



高新科技译丛

Bistatic SAR/GISAR/FISAR Geometry,
Signal Models and Imaging Algorithms

双基地SAR/GISAR/FISAR 观测几何、信号模型和成像算法

【保加利亚】 Andon Dimitrov Lazarov Todor Pavlov Kostadinov 著
黄海风 孙造宇 译 张启雷 审校

WILEY



国防工业出版社
National Defense Industry Press

高新科技译丛

双基地 SAR/GISAR/FISAR 观测几何、信号模型和成像算法

**Bistatic SAR/GISAR/FISAR Geometry,
Signal Models and Imaging Algorithms**

[保加利亚] 安东·迪米特罗夫·

拉扎罗夫 (Andon Dimitrov Lazarov)

托多尔·帕夫洛夫·科斯塔迪诺夫

著

(Todor Pavlov Kostadinov)

黄海风 孙造宇 译

张启雷 审校

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军-2015-056 号

图书在版编目 (CIP) 数据

双基地 SAR/GISAR/FISAR 观测几何、信号模型和成像算法/
(保)拉扎罗夫(Lazarov, A. D.), (保)科斯塔迪诺夫(Kostadinov,
T. P.) 著; 黄海风, 孙造宇译. —北京: 国防工业出版社, 2015.12
(高新科技译丛)

书名原文: Bistatic SAR/GISAR/FISAR Geometry, Signal Models
and Imaging Algorithms

ISBN 978-7-118-10565-0

I. ①双… II. ①拉… ②科… ③黄… ④孙… III. ①双基地
雷达—研究 IV. ①TN959

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 301205 号

Bistatic SAR/GISAR/FISAR Geometry, Signal Models and Imaging Algorithms

Translation from the English language edition:

Bistatic SAR/GISAR/FISAR Geometry, Signal Models and Imaging Algorithms

By Andon Dimitrov Lazarov, Todor Pavlov Kostadinov

©ISTE Ltd 2014

All rights reserved. This translation published under license.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 10¼ 字数 190 千字

2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1-2000 册 定价 69.90 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

译者前言

本书研究的对象是双基地 SAR 系统,该系统基于已有雷达、GPS、通信和广播等信号作为发射源,构建发射源、目标、接收机这样一个完整的双基地雷达链路。双基地 SAR 具有隐蔽性好、抗干扰能力强、获取双站地物属性有利于图像解译、能够利用多种照射源信息、实现长基线干涉测绘等优势,是满足国防装备现代化需求的高新技术,目前已有海岸成像警戒双基地雷达系统等装备,国外第一个双星编队双基地 SAR 系统(TanDEM-X 系统)也已在轨运行。双基地 SAR 可以实现全天时、全天候的观测,在军事侦察(战场侦察、目标检测、毁伤评估等)和国民经济建设(地形测绘、地质勘探、海洋开发、精细农业、森林观测等)中具有广泛的应用前景。

原著 2014 年出版,引用的主要文献也都是 2010 前后的文献,内容具有前瞻性。书中研究的双基地 BGISAR、FISAR 以及 SS-BSAR 等也是最近几年提出新的观测模式。本书建立了一般化的理论模型,包括了 SAR、GISAR、FISAR 等多种 SAR 观测模式,也包括了雷达、GPS、通信和广播等不同信号体制,内容全面,所提出的模型和信号处理方法对不同形式的双基地 SAR 研究具有重要参考价值。

与国内外同类书相比,本书对双基地 SAR 系统理论进行抽象提炼,形成统一模型,并进行双基地 SAR 成像一般化理论探索,理论性和系统性强,在讲述理论之后,都有仿真验证,也具有较强的操作性。本书比较适合相关专业的在校师生、工业部门的工程师和专业技术人员阅读,方便系统地掌握双基地 SAR 理论。国内在双基地 SAR 方面的科研、教学还处在发展阶段,本书的翻译出版可以为这方面的工作提供有益的参考。本书的翻译工作是在国家自然科学基金项目(61002031)“多维 SAR-Hermitian 乘积的统计建模理论与噪声抑制新方法研究”、国家自然科学基金重大研究计划项目(91438202)“空间分布式 SAR 高精度干涉成像基础理论与关键技术”的资助下完成的。

译者

2015 年 9 月

致 谢

本书作者非常感谢 MEYS 项目的负责人 DSc Hristo Kabakchiev 教授的帮助,同时本书受到了保加利亚科学基金项目 DTK 02/08/2009, DDVU 02/50/2010 的资助。

