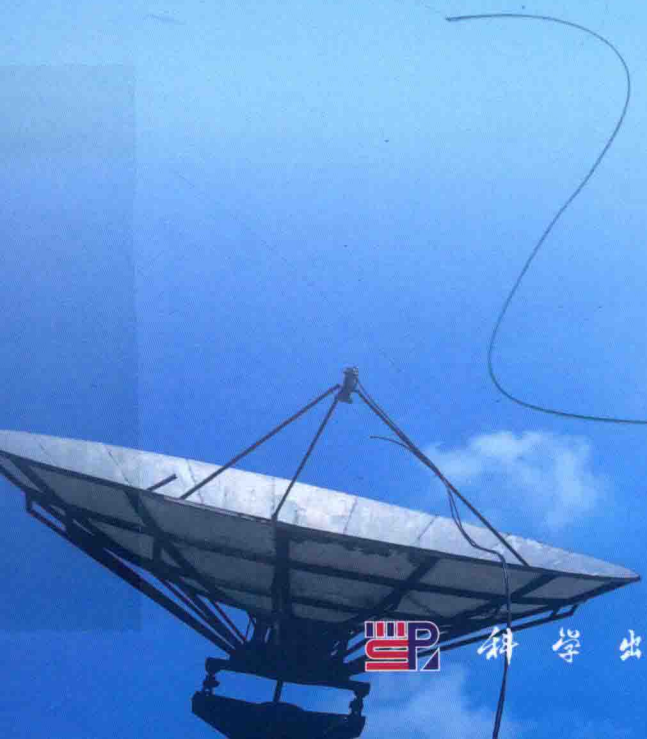
空间信息获取与处理前沿技术丛书

# 电磁涡旋成像理论与方法

刘 康 王宏强 程永强 黎 湘◎著



科学出版社

空间信息获取与处理前沿技术丛书

# 电磁涡旋成像理论与方法

刘 康 王宏强 程永强 黎 湘 著




科学出版社
北京

## 内 容 简 介

本书系统阐述涡旋电磁波及其在雷达成像应用中的最新研究成果。全书共8章，主要内容包括：涡旋电磁波的物理特性、面向成像的涡旋电磁波产生方法、涡旋电磁波测量与目标散射特性、电磁涡旋成像原理与数学模型、电磁涡旋成像目标重构方法、基于SBL的高分辨率电磁涡旋成像方法，以及电磁涡旋成像方面的若干开放性问题。

本书概括涡旋电磁波基本特性及电磁涡旋成像原理、成像模型和成像方法等重要问题的认识，兼具理论前沿性和学术先进性。本书建立并形成电磁涡旋成像理论与方法体系，不仅能够丰富电磁涡旋基础理论与应用技术，而且也能为新体制雷达探测与成像技术的发展提供有益的借鉴。

本书可作为高等院校信息与通信工程、电子科学与技术等专业研究生参考书，同时对从事雷达目标探测与成像、电磁涡旋技术研究的广大科技工作者和工程技术人员具有较大的参考价值。

**图书在版编目(CIP)数据**

电磁涡旋成像理论与方法/刘康等著. —北京：科学出版社，2020.4

(空间信息获取与处理前沿技术丛书)

ISBN 978-7-03-063229-6

Ⅰ.①电… Ⅱ.①刘… Ⅲ.①电磁波传播-应用-雷达成像-研究

Ⅳ.①TN957.52

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第250650号

责任编辑：张艳芬 李 娜 / 责任校对：王 瑞

责任印制：吴兆东 / 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4月第 一 版 开本：720×1000 B5

2020年4月第一次印刷 印张：11 1/2

字数：214 000

**定价：99.00元**

(如有印装质量问题，我社负责调换)

《空间信息获取与处理前沿技术丛书》编委会

主　编：黎　湘

副主编：王宏强　董　臻　郑　键　刘永祥

编　委：高勋章　魏玺章　何　峰　邓　彬

秦玉亮　程永强　李彦鹏　黄海风

刘　振

# 《空间信息获取与处理前沿技术丛书》序

进入21世纪，世界各大国加紧发展空间攻防武器装备，空间作战被提到了国家军事发展战略的高度，太空已成为国际军事竞争的战略制高点。作为空间攻防的重要支撑，同时伴随着我国在载人航天、高分专项、嫦娥探月、北斗导航等重大航天工程取得的成功，空间信息获取与处理技术也得到了蓬勃发展，受到国家高度重视。空间信息获取与处理技术在科学内涵上属于空间科学技术与电子信息技术交叉的学科，为各种航天装备的开发和建设提供支持。

