

# 多输入多输出 雷达



——应用于海洋油污检测

曾建奎 / 著



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

# 多输入多输出 雷达

——应用于海洋油污检测

DUOSHIURU DUOSHUCHU  
LEIDA

曾建奎 / 著



西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内容摘要

由于性能优越，多输入多输出雷达（MIMO 雷达）已成为研究热点。本书较全面地介绍了 MIMO 雷达的工作原理、分类，重点研究了 MIMO 雷达的检测问题，并进行了 MATLAB 仿真和实验验证。最后将 MIMO 雷达应用到海洋油污检测，并对相关研究问题进行了展望。

---

### 图书在版编目（C I P）数据

多输入多输出雷达：应用于海洋油污检测 / 曾建奎著. —成都：西南交通大学出版社，2014.5

ISBN 978-7-5643-3055-2

I. ①多… II. ①曾… III. ①多变量系统—雷达—应用—海洋污染监测 IV. ①X834

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 095372 号

---

### 多输入多输出雷达

——应用于海洋油污检测

曾建奎 著

\*

责任编辑 张宝华

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

成都市金牛区交大路 146 号 邮政编码：610031

发行部电话：028-87600564

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸：148 mm × 210 mm 印张：4.75

字数：130 千字

2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-3055-2

定价：18.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

# 前 言

在无线通信领域，MIMO 技术被广泛应用，以克服多径效应的影响，并提高传输率。而在雷达技术领域，综合脉冲孔径雷达 (Synthetic Impulse and Aperture Radar, SIAR) 已被证明是一种高效技术。在这两种技术启发下，产生了 MIMO 雷达。根据工作原理不同可以分成两种类型：一种是 Eran Fishler 提出的收发全分集 MIMO 雷达。收发全分集 MIMO 雷达利用了传统雷达中有害目标的起伏来改善雷达的性能。这种雷达的优势明显，主要包括有效口径大、硬件简单、通过空间分集对抗目标衰落等。另外一种是由美国林肯实验室的研究人员提出的发射分集 MIMO 雷达。在这种雷达工作体制中，收发阵列天线单元布置与相控阵雷达相同，甚至可以共用同一个阵列，因此，它也被认为是相控阵雷达的扩展。它的特点是发射信号相互正交，而在接收端采用波束形成方法进行处理，对接收到的综合信号进行分离。这种雷达的优点主要是利用发射信号的多样性提高雷达参数的可辨识性，进而提高角度分辨力。发射分集的 MIMO 雷达技术与现在使用的雷达技术更加接近，因此在工程上更容易实现。

本书对两种不同类型的 MIMO 雷达检测的相关问题展开研究，安排如下：

第一章对雷达发展情况进行简单概述，讲述了 MIMO 雷达的产生、发展概况、工作原理及分类。

第二章研究收发全分集 MIMO 雷达的工作原理，建立收发信号模型。在经典的慢起伏雷达目标截面积 RCS 模型的基础上， $\chi^2$  分布模型，理论分析收发全分集 MIMO 雷达的检测性能，并与传统的相控阵进行比较。

第三章将统计模型、隐马尔可夫模型 (Hidden Markov Model, HMM), 应用于收发全分集的 MIMO 雷达目标检测问题中。收发全分集 MIMO 雷达的天线阵元布置间距很大, 可以认为接收天线从不同角度对目标进行观察, 因此, 目标的回波在不同角度上呈现不同的特性, 回波强度变化很大; 而杂波的回波则在每个方向上呈现出相同的特性, 回波的强度基本相同。根据这个特点, 可以用隐马尔可夫模型对目标回波和杂波回波分别进行建模, 从而实现对目标回波和杂波的分离。

第四章研究基于正交波形的发射分集 MIMO 雷达的工作原理。首先分析这种雷达系统的特点、信号模型, 再构建基于正交波形的发射分集 MIMO 雷达仿真系统, 用仿真系统验证发射分集 MIMO 雷达在抗截获性能、检测弱目标能力、速度分辨力、距离分辨力等方面相对于传统相控阵雷达的优势。

第五章将传统的空时自适应处理技术 (Space-time Adaptive Processing, STAP) 应用于采用正交波形的发射分集 MIMO 雷达。针对 MIMO 雷达发射相互正交信号这一特点, 将空时自适应处理技术进行了扩展, 提出了波形-空间-时间三维信号处理方法。

