基于稀疏理论的MIMO雷达运动目标三维成像

胡晓伟　童宁宁　张永顺　著

科学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

基于稀疏理论的MIMO雷达运动目标三维成像

胡晓伟　童宁宁　张永顺　著



科学出版社

北京

内 容 简 介

多输入多输出(MIMO)雷达是一种新体制雷达，具有阵列扩展、回波信息自由度高等优点。稀疏理论是近年来提出的一种能够以远低于奈奎斯特采样频率高概率恢复原始信号的新理论。本书将 MIMO 雷达与稀疏理论相结合，探讨针对复杂运动目标的短时(单快拍)成像问题。书中较为深入地论述基于稀疏理论的 MIMO 雷达成像基本理论和方法，重点介绍作者在该领域的最新研究成果。全书 7 章，内容包括：绪论、MIMO 雷达成像基本原理、均匀阵列 MIMO 雷达的超分辨三维成像、稀布阵列 MIMO 雷达三维成像、双基结构 MIMO 雷达三维成像、基于多快拍图像相干融合的 MIMO 雷达三维成像以及总结与展望。

本书可供从事雷达成像相关技术教学和研究的高等院校教师使用，对于从事新型雷达成像系统开发及应用的科研人员、工程师及其他相关人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

基于稀疏理论的 MIMO 雷达运动目标三维成像/胡晓伟，童宁宁，张永顺著. —北京：科学出版社，2020.3

ISBN 978-7-03-064073-4

Ⅰ.①基… Ⅱ.①胡… ②童… ③张… Ⅲ.①多变量系统－雷达成像－研究 Ⅳ.①TN957.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020) 第 015961 号

责任编辑：杨 丹／责任校对：郭瑞芝
责任印制：张 伟／封面设计：陈 敬

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

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 3 月第 一 版 开本：720×1000 B5
2020 年 3 月第一次印刷 印张：9 3/4
字数：196 000

定价：98.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

第二次世界大战以来，雷达技术得到了空前的发展。对空中 (空间) 运动目标成像是当代雷达技术的一个重要应用方向。雷达成像能够全天候、远距离地提供飞机、弹道导弹、卫星等运动目标的图像信息，是实现目标探测、识别、预警的重要依据。逆合成孔径雷达成像是当前雷达对空成像的主要技术手段，但在复杂运动目标成像场景下，该技术面临着精确运动补偿、高分辨方位成像、三维成像等诸多挑战。多输入多输出雷达通过发射相互正交信号并在接收端对信号进行分选，从而得到远多于实际收、发阵元数目的观测通道和自由度。相比传统 ISAR 成像，利用 MIMO 雷达进行复杂目标成像具有无须运动补偿、可增加虚拟孔径和易于实现三维成像等优点，是未来雷达成像技术发展的一个重要方向。但目前 MIMO 雷达成像自身存在着诸多尚未解决的问题，如 MIMO 阵列结构优化、高效精确的成像算法设计、MIMO 单快拍成像所需阵元数量太多、硬件设计困难等。近年来，随着压缩感知和矩阵填充等稀疏理论的发展，稀疏微波成像方法得到了广泛研究。稀疏微波成像与 MIMO 雷达成像相结合，为 MIMO 雷达实现对运动目标单次快拍三维成像提供了新的思路。

本书作者在国家自然科学基金项目 (61571459、61701526) 和陕西省自然科学基础研究计划项目 (2019JQ-336) 资助下，对 MIMO 雷达运动目标成像理论及相关技术进行了较为深入的研究。本书结合作者近年来的研究成果，详细阐释 MIMO 雷达成像原理，重点对基于稀疏理论的 MIMO 雷达超分辨三维成像、稀布阵列三维成像、多快拍图像融合三维成像方法进行深入分析研究，并对双基结构 MIMO 雷达成像相关问题进行探讨。