国防科技大学是我国国防科技自主创新的高地。为适应空间攻防国家重大战略需求和学科发展要求，2004年正式成立了空间电子技术研究所。经过十多年的发展，目前已经成长为相关领域研究的中坚力量，取得了一大批研究成果，在国内电子信息领域形成了一定的影响力。为总结和展示研究所多年的研究成果，也为有志于投身空间信息技术事业的研究人员提供一套有用的参考书，我们组织撰写了《空间信息获取与处理前沿技术丛书》，这对推动我国空间信息获取与处理技术发展无疑具有极大的裨益。

空间信息领域涉及信息、电子、雷达、轨道、测绘等诸多学科，其新理论、新方法与新技术层出不穷。作者结合严谨的理论推导和丰富的应用实例对各个专题进行了深入阐述，丛书概念清晰，前沿性强，图文并茂，文献丰富，凝结了各位作者多年深耕结出的累累硕果。

相信丛书的出版能为广大读者带来一场学术盛宴，成为我国空间信息技术发展史上的一道风景和独特印记。丛书的出版得到了国防科技大学和科学出版社的大力支持，各位作者在繁忙教学科研工作中高质量地完成书稿，特向他们表示深深的谢意。

2019年1月

# 前　言

作为信息载体的电磁波除了采用传统携带信息方式，近年来其拥有的相位波前信息调制能力越来越受到关注。其中，轨道角动量是电磁波一个重要的尚未加以充分利用的物理量，传统电磁波加载轨道角动量调制时将形成涡旋电磁波，其相位波前呈现出螺旋形的结构，可在相位波前上调制所需信息，提高电磁波的信息传递和信息获取能力。目前，国内外关于电磁涡旋的研究方兴未艾，电磁涡旋在雷达成像、旋转多普勒探测、无线通信等领域逐渐展现出独特的优势。

本书内容源于作者所在团队的研究成果，旨在探索涡旋电磁波在雷达成像中的应用，重点对面向雷达成像应用的涡旋电磁波产生与辐射场优化方法、涡旋电磁波测量与目标散射特性、电磁涡旋成像原理及目标重构方法等科学问题进行深入讨论，为电磁涡旋成像技术的发展奠定理论与方法基础。

在撰写本书过程中，作者得到了雷达信号处理、微波与电磁场领域专家的大力指导和帮助，在此向他们表示衷心的感谢。感谢英国伦敦玛丽女王大学高跃教授在电磁涡旋成像研究过程中给予的建议和帮助。感谢吕跃广院士、何友院士、王耀南院士、中国科技大学王东进教授、中国科学院上海光学精密机械研究所韩申生研究员、西安电子科技大学廖桂生教授、国防科技大学胡卫东教授和粟毅教授等给予的宝贵意见和建议。

将涡旋电磁波应用于雷达成像是一个新的尝试，这为雷达目标信息获取提供了一个新的维度。然而，电磁涡旋理论与应用具有很强的多学科交融性，问题理解与理论建模难度较大，该技术走向实际应用仍需要不断的探索和研究。

限于作者水平，本书难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

作　者

2020 年 1 月于长沙

# 目　录

《空间信息获取与处理前沿技术丛书》序
前言
第 1 章　概论 …… 1
1.1　引言 …… 1
1.2　雷达成像技术概述 …… 2
1.2.1　传统凝视成像技术概述 …… 2
1.2.2　微波关联成像技术概述 …… 5
1.2.3　电磁涡旋成像研究现状 …… 6
1.3　本书内容安排 …… 10
参考文献 …… 11
第 2 章　涡旋电磁波与轨道角动量物理特性 …… 17
2.1　引言 …… 17
2.2　电磁场基本理论与守恒法则 …… 17
2.2.1　Maxwell-Lorentz 方程 …… 17
2.2.2　电磁波的辐射和传播 …… 19
2.2.3　电磁能量与电磁动量 …… 21
2.3　轨道角动量的内禀属性与辐射场特性 …… 22
2.3.1　轨道角动量的内禀属性 …… 22
2.3.2　不同极化条件下的辐射场分布与变化特性 …… 24
2.4　涡旋电磁波传播特性 …… 27
2.5　本章小结 …… 30
参考文献 …… 30
第 3 章　面向成像的涡旋电磁波产生方法 …… 32
3.1　引言 …… 32
3.2　涡旋电磁波产生原理与方法 …… 33
3.2.1　涡旋电磁波产生基本原理 …… 33
3.2.2　基于密度加权圆环阵列的涡旋电磁波产生方法 …… 39
3.2.3　基于矩形阵和六边形阵的涡旋电磁波产生方法 …… 43
3.3　辐射方向图优化设计方法 …… 47
3.3.1　基于有向阵元的方向图优化方法 …… 47

