

MIMO雷达阵列设计及 稀疏稳健信号处理算法研究

杨 杰◎著



西北工业大学出版社

MIMO 雷达阵列设计及 稀疏稳健信号处理算法研究

杨 杰 著

西北工业大学出版社

西 安

【内容简介】 MIMO 雷达是近年来雷达领域的研究热点,本书围绕集中式 MIMO 雷达开展研究,主要包括嵌套 MIMO 雷达稀疏测向算法设计、互质 MIMO 雷达稀疏测向算法设计、MIMO 雷达稳健波束形成算法以及稀疏成像算法设计等。

本书可作为高等学校信号与信息处理专业的研究生教材,同时可供科研院所的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

MIMO 雷达阵列设计及稀疏稳健信号处理算法研究/
杨杰著. —西安:西北工业大学出版社,2018.8
ISBN 978-7-5612-6198-9

I.①M… II.①杨… III.①多变量系统—
雷达—研究 IV.①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 183828 号

MIMO LEIDA ZHENLIE SHEJI JI XISHU WENJIAN XINHAO CHULI SUANFA YANJIU
MIMO 雷达阵列设计及稀疏稳健信号处理算法研究

策划编辑:梁 卫

责任编辑:李阿盟 朱辰浩

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:陕西向阳印务有限公司

开 本:727 mm×960 mm 1/16

印 张:11.375

字 数:203 千字

版 次:2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价:68.00 元

前 言

MIMO 雷达是在 MIMO 通信技术基础上发展起来的一种新体制雷达, 并以其在目标检测、跟踪、识别和参数估计等方面所具有的巨大性能优势, 成为近年来雷达研究领域的热点。本书围绕集中式 MIMO 雷达, 着重针对该雷达系统中的阵列结构优化、稀疏波达方向估计算法设计、稳健自适应波束形成算法设计、稀疏成像算法设计等问题开展研究。

全书分为 6 章。第 1 章介绍 MIMO 雷达信号处理的研究背景和发展概况; 第 2 章针对均匀 MIMO 雷达可分辨目标数受限于虚拟阵元数的问题, 介绍了一种基于嵌套阵的 MIMO 雷达阵列结构设计新方法并阐述了相应的稀疏 DOA 估计算法, 应用该新型 MIMO 雷达阵列结构, 可分辨的独立目标数大于虚拟阵元数; 第 3 章将互质阵的概念引入 MIMO 雷达收发天线的配置选择问题中, 通过优化 MIMO 雷达的收发阵列结构, 使该系统的虚拟阵元位置满足互质阵的空间分布形式, 从而充分利用互质阵在相关域的自由度扩展特性, 以突破虚拟阵元数目对 MIMO 雷达最大可分辨目标数的限制, 同时将稀疏贝叶斯学习的思想推广到互质 MIMO 雷达的 DOA 估计问题中; 第 4 章介绍 MIMO 雷达稳健自适应波束形成技术, 其核心思想在于有效重构干扰-噪声协方差矩阵和精确预估目标导向矢量, 其中干扰-噪声协方差矩阵可通过将接收数据协方差矩阵投影到干扰-噪声子空间或将目标分量从接收数据协方差矩阵中消去得到; 目标真实导向矢量可通过解一组新构建的优化问题(此优化问题的目标函数为最小化波束形成器敏感度)得到; 第 5 章介绍基于压缩感知的 MIMO 雷达稀疏成像技术, 针对线性调频和跳频两种波形分集方式, 建立相应集中式 MIMO 雷达系统的回波模型, 并从模糊函数的角度分析两种发射波形对成像效果的影响, 同时从校正连续成像场景的离散化网格与真实目标散射点之间存在的网格失配误差的角度出发, 将基于泰勒近似技术的改进型 SLIM 算法引入 MIMO 雷达稀疏成像领域, 该算法减轻经典稀疏重构算法对离散网格的依赖性, 有效改善成像质量; 第 6 章对全书内容进行总结, 并指明今后的研究方向。

本书内容是笔者在雷达领域研究工作的一个小结。在本书出版之际,特别感谢廖桂生教授在笔者攻读博士学位期间的指点与培养,没有他的悉心指导,要完成本书的写作是不可能的。同时,还特别感谢杨益新教授的支持与帮助,以及西北工业大学航海学院声学与信息工程系领导的关怀。

