载雷达组网系统的发射机选择策略。全书共分7章,介绍了雷达组网系统与飞机射频隐身技术的发展历程,研究了基于射频隐身的机载雷达组网合作博弈功率控制技术、机载雷达组网跟踪模式下基于射频隐身的功率分配和资源管理技术、基于射频隐身的机载雷达组网雷达波形设计方法、频谱共享环境下基于射频隐身的正交频分复用雷达波形设计方法,以及基于调频广播外辐射源机载雷达组网的发射机选择策略。

本书总结了作者多年来在射频隐身技术上的研究成果,对于从事飞机射频隐身技术和机载雷达组网系统研究工作的工程技术人员具有参考价值。本书也可作为高等院校信号与信息处理和相关专业的高年级本科生和研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机载雷达组网射频隐身技术/时晨光等著. —北京:国防工业出版社, 2018.12

ISBN 978-7-118-11702-8

I. ①机… II. ①时… III. ①机载雷达—射频—隐身技术

IV. ①TN959.73 ②TN974

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第287939号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

三河市德鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 12¼ 字数 217千字

2019年2月第1版第1次印刷 印数 1—1500册 定价 66.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

前 言

随着网络与信息技术的发展，战场系统网络化是未来战争的基本形态，未来变革的方向是“以传感器为中心的战争”转化为“以网络为中心的战争”，单部雷达或多部雷达的简单组合、叠加已不能满足联合作战的需要。机载雷达组网依托网络化的传感器系统，通过信息融合为指挥员提供实时、透明的空间感知，是未来雷达装备的发展方向。然而，敌方无源探测系统对机载雷达组网的战场生存能力和突防能力构成了严重威胁。在此背景下，本书主要讨论如何根据目标信息合理地设计雷达发射机工作参数，进而在满足目标探测和跟踪性能的条件下提升系统的射频隐身性能。在充分了解国内外相关研究现状的基础上，本书从发射功率分配、资源管理、波形设计及优化等方面，对机载雷达组网系统的射频隐身性能进行了深入的研究，并探讨了基于外辐射源机载雷达组网系统的发射机选择策略。

本书主要以作者所在课题组的研究工作和原始论文为基础，主要内容共分7章。第一章概括介绍机载雷达组网系统及飞机射频隐身技术的发展状况；第二章针对机载雷达组网探测模式下的射频隐身问题，介绍基于合作博弈的机载雷达组网分布式功率控制方法；第三章和第四章针对机载雷达组网跟踪模式下的射频隐身问题，围绕辐射功率、采样间隔、驻留时间等雷达工作参数设计，分别介绍基于射频隐身的功率分配及资源管理方法；第五章针对机载雷达组网系统的波形设计问题，介绍基于射频隐身的机载雷达组网雷达波形设计方法；第六章围绕雷达与通信系统的频谱共享问题，介绍基于射频隐身的正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）雷达波形设计方法；第七章介绍基于调频（Frequency Modulation, FM）广播信号的外辐射源机载雷达组网系统，并围绕多传感器选择问题，讨论基于调频外辐射源机载雷达组网的发射机选择方法。

本书由时晨光博士、周建江教授、汪飞副教授和李海林博士执笔。时晨光博士对本书中的大量理论进行了推导和仿真验证。全书由时晨光博士和周建江教授审校。感谢英国杜伦大学工程与计算科学学院 Sana Salous 教授和赫尔瓦特大学工程与物理科学学院 Mathini Sellathurai 教授在雷达信号处理研究过程中给

予作者的指导与帮助。感谢江苏科技大学电子信息学院张贞凯博士就相关问题与作者进行的深入讨论。

本书在撰写和出版过程中，参考了众多学者的论著及研究成果，中国电子科技集团公司、中国航空工业集团公司所属研究所和相关高校的科技工作者朱银川、王合龙、周德召、孙厚俊、严俊坤、易伟等也给了作者许多有益启发和宝贵意见，同样向他们表示深深的谢意。国防工业出版社对本书的出版提供了细致的帮助，在此向他们表示诚挚的敬意。

