



国防科技著作精品译丛

雷达电子战系列

MIMO Radar Signal Processing

MIMO雷达信号处理

【美】Jian Li Peter Stoica 著

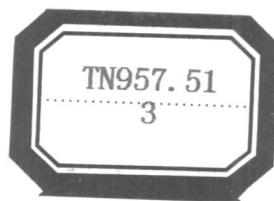
黄高明 左 炜 刘 涛 等译 高 俊 审

WILEY | 北

国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金



MIMO 雷达信号处理

MIMO Radar Signal Processing

[美] Jian Li Peter Stoica 著
黄高明 左 炜 刘 涛 等译
高 俊 审



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 -2010 -034 号

图书在版编目 (CIP) 数据

MIMO雷达信号处理 / (美) 李建, (美) 斯托伊卡 (Stoica, P.)
著; 黄高明等译. -- 北京: 国防工业出版社, 2013.9
(国防科技著作精品译丛. 雷达电子战系列)
书名原文: MIMO radar signal processing
ISBN 978-7-118-09061-1

I. ①M… II. ①李… ②斯… ③黄… III. ①移动通信-雷达
信号处理 IV. U7N957.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 199009 号

Translation from the English language edition:

MIMO Radar Signal Processing by Jian Li and Peter Stoica

Copyright © 2009 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved.

This translation published under license.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

MIMO 雷达信号处理

[美] Jian Li Peter Stoica 著

黄高明 左 炜 刘 涛 等译 高 俊 审

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 27¼

字 数 440 千字

版 印 次 2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—3000 册

定 价 110.00 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

翻 译 组 名 单

组 长： 黄高明

副组长： 左 炜 刘 涛

成 员： 吴鑫辉 方 标 马 捷

应 涛 聂 忠 许晓明

主 审： 高 俊

译者序

MIMO雷达又称多输入多输出雷达, MIMO技术是指在发射端和接收端分别使用多个发射天线和接收天线, 信号通过发射端和接收端的多个天线传送和接收, 从而改善每个用户得到的服务质量 (误比特率或数据速率)。MIMO技术首先在无线通信提出, 在无线通信尤其是在第三代移动通信 (W-CDMA) 中有广泛的应用。其目的是解决无线通信中信道衰落问题, 提高信道容量。受这一技术的启发, 与常规的相控阵雷达的不同之处在于相控阵雷达以提高相参处理增益为目的, 发射的信号是相参信号; 而MIMO雷达则利用目标的角度分集特征以改进雷达性能, 为实现空间分集, MIMO 雷达发射信号通常在时域上是正交的。现有的相控阵雷达、单/多基地雷达、SAR 等均可看作是MIMO雷达的一种特例。MIMO 雷达是一个新生事物, 尽管目前国际上仍处于概念研究的阶段, 但其体制上的优越性, 对于传统雷达的更深层理解, 以及新体制、新概念雷达的研究具有指导意义。

MIMO 雷达的信号处理内容丰富, 在现代信号处理许多领域都应用, 而且涉及的学科领域丰富。本书集合当今国际上对MIMO雷达的研究成果, 技术水平高, 内容涉及的专业领域广, 并获得了很多突破性成果, 为后续相关工程研制和实现建立了初步的理论基础, 具有非常明显的实用价值。全书以 MIMO 信号处理为中心, 对自适应信号处理进行了深入阐述, 充分反映了近年来该领域的新理论、新技术和新应用。

本书按照雷达信号处理研究生课程的水平编写。在这个范围内, 在材

料的组织上为读者选择适合这一主题的兴趣的内容提供了很大的灵活性。与国内外同类书相比, 本书的适应面和实用性更强, 国内在这方面的图书相对较少, 而需求较多。本书不仅适于从事雷达工程、通信工程、电子对抗、信息工程等专业的高校教师和学生使用, 而且对产业界的研究者和工程师, 以及工作在与新型雷达系统理论和应用有关的政府行政机关的人员也有帮助。

