

频控阵MIMO雷达波束 形成与参数估计

Beamforming And Parameter Estimation
Of Frequency Diverse MIMO Radar

巩朋成 李风从 王文钦 李婕 著



科学出版社

频控阵 MIMO 雷达波束形成 与参数估计

巩朋成 李风从 王文钦 李 婕 著

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)雷达近年来受到雷达界和相关学术界科研人员的高度关注和研究。本书围绕波形分集、频控阵等带来的新问题,深入地研究 MIMO 雷达、频控阵 MIMO 雷达中的波束形成和参数估计,包括 MIMO 雷达的窄带和宽度波束形成、MIMO 雷达的角度和距离估计、频控阵 MIMO 雷达的波束形成、频控阵 MIMO 雷达的参数估计。

本书可作为通信与信息系统、信号与信息处理、信息对抗技术、电磁场与微波技术等相关专业高年级本科生和研究生的参考书,也可供从事阵列信号处理相关领域的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

频控阵 MIMO 雷达波束形成与参数估计/巩朋成等著. —北京:科学出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-03-055725-4

I. ①频… II. ①巩… III. ①雷达波形 IV. ①TN951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 293285 号

责任编辑:闫 陶 杜 权/责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2017 年 11 月第 一 版 印张:10 1/2

2017 年 11 月第一次印刷 字数:250 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序

多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)系统是控制系统中的一个概念,表示一个系统有多个输入和多个输出,但仅仅从此概念来理解 MIMO 雷达是比较困难的。受 MIMO 系统的启发,第 37 届和第 38 届“Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers”以及 2004 年 IEEE 雷达会议,专题讨论了 MIMO 雷达及其相关理论,至此 MIMO 雷达的概念被正式提出。相比于传统的相控阵雷达, MIMO 雷达除了提高目标检测的可靠性和探测隐身目标的能力,还具有更高的分辨特性、更好的目标参数估计性能、更强的抗干扰能力以及更好的目标识别能力等优点。

该书正是以上述优点来介绍 MIMO 雷达系统的,内容主要涵盖了目前 MIMO 雷达中各种最实用的波形设计和参数估计,包括 MIMO 信号模型及正交波形设计、基于凸优化的窄带 MIMO 雷达波形优化设计、宽带 MIMO 雷达波形设计、MIMO 雷达目标多维参数估计以及频控阵 MIMO 雷达目标参数估计。对每一个章节,作者不仅进行了十分详尽和直观的解释,还给出了具体算法的仿真验证与分析,使其便于工程实现。此外,为了便于理解和阅读,作者尽量采用图表形式阐述观点,并给出了重要部分的证明。另外,书后的参考文献也提供了进一步思考相关问题的线索。

该书的第一作者巩朋成近年来主要从事有关 MIMO 雷达方面的研究,积累了大量有关 MIMO 雷达系统的理论知识和创新成果,为理论研究成果向实际工程应用搭建了桥梁,做出了重要的贡献。巩朋成博士先后主持了国家自然科学基金青年基金、中国博士后科学基金、博士启动基金等多项项目,以第一作者在国际权威期刊发表 SCI 检索论文多篇,并担任国内外 MIMO 雷达领域多个权威期刊的审稿人。

张永权

西安电子科技大学电子工程学院

2017 年 9 月 25 日

前 言

MIMO 雷达近十多年来受到了雷达界和相关学术界科研人员的高度关注和研究。目前在文献中提到最多的是共址式和集中式两类 MIMO 雷达,前者由麻省理工学院(MIT)林肯实验室的 Bliss 和 Forsythe 在第 37 届 Asilomar 会议上首次提出,其特点是应用波形分集技术,可以设计灵活的波束,提高目标分辨、参数识别和干扰抑制等性能;后者由美国新泽西理工学院(NJIT)的 Haimovich, Fishler 及里海大学(LU)的 Blum 等在 2004 年 IEEE 雷达会议上首次提出,其特点在于通过空间分集利用目标的 RCS 散射特性,提高目标检测和参数估计性能。除此之外,结合其他技术如相控阵、压缩感知以及频控阵等的混合 MIMO 雷达也得到了大批学者的深入研究。本书主要基于共址式 MIMO 雷达系统展开,也涉及压缩感知和频控阵等技术。

本书是基于近六年来对 MIMO 雷达和频控阵深入研究的经验和总结,内容包括正交波形设计、窄带部分相关信号设计、宽带部分相关信号设计、静止目标和运动目标参数估计等。本书可为有兴趣在 MIMO 雷达和频控阵理论及其工程应用领域从事研究工作的读者起到抛砖引玉的作用。

全书共分 6 章。第 1 章综述了 MIMO 雷达的背景和特点,以及新体制 MIMO 雷达的国内外研究概况。第 2 章介绍了 MIMO 雷达信号模型及正交波形设计方法,包括频域迭代的正交波形设计方法以及从谱逼近的角度分析 CAN 方法。第 3 章研究了基于凸优化的窄带 MIMO 雷达波形优化设计,包括基于 SQP 的方向图合成和基于 SOCP 的方向图合成,以及基于方向图的波形合成。第 4 章研究了宽带 MIMO 雷达波形设计,包括单向的宽带 MIMO 雷达波形设计,以及宽角度的发射方向图合成。第 5 章研究了基于稀疏表示的静止目标自适应 MIMO 雷达参数估计方法,并讨论了基于迭代重复加权最小化方法进行运动目标的距离-方位-多普勒三维参数估计问题。第 6 章提出了基于稀疏迭代方法的窄带频控阵 MIMO 雷达目标参数估计方法,以及基于循环优化和类功率迭代法的 FDA-MIMO 雷达的发射波束矩阵设计方法。其中第 3 章中基于二阶锥规划的 MIMO 雷达方向图合成,以及第 4 章中宽频带宽角度的 MIMO 雷达方向图合成的研究思路和相关技术都可以应用到相控阵及频控阵等阵列的方向图合成中。