同时，本书得到了国家自然科学基金青年基金项目（No. 61801212）、国家自然科学基金面上项目（No. 61371170, No. 61671239）、航空科学基金（No. 20172752019, No. 2017ZC52036, No. 20152052028）、江苏省基础研究计划（自然科学基金）青年基金项目（No. BK20180423）、南京航空航天大学引进人才科研启动基金、电磁频谱空间认知动态系统工信部重点实验室（南京航空航天大学）开放课题（No. KF20181916）、雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室、电磁频谱空间认知动态系统工信部重点实验室（南京航空航天大学）和江苏省高校优势学科建设项目的资助。

由于作者精力和水平有限，加之雷达信号处理技术正处于迅速发展之中，书中难免还存在一些疏漏和不足之处，恳请业界专家、学者以及广大读者批评、指正。

作者
2018年9月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 雷达组网系统概述.....	3
1.3 国内外研究现状.....	5
1.3.1 雷达组网系统研究现状.....	5
1.3.2 飞机射频隐身技术研究现状.....	12
1.3.3 多传感器协同与管理研究现状.....	21
1.4 本书章节安排.....	24
第二章 机载雷达组网探测模式下基于合作博弈的功率控制	27
2.1 引言.....	27
2.2 系统模型.....	29
2.3 基于 NBS 的机载雷达组网功率控制算法.....	31
2.3.1 基于 NBS 的分布式功率控制模型.....	31
2.3.2 NBS 的存在性与唯一性证明.....	34
2.3.3 迭代公式求解.....	36
2.4 仿真结果与分析.....	38
2.4.1 仿真参数设置.....	38
2.4.2 功率控制结果分析.....	38
2.5 小结.....	45
第三章 机载雷达组网跟踪模式下基于射频隐身的功率分配	46
3.1 引言.....	46
3.2 机载雷达组网系统模型.....	47
3.2.1 机载雷达组网系统方程.....	47
3.2.2 信号模型.....	49
3.2.3 二元假设检验.....	50
3.3 机载雷达组网目标跟踪模型.....	52
3.3.1 目标跟踪模型.....	52

3.3.2	IMM-EKF 算法	54
3.4	基于射频隐身的机载雷达组网功率优化分配模型	57
3.4.1	优化模型的建立	57
3.4.2	基于非线性规划的遗传算法	61
3.5	仿真结果与分析	64
3.5.1	仿真参数设置	64
3.5.2	仿真结果	66
3.6	小结	69
第四章	机载雷达组网跟踪模式下基于射频隐身的资源管理	70
4.1	引言	70
4.2	机载雷达组网系统模型	71
4.3	机载雷达组网目标跟踪模型	73
4.3.1	目标跟踪模型	73
4.3.2	IMM-EKF 算法	75
4.4	机载雷达组网的截获概率	76
4.5	基于射频隐身的机载雷达组网资源管理模型	78
4.5.1	优化模型的建立	78
4.5.2	优化模型的求解	80
4.6	仿真结果与分析	86
4.6.1	仿真参数设置	86
4.6.2	仿真结果	88
4.7	小结	93
第五章	基于射频隐身的机载雷达组网雷达波形设计	94
5.1	引言	94
5.2	机载雷达组网最优雷达波形设计算法	95
5.2.1	扩展目标冲激响应模型	95
5.2.2	基于 SINR 准则的最优雷达波形设计算法	98
5.2.3	基于 MI 准则的最优雷达波形设计算法	101
5.3	机载雷达组网稳健雷达波形设计算法	105
5.3.1	不确定性模型	105
5.3.2	基于 SINR 准则的稳健雷达波形设计算法	106
5.3.3	基于 MI 准则的稳健雷达波形设计算法	107
5.3.4	算法分析	108