目 录

第 1 章 双基地 SAR 概述	1
1.1 引言和主要定义	1
1.2 无源星地双/多基地 SAR	2
1.3 前向散射雷达	4
1.4 运动目标问题——多基地 SAR 中的逆问题	5
1.5 双基地 SAR 建模、成像、方法和算法	5
1.5.1 移变和移不变飞行几何下的距离迁移算法	6
1.5.2 基于 Loffeld 双基地方程的双基地点目标参考谱	6
1.5.3 目标参数提取及成像	7
第 2 章 双基地 SAR 几何	10
2.1 双基地 GISAR 观测几何和运动特性	10
2.2 多基地 BSAR 观测几何和运动特性	13
2.3 BFISAR 观测几何和运动特性	15
2.3.1 运动参数估计	16
第 3 章 双基地 SAR 波形和信号模型	18
3.1 短脉冲波形和双基地 SAR 信号模型	18
3.1.1 短脉冲波形	18
3.1.2 短脉冲双基地 SAR 信号模型	19
3.1.3 短距离 BFISAR 构形下的目标参数估计	20
3.2 线性调频脉冲波形	20
3.2.1 LFM 双基地 SAR 信号模型	21
3.3 线性调频连续波形和 BSAR 信号确定部分建模	22
3.4 相位编码波形	23
3.4.1 巴克相位编码	24
3.4.2 补码	25
3.4.3 BSAR 发射补码调制波形	25
3.4.4 GPS C/A 相位编码	26
3.4.5 GPS P 相位编码	28

3.4.6	DVB-T 相位编码	31
第 4 章	双基地成像算法	33
4.1	短脉冲波形的双基地成像	33
4.2	线性调频脉冲波形的双基地成像	35
4.3	PCM 双基地成像	36
4.4	熵最小化自聚焦算法	38
4.5	多基地 SAR 成像算法验证	39
第 5 章	双基地 SAR 空间分辨率分析	47
5.1	通用的 BSAR 距离和多普勒分辨率	47
5.1.1	BSAR 距离分辨率	47
5.1.2	BSAR 多普勒分辨率	49
5.2	顺轨距离分辨率	49
5.3	视线向距离分辨率	52
第 6 章	双基地 SAR 仿真结果	54
6.1	实例 1: 短脉冲波形的双基地 FISAR 结果	54
6.1.1	BFISAR 参数估计	54
6.1.2	BFISAR 信号建模算法	54
6.2	实例 2: LFM 波形的双基地 FISAR 结果	59
6.2.1	BFISAR 几何及等距椭圆参数估计	59
6.2.2	BFISAR LFM 信号建模算法	60
6.2.3	图像重建算法和试验结果	61
6.3	实例 3: LFM 波形的非对称双基地 FISAR 结果	67
6.3.1	BFISAR LFM 信号建模算法	67
6.3.2	BFISAR 图像重建算法和试验结果	68
6.4	实例 4: Barker PCM 波形的双基地 GISAR 结果	71
6.4.1	BGISAR 巴克相位编码	72
6.4.2	BGISAR 图像重建算法和仿真结果	73
6.5	实例 5: GPS C/A PCM 波形的双基地 GISAR 结果	78
6.5.1	BGISAR GPS C/A 相位编码信号模型	79
6.5.2	BGISAR 图像重建算法和仿真结果	80
6.6	实例 6: GPS P PCM 波形的双基地 GISAR 结果	82
6.6.1	BGISAR GPS P 相位编码信号模型	83
6.6.2	BGISAR 图像重建算法和仿真结果	85

第 7 章 双基地 SAR 算法 Matlab 程序实现	89
7.1 直升机图像重构	89
7.2 双基地 GISAR 成像	90
7.3 短脉冲波形的双基地 FISAR 成像	101
7.4 连续 LFM 波形生成	105
7.5 脉冲 LFM 波形生成	106
7.6 脉冲 LFM 波形的双基地 FISAR 成像	107
7.7 GPS 粗码相位调制波形生成	113
7.8 GPS C/A PCM 波形的双基地 GISAR 成像	114
7.9 GPS 精码相位调制波形生成	120
7.10 GPS P PCM 波形的双基地 GISAR 成像	125
7.11 脉冲 LFM 波形的多基地 SAR 成像	134
7.12 等斜距椭圆生成	138
7.13 距离分辨率确定	140
参考文献	142

