



国防科技图书出版基金

Array Processing Techniques for  
Modern Phased Array Radar

# 现代相控阵雷达阵列处理技术

胡 航 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

# 现代相控阵雷达 阵列处理技术

Array Processing Techniques for Modern  
Phased Array Radar

胡 航 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

现代相控阵雷达阵列处理技术 / 胡航著. —北京:  
国防工业出版社, 2017. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 11204 - 7

I. ①现… II. ①胡… III. ①相控阵雷达 - 雷达信号  
处理 IV. ①TN958.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 240913 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17½ 字数 320 千字

2017 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 79.00 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

## 致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

(按姓氏笔画排序)

# 前 言

雷达阵列信号处理已经历了 50 年的发展历程,至今仍是一个引人入胜及有巨大潜力的研究领域。迅速发展中的先进雷达处理技术大多与阵列处理密切相关,包括空时自适应处理、MIMO 雷达、多通道 SAR/ISAR、自适应检测、空(时)域 ECCM、超分辨等。目前雷达阵列处理领域仍然存在相当多的理论、技术、应用与工程问题有待研究解决。

相控阵雷达是现代雷达的主要发展方向之一,其性能的提高在很大程度上依赖于阵列处理技术。相控阵雷达的固有天线结构特别适合于构成多通道系统,从而可应用各种先进的阵列信号处理技术,充分发挥系统的性能优势及潜力。

相控阵雷达阵列处理是相控阵雷达、阵列信号处理及天线技术相结合的综合性理论技术体系。阵列处理技术应用于相控阵雷达时有很多特殊的要求,需要进行专门的修正。对相控阵雷达特别是多功能相控阵雷达,在现有技术条件下,由于硬件成本和系统复杂度的原因,需采用子阵结构。子阵化模式是相控阵雷达阵列处理的主要实现方式,是区别于常规雷达阵列处理的一个显著特征。此外,相控阵雷达的接收阵列信号处理技术可推广到 MIMO 雷达及 MIMO-相控阵雷达中。

本书是系统论述现代相控阵雷达阵列信号处理理论与技术的专著,以作者的研究成果为框架来组织材料。其特点如下:

(1) 立足学科前沿,内容高度提炼,主要反映本研究领域的核理论、新算法、关键技术、研究进展及发展趋势。

(2) 体现系统的观点。如将信号处理问题纳入到天线阵—接收通道—ADC—信号处理机的统一框架下进行分析与评估。

(3) 以应用的观点阐述有关的理论与算法,更关注的是系统级与实现问题,这也是研究者及工程技术人员特别关心的问题。比如,本书涉及系统结构与方案设计、阵列处理各组成部分的关系、有限采样、带宽效应、算法的鲁棒性、加权方案、ADC 动态范围、栅瓣抑制、子阵稀疏、阵列/通道/导向向量的误差、自校正阵、通道均衡、主瓣干扰下的目标、快速运动的目标、运动干扰、处理机结构、硬件实现等问题。

(4) 除论述相控阵雷达的阵列处理技术(旁瓣/栅瓣抑制、波束形成、自适应干扰/杂波抑制、超分辨、子阵结构与优化等)外,还论述了与阵列处理密切相关的

检测与参数估计问题并涉及了目标跟踪问题。体现了阵列处理与自适应的检测、参数估计与跟踪相结合的观点,这是提高相控阵雷达整体性能的有效途径。

(5) 出于可实现性的考虑,本书很多内容围绕子阵级处理而展开。

(6) 主要论述信号处理问题,但也涉及相关的天线阵列、射频器件、馈线网络、通道(包括滤波器)及 ADC 等。

(7) 子阵级 MIMO - 相控阵雷达是相控阵雷达体制的进一步发展,兼具 MIMO 雷达与相控阵雷达的优势,是对相控阵雷达阵列处理技术的发展与深化,本书也论述了这种新体制雷达的阵列处理技术。

全书按以下顺序组织材料:旁瓣抑制与加权方法—自适应干扰抑制(ABF 及快时 STAP)—子阵设计与栅瓣抑制—阵列/通道误差及均衡杂波抑制(慢时 STAP)—自适应检测(包括 ASLB)—参数估计(自适应单脉冲与超分辨)—子阵结构优化—子阵级 MIMO - 相控阵雷达中的阵列处理。