写作本书曾参阅了相关文献、资料,在此,谨向其作者深表谢忱。

由于水平有限,加之这一领域仍处于迅速发展之中,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

2018年5月

符号对照表

符号	符号名称
\otimes	Kronecker 积
\odot	Khatri - Rao 积
\oplus	Hadamard 积
$\text{tr}(\cdot)$	矩阵迹
$\text{rank}(\cdot)$	矩阵秩
$\text{Krank}(\cdot)$	矩阵条件秩
$\text{diag}(\cdot)$	对角矩阵
$\text{CN}(\cdot)$	复高斯概率分布
$(\cdot)^{-1}$	矩阵求逆运算
$\text{Re}(\cdot)$	求复数量实部
$\text{Im}(\cdot)$	求复数量虚部
$\text{E}[\cdot]$	统计平均(数学期望)
$(\cdot)^*$	复共轭运算
$(\cdot)^H$	转置复共轭运算
$(\cdot)^T$	矩阵转置运算
$\ \cdot\ _0$	矢量 l_0 范数
$\ \cdot\ _1$	矢量 l_1 范数
$\ \cdot\ _2$ 或 $\ \cdot\ $	矢量 Euclidean 范数
$ \cdot $	绝对值/矩阵行列式/集合的势
$\text{vec}(\cdot)$	矩阵向量化操作
$\text{argmin}(\cdot)$	求函数的最小值
R	实数集合
C	复数集合
\mathbf{I}_N	$N \times N$ 阶单位矩阵
j	虚数单位
$\langle \cdot \rangle$	内积运算
\mathbf{z}_p	向量 \mathbf{z} 的第 p 个元素
$\mathbf{Z}_{p,:}$	矩阵 \mathbf{Z} 的第 p 个行向量
$\mathbf{Z}_{:,p}$	矩阵 \mathbf{Z} 的第 p 个列向量
\mathbf{Z}_{p_1,p_2}	矩阵 \mathbf{Z} 的第 (p_1, p_2) 个元素

缩略语对照表

缩略语	英文全称	中文对照
RADAR	Radio Detection And Ranging	无线电探测与测距
MIMO	Multiple - Input Multiple - Output	多输入多输出
SIAR	Synthetic Impulse and Aperture Radar	综合脉冲孔径雷达
SBL	Sparse Bayesian Learning	稀疏贝叶斯学习
DOF	Degrees Of Freedom	自由度
CRB	Cramer - Rao Bound	克拉美-罗界
DOA	Direction Of Arrival	波达方向
MUSIC	Multiple Signal Classification	多重信号分类算法
ESPRIT	Estimation of Signal Parameter via Rotational Invariance Technique	旋转不变子空间算法
EVD	Eigen Value - Decomposition	特征值分解
SS - MUSIC	Spatial Smoothing - based Multiple Signal Classification	基于空间平滑技术的多重信号分类算法
RVM	Relevance Vector Machine	关联向量机
CS	Compressed Sensing	压缩感知
RIP	Restricted Isometry Property	限制等容属性
SMV	Single Measurement Vector	单测量矢量
MMV	Multiple Measurement Vector	多测量矢量
MVDR	Minimum Variance Distortionless Response	最小方差无失真响应
RMSE	Root Mean Square Error	均方根误差
SNR	Signal - to - Noise Ratio	信噪比
SINR	Signal - to - Interference - plus - Noise Ratio	信干噪比
SVD	Singular Value Decomposition	奇异值分解
CMSR	Covariance Matrix Sparse Representation	协方差矩阵稀疏表示
ULA	Uniform Linear Array	均匀线阵
SLIM	Sparse Learning via Iterative Minimization	基于迭代最小化的稀疏学习

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究历史与发展现状	4
1.3 主要工作与内容安排	20
第 2 章 基于空域稀疏性的嵌套 MIMO 雷达 DOA 估计算法	23
2.1 引言	23
2.2 嵌套阵信号处理基础	27
2.3 嵌套 MIMO 雷达阵列结构设计算法	30
2.4 基于 SBL 准则的嵌套 MIMO 雷达高分辨测向算法	37
2.5 仿真实验与分析	51
2.6 本章小结	59
第 3 章 基于空域稀疏性的互质 MIMO 雷达 DOA 估计算法	60
3.1 引言	60
3.2 互质阵信号处理基础	64
3.3 互质 MIMO 雷达阵列结构设计算法	68
3.4 基于 SBL 准则的互质 MIMO 雷达高分辨测向算法	72
3.5 仿真实验与分析	87
3.6 本章小结	97
第 4 章 MIMO 雷达稳健自适应波束形成算法	98
4.1 引言	98
4.2 嵌套 MIMO 雷达稳健自适应波束形成算法	101
4.3 均匀 MIMO 雷达稳健自适应波束形成算法	109
4.4 仿真实验与分析	120
4.5 本章小结	128