第1章 双基地 SAR 概述

本章将概述双基地 SAR 技术的最新研究结果,关注的重点主要包括双基地 SAR 的空间几何、方法、模型、信号处理和成像算法。

1.1 引言和主要定义

作为一种相干成像技术,合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具备对地面静止和运动目标进行高分辨成像的能力,是军事情报、侦察和监视的一种重要传感器^[1-6]。随着信号处理和成像方法的不断进步,在 SAR 系统的技术框架内,更多不同的雷达拓扑结构及其关键问题正在得到研究^[7,8]。

双基地 SAR (BSAR) 是 SAR 的一个子类。与单基地相比,双基地雷达具有收发分置的特点,能够为特征提取和增强提供更多的目标特性信息,因此在过去的 20 多年里得到了广泛地研究。这些研究成果揭示了森林、植被和土壤的关系,因此对于地形特征、地表沉积物和引流的研究很有价值。双基地 SAR 技术的研究还提供了土地分类和土地利用管理的重要信息,并对农业监测、土地测绘和考古研究等应用具有益处。

此外,为了满足更为先进的微波遥感系统的技术需求,双基地 SAR 有力地推动了 SAR 和逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)的技术进步。可以预期的是,双基地逆合成孔径雷达概念与 ISAR 相结合将进一步拓展成像雷达的应用范围和实用性。

文献[9]介绍了双基地 SAR 的基本概念、定义和数学公式推导,比如成像几何、卡西尼卵形线、距离历程、等距离线、等多普勒线、目标多普勒以及杂波多普勒扩展等。

文献[10-12]回顾了双/多基地雷达技术在军事、科学和商业方面的应用,同时也介绍了杰出科学家在双基地杂波信号处理方面的研究成果,主要包括为了改进双基地动目标识别性能的自聚焦成像方法。

文献[13, 14]阐述了双基地雷达的广泛应用,包括太空探索、国土防御、交通运输、航空航天以及气象应用等。该文献专注于双基地雷达更先进的应用和发展研究。在多位双基地雷达领域著名专家的共同努力下,该文献收集整理了双基地 SAR 和被动双基地雷达系统(Passive Bistatic Radar System, PBRs)的最新研究进展。在上述两个领域,作者研究了几种主要的双基地 SAR 拓扑结构:星载双基地 SAR、机载双基地 SAR、星地双基地 SAR,并对复兴的双基地 SAR

技术进行了分析。

从几何观点来说,双基地 SAR 是一个收发分置的 SAR 系统,其中收发分系统可以是一方固定或者双方都沿特定的轨迹运动^[15-17]。收发分置的特点使得双基地 SAR 系统能够得到目标的双基地散射特性,进而获得更为丰富的目标信息,增加军事应用中的抗攻击性,获取前视 SAR 图像以及增加雷达散射截面积(RCS)等。

即使对于在单基地 SAR 图像中表现为低 RCS 的目标,在双基地情况下,通过选择不同的双基地角可以增大其 RCS,进而能够使其在最终的图像中凸显出来。此外,在单基地情况下,由于双/多面角效应造成的后向散射过强,城市区域的 SAR 图像会受到严重影响;而在双基地情况下,该影响可以通过选择不同的观测角度加以削弱。文献[18]中介绍了 TanDEM-X 编队飞行系统的双基地干涉 SAR 试验。试验结果表明:相比于单基地 SAR 图像,双基地 SAR 图像比单基地更加均匀。双基地 SAR 可以安装在不同的平台上,例如,可以将接收机安装在飞机、无人驾驶飞行器^[19]上,发射机安装在卫星上,或者发射机和接收机分别安装在不同的飞机上。无论如何,对于收发分置的双基地 SAR 系统来说,空间同步和时间同步都是一个关键问题。一种解决天线波束空间同步的办法是采用相控阵天线实现波束的电扫描,以利用接收天线波束快速跟踪发射天线波束的指向。

文献[19]中描述了一种利用已在轨的星载 SAR(如 ENVISAT, ERS-2, RADARSAT, TerraSAR-X 等)作为机会照射源,利用飞机搭载接收机的双基地 SAR 配置。对该系统而言,关键在于降低录取回波所需的数据吞吐量。一种有效的解决方法是:首先对接收到的直达波信号进行匹配滤波,进而检测目标场景有效散射信号所在时段;然后只存储该时段内的回波数据。

