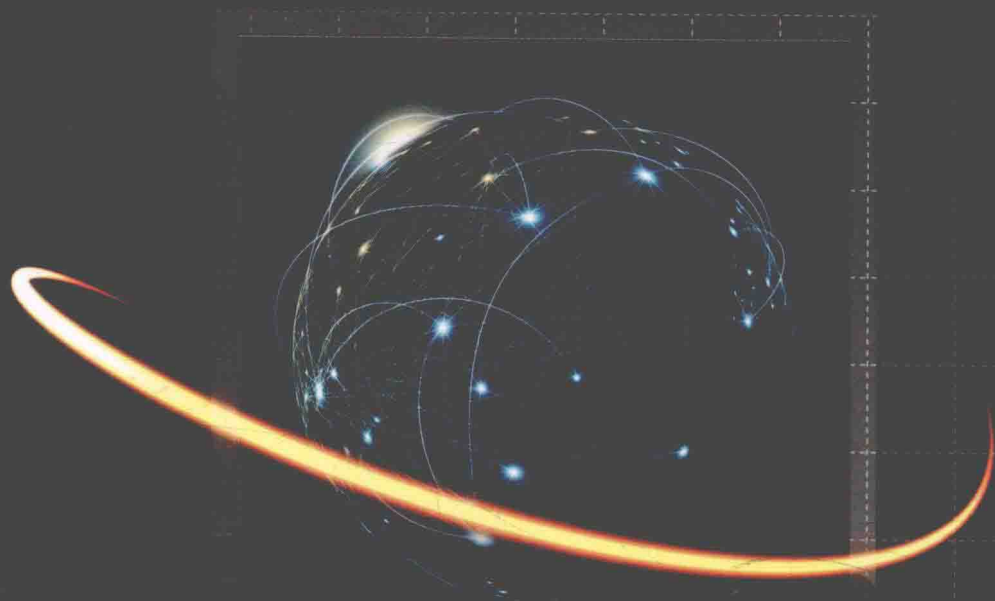




高端科技专著丛书

组网雷达系统 建模与仿真

◆ 赵 锋 艾小锋 刘 进 饶 彬 赵艳丽 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

高端科技专著丛书

组网雷达系统建模与仿真

赵 锋 艾小锋 刘 进 饶 彬 赵艳丽 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

组网雷达系统是雷达系统建设发展的重要趋势,是当前关注的重点,在组网雷达系统研制与试验过程中,建模与仿真是一种极为有效的手段,能提高效率、降低成本。在对 10 余项组网雷达系统及其对抗关键技术研究的基础上,本书总结出一套有效的组网雷达系统建模与仿真方法,能为组网雷达系统论证、研发及性能评估等提供支撑,能够给广大雷达技术研究者提供参考。本书共 9 章,着重阐述了单基地雷达系统、分布式组网雷达系统、集中式组网雷达系统、雷达交接班、双/多基地组网雷达系统、组网雷达系统对抗性能评估等建模与仿真方法,以及组网雷达系统对抗效能评估方法,并给出了多种模式组网雷达系统开发实例。

本书主要供从事雷达系统、组网雷达系统研究、设计与试验的科技工作者参考,也可作为高等院校信息类专业研究生的教学参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

组网雷达系统建模与仿真/赵锋等编著. —北京:电子工业出版社, 2018.1

(高端科技专著丛书)

ISBN 978-7-121-33293-7

I. ①组… II. ①赵… III. ①雷达系统—网络系统—系统建模②雷达系统—网络系统—系统仿真
IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 309745 号

策划编辑:曲 昕

责任编辑:靳 平

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21.25 字数:544 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价:79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: quxin@phei.com.cn。

组网雷达系统将多部不同体制、不同频段、不同工作模式、不同极化方式的雷达进行适当部署,通过通信数据链相互链接构成网络,由中心站统一调配而形成有机整体,借助信息融合技术将网络内各雷达的探测信息经综合处理后形成最终的雷达情报。组网雷达系统可按照作战需要灵活调整网内雷达的工作状态,发挥各自优势,从而形成预警探测防空网的电磁优势和信息优势,使其整体作战能力得到极大提高,特别是在复杂电磁环境背景下,组网雷达的作战能力优势更是得到充分体现。

近年来,组网雷达系统得到了长足的发展,越来越多的装备升级改造加入了组网功能,越来越多的组网雷达系统开始部署,组网雷达系统作战效能若采用实地试验的方式进行评估,不仅需要消耗大量的人力和物力资源,而且试验的环境还会受到各种外界因素的干扰,得不到准确的实验结果,而采用建模与仿真技术搭建仿真平台来进行组网效能的评估,不但能节省资源的消耗,而且还能重复进行试验,因此,采用建模与仿真技术搭建仿真平台的方式来研究雷达网性能成为必然选择。

本书作者所在的科研团队在组网雷达及其对抗领域进行了长期深入的研究,本书是近十年来集体智慧的结晶。本书围绕组网雷达系统及其对抗中的建模与仿真技术,从单部雷达建模、分布式组网、集中式组网、交接班组网、双/多基地组网、组网雷达对抗等多个角度,全面、系统地介绍了我们所做的工作,以期为组网雷达系统设计、研制、试验、性能评估等提供模型支撑和技术参考。