5.4	仿真结果与分析	109
5.5	小结	116
第六章	频谱共享环境下基于射频隐身的 OFDM 雷达波形设计	117
6.1	引言	117
6.2	系统模型	118
6.3	基于射频隐身的最优 OFDM 雷达波形设计算法	121
6.3.1	问题描述	121
6.3.2	最优 OFDM 雷达波形设计准则 1	121
6.3.3	最优 OFDM 雷达波形设计准则 2	126
6.3.4	最优 OFDM 雷达波形设计准则 3	129
6.3.5	算法分析	132
6.4	基于射频隐身的稳健 OFDM 雷达波形设计算法	132
6.4.1	不确定性模型	132
6.4.2	稳健 OFDM 雷达波形设计准则 1	134
6.4.3	稳健 OFDM 雷达波形设计准则 2	135
6.4.4	稳健 OFDM 雷达波形设计准则 3	136
6.5	仿真结果与分析	137
6.5.1	仿真参数设置	137
6.5.2	OFDM 雷达波形设计结果	138
6.5.3	射频隐身性能分析	141
6.6	小结	143
第七章	基于 FM 外辐射源机载雷达组网的发射机选择	144
7.1	引言	144
7.2	基于 FM 外辐射源的机载雷达组网系统模型	147
7.2.1	外辐射源雷达系统工作原理	147
7.2.2	可行性分析及关键技术	147
7.2.3	信号模型	149
7.3	莱斯起伏目标参数估计的联合克拉美-罗下界	150
7.3.1	最大似然估计	150
7.3.2	Fisher 信息矩阵和克拉美—罗下界	152
7.3.3	仿真结果与分析	156
7.4	基于 FM 外辐射源机载雷达组网的发射机选择算法	161
7.4.1	基于最小子集策略的 FM 发射机选择算法	162

7.4.2	基于最优参数估计策略的 FM 发射机选择算法	163
7.4.3	仿真结果与分析	164
7.5	小结	167
附录 A	168
附录 B	170
附录 C	173
参考文献	175

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

雷达是英文 Radar 的音译，原意是无线电探测与测距（Radio Detection and Ranging）^[1]。雷达发射电磁波照射目标，通过接收回波并从中提取目标的距离、方位、俯仰、速度等尺度信息和形状、材质等目标特性信息。雷达自 20 世纪 30 年代投入应用以来，其功能已由最初的目标探测与测距扩展到现在的预警探测、跟踪引导、导航控制、武器制导、遥测遥控、地形测绘、气象预报等多种功能。作为一种全天候探测手段，雷达已逐渐成为民用和军事领域的重要传感器。汽车防撞、民用导航、气象预报、资源勘探、地形测绘等民用方面的广泛应用，给人们的生活带来了极大的方便；远程预警、目标跟踪、导弹制导、武器控制、目标成像、遥测遥控等军事方面的广泛应用，使得雷达已成为现代战争和国土防御，乃至当今陆、海、空、天、赛博一体化联合作战的重要装备^[2]。

在未来信息化战争中，单部雷达或多部雷达的简单组合、叠加，已不能满足联合作战的需要。因此，在进入网络时代的今天，雷达与多雷达系统的一体化是现代战争与信息战的必然要求，同时也是信息时代雷达系统发展的必然趋势。从武器装备发展规律来看，体系对抗与作战系统网络化是未来高技术战争的特点，依托高度发达的信息网络技术，未来变革的方向是“以传感器为中心”的战争转化为“以网络为中心”的战争，依赖网络化的战场系统，通过雷达组网系统信息融合为指挥员提供实时、透明的空间感知。它可从多视角、多维度提取目标特征信息，更有利于分析、识别威胁，从根本上消除虚警，更准确、更可靠地估计探测区域内威胁目标的位置、数量、属性和技术参数等，缩短反应时间，快速引导对抗措施，确保战术需求。近年来，传感器元器件水平、计算机软硬件能力和网络同步技术的不断提高，为机载雷达组网系统的实现特供了可能。机载雷达组网系统是指将不同工作体制、不同工作模式、不同极化方式的机载雷达适当组网，借助于机间数据链链接成网，由长机或系统融合中心统一调配而形成的一个有机整体。机载雷达组网系统可以有效地扩大传统单站相控阵雷达的作用范围，并按照战争态势的变化自适应地调整平台间各机载雷