全书内容共 7 章。第 1 章介绍基于稀疏理论开展 MIMO 雷达运动目标三维成像研究的背景意义及发展现状。第 2 章为 MIMO 雷达成像基础，介绍 MIMO 雷达的空时等效原理，建立单基 MIMO 雷达单次快拍成像模型，分析影响 MIMO 雷达成像性能的主要因素，对基于压缩感知和矩阵填充进行雷达成像的基本理论和方法进行分析。第 3 章研究均匀阵列条件下 MIMO 雷达的超分辨三维成像问题，介绍一种基于压缩感知的 MIMO 雷达波形分离方法和一种基于 Kronecker 压缩感知的二维横向超分辨成像方法。第 4 章主要研究稀布阵列 MIMO 雷达的三维成像问题，针对两种不同结构的稀布阵列，分别介绍基于目标联合稀疏性和基于矩阵填充理论的稀布阵列 MIMO 雷达成像方法。第 5 章介绍双基结构 MIMO 雷达三维成像模型、超分辨成像方法、稀布阵列成像方法等内容。在以上单快拍三维成像基础

上，第 6 章介绍基于多快拍图像相干融合的 MIMO 雷达三维成像方法。第 7 章对全书内容进行总结，并对基于稀疏理论的 MIMO 雷达三维成像的下一步研究方向进行展望。

在本书撰写过程中，空军工程大学何兴宇、薛斌、丁姗姗等研究生参与了文字整理等工作，在此表示感谢。

限于作者的水平和能力，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

缩略词对照表

BP	basis pursuit	基追踪
CS	compressive sensing	压缩感知
DFT	discrete Fourier transform	离散傅里叶变换
DOA	direction of arrival	波达角
DOD	direction of departure	波离角
DR-KCS	dimension reduction KCS	降维 KCS
FFT	fast Fourier transform	快速傅里叶变换
FMD-SL0	fast MD-SL0	快速 MD-SL0
FOCUSS	focal underdetermined system solver	欠定系统局灶解
FSI	Fourier-sparsity integrated	傅里叶稀疏整合
IALM	inexact augmented Lagrange multiplier	不精确增广拉格朗日乘子
IC	image contrast	图像对比度
IE	image entropy	图像熵
InISAR	interferometric ISAR	干涉 ISAR
IRCM	irregular range cell migration	不规则越距离单元徙动
ISAR	inverse synthetic aperture radar	逆合成孔径雷达
JSD	joint sparsity-driven	联合稀疏驱动
MC	matrix completion	矩阵填充
MD-SL0	multidimensional SL0	多维 SL0
MIMO	multiple-input multiple-output	多输入多输出
MIP	mutual incoherence property	互相关特性
MMV	multiple measurement vector	多观测向量
MSE	mean square error	均方误差
MTRC	migration through resolution cells	越距离单元徙动
NP	non-deterministic polynomial	非确定性多项式
OMP	orthogonal matching pursuit	正交匹配追踪
PCA	phase center approximation	相位中心近似
PCM	pulse code modulation	相位编码
RCS	radar cross section	雷达散射截面

RD	range Doppler	距离–多普勒
RIP	restricted isometry property	约束等距特性
RIC	restricted isometry constants	约束等距常数
R/C-SA	row/column sparse array	行/列稀布阵
R-SA	random sparse array	随机稀布阵
SAR	synthetic aperture radar	合成孔径雷达
SBL	sparse Bayesian learning	稀疏贝叶斯学习
SCFT	scaled Fourier transform	尺度傅里叶变换
SL0	smoothed l_0 norm	平滑 l_0 范数
SMV	single measurement vector	单观测向量
SNR	signal-to-noise ratio	信噪比
StMC	structured MC	结构化 MC

目　　录

前言
缩略词对照表
第 1 章　绪论 ····· 1
1.1　运动目标三维成像基本方法 ····· 2
1.2　MIMO 雷达成像技术 ····· 4
1.3　基于稀疏性的微波成像技术 ····· 7
1.4　本书内容结构 ····· 8
第 2 章　MIMO 雷达成像基本原理 ····· 10
2.1　MIMO 雷达空时采样等效原理 ····· 10
2.2　MIMO 雷达成像模型 ····· 13
2.2.1　阵列结构 ····· 14
2.2.2　信号模型 ····· 14
2.3　影响成像性能的主要因素 ····· 17
2.3.1　发射波形正交性 ····· 17
2.3.2　阵列结构 ····· 21
2.3.3　目标相对雷达的视角 ····· 24
2.3.4　目标参数估计精度 ····· 27
2.4　基于稀疏理论的 MIMO 雷达成像 ····· 30
2.4.1　运动目标雷达图像的稀疏性 ····· 31
2.4.2　压缩感知成像理论 ····· 32
2.4.3　矩阵填充成像理论 ····· 34
第 3 章　均匀阵列 MIMO 雷达的超分辨三维成像 ····· 37
3.1　基于压缩感知的 MIMO 雷达波形分离 ····· 37
3.1.1　CS 波形分离方法 ····· 38
3.1.2　仿真分析 ····· 39
3.2　基于压缩感知的二维方位向超分辨成像 ····· 47
3.2.1　CS 超分辨成像方法 ····· 47
3.2.2　CS 基失配问题及对二维方位向超分辨成像的影响 ····· 48
3.3　基于 KCS 的超分辨成像 ····· 52
3.3.1　KCS 超分辨成像方法 ····· 52