本书共9章,第1章介绍了组网雷达系统及其对抗的研究进展;第2章介绍了组网雷达系统基本单元的建模与仿真方法,主要包括单部相控阵雷达的功能建模及信号建模;第3章介绍了分布式组网雷达系统建模与仿真,主要有分布式组网雷达系统关键数学模型,包括航迹关联模型和航迹融合模型等,分布式组网雷达仿真系统实现方法,包括通信量和实时性的估算、硬件架构和软件流程等;第4章介绍了集中式组网雷达系统建模与仿真,主要有集中式组网雷达系统的典型数学模型,包括航迹起始模型、跟踪滤波模型、数据关联模型等,集中式组网雷达仿真系统实现方法,包括通信量和实时性的估算、硬件架构和软件流程等;第5章介绍了雷达交接班建模与仿真,主要包括预警引导信息与引导策略、预警系统中段弹道预测误差模型、弹道导弹预警引导信息误差统计模型、引导信息下的制导雷达搜索空域划分模型等;第6章介绍了双/多基地组网雷达系统建模与仿真,主要包括目标双基地散射模型、双基地观测运动模型、动态回波模型、双/多基地目标检测模型等;第7章介绍了组网雷达干扰的建模与仿真,主要包括传统干扰模型、单部雷达组网干扰模型及双/多基地雷达组网干扰模型等;第8章介绍了组网雷达系统对抗性能评估方法,主要包括单部雷达组网和双/多基地

雷达组网系统对抗性能评估指标和评估方法等；第9章介绍了组网雷达仿真系统开发实例，主要包括仿真系统框架、数据交互、时间管理及同步等。

本书由国防科技大学赵锋主编和统稿，是历时近十年系统研制和工程应用实践的初步经验总结。其中，第5章、第9章由赵锋编写；第3章、第4章由饶彬编写；第1章、第6章由艾小锋编写；第2章、第7章由刘进编写；第8章由赵艳丽、饶彬编写。

本书的出版受到国家自然科学基金项目（No.61401491，No.61490692，No.61101180）资助，在此表示感谢。编写过程中，国防科技大学肖顺平、王雪松、王伟、李永祯，中国航天科技集团公司一院十四所刘佳琪、刘向荣，从篇章结构到具体技术内容，提出了宝贵的意见和建议，课题组赵志超、邹小海、宗志伟、宋济慈、甄晓鹏、黄光才等同学也付出了劳动，电子工业出版社曲昕编辑为本书的出版付出了辛勤的努力，在此一并致以衷心的感谢！向本书参考文献的有关作者致以衷心的感谢。

本书可供从事组网雷达及其对抗装备研究、设计、试验和评估的工程技术人员参考，也可作为高等院校相关专业教师和研究生的参考用书。由于雷达技术、雷达组网技术、雷达组网对抗技术快速发展，新理论、新技术日新月异，加之作者技术水平有限，书中难免存在不足和错误之处，诚恳希望广大读者批评指正。

作者

2017年12月

第 1 章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 组网雷达系统的发展	(1)
1.2.1 组网雷达系统的基本概念	(1)
1.2.2 组网雷达系统的几种模式	(2)
1.2.3 组网雷达系统的典型实例	(4)
1.2.4 组网雷达系统的关键技术	(5)
1.3 组网雷达系统对抗技术的发展	(8)
1.3.1 网络化侦察	(8)
1.3.2 分布式干扰	(8)
1.3.3 航迹欺骗干扰	(9)
1.3.4 通信链干扰	(9)
1.4 雷达电子战建模与仿真的发展	(9)
1.4.1 雷达电子战建模与仿真技术的需求	(9)
1.4.2 雷达电子战建模与仿真技术的发展	(10)
1.4.3 组网雷达系统建模与仿真技术的发展	(16)
参考文献	(17)
第 2 章 单基地雷达系统建模与仿真	(19)
2.1 概述	(19)
2.2 雷达系统功能仿真方法与应用	(19)
2.2.1 功能仿真概述	(19)
2.2.2 仿真系统开发	(24)
2.2.3 仿真应用	(28)
2.3 相控阵雷达系统的相干视频信号建模与仿真应用	(31)
2.3.1 相控阵雷达系统的相干视频信号仿真	(31)
2.3.2 相控阵雷达系统的相干视频信号建模	(34)
2.3.3 仿真应用	(44)
参考文献	(58)
第 3 章 分布式组网雷达系统建模与仿真	(60)
3.1 概述	(60)