本书有以下问题需要说明:

(1) 相控阵雷达阵列处理的研究内容极为广泛,本书并未涉及该领域的所有方面。由于作者认识上的局限,对某些问题可能有所遗漏。

(2) 本书的一些观点、处理思路、对具体算法及技术的评述及结论等只反映了当前阶段的认识和理解。

(3) 本书以相控阵雷达为应用背景进行讨论,但书中一些方法与技术也适用于常规的雷达阵列处理(如阵元级方式)。

本书的部分研究工作得到作者主持的以下项目的资助:中国博士后科学基金特别资助,航空科学基金,航天支撑基金,航天科学技术基金,国拨军事电子预研课题的子项目,国防科技重点实验室预研基金,上海航天科技创新基金,中央高校基本科研业务费专项资金等。

作者特别感谢国际著名雷达专家、德国国防研究机构的 Ulrich Nickel 博士。作为对本研究领域作出重要贡献的开拓者及权威学者,Nickel 博士对作者给予了极为有益的指导和非常宝贵的支持,并提出了十分有价值的学术思想。本书也反映了 Nickel 博士的创新性成果。

毛二可院士在百忙之中审阅了本书,提出宝贵的指导性意见,并推荐出版;主审委员王小谟院士对书稿的内容及形式等多方面提出了修改要求,王永良院士在全书的体系结构、章节安排、所应阐述的理论与技术问题等方面提出很多有益的建议,吴嗣亮教授为本书出版写了推荐材料,李绍滨教授对作者的研究工作给予了支持,廖桂生教授对本书给予了关注,在此向各位专家表示衷心致谢!

金玉宝、邓峰、张广磊、孙少雄同志提供了帮助;书中某些数值结果反映了作者一些研究生的工作,在此一并致谢。

感谢国防科技图书出版基金对本书出版的资助。出版社陈洁老师对本书的编写与出版工作给予了大力支持并提出了很多宝贵建议,在此表示衷心的感谢!

本书可供高等院校雷达、电子对抗、信号与信息处理等学科及专业的教师和研究生使用,也可供科研单位和部队从事雷达及电子对抗的科技工作者与工程技术人员参考。

本书编写历时三年多,其间又经过多次补充、修改、完善。但相控阵雷达阵列处理包含大量的理论、算法、技术、系统、应用、工程和硬件问题,且涉及天线阵列、ADC、处理机、通道、馈线等诸多方面。作者理论与学术水平有限,对系统、应用及工程方面的认识也有一定的局限,因而书中可能存在一些缺点和不足之处,敬请有关专家和读者批评指正。

胡航

2017年5月



# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
第 2 章 阵列处理的基本模型与结构 .....	5
2.1 阵列设计 .....	5
2.2 子阵的设计方法 .....	6
2.3 加权方案 .....	7
2.4 处理结构与模型 .....	8
第 3 章 静态方向图的子阵级旁瓣抑制方法 .....	10
3.1 引言 .....	10
3.2 抑制差波束旁瓣的子阵级加权:解析方法 .....	10
3.2.1 权值近似 .....	11
3.2.2 方向图近似 .....	12
3.2.3 仿真结果 .....	13
3.3 抑制差波束旁瓣的子阵级加权:遗传优化 .....	17
3.4 基于一种模拟加权的和差波束旁瓣的同时抑制方法:线阵 .....	21
3.4.1 模拟加权 .....	22
3.4.2 数字加权 .....	23
3.4.3 仿真分析 .....	24
3.5 基于一种模拟加权的和差波束旁瓣的同时抑制方法:平面阵 .....	26
3.6 基于凸规划的差波束形成及旁瓣约束 .....	30
3.7 本章小结 .....	33
第 4 章 子阵级波束扫描的旁瓣抑制方法 .....	35
4.1 引言 .....	35
4.2 子阵级波束扫描的方向图及加权网络 .....	35
4.3 理想子阵方向图方法 .....	37
4.3.1 矩形投影区域方法 .....	37
4.3.2 圆形投影区域方法 .....	38
4.3.3 仿真结果 .....	38
4.4 高斯子阵方向图方法 .....	41
4.5 简化的理想子阵方向图方法 .....	44

