



组网雷达作战能力 分析与评估

陈永光 李修和 沈阳 著 王国玉 审



国防工业出版社

National Defense Industry Press

组网雷达作战能力 分析与评估

陈永光 李修和 沈阳 著
王国玉 审



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

组网雷达作战能力分析与评估/陈永光等著. —北京:
国防工业出版社, 2006. 1

ISBN 7-118-04050-9

I. 组... II. 陈... III. 军用雷达-网络系统-应用-作战-研究 IV. TN959

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 083350 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 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 13 $\frac{1}{8}$ 340 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 40.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

前 言

组网雷达的作战效能并非是将多部雷达的探测区叠加起来那么简单,而是使雷达系统的作战能力获得了质的飞跃,特别是在电子战背景下,组网雷达的作战能力得到了充分体现。面临复杂的电磁环境,如何对组网雷达的作战能力进行有效的分析和评估是本书论述的主要内容。

雷达及其对抗始终是现代战争中争夺制电磁权的重要内容。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;雷达目标隐身技术和飞行器低空飞行技术的进一步发展,也将制约雷达信息的获取;反辐射武器的更新换代更是直接威胁到雷达的生存。这些传统雷达所面临的“四大威胁”(电子干扰、隐身、反辐射摧毁和低空突防)促使雷达向网络化方向发展。如今的雷达及其对抗已经发展到体系对体系的作战模式,再也不是以前的单部雷达与单部雷达对抗侦察装备和单部雷达干扰机之间单打独斗式抗争的局面。组网雷达充分利用各单部雷达的资源和信息融合优势,即把多部不同体制、不同频段、不同程式(工作模式)、不同极化方式的雷达适当布站,借助于通信手段链接成网,由中心站统一调配,从而使整体作战能力得到极大的提高,包括探测、定位、跟踪、识别、威胁判断等在内的雷达整体性能得以大幅度改善,在抗干扰、抗隐身、抗反辐射摧毁和抗低空突防“四抗”能力方面发生了本质的变化。

长期以来,对于组网雷达作战能力的评价一直停留在定性分析的层面上,突出表现在对其“四抗”能力的讨论方面,重复性、概念性的阐述较多,而鲜见实质性的定量分析判断,对于组网雷达作战效能的全面评估更是一项空白。这种现象的产生不仅与人们对

组网雷达作战能力定量评价的重要性和迫切性认识不足等主观因素有关,也与目前条件下难以做到对实际组网雷达系统作战效能进行准确评估等客观因素有关。由于组网雷达的优势已经在理论上得到证明,实践中的进一步证实也只是时间问题,因此,为了在理论研究的基础上深化对组网雷达作战能力的认识和评估,一般倾向于采用计算机作战模拟的方法来完成此项任务。计算机作战模拟能够逼真地显现实战中执行任务的过程,可以激起演练者行为与思维的交互式反应;自动化程度高,可控性强,重复性好,与实战演练相比耗费少,武器装备磨损低,对环境破坏小,还可以避免人员伤亡。因而,它是一种进行军事演习、训练与武器系统评估的有效途径。而基于作战模拟的武器效能定量分析研究和评价,一直是国内外军事专家和技术专家共同关注的热点问题。组网雷达系统是典型的分布式军事信息系统,适宜采用分布交互式仿真技术研究其作战效能评估问题。

本书论述了组网雷达作战能力分析 with 评估的基本理论与方法,共 11 章,从结构上可以分为以下 5 个部分:

第 1 部分(第 1 章)论述了组网雷达的定义、分类、特点和作战任务,组网雷达研究与应用情况以及武器系统作战能力分析 with 评估的基本方法。

第 2 部分(第 2 章~第 6 章)系统地分析与评估了组网雷达的抗干扰、抗隐身、抗反辐射摧毁和抗低空突防能力。系统全面地分析了组网雷达面临的综合电子干扰、目标隐身技术、反辐射武器和低空飞行技术等复杂作战环境,剖析了组网雷达具备优越“四抗”能力的机理,建立了组网雷达“四抗”能力评估指标体系和数学模型,包括“四抗”能力综合评估模型,并对组网雷达“四抗”能力进行了仿真分析。

第 3 部分(第 7 章)系统地分析与评估了组网雷达的一种特殊形式——双基地雷达系统的作战能力。分析了双基地雷达系统因其空间分置而具备的优越“四抗”能力。重点研究了电子战环境下双基地雷达对隐身目标的跟踪技术。该部分还揭示了双基地