3.3.2 基于同心圆环阵列的方向图优化方法 …… 50
3.4 基于同心圆环阵列的 X 波段轨道角动量波束产生方法 …… 54
3.4.1 基于遗传算法的涡旋电磁波产生优化方法 …… 54
3.4.2 天线单元设计及其对阵列方向图的影响分析 …… 57
3.4.3 实用阵列设计范例 …… 67
3.5 本章小结 …… 71
参考文献 …… 72
**第 4 章 涡旋电磁波测量与目标散射特性** …… 74
4.1 引言 …… 74
4.2 涡旋电磁波接收与测量方法 …… 74
4.2.1 涡旋电磁波接收与轨道角动量态测量方法 …… 74
4.2.2 基于旋转多普勒频移的轨道角动量态测量方法 …… 76
4.3 涡旋电磁场实测结果与质量分析 …… 77
4.3.1 涡旋电磁波产生系统设计方案 …… 78
4.3.2 阵列误差建模与分析 …… 79
4.3.3 涡旋电磁场测量方法与测量结果分析 …… 83
4.4 目标散射特性与调制作用 …… 90
4.4.1 基于轨道角动量的 RCS 的定义 …… 90
4.4.2 金属平板基于轨道角动量的 RCS 计算与特性分析 …… 91
4.4.3 金属圆柱体的基于轨道角动量的 RCS 计算与特性分析 …… 95
4.5 本章小结 …… 98
参考文献 …… 98
**第 5 章 电磁涡旋成像原理与数学模型** …… 100
5.1 引言 …… 100
5.2 电磁涡旋成像基本原理 …… 100
5.3 成像数学模型 …… 102
5.3.1 多发多收工作模式 …… 103
5.3.2 多发单收工作模式 …… 106
5.3.3 斜视场景下成像模型 …… 108
5.4 成像性能优势分析 …… 110
5.4.1 成像分辨率分析比较 …… 110
5.4.2 成像系统特点 …… 113
5.5 本章小结 …… 114
参考文献 …… 115
**第 6 章 电磁涡旋成像目标重构方法** …… 117

6.1 引言 …… 117
6.2 基于圆环阵列的成像方法 …… 117
6.2.1 基于线性调频信号的成像模型 …… 117
6.2.2 回波分析与成像处理方法 …… 119
6.3 基于同心圆环阵列的电磁涡旋成像方法 …… 121
6.3.1 辐射场设计方法 …… 121
6.3.2 成像模型与成像处理 …… 124
6.3.3 方向图综合后成像模型与成像结果 …… 128
6.4 电磁涡旋成像实验数据验证 …… 133
6.4.1 一维成像实测数据处理与分析 …… 133
6.4.2 二维成像实测数据处理与分析 …… 136
6.5 本章小结 …… 139
参考文献 …… 140
**第 7 章 基于稀疏贝叶斯学习的高分辨率电磁涡旋成像方法** …… 141
7.1 引言 …… 141
7.2 电磁涡旋成像的稀疏表示模型 …… 141
7.2.1 稀疏信号恢复基本理论回顾 …… 142
7.2.2 稀疏信号表示模型 …… 142
7.3 基于稀疏贝叶斯的图像重建方法 …… 145
7.3.1 目标重构方法 …… 145
7.3.2 高分辨二维成像 …… 147
7.3.3 网格失配影响分析与校正 …… 151
7.4 波束扫描条件下的稀疏贝叶斯成像方法 …… 153
7.4.1 基于遗传算法的旁瓣抑制方法 …… 153
7.4.2 波束扫描与分析 …… 156
7.4.3 成像模型与成像处理方法 …… 158
7.5 实验数据成像结果与分析 …… 161
7.6 本章小结 …… 163
参考文献 …… 163
**第 8 章 若干开放性问题** …… 166
参考文献 …… 168
**附录** …… 169

# 第1章 概 论

## 1.1 引 言

雷达成像技术作为一种全天时、全天候、远距离的信息获取手段，在空间监视、对地观测、精确制导等领域具有非常重要的应用，已成为诸多国家竞相发展的关键技术。经过数十年的发展，雷达高分辨率成像理论与技术已取得长足进步，部分成果已应用到雷达成像系统中。尽管成像方法各种各样，但通常都是基于距离-多普勒原理，该原理通过发射宽带信号获得距离向高分辨率，利用雷达与目标之间的相对运动形成大的虚拟合成孔径，以获得方位向高分辨率。上述成像原理中，方位向分辨率的获得依赖于雷达与目标的横向相对运动，然而在一些雷达与目标间横向相对运动很小的应用场景中，传统的合成孔径雷达(synthetic aperture radar，SAR)/逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar，ISAR)成像所需的大虚拟孔径无法保证，难以成像，严重制约雷达综合探测能力的发展。

