

# 一种新兴的雷达体制——MIMO 雷达

陈浩文, 黎 湘, 庄钊文

(国防科学技术大学电子科学与工程学院空间所, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)雷达作为一种新型雷达体制在 21 世纪初正式提出后,引起了国内外众多学者和研究机构的浓厚兴趣.本文从现有的研究成果出发,首先对 MIMO 雷达基本理论进行了概要性总结;而后从 MIMO 雷达系统结构、信号设计、目标检测、参数估计以及高分辨性能五方面探究其潜能本质,同时指出 MIMO 雷达走向实用化所面临的制约因素;最后在综合分析的基础上展望了 MIMO 雷达的发展趋势.

**关键词:** MIMO 雷达; 分集技术; 波形设计; 目标检测; 参数估计; 高分辨性能

**中图分类号:** TN958      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 06-1190-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.021

## A Rising Radar System—MIMO Radar

CHEN Hao-wen, LI Xiang, ZHUANG Zhao-wen

(*Research Institute of Space Electronics Information Technology in School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China*)

**Abstract:** Multiple-input multiple-output (MIMO) radar as a new radar system is proposed at the beginning of 21st century, which has been attracting much attention of researchers and institutions all over the world. In this paper, MIMO radar theory is summarized based on the current literature firstly. Then, the potential capabilities of system configuration, signal design, target detection, parameter estimation and high resolution performance are introduced. At the same time, the restricting factors in practical application are pointed out. Finally, some further work and the technical difficulties in MIMO radar are predicted.

**Key words:** multiple-input multiple-output radar; diversity techniques; waveform design; target detection; parameter estimation; high resolution

## 1 引言

雷达(radar)的发展自 1904 年 Christian Hulsmeyer 研制出原始的船用防撞雷达以来已有一百多年的历史,而真正的现代雷达是最近 50 年才发展起来的.今天它已经发展成为一项非常广泛而实用的技术.雷达理论和雷达应用的发展相辅相成,互相促进.由于受到软硬件水平的限制,雷达理论研究通常领先于雷达系统的应用,MIMO 雷达也不例外.现阶段对 MIMO 雷达的研究主要处于理论研究阶段,但众多的国内外研究者被其潜力所吸引,并对其广泛实用化充满信心和期待.

MIMO 雷达<sup>[1-3]</sup>是在 MIMO 理论、空时编码理论应用于通信系统并取得了重大突破的启示下被提出的.一经提出立即引起了全世界范围内有关学者和研究机构的高度关注.近年来,在国际会议和期刊上涌现出大量

研究成果,对 MIMO 雷达的前景进行了探讨,拥有众多坚定支持者同时也不乏激烈的质疑声.从辩证观点看来,MIMO 雷达的研究与发展过程无不体现了螺旋式上升的结果:一方面是其特有潜力的开发和应用,一方面是其工程上实现的难度.但应看到任何新兴事物发展都是在支持和反对者之间思想上强烈碰撞后才最终开出的艳丽花朵.

本文旨在分析国内外“MIMO 雷达研究热”现状,试图为相关研究者提供较为全面而基础性的理解和认识.以分析 MIMO 雷达的潜力出发,对现有研究成果进行归类总结,从系统结构、信号设计、目标检测、参数估计以及高分辨性能五个方面进行阐述,初步凝练出 MIMO 雷达的基本特征、概念以及研究方向;同时也指出了其在工程实现上的难点问题;最后,在综合分析现有研究成果的基础上提炼出有待进一步研究的科学问题.

## 2 MIMO 雷达理论概述

### 2.1 MIMO 雷达概念

早在 1974 年 Mehra 就将多输入多输出的概念应用于控制系统中来增强参数估计的性能<sup>[4]</sup>.而后在 20 世纪 90 年代早期 MIMO 思想进入通信系统领域<sup>[5]</sup>,并获得了飞速发展和广泛的应用.鉴于 MIMO 理论在通信领域的巨大成功,MIMO 雷达理论也由 E. Fishler 等人借鉴 MIMO 通信理论正式提出并得到迅速发展<sup>[1]</sup>.

MIMO 雷达是利用多个发射天线同步地发射分集的波形,同时使用多个接收天线接收回波信号,并集中处理的一种新型雷达体制<sup>[6,7]</sup>.在克服信道衰落、提高分辨率和抑制干扰等方面具有巨大的潜力.将 MIMO 理论应用于雷达系统,能显著提高系统的目标检测、跟踪、识别和参数估计等性能.分集增益是 MIMO 雷达具有这些潜能的根源:传统单基地雷达对目标的探测所获得信息较为单一,而 MIMO 雷达能获得多维目标信息,通过多维信息的联合处理可以获得目标更多、更本质的特征.MIMO 雷达为空间分集、波形分集、结构分集和极化分集等分集技术的使用提供了平台.同时不难看出 MIMO 雷达在性能上的优势通常以增加系统复杂性为代价,如何处理好性能与复杂性之间的关系是系统设计的难点.

下面将简要对 MIMO 雷达、多站雷达和相控阵雷达进行比较.广义上而言,MIMO 雷达包含了所有不同的

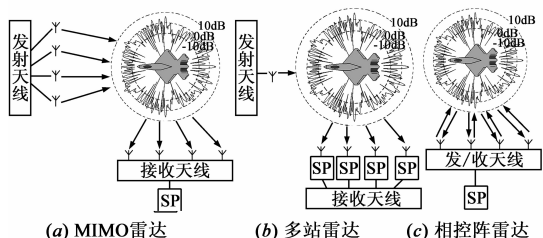


图1 MIMO雷达、多站雷达和相控阵雷达示意图(其中SP表示信号处理单元)