4.6	简化的高斯子阵方向图方法	47
4.7	本章小结	50
<b>第5章</b>	<b>ABF 及自适应干扰抑制</b>	<b>51</b>
5.1	引言	51
5.2	ABF 的结构	52
5.3	SMI 及其局限性	54
5.4	鲁棒的 ABF	55
5.4.1	对角加载方法	55
5.4.2	子空间投影法	56
5.4.3	干扰子空间维数的确定	57
5.4.4	CAPS	58
5.5	静态方向图控制方法	59
5.5.1	归一化方法	59
5.5.2	MOD	61
5.5.3	SSP	65
5.5.4	方向图控制与 SMI 的结合方法	67
5.6	两级子阵级加权	70
5.7	SLC	73
5.8	GSLC	74
5.9	不同 ABF 结构的性能	77
5.10	栅零问题	78
5.11	算法的应用	79
5.12	ABF 的系统设计问题	80
5.13	时间采样	82
5.14	处理机结构	83
5.15	本章小结	84
<b>第6章</b>	<b>宽带 BF 及宽带干扰抑制</b>	<b>87</b>
6.1	引言	87
6.2	时延子阵	88
6.2.1	时延子阵结构	88
6.2.2	子阵数的选取	89
6.3	时延子阵 BF	90
6.3.1	宽带信号模型	90
6.3.2	宽带方向图	92
6.4	时延子阵 ABF	92
6.5	ABF 扩展到宽带干扰	95

6.6	快时 STAP .....	96
6.6.1	STAP 的两种形式 .....	96
6.6.2	快时 STAP 的结构 .....	96
6.6.3	信号模型 .....	98
6.6.4	时延子阵快时 STAP .....	99
6.7	改进的 SLC - STAP; 宽带主瓣干扰对消 .....	100
6.8	本章小结 .....	103
<b>第 7 章</b>	<b>子阵设计与栅瓣抑制 .....</b>	<b>104</b>
7.1	子阵结构与尺寸要求 .....	104
7.2	用于栅瓣抑制的子阵结构 .....	105
7.3	随机子阵 .....	106
7.4	重叠子阵的设计 .....	107
7.5	子阵锥削加权 .....	109
7.6	基于子阵优化的栅瓣抑制 .....	110
7.7	子阵位置误差的影响及补偿 .....	111
7.8	稀疏子阵 .....	112
7.9	本章小结 .....	115
<b>第 8 章</b>	<b>阵列/通道误差的影响及均衡 .....</b>	<b>116</b>
8.1	引言 .....	116
8.2	阵列处理中的误差因素 .....	116
8.3	L/Q 误差的影响 .....	117
8.4	带通滤波器误差的影响 .....	119
8.5	通道误差对 ABF 性能影响的一些结论 .....	121
8.6	通道间/内失配对干扰对消性能的影响 .....	122
8.7	主/辅通道失配对干扰对消性能的影响 .....	122
8.8	通道色散误差均衡滤波器的一个实例 .....	124
8.9	本章小结 .....	125
<b>第 9 章</b>	<b>慢时 STAP .....</b>	<b>127</b>
9.1	引言 .....	127
9.2	子阵级处理的必要性 .....	127
9.3	STAP 的基本模型 .....	128
9.4	空时协方差矩阵的杂波秩估计 .....	129
9.5	STAP 的子阵结构设计 .....	132
9.6	对称辅助列子阵的处理结构 .....	134
9.7	杂波与干扰的联合抑制 .....	135
9.7.1	干扰与杂波的同时抑制: 辅助通道空时滤波 .....	136

