双基地MIMO雷达目标多参数联合估计

郭艺夺 宫 健 胡晓伟 著

SHUANG JIDI MIMO LEIDA
MUBIAO DUO CANSHU LIANHE GUJI

西北工业大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

双基地MIMO雷达目标多参数联合估计

郭艺夺　宫健　胡晓伟　著

西北工业大学出版社

西安

【内容简介】 本书分为九章，包括绪论、双基地 MIMO 雷达基本理论、双基地 MIMO 雷达收发方位角估计的波束空间 ESPRIT 算法、未知目标数的双基地 MIMO 雷达角度-多普勒频率联合估计、双基地MIMO雷达相干分布式目标收发中心角估计算法、双基地 MIMO 雷达准平稳目标空间定位算法、双基地 MIMO 雷达目标定位及幅相误差自校正、双基地 MIMO 雷达目标定位及互耦自校正，以及总结和展望等。

本书可供高等院校雷达目标探测相关专业高年级及研究生学习使用，也可供相关技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

双基地 MIMO 雷达目标多参数联合估计/郭艺夺，宫健，胡晓伟著．—西安：西北工业大学出版社，2018.11

ISBN 978-7-5612-6389-1

Ⅰ.①双… Ⅱ.①郭… ②宫… ③胡… Ⅲ.①多变量系统—雷达目标—参数—估计 Ⅳ.①TN951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 259078 号

策划编辑：杨 军
责任编辑：万灵芝

出版发行：西北工业大学出版社
通信地址：西安市友谊西路 127 号 邮编：710072
电 话：(029)88493844 88491757
网 址：www.nwpup.com
印 刷 者：兴平市博闻印务有限公司
开 本：727 mm×960 mm 1/16
印 张：10.625
字 数：176 千字
版 次：2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷
定 价：69.00 元

前　言

随着电子战技术的发展，隐身目标、电子干扰、反辐射导弹和超低空突防等技术严重制约着传统单雷达发挥其作用，使其面临着所谓的“四大威胁”。双(多)基地雷达以收发分置和复杂的工作方式，具有固有的反隐身、对抗反辐射导弹、抗干扰、反低空突防的优势和一些雷达新特性，极具发展潜力，被认为是21世纪的三大雷达体制之一。

MIMO(Multiple - Input Multiple - Output)技术是一种多输入多输出技术，最早在通信中应用，近年来开始在雷达中应用。MIMO雷达是近几年发展起来的一种新概念雷达，是双(多)基地雷达的一种扩展。MIMO雷达在抑制目标闪烁与信号传输衰落、提高测量精度和分辨力、抗干扰以及反隐身等方面具有潜在优势。对这些潜在优势的开发可以显著改善雷达的目标检测、参数估计、跟踪和识别的性能。MIMO雷达代表未来雷达发展的必然趋势，已经引起世界各国学者、研究机构、军事和工业部门的高度关注。MIMO雷达与常规相控阵雷达不同，采用空间分集、频率分集、多种波形设计等技术，在发射和接收端同时采用数字阵列技术。发射端每个子阵发射相互正交的信号，接收子阵形成接收数字波束，可同时完成多个功能。MIMO雷达处理维数高、收发孔径利用充分、角分辨率高，可以兼顾大空域搜索和空域覆盖率要求，可以实现更低的波束副瓣，可进行自适应处理以提高检测目标能力。有关专家预期：21世纪将是MIMO雷达的时代。

传统双基地雷达在目标参数测量中存在着时间、角度、频率(相位)同步的三大技术难题，对于直达信号的抑制也存在较大的困难。将MIMO技术与双基地雷达技术相结合，可形成一种新的双基地雷达体制，是雷达技术的一个新发展。双基地MIMO雷达利用发射和接收阵列信号具有的方向相关性，可同时估计出接收站目标方向和发射站目标方向，这种体制避开了双基地固有的“三大同步”难题，具有双基地雷达和MIMO技术的双重优点。这种新体制雷达是数字化、分布化、多通道化、低辐射功率和非扫描等雷达发展趋势的综合体现，具有很好的发展前景。然而，双基地MIMO雷达目标参数估计技术的理论研究尚处于起步阶段，有许多理论问题需要深入研究，因此，本书主要针对双基地MIMO雷达目标探测中的多参数联合估计新方法和新技术等关键