第 5 章 MIMO 雷达稀疏成像算法	130
5.1 引言	130
5.2 MIMO 雷达模糊函数	132
5.3 MIMO 雷达成像场景的稀疏表示	136
5.4 MIMO 雷达稀疏成像效果与模糊函数的关系	138
5.5 基于改进 SLIM 算法的 MIMO 雷达稀疏成像角度误差校正方法	139
5.6 仿真实验与分析	142
5.7 本章小结	147
第 6 章 总结与展望	148
6.1 内容总结	148
6.2 工作展望	151
参考文献	153

第 1 章

绪 论

本章首先以雷达技术的发展历史为背景阐述本书的研究意义,然后概述多输入多输出(Multiple - Input Multiple - Output, MIMO)雷达的相关知识及国内外热点研究领域,接着对本书所涉及的阵列自由度(Degrees - Of - Freedom, DOF)扩展、稀疏重构以及稳健自适应波束形成等理论作简要介绍,最后厘清本书的组织架构。

1.1 研究背景与意义

雷达(RADAR)是英文词组“Radio Detection And Ranging”缩写的音译,意为“无线电探测与测距”,它是一种利用电磁波探测目标,并对目标特征信息(如距离、波达方向和速度)进行提取的电子系统^[1-5]。雷达系统的组成要素如图 1.1 所示。由图 1.1 可知,雷达的工作原理可概括为以下过程:首先,由发射机向待探测区域发射一串电磁波信号;然后,电磁波经空间传输到达目标所在位置,并被目标反射;最后,由接收机接收目标回波信号,并借助相应的信号处理算法输出检测估计结果。虽然不同应用背景下的雷达系统结构千差万别,但万变不离其宗,所有雷达系统均是围绕如图 1.1 所示的基本架构所组建的,即各类雷达系统均包含发射机、天线、接收机和信号处理机这几类基本组成模块。相比传统探测手段,雷达具有可全天候、全天时工作的优点,因而使其在过去的一百多年中得到了迅猛的发展。同时,现代电子科学的先进成果也推动了雷达在技术上的创新,使其不仅成为军事上必不可缺的电子装备,并且广泛应用于众多民用领域中。

作为一种战争的产物,战场态势感知、国土安全防卫是催生雷达技术的重要诱因^[6]。雷达概念的提出可追溯至 1888 年,由德国物理学家 Heinrich Hertz 首次用实验验证了 Maxwell 电磁场理论并展示了雷达基本工作原理^[7, 8]。此后,雷达领域的相关研究进展缓慢,直到第二次世界大战(简称“二战”,下同)爆发,由于传统预警手段已无法适应交战各国骤然增加的防空压

力,因而迫切需要新技术、新理论的出现。雷达理论实用化的雏形——Robert Watson 于 1937 年在英国设计的 Chain Home 雷达^[9],便在此背景下应运而生。早期雷达主要提供领空警戒、船只避险等功能,且其通常采用收发天线分置(可归类于当前雷达理论中的双基雷达范畴)、连续波(波长通常大于 60 cm)等工作模式。由于理论和技术水平所限,该时期的雷达仅能提供基本的判断目标有无功能,更复杂的测距、测速功能则无法实现。然而,由于在战场信息获取、远程警戒等方面所具有的无可比拟的优势,雷达自诞生之日起便吸引了众多学者和工程技术专家的关注,进而推动了雷达理论和硬件设备的飞速发展。