目前，针对上述成像问题，典型的解决方案有单脉冲成像技术、基于阵列信号测角的成像技术、利用天线方向图信息的解卷积成像技术等，这些方法均属于实孔径成像范畴，可在一定程度上改善雷达的角分辨能力，但由于天线波束内不同方位向辐射信号类似，对雷达方位向分辨性能的提升有限，因此难以实现高分辨率成像。上述瓶颈问题限制了雷达成像水平的提升，迫切需要探索新的雷达体制、成像原理和成像方法。

传统雷达成像技术中信息调制主要在时域、频域或极化域内进行，通常利用远场平面波近似。涡旋电磁波与经典平面波的一个主要区别是波束内同一距离下复振幅不再是一个恒定的常量，而是随着空间方位的改变而变化。在涡旋电磁波照射下，探测区域内信号具有显著的空间起伏特性，波束内相同距离不同目标处将形成具有差异性分布的电磁激励，有望使目标散射回波中蕴含更多的目标信息，从而可以进行信息的解耦与超分辨处理。这一特性也使得基于涡旋电磁波的雷达成像技术具有良好的抗噪、抗干扰性能，在微波凝视高分辨率成像、目标识别等领域具有广阔的应用前景。表1.1给出了传统雷达成像与电磁涡旋成像特点的比较，并指出了基于涡旋电磁波的雷达成像技术潜在的性能优势。然而，电磁涡旋成像基本原理与数学模型尚不明晰，涡旋电磁波产生方法与辐射场设计、雷达目标对涡旋电磁波的散射特性及电磁涡旋成像处理方法等诸多问题有待进一步深入研究。

表 1.1 传统雷达成像与电磁涡旋成像特点的比较

| 成像方式 | 成像特点比较 | |
|---|---|---|
| | 传统雷达成像 | 电磁涡旋成像 |
| 成像原理 | 距离-多普勒原理 | 相位波前调制 |
| 高分辨原理 | 距离向：宽带信号<br>方位向：合成孔径 | 距离向：宽带信号<br>方位向：相位波前变化 |
| 辐射场形式 | 平面波近似 | 非平面波 |
| 对相对运动的依赖性 | 依赖于雷达与目标的相对转动 | 不依赖于雷达与目标的相对转动，可凝视成像 |
| 抗干扰能力 | 易受有源欺骗干扰 | 具有较强的抗干扰能力 |

因此，本书紧紧围绕电磁涡旋成像技术，重点对涡旋电磁波产生原理与方法、涡旋电磁波与目标相互作用机理、利用涡旋电磁波实现雷达高分辨率成像原理及电磁涡旋成像方法等关键问题展开深入研究，建立基于涡旋电磁波的雷达成像理论体系，促进新体制雷达成像技术的快速发展。

## 1.2 雷达成像技术概述

一直以来，微波凝视成像技术（雷达与目标相对静止观测场景下成像）在目标探测与识别、地理信息遥感等诸多军事和民用领域具有广泛而迫切的应用需求。传统的凝视成像技术，即实孔径雷达成像技术[1,2]，主要包括单脉冲扫描雷达[3]、焦平面成像雷达[4,5]及相控阵雷达[6]等。2010 年以来，借鉴光学成像中鬼成像的思想与方法，诞生了基于时空随机调制辐射场的微波关联成像雷达[7]。近年来，电磁波相位波前调制受到越来越多的关注，从而在凝视成像领域逐渐发展形成第三类凝视成像体制，即新兴的电磁涡旋成像雷达。因此，本节首先简要概述传统凝视成像技术和微波关联成像技术，然后详细阐述电磁涡旋成像技术的起源、发展历程与研究现状，指出电磁涡旋成像研究中的关键技术和亟待解决的科学问题。

### 1.2.1 传统凝视成像技术概述

在传统凝视成像应用领域，为减弱或消除成像过程对雷达与目标相对运动的依赖性，弥补 SAR/ISAR 成像存在盲区的缺陷，人们提出了一系列凝视成像方案，具体包括单脉冲测角成像方法、基于解卷积的成像方法、基于阵列测角的成像技术和相控阵波束扫描成像技术等。下面简要介绍每一类方法的基本原理，并着重对其优缺点进行评述。

1) 单脉冲测角成像方法

单脉冲测角技术[1,8,9]，即采用独立的多个通道同时接收目标回波，通过比较单脉冲回波的和、差两路信息(比幅或者比相)来获得目标角度信息，因其测量精度高，在雷达目标搜索与跟踪、地面运动目标指示等领域具有较为广泛的应用。鉴于此，诸多研究人员将单脉冲测角技术应用到凝视成像领域[10,11]，其基本原理为：首先采用脉冲压缩技术获得待探测目标的高分辨一维距离像，然后利用单脉冲测角技术获取各个距离单元上目标的方位向信息。图1.1给出了典型的基于单脉冲测角的成像处理流程。总体来说，单脉冲测角成像方法的优点是成像时间短、具有较高的方位向测角精度；其缺点表现为距离向上无法分辨的两个目标在方位向上无法分辨，当同一距离分辨单元存在多个目标时，单脉冲测角成像方法仅能得到多个散射中心的等效中心方位角，从而使成像图像质量急剧恶化。