3.3.2　一种降维 KCS 超分辨成像方法 ····· 53
3.3.3　仿真分析 ····· 56
第 4 章　稀布阵列 MIMO 雷达三维成像 ····· 65
4.1　成像模型 ····· 65
4.1.1　阵列模型 ····· 65
4.1.2　信号模型 ····· 66
4.2　基于联合稀疏性的行/列稀布阵三维成像 ····· 67
4.2.1　分维压缩模型 ····· 67
4.2.2　分维压缩原理 ····· 68
4.2.3　成像方法流程 ····· 70
4.2.4　仿真分析 ····· 71
4.3　基于矩阵填充的随机稀布阵三维成像 ····· 77
4.3.1　基于结构化 MC 的 MIMO 雷达成像方法 ····· 77
4.3.2　仿真分析 ····· 79
第 5 章　双基结构 MIMO 雷达三维成像 ····· 84
5.1　成像模型 ····· 84
5.1.1　双基成像模型 I ····· 84
5.1.2　双基成像模型 II ····· 87
5.1.3　仿真分析 ····· 90
5.2　超分辨三维成像 ····· 92
5.2.1　1D-SL0 算法 ····· 92
5.2.2　MD-SL0 算法 ····· 93
5.2.3　基于 MD-SL0 的超分辨三维成像方法 ····· 95
5.2.4　仿真分析 ····· 97
5.3　稀布阵列三维成像 ····· 100
5.3.1　稀布阵列成像模型 ····· 100
5.3.2　基于 MC 的稀布阵列三维成像方法 ····· 101
5.3.3　仿真分析 ····· 103
第 6 章　基于多快拍图像相干融合的 MIMO 雷达三维成像 ····· 105
6.1　多快拍 MIMO 雷达信号模型 ····· 105
6.2　越距离单元徙动校正 ····· 107
6.2.1　MTRC 现象分析 ····· 108
6.2.2　MTRC 校正方法 ····· 108
6.2.3　MTRC 对 CS 波形分离方法的影响 ····· 110
6.2.4　仿真分析 ····· 111

6.3　多快拍三维图像相干融合……115
6.3.1　包络对齐与相位校正……115
6.3.2　合成转速估计……118
6.3.3　相干融合……119
6.3.4　仿真分析……120
6.4　双基 MIMO 雷达多快拍三维成像……125
6.4.1　双基合成转速估计……125
6.4.2　仿真分析……127
第 7 章　总结与展望……129
7.1　总结……129
7.2　展望……130
参考文献……133
附录……145
附录 A　PCM 信号相位编码值……145
附录 B　单基成像模型斜视条件下非正交基证明……146
附录 C　双基成像模型下线性无关向量组证明……146
附录 C1　双基成像模型 I 线性无关向量组证明……146
附录 C2　双基成像模型 II 线性无关向量组证明……146

第1章 绪 论

雷达是对目标进行检测和定位的电子系统，在第二次世界大战中因军事需求得到了迅速发展。早期雷达的分辨率低，通常将所观测的对象视为一个“点”，因此仅能测定其位置和运动参数。随着对雷达获取目标高维信息需求的增加以及现代雷达分辨能力的提高，成像雷达应运而生。由于成像雷达不是将观测对象视为“点目标”，而是一个具有特定外形的结构体，在获得目标位置和运动参数的同时，还能获得目标的图像信息，在现代军用和民用领域都有广阔的应用前景。对空成像是雷达成像的一个重要应用方向，能够全天候、远距离地提供飞机、卫星、弹道导弹等运动目标的数量、结构类型、外形尺寸等特征，为目标的分类、识别、预警等提供重要依据。在现代战场环境下，随着来自空中 (空间) 威胁的日益严峻，发展雷达对空成像技术已成为当今雷达技术的迫切需求和研究热点。