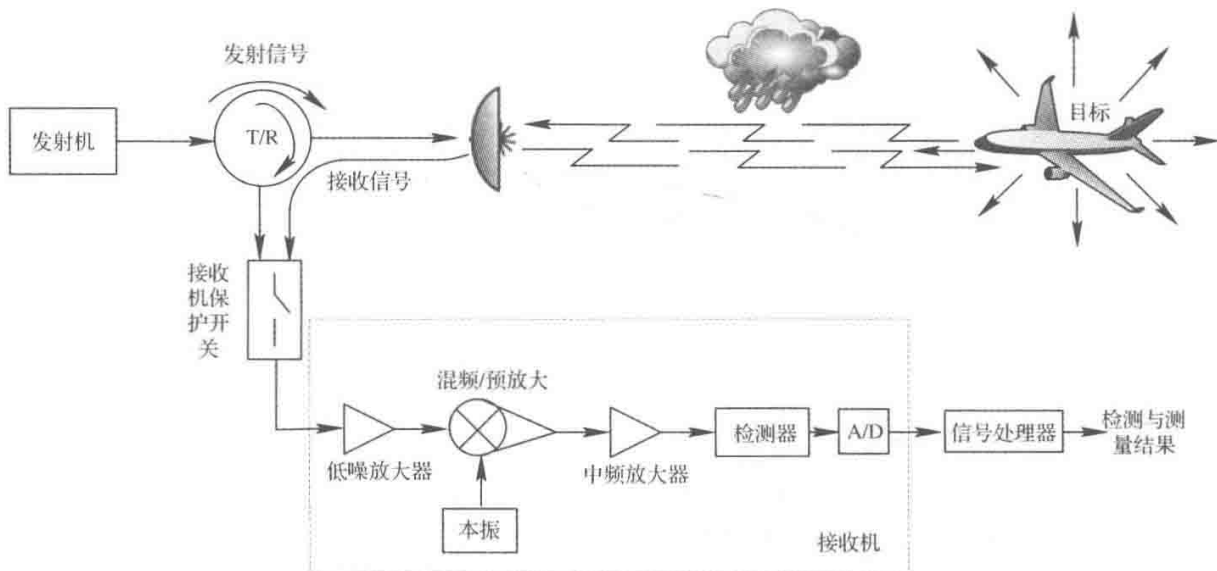


图 1.1 雷达系统的组成要素

如前所述,对探测目标距离信息、速度信息的迫切需求刺激了新体制雷达的产生,这也是二战后雷达系统从相参连续波工作模式向非相参脉冲工作模式转变的根本原因。对目标多普勒频移信息的充分利用可有效估计各类运动参数,有利于将目标回波从相对“静止”的杂波背景中分离出来。经过半个多世纪的发展,脉冲-多普勒工作模式已被现代雷达系统广泛采用。根据不同的应用背景,可将现代雷达系统简要归纳为战术雷达、情报侦察雷达和特殊用途雷达三类^[10]。战术雷达中的典型代表包括连续波雷达^[11],主要应用于导弹导引头系统;毫米波雷达,主要应用于战场火控系统和汽车防碰撞系统;机载脉冲-多普勒雷达^[12, 13];大型复杂相控阵雷达^[14],具备搜索、跟踪和定位等多重功能;弹道导弹拦截雷达等。情报侦察雷达中的典型代表包括地面动目标显示雷达^[15],主要用于检测、监视地面运动目标;星载遥测雷达,主要应用于地球资源勘探、敌方军事设施识别等方面。特殊用途雷达中的典型代表包括

民航交通管制雷达^[16]；气象雷达^[17]；农作物生长态势评估雷达^[18]；穿地雷达^[19]等。除此之外，现代雷达体制还可依据发射端与接收端之间的距离远近划分为单基雷达、双基雷达和多基雷达^[20]；或可根据工作平台之不同划分为地基雷达、舰载雷达、机载雷达和星载雷达^[21, 22]。