3.2	分布式组网雷达系统的基本原理	(60)
3.2.1	体系结构	(61)
3.2.2	基本特点	(62)
3.2.3	技术内涵	(64)
3.3	分布式组网雷达系统的性能分析	(71)
3.3.1	抗干扰能力分析	(71)
3.3.2	融合精度分析	(72)
3.4	分布式组网雷达系统关键数学模型	(81)
3.4.1	分布式组网雷达航迹预处理技术	(81)
3.4.2	分布式组网雷达航迹关联模型	(85)
3.4.3	分布式组网雷达航迹融合模型	(89)
3.5	分布式组网雷达系统的实现	(92)
3.5.1	通信量分析	(92)
3.5.2	实时性估算	(93)
3.5.3	软件流程	(98)
3.6	分布式组网雷达仿真系统实例	(100)
3.6.1	仿真系统组成	(100)
3.6.2	仿真系统工作过程	(101)
3.6.3	仿真系统实现注意事项	(101)
3.6.4	仿真结果	(102)
	参考文献	(103)
第4章	集中式组网雷达系统建模与仿真	(105)
4.1	概述	(105)
4.2	集中式组网雷达系统的基本原理	(105)
4.2.1	体系结构	(106)
4.2.2	基本特点	(107)
4.2.3	技术内涵	(108)
4.3	集中式组网雷达系统的性能分析	(112)
4.3.1	抗干扰能力分析	(112)
4.3.2	反隐身能力分析	(113)
4.3.3	融合精度分析	(115)
4.3.4	航迹合成能力分析	(116)
4.4	集中式组网雷达系统关键数学模型	(118)
4.4.1	航迹起始模型	(118)
4.4.2	集中式组网雷达跟踪滤波模型	(120)
4.4.3	集中式组网雷达成点迹关联模型	(137)
4.4.4	集中式组网雷达航迹管理模型	(141)
4.5	集中式组网雷达系统的实现	(142)
4.5.1	通信量分析	(142)

4.5.2	实时性估算	(143)
4.5.3	软件流程	(144)
4.6	集中式组网雷达仿真系统实例	(146)
	参考文献	(147)
第5章	雷达交接班建模与仿真	(149)
5.1	概述	(149)
5.2	预警引导信息与引导策略	(149)
5.2.1	预警引导信息的涵盖内容描述	(150)
5.2.2	预警引导信息的引导策略	(150)
5.3	预警系统中段弹道预测误差模型	(153)
5.3.1	基于坐标变换的中段弹道预测模型	(154)
5.3.2	中段弹道预测误差模型	(158)
5.3.3	中段弹道预测仿真结果及分析	(160)
5.4	弹道导弹预警引导信息误差统计模型	(163)
5.4.1	均匀球模型	(163)
5.4.2	高斯球模型	(164)
5.4.3	高斯椭球模型	(165)
5.5	引导信息下的制导雷达搜索空域划分模型	(166)
5.5.1	基于位置引导信息的搜索空域静态划分模型	(166)
5.5.2	基于速度引导信息的搜索空域动态更新模型	(169)
5.5.3	仿真结果及分析	(172)
5.6	引导信息下的最优波位搜索时序模型	(174)
5.6.1	精确位置引导信息下的最优波位搜索时序模型	(174)
5.6.2	高精度速度引导信息下的最优搜索时序模型	(177)
	参考文献	(186)
第6章	双/多基地组网雷达系统建模与仿真	(188)
6.1	概述	(188)
6.2	目标双基地散射特性建模	(188)
6.2.1	双基地 RCS 等效模型	(188)
6.2.2	双基地散射中心模型	(189)
6.2.3	双基地观测目标运动模型	(190)
6.2.4	双基地雷达目标动态回波生成方法	(199)
6.3	双/多基地雷达融合检测模型	(204)
6.3.1	集中式检测模型	(204)
6.3.2	分布式检测模型	(205)
6.3.3	密集多目标检测模型	(208)
6.4	双/多基地雷达融合定位与跟踪模型	(213)
6.4.1	双/多基地雷达目标定位模型	(213)
6.4.2	双/多基地雷达目标跟踪模型	(216)

6.4.3	双/多基地雷达资源调度与反馈模型	(217)
6.5	T/R-R 复合式双基地雷达联合特征提取模型	(218)
6.5.1	双基地雷达目标一维像的位置及长度	(218)
6.5.2	基于双基定位与一维像的特征提取方法	(219)
6.5.3	仿真实验与结果分析	(222)
	参考文献	(223)
第7章	组网雷达干扰的建模与仿真	(225)
7.1	概述	(225)
7.2	单部雷达干扰模型	(225)
7.2.1	单部雷达噪声干扰模型	(225)
7.2.2	单部雷达欺骗干扰模型	(234)
7.3	单基地组网雷达干扰模型	(240)
7.3.1	组网雷达噪声压制干扰模型	(240)
7.3.2	组网雷达单干扰机欺骗干扰模型	(242)
7.3.3	组网雷达分布式协同欺骗干扰模型	(243)
7.4	双/多基地组网雷达干扰模型	(257)
7.4.1	噪声压制干扰模型	(257)
7.4.2	假目标欺骗干扰模型	(260)
7.4.3	对双基地雷达的分布式干扰模型	(267)
	参考文献	(269)
第8章	组网雷达系统对抗性能评估	(271)
8.1	概述	(271)
8.2	组网雷达系统对抗性能评估的基本准则	(271)
8.2.1	雷达电子战系统评估的内涵	(271)
8.2.2	雷达电子战系统评估的基本准则	(272)
8.3	组网雷达仿真系统试验数据的预处理	(274)
8.3.1	仿真数据录取	(275)
8.3.2	仿真数据预处理	(276)
8.4	组网雷达系统对抗性能评估	(279)
8.4.1	组网雷达系统的固有评估指标	(279)
8.4.2	搜索阶段评估指标	(284)
8.4.3	确认阶段评估指标	(285)
8.4.4	跟踪阶段评估指标	(287)
8.4.5	识别阶段评估指标	(288)
8.5	双/多基地雷达系统对抗性能评估	(289)
8.5.1	双/多基地雷达系统的固有评估指标	(289)
8.5.2	搜索阶段评估指标的模型	(290)
8.5.3	跟踪阶段评估指标的模型	(291)
8.5.4	识别阶段评估指标	(292)