目前，雷达对空成像主要基于逆合成孔径雷达 (inverse synthetic aperture radar, ISAR)[1−3] 成像技术，用以获得目标在距离向和方位向的二维图像。二维图像仅是三维空间目标在距离–方位平面的二维投影，因此会随目标姿态的变化而改变。若在二维图像基础上，增加垂直距离–方位平面的第三维信息，即可得到反映目标三维空间结构的三维图像。与二维图像相比，三维图像能够为目标识别提供更为全面、更为稳定的特征信息。但目标三维图像的获取较为困难，特别是对于一些复杂运动的目标以及一些构成复杂的多目标。目前常见的运动目标三维成像方法，如基于 ISAR 成像技术发展起来的干涉逆合成孔径雷达 (interferometric ISAR，InISAR)[4−5] 成像技术、基于 ISAR 像序列的成像技术以及基于目标自旋特性的成像技术等，成像效果都不甚理想。多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 雷达 [6−9] 采用多发多收体制可以有效扩展物理天线的阵列孔径，从而能够实现短时观测甚至单快拍照射下的运动目标三维成像。但基于单快拍数据对大视场场景进行三维高分辨成像时，需要 MIMO 雷达具有大量的收发阵元，这不仅增加了 MIMO 雷达的成本，也增加了 MIMO 雷达的设计和制造难度。近几年快速发展的压缩感知 (compressive sensing, CS) 理论 [10] 和矩阵填充 (matrix completion, MC) 理论 [11−13] 为解决 MIMO 雷达成像中的问题提供了新思路，基于 CS 和 MC 的 MIMO 雷达成像技术成为雷达成像领域的一个重要研究方向。

本章主要介绍常见运动目标三维成像方法、MIMO 雷达成像中涉及的关键技术、CS 和 MC 的基本原理以及在微波成像中的应用。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1.1　运动目标三维成像基本方法

目前，运动目标三维成像方法可以分为以下几类：基于单脉冲测角的方法、基于 ISAR 像序列的方法、基于目标微动特性的方法、基于 InISAR 的方法和基于二维阵列的方法。

1. 基于单脉冲测角的方法

基于单脉冲测角的方法由传统的雷达目标测角技术发展而来。单脉冲雷达通过发射宽带信号实现散射点在距离向的高分辨，再利用和差波束测量目标上各散射点相对波束中心的夹角，以此获得各散射点的距离、方位、俯仰三维信息，实现目标的三维成像 [14]。但单脉冲测角法仅适用于每个距离单元有一个散射点的情形，当一个距离单元包含多个散射点时将会出现角闪烁的问题。文献 [15] 中提出先利用 ISAR 技术实现散射点二维分辨，再利用单脉冲测角获得三维信息，但该方法在同一距离–多普勒单元存在多个散射点时同样会存在角闪烁问题。总体来说，单脉冲测角法比较简单，但方位向分辨率较低，难以满足高分辨三维成像的要求。

2. 基于 ISAR 像序列的方法

基于 ISAR 像序列的方法通过 ISAR 成像系统对运动目标进行长时间观测，获得关于目标的连续 ISAR 像序列，根据观测时间内目标相对成像系统的三维姿态变化，提取散射点的三维信息，进而实现目标的三维重构。文献 [16] 研究了基于非形变目标的光学图像序列，并根据目标与成像平面的正交投影，利用矩阵因式分解方法提取了目标的外形和运动信息，在此基础上分析了 ISAR 图像与真实目标三维结构的线性投影方程，利用因式分解方法实现了雷达目标图像的三维重构。文献 [17] 提出了一种利用舰船目标的二维 ISAR 像序列获取散射点三维坐标，用于目标识别的方法。文献 [18] 将长时间观测获得的连续 ISAR 像称为 ISAR“movies”，提出了一种基于最小均方估计的目标散射点三维位置估计方法。文献 [19] 进一步提出了一种基于多基 ISAR “movies” 的目标三维结构估计方法，但该方法需要已知目标的相对运动信息作为先验知识。为解决该问题，文献 [20] 提出了一种目标相对运动信息和目标三维形状估计方法。以上方法虽然能够利用 ISAR 像序列实现目标三维成像，但要求对目标进行长时间观测和目标作规律性运动，因而难以用于非合作目标。