统计型 MIMO 雷达收发天线位置相距较“远”,各天线相对于目标的视线角是有明显差异的,因而具有良好的空间分集增益、结构增益和极化分集增益,当然同样可以获得波形分集增益.该类型的 MIMO 雷达优势在于克服目标 RCS(Radar Cross Section)在空间上的起伏特性提高目标的检测性能<sup>[10,11]</sup>和参数估计能力.主要的统计型 MIMO 实验系统研究机构有:澳大利亚国防科学技术组织(DSTO)ISR 分部<sup>[13]</sup>和英国伦敦大学学院(UCL)<sup>[12]</sup>等.其中澳大利亚的统计型 MIMO 雷达系统并非是为研究 MIMO 雷达而建造的,而是在其原有 OTHR(Over-The-Horizon Radar)基础上进行了改进以达到实验要求,其发射阵如图 3 所示;UCL 在 Netted Radar 的研究

雷达体制,为便于区别于传统雷达,学术界一般认为:

(1)MIMO 雷达是利用多个发射天线同步地发射分集的波形,同时使用多个接收天线接收回波信号,并集中处理的工作模式,如图 1(a);

(2)多站雷达是使用两个或两个以上的接收天线和一个发射天线进行工作的雷达系统,如图 1(b),且各接收天线信号独立处理;

(3)相控阵天线有一个由大量相同辐射单元组成的孔径,每个单元在相位和幅度上是独立控制的,但不同天线发射单元发射相同的信号形式,如图 1(c).

### 2.2 MIMO 雷达分类

MIMO 雷达依据不同的分类标准可分成不同的类型.在此着重探讨目前学术界广泛采用的分类方式:根据天线的配置方式来划分 MIMO 雷达的类型.

根据各天线间距的“远近”<sup>[8]</sup>分为统计型 MIMO 雷达(statistic MIMO radar 或 separated MIMO radar)<sup>[7]</sup>和相参型 MIMO 雷达(coherent MIMO radar 或 colocated MIMO radar)<sup>[6]</sup>两大类,分别如图 2(a)和图 2(b)所示.简言之,当目标相对于各天线的视线角可近似相等时为相参型 MIMO 雷达,反之目标相对于各天线的视线角明显不同时则为统计型 MIMO 雷达.易知,统计型和相参型 MIMO 雷达是两个极端情形,介于二者之间称为混合型 MIMO 雷达(hybrid MIMO radar),如相控阵 MIMO 雷达(phased-MIMO radar)<sup>[9]</sup>,如图 2(c)所示.

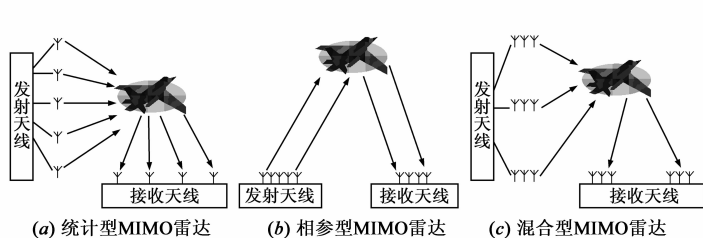


图2 MIMO雷达几何拓扑结构与分类示意图

基础上,改进原有设备用于统计 MIMO 雷达实验.

相参型 MIMO 雷达收发天线位置相距较“近”.各天线相对于目标的视线角近似相等,因而通常可以认为目标的 RCS 在不同收发天线对间是近似相等的,由于系统各天线发射信号的不同而获得良好的波形分集增益<sup>[6]</sup>.波形分集增益可获得:系统参数识别能力的增强,自适应技术的直接运用以及发射方向图的灵活



图3 统计型MIMO雷达范例:澳大利亚OTHR发射阵列

设计等方面的优势.国内外拥有相参型 MIMO 实验系统的研究机构包括:MIT 林肯实验室和我国的西安电子科技大学<sup>[14]</sup>等.其中 MIT 林肯实验室 K.W. Forsythe 等研究者设计的相参型 MIMO 雷达的实验系统主要用于分析角分辨能力较之传统阵列的优势性能,如图 4(a)所示;西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室研制出了一种多输入多输出新型对空监视雷达——稀疏阵列综合脉冲孔径雷达(SIAR),该系统通过各个发射阵元全向发射正交编码频率信号以使得各向同性照射,在接收端通过数字波束形成(DBF)实现发射脉冲的综合,提高目标跟踪精度,如图 4(b)所示.

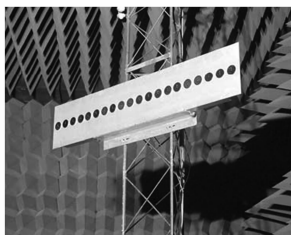
实际应用过程中将根据任务需求采用不同的 MIMO 雷达类型.总的说来,统计型 MIMO 雷达作为一个分布式系统,存在时间、空间、相位的三大同步问题,在工程实现上较之相参型难于实现.本文旨在探讨 MIMO 雷达的优势和发展趋势,因而没有完全分开来阐述统计型、相参型等类型各自性能,但力求让读者明了各自优势性能的本质.

### 3 MIMO 雷达现有的研究热点问题

MIMO 雷达开辟了一个雷达系统设计和信号处理的新领域.研究表明,与传统的相控阵雷达相比,MIMO 雷达在目标检测、参数估计、分辨能力以及干扰抑制等方面有潜在的优势<sup>[15]</sup>.本节试图对 MIMO 雷达研究热点问题进行全面而透彻的分析.MIMO 雷达作为一新兴的雷达体制,其研究不仅需要面对传统雷达中所涉及的问题,还需要解决自身固有的难题.本节将从 MIMO 雷达系统分析、信号设计、目标检测、参数估计以及高分辨性能五方面进行阐述.