问题来展开研究。

本书分为九章。第 1 章介绍本书研究的背景和意义，对 MIMO 雷达的研究进展及 MIMO 雷达目标参数估计技术的发展与现状进行了综述，分析双基地 MIMO 雷达目标多参数联合估计研究的可行性和必要性。第 2 章介绍双基地 MIMO 雷达基本理论。从定义和分类、结构和信号模型、基本算法等方面对双基地 MIMO 雷达基本理论进行简要介绍。第 3 章针对目标收发角联合估计问题，介绍一种双基地 MIMO 雷达收发方位角估计的波束空间 ESPRIT(B-ESPRIT)算法。第 4 章针对空间高斯白噪声和高斯色噪声背景，介绍两种无须预知或预判目标数的双基地 MIMO 雷达收发方位角及多普勒频率联合估计算法。第 5 章针对相干分布式目标，介绍一种快速的双基地 MIMO 雷达目标收发中心方位角联合估计方法。第 6 章针对准平稳目标，介绍一种目标二维 DOD 和 DOA 联合估计的 Khatri-Rao ESPRIT(KR-ESPRIT)算法，从而实现对准平稳目标的空间定位。第 7 章针对双基地 MIMO 雷达收发阵列存在幅相误差的情况，介绍一种基于辅助阵元法(ISM)的 ESPRIT 类(ESPRIT-like)算法。第 8 章针对双基地 MIMO 雷达收发阵列存在互耦误差的情况，利用均匀线阵互耦系数矩阵的带状、对称 Toeplitz 特性，介绍一种基于降维的双基地 MIMO 雷达目标定位及互耦自校正算法。第 9 章对本书内容进行总结，并对双基地 MIMO 雷达目标参数估计的未来发展方向进行展望。

本书内容新颖，技术实用。在编写过程中，参阅了相关文献资料，在此向相关作者表示衷心的感谢。

限于笔者的水平和能力，书中难免有不足之处，敬请同行、专家批评指正。

著　者

2018 年 8 月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　引言 …… 1
1.2　MIMO 雷达的发展与现状 …… 3
1.3　MIMO 雷达目标参数估计技术的发展与现状 …… 7

第 2 章　双基地 MIMO 雷达基本理论 …… 14

2.1　MIMO 雷达的分类与双基地 MIMO 雷达的定义 …… 14
2.2　双基地 MIMO 雷达的结构与信号模型 …… 15
2.3　双基地 MIMO 雷达参数估计基本算法 …… 18
2.4　小结 …… 33

第 3 章　双基地 MIMO 雷达收发方位角估计的波束空间 ESPRIT 算法 …… 34

3.1　引言 …… 34
3.2　波束空间变换数据模型 …… 35
3.3　B－ESPRIT 算法 …… 36
3.4　基于多级维纳滤波器的 B－ESPRIT 算法 …… 39
3.5　波束空间算法性能分析 …… 41
3.6　计算机仿真结果 …… 46
3.7　小结 …… 49

第 4 章　未知目标数的双基地 MIMO 雷达角度-多普勒频率联合估计 …… 51

4.1　引言 …… 51
4.2　噪声模型 …… 52

4.3 空间高斯白噪声背景下的联合估计算法 …… 53
4.4 空间高斯色噪声背景下基于对角加载的联合估计算法 …… 56
4.5 计算机仿真结果 …… 58
4.6 小结 …… 64

第 5 章 双基地 MIMO 雷达相干分布式目标收发中心角估计算法 …… 65

5.1 引言 …… 65
5.2 双基地 MIMO 雷达相干分布式目标信号模型 …… 66
5.3 双基地 MIMO 雷达相干分布式目标收发中心角估计算法 …… 68
5.4 算法的分析和讨论 …… 72
5.5 计算机仿真结果 …… 75
5.6 小结 …… 79

第 6 章 双基地 MIMO 雷达准平稳目标空间定位算法 …… 81

6.1 引言 …… 81
6.2 系统配置和信号模型 …… 82
6.3 准平稳目标空间定位算法——KR - ESPRIT 算法 …… 84
6.4 KR - ESPRIT 算法性能分析与讨论 …… 89
6.5 计算机仿真结果 …… 93
6.6 小结 …… 97

第 7 章 双基地 MIMO 雷达目标定位及幅相误差自校正 …… 99

7.1 引言 …… 99
7.2 收发阵列存在幅相误差条件下双基地 MIMO 雷达数据模型 …… 100
7.3 基于 ISM 的 ESPRIT - like 算法 …… 101
7.4 算法性能的讨论与分析 …… 106
7.5 计算机仿真结果 …… 112
7.6 小结 …… 119