8.6	组网雷达系统对抗性能评估实例	(292)
8.6.1	战情想定	(292)
8.6.2	固有指标评估结果	(293)
8.6.3	集中式组网仿真试验及效果评估	(293)
8.6.4	分布式组网仿真试验及效果评估	(294)
8.6.5	双/多基地仿真试验及效果评估	(295)
	参考文献	(296)
第9章	组网雷达对抗分布式仿真系统实现技术	(297)
9.1	概述	(297)
9.2	组网雷达对抗分布式仿真系统框架	(297)
9.2.1	联邦与联邦成员	(297)
9.2.2	分布式系统结构	(298)
9.3	仿真系统数据交互	(299)
9.3.1	联邦中的对象类	(300)
9.3.2	联邦中的交互类	(304)
9.3.3	数据分发管理设计	(309)
9.4	仿真系统时间管理	(311)
9.4.1	HLA 的时间管理	(312)
9.4.2	SimManager 联邦成员的时间管理	(313)
9.4.3	Missile 联邦成员的时间管理	(313)
9.4.4	Jammer 联邦成员的时间管理	(314)
9.4.5	SBIRS 联邦成员的时间管理	(315)
9.4.6	EWR_Receiver 联邦成员的时间管理	(315)
9.4.7	EWR_Fusion 联邦成员的时间管理	(316)
9.4.8	TGRadar 联邦成员的时间管理	(316)
9.4.9	TGR_Fusion 联邦成员的时间管理	(317)
9.4.10	BMC 联邦成员的时间管理	(317)
9.4.11	Interceptor 联邦成员的时间管理	(317)
9.4.12	Display 和 Collection 联邦成员的时间管理	(318)
9.5	仿真系统的同步	(318)
9.5.1	问题描述	(318)
9.5.2	仿真执行阶段的划分	(319)
9.5.3	同步点简介	(319)
9.5.4	使用同步点	(320)
9.5.5	MOM	(320)
9.5.6	联邦成员同步点操作	(321)
9.6	仿真系统主要流程	(322)
9.6.1	分布式仿真框架流程	(322)
9.6.2	模型处理流程	(323)
	参考文献	(327)

第1章 绪论

1.1 概述

组网雷达是将不同工作频段、不同极化方式的多部雷达部署在不同地域,使得组网雷达扩展在空间和频域上对责任区域的覆盖,将组网雷达内各雷达探测信息进行融合处理,提高覆盖区域的综合探测能力及组网雷达自身的存活能力,持续在战场上给己方提供战场信息,形成全方位、立体化的防御体系。组网雷达需要解决的主要问题有:组网雷达的配置与部署、网内通信的实现、网内雷达时空配准及数据融合处理等。

发展组网雷达的意义,一是为了弥补单雷达先天的探测能力的不足,例如,不能从多个方向照射目标,受视距限制、利用探测信息不够充分等;二是为了降低装备成本,作为过渡措施,通过组网将几部性能较差的雷达组合在一起,期望达到一部更好雷达的性能;三是实现多部雷达间的战术配合,如协同探测、协同抗反辐射等。组网雷达不能脱离雷达独立存在,影响单雷达探测能力的各种因素是组网雷达协同探测研究的重点,包括阵地、频段、照射积累时间等,通常认为组网雷达可以在空间、时间、频率上进行协同探测,但选取何种或几种协同探测取决于协同探测的具体应用。

近年来,组网雷达系统得到了长足的发展,越来越多的装备升级改造加入了组网功能,越来越多的组网雷达系统开始被部署,组网雷达系统作战效能若采用实地试验的方式进行评估,不仅需要消耗大量的人力和物力资源,而且试验的环境还会受到各种外界因素的干扰,得不到准确的实验结果,而采用建模与仿真技术搭建仿真平台来进行组网效能的评估,不但能节省资源的消耗,而且还能重复进行试验,因此,采用建模与仿真技术搭建仿真平台的方式来研究组网雷达系统性能成为必然的选择。

1.2 组网雷达系统的发展

1.2.1 组网雷达系统的基本概念

随着综合电子干扰技术的发展,单部雷达已经很难与电子对抗系统全面抗衡,新的威胁促使雷达向网络化方向发展。组网雷达充分利用单部雷达资源和信息融合优势,把多部不同体制、不同频段、不同工作模式、不同极化方式的雷达进行优化布站,借助于通信手段联网,由中心站统一调配,从而使得雷达在探测、定位、跟踪、识别、抗干扰、反隐身等方面的整体性能得以大幅度改善。