本书由湖北工业大学的巩朋成、李风从和李婕,电子科技大学的王文钦共同撰写完成。巩朋成博士完成第 1 和第 4~6 章以及第 3 章部分内容的撰写和全书内容的组织、统稿工作;李风从博士完成第 2 章以及第 3 章部分内容的撰写;王文钦博士和李婕博士完成全书审阅工作;此外湖北工业大学 B616 实验室的涂斯纯、李仄立等研究生参与了书稿编辑整理等工作。本书中涉及很多研究的成果是在电子科技大学通信与信息工程学院邵振海教授的指导和帮助下完成的,这为本书的写作打下了坚实的基础。另外,本书在写作过程中得到许多专家、同行和同学的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书内容主要源自国家自然科学基金青年基金(61601178)、中国博士后科学基金(2016M600729)、深圳市科技计划项目(JCYJ20150630145302222)、湖北工业大学博士启动基金(BSQD14032)和电子科技大学中央高校科研基金(ZYGX2011YB002)等项目的创新研究成果,也是作者近几年来部分科研成果的积累和总结。

由于作者阅历及研究水平有限,不可能面面俱到,有不妥之处在所难免,敬请专家、同行和读者谅解,并欢迎批评指正。

作 者

2017 年 9 月书于湖北工业大学南区

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 MIMO 雷达概述	1
1.2 MIMO 雷达的分类与研究现状	3
参考文献	15
第 2 章 MIMO 雷达信号模型及正交波形设计	26
2.1 MIMO 雷达信号模型	26
2.2 MIMO 雷达正交波形设计的定义	29
2.3 频域迭代的正交波形设计方法	30
2.4 从谱逼近的角度分析 CAN 方法	32
2.4.1 数学模型	32
2.4.2 基于谱逼近的优化方法	34
2.5 仿真验证与分析	38
参考文献	40
第 3 章 基于凸优化的窄带 MIMO 雷达波形优化设计	42
3.1 MIMO 雷达发射方向图的定义	43
3.1.1 问题描述	43
3.1.2 简化定义	45
3.1.3 仿真实验与分析	46
3.2 基于 SQP 的方向图合成	48
3.2.1 方向图匹配设计	48
3.2.2 仿真验证与分析	49
3.3 基于 SOCP 的方向图合成	51
3.3.1 二阶锥规划	51
3.3.2 全方位 MIMO 雷达方向图合成	52
3.3.3 旁瓣控制的 MIMO 雷达方向图合成	54
3.3.4 仿真验证与分析	56
3.4 基于方向图的波形合成	62
3.4.1 波形合成	62
3.4.2 仿真验证与分析	65
参考文献	72

第 4 章 宽带 MIMO 雷达波形设计	74
4.1 宽带 MIMO 雷达发射方向图模型	75
4.2 单向的宽带 MIMO 雷达波形设计	77
4.2.1 发射方向图合成	78
4.2.2 波形优化设计	80
4.2.3 仿真验证与分析	82
4.3 宽角度的发射方向图合成	88
4.3.1 发射方向图合成	88
4.3.2 仿真验证与分析	90
参考文献	93
第 5 章 MIMO 雷达目标多维参数估计	95
5.1 静止目标 DOA 估计	96
5.1.1 数据依赖的方法	96
5.1.2 基于稀疏表示的自适应参数估计	100
5.1.3 仿真验证与分析	109
5.2 运动目标多维参数估计	113
5.2.1 问题描述	114
5.2.2 迭代自适应方法(IAA)	115
5.2.3 一般化的 IAA(IAA-R)	116
5.2.4 基于 q 范数的多维参数估计方法	117
5.2.5 仿真验证与分析	118
参考文献	130
第 6 章 频控阵 MIMO 雷达目标参数估计	133
6.1 频控阵方向图	134
6.1.1 频控阵列发射方向图	134
6.1.2 频控阵列方向图仿真分析	135
6.2 基于稀疏迭代的多维信息联合估计	137
6.2.1 频控阵 MIMO 雷达信号模型	138
6.2.2 基于稀疏迭代的多维参数联合估计方法	140
6.2.3 仿真验证与分析	142
6.3 基于稀疏的发射波形矩阵设计	148
6.3.1 信号模型	148
6.3.2 FDA-MIMO 雷达的发射波束矩阵设计	149
6.3.3 仿真结果	151
参考文献	156

第 1 章 绪 论

MIMO 雷达作为一种新体制雷达技术,得到了研究人员的广泛关注。本章首先综述了 MIMO 雷达的分类及特点以及其一些研究热点;接着对 MIMO 雷达中的波形优化设计、波束形成和参数估计等技术及新体制 MIMO 雷达的国内外研究概况做了详细综述,并简述了 MIMO 雷达系统面临的问题。