第 8 章 双基地 MIMO 雷达目标定位及互耦自校正 …… 120

8.1 引言 …… 120

8.2 收发阵列互耦条件下双基地 MIMO 雷达数据模型 …… 121
8.3 基于降维的双基地 MIMO 雷达目标定位及互耦自校正算法 …… 122
8.4 基于 ESPRIT 的双基地 MIMO 雷达目标定位及互耦自校正算法 …… 125
8.5 算法的性能分析 …… 127
8.6 计算机仿真结果 …… 133
8.7 小结 …… 140

第 9 章 总结和展望 …… 142

9.1 总结 …… 142
9.2 工作展望 …… 144

参考文献 …… 146

第1章 绪 论

1.1 引 言

现代战争是信息化条件下的高科技战争。信息战、空天战、非接触及立体作战、全方位大纵深和海陆空天地一体化作战将成为战争的主要作战样式。雷达作为战场上主要的目标传感器，担负着信息获取、精确制导等重要任务，将在信息化战争中发挥核心作用。然而，随着隐身技术、反辐射导弹、综合电子干扰和低空突防技术的发展，雷达面临的作战环境更加恶劣，传统雷达已难以应付这“四大威胁”，主要表现在：①反隐身能力弱。目前隐身技术已发展到相当高的水平，前向鼻锥±45°范围的隐身水平可达到20～30 dB，使传统单基地雷达探测距离大大缩小。②生存能力差。常规体制雷达发射功率大、天线副瓣电平较高，使其易于被电子侦察系统侦测定位，更易遭到反辐射导弹的攻击，其生存受到极大威胁。③抗干扰能力弱。实际战场环境中强大的电磁干扰，极大地限制了常规体制雷达探测性能的发挥。④目标闪烁引起雷达性能衰退。由于目标是由许多小的散射体组成，所以目标到雷达的距离、方位微小变动都会引起目标的散射中心和截面积(RCS)变化，即引起反射波能量的变化，致使雷达测量性能大大降低。

多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output，MIMO)雷达[1-3]是近几年来发展起来的一种新体制雷达，因其具有优良的反隐身、抗反辐射导弹、抗干扰和低慢速目标检测等性能，已经引起世界各国学者、研究机构、军事和工业部门的高度关注。因此，MIMO雷达可为解决上述问题提供一条崭新的途径。与传统的相控阵雷达相比，MIMO雷达的优势主要体现在以下几方面：①反隐身能力强。MIMO雷达可利用不同角度的散射特性，而隐身飞行器不可能做到任何角度都具有隐身效果，所以总有大的RCS被侦测到。②参数估计精度高。与传统相控阵雷达相比，相同收发阵元情况下，MIMO雷达能够形成更大的虚拟阵列孔径，因此能够提高目标参数估计的分辨力。研究表明，MIMO雷达的角度估计误差比常规雷达小$\sqrt{2}$倍[4]。③抗干扰能力强。MIMO雷达通过充分利用多散射体造成的多径进行信号处理，所以其抗多径

干扰能力强。相比常规雷达，MIMO 雷达降低了接收机上的杂波功率，使其具有较好的抗杂波及抗干扰性能。MIMO 雷达采用了收发分开配置的结构，使得干扰机实施干扰的方向是该雷达发射机的方向而不是接收机的方向，而且其接收端可以采用数字波束形成技术将干扰方向置零，从而达到消除有源干扰的目的，这就使得 MIMO 雷达具有优良的抗有源干扰性能。④反侦察、低截获性能高。由于 MIMO 雷达发射低功率、宽频带的脉冲信号，使得角度宽开的天线和频率宽开的电子侦测机截获 MIMO 雷达信号困难。而 MIMO 雷达天线收发分置，使用合成的阵列天线虚阵元，可以完成电子战的欺骗式干扰。由于 MIMO 雷达各发射阵元的波形相互正交不产生相干合成，因此可形成低增益的宽波束。当 MIMO 雷达发射通道数为 M 时，主波束方向的空间增益将降低为原来的 $1/M$，因而改善了雷达的抗截获性能。⑤抗摧毁能力强。MIMO 雷达采用空间分散分布、频率分集、多种波形设计，相当于一部雷达随机变换工作地点、工作波段和波形，使得反辐射导弹侦测系统始终处于搜索阶段，最终导致反辐射导弹找不到目标而不能进行有效攻击。因而 MIMO 雷达代表着未来雷达发展的必然趋势，是近代雷达变革中新技术和新体制的集中体现，是集中了现代电子科学技术各学科成就的高技术系统。有关专家预期：21 世纪将是 MIMO 雷达的时代。