文献[20]给出了矢量模型在双基地 SAR 信号处理中的一种应用。其中发射机和接收机按设定的轨迹运动,但速度矢量不同。该文献在空间-时间域中定义点目标响应函数,然后利用驻定相位原理将其变换到频域进而得到点目标参考频谱。

文献[21]研究了双基地 SAR 的一些最新试验结果和处理方法,其中两部 SAR 被分别安装于两架飞机上来构成双基地系统,即:发射机安装于 AER-II 机载系统上,接收机安装于 PAMIR 机载系统上。基于该系统,研究人员开展了多种的“空不变”几何配置下的双基地 SAR 试验,并成功获取了高分辨双基地 SAR 图像。

1.2 无源星地双/多基地 SAR

无源星地双基地 SAR(SS-BSAR)是一类特殊的双基地 SAR(BSAR)系

统,它包含一个星载发射机和一个近地面的接收机。尽管 SS-BSAR 只是 BSAR 的一个子类,但也是一个门类广泛的双基地拓扑结构。SS-BSAR 的发射机可以是合作式或非合作式的卫星系统,而接收机可以搭载于飞机、汽车或固定站之上。近年来,这种双基地 SAR 模式受到了广泛关注,研究人员开展了不同配置的 SS-BSAR 技术研究。例如,利用卫星作为照射源的双基雷达^[22],接收机固定的 BSAR 的子孔径距离多普勒处理方法^[23],地基寄生式 SAR 试验^[24],星载雷达发射机载雷达接收的应用^[25],接收机固定模式的混合双基地 SAR 处理方法^[26]。其中,有一种无源 SS-BSAR 模式被广泛关注,它利用全球导航系统(如 GPS, GLONASS 以及正在研发的伽利略系统)作为照射源,接收机安装于飞机上。文献[27]研究了这种模式的成像算法,文献[28]则研究了信号检测性能,文献[29]研究了干扰评估方法,文献[30]给出了试验结果,文献[31]研究了运动补偿算法,文献[32]研究了非合作照射源选择问题。文献[33]研究了 SS-BSAR 新的拓扑结构。该拓扑结构以 GNSS 作为机会照射源,利用地面固定接收机来实现局部区域监视。

文献[34]描述了一种基于地面目标反射的 GPS 信号的三维多基地 SAR 成像系统,能够检测目标的运动和变化信息。这种双基雷达通过匹配滤波来改进空间分辨率。文献[35]描述了一些基于机会照射源的双基几何和新体制 SAR 系统。在一阶 Born 近似下,通过 Dip Move Out 操作,可以将双基地地震场测量几何等效为一个单基地几何,该距离模型称为 smile,是一个随时间缓慢变化但空间不变的模型。鉴于地震场测量和 SAR 测量十分类似,Dip Move Out 操作可以被移植到双基地 SAR 系统中。

无源雷达是一种用来探测跟踪飞机目标的先进遥感技术,有两种实现方式:无源跟踪(PET)和无源相干定位(PCL)。PCL 是一种双多基地雷达应用,可以选用的机会照射源多种多样,包括模拟电视,模拟 LF 无线电,数字视频广播(DVB-T),数字音频广播(DAB),GSM,WiFi 和 GPS 发射机等发射连续波信号的信号源。文献[36]研究了联合 PCL 和电子支持测量(ESM)跟踪系统可以达到更高的定位精度。文献[37]分析了场景位置高度对于 PCL 系统定位精度的影响。其他类型的无源雷达使用非合作的脉冲体制照射源作为发射机,如已有的脉冲雷达网络,包括航空管制雷达和早期预警雷达。在这种情况下,发射信号的主要参数(如载频、脉冲宽度、脉冲重复周期、信号带宽、调频信号参数等)需要被估计出来。文献[38]提出了一种改进通用线性调频变换递归算法来估计发射信号参数。针对 Cassidian 研发的一种利用 FM,DAB 和 DVB-T 广播信号作为发射信号的无源雷达,文献[39]研究了发射机识别方法,包括单频信号、FM 信号和 DAB 信号特征网络分析等。文献[40]通过实验证明了 DVB-T 照射源体制的无源雷达能够检测低空飞行器和地面运动目标。

EADS Cassidian 研制了一个多波段无源雷达实验系统,能够全天候全天时

接收并处理 FM, DAB 和 DVB-T 信号。该无源雷达三维定位系统基于多个椭圆曲线交汇实现目标定位, 文献[41]研究了这种系统的体系结构、ASTERIX 协议和外部网络兼容方法。