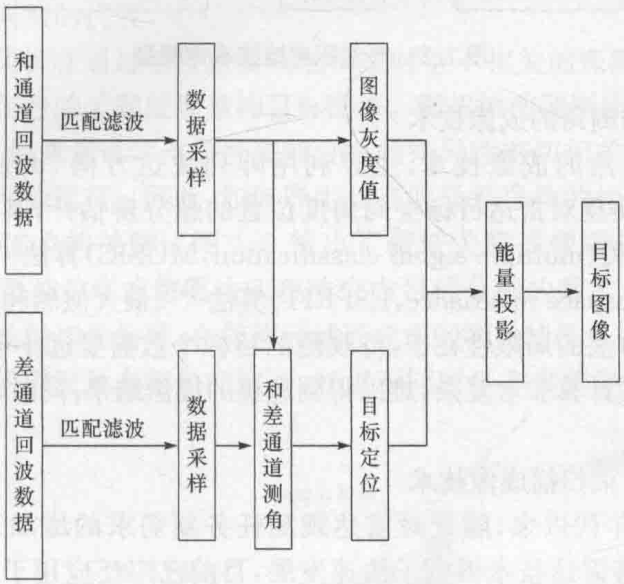



图1.1 典型的基于单脉冲测角的成像处理流程

2) 基于解卷积的成像方法

雷达目标回波信号在方位域可以看成天线方向图和目标RCS(radar cross section，RCS)的线性卷积，因此理论上通过解卷积操作即可获得目标方位位置的准确信息[12]。基于解卷积的成像信号模型可以表示为

$$s(\phi)=\sigma(\phi)*h(\phi) \tag{1.1}$$

式中，$s(\phi)$表示目标回波信号；$\sigma(\phi)$表示与目标方位角度相关的散射系数；$h(\phi)$表示天线方向图；符号“$*$”表示卷积运算。

由式(1.1)可知，对目标方位向成像即在已知$s(\phi)$和$h(\phi)$的条件下求解出目标在方位向的分布$\sigma(\phi)$。在不含噪声的理想条件下，采用逆滤波方法对

式(1.1)进行解卷积操作(图 1.2),可以得到 $\sigma(\phi)$ 的冲击响应函数,获得理论上无限高的方位分辨率。然而,实际中天线方向图具有低通特性,损失了原始场景回波的高频部分,导致解卷积方法对噪声非常敏感,$\sigma(\phi)$ 的求解结果不连续依赖于测量数据。同时,成像质量易受天线方向图形状和旁瓣的影响,对回波信噪比要求很高,实用价值低。为解决上述问题,研究人员相继提出限制迭代去卷积(constrained iterative deconvolution,CID)算法、快速限制迭代去卷积(fast constrained iterative deconvolution,FCID)算法及 FCID-CID 算法等[13-15]。此外,采用多通道解卷积技术[16]可以在一定数学约束条件下,将单通道解卷积问题由病态转为良态,然而多通道解卷积方法依然面临信噪比损失的问题,并且大量的解卷积运算使得处理过程非常复杂,计算量庞大。

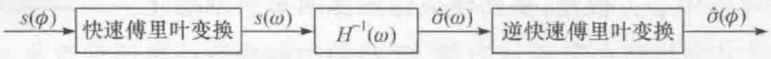



图 1.2 解卷积逆滤波成像模型

3) 基于阵列测角的成像技术

基于阵列测角的成像技术,主要利用阵列波达方向(direction of arrival,DOA)估计方法实现对雷达目标空间角度位置的超分辨估计,其中常用的典型方法有多重信号分类(multiple signal classification,MUSIC)算法[17]、旋转不变子空间(rotational subspace invariance,ESPRIT)算法[18]、最大似然和空间拟合算法[19]等。然而,此类方法的局限性在于:待观测的目标个数需要远小于通道数,当目标数目较多时,迭代计算非常复杂,难以得到理想的成像结果;同时,成像性能受噪声影响很大。

4) 相控阵波束扫描成像技术

20 世纪 60 年代以来,随着对雷达观测任务新需求的增加及相控阵天线技术的发展,相控阵雷达技术得到了快速发展,目前已广泛应用于机载与星载等多种军用和民用雷达之中[20-22]。不同于机械扫描雷达,相控阵雷达利用电控方法实现天线波束指向在空间的快速转动或扫描及波束形状的改变。由于相控阵雷达系统具有波束快速扫描与波束形状捷变的特点,相控阵技术被引入凝视成像应用中,可以在一定程度上提高实孔径天线的成像分辨能力[23]。然而,相控阵天线方向图形状在波束扫描过程中随着波束轴指向的变化而发生变化,并且在空间俯仰、方位向上不能完全分离,因而成像应用中需解决时/空变系统的解卷积问题。此外,相控阵系统通常具有庞大的收发通道数,发射和接收过程复杂、硬件成本极其昂贵。