双基地 MIMO 雷达指的是一种发射站与接收站间隔一定距离，发射站发射两个以上的正交信号，接收站采用两个以上的接收阵元进行相参接收的 MIMO 雷达系统。与传统的双基地雷达相比，其不需要发射站和接收站之间的时间同步和角度同步，也不需要额外的通信，从而可大大简化系统设备。因此，双基地 MIMO 雷达可以解决双基地雷达系统面临的技术难题，具有双基地雷达和 MIMO 雷达的双重优点，它是数字化、分布化、多通道化、低辐射功率和非扫描等雷达发展趋势的综合体现。

双基地 MIMO 雷达形成的虚拟阵列可增大天线的孔径，从而获得空间分集增益，提高雷达探测目标的可靠性和目标参数估计的精度，可以作为防空雷达的一种新体制，用于对空中目标的预警、跟踪、识别和对导弹的精确制导。因此，其在军事领域具有广阔的应用前景。信号检测和目标参数估计是双基地 MIMO 雷达信号处理的核心内容，特别是目标参数估计，更是当前国际上的研究热点。近年来，基于双基地 MIMO 雷达的目标参数估计理论研究取得了丰硕的成果，但将其应用到实践中，有待解决的问题仍然很多。进行深入的理论和方法研究，使目标参数估计走向实用化是十分必要的，具有重要的理论意义和实用价值。

1.2　MIMO 雷达的发展与现状

1.2.1　MIMO 雷达的概念及分类

MIMO 雷达是指使用多个发射天线发射多种正交分集信号，并使用多个接收天线联合接收处理信号的雷达系统。在发射端，MIMO 雷达发射阵元（或子阵）以全向或宽波束的形式发射相互正交的波形。在接收端，用匹配滤波器组来分离回波信号中的各发射分量，然后通过自适应阵列处理技术进行目标检测、杂波抑制与参数估计。MIMO 雷达实际上就是更广义的数字阵列雷达系统，传统相控阵雷达仅是其在发射波形全相干时的特例[2]。MIMO 雷达的特点主要体现在两个分集，即空间分集和波形分集。空间分集是指由于 MIMO 雷达收发阵元间距离较大，所以各回波通道中的信号互不相关；波形分集是指各发射通道信号波形相互正交，不具有相关性。MIMO 雷达主要可以分为两大类：统计 MIMO 雷达[5-8]与相干 MIMO 雷达[9-11]。

统计 MIMO（Statistical MIMO，SMIMO）雷达的发射阵元和接收阵元间距离较大，使得探测信号可从多个不相关的方向照射到散射目标，所以各接收阵元对应通道内信号完全独立，从而可获得较高的空间分集增益。SMIMO 雷达又称为分布式 MIMO 雷达或收发全分集的 MIMO 雷达。SMIMO 雷达同时具有空间分集和波形分集的特点，它能够从各个角度观测目标，使得目标对每个发射接收通道呈现独立的散射特性，从而避免了目标 RCS 起伏给雷达目标检测带来的不利影响，提高了雷达整体的探测和参数估计性能。研究者主要以美国新泽西研究所的 Fishler Eran 和 Lehigh 大学的 Blum Rick 等为代表。

相干 MIMO（Coherent MIMO，CMIMO）雷达，也称为集中式 MIMO 雷达，其发射阵列阵元间距较小，接收阵列与传统相控阵雷达类似。CMIMO 雷达各发射阵元发射相互正交信号，因此发射信号在空间中不能形成强方向性的发射方向图，而是发射全方向波束或宽波束[12]。CMIMO 雷达仅具有波形分集的特点，该分集可以使其产生大量的虚拟阵元，从而能够扩展雷达的虚拟阵列孔径。因此，CMIMO 雷达能够提高空间分辨力，增强目标参数估计的性能[9]。另外，CMIMO 雷达可以自适应地对发射波束方向图进行设计，从而提高发射方向图设计的灵活性[13]。其研究者主要以美国 Florida 大学的 Li Jian 和瑞典 Uppsala 大学的 Stoica Petre 等为代表。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