早期雷达主要采用机械扫描工作模式，然而随着电磁应用环境的日益复杂和新型雷达对抗技术的不断涌现，该体制雷达所面临的挑战越发严峻。我们知道，雷达波束宽度与天线孔径成反比关系，为了提高目标探测精度，势必要增大天线尺寸；同时，对高速机动目标的有效检测也依赖于较快的天线扫描速度。这些需求增加了机械扫描雷达的工程实现难度，限制了该体制雷达在现代战场环境中的应用范围。自20世纪60年代起发展至今的相控阵雷达^[23]在一定程度上解决了传统机械扫描雷达所面临的技术难题。相控阵雷达一般集成了多个天线单元，各个天线辐射完全相关的电磁波信号，同时通过移相器来自适应调整各发射信号的相位，从而在空间形成多个具有指向性的波束，提高了波束的空间利用率。与机械扫描雷达相比，相控阵雷达所具有的性能优势显而易见，如：①波束指向灵活可控（通过改变各移相器的相位实现），从而无须转动天线本身，缩短了雷达反应时间；②通过对各个发射信号进行相参积累，可有效增加雷达的功率-孔径积；③可在探测空间同时形成相互独立的多个波束，从而提高了雷达系统对多目标的处理能力；通过灵活划分子阵并使各个子阵处于不同的工作模式，可使雷达系统具备跟踪、检测和监视等多种功能；④结合各类自适应信号处理技术，可使相控阵雷达具备较强的干扰抑制能力，从而提高相控阵雷达对复杂场景的适应能力。然而，随着各种反雷达技术的发展，相控阵雷达固有的性能弊端也日益凸显出来。例如：①为了满足日益严苛的性能指标，相控阵雷达的构造愈加复杂，增加了制造成本；②相控阵雷达通常利用大功率-孔径积和高峰值功率来提高对目标的探测能力，增大了雷达信号被截获概率，易于受到各类反辐射武器的攻击；③相控阵雷达的波束扫描范围有限，为了实现全空域覆盖，通常需配置多个天线阵面，不利于系统结构的小型化、机动化。为此，雷达设计者必须寻找新的技术解决途径来应对相控阵雷达所面临的严峻挑战。MIMO雷达就是近年来所提出的新体制雷达中的典型代表。

从本质上来说，MIMO雷达系统可视为传统相控阵雷达系统的自然扩展。这两类雷达体制的主要区别是相控阵雷达的各个发射天线发射完全相干的信号，以便在空间形成具有特定指向的波束；MIMO雷达的各个发射天线发射完全正交的信号，并且通过在各个接收天线处串联一组匹配滤波器来分

离各发射通道。换言之, MIMO 雷达的发射信号能量在空间全向均匀分布, 不形成特定指向, 因而降低了雷达信号的被截获概率, 满足了现代战场环境中对雷达系统的隐蔽化要求。正是由于 MIMO 雷达采用了关键的波形分集技术, 使其具备传统相控阵雷达所不具有的多种性能优势, 如: ①提高雷达系统对隐身目标的探测能力^[24]; ②提高雷达系统对慢速运动目标的检测能力^[25]; ③通过虚拟阵元技术增大阵列孔径, 由此带来系统自由度增加、可检测目标数增多和角分辨率提高等益处^[26]; ④发射方向图可灵活设计^[27]; ⑤改善强杂波背景下雷达系统对微弱目标的检测能力^[28], 等等。

综上所述, MIMO 雷达作为近年来提出的一种全新体制雷达, 以其巨大的性能优势吸引了越来越多科技工作者的关注。由于 MIMO 雷达与传统体制雷达在工作机理上的相似性, 波达方向估计、稳健波束形成和目标成像等传统体制雷达所重点关注的领域, 也成为 MIMO 雷达的主要研究内容。然而, MIMO 雷达所特有的多发多收体制虽然使其便于融合多个通道所获取的信息, 提升雷达整体性能, 却无可避免地增加了系统的复杂度。因而, 雷达性能与系统复杂度这对矛盾关系是制约 MIMO 雷达系统工程化、实用化的瓶颈, 也是 MIMO 雷达研究领域必须着力解决的问题。本书以降低 MIMO 雷达系统的工程实现复杂度为需求牵引, 给出了两类低复杂度 MIMO 雷达系统——即嵌套 MIMO 雷达和互质 MIMO 雷达的阵列结构设计准则, 并针对低复杂度 MIMO 雷达系统和传统 MIMO 雷达系统中的稀疏参数估计、稀疏成像和稳健波束形成器设计等问题开展研究, 以期起到抛砖引玉之效, 为广大 MIMO 雷达研究者提供一些有益的借鉴思想。

1.2 国内外研究历史与发展现状

本节从 MIMO 雷达、阵列自由度扩展、稀疏信号重构和稳健自适应波束形成等方面对本书所涉及的相关雷达技术领域的研究历史与发展现状作一概要介绍。

1.2.1 MIMO 雷达研究历史与发展现状

MIMO 并非是十多年来发展起来的新技术, 其理论构建可追溯至控制系统学科, 意为一个控制系统中存在多个输入变量和多个输出变量。早在 1974 年, Mehra^[29]就指出, 通过优化配置控制系统中的多个输入变量, 可以有效提高整个系统的参数估计性能。之后, MIMO 的思想被通信领域所借鉴。若将移动通信