达的工作状态和辐射参数，充分发挥各雷达的优势，有效完成整个覆盖范围内的目标探测、定位、跟踪和识别等任务。

然而，现代战争中的雷达系统作战环境日趋复杂。无源态势感知、电子情报系统（Electronic Intelligence, ELINT）、信号情报系统（Signal Intelligence, SIGINT）、电子支援措施（Electronic Support Measures, ESM）、雷达告警接收机（Radar Warning Receiver, RWR）、反辐射导弹（Anti-Radiation Missile, ARM）等敌方无源探测系统自身不辐射电磁波，而是通过接收己方雷达辐射的电磁波来实时获得雷达位置和属性等参数，具有作用距离远、隐蔽性强、不易被发现等优点，这对己方战斗机及其编队的战场生存能力和突防能力构成了严重威胁^[3]。据报道，美国 F-22 “猛禽”战斗机的电子战系统由 AN/ALR-94 综合 ESM 系统和 AN/AAR-56 凝视红外阵列的导弹逼近告警系统组成^[4]。其中，AN/ALR-94 综合了 RWR、ESM 精确测向和窄波束交替搜索与跟踪功能，能够在各个频段提供 360° 全方位覆盖，是 F-22 战斗机上最有效的无源传感器系统。AN/ALR-94 可以被动探测到 460km 外的目标，从而实现先敌发现、先敌打击和先敌摧毁。F-35 战斗机装备的 AN/ASQ-329 电子战系统充分借鉴了 F-22 战斗机 AN/ALR-94 综合 ESM 系统的研制技术，同样具有 360° 全方位全频段的信号收集和监视功能，能够同时实施空对地、空对空的作战任务，准确辨别、定位、跟踪和打击敌方地面和空中目标。在某次飞行验证试验中，AN/ASQ-329 电子战系统对目标信号的有效作用范围可达 482.8 km，并能够在 217.6 km 的距离上精确定位雷达目标。

飞机射频（Radio Frequency, RF）隐身技术作为一种重要的有源隐身技术，是对抗敌方无源探测系统，保障战斗机及其编队先敌发现、先敌打击、先敌摧毁的重要手段^[5, 6]。具体来说，飞机射频隐身技术是指机载雷达、数据链、高度表等机载有源电子设备抵御敌方无源探测系统截获、分选、识别的隐身技术，以降低无源探测系统的截获概率、截获距离为目的，从而提升飞机的战场生存能力和突防能力。飞机射频隐身技术与雷达隐身、红外隐身等技术不同，需要在满足系统性能和作战任务的前提下最大限度地减小机载电子设备的射频辐射特征。因此，研究与发展针对机载雷达组网系统的射频隐身技术具有重要的现实意义和广阔的应用前景。

针对上述背景，本书将机载雷达组网技术与射频隐身技术相结合，围绕基于机载雷达组网射频隐身技术研究。本书内容主要从四个方面展开：①针对目标探测模式下的射频隐身问题，提出一种基于纳什议价解（Nash Bargaining Solution, NBS）的机载雷达组网分布式功率控制算法；②针对目标跟踪模式下的射频隐身问题，结合机载雷达组网系统的分集增益和信号级融合特点，分别

提出基于射频隐身的功率分配及资源管理模型；③针对雷达波形设计问题，提出基于射频隐身的机载雷达组网雷达波形设计算法，并针对雷达与通信系统频谱共享的环境，提出基于射频隐身的正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）雷达波形设计算法；④针对机载雷达组网的目标参数估计问题，分析外辐射源机载雷达组网系统的工作原理和关键技术，推导基于调频（Frequency Modulation, FM）广播信号的外辐射源机载雷达组网目标参数估计克拉美—罗下界（Cramér–Rao Lower Bound, CRLB），并提出两种 FM 外辐射源发射机选择算法。

