

# 复杂运动目标逆合成孔径 雷达成像技术

王勇 著

非外借

 科学出版社

# 复杂运动目标逆合成孔径 雷达成像技术

王 勇 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统阐述了复杂运动目标的逆合成孔径雷达成像基本理论与技术、非平稳信号的时频分析与参数估计技术。全书共8章。第1章介绍逆合成孔径雷达成像的基本原理、运动补偿技术的实现以及距离-多普勒成像方法;第2章对复杂运动目标 ISAR 成像的原理与方法进行总结和分析;第3~5章主要针对复杂运动目标 ISAR 成像的回波信号模型,分别从信号分解、时频分布和参数估计三个方面介绍相应的成像算法;第6章介绍分布式 ISAR 成像技术;第7章介绍具有旋转部件目标的 ISAR 成像算法;第8章针对舰船目标 ISAR 成像的特殊性介绍相应的成像方法。

本书可作为高等院校电子工程专业高年级本科生及研究生的辅导用书,也可从事有关雷达成像研究的科技工作者和工程技术人员提供参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

复杂运动目标逆合成孔径雷达成像技术/王勇著. —北京:科学出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-03-054806-1

I. ①复… II. ①王… III. ①逆合成孔径雷达-雷达成像-研究 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 247755 号

责任编辑:朱英彪 赵晓廷 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

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



2017年10月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年10月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:332 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序

雷达作为一种先进的探测工具,具有全天时、全天候、远距离获取目标信息的能力。随着科学技术的发展和人类对自然界探索的需要,现代雷达不仅能够对目标进行定位、监测和跟踪,还能实现对飞机、舰船、空间目标和地表等物体的成像,从而可以对目标进行识别,以及完成遥感、遥测等功能。根据雷达的不同工作方式及成像方式,成像雷达可分为逆合成孔径雷达和合成孔径雷达。当目标做平稳运动时,传统的距离-多普勒算法可以实现高分辨的逆合成孔径雷达成像。当目标做复杂运动时,由于散射点回波信号的多普勒频率是时变的,此时距离-多普勒算法会出现严重的方位向散焦问题,影响成像质量。

在雷达信号处理领域,对复杂运动目标逆合成孔径雷达成像的研究是一项十分引人注目的前沿课题,具有非常重要的实际应用价值和理论深度。以空中目标为例,逆合成孔径雷达技术可以全天时、全天候地对空中目标如飞机、导弹等进行二维成像,从而识别目标,捍卫领空和打击敌机、拦截敌弹入侵,在军事领域发挥日益重要的作用。但对于空中飞行目标,尤其是敌方飞机、导弹,很可能存在高机动飞行的情况,使得现有的成像算法和成像装置失效,进而导致无法对其进行有效拦截和打击。海面舰船目标是另外一种常见的复杂运动目标。虽然舰船目标与飞机目标的雷达成像原理相同,但由于舰船目标所处的环境比较复杂,它的成像条件也比飞机目标要复杂得多。以岸基逆合成孔径雷达为例,首先,海杂波的存在降低了回波信号的信噪比,这给回波信号的运动补偿带来很大困难;其次,在低俯仰角下,由于海平面的反射与折射,将不可避免地产生多径效应问题,这也是影响成像质量的一个重要方面;最后,在海情较高时,海水的波动起伏使舰船的姿态变化非常复杂,同时伴有偏转、俯仰和侧摆三维运动,这给舰船的逆合成孔径雷达成像带来很大的困难。同时,由于舰船目标的雷达成像是对三维物体进行二维成像,转轴的改变会导致成像投影平面也随之变化。

在上述情况下,目标运动的复杂性使目标散射点回波信号的形式变得异常复杂,需采用先进的信号处理方法并结合成像技术获得目标的高质量逆合成孔径雷达成像。该书作者近年来的主要科研工作就是围绕非平稳信号的时频表示新方法及其在雷达成像中的应用研究而展开的。信号的时频分析技术同时在时域和频域表示信号,能够更清楚地揭示信号的时变谱规律。该书作者分别从信号的参数化时频表示和非参数化时频表示两个方面进行了深入研究,较好地解决了目标复杂运动状态下的成像问题,具有较大的实际应用价值;同时,对目前应用日益广泛的分

布式逆合成孔径雷达成像技术、具有旋转部件目标的逆合成孔径雷达成像技术进行了认真的阐述。

该书是作者及其指导的研究生近年来在逆合成孔径雷达成像领域研究成果的总结,内容新颖,具有较强的理论性和实际应用价值,对从事雷达成像研究的科研人员和工程技术人员具有一定的参考作用。