中的传输信道视作一个系统,则发射码元可认为是该系统的输入信号,接收码元可认为是该系统的输出信号,上述移动通信与控制系统的内在相似性即是 MIMO 理论能够有效应用于通信领域的根本原因。自 20 世纪 90 年代初期起,美国的 Bell 实验室^[30, 31]等先后提出将 MIMO 概念融入无线通信系统中的实用化方案,即在传统无线通信系统中的基站和移动端均配置多个天线。采用此方案的 MIMO 通信系统可获得极高的空间分集增益,从而显著提高移动通信系统在衰落信道环境中的信道容量,尤其对大角度扩展信道(极端情况下角度扩展范围为 2π)的性能改善尤为明显。大量理论分析与实验结果均已证明,MIMO 通信系统的信道容量与收发两端的天线个数成正比关系。

由于雷达回波信号与移动通信信道之间存在某种相似性,学者及工程专家将在移动通信中得到广泛应用的 MIMO 技术延伸至雷达领域,成为一种可行的尝试^[32]。雷达回波信号通常是不同散射方向上的多径信号的叠加,具有与移动通信中角度扩展相似的特性。实际观测数据表明,雷达探测目标具有闪烁特性,目标姿态和观测角的变动将会导致回波信号(即 RCS, 雷达截面积)的严重起伏,变动范围可达 $5\sim 20$ dB。这种回波信号的涨落起伏类似于通信领域中的信道衰落现象,将严重影响雷达的常规探测性能。如图 1.2 所示为雷达回波信号能量随观测角的变化情况,从图中可看出,观测角的微小变化将会导致雷达接收回波能量的剧烈变动(关于此现象的数学解释可参阅 Fishler 于 2006 年发表的文章^[32])。

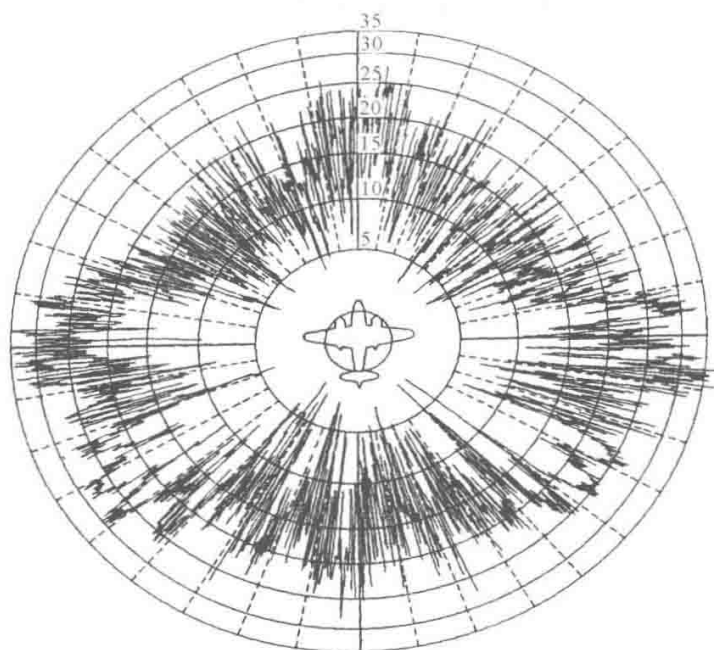


图 1.2 雷达目标回波能量随观测角的变化情况(单位: dB)