9.7.2	干扰与杂波的分别抑制	137
9.8	阵列误差对 STAP 性能的影响	138
9.9	本章小结	139
<b>第 10 章</b>	<b>自适应检测</b>	<b>140</b>
10.1	引言	140
10.2	SLB	140
10.3	保护通道的设计	141
10.4	自适应检测器	143
10.5	锥削阵列的检测性能	147
10.5.1	统计量的分布	147
10.5.2	检测器的性能	147
10.6	阵列误差及失配对检测器性能的影响	148
10.7	基于先进 ABF 的自适应检测	149
10.8	本章小结	150
<b>第 11 章</b>	<b>自适应单脉冲</b>	<b>152</b>
11.1	引言	152
11.2	自适应单脉冲算法	153
11.2.1	已有算法	153
11.2.2	性能评估	154
11.3	基于两级干扰抑制的自适应单脉冲	155
11.3.1	四通道单脉冲系统	156
11.3.2	信号模型	156
11.3.3	第一级自适应:主瓣保形 ABF	157
11.3.4	第二级自适应:四通道主瓣干扰抵消	158
11.3.5	仿真分析	161
11.4	子阵级静态权对单脉冲性能的影响	164
11.5	干扰环境下 DOA 估计的 CRLB	165
11.5.1	ML 方向估计	165
11.5.2	CRLB	166
11.6	本章小结	168
<b>第 12 章</b>	<b>超分辨</b>	<b>170</b>
12.1	引言	170
12.2	雷达超分辨问题	171
12.3	超分辨在雷达中的应用	172
12.4	超分辨算法及其特性	173
12.4.1	谱方法	174

12.4.2	参数化方法	175
12.5	超分辨的信号模型	176
12.5.1	MUSIC	177
12.5.2	MLE	177
12.5.3	WSF	178
12.6	基于简化阵列流形的超分辨	178
12.6.1	直接简化的阵列流形方法	178
12.6.2	基于理想子阵方向图的简化阵列流形方法	182
12.6.3	基于高斯子阵方向图的简化阵列流形方法	186
12.6.4	基于近似理想子阵方向图的简化阵列流形方法	191
12.6.5	基于近似高斯子阵方向图的简化阵列流形方法	193
12.7	各种超分辨算法的应用性能	196
12.8	算法实现与应用问题	199
12.8.1	目标数的确定	199
12.8.2	数值极大/极小化	200
12.8.3	非均匀背景	200
12.8.4	多径成分的鉴别	200
12.8.5	CW 噪声干扰的抑制	200
12.8.6	运动目标的超分辨	202
12.8.7	提高超分辨性能的方案	202
12.9	主瓣干扰下的超分辨	203
12.9.1	目标的 DOA 估计	203
12.9.2	主瓣干扰的 DOA 估计	203
12.10	超分辨系统的设计	204
12.10.1	天线结构	204
12.10.2	子阵	204
12.10.3	接收通道	204
12.10.4	阵列流形与校正	205
12.10.5	通道数	205
12.10.6	处理机	206
12.11	本章小结	206
<b>第 13 章</b>	<b>宽带超分辨</b>	<b>209</b>
13.1	引言	209
13.2	窄带超分辨的局限	209
13.3	宽带信号模型	210
13.4	基于子阵时延的空域超分辨	211

13.5	子带超分辨	211
13.5.1	ISSM	212
13.5.2	CSST	213
13.5.3	WAVES	214
13.6	空时超分辨	215
13.7	各种宽带超分辨方法的性能比较	216
13.8	本章小结	217
<b>第 14 章</b>	<b>相控阵雷达的最优子阵划分</b>	<b>219</b>
14.1	引言	219
14.2	子阵结构的编码方法及子阵划分的约束条件	220
14.3	基于 GA 的子阵优化	221
14.3.1	基于自适应交叉算子的改进 GA	221
14.3.2	子阵划分流程	222
14.3.3	数值结果	222
14.4	MOGA 子阵优化的目标函数	222
14.5	基于 Pareto 秩排序 MOGA 的子阵优化	223
14.5.1	原理	223
14.5.2	子阵优化流程	225
14.6	基于 VEGA 的子阵优化	225
14.7	子阵结构规则化	227
14.7.1	满布规则	227
14.7.2	子阵形状控制	227
14.8	仿真分析	227
14.9	子阵优化方法的改进	230
14.10	圆阵的优化	232
14.11	本章小结	233
<b>第 15 章</b>	<b>子阵级 MIMO - PAR 的阵列处理</b>	<b>235</b>
15.1	引言	235
15.2	MIMO - PAR 的发射端结构	237
15.3	MIMO - PAR 的信号模型	238
15.4	基于子阵信号的发射方向图合成	239
15.4.1	原理	239
15.4.2	性能评估	240
15.4.3	仿真分析	241
15.5	MIMO - PAR 的方向图特性	241
15.6	接收 ABF	243