中国科学院院士 刘永坦  
中国工程院院士

2017年3月

# 前 言

逆合成孔径雷达(ISAR)成像具有远距离、全天时和全天候的特点,在军用和民用方面都有着重大的实用价值。本书系统介绍了复杂运动目标逆合成孔径雷达成像的基本原理与信号处理新方法,并结合大量外场实测数据来验证成像方法的有效性。

本书是作者近 15 年来从事逆合成孔径雷达成像研究工作的总结,同时融入讲授研究生专题课“新体制雷达技术专题”和“现代雷达信号处理技术专题”过程中所积累的教学经验及成果。本书的主旨是使读者能够对逆合成孔径雷达成像的基本原理与方法有进一步的理解,同时全面深入地掌握复杂运动目标逆合成孔径雷达成像过程中所涉及的信号处理技术。

第 1 章,逆合成孔径雷达成像概述。简要介绍雷达成像的发展过程以及复杂运动目标逆合成孔径雷达成像信号处理的研究现状、逆合成孔径雷达成像的基本原理、运动补偿技术及成像算法、逆合成孔径雷达成像的横向定标等知识。

第 2 章,复杂运动目标 ISAR 成像的原理与方法。首先给出距离-多普勒法在实测数据 ISAR 成像中的应用,并分析其存在的问题;进而介绍复杂运动目标回波信号特点及 ISAR 成像的距离-瞬时多普勒法原理,并讨论两种超分辨算法在复杂运动目标 ISAR 成像中的应用;最后对目标复杂运动情况下的回波信号特点进行总结,并从信号处理的角度对其进行理论分析。

第 3 章,基于信号分解的复杂运动目标 ISAR 成像。首先对信号自适应 Chirplet 分解的方法进行改进,提出一种基于三次相位函数的快速分解算法,并研究其在 ISAR 成像中的应用;然后针对自适应 Chirplet 分解的不足,提出修正自适应 Chirplet 分解的概念及其相应的分解算法,并应用于复杂运动目标的 ISAR 成像中,以进一步提高成像质量。

第 4 章,基于时频分布的复杂运动目标 ISAR 成像。首先研究基于传统时频分布的 ISAR 成像方法;进而从交叉项抑制和时频聚集性两个方面综合考虑,提出适用于多分量多项式相位信号的新型时频分布;最后研究新型时频分布在复杂运动目标 ISAR 成像中的具体应用。

第 5 章,基于三次相位信号参数估计的复杂运动目标 ISAR 成像。首先研究在目标复杂运动情况下将散射点回波近似刻画为多分量三次相位信号的方法;进而分别提出基于三次相位信号参数估计算法的 ISAR 成像新技术;最后分析参数估计算法的统计特性,并通过仿真和实测数据,验证新方法的有效性。

第6章,分布式 ISAR 成像技术。首先介绍分布式 ISAR 的概念并对其具体原理进行分析;进而介绍分布式 ISAR 成像所需的详细处理步骤,通过对平稳目标的仿真和实测数据的处理,验证分布式 ISAR 的有效性和优越性;最后研究分布式 ISAR 技术应用于非平稳目标成像的情况,通过仿真数据的处理,证明此技术的有效性。

第7章,具有旋转部件目标的 ISAR 成像算法。首先建立 ISAR 成像模型并分析微多普勒效应;然后分别运用短时傅里叶变换法及改进的参数估计算法去除微多普勒效应;最后通过信号仿真及点目标成像模型验证信号处理方法和成像算法的有效性,获得去除旋转部件后刚体目标的 ISAR 像。

第8章,舰船目标的 ISAR 成像。针对舰船目标 ISAR 成像的特殊性展开深入研究。首先介绍舰船目标二维成像过程中的成像数据段选取、成像方法等;进而研究基于干涉技术和多输入多输出技术的舰船目标三维成像方法,给出仿真结果。

本书从非平稳信号处理的角度介绍复杂运动目标的雷达成像算法,注重理论与实际的紧密结合。本书以翔实的理论分析为基础,实例丰富,结构体系完整,写作上深入浅出,具有较好的可读性。

本书第1~5章由王勇撰写,第6章由王勇、张涛撰写,第7章由王勇、康健撰写,第8章由王勇、李雪鹭撰写。全书由王勇撰写大纲并统稿。在本书撰写过程中,哈尔滨工业大学电子工程技术研究所许荣庆、姜义成等给予大力指导与帮助,并提出宝贵建议;同时得到了博士研究生王照法和硕士研究生冯帅、周菁等的大力支持,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评、指正。