1.1 MIMO 雷达概述

雷达能够全天候、全天时地反映目标的电磁散射特性,并对植被、地表及人体等物体有一定穿透能力,这些优点极大地扩展了雷达技术的应用范围。早期的雷达主要应用在军事方面,如对敌目标的监视、导弹武器、战斗机制导控制等^[1-2]。现在雷达已被广泛应用于民用事业^[3-5],如空中交通管制、气象预报、海上和空中导航、资源探测、土壤湿度调查以及超速车辆检测等方面。尽管雷达有着广泛的应用范围,但雷达系统的基本任务仍然是无线电探测和测距,即雷达发射机主动向目标环境发射电磁(electro magnetic, EM)信号,接收机接收散射体的回波信号,并从中检测出目标位置或者抽取更多的目标信息^[3,5]。雷达系统的基本任务如下。

(1) 检测目标的反射信号是雷达系统最基本的功能。雷达接收端的检测器决定接收信号是有目标存在的反射信号还是噪声信号,如果检测到目标存在,雷达系统接下来的任务是提取目标的一些特性信息。

(2) 提取目标的特性信息。雷达接收机提取目标反射的回波信号,通过处理一系列的信号(如位置、时间和频率的函数)得到目标的距离、速度、角度位置以及其他目标特征等信息。

通常提到的雷达都是单输入单输出(single-input single-output, SISO)雷达,即利用单个天线发射 EM 信号并通过单个天线接收目标反射的电磁波,但面对雷达散射截面(radar cross section, RCS)很小的目标,如隐形飞机、反辐射武器等, SISO 雷达只有通过提高发射功率才能有效地发现目标。然而,提高发射功率也极易被对方侦察设备截获,这样对雷达发射端的辐射信号波形以及接收端的动态范围提出了更高的要求。如存在强干扰时, SISO 雷达也很难获得准确的目标信息。

随着需求和雷达工艺的不断提高,解决上述问题的一种途径是发射端和接收端均采用多个天线结构,即相控阵雷达(phased array radar, PAR)。PAR 由一组天线单位构成,且每个天线单位与一个相位转移器相连接^[6],故相控阵不需要进行机械扫描,通过移相就可以向空间驱动多个波束^[7-10]。在相控阵中,天线单位可以按照多种方式放置,如线性、平面或者立体阵列,天线单位之间的间距可以是均匀、非均匀或者随机的。本书考虑广泛应用

的均匀线性阵列(uniform linear array, ULA)。传统相控阵雷达在检测微弱目标^[11-12]时,通过增加孔径得到大孔径增益(aperture gain)和辐射高峰值功率(peak power)信号来实现。因此,传统相控阵雷达对目标方向区域进行最大化功率输出时,也增加了被敌方截获的概率,同样相控阵雷达也易受到反辐射武器的攻击或者有源强干扰。虽然相控阵雷达能够获得低的旁瓣水平和较高的增益,但其固有的缺点之一也是极易受到干扰。

在 1976 年,法国国家宇航研究局(ONERA)的 Dorey 等提出了综合脉冲孔径雷达(synthetic impulse and aperture radar, SIAR)的概念^[13],其目的是提高传统雷达探测隐身目标的能力以及实现雷达低截获概率(low probabilities of interception, LPI)。在 SIAR 系统中,收发阵列采用了大孔径的随机稀疏布阵形式,且每个发射天线全向辐射窄带正交频率波形(orthogonal frequency waveforms, OFW)^[14-16]。SIAR 系统没有利用机械扫描或者移相器,发射阵列和接收阵列均采用数字处理技术进行波束形成^[17-18]。因此,SIAR 系统的特点是各个发射天线全向辐射相互正交的信号(如频率编码、相位编码等),而在接收端由数字波束形成技术和综合脉冲形成,获得目标的距离、速度、方位角以及仰角等目标信息。

综上所述,传统相控阵雷达的发射端(或接收端)天线阵元通常是集中排列,且不同发射天线发射相干信号(即信号相关),并利用移相器进行波束指向,因此相控阵雷达在发射端不能进行阵列信号处理。与传统相控阵雷达相比,SIAR 系统的每个天线发射相互正交的信号(即信号不相关),故 SIAR 在发射端和接收端都能进行阵列信号处理,且其发射波束是低增益的宽波束或者全向波束,即 SIAR 具有 LPI;同时 SIAR 系统利用了大阵元间隔的稀疏布阵。SIAR 系统的 LPI 和稀疏布阵特点,表明 SIAR 系统已具有了 MIMO 雷达的影子。

MIMO 的概念是一个控制系统的概念,其表示一个系统由多个输入和输出组成。自 19 世纪 90 年代初期至今,MIMO 技术的引进已经革新了无线通信^[19-23]。MIMO 通信系统通过多个不相关的发射端发射冗余的数据流,并在接收端布置多个接收天线单位接收信号,这样不同的衰落路径是相关独立的,故 MIMO 通信系统克服了无线信道衰落的影响^[21]。因此,相比传统的 SISO 通信系统(即在同一路径上发射和接收所有的信号),MIMO 通信系统随着路径数的增加,信噪比(signal to noise ratio, SNR)也会相应增加,这就获得了分集增益(diversity gain)。而且,MIMO 通信系统通过发射正交信号利用丰富的散射环境^[23],相当于增加了带宽,也就获得了复用增益(multiplexing gain)。