15.7	空时模糊函数	243
15.8	MIMO - PAR 的子阵优化	244
15.9	本章小结	245
<b>第 16 章</b>	<b>结论与展望</b>	<b>246</b>
<b>参考文献</b>		<b>249</b>

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>Introduction</b>	1
<b>Chapter 2</b>	<b>Basic Model and Processing Architecture</b>	5
2.1	Design of Arrays	5
2.2	Design Strategy of Subarrays	6
2.3	Weighting Scheme	7
2.4	Model and Processing Architecture	8
<b>Chapter 3</b>	<b>Subarrayed Weighting for Sidelobe Reduction of Quiescent Patterns</b>	10
3.1	Introduction	10
3.2	Weighting at Subarray Level for Sidelobe Reduction of Difference Beamforming: Analytic Approach	10
3.2.1	Weight Approximation	11
3.2.2	Pattern Approximation	12
3.2.3	Simulation Results	13
3.3	Weighting at Subarray Level for Sidelobe Reduction of Difference Beamforming: Genetic Algorithm	17
3.4	An Analogue Weighting for Sidelobe Reduction of Both Sum and Difference Beamforming—Linear Array	21
3.4.1	Analogue Weights	22
3.4.2	Digital Weights	23
3.4.3	Simulation Results	24
3.5	An Analog Weighting for Sidelobe Reduction of Both Sum and Difference Beamforming—Planar Array	26
3.6	Convex Programming – based Pattern Synthesis and Sidelobe Constraint for Difference Beamforming	30
3.7	Summary	33
<b>Chapter 4</b>	<b>Sidelobe Reduction for Subarrayed Beam Scanning</b>	35
4.1	Introduction	35
4.2	Patterns of Subarrayed Beam Scanning and Subarray Weighting	



Network .....	35
4.3 Ideal Subarray Pattern – based Approach .....	37
4.3.1 Rectangular Projection Area – based Approach .....	37
4.3.2 Circular Projection Area – based Approach .....	38
4.3.3 Simulation Results .....	38
4.4 Gaussian Subarray Pattern – based Approach .....	41
4.5 Simplified Ideal Subarray Pattern – based Approach .....	44
4.6 Simplified Gaussian Subarray Pattern – based Approach .....	47
4.7 Summary .....	50
<b>Chapter 5 ABF and Adaptive Interference Suppression .....</b>	<b>51</b>
5.1 Introduction .....	51
5.2 Basic Structure of ABF .....	52
5.3 SMI and Its Limitations .....	54
5.4 Estimation of Adaptive Weights .....	55
5.4.1 Diagonal Loading .....	55
5.4.2 Subspace Projection .....	56
5.4.3 Selection of dimension of jammer subspace .....	57
5.4.4 CAPS .....	58
5.5 Quiescent Pattern Controlling .....	59
5.5.1 Normalization Method .....	59
5.5.2 MOD .....	61
5.5.3 SSP .....	65
5.5.4 Combined Method of SMI and Pattern Controlling .....	67
5.6 Two – stage Subarray Level Weighting .....	70
5.7 SLC .....	73
5.8 GSLC .....	74
5.9 Capabilities of Various ABF Types .....	77
5.10 Grating Notches .....	78
5.11 Operation of Algorithms .....	79
5.12 System Design of ABF .....	80
5.13 Temporal Sampling .....	82
5.14 Processing Scheme .....	83
5.15 Summary .....	84
<b>Chapter 6 Broadband BF and Broadband Jamming Suppression .....</b>	<b>87</b>
6.1 Introduction .....	87
6.2 Time – delayed Subarray .....	88