1.3 前向散射雷达

近年来, 前向散射雷达 (FSR) 受到了大学、研究所和工业部门的广泛关注。研究热点包括 FSR 双基地 RCS 和目标检测^[42]、阴影区 ISAR^[43]、FSR 检测^[44]、FSR 运动目标位置测量^[45]、FSR 车辆分类^[46]以及 ISAR 船只测量^[47]。文献[9, 48]阐述了 FSR 的基本原理。FSR 具有很多独一无二的优点, 如隐身目标探测稳健, 目标 RCS 强, 相干时间长, 信号接收稳定, 硬件简单等优点。当然也有许多缺点, 比如距离分辨率低、观测带窄, 大多数 FSR 的研究都局限于少数几个场景。已发表的 FSR 文献主要关注飞机目标, 也有文献研究了采用地基 FSR 实现双基地 SAR, 包括 FSR 车辆分类^[49]、FSR 地面目标检测^[50]、FSR 自动地面目标分类^[51]等, 但没有考虑不同强度的噪声对目标检测和分类的影响。

监视、监测和保卫海岸边界、海岸线和海上国土是国土安全的主要任务, 也是国民经济发展的重要保证。文献[52]建议在海面上布设一连串的浮标, 浮标中安装收发器, 当目标穿过相邻浮标之间的基线时, 能够根据目标的多普勒信号来检测目标。该系统能够用来检测低 RCS 目标, 比如滑板、充气船甚至游泳的人。不过, FSR 系统在弱小海洋目标检测方面有多约束条件。FSR 在模糊区没有距离分辨能力, 因此海杂波在相同多普勒区将淹没信号等。针对海洋环境背景, 文献[30]提出了一种超宽带 (UWB) FSR 系统, 并重点研究了系统性能、预期目标的前向 RCS 以及低掠地角下的 UWB 信号海面传播机理等问题。不同海洋环境下, UWB 前向 RCS, 海杂波能量以及杂波谱都不同。已经证明相比于窄带系统, 超宽带 FSR 系统具有较低的杂波能量和较窄的杂波谱, 因而系统性能得以提升, 在海杂波背景下, 弱小目标能够被检测。典型的弱小海面目标在不同频率和频谱宽度下的前向 RCS 也有分析结果。

文献[53]阐述了 FSR 在地面目标检测方面的应用, 着重研究了穿过 FSR 基线的地面目标的反射信号提取问题。由于目标信号淹没在强杂波和噪声干扰中, 难点在于如何从中提取目标的多普勒信号。已有的技术途径包括 Hilbert 变换和小波技术, 研究表明利用这些技术能够有效的检测目标的前向散射截面积。FSR 具备检测低强度和低信噪比目标信号, 以及低成本的优点, 使得在军民、海洋、医疗以及安全领域都有应用。

文献[19]阐述了一种适宜搭载于 UAV 上的 BSAR 接收机设计与构造, 并研究了其与发射机之间如何建立连续同步链路。同步信号的恢复采用匹配滤波来完成, 这可以通过在频域进行 FFT 算法来实现。文献[51]提出一种基于 FSR 微

传感器无线网络概念,用于地面目标的检测、参数估计(如速度)和自动目标分类(ATC)。显然,雷达载频不能太低(对应波长长),这是因为目标 RCS 在低频情况将显著降低。文献[51, 54, 55]指出人体目标在垂直极化,载频在 VHF 频段(70~120MHz)下有较强的 RCS。文献[56]的研究表明叶簇杂波能量严重依赖于载频大小。ATC 应用要求雷达工作在较短的波长,例如,小汽车的识别实验选择在频载 870MHz 附近^[46,57]。实验结果显示 FSR 能有效应用于 ATC,且目标能正确识别和分类。

文献[57]介绍和讨论了一个应用于地面目标分类的低频 FSR 网络的性能评估结果以及不同频率下的 ATC 实验。并展示了 VHF 频段不同系统频率下目标识别的可能性。

文献[58]讨论了双基地 SAR 成像系统中基于全极化三维绕射几何理论(GTD)的模型,模型还考虑了系统各要素(接收机、发射机和目标)的运动,以及基于扩展距离多普勒算法(RDA)的图像重建处理过程。