受 MIMO 通信系统和空时编码技术^[19,20,23-25]的理论启发,第 37 届和第 38 届 Asilomar 会议以及 2004 年的 IEEE 雷达会议,专题讨论了 MIMO 雷达系统及其相关理论问题^[26-28],从此 MIMO 雷达的概念被正式提出。相比相控阵雷达和 SIAR 系统,MIMO 雷达除了提高了目标检测的可靠性和探测隐身目标的能力,还具有更高的分辨特性、更好的目标参数估计性能、更强的抗干扰能力以及更好的目标识别能力等优点。

MIMO 雷达辐射信号波形与 MIMO 雷达的目标分辨率、处理精度以及目标检测和参数估计等性能都有重要关系;优化的 MIMO 雷达发射波形可以提高目标检测能力、提供更高的参数估计能力等。因此,开展基于 MIMO 雷达的波形优化设计及目标参数估计研究,无论是在军事应用领域还是在民用方面都具有很重要的理论和现实意义。

1.2 MIMO 雷达的分类与研究现状

1. MIMO 雷达的分类及特点

关于 MIMO 雷达的分类,众多文献广泛采纳的是依据天线阵元在空间的布置不同,大致将其分为两类:共址式 MIMO 雷达^[26-27]和分布式 MIMO 雷达^[28-29]。本书将 MIMO 雷达系统的类型做了扩展,总结如图 1-1 所示,除了根据天线阵元布置划分,还有结合新技术的混合 MIMO 雷达。下面简介各种 MIMO 雷达技术。

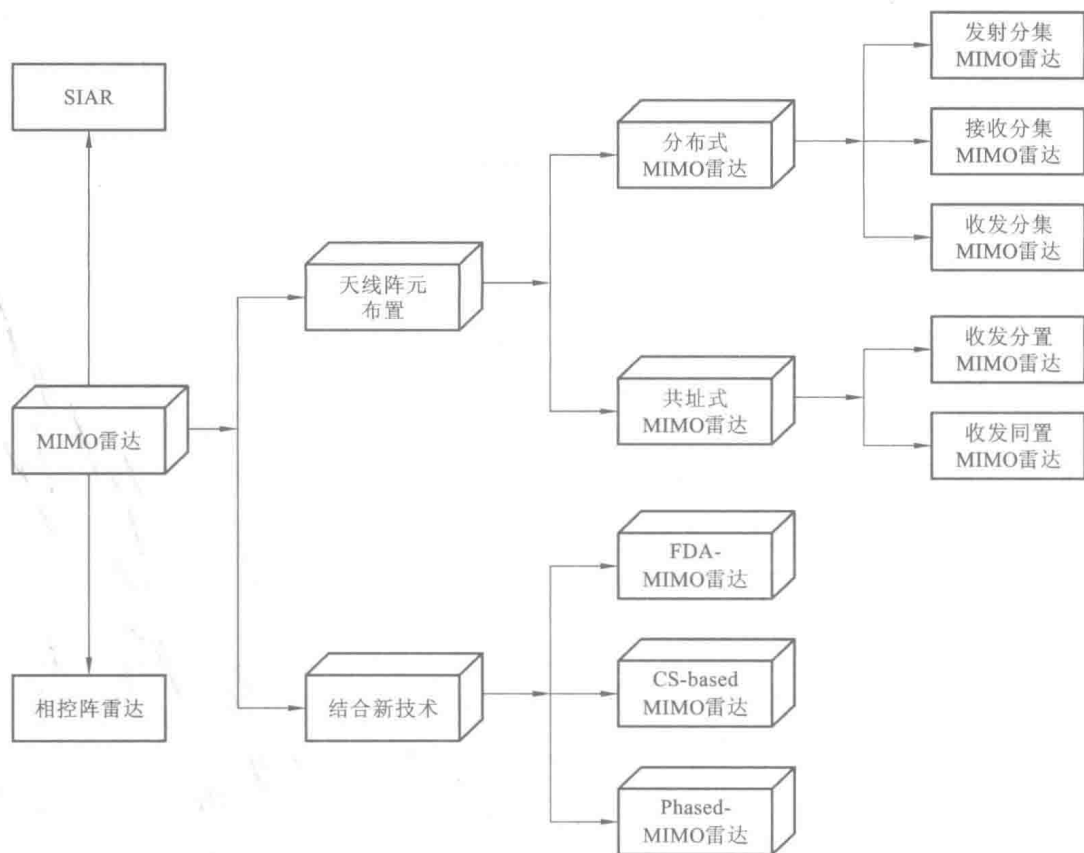


图 1-1 MIMO 雷达的分类

1) 共址式 MIMO 雷达

共址式 MIMO 雷达,也可称为集中式 MIMO 雷达,或者紧凑式 MIMO 雷达。2003 年的第 37 届“Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers”上,美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室的 Bliss 和 Forsythe 首次提出了共址式 MIMO 雷达^[26]。共址式 MIMO 雷达系统中发射和接收阵列的天线以较小的间距布置,其布阵形式类似于传统的相控阵雷达,因此发射阵列(或接收阵列)都是集中放置,相对于目标所成的角度几乎相同。共址式 MIMO 雷达的发射端采用全向辐射天线,且各个天线发射相互正交或者部分

相关信号,发射信号在空间叠加形成宽波束,而不是很窄的波束。接收端可以利用传统的自适应信号处理或者其他信号分离方法进行目标检测和参数估计。本书主要研究基于共址式 MIMO 雷达的新技术。