第六章将图像处理技术中常用的 Hough 变换应用于发射信号分集的 MIMO 雷达目标检测问题中。首先针对常规 Hough 变换计算量大的问题, 提出改进方法, 采用斜率-截距参数空间, 通过平移参数空间单元格的方法来实现 Hough 变换, 对具有相同到达时间的一组数据同时处理, 降低了计算量。更进一步提出利用回波信号的相位实现相干积累, 在低信噪比时提高检测性能。最后研究了将 Hough 变换应用于 MIMO 雷达长时间积累中的方法。

第七章将通信系统中的信道估计技术应用于 MIMO 雷达的检测问题中, 把雷达检测问题等效成信号传输信道估计问题。由于目标的存在, 使得信道的特性发生变化, 进而对信道特性进行分析, 从而判断目标是否存在。

第八章介绍了 MIMO 雷达在海洋油污的检测问题。MIMO 雷达

在工作体制上与 SAR 雷达很类似，因此，借鉴 SAR 雷达在海洋油污检测的成功应用，可以将 MIMO 雷达用在海洋油污的检测问题中。

本书得到重庆科技学院博士教授启动基金项目(CK2010B04)的支持。感谢出版社在本书出版过程中的认真编辑加工。

限于水平，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2013 年 11 月

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 引 言 .....	1
1.1.1 收发全分集 MIMO 雷达 .....	3
1.1.2 发射分集 MIMO 雷达 .....	6
1.2 研究动态及发展现状 .....	7
第 2 章 收发全分集 MIMO 雷达检测性能研究 .....	10
2.1 收发全分集 MIMO 雷达信号模型 .....	10
2.2 雷达模型分类 .....	13
2.3 MIMO 雷达与传统相控阵雷达检测性能对比分析 .....	14
2.3.1 MIMO 雷达似然函数 .....	14
2.3.2 MIMO 雷达检测性能分析 .....	16
2.3.3 相控阵雷达检测性能分析 .....	17
2.4 数字实验结果 .....	18
2.5 本章小结 .....	20
第 3 章 隐马尔可夫模型在收发全分集 MIMO 雷达检测的应用 .....	22
3.1 引 言 .....	22
3.2 隐马尔可夫模型方法基本原理 .....	23
3.2.1 HMM 的基本概念 .....	24
3.2.2 马尔可夫链的形状 .....	25
3.2.3 隐马尔可夫链的三个基本算法 .....	26
3.3 MIMO 雷达中使用隐马尔可夫模型的检测方法 .....	31

3.3.1	目标和杂波散射特性分析	31
3.3.2	用 HMM 进行 MIMO 雷达目标检测的原理	31
3.3.3	基于 HMM 的 MIMO 雷达目标检测实现步骤	33
3.3.4	仿真实验	36
3.4	本章小结	36
<b>第 4 章</b>	<b>基于正交波形的发射分集 MIMO 雷达检测性能研究</b>	<b>38</b>
4.1	发射分集 MIMO 雷达的原理	39
4.2	发射分集 MIMO 雷达的特点	42
4.3	发射分集 MIMO 雷达检测性能研究	46
4.3.1	MIMO 雷达的接收信号处理流程分析	46
4.3.2	相控阵雷达的接收信号处理流程分析	49
4.3.3	MIMO 雷达与相控阵的性能对比	50
4.4	发射分集 MIMO 雷达仿真系统	52
4.4.1	仿真系统介绍	52
4.4.2	输入参数界面和仿真输出	76
4.5	本章小结	77
<b>第 5 章</b>	<b>空时自适应处理在发射分集 MIMO 雷达检测的应用</b>	<b>79</b>
5.1	引言	79
5.2	传统空时自适应技术信号原理	80
5.3	MIMO 雷达中的空时自适应处理	85
5.3.1	信号模型	86
5.3.2	仿真实验	88
5.4	本章小结	91
<b>第 6 章</b>	<b>Hough 变换应用于发射分集 MIMO 雷达研究</b>	<b>93</b>
6.1	传统的 Hough 变换方法	93
6.1.1	Hough 变换简介	93
6.1.2	Hough 变换应用	96