#### 3.1 系统分析

从 MIMO 雷达提出至今,众多的支持者试图挖掘其潜在的优势,也有部分学者对 MIMO 雷达的前景表示怀疑,其中以雷声公司的 Fred Daum 反对最为激烈<sup>[16]</sup>.他从雷达工程学的角度出发说明 MIMO 雷达的劣势,甚至指出现有 MIMO 雷达相关文献 95% 是骗人的万灵油(snake oil).笔者认为从本质上来说:MIMO 雷达增加了传感器数目,因而增加了感兴趣目标样本信息,有利于更全面地刻画事物的本质,但是信息量的增加是以系统相对复杂为代价,能否很好处理系统的性能与复杂度的关系将很大程度决定了 MIMO 雷达的发展前景.同时可以看到多传感器信息融合是信息领域的研究热点亦是发展必然趋势,因而 MIMO 雷达将是突破现有雷达



L波段阵列



X波段阵列



(b) SIAR系统(西安电子科技大学)

(a) K.W.Forsythe教授设计的单站MIMO雷达的实验系统

图4 相参型MIMO雷达范例

体制瓶颈的希望之所在.

在此着重阐述 MIMO 雷达系统结构带来的“分集”增益(diversity gain),这也是 MIMO 雷达优势性能的体现.MIMO 雷达具有波形分集、空间分集、以及极化分集等分集优势:

MIMO 雷达波形分集<sup>[6]</sup>是通过多发射天线同步发射不同的波形,在接收端使用多接收天线接收所有发射信号的回波.然而必须注意到波形分集带来的性能提高很大程度依赖于优良的发射信号集,因而波形集设计问题是当前研究的热点之一.

空间分集<sup>[7]</sup>是 MIMO 雷达所具有潜力的又一本质性体现,空间分集也即所谓的几何分集<sup>[17]</sup>.一般来说 RCS 敏感于雷达视线角,而目标的检测性能很大程度上决定于目标反射回波能力,统计型 MIMO 雷达为对抗目标 RCS 的闪烁提供了解决途径:不同视线角观测到的回波能量叠加等价于照射具有不同视线角 RCS 平均值的目标,因而克服了由于目标 RCS 闪烁引起的漏警而获得稳定而良好的检测性能.由于隐身目标通常无法做到全方位的隐身,因而统计型 MIMO 也为隐身目标的有效探测提供了解决办法.

频率分集是解速度模糊和检测低空飞行目标的有效途径<sup>[18~20]</sup>.频率分集雷达通常需要具备多个相互独立的收发通道,而 MIMO 雷达系统结构使其在采用频率分集上有着天然的优势.

极化分集是发射天线发射相对不同的极化波形,文献[21]表明采用优化极化设计的发射波形对比于所有天线发射相同极化形式的 MIMO 雷达系统在目标检测和识别上有明显的优势.

#### 3.2 信号设计

与传统雷达系统一样,MIMO 雷达系统性能很大程度取决于所采用的信号形式.众所周知,不存在一种“万能”的信号形式满足所有的应用场景,因而通常需要根据系统所需完成的任务需求设计不同的信号形式.MIMO 雷达信号设计由于其特有的系统结构和信号处理方式,因而所需信号形式也有其特点.为便于接收端通过滤波器组得到各通道的回波数据,MIMO 雷达通

常选择正交波形集,因而现有的相关文献较多的以设计具有正交特性的信号集为目标<sup>[22]</sup>;同时必须认识到 MIMO 雷达系统本身并不要求一定发射彼此正交的信号集而且不存在完全正交的信号集,也有学者对满足一定相关特性的信号集展开了研究<sup>[23]</sup>。

类似于传统波形设计, MIMO 雷达的波形优化设计也可分为四个基本步骤:一是确定优化准则,二是设计代价函数,三是采用优化方法得出满足优化准则的波形,最后对波形设计结果进行评价。其中优化准则是波形设计的前提,当前针对 MIMO 雷达的波形优化设计主要有如下准则:一种是以模糊函数为准则,基于各种先验信息,利用遗传算法和循环算法等优化方法设计波形,使其协方差矩阵达到或接近期望的最优协方差矩阵,获得低的自相关和互相关旁瓣、高的距离-速度多普勒模糊分辨率;另一种是以发射功率为约束,分别利用信息论中互信息和统计理论来设计波形;最后是以最大信杂噪比为准则,基于观测场景和目标特性,结合杂波抑制和抗干扰性能分析,设计最优信号,以便最大程度的抑制杂波干扰,提高目标检测的性能。具体说明如下:

#### (1) 以模糊函数为准则的波形设计

针对 MIMO 雷达系统, G. S. Antonio<sup>[24]</sup>等推广了传统模糊函数,该模糊函数包含了雷达接收信号的全部信息:天线结构信息、目标距离、速度参数以及目标和环境散射的统计特性;并推导了不同信号集的模糊函数形式,进一步分析了其在信号设计中的应用。Chun-Yang Chen 基于 MIMO 雷达模糊函数利用跳频正交信号对波形进行优化<sup>[22]</sup>。值得注意的是这些研究均是在信号形式确定情况下的参数优化,优化性能会受到限制。

#### (2) 以信息论和统计理论为准则的波形设计

P. Woodward 和 Davies 将信息论用于雷达系统设计已有近 60 年历史<sup>[25]</sup>,而将信息论用于雷达波形设计是在最近 20 年内才发生的事情<sup>[26]</sup>。Yang Yang 在文献[27]中着重探讨了 MIMO 雷达在目标识别与分类中的波形设计问题,提出了两种不同准则:一种是在信息论准则下随机目标响应与接收信号间互信息(MI)最大准则;一种是统计意义下随机目标响应的均方误差(MSE)最小准则,分析表明这两种准则在发射功率一致的限定条件下两者是等价的。Yang Yang 在文献[28]中进一步提出了以上述准则为目标具有良好鲁棒性的最小最大(minimax)波形设计方法。针对上述准则的目标函数求解通常是比较复杂的特点,文献[29]提供了一种基于交互投影(alternating projection)的最优迭代算法用来求解目标函数。通常来说,雷达以探测,跟踪,识别感兴趣目标为目的,这些功能的获得都需要信息的支撑,信息的多少和优选对实现这些功能具有决定性作用;更进一