共址式 MIMO 雷达依据发射和接收阵列布置位置不同,分为收发分置 MIMO 雷达和收发同置 MIMO 雷达。收发同置 MIMO 雷达是指接收阵列和发射阵列复用,或者两阵之间的间距很靠近,以至于接收角与发射角相同。收发分置 MIMO 雷达与之相反,收发两阵之间的间距很远,发射角与接收角各不相同。

共址式 MIMO 雷达系统最大的特点在于应用波形分集技术,既可得到虚拟孔径,改善目标估计性能,也可以设计灵活的发射波束图。接收端可直接应用传统的自适应技术进行低速目标、弱目标检测和参数估计,提高雷达参数识别能力和干扰抑制能力,此外具有低截获性能等。

2) 分布式 MIMO 雷达

分布式 MIMO 雷达也称为统计 MIMO 雷达^[29],由美国新泽西理工学院的 Haimovich、Fishler 及美国里海大学的 Blum 等在 2004 年的“IEEE Radar Conference”上首次提出^[28]。分布式 MIMO 雷达系统借鉴了 MIMO 通信系统的思想,其收或发阵列的天线分布在空间不同位置,且天线间距足够远,各个发射天线发射相互正交信号,以至于雷达的各个阵元相对于目标所成的角度各不相同,这样观测到的目标回波是相互独立的,故分布式 MIMO 雷达获得了空间分集增益。

分布式 MIMO 雷达根据收发阵列的天线间距布置不同,也可分为发射分集 MIMO 雷达、接收分集 MIMO 雷达以及收发分集 MIMO 雷达。发射分集 MIMO 雷达是指发射阵列的天线之间间距很大,即满足空间分集,而接收阵列采用密集布置(与传统相控阵雷达类似);接收分集 MIMO 雷达的阵列布置与发射分集 MIMO 雷达相反;而收发分集 MIMO 雷达是指接收、发射阵列都满足空间分集。

分布式 MIMO 雷达的最大特点在于利用了空间分集增益。目标闪烁在传统雷达中因其降低雷达检测性能而被当作不利因素处理,但分布式 MIMO 雷达系统通过空间分集利用了目标的 RCS 散射特性,提高了目标检测能力,并具有高精度的目标估计能力。分布式 MIMO 雷达的不同天线发射相互正交的独立信号,克服了雷达信号之间的相互干扰,提高了目标分辨力。

3) 压缩感知(CS-based)MIMO 雷达

压缩感知(compressive sensing,CS)也称为压缩传感、稀疏采样(sparse sampling)或压缩采样(compressive sampling),于 2004 年由斯坦福大学的 Donoho^[30-33]提出。CS 一经提出,就受到了各个领域的专家和学者高度关注。压缩感知^[30-31]是利用信号的“稀疏”特性,通过尽量少的观测信息恢复原始信号,突破了奈奎斯特采样定理的限制。“稀疏”解释为信号在一组基底展开后,大多数系数绝对值为 0,或者很小^[30]。在实际雷达场景中,目标散射体相对于整个场景是稀疏分布的,故雷达场景也可用压缩感知的方法进行稀疏表示。近年来,压缩感知也应用到了共址式 MIMO 雷达^[34-38]和分布式 MIMO 雷达^[39-40]中,为叙述简单,本书将其统称为压缩感知 MIMO 雷达。

4) Phased-MIMO 雷达

相控阵 MIMO(phased-MIMO)雷达系统^[41-49]结合了传统的相控阵和 MIMO 雷达技术,将发射阵列划分成若干子阵,不同的子阵发射相互正交波形,而每个子阵发射相干波形,这样可以向一定的空间方向进行宽带波束形成,通过对每个子阵设计加权矢量也可以获得相干处理增益。因此,不同的子阵发射不同的波形,各个子阵联合处理形成一个 MIMO 雷达,该系统集成了相控阵雷达的相干处理和 MIMO 雷达的波形分集,它具有相控阵和 MIMO 雷达的优点。

5) FDA-MIMO 雷达

2006 年的 IEEE 国际雷达会议上,Antonik 等首次提出了频率分集阵列(frequency diverse array,FDA)雷达的概念^[50]。在 FDA 中,相邻阵元存在一个较小的频率增量,该频率增量相对时间是恒定的,且远远小于载频,于是发射信号在频域上部分重叠。Antonik 指出 FDA 波束形成器的波束扫描角随着距离而变化,FDA 雷达的波束具有角度和距离依赖性,这为目标的距离和角度参数联合定位提供可能。FDA 直译应为频率分集阵列,FDA 和相控阵具有相似的物理特性,王文钦等认为这种新体制雷达从其工作原理和物理特性上讲译作频控阵更为妥当,本书也借鉴此观点,称其为频控阵^[51]。在 MIMO 雷达中结合 FDA 技术已有部分学者开始研究,为叙述方便,本书将其称为频控阵 MIMO(FDA-MIMO)雷达^[52-54]。