6.2 改进的 Hough 变换方法	97
6.2.1 快速 Hough 变换	97
6.2.2 相干 Hough 变换	104
6.3 改进的 Hough 变换方法应用于 MIMO 雷达积累	110
6.3.1 信号处理流程及性能分析	110
6.3.2 仿真实验结果	113
6.4 本章小结	114
<b>第 7 章 信道估计应用于发射分集 MIMO 雷达研究</b>	<b>116</b>
7.1 引言	116
7.2 收发信号模型	116
7.3 信道估计方法及目标参数估计	117
7.4 仿真实验	119
7.5 本章小结	120
<b>第 8 章 MIMO 雷达用于海油检测</b>	<b>121</b>
8.1 引言	121
8.2 MIMO 雷达检测海洋油污的问题	122
<b>参考文献</b>	<b>125</b>

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 引 言

基于阵列处理的有源阵列广泛应用于雷达系统的目标检测和参数估计<sup>[1-3]</sup>。雷达系统的任务是目标检测及参数估计，如确定目标的距离、方位和速度等。检测和参数估计问题已经在文献中进行了详细研究<sup>[4]</sup>，其解决方法可以分为两类：一是基于高分辨率技术，如 MUSIC 或最大似然 (ML)<sup>[4]</sup>；二是利用多个阵元在空间形成波束。在接收天线端使用数字波束形成技术<sup>[4-8]</sup>，可以同时形成多个接收波束，无需机械扫描。

自 20 世纪 40 年代以来，由于相控阵雷达技术比机械扫描雷达具有明显的优越性，目前已经在各个领域得到了广泛应用。典型代表有美国的地基雷达 (GBR) 和宽带固态有源相控阵雷达，包括 TMD-GBR 雷达、GBR-P 雷达及发展型 XBR 雷达等<sup>[9]</sup>。我国也对相控阵雷达进行了研究<sup>[10-12]</sup>。由于在杂波环境中检测出运动目标是很重要的，由此发展了空时自适应信号处理技术<sup>[13-16]</sup>。

另外一种有源雷达是多基雷达<sup>[17]</sup>。这种雷达系统由许多子雷达构

成，每个子雷达工作独立<sup>[18]</sup>，即分别独立进行信号预处理，处理结果通过网络送到中央处理器进行信息的融合，以作出最终决策<sup>[17-21]</sup>。

20 世纪 70 年代末，为了解决雷达隐身目标的探测问题和提高雷达抗反辐射导弹的能力，法国国家航天局提出了综合脉冲孔径 (SIAR) 雷达<sup>[22, 23]</sup>概念。由于大量使用的隐身飞行器的隐身材料都是针对厘米波段雷达而设计的，因此隐身对米波雷达无效，故米波雷达可探测到隐身目标。但米波雷达由于信号波长长，因此要获得足够高的角度分辨率，米波雷达天线应有大的口径尺寸。为了在天线阵元数和口径尺寸间获得折中选择，SIAR 采用了大阵元间距的随机稀疏布阵形式。为了提高雷达抗反辐射导弹的能力，SIAR 雷达采用将发射天线和接收天线分开放置的布阵方式；也为了使 SIAR 雷达具有全向探测能力，通常采用大口径稀疏圆环阵列形式。图 1.1 为 SIAR 雷达阵元布置俯视图，其中内环上的小圆圈代表接收天线阵元，外环上的双三角代表发射天线阵元。

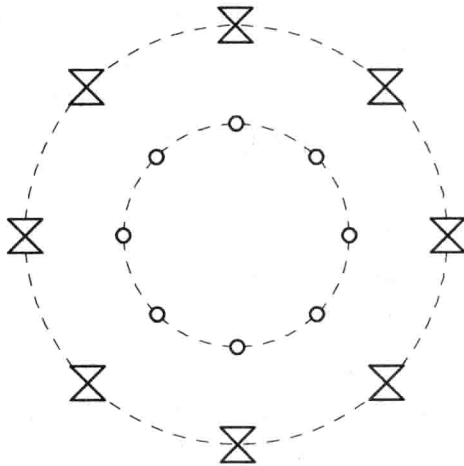


图 1.1 SIAR 雷达阵元布置俯视图

SIAR 雷达除了天线布置采用稀布方式外,工作原理也与普通相控阵雷达或稀布阵雷达不同,其独特之处在于 SIAR 雷达的每个天线发射的信号各不相同,并且相互正交,因此 SIAR 雷达的发射波束将是低增益的宽波束。而接收可采用数字波束形成技术,形成多个同时接收波束,以覆盖发射波束所照射的空域。SIAR 发射的正交波形,可以通过编码方式实现,简单的方法也可通过频分的方式实现,即每个天线发射信号的频率是步进递增的,步进增量为发射波形时宽的倒数。