步考虑对于非合作目标的信息的获取由于先验信息的有限,统计理论的方法用于分析研究 MIMO 雷达信号设计值得肯定,因为目标检测和参数估计通常都是统计意义下的结果。

#### (3) 以最大信杂噪比为准则的波形设计

信杂噪比是雷达目标检测等性能的重要指标。文献[30]提出以最大化 MIMO 雷达信杂噪比为目标,联合考虑发射波形和接收滤波的迭代算法,该算法能很好的解决最佳发射波形和匹配滤波问题,其结果是全局最优解。文献[31]把杂波和噪声推广到与发射信号具有一定的相关特性,联合(2)中提到的最大 MI 和最小 MMSE 准则,以最大化信杂噪比得到最佳的波形。

在 MIMO 雷达波形设计中需要针对不同的实际应用场景需求选择合适的信号类型,或者取长补短,对波形进行综合优化设计,这同样也是感知雷达思想。

### 3.3 目标检测

在雷达系统应用中,检测是指确定雷达测量值到底是目标回波,还是仅为干扰项,是精确的距离、角度或多普勒测量的前提。MIMO 雷达开发其分集增益能很好地利用目标 RCS 的“闪烁”<sup>[9]</sup>、多径效应,“变废为宝”的来提高目标检测性能<sup>[32]</sup>。

现有关于 MIMO 雷达检测的大多文献聚焦于空间分集增益带来检测性能提高上。目标检测,关键问题之一在于最大化信噪比的获得:一般说来,对于一个发射功率一定的 MIMO 雷达系统而言,信噪比的最大化取决于 MIMO 雷达几何结构、回波信号的处理方式等方面的因素。在此, MIMO 雷达几何结构是指天线数目的确定和布站方式,针对该问题的研究尚显不足,还有待于进一步深入展开。回波信号的处理方式通常分为单脉冲还是多脉冲积累检测,多脉冲积累检测又分为相干积累处理与非相干积累处理。文献[10]中,对比了在发射功率相同情况下单脉冲处理模式 MIMO 雷达、MISO (Multi-Input Single-Output) 雷达以及相控阵雷达三种雷达体制的目标检测性能,分析得到在检测性能达到 80% 以上水平时, MIMO 雷达利用空间分集增益在相同信噪比条件下得到最好检测性能。文献[33]通过比较四种目标统计模型假设下的多脉冲相干积累处理 MIMO 雷达、多脉冲非相干积累处理网络雷达以及多脉冲相干积累处理网络雷达的检测性能,得出:多脉冲相干处理网络雷达具有最好的检测性能; MIMO 雷达次之且与前者性能相差无几,而在处理上更简便;多脉冲非相干处理网络雷达性能最差且与前两者的性能相差甚远。相干积累的信号处理方式与非相干积累处理方式相比,因为相干积累引入相位信息而使得处理更复杂,但在回波信号相关性较强的情形下能得到更好的检测性能。

对于近地目标检测而言,多径散射效应对目标回波的影响通常不可忽视.文献[34]对多径散射场景下 MIMO 雷达的检测问题进行了探讨,提出了时间反转 TR (Time Reversal) 的信号处理方式,系统的检测性能得到了明显的提高.本质上而言,多径效应的利用也是空间分集应用的一种表现形式.

目标检测问题中,检测器的设计与分析是获得良好检测性能的必要保证.与传统雷达检测类似,假设检验中概率密度函数 PDF (Probability Density Function) 完全已知时,给定虚警概率,使检测概率最大的检测器是由 NP (Neyman-Pearson) 定理得到的似然比检验,且为最佳接收机;当 PDF 不能完全已知时,通常需要采用最大似然估计 MLE (Maximum Likelihood Estimation) 对其未知参数估计后采用广义似然比检验 GLRT (Generalized Likelihood Ratio Test) 来设计检测器.

检测性能分析是 MIMO 雷达理论提出初期重点关注的问题<sup>[9]</sup>.现有大部分检测方面的文献主要探讨利用空间分集增益来提高检测性能:文献[35]指出 MIMO 雷达的分集增益系数小于等于散射点数目和收发天线数目积的最小值;而文献[36]引入信息论中的相关熵来分析 MIMO 雷达的检测性能.但必须注意到分集技术中不仅仅空间分集技术能提高目标的检测性能,包括极化分集在内的分集技术也能提高检测性能.

### 3.4 参数估计

与传统雷达一样,MIMO 雷达目标参数主要有:目标的方位、速度以及距离等.有效自由度通过分集增益获得增加是 MIMO 雷达参数估计潜力本质原因.下面将从目标的方位、距离以及速度三方面的估计分别做出说明:

目标方位是 MIMO 雷达目标定位的重要参数之一.与传统的单站雷达不同,MIMO 雷达尤其是统计型 MIMO 雷达所需估计的方位角是多组离开角 DOD (Direction-Of-Departure) 和到达角度 DOA (Direction-Of-Arrival).因而较之传统雷达,统计型 MIMO 雷达中目标的方位估计更为复杂.文献[37]等以多散射点组成的单目标 DOA 估计为研究对象;其中文献[38]在单基地 MIMO 雷达体制下将发射天线、接收天线的相位延迟同时补偿,在接收端对发射波束进行二维方向综合,提高了雷达的角分辨力和测角精度;文献[39]等在双基地 MIMO 雷达体制下采用高分辨的 ESPRIT (Estimation of Signal Parameters by Rotational Invariance Techniques) 方法对 DOA 和 DOD 进行了联合估计,得到了 DOA 和 DOD 估计的闭合形式并且具有自动配对的优良特性.文献[40]以多目标的 DOA 估计为研究对象,指出 MIMO 雷达系统的最大参数估计数目取决于其不相关信道的数目.并根据 MIMO 雷达所获得数据量的急剧增加的特点提出了一

种有效快速的三次迭代最小二乘 TI-LS (Tri-Iterative Least-Square) 的多目标 DOA 估计方法,实验证明该方法在估计精度和计算的复杂性方面优于以特征分解为基础的 ESPRIT 算法,性能接近于 CRB (Cramer-Rao Bound).