本书的翻译工作由海军工程大学黄高明教授牵头完成, 参与本书初译的人员还有左炜、刘涛、吴鑫辉、方标、马捷、应涛、聂忠、许晓明等同志, 最后由海军工程大学高俊教授完成译校。在翻译过程中, 我们力求忠实、准确地把握原著, 同时保留原著的风格。但由于译者水平有限, 书中难免有错误和不准确之处, 恳请广大读者批评指正。

译者

2013 年 7 月

原版序

近几年,多输入多输出(MIMO)雷达已得到了学术界研究者、专业人员以及基金组织的广泛关注。MIMO雷达是因同时使用多个天线发射不同波形(可能线性独立)以及多个天线同时接收反射信号而闻名。如同MIMO通信,MIMO雷达提供了一种信号处理研究的新模式,在缓解衰落、提升分辨率以及抑制干扰等方面具有重大潜力。这些潜力的充分挖掘与研究,可给目标检测、参数估计以及目标跟踪和识别性能带来显著改进。

本书致力于引进近年来MIMO雷达的最新发展,以促进该课题的新概念、新理论和应用的发展,以及与MIMO通信领域思想的融合和交汇。本书是第一本逻辑性严谨的介绍MIMO雷达的专著,包含了来自学术界和科学实验室诸多知名学者的成果与贡献。

本书组织结构如下:前7章重点研究了波形分集的优点,通过并置排列的发射和接收单元阵列来提高雷达性能,而最后3章进一步发掘分集性的优势,研究广义分布式发射/接收天线单元以提高性能增益。

第1章由佛罗里达大学(University of Florida)的J.Li和乌普萨拉大学(Uppsala University)的P.Stoica所著,显示出MIMO雷达的波形分集特点在一些基础领域上的优越性,包括改善了参数可辨识性与自适应技术在接收数据参数上的直接应用,提高了目标检测与参数估计性能,更灵活地进行发射波形设计。第2章基于麻省理工学院林肯实验室(MIT Lincoln Laboratory)的K.W.Forsythe和D.W.Bliss的研究,他们提供了一个关于雷达及MIMO雷达研究现状的趣味性历史回顾。这一章宽泛地同时涵盖了

主要研究课题,包括了 MIMO 虚拟孔径、性能界限、波形优化以及 MIMO 地面动目标搜索雷达 (GMTI) 的最小化搜索率等一系列问题。第 3 章是基于华盛顿大学 (Washington University) 的 G.San Antonio、D.R.Fuhrmann 和 F.C.Robey (MIT Lincoln Laboratory) 的联合工作,讲述了雷达的一个基本问题: MIMO 雷达是如何扩展常规 Woodward 模糊函数的。这一章提出了一种能同时描述阵列几何特征、发射波形以及目标扫描分辨率性能的 MIMO 模糊函数。第 4 章基于内盖夫本古里安大学 (Ben-Gurion University of the Negev) J.Tabrikian 的研究,给出了 MIMO 雷达目标定位性能界以及相关特性的深入探讨。第 5 章由圣·克鲁斯加利福尼亚大学 (University of California at Santa Cruz) 的 B.Friedlander 提供,考虑了基于目标和杂波统计特性的波形设计来改善雷达目标探测和参数估计性能。第 6 章基于加利福尼亚技术研究院 (California Institute of Technology) 的 C.Y.Chen 和 P.P. Vaidyanathan 的研究工作,集中于快时间 MIMO 时空自适应处理 (STAP),并提出了一种新算法,可利用杂波协方差矩阵的几何结构在保持良好的信干噪比的条件下达到降低计算复杂度的目的。第 7 章基于杜克大学 (Duke University) 的 V.F.Mecca 和高通公司 (Qualcomm Inc) 的 D.Ramakrishnan、麻省理工学院林肯实验室的 F.C.Robey、杜克大学的 J.L.Krolik 的共同研究,主要是慢时间 MIMO 时空自适应处理以及在超视距杂波消除方面的应用。通过脉冲—脉冲的相位编码实现波形正交性,同时具有硬件执行简便的重要优势。