作者

2017年3月

# 目 录

序	
前言	
第 1 章 逆合成孔径雷达成像概述	1
1.1 引言	1
1.1.1 雷达成像发展过程	1
1.1.2 复杂运动目标逆合成孔径雷达信号处理	2
1.2 逆合成孔径雷达成像	11
1.2.1 逆合成孔径雷达成像的基本原理	11
1.2.2 逆合成孔径雷达运动补偿技术	12
1.2.3 逆合成孔径雷达成像算法	14
1.3 逆合成孔径雷达成像的距离-多普勒法	14
1.3.1 目标回波模型	14
1.3.2 转台成像仿真实验	16
1.3.3 真实数据成像方法与结果	18
1.4 逆合成孔径雷达像的横向定标	21
1.4.1 用解调频法估计线性调频信号初始频率及调频率	22
1.4.2 基于解调频参数估计方法对逆合成孔径雷达像进行横向定标	23
1.5 本章小结	27
参考文献	27
第 2 章 复杂运动目标 ISAR 成像的原理与方法	34
2.1 引言	34
2.2 基于距离-多普勒法的实测数据 ISAR 成像及分析	35
2.3 复杂运动目标 ISAR 成像原理	37
2.3.1 用逐次消去法分解多分量线性调频信号	39
2.3.2 ISAR 成像结果及分析	44
2.4 复杂运动目标 ISAR 成像的超分辨率方法	48
2.4.1 基于松弛迭代技术的超分辨率方法	48
2.4.2 基于 APES 技术的超分辨率方法	49
2.4.3 实测数据超分辨 ISAR 成像结果	51
2.5 复杂运动目标 ISAR 回波信号特点	51



2.6	本章小结	55
	参考文献	55
<b>第3章</b>	<b>基于信号分解的复杂运动目标 ISAR 成像</b>	<b>58</b>
3.1	引言	58
3.2	自适应 Chirplet 分解的快速算法	59
3.2.1	单分量信号参数估计	59
3.2.2	多分量信号参数估计	60
3.3	基于自适应 Chirplet 分解的 ISAR 成像方法	64
3.4	修正自适应 Chirplet 分解法及其应用	66
3.4.1	修正自适应 Chirplet 分解的基本原理	66
3.4.2	修正自适应 Chirplet 分解的最大似然方法	67
3.4.3	修正自适应 Chirplet 分解的快速算法	68
3.4.4	修正自适应 Chirplet 分解实验结果	72
3.4.5	基于修正自适应 Chirplet 分解的复杂运动目标 ISAR 成像	73
3.5	本章小结	74
	参考文献	74
<b>第4章</b>	<b>基于时频分布的复杂运动目标 ISAR 成像</b>	<b>77</b>
4.1	引言	77
4.1.1	线性时频分布	77
4.1.2	非线性时频分布	78
4.2	基于传统时频分布的复杂运动目标 ISAR 成像	81
4.2.1	线性时频分布	81
4.2.2	双线性时频分布	83
4.2.3	一种新的时频分布	85
4.2.4	重排时频分布	87
4.3	新型时频分布的构造及其在 ISAR 成像中的应用	89
4.3.1	基于 Wigner-Ville 分布和 L-Wigner-Ville 分布的核函数设计方案	90
4.3.2	基于指数型相位匹配原理的核函数设计方案	100
4.3.3	具有复数时间延迟变量的时频分布的构造	104
4.3.4	多项式 Wigner-Ville 分布的频域卷积实现	108
4.3.5	四阶复时间延迟型多项式 Wigner-Ville 分布	112
4.3.6	基于新型时频分布的复杂运动目标 ISAR 成像方法	114
4.4	本章小结	116
	参考文献	116