1.2 雷达组网系统概述

雷达组网系统，也称为分布式多输入多输出（Multiple-Input Multiple-Output, MIMO）雷达，是指将多部异地分散部署的发射机在融合中心的控制下同步地发射雷达信号，同时使用多部接收机接收从目标反射的回波信号，并集中处理收发信号的雷达系统^[7-11]。雷达组网系统可实现时域、频域、空域的协同工作，从而完成对目标的探测、跟踪、识别、武器制导等功能。

雷达组网系统借鉴了无线 MIMO 通信中的分集思想，通过利用分集增益能够有效对抗目标雷达散射截面（Radar Cross Section, RCS）起伏、抑制杂波与干扰、提高分辨率等，从而提升雷达系统的目标检测、跟踪、识别和参数估计等能力。雷达组网系统具有空间分集、波形分集、频率分集和极化分集等优势^[12]。研究表明，分集增益是雷达组网系统性能优势的根源，传统的单站相控阵雷达只能从单一视角和维度对目标进行探测，获得的感兴趣目标样本信息较少，而雷达组网系统能够从多视角、多维度提取目标特征信息，并通过多维信息联合处理获得目标更全面、更本质的特征。

本书讨论的雷达组网系统是多站雷达和传统组网雷达概念的延续，对雷达组网系统研究的意义在于组建信号级的融合网络。为表述简洁，若无特殊说明，本书提及的雷达组网系统均指信号级融合网络。传统的组网雷达以单站雷达组网为主，通过点迹和航迹融合实现目标探测，对数据和信息的融合建立在目标层，属于信息级的融合网络，不能综合利用各信道的回波数据提高雷达系统的性能，数据融合度受到很大限制，对目标的识别问题同单部雷达并无明显改变，单站雷达的作用对组网雷达的影响较大。而信号融合网络能够综合利用所有发射—接收路径的回波数据，在信号级进行融合以提高系统的目标检测、跟踪和参数估计等性能^[13, 14]。

在雷达组网系统或分布式 MIMO 雷达概念出现之前，英、俄、美、法、

澳等国已经对双/多站雷达体制开展了一定的研究，并取得了显著成果^[15-19]。1939年9月，英国在东海岸建造了世界上最早的防空预警雷达网络——“本土链”（Chain Home）雷达网，该系统由20个地面雷达站组成，如图1.1所示。在第二年夏天抗击纳粹德国大规模空袭英国的“不列颠空战”中，英国正是靠“本土链”在每次德军空袭时赢得了20min宝贵的预警时间。

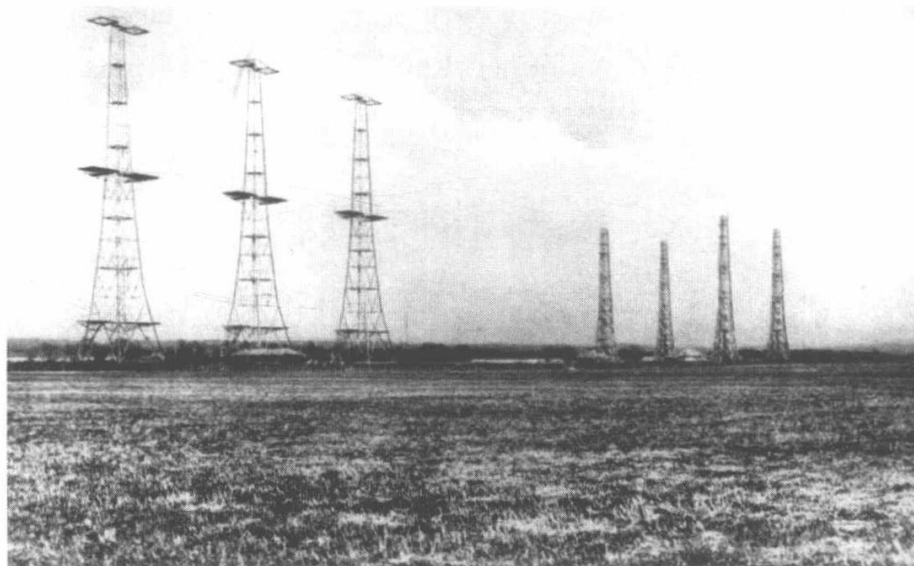


图 1.1 英国“本土链”雷达网

1961年，苏联采用三部单基地脉冲雷达构建了非相参多基地雷达系统，对反弹道导弹试验中的弹头和拦截器进行精密跟踪，该系统具有独立的信号接收和点迹级的信息融合特点^[20]。