3. 基于目标微动特性的方法

基于目标微动特性的方法主要针对具有微动部件或自身具有微动特性的目标，通常不能采用传统的 ISAR 距离–多普勒处理，而是利用目标特殊的三维运动形式，

通过参数估计方法来重建目标的三维图像。文献 [21] 和 [22] 研究了高速自旋空间碎片的高分辨三维成像。文献 [23] 通过提取目标的微动特征，实现了非对称自旋目标的三维成像，但该方法只适用于微动形式为自旋的目标。文献 [24] 基于分布式组网雷达研究了有翼弹道目标三维进动特征提取，获得了目标的空间锥旋矢量、进动周期、自旋周期等特征参数。文献 [25] 在多个雷达站距离像匹配的基础上，重构了锥体弹头各散射点的三维空间位置。但以上研究均针对具有某种运动形式的特定目标，因此成像方法不具有普遍性。

4. 基于 InISAR 的方法

干涉技术最早应用于合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 成像中对地面高程进行测量 [26]，之后被引入 ISAR 成像 [4]。文献 [5] 提出利用相互垂直的两个天线分别获取目标的 ISAR 图像，之后对两图像进行干涉处理求得散射点的高度信息。文献 [27] 研究了 InISAR 图像失配的问题，提出通过两个相互正交阵列进行参数估计和图像相位补偿的 InISAR 三维成像方法。文献 [28] 提出了两种不同运动情况下海上目标的 InISAR 三维成像方法。文献 [29] 对传统的 ISAR 成像旁瓣抑制方法进行了改进，提出了一种获得超分辨三维图像的成像方法。文献 [30] 和 [31] 巧妙利用了海面对雷达信号的多径效应，利用单部雷达获得了等效三部雷达的 ISAR 图像并用于干涉三维成像。文献 [32] 研究了近场条件下的干涉三维成像，利用一种改进的后向投影方法获得了目标的二维图像，再经过干涉处理获得目标的三维 InISAR 像。传统 InISAR 成像大多基于正侧视模型，文献 [33] 研究了斜视模型下的 InISAR 成像，并讨论了不同 ISAR 像的包络对齐问题。除此之外，对 InISAR 方法的研究还包括相位解缠 [34−35]、高速/机动/大尺寸目标的 InISAR 三维成像 [36−38]、InISAR 图像的目标识别 [39−40] 等。

由于 InISAR 技术是在 ISAR 成像技术基础上发展起来的，InISAR 成像也存在 ISAR 成像中的运动补偿难题。此外，InISAR 技术本身还面临着图像配准、角闪烁、相位缠绕等问题，难以在复杂场景下获得运动目标稳定、高质量的三维图像。

5. 基于二维阵列的方法

与 InISAR 方法采用两天线或三天线进行三维成像不同，基于二维阵列的方法通常采用多天线结构，从而解决了 InISAR 方法的角闪烁和图像配准等问题。文献 [41] 提出了一种利用两个垂直线阵进行 InISAR 三维成像的方法，在二维 ISAR 成像基础上，采用二维阵列角估计实现了对同一距离–多普勒单元不同散射点的分辨。文献 [42] 进一步将研究拓展至二维稀疏阵，利用宽孔径二维阵列实现三维成像，并较好地解决了三维图像旁瓣抑制和散射点坐标匹配等问题。之后，文献 [43] 提出了一种利用最大似然估计和 CLEAN 技术提高参数估计精度和三维图像质量