雷达系统的空间分置特性使其干扰暴露区不同于单基地雷达这一特点,研究了悲观准则和乐观准则下面临不同干扰方式时的双基地雷达探测能力。

第4部分(第8章~第10章)系统地研究了组网雷达的定位能力、多目标跟踪的数据融合技术以及组网雷达的识别能力与威胁判断。提出了基于定位精度几何稀释(GDOP)准则的电子战环境下突防飞机航路选择策略和干扰机任务分配策略,讨论了组网雷达实际作战背景GDOP分布图及其在定位能力评估上的应用。研究了电子战背景下组网雷达对多目标跟踪的数据融合技术,建立了组网雷达多目标跟踪的起始和终结、目标运动、数据校准、多目标跟踪滤波算法以及多目标跟踪数据互联的数学模型,并对干扰条件下组网雷达对目标的跟踪进行了仿真。该部分还研究了组网雷达中由雷达和电子支援措施(ESM)组成的异类传感器的有源/无源协同定位技术,应用证据理论分析了网内各传感器对目标的融合识别技术,并研究了组网雷达对目标的威胁判断能力。

第5部分(第11章)研究了针对组网雷达的各种对抗手段的评估、建模和仿真技术。建立了基于仿真系统分析的组网雷达对抗评估指标体系和组网雷达对抗技术高层模型体系。讨论了组网雷达对抗仿真系统体系结构以及联邦对象模型/仿真对象模型(FOM/SOM)的开发、时间管理和高层体系结构(HLA)中的数据融合设计等关键技术。

本书系统地论述了组网雷达作战能力及效能评估理论和方法、评估指标体系以及仿真数学模型等,包括部分仿真示例。详细分析了组网雷达的探测、定位、跟踪、识别、威胁判断和抗干扰、抗隐身、抗反辐射摧毁、抗低空突防等“四抗”能力及其作战效能评估方法,建立了组网雷达对抗系统的评估指标体系、高层模型和仿真系统结构。基本上反映了近年来组网雷达作战能力分析 with 评估研究领域的新概念、新理论、新技术和新方法。

在撰写本书的过程中,王国玉研究员审阅了全书并提出了指导性意见。曹志耀、林春应、霍万利、贾鑫、肖顺平、胡以华、张剑

云、尹成友、张文明、王国良、谢虹、李宏、汪连栋、俞静一、冯润明、冯富强、曾勇虎、王伟、张顺健、李昌锦、焦逊、解凯、孙云辉等同志参加了部分内容的研讨；汪鸿雁、王金良、尹照武、常伟、刘利民、张艳艳、陈永利、任翔宇、刘英芝等同志对本书的出版给予了大力支持，在此一一致谢。

作者特别感谢国防科技大学孙仲康教授多年来在双/多基地雷达定位与跟踪技术方面给予的理论指导。

本书的研究对象——组网雷达作为一类复杂的军事信息系统还处在不断发展和完善之中，一些关键技术还没有完全解决，对于雷达组网后的作战能力和对抗效能的研究可以说还是一项崭新的、具有前瞻性的课题，加之作者水平有限，书中定有缺点和短见之处，恳请读者不吝赐教。

作者

2005年3月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 组网雷达的定义和分类	1
1.1.1 组网雷达的定义	1
1.1.2 组网雷达的分类	1
1.2 组网雷达的特点和作战任务	5
1.2.1 组网雷达的特点	5
1.2.2 组网雷达的作战任务	6
1.3 组网雷达的研究与应用情况	7
1.3.1 双/多基地雷达的研究与应用	7
1.3.2 组网雷达的研究与应用	11
1.4 武器系统作战能力分析与评估的基本方法	13
1.4.1 系统方法	13
1.4.2 效能分析方法	16
1.4.3 数学建模方法	22
1.4.4 分析步骤和流程	25
第2章 组网雷达抗干扰能力分析与评估	28
2.1 引言	28
2.2 几种典型的雷达抗干扰技术	29
2.2.1 频率捷变	29
2.2.2 脉冲压缩	30
2.2.3 低旁瓣天线	31
2.2.4 旁瓣消隐	32
2.2.5 “烧穿”发射方式	34
2.2.6 自动频率选择	34