第 8 章基于克兰菲尔德大学 (Cranfield University) 的 H.D.Griffiths、C.J.Baker 和伦敦大学学院 (University College London) 的 P.F.Sammartino,以及空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory) 的 M.Rangaswamy 的共同成果,研究了分布式雷达网的性能与用途,给出了将 MIMO 框架应用于雷达的深入分析。第 9 章主要基于新泽西技术研究院 (New Jersey Institute of Technology) 的 H.Godrich、A.M.Haimovich 以及理海大学 (Lehigh University) 的 R.S.Blum 的素材,包括使用分布天线的 MIMO 雷达系统的概念与应用的综述。这一章也讨论了模糊函数和性能边界,以及高分辨率目标定位技术。最后,第 10 章是由那不勒斯费德里克二世大学 (Universita degli Studi di Napoli “Federico II”) 的 A.De Maio 和卡西诺大学 (Universita degli Studi di Cassino) 的 M.Lops 编写,重点研究借助于最优化时空编码矩阵的统计 MIMO 技术,同时针对探测性能与选择编码矩阵之间的相互影响进行了深入有效的探讨。

诚挚地感谢本书各个章节作者的原创性贡献,与此同时,向为了本书

的问世做出贡献的其他作者也深表谢意。我们的大部分工作集中于波形分集研究以及 MIMO 雷达应用领域, 生物工程自然成为我们在阵列信号处理研究工作上的延展。对于下列支持本项研究的机构和人员在此表达谢意: 美国国家科学基金会 (the National Science Foundation, NSF)、美国海军研究局 (the Office of Naval Research, ONR)、美国陆军研究局 (the Army Research Office, ARO)、美国国防部高级研究计划局 (the Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)、以及瑞典科学研究委员会 (the Swedish Science Council, VR)。同时衷心感谢 George Telecki 副教授, Wiley 出版社的 Melissa Valentine 及 Rachel Witmer 助理编辑, 他们提供的友好服务使得本书得以顺利出版。最后, 诚挚感谢 Xing Tan 先生帮助我们完成本书的统稿工作。

JIAN LI, PETRE STOICA

目录

第 1 章 MIMO 雷达 —— 分集性意味着优越性	1
1.1 概述	1
1.2 问题的公式化描述	3
1.3 参数的辨识	4
1.3.1 预备分析	5
1.3.2 充要条件	6
1.3.3 数值实例	7
1.4 非参数自适应技术在参数估计中的应用	9
1.4.1 不考虑阵列校准误差	11
1.4.2 阵列校准误差	14
1.4.3 数值实例	17
1.5 参数估计的参数方法	23
1.5.1 ML 和 BIC	23
1.5.2 数值实例	27
1.6 发射波形设计	29
1.6.1 波形匹配设计	30
1.6.2 旁瓣最小化波形设计	33
1.6.3 相控阵波形设计	33
1.6.4 数值实例	34
1.6.5 乳癌的超声高热治疗应用	41

1.7 小结	47
附录 1A 一般似然比检验	50
附录 1B 引理及证明	52
参考文献	54

第 2 章 MIMO 雷达: 概念, 性能增强及应用 61

2.1 概述	61
2.1.1 雷达简史	61
2.1.2 MIMO 雷达的定义和特点	62
2.1.3 MIMO 雷达的用途	63
2.1.4 MIMO 雷达研究现状	65
2.1.5 本章框架	67
2.2 符号	67
2.3 MIMO 雷达虚拟孔径	68
2.3.1 MIMO 信道	68
2.3.2 MIMO 虚拟阵列: 分辨率和旁瓣	69
2.4 无杂波环境中的 MIMO 雷达	72
2.4.1 克拉美 — 罗估计界限的限制	72
2.4.2 信号模式	72
2.4.3 Fisher 信息矩阵	74
2.4.4 波形相关优化	77
2.4.5 实例	79
2.5 MIMO 雷达探测最优化的	82
2.5.1 探测	82
2.5.2 高信噪比	84
2.5.3 弱信号	85
2.5.4 无搜索条件下的最优波束形成	86
2.5.5 非衰落目标	86
2.5.6 MIMO 雷达的额外优点	87
2.6 MIMO 雷达杂波下动目标指示: 地面动目标指示雷达	87
2.6.1 信号模式	88
2.6.2 定位与合适的信噪比	90
2.6.3 内积和波束宽度	95