文献[59, 60]分别介绍了采用基于 L1 非合作式 GPS 接收机的 FSR 所开展的雷达目标探测可能性研究的实验结果,以及 FSR 中采用局部统计的目标识别简化算法。

1.4 运动目标问题——多基地 SAR 中的逆问题

基于压缩感知理论,在发射机和接收机随机分布的多基地观测几何中,采用前向窄锥形波束观测感兴趣区域,则能够对运动目标进行有效成像。在现有 SAR 运动目标处理方法中,主要通过匹配滤波方法解决目标散射和运动估计等耦合的非线性问题。与之不同的是,通过采用超完备字典方法,前向模型能够被有效线性化为稀疏条件下的大规模统一规范的逆问题求解。文献[2]提出了运用运动速度的超完备字典和压缩感知理论进行多基地 SAR 系统运动目标成像,并将该问题视为基于目标速度超完备字典的空间散射信号求逆的过程。

1.5 双基地 SAR 建模、成像、方法和算法

文献[61]讨论了采用相干脉冲雷达进行旋转目标的单/双基地距离-多普勒域成像。文献[62,63]提出并研究了几种双基地模型、成像方法和算法、以及近似的双基地点目标参考频谱。由于发射机和接收机的空间分置,相比于常规 SAR,BSAR 的成像几何配置更加灵活。双基地几何能应用于多种 SAR 功能中,例如,被动成像和监视、前视成像、干涉成像以及运动目标指示^[64-66]。由于收发分置,双基地 SAR 的成像算法和传统 SAR 成像算法不同。不考虑计算效率的情况下,时域后向散射算法是目前普遍使用的方法^[67]。

文献[15]提出一种移不变模式下的 BSAR 成像的扩展精确传输函数算法。该算法将双基地 SAR 等效为一个单基地 SAR, 进而直接采用常规 SAR 的二维传输函数。这个算法在等效处理中, 需要建立一个新的方位压缩函数, 还考虑了双基地 SAR 成像中的几何畸变校正。另外, 该算法具有一个良好的特性, 即计算流程及效率与单基地 SAR 的精确传输函数算法相同, 其有效性通过顺轨跟飞构形及前视构形下的点目标仿真得到了验证。

1.5.1 移变和移不变飞行几何下的距离迁移算法

在收发平台速度矢量相同情况下, 文献[68]首次提出二维观测几何下双基地距离迁移算法。文献[21]则提出了一种三维观测几何下的双基地距离迁移算法, 其中 SAR 图像是直接沿地表平面重建的。以单基地距离迁移处理方法的角度来看, 这种处理方法不是最优的, 但是在较大的几何参数范围内, 其误差都是可忽略的。这种基于傅里叶变换的处理器优势是其计算效率高。

一种距离迁移处理方法^[69]非常接近文献[21,70]的方法, 但是其应用了实际目标为参考以及采用了泰勒级数拟合线性相位项的假设; 另一种双基地 SAR 处理方法发表在文献[35,17]中, 其中的双基地处理是由原始数据卷积双基地变化项后的类单基地处理完成的。

即使不考虑振荡器同步、收发时序同步、天线指向、飞行协调和运动补偿等技术问题的情况下, 双基地聚焦算法仍需要进一步的发展和完善。针对移不变模式, 即收发平台具有相同的运动速度矢量, 文献[70]提出了一种双基地距离迁移算法, 向高效处理迈出了重要的一步。

1.5.2 基于 Loffeld 双基地方程的双基地点目标参考谱

文献[71]分析了基于 Loffeld 双基地方程 (LBF) 的双基地点目标参考谱。在 LBF 中, 人为假定发射机和接收机对方位的调制贡献相同。这种假设导致了 LBF 在一些极端情况下会失效 (如星发机收配置)。仿真结果显示文献中提出的双基地点目标参考谱在星发机收配置下依然有效。

在频域进行双基地 SAR 聚焦需要二维点目标参考谱。LBF 和级数反演方法已被提出来计算双基地 SAR 点目标参考谱。在文献[16]中, 原始的 LBF 利用了收/发多普勒贡献函数来通用化。原始 LBF 和其派生双基地公式 (如扩展 LBF) 都可以看做是固定多普勒贡献下的通用化 LBF 的特殊形式。基于此, 一个除了驻定相位原理误差外没有计算误差的理想 LBF 被推导出来。对于一般构形的双基地 SAR 而言, 其点目标参考解析谱可通过近似理想 LBF 来得到。在处理过程中, 将收/发多普勒贡献表示为一个幂级数, 进而逼近理想 LBF。对于双基地点目标参考谱的有效性问题的, 其误差限也被加以考虑。这些结果能够用于研究