2.3	组网雷达抗干扰能力分析	34
2.3.1	组网雷达抗有源压制性干扰能力分析	35
2.3.2	组网雷达抗有源欺骗性干扰能力分析	37
2.4	组网雷达抗干扰能力评估指标及模型	39
2.4.1	评估指标	39
2.4.2	组网雷达自卫距离模型	40
2.4.3	组网雷达干扰压制比模型	42
2.4.4	组网雷达抗干扰能力度量模型	45
2.4.5	组网雷达定位精度几何稀释模型	51
2.5	组网雷达抗干扰能力仿真评估	56
2.5.1	仿真条件	57
2.5.2	结果分析	58
第3章	组网雷达抗隐身能力分析与评估	63
3.1	引言	63
3.2	反雷达探测隐身技术	64
3.2.1	隐身目标雷达反射截面积减缩及其影响	64
3.2.2	雷达隐身技术分析	66
3.3	组网雷达抗隐身能力分析	68
3.3.1	雷达反隐身面临的若干难题	68
3.3.2	隐身目标的技术缺陷	70
3.3.3	组网雷达抗隐身机理分析	75
3.4	组网雷达抗隐身能力评估指标及模型	83
3.4.1	评估指标	83
3.4.2	组网雷达抗隐身能力度量模型	84
3.4.3	隐身目标单基地雷达截面积模型	86
3.4.4	组网雷达融合发现概率模型	87
3.4.5	组网雷达系统定位精度模型	89
3.4.6	组网雷达系统跟踪航迹质量模型	90
3.4.7	防空系统预警时间模型	92
3.4.8	防空系统目标拦截概率模型	93

3.4.9	防空系统生存概率模型	94
3.5	组网雷达抗隐身能力仿真评估	95
3.5.1	仿真条件	95
3.5.2	结果分析	96
第4章	组网雷达抗反辐射摧毁能力分析与评估	99
4.1	引言	99
4.2	组网雷达抗 ARM 能力分析	100
4.2.1	反辐射导弹的特点与局限性	100
4.2.2	防御 ARM 的方法概述	101
4.2.3	组网雷达抗 ARM 机理分析	103
4.3	组网雷达抗 ARM 能力评估指标及模型	107
4.3.1	组网雷达抗 ARM 能力评估指标	107
4.3.2	组网雷达诱偏系统优化布站及效果评估 模型	107
4.3.3	组网多点源诱偏系统工作模式模型	112
4.3.4	组网雷达抗 ARM 效能评估模型	115
4.4	组网雷达抗 ARM 能力仿真评估	125
4.4.1	仿真条件	126
4.4.2	结果分析	127
第5章	组网雷达抗低空突防能力分析与评估	129
5.1	引言	129
5.2	组网雷达抗低空突防能力分析	130
5.2.1	现代雷达面临的低空威胁	130
5.2.2	抗低空突防措施	134
5.2.3	组网雷达抗低空突防优势分析	139
5.3	组网雷达抗低空突防能力评估指标及模型	143
5.3.1	组网雷达抗低空突防能力评估指标	143
5.3.2	组网雷达抗低空突防能力度量模型	143
5.3.3	低空目标融合发现概率模型	144
5.3.4	低空目标跟踪航迹寿命模型	147

5.3.5	防空系统预警时间模型	148
5.3.6	低空目标拦截概率模型	148
5.3.7	防空系统生存概率模型	149
5.4	组网雷达抗低空突防能力仿真评估	150
5.4.1	仿真条件	150
5.4.2	结果分析	151
第6章	组网雷达“四抗”能力综合评估	153
6.1	引言	153
6.2	层次分析法与最优指标法	154
6.2.1	层次分析法	154
6.2.2	最优指标法	157
6.3	组网雷达“四抗”能力综合评估模型与方法	160
6.3.1	组网雷达“四抗”能力层次结构模型	160
6.3.2	综合评估方法	162
6.4	组网雷达“四抗”能力综合评估过程	164
6.4.1	判断矩阵的构造与层次单排序和总排序 ..	165
6.4.2	评价指标值的确定	168
6.4.3	“四抗”能力综合评估	173
第7章	双基地雷达作战能力分析与评估	175
7.1	引言	175
7.2	双基地雷达的定义与特点	176
7.2.1	双基地雷达的定义和分类	176
7.2.2	双基地雷达主要战术技术特点	179
7.3	双基地雷达“四抗”能力	181
7.3.1	抗干扰能力	181
7.3.2	抗摧毁能力	183
7.3.3	抗隐身能力	185
7.3.4	抗低空突防能力	187
7.4	双基地雷达对隐身目标的跟踪能力	188
7.4.1	双基地雷达定位跟踪算法	188