的方法，并讨论了多径效应转速估计误差对成像效果的影响。

与传统的 InISAR 方法相比，基于二维阵列的方法虽然能够获得较为满意的目标三维成像结果，但所需的天线数量大大增加，这无疑提高了硬件成本。

1.2　MIMO 雷达成像技术

MIMO 雷达成像技术为解决运动目标三维成像问题提供了一种有效途径。MIMO 雷达的发射端和接收端均为多阵元的天线结构，发射时各个发射阵元同时辐射相互正交的信号波形，接收时每个接收阵元能够接收目标对所有发射信号的散射信号，通过接收机后端对信号进行的分选能获得远多于实际收、发阵元数目的信号观测通道和自由度。因此，利用 MIMO 雷达进行运动目标成像具有以下优势：① 与常规阵列成像方法相比，采用 MIMO 阵列可以获得比天线实阵列阵元数大得多的虚拟阵元，从而显著减少天线的阵元数量。② 与 ISAR 成像方法相比，采用 MIMO 雷达成像可以显著降低成像所需的相干积累时间，甚至无需进行脉冲积累即可实现单次快拍成像，从而避免复杂的运动目标平动补偿的难题。③ ISAR 成像的方位向高分辨依赖于目标的相对运动，当目标沿一定方向运动时可以获得二维图像，但难以获得三维图像；而 MIMO 雷达成像的方位向高分辨则依靠雷达阵列天线实现，因此通过设计合适的二维天线阵列可以容易实现对目标的三维成像。目前，国内外针对 MIMO 成像所做的研究大体可以分为以下几个方面。

1. 正交波形设计

MIMO 雷达要求发射端发射一组互不相关的波形集，保证在接收端能够从回波中将不同发射波形的目标回波信号完全分离，这需要设计具有正交特性的信号集。目前，MIMO 雷达正交信号主要分为时间分集 (时分) 信号、频率分集 (频分) 信号、同频码分信号以及其他信号形式。其中，时分信号是指不同发射阵元分时发射信号，从而使信号在时间上是正交的，但由于时分信号占用较长的时间资源，不适合对回波进行实时处理；频分信号在频域上互不重叠，可以通过设计频域滤波器可以实现不同发射信号的分离，但雷达成像要求发射大带宽信号并对不同通道信号进行相干处理，因此频分信号并不适用于成像应用场景；同频码分信号通过相位或频率编码实现不同波形间的正交，同时保证回波信号具有相同的载频和带宽，便于后续成像处理。

文献 [44] 通过整合模拟退火算法和迭代编码选择方法得到一种有效的多项相位编码信号设计方法，并给出了设计实例。文献 [45] 进一步利用模拟退火算法设计了正交离散频率编码波形。文献 [46] 以综合积分旁瓣比作为评价指标对同频码分信号的雷达成像性能进行了理论分析和数值仿真，结果表明现有同频码分信号

通常难以满足 MIMO-SAR 的成像要求。文献 [47] 和 [48] 相继研究了类零自相关区的相位编码信号设计方法，其中文献 [48] 采用改进的零相关区编码信号抑制距离向旁瓣，提高了 MIMO 雷达三维成像的质量。文献 [49] 和 [50] 针对恒模约束下正交波形设计，提出了高效的波形优化设计方法。文献 [51] 研究了基于压缩感知稀疏恢复的正交波形设计及能量分配方案。文献 [52] 针对 MIMO-SAR 应用要求，通过对 chirp 信号进行方位相位编码设计，抑制了互相关噪声。文献 [53] 提出了一种新的正交频分复用 chirp 波形设计方法，用于成像场景。虽然 MIMO 雷达正交波形设计已取得了大量研究成果，但对于 MIMO 雷达成像而言，现有同频正交波形仍存在正交性差、互相关旁瓣高、大带宽信号设计困难等问题，有待于更进一步的研究。本书将重点针对 MIMO 雷达发射同频码分信号波形时的成像问题进行深入研究。

2. 天线阵列设计

根据天线间距不同，可以将 MIMO 雷达分为分布式 MIMO 雷达和集中式 MIMO 雷达两大类。分布式 MIMO 雷达又称空间分集 MIMO 雷达、非相干 MIMO 雷达或统计 MIMO 雷达。分布式 MIMO 雷达各天线阵元间距较大，使得不同天线阵元的视线角明显不同，因而具有良好的空间分集增益和结构分集增益。分布式 MIMO 雷达的优势在于能够克服目标雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 在空间上的起伏，提高雷达对目标的检测和识别性能，并且具有良好的抗隐身、抗摧毁能力，缺点是存在时间、空间、相位的三大同步问题，难于相干处理，工程实现困难。集中式 MIMO 雷达又称共置 MIMO 雷达或相参 MIMO 雷达。集中式 MIMO 雷达各天线阵元之间位置相距较近，可以收发分置也可以收发同置。由于各天线相对于目标的视线角近似相等，通常可以认为不同收发天线阵元的目标 RCS 近似相等。并且因为各天线阵元发射正交信号，所以能获得良好的波形分集增益。相比于分布式 MIMO 雷达，集中式 MIMO 雷达具有截获概率低、角度/速度分辨率高、能够实现信号相干处理、易于工程实现等优势，更适用于目标成像。