由于 SIAR 雷达采用了大阵元间距的稀布阵方式,且各阵元发射信号不同,就这两点而言,SIAR 已有 MIMO 雷达的影子,是 MIMO 雷达的雏形。而在文献<sup>[24, 26]</sup>中提到的雷达,由于利用了多个阵元发射相互正交的波形,故被称为 MIMO 雷达。

受 MIMO 通信理论及 SIAR 概念的启发,以及雷达对新理论和新技术的需求,两种 MIMO 雷达概念被提出<sup>[27]</sup>:一种是收发全分集的 MIMO 雷达,这种雷达的特点是收发天线阵列单元的间距很大,利用空间分集;另一种是发射分集的 MIMO 雷达,这种雷达的特点是发射相互正交的信号,利用信号分集。

### 1.1.1 收发全分集 MIMO 雷达

首先提出的是收发全分集的 MIMO 雷达<sup>[28-30]</sup>,这种雷达的思想受到 MIMO 通信思想的启发<sup>[31-33]</sup>,收发天线间距拉开很大,以达到从不同角度观测目标的目的。多输入多输出系统(MIMO, Multiple Input Multiple Output)原本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,如果将移动通信系统的传输信道看成一个系统,则发射信号可看成移动信道(系统)的输入信号,而接收信号可看成移动信道的输出信号。从 20 世纪 90 年代中期以来, Bell 实验室

等先后提出在无线通信系统中的基站和移动端均用多天线的方案,即对移动信道这样一个系统而言,有多个信号输入和多个信号输出(MIMO系统)<sup>[31,32]</sup>。由于MIMO通信系统可获得空间分集增益,能显著提高移动通信系统在衰落信道条件下的信道容量,特别对大的角度扩展信道(极端情况是 $2\pi$ ),其性能改善尤为明显,理论分析表明,信道容量与收发两端天线阵元数有直接关系<sup>[33]</sup>。实验室的研究证明,采用MIMO技术在室内传播环境下的频谱效率可以达到 $20 \sim 40 \text{ bit/s/Hz}$ ,而使用传统无线通信技术在移动蜂窝中的频谱效率仅为 $1 \sim 5 \text{ bit/s/Hz}$ ,在点到点的固定微波系统中也只有 $10 \sim 12 \text{ bit/s/Hz}$ 。MIMO技术作为提高数据传输速率的重要手段受到人们越来越多的关注。MIMO技术的核心是空时信号处理,也就是利用在空间中分布的多个天线将时间域和空间域结合起来进行信号处理,它有效地利用了随机衰落和可能存在的多径传播以成倍提高业务传输速率。对MIMO技术的研究主要集中在智能天线、信道模型、信道容量、信号编码、空间分集及空间复用等方面。

如图1.2所示<sup>[34]</sup>,雷达目标在不同的散射方向提供了丰富的散射信号,考虑到地物等环境对目标不同部分散射信号的反射,雷达接收的信号应是各多径信号的叠加。鉴于具有与通信中角度扩展相似的特性,相距一定间隔的两个接收天线接收的信号可以是相互独立的。另外,雷达目标具有明显的闪烁特性。理论和实验均表明,雷达目标在姿态和方向上的微小变化,都将导致雷达回波(即RCS,雷达截面积)的严重起伏,可达 $10 \sim 25 \text{ dB}$ <sup>[35]</sup>。这种回波信号的起伏十分类似于移动信道的信号衰落,将严重影响常规雷达的探测性能<sup>[36]</sup>。可见,雷达回波信号具有某些与通信信道相似的特性,将已在移动通信中得到深入研究的MIMO概念<sup>[37]</sup>,引申应用于解决雷达信号接收和目标探测问题,是一种可行的尝试。

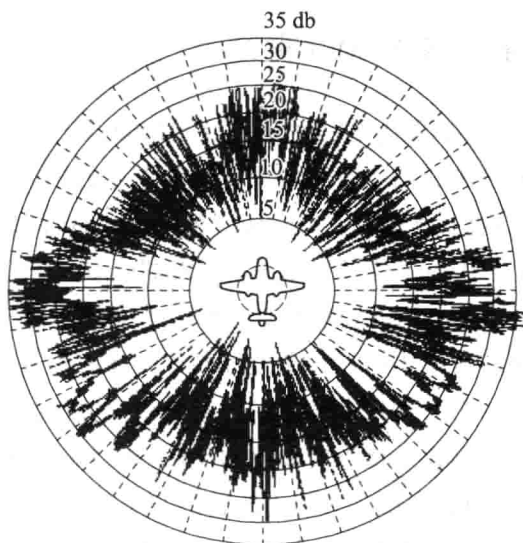


图 1.2 目标的雷达信号后向散射 (波长: 10 cm)