### 1.2.2 微波关联成像技术概述

量子成像又称鬼成像[24,25]，是量子光学的一个重要分支，其利用光场的量子相干性和不确定性，采用二阶(或者高阶)关联方法来实现对目标的成像，因此也称为关联成像。最早的量子成像是通过纠缠双光子系统实现的，具有非定域特性，并且其分辨率能够突破瑞利衍射极限[26]。因此，量子成像技术一经提出就受到了人们的广泛关注，并且量子纠缠被认为是鬼成像的必要条件。然而，随着研究的深入，量子成像的实现打破了量子纠缠的限制，能够通过更普遍的热光源、赝热光源实现[27]。借鉴量子关联成像中的随机涨落光场，可以对电磁波幅度、频率、相位等物理量进行随机调制以获得随机调制辐射场，从而实现波束内对目标的分辨。近年来，人们利用这一成像原理提出随机波前调制雷达成像技术[28,29]。其中，微波关联成像是一个典型的代表。

微波关联成像旨在通过相位波前调制构造时空不相关的探测信号，从而通过参考信号和接收信号的关联处理重构目标图像。随机波前调制信号的产生是其中最基本的问题，成像质量通常与信号波前分布的差异性密切相关：差异性越明显，成像分辨率就有可能越高。因此，如何产生具有明显差异性的相位波前分布是微波关联成像雷达技术的关键。图1.3给出了微波关联成像雷达工作原理示意图[29]。图1.4为微波关联成像雷达实现波束内目标分辨的基本思想[29]。传统雷达成像技术通过发射相参信号，在探测区域形成空间相关特征显著的辐射场，波束内不同位置目标的回波具有相似的波形，利用不同时延和多普勒信息区分各个散

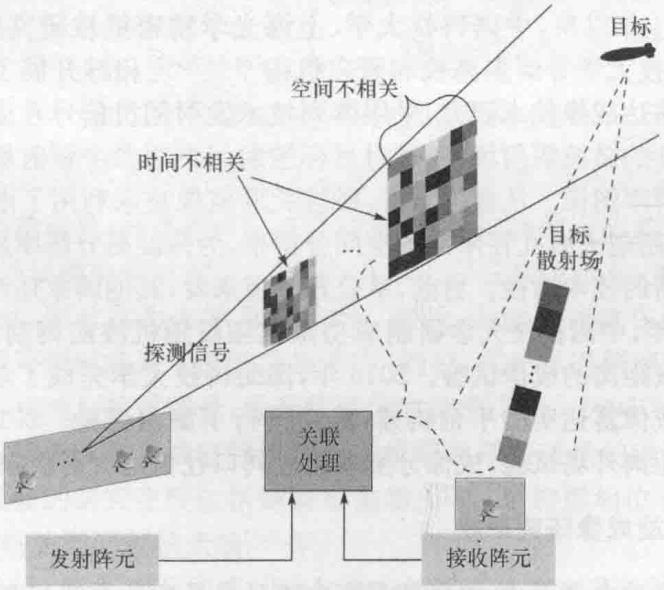



图1.3 微波关联成像雷达工作原理[29]

射点。相比之下，微波关联成像雷达发射的探测信号具有明显的空间不相关特征，波束内不同散射点的回波不仅具有不同的时延和多普勒频率，同时具有不同的波形。因此，在不依赖多普勒信息的条件下，微波关联成像技术为同一距离处的不同空间位置目标分辨提供了可能，在凝视成像和非合作运动目标成像等领域具有很大的应用潜力。

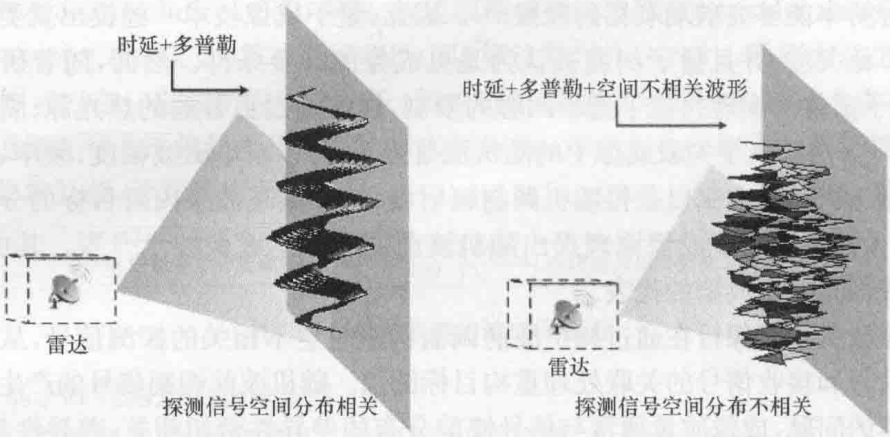



图 1.4 微波关联成像雷达实现波束内目标分辨的基本思想[29]