目标定位的另一参数为目标距离.现有的文献单独对 MIMO 雷达目标距离估计的研究较少,由于需要获得更好的角度估计、速度估计以及检测性能,通常与距离估计联合考虑.文献[41]中采用最大后验概率准则对信号的时延进行估计与目标检测联合考虑,实验表明 MIMO 雷达与传统雷达相比在扩展目标的检测性能上有明显优势.文献[39]在距离估计方面同样也是与 DOA 估计进行联合考虑的.

MIMO 雷达参数估计另一重要参数是目标速度,即通常所说的测速.以目标与雷达之间相对运动产生的多普勒信息作为研究对象.文献[17]对统计型 MIMO 雷达的速度估计性能做了详细的研究,推导得到速度估计的 CRB 并且以此为基础对 MIMO 雷达天线结构的优化问题展开了研究,给出了以不同方位角不同反射的扩展目标的一般结果,并分析了各向同性的简单情况.进一步分析了当给定发射信号功率时,最小速度估计误差在 CRB 意义下的最优天线布置,以及在所有天线到目标的距离近似相等的假设下,均匀对称布置天线是最佳方式.

参数估计实际是一个谱分析的过程,因而谱分析方法的选用对目标参数估计起至关重要的作用.谱分析方法分成两大类:参数化方法和非参数化方法.这两大类方法的选取根据具体的场景而定,但有一点是肯定的:当获得较多的先验信息,如数据统计特性信息可用时,用参数化方法进行参数估计性能通常优于非参数化方法;反之若只能得到有限的先验信息时,一般采用非参数化方法更有效.现有的 MIMO 雷达参数估计研究中这两大类的谱分析方法均有采用,比如:参数化的 ESPRIT 方法和最小二乘法 (LS),非参数化的 Capon 和 APES (Amplitude and Phase Estimation) 法等.

由于 MIMO 雷达利用了分集增益,目标参数估计的性能通常较之传统雷达更加稳定.参数估计性能通常以 CRB 来评判:文献[42]中假定相位误差为随机变量,推导其对目标定位性能的影响的 CRB,通过数值分析得出当信噪比足够高时,相位误差对定位性能的影响是一个相对小量;文献[43]探讨了相参 MIMO 雷达目标位置估计精度问题,推导其 CRB 的表达式得到估计精度依赖于载波波长,而与带宽无关,并进一步引入 GPS (Global Position System) 性能分析工具 GDOP (Geometric Dilution Of Precision) 来分析具有高分辨的区域,这一功能也有助于天线几何分析;文献[44]探讨 DF (Direction Finding)-MIMO 利用目标 RCS 起伏特性来提高目标参数

估计和识别能力,推导得出其 CRB、average CRB 和 outage CRB 用于估计性能分析;文献[45]中推导了 MIMO 雷达中参数估计的 Barankin 限,并指出在 MIMO 体制下发射正交信号所得到的检测门限低于发射相干信号的门限.

### 3.5 高分辨

对 MIMO 雷达高分辨性能的研究,现有文献主要从距离-多普勒二维高分辨性能进行考虑,同时也有少量文献考察了 MIMO 雷达的三维高分辨潜力:

MIMO 雷达系统由于自由度的增加较之相控阵雷达在角分辨和多普勒分辨等性能上具有明显优势.实现目标的二维成像通常需要获得雷达相对于目标的大转角空间采样,从雷达天线阵列的角度上来考虑,等效于一个大的阵列天线来增加天线孔径以提高横向分辨率.MIMO 雷达能够从不同角度发射相互正交的信号来对目标进行照射,理论上这种分布式雷达系统中的每一部雷达都可以接受其他多个雷达单元的发射信号,从而构成多路处理通道,最终对多通道信号进行综合处理.当 MIMO 雷达发射宽带信号,利用这些具有角分辨的多通道数据,一次“快拍”即可以对目标进行成像处理.归根结底 MIMO 雷达高分辨性能的获得是其自由度的增加而带来的分集增益.与传统单站雷达相比,MIMO 雷达成像扩大了探测范围,降低了时间积累带来的相位补偿难度.传统雷达成像中,距离-多普勒图像敏感于目标的运动,时变的多普勒信息会产生图像的扭曲,因而目标复杂运动形式的补偿成为了获得高分辨图像的瓶颈.从理论上讲,这种基于实孔径的成像技术可以避免 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)成像中的运动补偿,为解决复杂运动目标成像提供了可行的办法.文献[46]对联合 ISAR 处理技术和 MIMO 体制的稀疏阵列高分辨性能做了分析,指出传统的稀疏阵列因其孔径增加提高分辨率的同时会由于旁瓣能量泄漏影响成像质量,文中提出的稀疏 MIMO 阵列能很好的将能量控制在限定的角度范围之内,因而能得到高质量的目标二维像.文献[47]将得到广泛运用的迭代自适应 IAA(Iterative Adaptive Algorithm)-APES 算法应用于 MIMO 雷达成像,较之工具变量 IV(Instrumental Variables)滤波器的成像方法有明显的高分辨和低旁瓣性能优势.MIMO 雷达高分辨性能以高分辨信号为基础,因此文献[48]对具有高分辨性能的信号进行了研究:通过循环最佳 CO(Cyclic Optimization)算法得到具有很好的自相关和互相关特性的常模 CM(Constant-Modulus)发射信号集;文献[22]分析了 MIMO 雷达的模糊函数的性质,并通过模拟退火算法得到以模糊函数  $p$ -范数最小为准则的调频编码信号集,研究表明该信号集具有比 LFM(Linear Frequency Modulated)更佳的角度与距离分辨能

力.