20世纪60年代，美国建立并应用于国土防御体系中的SPASUR系统就是一部多基地远程监视防御雷达系统，担负远、中、近程的战略防御任务^[21]。从1978年开始，美国林肯实验室和国防部高级研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）联合开展了组网雷达研究计划，该计划包含五部监视雷达，将所有雷达的输出信息通过窄带数据链路传输到系统融合中心，从而实现战场实时、透明的信息共享^[20]。

20世纪70年代末，为了解决雷达探测隐身目标和提高雷达抗ARM的能力，法国航空航天局提出了采用MIMO天线的综合脉冲孔径雷达（Synthetic Impulse and Aperture Radar, SIAR），该系统通过对窄带正交信号进行脉冲综合，从而获得高的距离分辨力，如图1.2所示^[22]。

澳大利亚建造的JORN超视距雷达（Over the Horizon Radar, OTHR）网络，由两部可遥控的高频天波雷达和一个系统控制中心组成，每部雷达的发射站和接收站相距80 km以上，在系统融合中心完成信息汇总，如图1.3所示。



图 1.2 法国 SIAR 系统



图 1.3 澳大利亚 JORN 雷达网

2004 年,英国伦敦大学学院的 Griffiths H 研究团队研制了由三部收/发一体的相参雷达组成的多站雷达原型试验机,该系统采用集中式数据处理方式。另外,他们利用该系统对雷达接收机噪声、杂波和多种回波信号进行了研究^[12]。

近年来,雷达组网系统也吸引了越来越多的国内科研机构与团队开展研究工作,清华大学^[23, 24]、西安电子科技大学^[25, 26]、电子科技大学^[27, 28]、南京理工大学^[29]、国防科学技术大学^[30]等多所高校的专家学者从 2007 年至今,在雷达组网系统及分布式 MIMO 雷达目标检测、协同跟踪、参数估计、目标成像和信号设计等方面正开展着理论和试验平台的研究。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 雷达组网系统研究现状

雷达组网系统作为一种有别于传统单站相控阵雷达的新体制雷达,在目标

检测、目标跟踪、目标识别、参数估计以及分辨能力等方面具有潜在的优势，受到了国内外众多学者和研究机构的高度关注。本节将从雷达组网系统目标检测、目标跟踪、参数估计、波形设计及资源优化管理 5 个方面进行阐述。

1. 目标检测

目标检测的目的是确定雷达系统量测值到底是目标回波信号还是噪声、干扰信号，这是目标距离、方位、速度等参数估计和目标跟踪、识别的前提。其中，目标检测器的设计与分析是良好检测性能的必要保证。与传统相控阵雷达的目标检测类似，当假设检验中概率密度函数完全已知时，在一定的虚警概率条件下，使得检测概率最大化的检测器为最佳接收机，即满足 Neyman-Pearson 准则得到的似然比检验；当概率密度函数不完全已知时，则采用最大似然估计对未知参数进行估计，然后再用广义似然比检验（Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT）设计检测器^[13]。2011 年，美国的 Wang P 等人研究了杂波环境中分布式 MIMO 雷达的目标检测问题，分别提出了集中式 MIMO-GLRT 检测器^[31]和分布式 MIMO-GLRT 检测器^[32]。其中，集中式 MIMO-GLRT 检测器需要各接收机将接收到的雷达回波信号发送到融合中心集中处理，而分布式 MIMO-GLRT 检测器只需将局部检验统计量发送至融合中心进行处理。仿真结果表明，分布式检测器不仅可以近似达到集中式检测器的性能，而且极大地减小了对数据传输带宽的要求和能量消耗。2014 年，美国的 Hack D E 等人则在文献[33]中将源雷达组网的目标检测问题推广到外辐射源雷达组网中，首次研究了基于外辐射源信号的 MIMO 雷达组网系统目标检测性能，并取得了良好的效果。Ali T 等人^[34]将集中式 MIMO 雷达应用于传感器网络的联合目标检测与定位中，并采用最小均方误差（Minimum Mean-Square Error, MMSE）接收机减小干扰与硬件实现复杂度。2015 年，Li H B 等人^[35]研究了收发站运动情况下分布式 MIMO 雷达系统的动目标检测性能，在考虑平台运动的情况下，针对稀疏杂波模型和参数自回归杂波模型，分别提出了两种 GLRT 检测器。