MIMO 天线阵列结构对回波信号的空间采样和后续的信号处理方式影响很大，因此 MIMO 阵列设计是 MIMO 雷达及 MIMO 成像的一项重要研究内容。目前 MIMO 雷达阵列设计方法主要可以分为三大类：第一类是通过最优化阵列方向图，以此获得具有窄波束低旁瓣的阵列结构 [54−55]。第二类以阵列冗余单元最少作为设计准则 [56]，提出一系列优化设计方法 [57−59] 和快速设计方法 [60−63]。第三类是针对特定的应用场景，设计合适的阵列结构。文献 [64] 从 MIMO 雷达波达方向估计角度出发，研究了 MIMO 雷达阵列设计方法，得到了 MIMO 收发阵列最佳设计的解析解。文献 [65] 依据目标场景范围和方位向分辨率要求，提出了一种非均匀 MIMO 线阵模型，显著降低了 MIMO 成像雷达天线阵元数量。文献 [66] 和 [67] 先

后针对 MIMO-ISAR 二维成像和三维成像应用背景，提出了 MIMO 线阵模型和均匀面阵模型的设计方法。而对于 MIMO 雷达单快拍三维成像而言，采样数据形式完全取决于阵列结构，因此阵列优化设计的自由度更大且更有必要，后续仍需开展更多的、有针对性的研究。

3. 参数估计

参数估计是 MIMO 雷达的基本功能之一，也是 MIMO 雷达成像的基础。MIMO 雷达参数估计包括目标角度估计、速度估计及距离估计等。其中对目标的波离角 (direction of departure，DOD) 和波达角 (direction of arrival，DOA) 估计是 MIMO 雷达参数估计的一个重要研究方向。文献 [68]~[71] 分别将 Capon 算法、CAPES 算法、ESPRIT 算法和信号子空间重构算法等应用于单基 MIMO 雷达一维 DOA 估计；文献 [72]~[75] 研究了 MIMO 面阵下的二维 DOA 估计问题。近几年双基 MIMO 雷达 DOD 和 DOA 估计的研究成果也大量涌现，主要包括噪声子空间类算法 [76−80]、信号子空间类算法 [81−84] 以及其他一些方法 [85−88]。此外，文献 [89]~[93] 还研究了对目标角度、速度、极化等多参数联合估计方法。总体来说，当前关于 MIMO 雷达参数估计方面的研究远远领先于成像研究，这为深入进行 MIMO 雷达成像研究奠定了基础。

4. 成像算法

MIMO 雷达成像既包括对地成像又包括对空成像，本书重点关注对空成像。根据积累时间的长短，MIMO 雷达对空成像可以分为 MIMO 单快拍成像和 MIMO 多快拍成像 (也称 MIMO-ISAR 成像)。文献 [94] 建立了 MIMO 雷达单快拍成像模型，讨论了 MIMO 雷达的方位向分辨成像性能。文献 [95] 基于电磁逆散射原理，推导出一种基于空间谱域填充的 MIMO 雷达成像方法。文献 [96] 利用 MIMO 线阵和宽带发射信号实现了高分辨二维成像。文献 [97] 进一步研究了利用两个垂直线阵进行窄带 MIMO 雷达二维成像。文献 [98]~[100] 提出了将 MIMO 雷达与 ISAR 相结合，利用 MIMO 等效阵列的空间采样代替 ISAR 长时间相干积累的空间采样，最终以远低于常规 ISAR 成像的积累时间获取高质量雷达图像。文献 [98] 和 [99] 探讨了 MIMO 雷达空间采样与 ISAR 时间采样的等价转换关系，提出 MIMO-ISAR 成像的一般处理步骤，初步验证了 MIMO-ISAR 的可行性。文献 [100] 利用多站和 MIMO 雷达进行 ISAR 成像，有效提高了旋转目标的方位向分辨率。文献 [101] 研究了多基雷达和 MIMO 雷达体制下，利用多斜视 ISAR 技术提高机动目标方位向分辨率的方法。文献 [102] 研究了 MIMO-ISAR 成像模型中空时不等效问题对成像性能的影响。文献 [103] 研究了 MIMO-ISAR 中的运动参数问题，实现了匀加速转动目标的转动参数估计，为后续数据的重排插值提供依据。文献 [104] 研究了回波