组网雷达系统是通过多部不同体制、不同频段、不同极化方式的雷达适当布站,对网内各部雷达的信息,形成“网”状收集与传递,并由中心站综合处理、控制和管理,从而形成一个统一的有机整体。网内各雷达的信息汇集至中心站综合处理,得出组网雷达覆盖范围内的情报信息、战略态势。然而组网雷达系统与情报综合具有本质的不同,情报综合指的是



将各部雷达站的航迹信息发送至情报中心进行处理,中心将主站航迹当成系统航迹,进而对威胁进行评估,拟订并实施作战方案。但是组网雷达系统将信息数据融合作为关键技术,将各部雷达站的送入信息进行融合,由此可得出许多单部雷达得不到的信息;其次,网内具有信息反馈与控制功能,这样就具备了网的重组能力,以灵活多变的工作方式极大地提高了整个网的“四抗”能力,确保有效的数据、情报上报。组网雷达系统的性能优势是任何单一雷达或以往那种以单纯的情报搜集为目的雷达网所不可攀比的。而且,与后者相比,它除了要增加一套专用数据融合设备和相应的高级软件系统外,其他设施的增加很有限,但由此带来的效果是无法估计的。组网雷达系统的意义体现在以下几个方面。

(1) 组网雷达系统大大提高了探测区域的覆盖面积,可以提供整个战场的态势;同时,在探测重叠区域,目标的检测概率得到了很大的提高,使其在反隐身方面具有很大优势。

(2) 组网雷达系统将不同雷达的信息进行融合,提高了对目标的跟踪精度。

(3) 组网雷达系统可以从不同的角度对目标进行探测,这在对抗隐身目标和低空、超低空目标中具有重要意义。

(4) 不同体制、不同频段、不同极化方式的组网雷达系统,可以提高系统的电子对抗能力。

1.2.2 组网雷达系统的几种模式

归纳常见的组网雷达融合方法,主要有以下几种模式:集中式、分布式、混合式、多级式、双/多基地式、无源定位式、引导交接班式等。理论上,多部雷达之间只要存在指令或数据的交互就可以称为组网雷达。组网雷达模式种类较多,需要具体问题具体分析。每种模式下又有一些改进或变种,例如,集中式和分布式可同时处理构成混合式融合;每种组网模式下面还可以分层处理,拥有一级或多级局部融合节点。下面归纳几种常见组网方式的基本原理、优缺点和适用条件,以便读者对组网雷达系统有全方位的纵览和初步认识。

1. 集中式

集中式组网雷达系统中,分雷达系统一般只进行搜索处理,并将探测到的原始点迹信息全部上传至融合中心,在融合中心集中进行数据对准、航迹起始、航迹预测、点迹关联和跟踪滤波等处理,并形成统一全局航迹。因此,除数据对准外,融合中心的处理流程和单部雷达的数据处理流程基本一致。集中式处理系统中,融合中心一般要进行实时反馈,以便引导分雷达进行重点区域照射处理。

集中式组网的优点是信息损失最小,适用于微弱目标的探测,数据率高,具备航迹合成功能;缺点是通信量较大,融合中心计算负担较重,系统生存能力较差(依赖于反馈链路,链路被切断时分雷达系统可能无法正常工作;一旦某部雷达受到干扰,产生虚假点迹也会影响整个系统的融合效果)。集中式组网雷达系统一般适合于局部探测区域,例如,同一平台或同一区域的传感器采用集中式融合模式较佳。

2. 分布式

分布式组网雷达系统中,分雷达系统是具有跟踪能力的独立自主雷达系统。分雷达系统首先独自完成多目标跟踪与状态估计,并将目标航迹信息传至融合中心,在融合中心完成数据对准、航迹关联、航迹融合、剔除虚假航迹并形成全局航迹。由于分雷达是完整的雷达系



统,因此分布式组网融合结构可以以较低的费用获得较高的可靠性和可用性。

分布式组网的优点是通信量较小(只传递航迹信息),稳定性和生存能力较强(中心可以反馈也可不反馈,单部雷达失效一般不会影响整个系统的工作),具备较强的抗干扰能力(通过航迹融合和同源检验,能够有效剔除虚假航迹);缺点是不是最佳融合方法,因为单部雷达上传的航迹可能带有自身处理偏差,另外不易获得持续时间较长的航迹,因为并不是每部雷达都能同时观测到同一空间航迹。分布式组网雷达系统通常适用于欺骗干扰场景和多目标场景,雷达一般是相近体制雷达,探测精度相当,多为警戒雷达之间组网。

3. 双/多基地式

双/多基地式组网雷达系统中,发射站发射雷达信号,各接收站接收雷达信号,获取原始测量信息(一般为距离或距离和、方位、俯仰、速度等)。探测的原始数据全部上传给处理中心,通过定位算法定出目标点迹后再进行跟踪滤波处理,处理结果要实时传递给各分系统进行调度,一般为 PRF 级别的实时调度。各站之间还要通过同步数据链实现相位同步、空间同步和时间同步。双/多基地式雷达系统的优点是具有极强的抗干扰能力和反隐身能力,并且可防止反辐射攻击;缺点是系统实现复杂,要进行各种同步处理,数据率较低(帧间交互),生存能力较差,数据链破坏后性能下降,另外对处理中心的要求也较高,容易定位出较多虚假点迹。双/多基地式雷达系统一般适用于同类型雷达之间的处理,最好是机动平台,使其布站具有一定的灵活性;如果不需要同步技术,该模式即退化为无源定位模式。