7.4.2	对隐身目标的测量模型	196
7.4.3	对隐身目标跟踪能力的仿真评估	200
7.5	不同干扰决策准则下的双基地雷达探测能力	206
7.5.1	双基地雷达方程的引入	206
7.5.2	双基地雷达探测区的计算	207
7.5.3	基于干扰决策的双基地雷达干扰暴露区 计算	210
7.5.4	双基地雷达探测能力仿真评估	215
第8章	组网雷达定位能力评估	220
8.1	引言	220
8.2	雷达对目标的定位	222
8.2.1	单站定位	222
8.2.2	多站定位	224
8.3	影响组网雷达定位能力的电子战策略	225
8.3.1	电子战环境下突防飞机航路选择策略	225
8.3.2	基于 GDOP 分析的干扰机任务分配策略	231
8.4	基于 GDOP 分析的组网雷达定位能力仿真评估	235
8.4.1	GDOP 图的绘制算法	235
8.4.2	计算机仿真评估	237
第9章	组网雷达多目标跟踪的数据融合技术	243
9.1	引言	243
9.2	多目标跟踪起始和跟踪终结	244
9.2.1	Bayes 航迹确定方法	244
9.2.2	Bayes 航迹终结方法	245
9.3	目标运动模型	246
9.3.1	常速度模型	246
9.3.2	常加速度模型	248
9.3.3	时间相关模型	251
9.3.4	半马尔科夫模型	254
9.3.5	Noval 统计模型	254

9.3.6	机动目标“当前”统计模型	255
9.4	数据校准模型	256
9.4.1	坐标转换	256
9.4.2	时间校准	259
9.5	组网雷达跟踪滤波算法	261
9.5.1	卡尔曼滤波算法	261
9.5.2	α - β 和 α - β - γ 滤波算法	269
9.6	组网雷达多目标跟踪中的数据互联技术	272
9.6.1	观测—观测互联	272
9.6.2	观测—航迹互联	274
9.6.3	航迹—航迹互联	277
9.7	电子战环境下组网雷达目标跟踪的数据融合技术	286
9.7.1	系统描述	287
9.7.2	不同干扰强度下雷达观测方程	288
9.7.3	观测信息的线性模型	289
9.7.4	干扰条件下组网雷达数据互联算法	292
9.7.5	滤波算法的应用	294
9.7.6	计算机仿真	295
9.7.7	结论	297
第10章	多源组网雷达的识别能力与威胁判断	301
10.1	引言	301
10.2	组网雷达中有源/无源协同定位	302
10.2.1	问题描述	302
10.2.2	关联判别模型	303
10.2.3	关联判决规则	305
10.2.4	关联判决门限	307
10.3	基于证据理论的组网雷达目标识别能力分析	311
10.3.1	证据理论方法	311

10.3.2	组网雷达目标识别的证据理论 融合方法	315
10.4	组网雷达对目标的威胁判断	320
第 11 章	组网雷达对抗系统评估建模与仿真	322
11.1	引言	322
11.2	组网雷达对抗评估指标体系	323
11.2.1	组网雷达探测能力指标	323
11.2.2	组网雷达定位性能指标	326
11.2.3	组网雷达跟踪性能指标	326
11.2.4	目标识别精度	327
11.2.5	组网雷达“四抗”能力指标	328
11.3	组网雷达对抗技术高层模型	331
11.3.1	压制性噪声干扰模型	332
11.3.2	欺骗式干扰模型	340
11.3.3	反辐射摧毁模型	355
11.3.4	组网雷达综合对抗	373
11.4	组网雷达对抗仿真系统体系结构	375
11.4.1	系统总体设计要求	375
11.4.2	选用 HLA 的依据	376
11.4.3	仿真系统结构	380
11.5	仿真系统中的关键技术	382
11.5.1	FOM/SOM 的开发	382
11.5.2	时间管理	383
11.5.3	HLA 中的数据融合设计	384
	图表索引	387
	缩略语	393
	参考文献	397

第 1 章 绪 论

1.1 组网雷达的定义和分类

1.1.1 组网雷达的定义

组网雷达是指通过将多部不同体制、不同频段、不同程式(工作模式)、不同极化方式的雷达或者无源侦察装备适当布站,借助于通信手段链接成网,由中心站统一调配而形成的一个有机整体。网内各雷达和雷达对抗侦察装备的信息(原始信号、点迹、航迹等)由中心站收集,综合处理后形成雷达网覆盖范围内的情报信息,并按照战争态势的变化自适应地调整网内各雷达的工作状态,发挥各个雷达和雷达对抗侦察装备的优势,从而完成整个覆盖范围内的探测、定位和跟踪等任务。