---

<b>第 5 章 基于三次相位信号参数估计的复杂运动目标 ISAR 成像</b> .....	120
5.1 引言 .....	120
5.2 复杂运动目标回波特性分析 .....	120
5.3 基于局域多项式 Wigner 分布的三次相位信号参数估计 .....	122
5.3.1 局域多项式 Wigner 分布定义 .....	122
5.3.2 单分量三次相位信号的局域多项式 Wigner 分布 .....	122
5.3.3 多分量三次相位信号的局域多项式 Wigner 分布 .....	123
5.3.4 局域多项式 Wigner 分布的统计特性分析 .....	124
5.3.5 仿真结果分析 .....	129
5.4 基于 IHAF 的三次相位信号参数估计 .....	131
5.4.1 IHAF 的定义 .....	131
5.4.2 基于 IHAF 的单分量三次相位信号的三次相位系数估计 .....	132
5.4.3 基于 IHAF 的多分量三次相位信号的三次相位系数估计 .....	132
5.4.4 IHAF 算法的统计特性分析 .....	133
5.5 基于 LPWD 和 IHAF 的复杂运动目标 ISAR 成像方法 .....	134
5.5.1 基于 LPWD 的复杂运动目标 ISAR 成像算法 .....	134
5.5.2 基于 IHAF 的复杂运动目标 ISAR 成像算法 .....	135
5.6 ISAR 成像结果 .....	136
5.6.1 仿真数据 .....	136
5.6.2 加性噪声情况下的成像结果分析 .....	141
5.6.3 乘性噪声情况下的成像结果分析 .....	144
5.6.4 实测数据 .....	145
5.7 基于三阶匹配傅里叶变换的复杂运动目标 ISAR 成像 .....	149
5.7.1 二阶匹配傅里叶变换简介 .....	150
5.7.2 三阶匹配傅里叶变换 .....	150
5.7.3 三阶匹配傅里叶变换的统计特性分析 .....	151
5.7.4 仿真结果 .....	159
5.7.5 基于三阶匹配傅里叶变换的 ISAR 成像算法 .....	160
5.8 本章小结 .....	163
参考文献 .....	163
<b>第 6 章 分布式 ISAR 成像技术</b> .....	167
6.1 引言 .....	167
6.2 分布式 ISAR 成像的基本原理 .....	168
6.3 分布式 ISAR 成像处理步骤 .....	172
6.4 仿真和实测数据处理 .....	174

6.4.1	单散射点仿真 .....	174
6.4.2	多散射点仿真 .....	175
6.4.3	实测数据处理 .....	179
6.5	分布式 ISAR 技术应用于非平稳目标的成像 .....	180
6.6	本章小结 .....	183
	参考文献 .....	183
<b>第 7 章</b>	<b>具有旋转部件目标的 ISAR 成像算法</b> .....	<b>184</b>
7.1	引言 .....	184
7.2	含旋转部件的目标成像模型 .....	184
7.3	基于时频分析的去微多普勒效应的 ISAR 成像算法 .....	186
7.3.1	信号的短时傅里叶变换 .....	186
7.3.2	单频信号与正弦调频信号分离的基本原理 .....	186
7.3.3	去微多普勒干扰的 ISAR 成像算法 .....	189
7.4	改进的去微多普勒效应的 ISAR 成像算法 .....	191
7.5	本章小结 .....	195
	参考文献 .....	195
<b>第 8 章</b>	<b>舰船目标的 ISAR 成像</b> .....	<b>197</b>
8.1	引言 .....	197
8.2	舰船目标的最优成像时间段选取 .....	198
8.2.1	基于角运动参数估计的最优成像时间段选取方法 .....	198
8.2.2	基于多普勒中心估计的最优成像时间段选取方法 .....	206
8.3	舰船目标的 InISAR 三维成像 .....	208
8.3.1	InISAR 三维成像 .....	210
8.3.2	针对舰船目标的 InISAR 三维成像 .....	212
8.3.3	基于最优成像时间段选取的舰船目标 InISAR 三维成像 .....	221
8.3.4	基于线性时频分析的舰船目标 InISAR 三维成像 .....	232
8.4	基于空间分割的舰船目标三维成像 .....	238
8.4.1	舰船目标 MIMO 雷达三维成像的信号模型 .....	239
8.4.2	舰船目标 MIMO 雷达三维成像原理 .....	241
8.5	本章小结 .....	250
	参考文献 .....	250

# 第 1 章 逆合成孔径雷达成像概述

## 1.1 引 言

### 1.1.1 雷达成像发展过程

雷达作为一种先进的探测工具,具有全天时、全天候、远距离获取目标信息的能力。随着科学技术的发展,现代雷达不仅能够对目标进行定位、监测和跟踪,还能实现对飞机、舰船、空间目标以及地表等物体的成像,从而可以对目标进行识别以及完成遥感、遥测等功能<sup>[1,2]</sup>。