2013 年，杜克大学 Hunt 等[30]提出采用超材料设计制成的天线孔径实现压缩微波成像的方法，整个系统只需要一个微波探测器。不同频率微波通过超材料阵列可以产生不同辐射模式，在空间中形成随机调制辐射场，从而实现孔径内的超分辨率成像。2011 年以来，中国科技大学、上海光学精密机械研究所、国防科技大学、西安电子科技大学等诸多高校和研究机构[28,29,31,32]相继开展了基于时空两维随机辐射场的雷达成像技术研究，采用阵列技术发射随机信号在成像平面构造具有空间起伏特性的微波辐射场，通过对目标散射回波与参考辐射场的关联处理获得目标的高分辨率图像。从理论上讲，微波关联成像技术利用了电磁场的空间相干性，可以获得超越天线孔径限制的空间分辨率，为微波高分辨率成像技术的发展提供了一条崭新的技术途径。目前，从公开报道来看，其他国家还没有涉及该方面的研究。2014 年，中国科技大学研制成功微波频段随机波前调制成像雷达样机，进行了百米量级距离的成像试验。2016 年，国防科技大学完成了基于数字阵列的随机波前调制成像雷达实验平台构建，成功进行了室内试验。2018 年，国防科技大学开展了远距离外场试验，成像分辨率超过同口径雷达衍射极限 10 倍以上。

### 1.2.3 电磁涡旋成像研究现状

根据经典电动力学理论，电磁能量和电磁动量是两个客观存在的物理量，两者可以相互转化并满足守恒的关系[33]。其中，电磁动量包括线动量和角动量两部

分，线动量与平动相对应，而角动量通常与转动相对应。进一步，角动量又可以分为自旋角动量(spin angular momentum，SAM)和轨道角动量。自旋角动量与电磁场的极化相对应，轨道角动量与相位波前的变化情况相联系，两者均为物理守恒量。电磁波极化自发现以来，已经广泛用于光学和无线电通信、雷达目标探测与识别等领域[34]。近年来，轨道角动量由于其特殊的物理性质受到了广泛关注，相对于自旋角动量，轨道角动量理论上具有无限多的拓扑荷数，能够提供更为丰富的信息调制自由度[35]。因此，轨道角动量在纳米技术[36]、量子操控[37]、无线电通信[38-41]和雷达探测等领域有着很大的应用潜力。本节将主要综述携带轨道角动量的涡旋电磁波及其在雷达目标探测领域应用的起源、发展与现状，具体内容包括涡旋电磁波产生、电磁涡旋成像及旋转目标检测等部分。图1.5描述了涡旋电磁波及其应用的发展历史。