由于 SMIMO 雷达具有分布部署的特点，所以其在空间对准和时间对准上的技术难度较大，不易于工程实现；而 CMIMO 雷达收发阵列阵元间距较小，与传统的相控阵雷达类似，在工程上较容易实现。因此，本书研究对象为 CMIMO 雷达，为了简略起见，后面叙述中省略“相干”二字，统称为 MIMO 雷达。

1.2.2 MIMO 雷达的研究现状与趋势

针对传统雷达探测隐身目标难和易受反辐射导弹攻击的问题，法国国家航天局于 20 世纪 70 年代给出了综合脉冲孔径雷达(Synthetic Impulse and Aperture Radar，SIAR)[14-17]的概念。SIAR 采用收发分置的天线阵列，发射天线向空间全向辐射一组正交编码频率调制的宽脉冲，在接收端对接收到的目标回波信号进行匹配滤波，因此可看作 MIMO 雷达的雏形。为了满足现代战争对雷达探测性能的需求，受 MIMO 通信和 SIAR 技术的启发，在 2003 年第 37 届 Asilomar 信号、系统和计算机会议上，Rabideau 和 Paker[1]首次将 MIMO 的概念拓展到雷达领域中；2004 年，新泽西理工学院的 E. Fishier 等人从统计的角度详细介绍了 MIMO 雷达的基本概念和信号模型[2]。相比传统的相控阵雷达，MIMO 雷达在目标检测[18-20]、参数估计[21-23]及杂波抑制[24-26]等方面具有明显优势，同时具有抗干扰能力强和截获概率低的特性[27-29]。因此，关于 MIMO 雷达的研究已成为当前新体制雷达技术研究的热点，并取得了一系列的理论研究成果和实验论证结果。通过对现有关于 MIMO 雷达研究的文献进行整理可以发现，MIMO 雷达技术研究重点主要集中于以下 7 个领域：MIMO 雷达的系统建模与分析、收发阵列布阵配置、发射波形的设计、发射/接收波束形成、杂波抑制、目标检测和参数估计。

1.系统建模与分析

Bliss 等人[21]系统论述了 MIMO 雷达的目标信号模型，分析了 MIMO 雷达的探测性能及其 GMTI 性能。文献[2,30]建立了 MIMO 雷达的信号模型，研究了 MIMO 雷达在各种收发阵列分布条件下的信号模型，并分析了角度分集下 MIMO 雷达的目标检测性能和参数估计的克拉美-罗界。Robey 等人[5]基于对 MIMO 雷达信号模型的分析，给出了 MIMO 雷达的杂波模型，论述了 MIMO 雷达性能改善的原理，利用 L 波段和 X 波段的 MIMO 雷达系统所获得的实测数据研究了低旁瓣的波束形成技术。文献[9]建立了 CMIMO 雷达的信号模型，并基于这一模型详细论述了 CMIMO 雷达在参数估计、目标定位和波束设计上的性能优势。Friedlander[31]从 MIMO 雷达接收信号模

型的角度出发，比较了集中式 MIMO 雷达和传统相控阵雷达(SIMO 雷达)，建立了 MIMO 雷达与 SIMO 雷达模型之间的数学关系，验证了 MIMO 雷达与 SIMO 雷达的一致性，研究成果为 SIMO 雷达的信号处理方法向 MIMO 雷达的扩展提供了理论依据。

国内中国人民解放军国防科技大学、西安电子科技大学和电子科技大学等单位均对 MIMO 雷达的模型及特性分析进行了深入的研究，也取得了大量的高价值的研究成果[32-34]。

2.收发阵列布阵配置

基于 MIMO 雷达中虚拟阵元的形成机理，文献[35－36]研究了采用不同收发阵列配置时 MIMO 雷达形成虚拟阵列的结构及特点。文献[37]阐述了 SMIMO 雷达的阵列配置对空间去相关性和检测性能的影响，得出了其空间去相关情况下收发阵列的配置条件。文献[38]分析了分布式机载 MIMO 雷达发射平台(4 个平台)的不同几何配置方案对探测覆盖区域的影响。文献[39]中将 MIMO 思想应用到 VSAR 中，给出了一种新体制 MIMO VSAR 雷达的实用优化阵列配置方案。上述关于 MIMO 雷达中虚拟阵元的讨论都以均匀线阵(Uniform linear array，ULA)为基础，文献[40]研究了具有非均匀线阵(Nonuniform linear array，NLA)结构的 MIMO 雷达，从而得出非均匀线阵能够产生更多的有效虚拟阵元，解决了均匀配置的 MIMO 雷达虚拟阵元冗余的问题，该结构具有更大的空间自由度和更好的统计估计性能。基于传统相控阵雷达接收端最小冗余阵列的设计思想，文献[41－42]针对均匀线阵的 MIMO 雷达虚拟阵元冗余度高的问题，分别给出了发射阵列配置设计的最小冗余(Minimum Redundancy，MR)阵列设计算法和基于差集理论的 MR 算法，有效提高了 MIMO 雷达的阵元利用率。西安电子科技大学的一些学者也对该问题进行了详细研究，并给出了一系列 MIMO 雷达阵列优化配置的高效算法[43-46]。