2.6.4	信噪比损失	97
2.6.5	信噪比损失和波形优化	101
2.6.6	区域搜索率	103
2.6.7	一些实例	103
2.7	总结	105
附录 2A	定位原则	105
附录 2B	$R(N)$ 的界	108
附录 2C	一个不等式范数算子	108
附录 2D	可以忽略的项	108
附录 2E	特征值的界	109
附录 2F	内积	109
附录 2G	不变的内积	110
附录 2H	克罗内克和向量积	111
2H.1	分类排序	112
2H.2	张量积和克罗内克积	112
2H.3	性质	113
参考文献		113
第 3 章	广义 MIMO 雷达模糊函数	117
3.1	概述	117
3.2	背景	118
3.3	MIMO 信号模型	121
3.4	MIMO 参数信道模型	124
3.4.1	信号发射模型	124
3.4.2	信道和目标模型	124
3.4.3	接收信号参数模型	126
3.5	MIMO 模糊函数	126
3.5.1	MIMO 模糊函数	129
3.5.2	模型简化下的互相关函数	131
3.5.3	自相关函数和发射波形	134
3.6	结论和实例	135
3.6.1	正交信号	136
3.6.2	相干信号	139

3.7 总结	142
参考文献	142

第 4 章 MIMO 雷达目标定位精度和技术

4.1 概述	146
4.2 问题的提出	147
4.3 特性	150
4.3.1 虚拟孔径扩展	152
4.3.2 空间范围与辐射可能性	153
4.3.3 波束形式改进	155
4.4 目标定位	157
4.4.1 最大似然估计	158
4.4.2 发射分集平滑	159
4.5 目标定位的性能下界	162
4.5.1 克拉美罗界	162
4.5.2 Barankin 界	165
4.6 仿真结果	166
4.7 讨论和总结	172
附录 4A 对数似然推理	173
4A.1 一般模型	173
4A.2 无干扰, 单目标 — 多普勒	176
附录 4B 发射接收模型的推导	177
附录 4C Fisher 信息矩阵推导	177
参考文献	180

第 5 章 MIMO 雷达的自适应信号处理

5.1 概述	182
5.2 问题的数学模型	183
5.2.1 信号的数值范围简化模型	188
5.2.2 多脉冲和多普勒效应	189
5.2.3 完整模型	191
5.2.4 统计模型	191

5.3	估计	192
5.3.1	波束形成解决方案	192
5.3.2	最小二乘法	199
5.3.3	波形设计估计	200
5.4	检测	203
5.4.1	最优检测器	203
5.4.2	信干噪比	204
5.4.3	最优波形设计	206
5.4.4	次优波形设计	207
5.4.5	设计约束	207
5.4.6	目标和杂波模型	209
5.4.7	数值范例	209
5.5	MIMO 雷达和相控阵	214
5.5.1	接收后发射波束扫描	217
5.5.2	发射波束的适应性	217
5.5.3	发送 — 接收复合波形	218
附录 5A	SINR 的理论计算	219
	参考文献	220

第 6 章 MIMO 雷达时空自适应处理和信号设计 224

6.1	概述	225
6.1.1	记号	226
6.2	虚拟阵列的概念	226
6.3	MIMO 雷达时空自适应处理	231
6.3.1	信号模型	231
6.3.2	完全自适应的 MIMO 雷达 STAP 方法	233
6.3.3	与 SIMO 系统比较	234
6.3.4	STAP 的虚拟矩阵	235
6.4	MIMO 雷达的杂波子空间	236
6.4.1	MIMO 雷达中的杂波秩: Brennan 规则在 MIMO 中的扩展	237
6.4.2	杂波子空间的 PSWF 独立数据估计	240