成像雷达可分为两种,如果雷达移动,目标固定不动,为合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR);反之,若雷达固定不动,目标移动,则为逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)。合成孔径的概念可以追溯到 20 世纪 50 年代初,美国的威利首先提出可以用频率分析的方法改善雷达的角分辨率。与此同时,伊利诺伊大学利用相干雷达进行实验,采用非聚焦型综合孔径方法,于 1953 年得到第一张 SAR 图像。这是合成孔径原理和 SAR 发展的最初阶段。1953 年,在美国密歇根大学的暑期研讨会上,许多学者提出载机运动可将雷达的真实天线合成为大尺寸的线性天线阵列的新概念,用这种观点认识合成孔径原理,使人们意识到合成孔径雷达有聚焦和非聚焦工作方式之分。1957 年,密歇根大学研制的 SAR 进行了飞行试验,得到第一张全聚焦 SAR 图像,从此,合成孔径原理和 SAR 得到广泛的认可和不断的发展。1974~1984 年,SAR 被应用到各种民用方面,如测绘地形图、海洋学研究以及对冰川的研究等,同时,星载 SAR 技术也取得了很大的进展。

ISAR 与 SAR 几乎是同步发展的。20 世纪 60 年代初,在 M. L. Brown 领导下的 Willow Run 实验室就开展了对于旋转目标成像的研究。60 年代末,宽带的线性调频信号及高稳定的相干雷达技术已经成熟,相干雷达对转台上的缩比模型进行成像获得了成功。J. L. Walker 从 1970 年起开展旋转目标成像方面的研究,阐述了距离-多普勒成像理论。1978 年,C. C. Chen 等利用地面固定雷达对直线飞行和弯道飞行的目标进行了成像研究,获得令人鼓舞的成像结果。他们对信号的预处理、距离曲率、距离校准以及运动补偿等问题均进行了分析和研究。此后,ISAR 越来越受到世界各国的重视,其基本理论和信号处理方面都有很大的进展,

同时,人们对运动补偿问题进行了大量的研究,取得了丰硕的成果<sup>[2]</sup>。

近年来,国际上对 ISAR 的研究不断向实用化发展。由于 ISAR 具有全天候的能力,它是战略防御系统中极有前途的一种目标识别方法,在战术应用上,因其高分辨的成像能力,在防空、反舰和反潜斗争中都是十分有力的手段。此外,ISAR 在民用方面也有广泛的应用,许多国家有大量 ISAR 成像研究的报道。

国内在 ISAR 研究方面起步较晚。北京航空航天大学从 1986 年开始用转台对飞机、舰船和导弹等目标的缩比模型进行旋转目标的成像研究,并首先在国内得到旋转目标的二维 ISAR 图像。1987 年,ISAR 被列为国家级科研项目,从事这项研究工作的单位有哈尔滨工业大学、西安电子科技大学、南京航空航天大学、中国科学院电子学研究所、中国电子科技集团公司第十四研究所和中国航天科工集团第二研究院二十三所等。经过十多年的发展,ISAR 理论和技术在国内取得了重要进展。20 世纪 90 年代初,哈尔滨工业大学和中国航天科工集团第二研究院二十三所联合研制了实验 ISAR,通过多次实验得到大量宝贵的数据,大大推动了国内 ISAR 技术的发展。但是,从整体水平看,与国际先进水平仍有一定差距。

### 1.1.2 复杂运动目标逆合成孔径雷达信号处理

在 ISAR 成像中,迄今为止运算量最小、应用最为普遍的成像方法是距离-多普勒算法<sup>[3]</sup>,纵向距离分辨率依靠雷达发射宽频带信号,横向分辨率依靠目标转动的多普勒频率,首先经运动补偿使目标成为“自聚焦点”位于轴心的转台目标,然后进行成像处理<sup>[4]</sup>。整个成像过程可理解为:利用目标上各散射点子回波的不同时延,以及目标转动时子回波的不同多普勒频率,在距离-多普勒平面上呈现出目标散射点的强度分布图。其中,目标的多普勒信息是通过雷达回波每个距离单元进行傅里叶变换得到的。这种算法隐含两个假设,即目标尺寸和转角较小,目标散射点对距离单元游动的影响可不考虑,这一假设一般可以满足;另外,假设目标在水平面内均匀转动,在整个成像处理期间,散射点的多普勒频率是恒定的,这一假设对大型平稳运动的目标也可以满足。但在实际情况下,目标的运动状态经常伴随着机动性,复杂的运动状态会导致观测期间转速和转轴的变化。这里以舰船目标的 ISAR 成像为例,它的成像条件比飞机目标复杂得多,除了海杂波的存在降低了回波信号的信噪比,海面的波动起伏,使舰船的姿态变化非常复杂,同时伴有偏转(yaw)、俯仰(pitch)和侧摆(roll)三维运动,这给舰船的 ISAR 成像带来了很大的困难。同时,由于 ISAR 对三维物体进行二维成像,转轴的改变会导致成像投影平面也随之变化。此时,目标散射点回波的多普勒信号是时变的,传统的距离-多普勒成像方法得到的图像非常模糊,无法识别目标,因此需要对回波数据进行时频分析,得到每一个时刻散射点的高分辨瞬时多普勒谱,此即 ISAR 成像的距离-瞬时多普勒法。