通常来说,获得目标高维有效信息有利于雷达系统实现其探测识别功能,因此对 MIMO 雷达成像而言也不仅仅满足利用其二维高分辨,研究者也试图开发其三维高分辨的潜力.通过采用多部接收机的干涉 ISAR 已经获得了目标三维成像的成功,其原理在于利用多幅距离-多普勒二维 ISAR 像的几何结构相关性来提取目标的第三维信息得到的.传统雷达成像时运动补偿成为了获得高分辨图像的瓶颈在三维成像中仍然存在.对此文献[49]提出了两垂直线阵的宽带 MIMO 雷达用于三维成像,此雷达系统在一次“快照”中就能获得观测区域的三维采样信息,因而 ISAR 中运动补偿的难题将不会再面对,但是该系统中正交波形的设计是制约成像质量的重要因素.同时应该看到,在 MIMO 雷达系统中,目标的电磁散射特性表现为双站特性<sup>[50]</sup>,以及由于系统存在的几何位置误差,不同处理通道之间的相位非相参误差等,相比于单基地 ISAR 成像,MIMO 雷达成像处理有其复杂之处.

## 4 讨论与展望

纵观上述对 MIMO 雷达各领域的研究与进展,并分析了其潜力与面临的挑战,令人欢欣鼓舞的同时也必须头脑清醒.一方面随着对 MIMO 雷达的不断研究深入,各种新思想、新技术层出不穷,相关理论、技术、系统的研究方兴未艾,某些先驱性的应用已开始出现;另一方面对 MIMO 雷达系统之本质认识尚不够深入和全面,加之实用化面临众多工程上的难题,使得各项研究常局限于特定的问题或领域,技术成果亦难以推广,在整体上这些研究还难以应用到系统实际研制中.我们乐观的认为这种状况说明新兴的 MIMO 雷达体制正在孕育之中,其最终的成功还需进一步的努力.MIMO 雷达研究问题涵盖了传统雷达的方方面面,并且出现了诸多新的难点问题,随着研究的不断深入,预计将在以下方面取得有价值的研究成果:

(1) MIMO 雷达天线几何结构设计.对于具有多天线的 MIMO 雷达系统其天线几何结构对系统性能的影响不言而喻.如测角的 MIMO 雷达系统,天线的几何结构关系到测角精度、检测与分辨能力.且采用的天线的数目如何来确定也是天线几何设计的另一个需要解决的问题.对该问题的研究必须以系统需求为背景,建立天线几何与性能间的数学模型,运用优化方法来求解.信息几何、凸优化等理论将在该问题上大有用武之地.

(2) 先进信号处理工具在 MIMO 雷达中应用. MIMO 雷达作为一个多传感器的复杂系统,对信号处理工具的要求变得相对苛刻,诸如压缩采样 CS(Compressive

Sampling), 空时自适应处理 STAP (Space-Time Adaptive Processing) 等先进的信号处理工具将在 MIMO 雷达信号处理中发挥重要的作用。

(3) MIMO 雷达系统波形集设计. MIMO 雷达为波形分集提供了一个良好的应用平台; 同样可以认为 MIMO 雷达为感知雷达的实现提供了广阔的舞台. 为便于接收端信号处理, 现有的 MIMO 雷达通常采用正交信号, 而理想的正交信号不易实现. 现阶段主要使用正交编码信号, 而编码信号的获得需要通过计算量巨大的优化算法, 加之编码信号具有“固定长度”的限制, 给其广泛使用带来了制约. 基于混沌系统的“准正交”信号形式为解决上述难题供了一条很好的出路<sup>[51]</sup>. 值得指出的是不是所有场合都必须使用正交信号。

(4) MIMO 雷达成像技术. 基于实孔径的 MIMO 雷达成像技术可以避免 ISAR 成像中的复杂三维姿态变化带来的难以解决的相位补偿. 但实际应用中由于收发单元的数目有限、空间分布并不均匀, 难以实现波数域中的均匀采样观测, 且真实孔径长度有限也决定了成像分辨率不可能很高, 为此必须针对收发单元分布的具体特点研究相应的成像算法。

(5) 以传感器网络理论为基础的 MIMO 雷达传感器管理<sup>[52]</sup>. MIMO 雷达实质上也是一个传感器网络, 利用传感器网络已有的传感器管理、系统配置以及信息融合等研究成果对 MIMO 雷达进行研究将大大缩短其实用化进程。

(6) MIMO 雷达实用化系统研究. 尽管 MIMO 雷达系统的实用化面临诸多挑战, 并不妨碍研究者对特定背景下对其潜力的追求. 举例如机载、星载 MIMO-SAR (Synthetic Aperture Radar) 拥有高分辨率宽测绘带 SAR 成像、地面慢动目标检测、目标分类与识别等优势, 因此, 在正交信号发射与接收、宽带数字波束形成、长 CPI (Coherent Processing Interval) 空时自适应处理、模糊抑制等关键技术问题上就具有很大的理论探索空间。