本书将相控阵雷达和 SIAR 分别视作共址式 MIMO 雷达和分布式 MIMO 雷达的特殊形式,这里不再赘述。下节将详细概述以上各类 MIMO 雷达的研究现状。

2. 国内外研究历史与现状分析

查阅 SCI(science citation index)数据库可以发现,与 MIMO 雷达相关的文献数量是逐年增加的趋势(如图 1-2 所示,截至 2017 年 7 月),其中被引用次数最多的文献是收录在期刊 *IEEE Signal Processing Magazine* 上的两篇综述性论文^[55-56]:一篇是佛罗里达大学的 Li 和瑞典乌普萨拉大学的 Stoica 撰写的文献^[55],该文总结了 2007 年之前关于共址式 MIMO 雷达的研究成果;另一篇是美国新泽西理工学院的 Haimovich 及美国里海大学的 Blum 等发表的文献^[56],该文总结了 2007 年之前关于分布式 MIMO 雷达的研究成果。出版 MIMO 雷达排名前十的出版物名称见表 1-1。

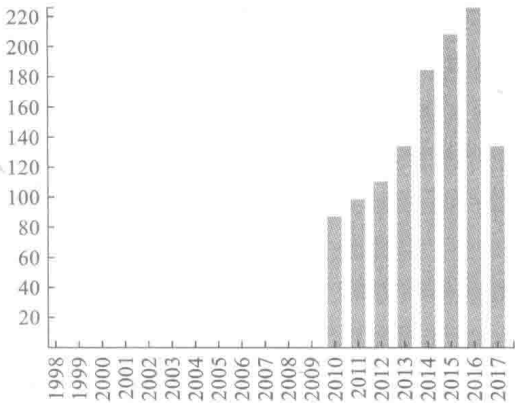


图 1-2 每年发表的论文数

表 1-1 出版 MIMO 雷达前十的出版物名称

来源出版物名称	记录数	占比/%
IEEE Transactions on Signal Processing	131	11.102
IET Radar, Sonar and Navigation	99	8.390
IET Radar Sonar Navigation	90	7.627
IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems	88	7.458
Inrernational Journal of Antennas and Propagation	66	5.593
Signal Processing	66	5.593
IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing	38	3.220
Electronics Letters	37	3.136
IEEE Signal Processing Lehers	34	2.881
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	29	2.458

自 2003 年和 2004 年两种 MIMO 雷达的概念提出后,大批学者就其关键技术和相关方面进行了深入研究。除了美国麻省理工学院林肯实验室研究共址式 MIMO 雷达外,国外研究共址式 MIMO 雷达的机构还有美国佛罗里达大学、加利福尼亚大学、华盛顿大学、德雷塞尔大学、加州理工学院、得克萨斯大学、加州大学圣克鲁兹分校、斯蒂文斯理工学院,瑞典的乌普萨拉大学,英国的伦敦大学学院,加拿大的阿尔伯塔大学,新加坡的南洋理工大学等^[26-27,55,57-61]。

在分布式 MIMO 雷达研究方面,除了美国的里海大学和新泽西理工大学外,国外研究分布式 MIMO 雷达的主要有美国的华盛顿大学、雪城大学、普林斯顿大学、拉法耶特学院、弗吉尼亚联邦大学、卓克斯大学、特拉华大学,芬兰的赫尔辛基理工大学,以及伊朗的亚兹德大学、乌尔米大学等^[28-29,56,62-67]。

基于 MIMO 雷达概念,结合其他技术,如相控阵、频控阵、压缩感知等技术,研究新体制 MIMO 雷达的国外机构有美国的斯蒂文斯理工学院、密歇根理工大学、罗格斯大学、普林斯顿大学,英国贝尔法斯特女王大学、伦敦大学学院,加拿大的阿尔伯塔大学,新加坡的南洋理工大学等^[34-54]。

国内最早研究 MIMO 雷达方面工作的单位除了电子科技大学、西安电子科技大学、国防科技大学、清华大学外,其他学术机构和研究单位还有中国人民解放军空军预警学院、南京理工大学、空军工程大学、南京航空航天大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、中国科学院电子学研究所、中国科学院沈阳自动化研究所、中国电子科技集团公司第十四研究所、中国电子科技集团公司第三十八研究所以及中国电子科技集团公司第二十研究所等^[68-82]。

在过去的十几年内,国内外学者对 MIMO 雷达的信号模型、发射波形优化设计、目标检测和参数估计、成像技术以及与其相关联的其他信号处理等方面的内容做了研究,且研究内容不断深入。阅读整理已有文献,本节从以下几个方面综述共址式 MIMO 雷达和新体制 MIMO 雷达。

1) MIMO 雷达信号模型研究

文献[26]和文献[55]给出了共址式 MIMO 雷达系统的信号模型,该模型的阵列结构接近传统相控阵雷达,其最大的特点在于利用波形分集可以进行灵活的发射波束图设计,直接应用传统的自适应技术进行目标检测和参数估计。文献[29]和文献[56]提出了统计 MIMO 雷达的模型,相比传统雷达中目标闪烁降低了雷达性能而被当作不利因素,该模型利用目标的 RCS 散射特性获得了空间分集增益,提高了目标检测能力,并具有高精度的目标定位能力。自从文献[26]和文献[29]的信号模型提出后,很多文献^[55-56]仅仅考虑了理想的信号模型,认为散射体位于时延-多普勒单元的中心,然而,实际中散射体的时延-多普勒值是随机分布的,不是精确地居中在假设的单元格上。为此,Friedlander 推导了一种信号模型^[83],该模型考虑了假设的时延-多普勒与实际不匹配的情况,同时也揭示了时延和多普勒不匹配对 MIMO 雷达阵列信号处理的影响。Friedlander 进一步研究^[86]指出,简化的信号模型^[84-85]假设所有散射体的时延和多普勒值都在时延-多普勒分辨单元的中心,感兴趣单元以外的信号部分都被加到了噪声和干扰项里,基于简化模型的结论一般与实际的雷达系统有差异,于是文献[86]重新推导了 MIMO 雷达系统的信号模型,并与一些文献经常使用的简化模型^[61,68,84]进行了比较。在文献[87]中,王永良团队考虑了运动目标更一般的 MIMO 雷达信号模型。本书的研究是基于文献[83]和文献[86]给出的 MIMO 雷达信号模型。