根据目标机动性的强弱,可将目标散射点回波信号分为四种模型来进行研究:①常幅线性调频信号;②常幅多项式相位信号;③变幅多项式相位信号;④基于时频分析方法直接得到信号的时频结构。其中,模型①~模型③是基于信号的参数估计原理,模型④是基于信号的时频表示原理,两者可归结为对目标的回波信号进行时频分析。时频分析技术可以精确掌握每个信号分量瞬时频率和瞬时能量的变化规律,将其应用于机动目标的 ISAR 成像中,可以大大提高成像质量。

综上所述不难看出,可以通过信号处理的方法来提高机动目标 ISAR 成像的质量,此时需对目标回波信号进行一般性的归纳与综合,进而采用时频分析原理,从参数估计和时频表示两个方面对其进行分析。根据 Stone-Weierstrass 理论,在一有限观测时间内,任一信号都可以表示成多项式相位信号的形式。因此,可将机动目标 ISAR 回波信号近似成为多分量多项式相位信号,通过对其进行分析与处理,来解决 ISAR 成像中存在的问题。

多项式相位信号广泛存在于工程技术领域,除了在雷达信号处理中目标回波可视为多项式相位信号<sup>[5]</sup>,在声呐、无线电通信系统中,由于传播介质物理特性的时常扰动,传播的信号频率发生变化<sup>[6]</sup>;接收系统与目标之间的相对运动产生的多普勒效应也会使信号的频率发生改变<sup>[7]</sup>。此外,生物医学中的信号如脑电图信号、鸟声信号和蝙蝠声呐信号等也可视为多项式相位信号<sup>[8]</sup>。多项式相位信号也广泛应用于地震探测、地质勘探和医学成像等众多研究领域<sup>[9]</sup>,因此,对于多项式相位信号的研究具有重要的实际意义。

根据信号的一阶和二阶统计量是否与时间有关,可将其分为平稳信号和非平稳信号。多项式相位信号属于非平稳信号,又称为时变信号,其频率随时间有较大的变化,呈现出较强的时间局部性<sup>[10]</sup>。对于多项式相位信号的研究目前主要从两方面入手:一方面是多项式相位信号参数估计;另一方面是多项式相位信号的时频表示,两者均可很好地刻画多项式相位信号的内在结构特性,但各有利弊。其中,多项式相位信号参数估计包括两方面内容:一方面是采用信号处理的方法直接对信号的相位系数进行估计,但这往往受到计算量和估计精度的限制;另一方面是采用信号分解的方法,将其分解成为一系列基函数的线性组合,这样可以了解有关信号更细节、更全面的信息,但是,对于最优基函数的选取仍是尚未解决的问题。多项式相位信号的时频表示是分析多项式相位信号又一个直接而且非常有效的工具。近年来,时频分析理论不仅在理论上有了快速的发展,还被成功地应用于许多信号处理领域,但也仍然有许多有关时频分析的问题尚待解决。可见,无论是实际的信号处理应用领域,还是信号处理的理论方法,对于多项式相位信号的研究都具有重要的意义和价值。

对于机动目标的 ISAR 成像,Chen 等于 1998 年提出了一种新的 ISAR 成像方法,它应用时频分析技术代替传统的傅里叶变换来对目标进行瞬时成像<sup>[11]</sup>。实