从上面的定义可以看出,组网雷达系统不仅包括雷达这种传感器,通常还可以包括诸如无源侦察装备之类的电子支援措施(ESM)传感器。雷达和 ESM 传感器各具优点,两者通过“分布探测,集中处理;主动为主,被动为辅”的技术机制形成一个有机整体。雷达探测提供目标的方位、俯仰和距离信息,而雷达对抗侦察装备提供目标的方位和识别信息。两者结合可以为现代防空系统提供探测所需要的完整数据,因此雷达和 ESM 两种探测技术的综合,可以更有效地探测空中、地面各种状态下的目标。

1.1.2 组网雷达的分类

按照不同的标准,组网雷达可以分为不同的类型。例如:按照雷达站载体的不同,雷达网可以分为陆基雷达网、舰基雷达网、空

基雷达网和天基雷达网4类;按照防空作战任务的不同,雷达网可以分为预警线、预警环、预警区和独立预警区4类。按照战术性能的不同,本书把组网雷达分为以下几类,分类的主体是雷达。

1.1.2.1 普通雷达网

普通雷达网即指网内雷达各自为战,在干扰条件下各自运用本身具有的抗干扰手段以求得该雷达的抗干扰“最佳”。在这种普通雷达网中,各雷达的情报上送到同一个情报指挥中心。情报指挥中心对情报的处理限于人工方式,采用人工判定和人工干预的方法进行情报的取舍,并能够指挥各部雷达的操纵员进行必要的操作,包括反干扰操作,但是不能做到实时,而有一定的时间延误。这样的雷达网有潜力采取下列抗干扰措施:

(1) 部署各种不同频段、不同发射波形(从高工作比到低工作比,各种幅度、相位、频率编码的脉冲等)的雷达。受干扰时,情报指挥中心可以选择受干扰程度较轻的雷达提供情报。在干扰种类和参数变化或者干扰源变动的情况下,适时改变优选雷达。

(2) 根据各雷达受干扰的情况,指挥它们开机或者关机、变更发射波形、变更重复频率、变更天线转速等,即让发射信号实施时域变化,从而给敌方雷达对抗侦察设备在分选识别信号时增加困难。尤其在网内雷达数量多时会起一定作用。

(3) 指挥各雷达改换工作频率、变更定频工作或者捷变频工作的方式,即让发射信号在频域内机动,从而给敌方侦察和干扰制造困难,使己方部分雷达摆脱或者减轻干扰。

上述措施的效果与雷达网内指挥和执行的反应速度有着很大关系,如果反应速度慢,指挥得不到及时执行,其效果将显著降低。应该指出的是,由于各雷达站都从自身角度出发寻求抗干扰“最佳”,并不十分清楚全局性的战斗态势,因而整个雷达网抗干扰的效果往往并不是“最佳”,在不断变化的敌方电子战策略面前往往处于不利的境地。

1.1.2.2 中级雷达网

中级雷达网与普通雷达网最大的不同是中级雷达网使网内雷达和情报指挥中心之间的通信畅通,从而保证情报的实时上报,网内雷达对目标坐标的测定精度也有所提高。这样,情报指挥中心可以进行目标航迹的自动处理(主要是航迹自动综合、自动跟踪)。因此与普通雷达网相比,中级雷达网增添了下列抗干扰能力:

(1) 指挥受干扰雷达对干扰源进行交叉定位,测定其较精确的位置。

(2) 充分而巧妙地利用了各部雷达中较高的分辨力(窄波束的方位分辨力和窄脉冲的距离分辨力),以区分目标和箔条,区分干扰飞机和被掩护目标。如果能够进一步利用各雷达的径向多普勒分辨力,则对反消极干扰更为有利。

1.1.2.3 高级雷达网

除了具有中级雷达网的抗干扰能力外,网内雷达工作状态的改变(如开机、关机、变频、改变工作方式、改变发射波形、改变天线转速等)还可以由情报指挥中心直接实施灵活控制。由于控制反应速度快,所以上述抗干扰的效果将有显著提高,而且由于雷达网内抗干扰措施的运用受纵观全局的情报指挥中心控制,因而可以尽可能地寻找整个雷达网的抗干扰“最佳”,这是一种本质性的提高。除此之外,还可以增加下列抗干扰措施:

(1) 控制雷达网内各雷达按照预定编程或者随机开机、关机,即实现“闪烁式”开机,各雷达站的断续情报在情报指挥中心进行综合。这样可以迷惑实施雷达干扰的一方,多种不同频率的雷达“闪烁”时可能使敌方干扰机难以有效地工作。如果网内再设置一部分假发射机(诱饵),真真假假,时隐时现,终将迫使敌方在空域和频域内分散干扰功率,从而降低干扰机的干扰效果。

(2) 适时控制网内某些雷达的发射波形,加大其时宽与频宽