这种 MIMO 雷达直接来源于 MIMO 通信概念, 它采用扩展目标模型, 而不是传统的点目标模型, 可以把雷达目标类比于通信中的信道<sup>[39]</sup>。这种 MIMO 雷达的一个特点是: 利用目标截面面积的角度扩展 (目标截面面积随着观测角度起伏变化) 来提高雷达性能。一个天线收到的目标回波很小的可能性较大, 但是当增加天线数目, 从不同的角度观测目标, 所有天线的目标回波都很小的概率就可以任意地小<sup>[39]</sup>, 这种思想被称为空间增益, 这种增益被用来对抗目标的衰落<sup>[30]</sup>。研究发现, 收发全分集 MIMO 雷达的优点主要有:

- (1) 利用空间分集来提高目标检测性能<sup>[30]</sup>和目标角度估计性能<sup>[40]</sup>。
- (2) 提高移动目标检测能力<sup>[39]</sup>。
- (3) 采用相干处理模式来提高目标分辨率<sup>[39]</sup>。

(4) 利用信号多样性来提高同时处理目标的数量。这点与通信中的空分复用概念类似<sup>[41]</sup>, 利用信号多样性建立高维信号空间。

### 1.1.2 发射分集 MIMO 雷达

另一种 MIMO 雷达是发射分集的 MIMO 雷达, 这种雷达发射阵列结构与相控阵相同, 可以看成相控阵雷达的扩展。美国麻省理工学院 (MIT) 林肯实验室 (Lincoln) 的 Rabideau 和 Parker 于 2003 年在第 37 届 Asilomar 信号、系统与计算机会议 (ACSSC) 上提出了发射分集的 MIMO 雷达概念<sup>[26]</sup>。他们对 MIMO 雷达在宽搜索波束形成、低截获概率 (LPI)、杂波抑制等方面的优势进行了理论分析, 并设计了一个 L 波段实验系统, 对其中的关键技术进行了实验研究。在同一届会议上林肯实验室的 Bliss 和 Forsythe 对不同结构下 MIMO 雷达的自由度、分辨力改善进行了分析, 也对 MIMO 雷达如何利用空时自适应处理 (STAP) 进行地面动目标显示 (GMTI) 进行了研究<sup>[25]</sup>。

发射分集 MIMO 雷达的阵元间发射相互正交的信号, 使发射信号不能在空间同相叠加形成高增益窄波束, 而是形成宽波束。在接收端, 通过匹配滤波处理来恢复各发射信号分量, 并通过 DBF 来形成同时数字多波束, 以覆盖发射波束所照射的区域。发射分集 MIMO 雷达不强调阵元间发射信号的相互独立性, 而是在传统相控阵雷达的基础上要求各阵元发射的波形相互正交, 这种雷达与发全分集 MIMO 雷达不同, 它的发射阵元间距很小, 与相控阵的阵列配置相同。这种雷达充分利用了各阵元信号的相干性, 这与收发全分集 MIMO 技术空间分集的特点恰恰相反。

发射分集 MIMO 雷达与相控阵雷达的区别如图 1.3 所示<sup>[38]</sup>, 图 (a) 是 MIMO 雷达, 它发射完全不同的信号, 信号之间相互独立; 图 (b) 是相控阵雷达, 它发射信号的波形相同, 只是每个信号加权进行波束形成。