验表明这一方法可以较好地解决机动目标的 ISAR 成像问题。2000 年,Chen 等给出了目标同时具有偏航、俯仰及横滚运动时的成像模型<sup>[12]</sup>。2001 年,Berizzi 等给出机动目标瞬时成像的模型和性能分析<sup>[13]</sup>;2002 年,Xia 等从理论和实验方面研究了将短时傅里叶变换用于 ISAR 机动目标成像的方法<sup>[14]</sup>。在国内,西安电子科技大学、哈尔滨工业大学等单位也对机动目标 ISAR 成像进行研究,得到一系列研究成果<sup>[15-18]</sup>。由于对机动目标 ISAR 成像研究的时间并不长,有许多问题尚未得到解决,机动目标 ISAR 成像现阶段依然是 ISAR 成像技术发展的前沿和难点。前面提到,可以将机动目标 ISAR 回波信号近似成为多分量多项式相位信号,通过对其进行分析与处理,来解决 ISAR 成像中存在的问题。因此,多项式相位信号的参数估计是解决机动目标 ISAR 成像问题的一个有效途径。下面将对有关多项式相位信号参数估计问题的研究进展与现状进行详细介绍。

### 1. 线性调频信号的参数估计

线性调频信号是多项式相位信号的一个特例,这里单独对其进行分析。实际上,对于线性调频信号的研究本身就是信号处理领域中的一个重要内容,这是因为线性调频信号是各种复杂信号的一种最简单的近似,在对精度要求不是非常高的情况下,自然界中的许多信号都可近似成为线性调频信号。对于线性调频信号的参数估计,目前的方法大致可分为如下几类。

#### 1) Wigner-Hough 变换(Wigner-Hough transform, WHT)方法<sup>[19]</sup>

给定能量有限的信号  $s(t)$ ,定义 WHT 为时域到  $(f, g)$  参数域的映射:

$$\text{WHT}_s(f, g) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi(f+g)\tau} d\tau dt \quad (1.1)$$

对于离散序列  $s(n), n=0, 1, \dots, N-1$  ( $N$  为偶数),其离散形式的 WHT 为

$$\begin{aligned} \text{WHT}_s(f, g) = & \sum_{n=0}^{N/2-1} \sum_{k=-n}^n s(n+k) s^*(n-k) e^{-j4\pi k(f+gn)} \\ & + \sum_{n=N/2}^{N-1} \sum_{k=-(N-1-n)}^{N-1-n} s(n+k) s^*(n-k) e^{-j4\pi k(f+gn)} \end{aligned} \quad (1.2)$$

此时,对于线性调频信号  $s(n) = Ae^{j(\varphi_0 + 2\pi f_0 n + \pi g_0 n^2)}$ ,其 WHT 在  $(f_0, g_0)$  处出现峰值。因此,可通过对 WHT 在  $(f, g)$  平面上进行谱峰搜索来实现线性调频信号的初始频率和调频斜率估计,而且峰值大小为  $N^2 A^2 / 2$ ,这样可以获得信号幅度的估计;信号初始相位可由峰值处的相位值得到。对于多分量信号的情况,可采用洁净(clean)技术依次估计出每个信号分量的参数。WHT 方法利用了线性调频信号在时频平面上的特点,沿直线积分后进行峰值检测,提高了信噪比,有利于对调频斜率的估计。不足之处是,对调频斜率的估计需要进行搜索,这会产生较大的运算量。调频斜率估计的分辨率与其搜索间隔有关,当两个信号调频斜率相距较近时,

相互之间的作用以及噪声的干扰都会影响估计的结果;另外,沿直线积分的结果是强信号越强,弱信号越受到压制,使得对弱信号调频斜率的估计产生误差。

## 2) 分数阶傅里叶变换方法<sup>[20]</sup>

傅里叶变换是一种线性算子,其作用可以看成在时频平面上,信号从时间轴转到频率轴,旋转了  $\pi/2$  角度。分数阶傅里叶变换则是这样一种算子,它可以做任意角度的旋转,可表示时频面上的线性调频信号,定义为

$$s^p(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_p(t, u) s(t) dt \quad (1.3)$$

$$K_p(t, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} e^{j(\frac{1}{2}u^2\cot\alpha - ut\csc\alpha + \frac{1}{2}t^2\cot\alpha)}, & \alpha \neq n\pi \\ \delta(t-u), & \alpha = 2n\pi \\ \delta(t+u), & \alpha = (2n+1)\pi \end{cases} \quad (1.4)$$

式中,  $\alpha = \frac{\pi}{2} p$ ,  $p \in [-1, 1]$ 。

对一信号进行角度为  $\alpha$  的分数阶傅里叶变换,结果反映到时频平面,相当于该信号的 Wigner-Ville 分布(Wigner-Ville distribution, WVD)旋转了角度  $\alpha$ 。也可以说,对于一个线性调频信号,当其分数阶傅里叶变换旋转的角度  $\alpha$  与该线性调频信号在时频域的倾斜角度相同时,变换后会出现峰值,由此可以检测并估计线性调频信号的参数。分数阶傅里叶变换是一种一维的线性变换,可借助快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)来实现,因此,与基于 WHT 的方法相比,该方法降低了处理的复杂度。