如前所述, MIMO 雷达系统与 MIMO 通信系统在原理上的相似性使 MIMO 雷达可充分利用由目标 RCS 闪烁效应所引起的回波去相关特性, 得到近似恒定的接收信号平均能量, 从而提高雷达检测性能和目标空间分辨率。需要指出, 由于应用场景和实现功能不同, MIMO 雷达和 MIMO 通信存在一些本质上的区别。对于 MIMO 通信系统来说, 独立和非独立信息流是通过多个平行子信道同时传输的, 经过如此操作, 可在给定误码率的情形下增加信道容量, 或在给定传输速率的情形下降低误码率。子信道数目依赖于信道矩阵的阶数(此阶数通常由具体信号传输环境所决定)。若信号传输环境中存在丰富的多径散射信号, 则信道矩阵阶数和子信道数目均会相应增加。信道矩阵通常由接收端接收到的训练序列估计得到(训练序列一般先于数据包发射)。然而, MIMO 通信系统仅仅利用信道矩阵从接收数据中恢复发射信息, 并没有充分发掘信道潜在的物理特性。与此相反, MIMO 雷达利用信道矩阵来感知探测环境的物理属性, 以便确定目标的数目、方位和速度。另外, 在 MIMO 雷达系统中, 由于发射信息已知, 因而无需建立依赖于多径环境的多个子信道。换言之, MIMO 雷达系统中的探测目标即相当于 MIMO 通信系统中的信道。举例来说, MIMO 雷达通过联合处理多个观测方向的目标回波信号来获得分集增益, 此分集增益类似于 MIMO 通信系统中信号经过衰落信道传输后所获得的分集增益^[33]。需要强调的是, 在雷达领域中, 目标在给定观测方向可能只有比较弱的散射回波, 然而通过增加观测方向的数目, 目标散射回波强度便会大大增加, Fishler^[34] 等人已在此方面(具体来讲, 即通过利用目标空间分集增益提高探测性能)做了比较深入的研究。

20 世纪 70 年代末, 由法国航天局设计的综合脉冲孔径雷达^[35] (Synthetic Impulse and Aperture Radar, SIAR), 可视作将 MIMO 技术应用于雷达系统的初步尝试。20 世纪 90 年代, 西安电子科技大学也与中国电科集团第 38 所合作研究了 SIAR 雷达的工程实现^[36-38]。SIAR 雷达采用收发分离的多发多收随机稀布阵体制, 且各个发射阵元发射相互正交的窄带波形。SIAR 雷达独特的发射信号形式保证了在接收端分离、处理各路发射信号的可行性。通过脉冲综合体制, SIAR 雷达可获得类似宽带雷达的高距离分辨率特性。不同于传统相控阵雷达, SIAR 雷达的发射信号可有效覆盖全空域, 因此 SIAR 雷达比典型的多基雷达具有更高的相干处理自由度。基于上述优势, SIAR 雷达可有效解决雷达探测隐身目标问题和提高雷达的抗反辐射导弹能力。由于 SIAR 雷达采用了多发多收及正交信号发射体制, 可将其视为 MIMO 雷达的雏形。然而, 从严格意义上说, SIAR 雷达与本书之后提及的 MIMO 雷达

在概念上仍存在一定差异,SIAR 雷达在信号处理过程中利用的是接收信号的全相关特性,而 MIMO 雷达在信号处理过程中利用的是接收信号的非相关或部分相关特性。

20 世纪初,鉴于 MIMO 理论在无线通信与 SIAR 雷达领域所取得的巨大成功,MIMO 雷达的概念应运而生。在 2003 年举办的第 37 届 Asilomar 信号、系统与计算机会议^[39]上,由美国麻省理工学院林肯实验室的 Rabideau 教授和 Parker 教授首次给出了 MIMO 雷达的系统、完整的定义,即利用多天线发射多个正交信号,并利用多天线协同处理反射回波的雷达系统。随后,在 2004 年举办的 IEEE 雷达年会上,由美国新泽西理工学院的 Eran Fisher 博士和 Alexander Haimovich 教授共同提出了分布式 MIMO 雷达^[40](也称为统计 MIMO 雷达)的概念,该体制 MIMO 雷达可充分利用目标的 RCS 闪烁特性以提高雷达探测性能,同时本书也充分分析了将 MIMO 雷达用于测向问题中所带来的性能优势,并推导出评价 MIMO 雷达测向结果的克拉美-罗界(Cramer - Rao Bounds, CRB)。MIMO 雷达作为一种新兴的雷达体制,其带给雷达领域的深刻变革是不容忽视的。美国麻省理工学院林肯实验室的 Bliss 教授和 Forsythe 教授指出^[41],MIMO 雷达比传统的单发体制雷达拥有更多的自由度,这些额外增加的自由度可用来灵活调整时间-能量分配模式^[39],提高方位向分辨率^[42, 43],提高参数可辨识度^[44]。特别地,对于充分利用探测目标空间分集特性的分布式 MIMO 雷达而言,其可有效提高对慢速运动目标的检测能力^[45, 46]。当前国外的加州理工学院、麻省理工学院、佛罗里达大学、乌普萨拉大学、里海大学、杜克大学、新泽西理工大学以及国内的国防科技大学、电子科技大学、清华大学、西安电子科技大学等分别在 MIMO 雷达的发射波形设计、阵列结构优化、空时自适应处理、模糊函数推导和稀疏成像算法设计等方面进行了深入研究^[47-63]。通过对以上所列举文献进行归纳总结,需强调一点,即根据 MIMO 雷达的广义概念,一些业已发展成熟的雷达系统也可包含在 MIMO 雷达的框架内。举例来说,合成孔径雷达(Synthesis Aperture Radar, SAR)可看作 MIMO 雷达的一个特例。尽管 SAR 通常采用单发单收体制,然而通过雷达载体的运动,可等效形成多个虚拟收发阵元,因此可近似将 SAR 归结于 MIMO 雷达范畴。SAR 和标准 MIMO 雷达间的主要区别是 SAR 仅对信道矩阵的对角线元素进行估测,而 MIMO 雷达对信道矩阵的所有元素均进行估测。类似地,我们也可将全极化雷达归类为 MIMO 雷达^[41, 64],只是与传统 MIMO 雷达相比,全极化雷达的尺寸更小。反之,MIMO 雷达也可视作全极化雷达的一种特殊构型。