3.发射波形设计

当前，关于 MIMO 雷达发射波形优化设计的研究成果很多，根据优化设计准则的不同可归纳为如下三类：①基于发射波形互相关矩阵的发射波形设计方法。该设计中用发射波形的互相关矩阵代替直接的波形函数作为设计目标。如文献[47－49]研究了如何通过选择合适的信号互相关矩阵和互谱密度矩阵来逼近需要实现的发射方向图。文献[50]通过优化控制 $\boldsymbol{R}_s$ 获得了最优的发射功率控制，实现了在指定目标探测位置上发射信号波形的互相关最小，同时也提高了接收端的空间分辨力。文献[51]以目标参数估计的克拉美-罗

界为优化准则，对发射波形间的互相关矩阵进行了优化设计。文献[52]给出了最优的发射波形的互相关矩阵，该最优设计获得了低的峰值均值功率比(Peak - to - average - power ratio，PAR)和较高的距离分辨力。②基于波形模糊函数的发射波形设计方法。模糊函数表征了 MIMO 雷达的角度-距离-多普勒分辨力，因此基于模糊函数的最优波形设计方法可实现空间域多普勒域的最优分辨性能。文献[53 - 55]设计了发射波形自相关和互相关函数的最低副瓣，进而使得模糊函数更加尖锐，增强了目标检测的空间和距离分辨力。③基于目标检测与估计性能最优的发射波形设计方法。基于模糊函数的方法仅以对目标的分辨力为目标进行波形的优化，而该方法则以目标检测与估计性能为设计准则进行发射波形的优化设计。一般该类方法均需要目标和杂波脉冲响应的先验信息。文献[56]给出了在发射波形为近似理想波形的约束下，使得输出 SINR 最大的发射波形设计方法。文献[57]研究了综合考虑目标检测概率、多普勒频率估计精度和距离分辨力等因素的最优编码波形的设计方法。文献[58 - 61]从信息论的角度，基于互信息(MI)及最小均方误差估计(MMSE)的准则对正交发射波形进行了优化设计。

4.杂波抑制

空时自适应处理(Space Time Adaptive Processing，STAP)的概念最初是由 Brennan 等人[62]于 1973 年针对相控阵体制机载预警雷达的杂波抑制而给出的。经过三十多年的探索和研究，STAP 技术如今已成为一项具有较为坚实理论基础的实用新技术[63-70]。而 MIMO 雷达是在相控阵雷达的基础上引入波形分集的思想，采用相干处理各单元发射的信号。将 MIMO 技术与 STAP 技术结合起来可大幅提高雷达的杂波抑制能力。首先，Bliss 等[71-76]研究了机载 MIMO 雷达的 STAP 技术，结果表明同机载相控阵雷达相比，机载 MIMO 雷达在最小可检测速度、搜索速率以及阵列旁瓣等方面都具有明显的性能优势[71-72]；继而，针对机载相干 MIMO 雷达 STAP 的高运算量问题，C. Y.Chen 等人给出了一种低复杂度的 STAP 算法[73-74]；与此同时，Mecca 等还研究了机载相干 MIMO 雷达在多径杂波下的地面动目标检测问题，并基于子阵设计提高发射功率有效性，解决高电压驻波比问题[75-76]。

5.波束形成

文献[77]研究了基于目标和散射特性调整的 MIMO 雷达波束形成技术，在不同的目标散射统计特性的假设条件下，建立了发射天线波束形成最优算法。文献[78]采用基于现代优化理论优化发射信号的互相关矩阵方法来形成所期望的天线发射方向图以实现发射波束形成。采用混合遗传算法来优化选