目标检测问题的关键在于获得最大信噪比。通常而言，对于发射功率一定的雷达组网或分布式 MIMO 雷达系统而言，最大信噪比的获得取决于目标回波信号的处理方式以及系统发射机和接收机相对目标的几何位置关系^[13]。对于传统相控阵雷达而言，目标 RCS 随雷达视线角的变化较为剧烈，而目标 RCS 闪烁将引起虚警和漏警，从而降低雷达系统的检测性能。雷达组网系统利用其分集增益，通过不同视线角接收的目标回波信号能量叠加，较好地克服了目标 RCS 起伏带来的性能损失，保证了目标检测性能的稳健性和可靠性。2006 年，Fisher E 等人^[36]研究了单脉冲处理模式下分布式 MIMO 雷达、多输入单输出（Multiple-Input Single-Output, MISO）雷达、单输入多输出（Single-Input Multiple-

Output, SIMO) 雷达和相控阵雷达的目标检测性能, 指出在检测概率高于 80% 且系统信噪比相同时, 由于分布式 MIMO 雷达具有空间分集优势, 其检测性能明显优于其他三种雷达体制。2011 年, Song X F 等人^[37]对比了发射正交波形和相同波形的分布式 MIMO 雷达系统检测性能。仿真结果说明, 在高信噪比条件下, 正交发射信号的目标检测性能优于相同发射信号, 而在低信噪比和特殊系统结构条件下, 相同发射信号的检测性能优于正交信号。2015 年, 电子工程学院的宋靖和张剑云^[38]研究了基于多脉冲发射的分布式全相参雷达性能, 通过推导输出信噪比增益的数学表达式, 并结合相干参数估计的 (CRLB), 得到了输出信噪比增益上界的数值解。分析指出, 增加脉冲数或发射天线数可以提高系统的输出信噪比增益; 当输入信噪比较小时, 输出信噪比增益随接收天线的增加而减小, 当输入信噪比较大时, 输出信噪比增益随接收天线的增加而变大。2017 年, 电子科技大学的程子扬等人^[39]根据分布式 MIMO 雷达收发站间的几何位置关系, 推导了低信噪比条件下相位随机 MIMO 雷达和幅相随机 MIMO 雷达的平方律检测器结构, 并分析了这两种非相参检测器的检测性能。仿真结果指出, 相比传统的单站相控阵雷达系统, 相位随机 MIMO 雷达和幅相随机 MIMO 雷达可达到高于 10 dB 的改善增益。需要说明的是, 除了空间分集以外, 波形分集、频率分集和极化分集同样可以达到提升目标检测性能的效果。