自 MIMO 雷达概念提出之日起,与其相关的研究方兴未艾,国际上涉及 MIMO 雷达领域的研究成果层出不穷,大大完善了 MIMO 雷达的理论体系,并对 MIMO 雷达进一步的工程化实现夯实基础。当前,国内外学者对 MIMO 雷达的研究主要聚焦于两种体制:一类是以 Alexander Haimovich 为代表所提出的分布式 MIMO 雷达^[65];另一类是以 Jian Li 和 Petre Stoica 为代表所提出的集中式 MIMO 雷达^[66]。分布式 MIMO 雷达的发射(接收)阵列阵元间距较大,每个收-发通道都能够提供独立的目标散射回波信息,此类 MIMO 雷达也可被称作统计 MIMO 雷达。分布式 MIMO 雷达的优势可总结为通过使探测信号从多个不同方向照射目标,获得对目标观测的空间分集增益,从而实现对目标 RCS 的空间解相关处理,使得目标 RCS 平稳输出,克服了复杂电磁环境下由目标 RCS 闪烁所引起的雷达探测性能损失问题。分布式 MIMO 雷达的缺点^[32]是各独立观测通道所获取的目标信息难以采用传统阵列理论中的相干处理手段实现高精度的目标方位估计,此外,复杂的时间/相位同步问题难以解决,由大阵元间距所带来的相位模糊问题也是一个严峻的挑战。集中式 MIMO 雷达(也称作相参 MIMO 雷达)的发射(接收)阵列阵元间距较小,因此远场目标相对于阵列平面可视作点目标。在集中式 MIMO 雷达中,目标相对于各个收-发天线对的 RCS 近似相等,因而此类雷达没有获得目标空间分集增益,仅利用各发射波形的正交性获得高波形分集增益。集中式 MIMO 雷达采用相干信号处理手段,在接收端对各发射正交信号实现匹配滤波分离,有效扩展了阵列孔径,使雷达系统自由度成倍增加。与分布式 MIMO 雷达相比,集中式 MIMO 雷达不要求增大阵元间距来使信道独立,以便充分利用各阵元所接收回波信号之间的相关性。

在上述介绍的两种体制的 MIMO 雷达中,需澄清一点,即如何界定阵元间距以确定给定 MIMO 雷达系统的类别。一般地,对于某具体 MIMO 雷达系统而言,其阵元间距的设定依赖于探测目标物理属性。如图 1.3 所示,若将目标散射体视为具有特定波束指向的相控阵系统,且目标波束每次仅能覆盖一个天线单元,则各收-发通道都能获得相互独立的目标散射回波信息,符合分布式 MIMO 雷达的定义。反之,若目标波束每次均可覆盖多个天线单元,则各收-发通道均可获得较强的相干处理增益,符合集中式 MIMO 雷达的定义。至于实际目标探测场景中,不同类型 MIMO 雷达系统阵元间距的具体计算过程,可参阅 Eran Fishler 于 2006 年发表的文章^[32]。

由于本书的阐述重点侧重于集中式 MIMO 雷达,因此下面将对集中式 MIMO 雷达中非常重要的“虚拟阵列”概念展开简要介绍。假设集中式