## 参考文献

- [1] E Fishler, A Haimovich, R Blum, et al. MIMO radar: An idea whose time has come [A]. Proceedings of IEEE Radar Conference [C]. Philadelphia: IEEE Press, 2004. 71 – 78.
- [2] J Li, P Stoica. MIMO Radar Signal Processing [M]. New York: Wiley, 2009. 1 – 10.
- [3] 何子述, 韩春林, 刘波. MIMO 雷达概念及其技术特点分析 [J]. 电子学报, 2005, 33(12A): 2441 – 2447.  
He Zishu, Han Chunlin, Liu Bo. MIMO radar and its technical characteristic analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12A): 2441 – 2447. (in Chinese)
- [4] R K Mehra. Optimal input signals for parameter estimation in dynamic systems—survey and new results [J]. IEEE Trans Automat Control, 1974, 19(6): 753 – 768.
- [5] A B Gershman, N D Sidiropoulos. Space-Time Processing for MIMO Communications [M]. London: John Wiley & Sons Ltd, 2005. 1 – 40.
- [6] J Li, P Stoica. MIMO radar with colocated antennas [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5): 106 – 114.
- [7] A Haimovich, R Blum, L Cimini. MIMO radar with widely separated antennas [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(1): 116 – 129.
- [8] H W Chen, Y X Liu, Z C Yang, et al. Correlation characteristics of channels in MIMO radar [J]. Journal of Electronics, 2011(1): 175 – 178.
- [9] A Hassanien, S A Vorobyov. Phased-MIMO radar: A tradeoff between phased-array and MIMO radars [J]. IEEE Trans Signal Process, 2010, 58(6): 3137 – 3151.
- [10] E Fishler, A M Haimovich, R Blum, et al. Spatial diversity in radars—models and detection performance [J]. IEEE Trans Signal Processing, 2006, 54(3): 823 – 838.
- [11] 关键, 黄勇. MIMO 雷达多目标检测前跟踪算法研究 [J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1449 – 1453.  
Guan Jian, Huang Yong. Track-before-detect algorithm in a MIMO radar multi-target environment [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1449 – 1453. (in Chinese)
- [12] G J Frazer, Y I Abramovich, B A Johnson. Use of adaptive non-causal transmit beamforming in OTHR: Experimental results [A]. Proc Int Conf Radar [C]. Adelaide, Australia: IEEE Press, 2008. 311 – 316.
- [13] P Sammartino, C J Baker, M Rangaswamy. MIMO radar theory and experiments [A]. IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing [C]. U K: IEEE Press, 2007. 101 – 104.
- [14] D F Chen, B X Chen, Sh H Zhang. Multiple-input multiple-output radar and sparse array synthetic impulse and aperture radar [A]. Proc Radar Conf [C]. Shanghai: IEEE Press, 2006. 1 – 4.
- [15] J Li, R S Blum, P Stoica, et al. Introduction to the issue on MIMO radar and its applications [J]. IEEE J Sel Topics Signal Process, 2010, 4(1): 2 – 4.
- [16] F Daum, J Huang. MIMO radar: Snake oil or good idea [A]? International WD & D Conference [C]. Kissimmee, FL: IEEE Press, 2009. 113 – 117.
- [17] Q He, R S Blum, H Godrich, et al. Target velocity estimation and antenna placement for MIMO radar with widely separated antennas [J]. IEEE J Sel Topics Signal Process, 2010, 4(1): 79 – 100.
- [18] C R Berger, B Demissie, J Heckenbach, P Willett, et al. Signal

- processing for passive radar using OFDM waveforms [J]. *IEEE J Sel Topics Signal Process*, 2010, 4(1): 226 – 238.
- [19] 杨明磊, 陈伯孝, 张守宏, 高昭昭. 多载频 FMCW 在 MIMO 雷达中的应用研究 [J]. *电子学报*, 2008, 36(12): 2351 – 2356.
- Yang Minglei, Chen Baixiao, Zhang Shouhong, Gao Zhaozhao. Study on application of multiple carrier frequency FMCW in MIMO radar [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(12): 2351 – 2356. (in Chinese)
- [20] 秦国栋, 陈伯孝, 陈多芳, 张守宏. 一种多载频 MIMO 雷达高速运动目标多维参数估计方法 [J]. *电子学报*, 2010, 38(12): 2763 – 2768.
- Qin Guodong, Chen Baixiao, Chen Duofang, Zhang Shouhong. A method of multiple parameters estimation for high speed moving targets in multi-carrier-frequency MIMO radar [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 2763 – 2768. (in Chinese)
- [21] S Gogineni, A Nehorai. Polarimetric MIMO radar with distributed antennas for target detection [J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 2010, 58(3): 1689 – 1697.
- [22] C Y Chen, P P Vaidyanathan. MIMO radar ambiguity properties and optimization using frequency-hopping waveforms [J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2008, 56(12): 5926 – 5936.
- [23] D R Fuhrmann, G S Antonio. Transmit beamforming for MIMO radar systems using signal cross-correlation [J]. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2008, 44(1): 171 – 186.
- [24] G S Antonio, D R Fuhrmann, F C Robey. MIMO radar ambiguity functions [J]. *IEEE J Sel Topics in Signal Process*, 2007, 1(1): 167 – 177.
- [25] P M Woodward. Information theory and the design of radar receivers [J]. *Proc IRE*, 1951, 1(1): 1521 – 1524.
- [26] M R Bell. Information theory and radar waveform design [J]. *IEEE Trans Inform Theory*, 1993, 39(5): 1578 – 1597.
- [27] Y Yang, R S Blum. MIMO radar waveform design based on mutual information and minimum mean-square error estimation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1): 330 – 343.
- [28] Y Yang, R S Blum. Minimax robust MIMO radar waveform design [J]. *IEEE J Sel Topics Signal Process*, 2007, 1(1): 147 – 155.
- [29] Y Yang, R S Blum, Z Sh He, et al. MIMO radar waveform design via alternating projection [J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2010, 58(3): 1440 – 1445.
- [30] C Y Chen, P P Vaidyanathan. MIMO radar waveform optimization with prior information of the extended target and clutter [J]. *IEEE Transactions on signal processing*, 2009, 57(9): 3533 – 3544.
- [31] T Naghibi, M Namvar, F Behnia. Optimal and robust waveform design for MIMO radars in the presence of clutter [J]. *Signal Process*, 2010, 90(4): 1103 – 1117.
- [32] H Deng, B Himed. Detection of low-speed ground moving targets using MIMO radar [A]. *ICASSP [C]*. Charleston, SC: IEEE Press, 2009. 1 – 4.
- [33] P F Sannmartino, C J Baker, H D Griffiths. Target model effects on MIMO radar performance [A]. *ICASSP [C]*. Toulouse: IEEE Press, 2006. 1129 – 1133.
- [34] Y W Jin, J M Moura, O' Donoughue N. Time reversal in multiple-input multiple-output radar [J]. *IEEE J Sel Topics Signal Process*, 2010, 4(1): 210 – 225.
- [35] R S Blum. Limiting case of a lack of rich scattering environment for MIMO Radar diversity [J]. *IEEE Signal letters*, 2009, 16(10): 901 – 904.
- [36] J Tang, N Li, Y Wu, et al. On detection performance of MIMO radar: A relative entropy-based study [J]. *IEEE Signal Process Lett*, 2009, 16(3): 184 – 187.
- [37] Y Yu, A P Petropulu, H V Poor. MIMO radar using compressive sampling [J]. *IEEE J Sel Topics Signal Process*, 2010, 4(1): 146 – 164.
- [38] 赵光辉, 陈伯孝, 朱守平. 基于 SIAR 体制的单基地 MIMO 雷达方向综合及测角性能分析 [J]. *中国科学, E 辑: 技术科学*, 2009, 39(1): 181 – 192.
- G H Zhao, B X Chen, S P Zhu. Monostatic MIMO radar beamforming and bearings estimation performance based on SIAR [J]. *Chinese Science, E, Technology Science*, 2009, 39(1): 181 – 192. (in Chinese)
- [39] J L Chen, H Gu, W M Su. A new method for joint DOD and DOA estimation in bistatic MIMO radar [J]. *Signal Processing*, 2010, 90(2): 714 – 718.
- [40] H Lv, D Z Feng, H W Liu, et al. Tri-iterative least-square method for bearing estimation in MIMO radar [J]. *Signal Processing*, 2009, 89(12): 2686 – 2691.
- [41] T Ali, G H Jajamovich, X D Wang, et al. Optimal joint target detection and parameter estimation by MIMO radar [J]. *IEEE J Sel Topics Signal Process*, 2010, 4(1): 127 – 146.
- [42] Q He, R Blum. Cramer-Rao Bound for MIMO radar target localization with phase errors [J]. *IEEE Signal Process Letters*, 2010, 17(1): 83 – 86.
- [43] H Godrich, A M Haimovich, R S Blum. Cramer Rao bound on target localization estimation in MIMO radar systems [A]. *ICASSP [C]*. Las Vegas, Nevada: IEEE Press, 2008. 134 – 139.
- [44] N H Lehmann, E Fishler, A M Haimovich, et al. Evaluation of transmit diversity in MIMO-radar direction finding [J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 2007, 55(5): 2215 – 2225.