2. 目标跟踪

雷达组网系统由于自由度的增加, 较之传统相控阵雷达在目标跟踪精度、抗干扰性能等方面具有明显优势。2001 年, 中国科学技术大学的徐洪奎等人^[40]提出了一种基于快速卡尔曼滤波的雷达组网机动目标跟踪算法, 融合中心根据每部雷达接收机量测得到的目标距离, 采用改进的卡尔曼滤波方法进行迭代计算目标的运动状态, 实现了对近距离高速机动目标的精确跟踪, 而且减小了计算复杂度。2009 年, Godrich H 等人^[41]研究了不同分布式 MIMO 雷达结构对目标跟踪性能的影响。研究表明, 目标跟踪精度与系统中雷达发射机和接收机数目的乘积以及目标相对于各发射机和接收机的几何位置关系有关, 即增加雷达发射机和接收机的数目、尽量从多个视角对目标进行照射, 可获得更高的目标跟踪精度。2013 年, 法国的 Hachour S 等人^[42]提出了基于信条分类的多传感器多目标联合跟踪与分类算法, 根据目标运动状态及加速度信息, 采用信条分类器获得目标所属的类型集合。2014 年, 军械工程学院的罗浩等人^[43]针对提高火控雷达跟踪精度和反隐身、反低空/超低空突防等作战需求, 研究了火控雷达组网系统的传感器分配问题, 分别提出了单部火控雷达对单目标进行跟踪、多部火控雷达对单目标进行跟踪和多部火控雷达对单目标间歇跟踪三种算法, 并进

行了仿真对比和分析,验证了所提算法的可行性和有效性。在以单站雷达为主的组网雷达系统中,由于各异地、分散部署的雷达接收机处的目标信噪比不同,使得系统中所有雷达无法同时探测到目标的存在。针对此问题,西安电子科技大学的刘宏伟等人^[44]提出了基于目标跟踪信息的组网雷达系统协同航迹起始算法,该算法根据目标运动状态的先验信息,在保证一定虚警概率的前提下,降低未探测到目标的雷达检测器阈值,并引导雷达波束对准目标将出现的方位,从而提升系统的目标航迹起始概率。严俊坤等人^[45]定量研究了数据融合对多雷达系统目标跟踪的影响。

针对欺骗干扰环境下的雷达组网目标跟踪技术,2007年,国防科学技术大学的赵艳丽等人^[46]研究了多假目标欺骗干扰下雷达组网目标跟踪技术:首先对所有量测数据进行预处理,将问题简化为单雷达多目标跟踪;然后根据目标优先级进行数据关联,从而有效剔除假目标,并确保对真目标的精确跟踪。2015年,浙江大学的杨超群等^[47]研究了欺骗干扰下雷达组网系统的目标跟踪性能,并分析了不同系统参数对目标跟踪性能的影响。在压制干扰环境下,2012年,海军航空工程学院的李世忠、王国宏等人^[48]提出了一种基于分布式干扰的雷达组网目标跟踪算法,该算法包含分布式干扰下的量测模型和基于交互式多模型(Interacting Multiple Model, IMM)的序贯滤波跟踪两部分,仿真验证了所提算法的有效性。2014年,西安电子科技大学的胡子军等人^[49]则针对无源相参雷达组网系统高速机动多目标跟踪问题,提出了一种基于扩展多模型概率假设密度滤波器的粒子滤波算法,实时初始化位置随机的高速运动的新目标,从而实现个数时变的高速机动多目标的有效跟踪。上述雷达组网系统对目标跟踪的研究主要在雷达自身的局部坐标系中,很少考虑地球曲率对干扰条件下雷达组网目标跟踪的影响。2015年,贺达超等人^[50]则考虑到地球曲率对系统跟踪性能的影响,提出了一种压制干扰下基于无偏转换测量卡尔曼滤波(Unbiased Converted Measurement Kalman Filter, UCMKF)的雷达网目标跟踪方法。首先将网络中各雷达的量测数据统一到地心直角坐标系中进行数据压缩,然后采用基于UCMKF的序贯滤波方法对压缩后的数据进行跟踪,仿真实验验证了在大功率集中式压制干扰下,该算法可保证雷达组网系统对目标跟踪的连续性和稳定性,为复杂电磁环境下雷达组网系统的目标跟踪奠定了基础。

3. 参数估计

强大的目标参数估计能力是雷达组网系统的优势之一,而分集增益正是该优势的本质原因。与传统相控阵雷达一样,雷达组网系统通常估计的目标参数有目标距离、方位和速度等。然而,由于雷达组网系统具有分集优势,其目标参数估计性能优于传统雷达。通常,采用CRLB表征目标参数估计性能。