4. 无源定位式

无源定位式组网雷达系统中,一般无发射站发射信号,接收站只接收目标的主动信号或反射信号。接收站之间一般无须进行同步处理,只要测量目标的角度、幅度或多普勒等信息,并且可以进行独立的角度或多普勒跟踪处理。分雷达系统探测的原始测量信息或独立维跟踪信息全部上传给处理中心,融合中心根据一定的准则合成目标的全局点迹和全局航迹,该模式一般无须进行反馈处理。无源定位式雷达系统的优点是反隐身和抗干扰能力极强,可以对干扰机进行定位,可抗反辐射攻击,不需要同步链路,系统实现简单;缺点是一般只用于跟踪主动有源干扰机,不能探测静默目标,且只有角度数据,一般没有测距数据,因此估计精度稍差些。无源定位组网模式一般适用于干扰源的无源交叉定位,可和其他组网模式混合使用,如果多个接收站同时检测到 AGC 电压突然持续增高(有可能存在高功率干扰机),无法准确测距,则可转入无源定位组网模式。

5. 引导交接班式

引导交接班式组网雷达系统中,一般用于预警雷达直接向制导雷达指示或者由指控中心中转向制导雷达交接。该模式是一种特殊的组网雷达方式,一般用于精度较低的雷达向精度较高的雷达进行交接(高精度雷达搜索全空域的时间较长,必须要进行引导),或者各雷达由于视距限制不能探测全程必须要引导交接。传递的信息一般为目标粗略预测位置、属性或威胁等级等。引导交接班式组网雷达系统的优点是利用信息共享,可避免高精度雷达全空域盲目搜索,实现快速准确捕获感兴趣目标;其缺点是由于没有重叠区域,易受干扰,因此要求引导雷达的探测信息必须足够准确(如红外预警系统的指示信息较为准确,热辐射是目标的



基本属性)。该模式一般适用于精度较低的预警雷达向制导雷达交接,或者各雷达由于视距限制不能探测全程必须要引导交接。在实际工程中,原始信息通常要传递到指控中心进行初步分选、融合和鉴别,识别出威胁等级较高的目标后才直接传递给后面的高精度雷达。

1.2.3 组网雷达系统的典型实例

组网雷达系统在当今防空反导和空间监视系统中都扮演着重要角色。例如,俄罗斯部署在莫斯科周围的“橡皮套鞋”反导系统是典型的单基地组网雷达系统的例子;“爱国者”导弹系统是台湾防空、反导系统中的重要组成部分;美国的 MD 导弹防御系统也是典型的多层次组网雷达系统。

1. 美军弹道导弹防御系统

美军弹道导弹防御系统的建设主要集中在 3 个领域:战区导弹防御、国家导弹防御和先进的弹道导弹防御技术发展。目前,美国已经部署的战区级导弹防御系统有“爱国者”系统、“宙斯盾”系统、战区高空区域防御系统,国家级导弹防御系统有陆基中段防御系统。

1) “爱国者”系统

“爱国者”系统是 1964 年美国国防部开始建设的一个陆军战区机动防空系统,从 1988 年开始升级为能够防御战术弹道导弹的“爱国者 1”型,主要拦截处于飞行末端的弹道导弹,对战区 100km 范围内提供防御。虽然“爱国者”系统技术成熟、部署数量较多,但其防御范围较小。“爱国者 3”导弹的射程和射高都只有 15km,只能对战区提供小范围的末端导弹防御。而目前美国陆军在本土、日本冲绳地区、德国、韩国至少部署了 14 个“爱国者”导弹营。

2) “宙斯盾”系统

1995 年起,美国海军对舰载“宙斯盾”系统进行改进,使其具有弹道导弹防御功能,该系统对弹道导弹的拦截高度为 70~500km,拦截距离为 1200km。系统由装备有“宙斯盾”系统的巡洋舰或驱逐舰及其携带的“标准-3”型导弹组成。“宙斯盾”系统探测的目标信息也可以与陆基中段防御系统共享。2004 年,美海军开始部署第一艘装有弹道导弹防御系统的改进型“宙斯盾”驱逐舰。目前,“宙斯盾”系统只能在大气层外对飞行中段的弹道导弹实施拦截,不能对再入大气层的导弹进行拦截。

3) 战区高空区域防御系统(萨德)(THAAD)

鉴于“爱国者”系统防御范围较小,美国陆军于 1992 年开始研制战区高空区域防御系统。该系统可以为战区部队提供大范围区域的导弹防御。它的最大拦截距离为 200km,拦截高度为 40~150km。系统于 2009 年开始部署第一个火力单元,到 2014 年部署 4 个火力单元。每个火力单元由雷达、指控与通信系统和 24 枚拦截导弹组成。目前,该系统已经进行了至少 13 次拦截试验,11 次拦截成功。其拦截高度上限为 150km,可对中程弹道导弹的飞行中端和洲际弹道导弹的飞行末端进行拦截。