2) MIMO 雷达的正交波形优化设计

正交发射波形设计是 MIMO 雷达的一个很重要的研究方面,对其研究主要在具有较好的时间、多普勒转移容忍性和空间相关性的正交波形设计方面,详细的综述如下所示。

(1) 针对具有较好的时间相关性的正交波形设计:只考虑时间自相关和互相关的序列设计。在实际的 MIMO 雷达波形设计中,如要使所有可能延时的信号旁瓣为零,即完全正交,这样的信号在实际中是不存在的,因此只能对发射信号进行优化设计,使之自相关旁瓣和互相关尽可能低。在波形优化中,经常使用相关函数的积分旁瓣比(integrated sidelobe level, ISL)表述一个已知序列的相关特性。例如,Deng 研究了使用模拟退火算法设计二进制序列集合^[88],其目标函数是最小化自相关旁瓣和互相关能量,即最小化积分旁瓣电平 ISL。在此基础上,Deng 提出了具有较低旁瓣的正交信号,利用模拟退火算法来搜索正交多相码波形^[89]和正交离散频率编码波形^[90]。Li 等^[91]提出了一种计算度很低的循环优化算法(cyclic algorithms, CA),该算法可产生具有良好自、互相关特性的恒模发射信号。Stoica 等^[92]针对与 ISL 相关的度量准则的局面最小化,提出了三种循环算法设计正交单模序列。文献[92]首先提出了一种处理加权 ISL 准则的局部最小化的 CAP 算法,该方法中需要奇异值分解(singular value decomposition, SVD),因此较大的序列在 PC 上运行是比较困难的;针对此问题,该文献提出了一种没有加权 ISL 准则的新 CA 算法,该算法是基于 FFT 操作的,可以处理较大的序列;最后,该文献提出了修改的 CAN 算法,该算法能处理任意的加权 ISL 准则的局部最小化问题。在文献[92]的基础上,He 等^[93-94]将文献[92]的方法扩展到了 MIMO 雷达中,提出了三种循环算法设计单模 MIMO 雷达波形,该文献提出的方法具有很低的自、互相关旁瓣,而且可以设计出很长的

序列。文献[95]重新在频域推导了能量约束序列的 ISL 的下界,并利用文献[96]和文献[97]提到的最近矢量法,研究了具有较低峰均比(peak-to-average power ratio, PAPR)的序列优化设计,该文献指出较大的 PAPR 可以降低相关旁瓣。以最小化自相关峰值旁瓣和互相关峰值为目标,张剑云团队设计了一种基于序列锥规划的 MIMO 雷达正交相位编码波形的设计方法^[98]。Palomar 等^[99]考虑了互补序列集的设计问题,该序列集也具有较好的自相关和互相关特性。该算法基于一般的优化最小方法来处理序列设计问题,也可以通过 FFT 操作实现,故也可以设计较长的序列集合。文献[100]也考虑了具有较好自相关特性的序列设计问题,但该文献考虑使用峰值旁瓣水平(peak side-lobe level, PSL)表示序列的相关特性,并利用循环优化方法优化序列设计。

(2) 针对具有较好的多普勒转移容忍性的正交波形设计:除了具有较好的时间自相关和互相关外,考虑对多普勒转移具有好的容忍性的序列设计。文献[101]和文献[102]利用较好的相关特性和对多普勒频移的自适应性,提出了一种多相序列的新组合,该序列基于相关特性进行了数值优化,该文献还利用互熵(cross entropy, CE)技术对序列进行了优化。刘波等设计了基于模糊函数 MIMO 雷达的多相正交信号^[103],该设计考虑了序列具有低的自相关峰值旁瓣、互相关以及对多普勒转移有较好的容忍性。Chen 等^[104-105]推导了共址式 MIMO 雷达模糊函数(ambiguity function, AF)的一些特性,在此基础上,利用模拟退火算法设计了基于模糊函数的正交调频波形设计。文献[106]提出了具有多普勒容忍性的 MIMO 雷达正交波形设计,该方法考虑了通过联合直接序列扩频技术和线性调频信号解决以上的波形设计问题。针对 MIMO 雷达波形的多普勒敏感性问题,Zhou 等^[107]研究了分布式 MIMO 雷达和共址式 MIMO 雷达中,关于多普勒敏感性对单模波形的自相关和互相关旁瓣的影响。