## 3) 离散调频傅里叶变换方法

离散调频傅里叶变换是最近提出的一种有效的线性调频信号检测技术,它是傅里叶变换的一种推广形式,可以同时实现对线性调频信号初始频率和调频斜率的匹配,与传统的离散傅里叶变换类似。文献[21]中定义离散信号  $x(n)$ ,  $n=0, 1, 2, \dots, N-1$  的  $N$  点离散调频傅里叶变换为

$$X_c(k, l) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn+ln^2}, \quad 0 \leq k; l \leq N-1 \quad (1.5)$$

式中,  $W_N = \exp(-j2\pi/N)$ 。

对于单频信号  $x(n) = W_N^{(l_0 n^2 + k_0 n)}$ ,  $0 \leq k_0, l_0 \leq N-1$ , 如果  $N$  是素数,则  $x(n)$  的离散调频傅里叶变换幅度为

$$|X_c(k, l)| = \begin{cases} \sqrt{N}, & l=l_0; k=k_0 \\ 1, & l \neq l_0 \\ 0, & l=l_0; k \neq k_0 \end{cases} \quad (1.6)$$

式(1.6)表明,对于单个调频信号的离散调频傅里叶变换,如果信号的长度  $N$



是素数,则信号的离散调频傅里叶变换峰值出现在 $(k_0, l_0)$ 位置上,据此可进行信号的参数估计。它的不足之处是要求信号总的采样点数为素数,且经过采样变换后的信号参数必须是整数,否则其性能将急剧下降。基于此,文献[22]提出了修正形式的离散调频傅里叶变换,使得对信号的采样点数和信号参数不附带任何约束条件,为其工程应用铺平了道路。

#### 4) 解线性调频(Dechirp)方法<sup>[23]</sup>

对于线性调频信号  $s(t) = Ae^{j(\varphi_0 + 2\pi f_0 t + \pi g_0 t^2)}$ ,其相位是时间的二次函数,因此,可用一调频因子  $e^{-j\pi g t^2}$  与信号相乘,以抵消  $s(t)$  中  $g_0$  的作用。解线性调频表示如下:

$$DR_s(f, g) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j\pi g t^2} e^{-j2\pi f t} dt \quad (1.7)$$

当  $f=f_0, g=g_0$  时,式(1.7)将出现峰值,由此可以得到信号的初始频率和调频斜率为

$$(\hat{f}_0, \hat{g}_0) = \underset{f, g}{\operatorname{argmax}} |DR_s(f, g)| \quad (1.8)$$

该方法只需一维搜索,同时可借助快速傅里叶变换来实现,具有很高的计算效率;不足之处是信号参数的估计精度受搜索步长的影响。

以上四种方法是估计多分量线性调频信号参数比较常用的方法,此外,还有一些方法,如分数阶自相关法<sup>[24]</sup>、Radon-Ambiguity 变换法<sup>[25]</sup>、Radon-STFT 法<sup>[26]</sup>等,都是在这四种方法的基础上加以改进后提出的,这里不再赘述。这四种方法均具有很好的参数估计性能,理论分析表明,在较低的信噪比下,估值的误差依然十分接近其 Cramer-Rao 下限<sup>[27]</sup>。

## 2. 多项式相位信号的参数估计

多项式相位信号的参数估计一直是信号处理中的重点和难点问题<sup>[28]</sup>。其中,最为直接的方法当属最大似然估计法,该方法要考虑多维非线性优化问题,当维数较高时,计算量很大,且容易受局部极值的影响,因此该方法不易实现。比较容易实现的一种方法是基于乘积型高阶模糊度函数的方法,因其计算量较小,而逐渐成为估计多项式相位信号参数的一种主要方法<sup>[15,29]</sup>。此外,通过估计多项式相位信号的瞬时频率变化率,进而得到其相位系数的方法在最近被提出,该方法具有较小的计算量和较高的参数估计精度,是一种比较实用的新方法<sup>[30,31]</sup>。下面将对这两种方法分别进行详细介绍。

### 1) 乘积型高阶模糊度函数法

考虑  $K$  分量  $M$  阶多项式相位信号为

$$s(t) = \sum_{k=1}^K a_k \exp\left(j \sum_{m=1}^M c_{k,m} t^m\right) \quad (1.9)$$