4) 陆基中段防御系统

陆基中段防御系统是美国目前唯一的国家级导弹防御系统。系统配备的陆基拦截导弹最大拦截高度为 2000km,拦截距离为 5300km,可以对大气层外飞行中段的弹道导弹进行拦截。



该系统建设的最终目标是为美国本土提供全面的导弹防御。目前,已经完成部署的预警探测雷达有 9 部,部署地域包括美国西海岸、东海岸、阿拉斯加、格陵兰岛、英国和日本。系统还包括天基预警卫星系统,由 5 颗地球同步轨道卫星组成。

2. 俄罗斯“橡皮套鞋”反导弹防御系统

俄罗斯在莫斯科周围部署了“橡皮套鞋”反弹道导弹系统,它采用单基地组网雷达形式。该系统由 7 部鸡笼远程警戒雷达、6 部狗窝远程目标精确跟踪/识别雷达和 13 部导弹阵地雷达组成。其中,7 部鸡笼远程警戒雷达分别与 2 部或 3 部狗窝远程目标精确跟踪/识别雷达联网;6 部狗窝远程目标精确跟踪/识别雷达又各与 4 部导弹阵地雷达联网。鸡笼远程警戒雷达作用距离比较远,最大作用距离可达 5930km,而狗窝远程目标精确跟踪/识别雷达最大作用距离约 2800km。所以,鸡笼远程警戒雷达可远程预警,对空中目标进行远距离搜索探测,并将目标信息(包括距离、方位和高度信息)送给狗窝远程目标精确跟踪/识别雷达;而狗窝远程目标精确跟踪/识别雷达平时保持寂静,在组网雷达系统送来的目标信息的参考下,只有当目标进入导弹射击范围时才开始工作,对目标进行精确跟踪和识别;导弹阵地雷达只是在发射导弹时才开机工作。

3. 法国的 CETAC 防空指挥中心

法国的 CETAC 防空指挥中心主要用于对近程防空系统和超近程防空系统的战术控制。CETAC 防空指挥中心具有警戒、战术控制和指挥等功能,它将虎-G 远程警戒雷达与霍克、罗兰特和响尾蛇导弹连的制导雷达及高炮连的火控雷达联网,实现空情预警、目标探测与跟踪、航迹校准、威胁评估、统一指挥和火力分配等功能。该系统还可接收当地雷达、STRIDA 网络、观测器和航空基地控制塔及其他防空武器系统提供的信息,同时还具有抗电磁干扰的能力。CETAC 有车载型、空运型和地下掩体型,一般由 3 名工作人员操作使用。CETAC 防空指挥中心在设计中也使用了很多先进的电子设备和软件,包括高清彩色显示器、触摸灵敏性屏幕、结构计算机、高级软件语言和跳频收发机等。

1.2.4 组网雷达系统的关键技术

组网雷达系统对目标的探测在原理上与单部雷达系统相差不多,最大的差别在于对获得的信息进行处理的复杂性上,它包括各种信号处理算法、数据传输、雷达站之间的坐标变换、雷达间位置和时间的配准、数据编录等内容,这些都需要借助计算机实现侦察、显示、通信与指挥控制的协同工作。因此,在组网雷达系统中,需要很强的计算资源和通信手段来保障网内各设备的协调性。这些是取得高质量的情报不可缺少的技术。组网雷达系统中的关键技术主要包括优化部署、时间同步技术、精确标定站位和标校技术、数据融合技术、组网雷达的管理技术和组网雷达的通信技术等。

1. 优化部署

这个问题的研究关系到如何发挥组网雷达系统中每一部雷达探测数据的作用。换句话说,组网雷达的优化部署要解决的问题是如何利用有限的资源最大限度地满足目标的发现概率、空间的覆盖、时间的覆盖和组网雷达系统的可靠性等一系列技术要求。



组网雷达部署的优劣,不仅直接影响组网雷达系统在空域的覆盖能力,而且影响雷达探测隐身目标和低空目标的能力及雷达网综合抗干扰、抗摧毁能力。传统的部署立足于单部雷达在检飞基础上绘制的波瓣图和雷达探测威力图,考虑了组网的雷达在距离、高度、频段上的交替、衔接和一定的冗余度,以及其缺乏立体感,特别是在敌电子干扰情况下雷达探测范围变化的情况,在主要方向上的部署缺乏严格的数学规划,造成资源浪费、低效重复和可能的自我干扰。优化部署是在综合考虑各种因素、权衡利弊的基础上,利用数学方法进行定量分析的部署方法,属于多目标优化和决策问题。组网雷达的优化部署应该坚持以下原则。

(1) 在雷达总数受约束的条件下,对主要方向、重点角度、主要高度层(特别是低空区)的覆盖冗余数最多。

(2) 单部雷达对目标的覆盖数最多。

(3) 各种极化方式、工作频段、工作模式的类别尽可能多。

(4) 干扰背景下组网的雷达间盲区互补,主要区域盲区最小。

2. 时间同步技术

各雷达天线的扫描通常是完全异步的,如果没有统一的时间标准,就很难进行信息融合,因此组网雷达时,各雷达之间的时间基准信号严格统一是组网的前提条件。一般通过以下途径来实现。