特殊双站情况（如星发机收配置）以及大斜视情况（如双基地前视情况）下的成像算法。

通过采用步进调频信号及带宽合成方法，可以解决超高分辨率 SAR 系统的大带宽信号生成问题。但是，高分辨率 SAR 图像的生成不是一个可分离的二维压缩处理，因此在采用的成像算法中必须改进带宽合成处理过程。文献[4]证明了 SAR 极坐标格式算法（PFA）中带宽合成方法应用，讨论了脉冲串内子脉冲间的运动补偿问题，并详细探讨了信号处理的流程。最后采用点目标仿真的方法验证了所提出的方法。

文献[72,73]提出了基于调频变标的双基地 PFA 方法。这个新方法在距离向采用了调频变标以实现距离向重采样，这个算法中只包括复数乘及快速傅里叶变换。解调频及调频信号是分别进行处理的。此新方法的效果与原始方法相当，但是其效率得到了很大提高。点目标仿真的结果验证了此方法。

文献[74]提出了一种针对顺轨跟飞模式下的 LBF 新观点，对比分析了影响频谱精度的各种因素。研究证明，相对于其他因素，半双基地角的余弦有更为重要的作用，它表示基线-距离比是否等于半双基地角的正切。当半双基地角的余弦非常接近 1 时，LBF 谱具有高精度，并且对于基线长度（基线-距离比）和斜视角大小没有直接的影响。仿真试验详细讨论了影响谱精度的因素。

1.5.3 目标参数提取及成像

双基地 ISAR 能够通过两个（或多个）空间分置的雷达来完成对运动目标的观测。双基地构形同样可以通过一个雷达天线作为发射机而另一个雷达天线作为接收机来实现。文献[75]提出了几种双基地构形，可应用于三维运动参数估计以及三维干涉 ISAR 图像重建。文献[76]定义了双基地 ISAR 应用的一种通用化点扩散函数（PSF），并且讨论了适用的经典运动目标补偿以及距离-多普勒图像重建技术。

双/多基地雷达系统的优势在于其收发分置。在双基地雷达信号处理中，必须考虑斜距、多普勒、信噪比等因素与观测几何的关系。提取目标参数，例如，位置、速度、方向等，需要将时间与时间相关以及（或者）来自于不同系统的数据进行融合。文献[77]讨论了在收发分置系统中的同步问题，同时考虑了双/多基地雷达中的跟踪问题，进而采用仿真输入数据来估计参数，并对不同方法的估计测量精度进行了对比。

针对任意双基地 SAR 构形，文献[62]提出了一种基于级数反演、驻定相位方法以及傅里叶变换对的二维点目标频谱。通过保留两个级数展开中的足够多的项可以控制该频谱的精度，进而采用点目标仿真验证了其有效性。

针对是方位移不变的双基地 SAR 数据，文献[63]提出了一种双基地调频变标方法，采用了两种方法去推导点目标的距离-多普勒域表达式的不同部分。与

基于双基地二阶展开距离模型的成像方法对比,新算法给出了闭合形式的方位调制函数。另外,在距离向处理中利用了分数阶傅里叶变换,进而提高了分辨率。

基于精确的双基地点目标解析谱,文献[78]提出了一种高效率的调频变标方法,针对顺轨跟飞模式下的双基地 SAR 数据处理,可以将不同距离门的距离迁移校正至一个参考距离门。该算法中不需要插值操作,只需要快速傅里叶变换以及相位相乘。

双基地斜距历程中包含两个双曲线,导致精确获取二维点目标频谱的解析表达式比较困难。研究人员推导了几种近似的二维频谱,并利用其实现双基地 SAR 数据的聚焦。文献[79-81]建立了 3 种分别基于 LBF, Rocca 的 smile 算子以及级数展开方法的双基地点目标频谱之间的关系,并利用 X 波段双基地固定基线机载雷达仿真数据验证了点目标频谱的精度。

针对一般构形,文献[82]基于改进的扩展 LBF (ILBF),提出了一种新的双基地 SAR 距离-多普勒算法。研究表明,ILBF 谱和级数反演方法推导的谱同样准确。而基于 ILBF 谱的扩展,又提出了新的距离-多普勒算法处理方位移不变及移变双基地 SAR 数据。与已有双基地距离-多普勒算法相比,新算法具有较为简单的表达式并且能够处理中高斜视角双基地 SAR 数据。