择 MIMO 雷达相关信号的互相关矩阵，从而实现了阵元间距较近时的相关 MIMO 雷达的波束形成。Yuri 给出了一种迭代自适应处理的波束形成算法[79]，不但降低了运算量和结构复杂性，而且迭代过程中收敛性和稳健性好。针对实际中导向矢量失配情况下的波束形成问题，文献[80－81]给出了波束最优化设计的模型，并给出了基于双边迭代算法的(Bi－iterative algorithm，BIA)的解法。文献[82]通过数学变换，把传统相控阵雷达非线性最小二乘方向图综合法推广到 MIMO 雷达方向图综合。该方法能够灵活调节综合方向图的过渡带宽度和主瓣波动幅度，且具有更小的均方误差。

6.目标检测技术

对于 SMIMO 雷达，文献[3]重点分析了该雷达的检测性能，并和相控阵雷达以及 MISO 雷达的检测性能进行了比较，研究了空间分集对目标检测性能的改善；文献[83－84]分别研究了 SMIMO 雷达发射相干脉冲串时的检测方法和性能，构建了 SMIMO 雷达和传统雷达检测方法及性能分析的统一的框架。Bekkerman 等重点分析了 CMIMO 雷达虚拟阵元的产生原理，讨论了其波束方向图改善和目标检测性能的潜力[85]。文献[86]在 Neyman－Pearson 准则下，研究了当 MIMO 雷达分集路径不完全独立时的检测方法和性能。Maio 将发射和接收全分集的统计 MIMO 雷达的检测问题分解为 MISO 系统的检测问题，并给出了加性高斯干扰中的 GLRT(Generalized Likelihood Ratio Test)检测器[87]；文献[88]给出了基于对角加载的机载 MIMO 雷达目标检测的 GLRT 方法。文献[89－92]建立了 MIMO 雷达在多脉冲条件下的目标检测模型，着重对比分析了 MIMO 雷达与传统相控阵雷达多脉冲条件下的检测性能，验证了 MIMO 雷达检测性能的优越性。

综上所述，MIMO 雷达作为一种极具潜力的新体制雷达，其在系统建模与分析、收发阵列布阵配置、发射波形设计、发射/接收波束形成、杂波抑制、目标检测等各个方面都取得了大量的研究成果。此外，关于 MIMO 雷达的 SAR 成像技术的研究也是当前研究的热点并有大量的研究成果出现[93-102]。而作为 MIMO 雷达信号处理的核心，MIMO 雷达参数估计技术的研究现状及趋势将在 1.3 节进行总结论述。

1.3　MIMO 雷达目标参数估计技术的发展与现状

MIMO 雷达的发射阵元间距小，接收阵列与传统的相控阵雷达类似，其利用波形分集和多通道相干处理，增加系统的自由度，提高目标的角度分辨率

和参数的估计性能。MIMO 雷达按收发阵列的部署方式的不同可分为两大类:收发共置的单基地 MIMO 雷达和收发分置的双基地 MIMO 雷达。以下将分别针对这两种 MIMO 雷达的目标参数估计算法的研究动态进行论述。

1.3.1 单基地 MIMO 雷达目标参数估计算法

由于单基地 MIMO 雷达是收发共置的,所以目标相对于收发阵列的波达方向(Direction Of Arrival,DOA)是相同的。目标 DOA 估计技术[103-104]是信号处理的一个重要分支,已经在雷达、声呐、地震勘探、射电天文中得到广泛的应用。由于 MIMO 雷达相对传统的相控阵雷达具有明显的优势,所以出现了单基地 MIMO 雷达 DOA 估计的大量文献。