6.5	新的 MIMO 雷达中断方法	244
6.5.1	新算法的提出	245
6.5.2	新方法的复杂度	245
6.5.3	协方差矩阵的估计	246
6.5.4	迫零法	246
6.5.5	与其他方法的比较	247
6.6	数值举例	247
6.7	时空自适应雷达系统的信号设计	251
6.7.1	MIMO 雷达模糊函数	251
6.7.2	MIMO 模糊函数的一些性质	253
6.7.3	MIMO 周期脉冲雷达信号的模糊函数	257
6.7.4	多频线性调频信号	259
6.7.5	跳频信号	261
6.8	结论	263
	参考文献	264

第 7 章 慢时间 MIMO 空时自适应处理 268

7.1	概述	268
7.1.1	MIMO 雷达和空间分集	268
7.1.2	MIMO 和目标衰落	270
7.1.3	MIMO 和处理增益	271
7.2	SIMO 雷达建模与处理	273
7.2.1	广义雷达发射波形	273
7.2.2	SIMO 目标模型	274
7.2.3	SIMO 协方差模型	275
7.2.4	SIMO 雷达处理	276
7.3	慢时间 MIMO 雷达建模	277
7.3.1	慢时间 MIMO 目标建模	277
7.3.2	慢时间 MIMO 协方差模型	279
7.4	慢时间 MIMO 雷达信号处理	281
7.4.1	慢时间 MIMO 方向图和电压驻波比	283
7.4.2	子阵列慢时间 MIMO	285
7.4.3	SIMO 与慢时间 MIMO 设计的比较	285

7.4.4	MIMO 雷达发射 — 接收方向谱估计	287
7.5	超视距传播和雷达杂波模型	288
7.6	仿真实验实例	291
7.6.1	接收/发射波束成形	291
7.6.2	SINR 性能	295
7.6.3	发射 — 接收谱	298
7.7	结论	300
	参考文献	300
第 8 章	MIMO: 分布式雷达系统	303
8.1	概述	303
8.2	系统	305
8.2.1	信号模型	306
8.2.2	空间 MIMO 系统	308
8.2.3	网络雷达系统	308
8.2.4	非集中式雷达网	310
8.3	性能	311
8.3.1	虚警概率	311
8.3.2	检测概率	319
8.3.3	抗干扰性	332
8.3.4	检测范围	335
8.4	小结	342
	参考文献	343
第 9 章	分布式天线 MIMO 雷达系统的概念与应用	348
9.1	背景	348
9.2	MIMO 雷达的概念	351
9.2.1	信号模型	351
9.2.2	空间去相关性	355
9.2.3	其他多天线雷达	357
9.3	非相干 MIMO 雷达应用	359
9.3.1	分集增益	359
9.3.2	动目标探测	362

9.4 相干 MIMO 雷达应用	365
9.4.1 模糊函数	366
9.4.2 CRLB	370
9.4.3 MLE 目标定位	372
9.4.4 BLUE 目标定位	374
9.4.5 GDOP	376
9.4.6 讨论	380
9.5 本章小结	380
参考文献	381

第 10 章 MIMO 雷达中的时空编码 385

10.1 概述	385
10.2 系统模型	388
10.3 MIMO 雷达的检测	391
10.3.1 满秩码矩阵	392
10.3.2 秩为 1 的码矩阵	393
10.4 空时编码设计	394
10.4.1 基于切尔诺夫界的码构造	396
10.4.2 基于 SCR 的码构造	399
10.4.3 基于互信息 (MIB) 的码构造	400
10.5 STC 和检测性能的相互影响	401
10.6 数值结果	403
10.7 自适应应用	409
10.8 结论	413
参考文献	414