(1) 在网内的雷达站之间建立一条数据链,提供时间基准信息。

(2) 利用卫星定位系统的高稳定时钟来做雷达站之间的基准信号。

(3) 在各站分别采用高稳定度基准频率源,如采用原子钟等,在使用前进行统一的标校。

(4) 有条件时,采用辅助天线直接从接收直达波中获得发射信号的相位/频率基准信息来作为基准信息。

3. 精确标定站位和标校技术

精确标定站位和标校技术要解决的问题是组网雷达中的每一部雷达在放置时所产生的空间坐标位置误差和雷达探测基准方位角设定误差的校正。这个问题处理的好坏直接影响到组网雷达信息融合处理中目标定位和航迹跟踪的准确性。因此它是组网雷达探测目标正确性的基础。组网雷达内各站的精确定位和空间几何标校是对目标精确定位的基础,是组网雷达内各站通过坐标变换共享数据的基础。由于地球曲率和缺少目标高度数据,坐标变换中若误差太大,将会发生目标分裂成假目标的现象,其误差将直接进入信息处理系统,形成目标定位的系统误差,影响雷达的跟踪精度。站址定位无须实时进行,可以利用卫星定位获得各站的精确地理位置,其精度可达 3m 以内。一种理论上较好的雷达标校方法是“全相对坐标变换法”,即将本雷达以外所需组网的雷达也看成一个目标或导弹,然后与真实目标一起测量就可确定它们之间的相对坐标,以达到消除坐标变换中诸多误差源的目的。

4. 数据融合技术

数据融合技术是许多传统学科和新技术的集成和应用,数据融合技术是指利用计算机技术处理探测信息校准、相关、识别、估计,对多源信息和多层次、多方面数据的组织、处理过程,以获得准确的状态和身份估计,以及完整和准确的战场数据。将多部雷达的探测信息



进行融合处理,可以实现更高的目标测量精度和更准确的评估,实现对目标的精确定位、跟踪、识别、态势和威胁估计。组网雷达中的数据融合技术有分布式、集中式和混合式。

分布式数据融合结构的特点是每个雷达站都设有数据处理器,对本雷达的测量数据进行处理得到目标航迹,再将单雷达航迹传送到雷达网数据融合中心得到融合后的航迹。分布式数据融合结构是一定量的单雷达数据处理器的一种连接,只传送真实航迹。该系统结构简单、可靠、可扩充容量,可本地操作,只需要有限的计算资源。

集中式数据融合结构的特点是只在雷达网数据融合中心设置一个数据处理器,对各雷达站送来的目标点迹直接处理。集中式数据融合结构要求重新设计整个系统,且要求有更多的数据传输线路以传送真假点迹。该系统的结构复杂,对计算机要求比较高,其优点是能够保持航迹连续性和完整性,便于采用高级数据处理技术,跟踪精度较高。

混合式数据融合结构的特点是在系统中有多个同等级别的处理中心存在,各处理中心融合若干单站的观测数据,最后由顶层融合中心实现航迹融合或者点迹/航迹融合。雷达数据融合技术中涉及的主要计算理论和方法有:

- ◆ 目标位置估计方法;
- ◆ 数据相关处理方法;
- ◆ 跟踪滤波方法。

5. 雷达网的管理

雷达组成网络后,雷达网管理系统将成为庞大的系统。其主要任务是调配雷达网正常有效的运转,包括在各种战斗环境下雷达网内部各个雷达运行状态的控制和调配雷达开关机的控制,以避免敌方侦查设备的侦测和反辐射导弹的攻击;数据流控制。由于网内雷达众多,输出的数据相当惊人,不经过深入研究,对浩如烟海的数据加以合理的加权处理,仅仅这些传输的数据,就可以致使网络瘫痪。如果再收到对方强电磁干扰的饱和攻击,其数据量更为巨大,没有相关的算法对数据去伪存真,雷达网根本无法有效工作。作为雷达网的管理系统的主要任务是调配雷达网正常有效的运转,以保证雷达网在敌方电磁干扰的饱和攻击下或者个别雷达不能正常工作的情况下调整雷达网的拓扑结构使得雷达网工作在最优状态。

6. 雷达网的通信

组网雷达所有的优势都来自于单站雷达、中心机及单站雷达间信息的互通,没有可靠的数据通信手段,就不可能有可靠的组网雷达,这是组网雷达的必要条件。雷达网中的各个雷达站及融合中心在空间上处于不同的地点,它们之间的联系完全由通信网络沟通。正是通信系统在雷达网中的特殊地位使得它成为敌方对雷达网攻击的重点,而且它也是雷达网相对比较薄弱的环节。因此作为雷达网的通信系统所要做到的是:保证通信的容量、通信的可靠性、通信的抗干扰能力及通信系统的抗摧毁能力等。

在雷达网中,各雷达站之间是靠通信系统相互联系构成一个整体,通信系统的性能对组网雷达后的性能有着决定性的影响。因此,必须建立起一套高传输速率、高稳定性和高安全性的通信系统。组网雷达数据一般的传输方式有:有线电缆、光纤、微波通信、卫星通信。采用不同形式的通信方法各有利弊,可选择有利的方式进行使用。