针对单基地 MIMO 雷达目标一维 DOA 估计,文献[23,105]将 Capon 法、APES 和 CAPES 等几种典型的自适应算法应用到单基地 MIMO 雷达对目标 DOA 和回波信号幅度的估计上。但文中所使用的接收数据为 MIMO 雷达实际接收的阵列数据,而不是 MIMO 雷达通过匹配滤波后的虚拟阵列数据,阵列的有效孔径没有增大。文献[106]给出了一种基于 ESPRIT 和 Kalman 滤波器的 MIMO 雷达参数估计方法。该方法适用于具有任意构型的一维或二维阵列,提高了参数估计的精度,但其只利用了系统接收或发射其中一端的自由度,多目标辨识能力降低了。文献[107]给出了一种未知互耦系数条件下基于四阶累积量的稀疏表示 DOA 估计方法,该方法不仅能够用于高斯白噪声的环境,还能用于高斯色噪声的环境。文献[108]针对多径效应,给出了一种相干源条件下 MIMO 雷达低仰角跟踪时 DOA 估计的新方法,其利用改进的只需一维搜索的最大似然算法对阵列接收数据进行了双端处理,这相当于扩大了单端处理时的阵列孔径,不但提高了低信噪比下仰角分辨力和估计精度,还降低了计算量。文献[109]研究了对称 α 稳定分布($S\alpha S$)冲击杂波下的 MIMO 雷达目标 DOA 估计问题,分别给出基于分数低阶最小方差无畸变响应的 MIMO 雷达 DOA 估计算法和无穷范数归一化最小方差无畸变响应算法。此外,很多文献分析了各种情况下单基地 MIMO 雷达的 DOA 估计性能,并得出了一些具有指导意义的结论。文献[110 - 111]研究了 MIMO 雷达对点目标的 DOA 估计性能,结果表明:对于具有多个发射天线的 MIMO 雷达,其 DOA 估计性能要优于相控阵雷达。文献[112]在文献[110 - 111]的基础上,研究了非均匀线阵,研究结果表明,非均匀线阵产生了更多的有效虚拟阵元,与相控阵雷达和均匀布阵 MIMO 雷达相比,具有更多的空间自由度、更好的克拉美-罗界和更好的 DOA 性能。文献[113]针对单基地

MIMO 雷达波达方向估计精度问题，推导了单目标情况下波达方向估计的克拉美-罗界，结果表明：DOA 估计精度取决于收发阵列的导向矢量以及发射信号的相关矩阵，当发射阵元间距为半波长时，MIMO 雷达波达方向估计的克拉美-罗界在大部分角度范围内优于相控阵雷达，MIMO 雷达还能够通过增大发射阵元间距来得到更小的克拉美-罗界，从而获得远优于相控阵雷达的波达方向估计性能。文献[114]研究了 MIMO 雷达对相干分布式目标 DOA 估计的克拉美-罗下界(CRB)，给出相干分布式目标的 MIMO 雷达信号模型，推导出目标参数估计 CRB 的一般关系式，仿真结果表明：由于具有避免波束形状损失等优点，MIMO 雷达对相干分布式目标的参数估计 CRB 性能优于普通相控阵雷达。文献[115]研究了复合高斯杂波下 MIMO 雷达 DOA 估计的平均克拉美-罗下限(Average CRB，ACRB)，给出了 MIMO 雷达信号与杂波模型，推导出目标 DOA 估计 ACRB 的一般关系式，在此基础上给出当杂波 texture 分量满足反 Gamma 分布时，ACRB 的闭合表达式，研究了目标 DOA 估计的中断 CRB(Outage CRB)，克服了一个发射单元时 ACRB 发散的问题。

上述关于单基地 MIMO 雷达目标一维 DOA 估计的研究都是基于线阵展开的。而对于二维 DOA 估计，常采用面阵结构，如均匀圆阵、L 形阵等。文献[116]中，作者将 MIMO 思想和米波圆阵雷达结合起来，给出了一种能同时估计目标及其镜像的二维角的算法，该算法不仅能估计出目标的方位角，而且能从俯仰上将目标和镜像分开。文献[117]基于约束最小冗余线阵(RMR-LA)，给出利用增广矩阵束(MEMP)算法来估计 MIMO 雷达的二维 DOA。采用约束最小冗余线阵配置 L 形阵列，计算两线阵的互四阶累积量并构造增广矩阵，利用 RMRLA - MEMP 方法估计出二维 DOA。文献[118]给出了一种单基地 L 形阵列 MIMO 雷达的空间多目标分辨和定位方案和基于 Capon 波束形成器的 MIMO - Capon 二维空间谱估计方法，该方法可对空间目标二维 DOA 进行估计，从而完成对多目标的分辨定位。文献[119]将 MIMO 技术和 L 形阵结合，给出了一种基于 MIMO 技术的 L 形二维 DOA 估计方法，该方法通过 MIMO 等效虚拟阵列原理，将 L 形阵等效为一矩形平面阵列，然后在等效矩形阵列的基础上，采用 MUSIC 进行二维 DOA 估计，以 L 形阵的物理孔径实现矩形平面阵列的估计性能，同时，其推导了二维 DOA 估计的 CRB。

除了对目标一维和二维 DOA 的估计，利用单基地 MIMO 雷达还可同时实现对目标其他参数(如距离，速度等)的估计。文献[120]采用多个发射机单个阵列接收机的 MIMO 模型，利用目标对应于各发射机和接收机的速度矢量

需要全本请访问 www.ertongbook.com