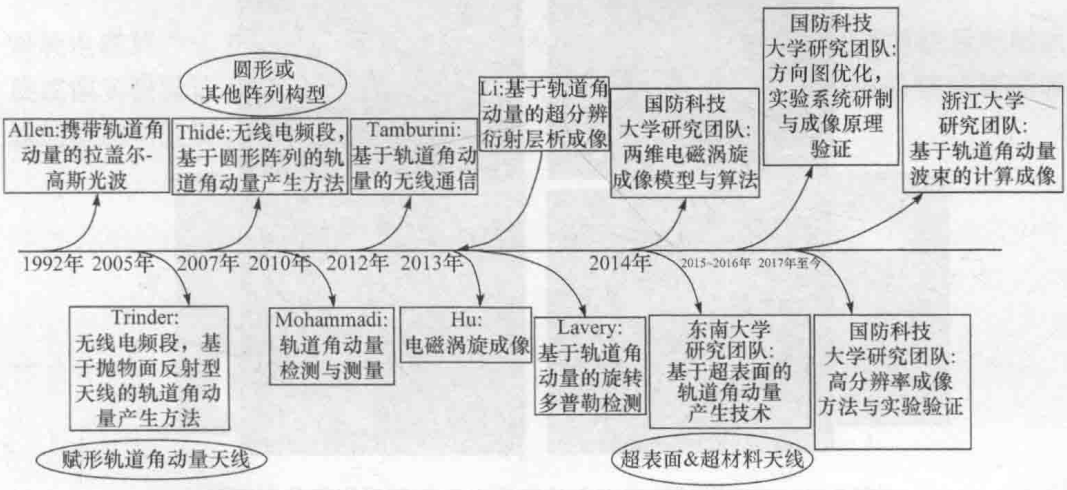



图1.5 涡旋电磁波及其应用的发展历史

1992年，Allen等[42]在研究拉盖尔-高斯光束时发现，受空间方位角调制的光束不仅具有自旋角动量，而且携带轨道角动量，其相位波前不再是平面，而是绕着传播方向旋转，呈现螺旋形结构[35]。此时，光轴上存在相位奇点，光束中心场强恒为零，形成涡旋状，因此称为光学涡旋[43,44]。随后，光学涡旋波在量子操控、光学通信及量子探测等领域迎来了蓬勃发展[45-47]，例如，在光学通信应用领域，轨道角动量调制可以用来增加信道容量、提升信息传递速率[48-50]。2005年，Trinder[51]设计的抛物面反射型天线在无线电频段产生了携带轨道角动量的电磁波。此后，关于轨道角动量天线的研究主要包括螺旋形抛物面[52]、螺旋形相位平板[53]、圆极化贴片天线[54,55]、行波圆形环状天线[56]等。

2007年，Thidé等[57]提出了采用均匀排布的圆环阵列产生无线电频段涡旋电磁波的方法，对辐射场特性进行了研究(图1.6)，为轨道角动量在无线电通信领域

的应用奠定了重要基础。Mohammadi 等[58,59]提出相位梯度法和单点测量法对辐射场局部轨道角动量状态进行测量和估计，这一技术为辐射场质量分析与评价提供了有效的方法。2012 年，Tamburini 等[60]在意大利威尼斯河两岸开展了首次基于轨道角动量的无线通信实验，验证了轨道角动量在无线电通信中应用的技术可行性，如图 1.7 所示。该实验中采用螺旋形抛物面天线产生轨道角动量模式数为 1 的涡旋电磁波，同时另一个八木天线产生传统电磁波，在同一载频（$f$ = 2.414GHz）上发送不同的调频信号，成功实现了长达 442m 的无线通信传输。然而，目前关于轨道角动量调制能否增加无线通信中的信道容量这一问题存在诸多争议[61-63]，有待进一步的理论论证与实验验证。

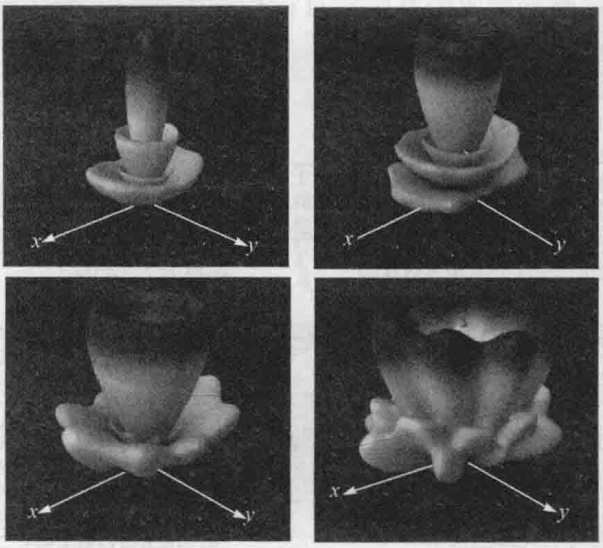



图 1.6 基于圆环阵列产生的涡旋电磁波辐射能量分布图[57]

2013 年，涡旋电磁波在雷达成像与目标探测领域得到了快速发展，其中，郭桂蓉等[64]首次提出了电磁涡旋成像这一概念，结合贝塞尔函数的频谱特性，分析了轨道角动量拓扑荷数与方位角变量之间的近似对偶关系，利用滤波-逆投影和傅里叶变换方法进行了成像处理，指出了涡旋电磁波对雷达目标具有方位向成像的潜力，为新体制雷达设计、目标识别技术的发展提供了方向性指导。同年，Li 等[65]将涡旋电磁波应用到衍射层析成像技术中，获得了超瑞利极限的高分辨率成像结果（图 1.8），推动了亚波长成像技术的发展。Lavery 等[66]利用涡旋电磁波实现了对旋转目标的检测，该方法不依赖于雷达与目标之间的径向运动即可实现对旋转多普勒信息的高效检测。此外，Zhao 等[67]研究了无线电频段（$f$=20GHz）利用涡旋电磁波检测旋转多普勒频移的方法，并开展了原理验证实验，平均检测误差为 0.36%。2014 年以来，东南大学、西安电子科技大学、浙江大学等高校的相关研究团队[68-70]结合超表面和超材料技术设计多种涡旋电磁波产生天线，进一步丰富了