- [45] J Tabrikian. Barankin bounds for target localization by MIMO radars [A]. The 4th IEEE Workshop on Sensor Array and Multi-Channel Processing [C]. Waltham, MA: IEEE Press, 2006. 278 – 281.
- [46] D Pastina, M Bucciarelli, P Lombardo. Multistatic and MIMO distributed ISAR for enhanced cross-range resolution of rotating targets [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2010, 48(8): 3300 – 3317.
- [47] J Li, X Y Zheng, P Stoica. MIMO SAR imaging: Signal synthesis and receiver design [A]. 2nd IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing [C]. St Thomas, Asilomar: IEEE Press, 2007. 89 – 92.
- [48] J Li, P Stoica, X Zheng. Signal synthesis and receiver design for MIMO radar imaging [J]. IEEE Trans Signal Process, 2008, 56(8): 3959 – 3968.
- [49] G Q Duan, D W Wang, X Y Ma, et al. Three-dimensional imaging via wideband MIMO radar system [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(3): 445 – 449.
- [50] R E Kell. On the derivation of the bistatic RCS from measurements [J]. Proc IEEE, 1965, 53(8): 983 – 988.
- [51] M Willsey. Quasi-orthogonal Wideband Radar Waveforms Based on Chaotic System [D]. USA: Computer Science Department, MIT, 2006. 1 – 24.
- [52] A O Hero, D A Castanon, D Cochran, et al. Foundations and Applications of Sensor Management [M]. New York: Springer, 2008. 21 – 67.

## 作者简介



**陈浩文** 男, 1981 年出生于湖南安化. 2004 年、2007 年分别在空军工程大学和国防科学技术大学获工学学士和硕士学位. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生、IEEE 会员. 主要研究方向为雷达系统与信号处理、MIMO 雷达系统设计、阵列信号处理、空间谱估计.  
E-mail: chenhw@nudt.edu.cn



**黎湘** 男, 1967 年出生于湖南浏阳. 国防科学技术大学教授、博士生导师、电子学会高级会员. 现为 973 国家安全重大基础研究项目技术首席, 863 专家组专家. 入选教育部“新世纪优秀人才资助计划”, 获中国科协“求是杰出青年奖—实用工程奖”, 入选“新世纪百千万人才工程国家级人选”, 获国家杰出青年科学基金资助. 主要研究方向为雷达系统与信号处理、非线性信号处理、雷达自动目标识别与模糊工程.

**庄钊文** 男, 1958 年生于福建. 国防科学技术大学教授、博士生导师、电子学会会士、国务院学位委员会学科评议组成员. 教育部“长江学者和创新团队计划”目标识别创新团队带头人, 国家 863 领域专家, 973 国家安全重大基础研究项目技术首席, 首批国家“百千万人才工程”第一、二层次培养对象, 获“求是杰出青年奖—实用工程奖”, 获国家杰出青年科学基金资助, 获何梁何利基金科学与技术进步奖. 长期从事雷达识别、精确制导、卫星导航定位等领域的教学和科研工作, 完成 30 余项重大科研任务.