(3) 针对具有较好的空间相关性的正交波形设计:考虑抑制空间自相关和互相关旁瓣。文献[108]考虑了设计发射波形具有很低的旁瓣和很低的空间互相关值。在文献[108]的基础上,Wang 等利用优化方法设计了 MIMO 雷达发射信号^[109],设计的信号除了匹配期望的方向图外,最大化压缩了空间角度间的自相关和互相关旁瓣。Deng 等^[110]设计了一种在空时域的 MIMO 雷达波形设计方法,该方法考虑了在空域满足发射波束形成,而在时域满足正交波形的需求。针对 Phase-MIMO 雷达中子阵之间的波形设计问题,陈志坤等^[111]提出了一种基于矩阵谱逼近的恒模正交波形设计方法。该方法首先根据最大信噪比准则对子阵单元进行波束形成,再利用迭代矩阵谱逼近算法设计正交波形。

3) MIMO 雷达的部分相关波形优化设计

除了研究正交波形设计外,也研究如何设计 MIMO 雷达的部分相关信号波形,使其发射波束方向图接近一个已知的方向图,对其的研究总结如下。

(1) 针对 MIMO 雷达波形的协方差矩阵优化设计。关于 MIMO 雷达的部分相关信号设计问题,最初 MIMO 雷达波形合成主要聚焦在优化波形的协方差矩阵,而不是直接优化或者设计信号波形。针对共址式 MIMO 雷达,Fuhrmann 和 Antonio^[112-113]研究了发射波束图综合问题,首次提出 MIMO 雷达的空间波束图与发射波形的相关矩阵紧密相关,可以通过合理设计发射信号的相关矩阵来综合出期望的波束图。在文献[112]和文献

[113]的基础上,Stoica 和 Li 等^[114-115]研究了如何设计发射信号的协方差矩阵,使得向感兴趣的目标位置具有最大化发射功率,或者接近一个已知的发射波束方向图,或者最小化反射信号的互相关。文献[116]考虑了 MIMO 雷达中发射方向图设计,并提出了一些方法间接或者直接控制了发射方向图中能量聚集部分的波动水平和过渡带带宽:首先,提出了基于 L_1 范数的加权方向图匹配设计,间接控制了能量聚集部分的波动水平和过渡带带宽;其次,提出了两种基于 L_2 范数的方向图的闭合解,这两种解分别是基于矩阵正则化(matrix regularization, MR)和 SVD 得到的,它们也能间接地控制能量聚集部分的波动水平和过渡带带宽;最后,考虑了将发射方向图表述成一个可行性问题(feasibility problem, FP),提出了一种考虑天线选择的基于 FP 的发射方向图设计准则。南京理工大学的朱晓华团队提出了一种干扰背景下 MIMO 雷达的部分相关信号波形设计方法^[117]。该方法以最大化输出 SINR 为目标函数,同时考虑发射信号为正交恒模波形情况下用基于拟牛顿法的连续优化方法求解目标函数。Aubry 等^[118]研究了 MIMO 雷达的波形协方差矩阵优化设计,其思想是分别以 PSL 和 ISL 为目标函数优化设计发射方向图。文献[119]提出了两种在恒模约束下的 MIMO 雷达波形设计方法,其设计准则分别是最小化期望方向图和已知方向图之间的平方误差和绝对值误差。

(2) 针对 MIMO 雷达部分相关波形的直接优化设计。在优化相同性能指标时,相比发射波形的协方差矩阵优化,波形的直接优化是更加困难的问题。在雷达系统或者通信系统中,除了发射序列具有较大优化因子(merit factor, MF)(即低的 ISL)外,为了避免昂贵的放大器和 A/D 转换器,要求发射信号是单模或者低的峰均比。Stoica 等^[120-121]设计了一种信号波形矩阵,使其协方差矩阵等于或者接近已知的协方差矩阵;合成的波形满足一些实际约束限制(单模或者 PAPR=1)时具有好的自相关和互相关特性,且能接近一个已知的发射波束方向图,或者最小化反射信号的互相关。由于 MIMO 雷达中设计发射波束的方法基于多个相关波形,这种方法耦合了空间(波束形成器)和时间(发射波形),使得波形设计问题更加复杂。为此,Friedlander 推导了一种解耦合的发射波束设计方法^[122],即通过设计一个多秩的发射波束形成器,逼近期望的发射方向图,这样可以使用更一般的发射波束设计方法,而不考虑发射信号的设计,仅仅发射正交信号。文献[123]提出了一种获得闭合解的方法来合成 MIMO 雷达波形协方差矩阵,并通过推导协方差矩阵设计提出了一种直接设计波形的的方法。

(3) 针对宽带 MIMO 波形优化设计研究。前面提到的如何设计 MIMO 雷达的发射信号使其发射波束方向图接近一个已知的方向图,是基于窄带信号的,也有文献研究了宽带波形设计^[124-125]。在窄带发射波束设计中,更多的方法考虑发射信号间的互相关,设计发射信号的协方差矩阵,文献[124]在宽带情况时也使用类似的方法,也设计功率谱密度矩阵,而不是直接合成信号波形。为了匹配在空间和频率中发射能量分布,He 等提出了一种直接合成宽带 MIMO 波形的方法^[125],合成波形的发射波束图能很好地匹配已知的宽带发射波束图。巩朋成等^[126]在统一单向发射方向图合成框架的基础上,提出了一种基于单向发射方向图合成的波形设计方法,并进而提出了一种混合范数的宽角度发射方向图合成方法。空军工程大学的张群团队考虑以载波的频点来调制通信信息,以子脉冲调频斜率的方向表示地址信息,在不影响宽带雷达成像功能的基础上,设计了一种基于随