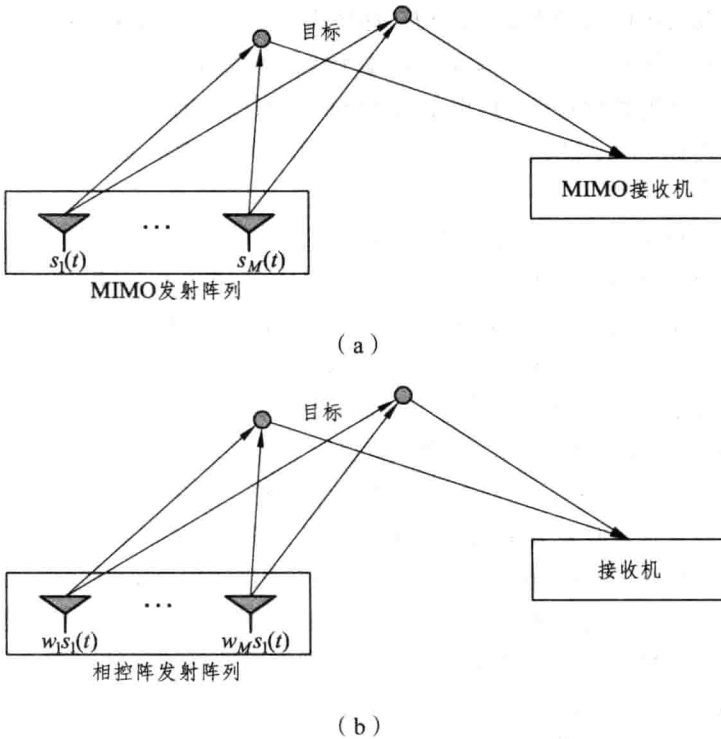


图 1.3 MIMO 雷达、相控阵雷达示意图

## 1.2 研究动态及发展现状

对于收发全分集 MIMO 雷达的研究主要集中于新泽西技术研究所、Lehigh 大学、德拉瓦大学、贝尔实验室等机构。新泽西技术研究所的 Fishler 等人分析了 MIMO 雷达角度估计均方差的 Cramer-Rao 限，并研究了角度分集增益对检测概率的改善情况<sup>[25]</sup>。

发射分集 MIMO 雷达与工程比较接近，研究比较广泛，主要集中于 MIT 林肯实验室、佛罗里达大学、华盛顿大学、英国的牛津大



学以及我国的清华大学等机构。这种雷达把能量均匀地发射到感兴趣的空域，具有抗截获等优势。相比于传统相控阵雷达的波束形成，这种雷达的处理增益低，但由于雷达同时观测很大的空域，不需要扫描，因此可以长时间积累，来弥补未波束形成而造成的处理增益方面的损失<sup>[26]</sup>。

Rabideau 对发射分集 MIMO 雷达的系统结构、匹配滤波、波束形成及性能改善方面进行了研究<sup>[39]</sup>；Robey 建立了 L 波段和 X 波段的 MIMO 雷达实验系统用于研究低旁瓣的波束形成技术<sup>[42]</sup>；Bekkerman 及 Tabrikian 对发射分集 MIMO 雷达的空间覆盖、方向图改善和最大可检测目标数目等问题进行了研究，也对其在目标检测、DOA 估计及 CRB 方面的性能改善进行了详细研究<sup>[43-46]</sup>；Sammartino 研究了目标模型对 MIMO 雷达性能的影响<sup>[47]</sup>；牛津大学的 Khan 通过实验系统对收发分集 MIMO 雷达模式下球状目标回波的信噪比改善进行了研究<sup>[48]</sup>。在角度分集和发射信号优化方面，Deng 利用模拟退火算法来优化正交多相编码波形<sup>[49]</sup>和正交离散频率编码波形<sup>[50]</sup>。他优化了相关函数，设计的正交波形对多普勒频率很敏感。针对这个问题，Khan 用正交矩阵的设计方法对多普勒问题进行了处理<sup>[51]</sup>，但是当波形长度及波形个数增加的时候，这种方法难以胜任；Yang 则从信息论的角度，基于互信息及最小均方误差估计的准则下对正交波形的设计进行了研究，并取得了很好的研究成果<sup>[52]</sup>。实际上，MIMO 雷达也可以采用非正交波形集来实现任意的方向图。在这方面，华盛顿大学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<sup>[53, 54]</sup>；MIT 林肯实验室的 Bliss 和 Forsythe 则研究了在杂波环境下用于雷达成像的发射波形优化设计，以及在无杂波环境下用于测角的发射波形优化设计问题<sup>[55]</sup>。

Xu 和 Li 等人则对自适应技术在 MIMO 雷达中的应用进行了研究<sup>[56, 57]</sup>，将目前存在的一些方法在 MIMO 雷达下进行拓展，主要包括 Capon 波束形成及 APES 方法等，显示了 MIMO 雷达在这些方面的优越性。同时他们也探测信号的设计进行了研究。