文献[72,73]提出了一种基于零阶多项式模型的精确双基地点目标参考频谱。这个谱只包含两个双曲线平方根项,形式上非常接近单基地解析谱。新的公式可以看做是 LBF 的改进,并且可以处理多样的双基地构形。原始的 LBF 只在接收机和发射机的多普勒调制贡献近似相同的情况下有效。文献[71]中定义的扩展 LBF (ELBF) 采用了时间带宽乘积对不同平台的方位相位调制进行加权。然而,这种扩展只在小斜视双基地几何下有效。LBF 和 ELBF 都被展开至二阶推导近似的双基地谱,但是在复杂的双基地情况下,这种方法聚焦效果并不好。例如,大斜视角情况下,各自的时间-多普勒对应关系并不准确。

双基地 SAR 数据相对于普通单基地数据的处理更有挑战性,这是由于飞行几何更为复杂,并且数据经常是非平稳的。已有若干单基地频域算法被改造,可以应付有限的几种双基地构形。但是,为了处理诸如收发平台速度不相同、飞行轨迹不平行以及大斜视角等更一般的构形,还需要探索一种通用的算法。文献[83]提出了一种改进的非线性调频变标 (NLCS) 算法,可以处理一般构形的双基地数据。

传统的单基地算法,例如距离多普勒算法和调频变标算法,在双基地情况下性能并不好。通过针对现有双基地 SAR 处理算法的分析,例如,波束域算法^[68]和后向投影算法^[84],可以发现 NLCS 算法^[85]是一个有效的选择。NLCS 是一种新颖的双基地 SAR 图像的聚焦方法。针对两个平台采用相同的速度平行飞行情况下的双基地聚焦,文献对现有的 NLCS 算法进行了扩展和改进。

ONERA/DLR^[86]联合开展了 X 波段双基地 SAR 实验,探讨了双基地雷达面临的挑战。分别利用 E-SAR 和 RAMSES 搭载了两套单基地 SAR 系统,采用正侧视模式进行双基地成像。该试验采用了两种独立的构形,两种构形都采用了平行飞行轨迹以及小斜视角,提出的算法成功实现了两种情况下的聚焦。

文献[79-81]提出了基于距离-多普勒算法的双基地 SAR 处理(复图像获取)思想,其关键在于利用级数反演的方法推导了信号的解析形式的频谱。该频谱可以实现二次距离压缩(SRC)、距离迁移校正和方位压缩。这个算法能够实现方位移不变构形下的双基地聚焦,即发射和接收平台采用相同的速度平行飞行的情况。另外,由于在二维频域采用了 SRC,该算法还能处理较大斜视角和宽孔径情况下的数据。

基于精确双基地点目标解析谱,文献[78]提出了一种高效率调频变标算法,它针对顺轨跟飞模式的双基地 SAR 数据处理能够将不同距离门的距离迁移校正至参考距离。基线长度(基线距离比)对提出的算法没有直接的影响,因此能够处理大基线下的顺轨跟飞模式的双基地数据,甚至包括基线等于斜距的情况。整个处理过程中不需要插值操作,只需要快速傅里叶变换和相位相乘,因此效率较高。仿真实验验证了所提算法的有效性。

基于双基地 SAR 的调研,能够规划出本书工作需要达到的目标。本书提出的方法是对上述文献作者重要的理论和实践成果的一个补充。

(1) 双基地 SAR 拓扑的几何解析描述以及目标、发射机、接收机运动的主要运动方程的推导。

(2) 双基地 SAR 复杂形状目标反射信号的波形及构造的解析描述,可以表示为直接空域变换的双基地 SAR 成像处理。

(3) 针对不同双基地 SAR 信号,基于直接空域变换的图像重建过程推导。

(4) 双基地 SAR 绝对及相对距离分辨率的几何解析定义。

(5) 双基地 SAR 信号模型及图像重建算法的正确性和有效性的数值验证。

(6) 波形、观测几何、运动特性、信号模型以及图像重建处理的程序实现。

为了达到上述目的,本书采用矢量来表示观测几何和运动特性的方法来推导不同双基地 SAR 场景下主要的分析方程、观测几何方程及运动特性方程。此外,本书还考虑了 BSAR 信号模型和图像提取算法的实用性。