数据的高精度二维重排方法，实现了二维空时数据的联合成像。文献 [105] 提出了一种极坐标格式成像方法，解决了 MIMO-ISAR 数据的非均匀性，提高了图像聚焦性能。文献 [106] 进一步研究了极坐标格式 MIMO 雷达成像的快速算法。

与 MIMO 雷达二维成像相比，目前 MIMO 雷达三维成像的研究相对较少。文献 [107] 在文献 [96] 和文献 [97] 的基础上，利用宽带信号和垂直线阵实现了距离向、方位向和俯仰向的三维分辨。文献 [108] 利用 MIMO 雷达研究了不同阵列结构下的收发同置 MIMO 雷达的宽带三维成像方法。文献 [109] 在文献 [108] 基础上，利用 ISAR 技术，实现了多幅单快拍三维图像的相干融合，提高了成像性能。文献 [67] 设计了一种特殊的均匀平面阵列，并基于该阵列研究了单次快拍三维成像和 MIMO-ISAR 三维成像方法。文献 [110] 利用两个收发分置的面阵，实现了窄带 MIMO 雷达的三维成像。以上关于 MIMO 三维成像的研究，大大推动了 MIMO 雷达成像技术的发展，但这些研究都较少考虑高分辨三维成像对 MIMO 阵元数量和阵列长度的巨大需求，而这是制约 MIMO 雷达成像实用性的一个关键问题。

1.3 基于稀疏性的微波成像技术

基于稀疏性的微波成像 (简称稀疏微波成像或稀疏成像) 是指利用雷达目标的稀疏性，运用压缩感知或稀疏恢复理论对目标图像进行重建的雷达成像新方法 [111−112]。自 2007 年 CS 理论被引入雷达成像 [113] 后，稀疏微波成像理论得到了广泛而深入的研究。根据成像对象的不同，研究领域主要包括 SAR、ISAR、探地雷达、穿墙雷达等。鉴于篇幅有限，下面仅对 ISAR 稀疏成像的研究进展进行简要介绍。文献 [114] 将 CS 用于 ISAR 成像，通过有限个脉冲获得了高的方位向分辨率。文献 [115] 研究了低信噪比条件下的 ISAR 高分辨成像，提出了一种稳定的 CS 方位向分辨率增强方法。2011 年，稀疏成像被引入 ISAR 高分辨距离像合成。文献 [116] 提出了一种随机稀疏频率的发射波形，并利用压缩感知实现了稀疏条件下的距离、方位二维 ISAR 成像。文献 [117] 研究了稀疏步进线性调频信号的高分辨距离像合成问题，先用子 chirp 信号进行粗分辨率距离成像，再利用 CS 理论将各粗分辨距离像合成为高分辨距离像。文献 [118] 也研究了稀疏步进频波形下的 ISAR 成像问题，考虑了不同子 chirp 信号间的运动补偿，提出了一种有效的二维 ISAR 成像方法。2012 年，稀疏孔径条件下的 ISAR 稀疏成像方法被相继提出。文献 [119] 对随机孔径稀疏和连续间隔孔径稀疏条件下的方位向成像方法进行了研究，提出了一种稀疏孔径下的距离对齐方法。文献 [120] 提出了一种基于贝叶斯压缩感知的稀疏孔径 ISAR 自聚焦方法。近几年，关于 ISAR 稀疏成像的研究成果大量出现，其研究方向可以分为以下几种：一是利用新的稀疏信号恢复算法改善 ISAR 成像效果，如稀疏贝叶斯学习算法 [121−123]、平滑 l_0 范数 (smoothed l_0 norm, SL0) 算

需要全本请访问 www.ertongbook.com