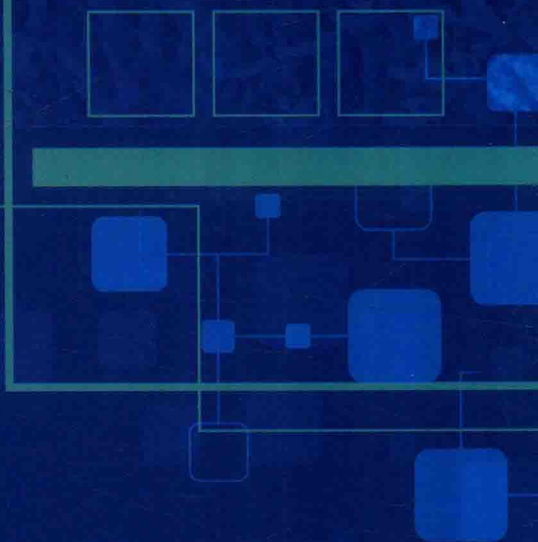
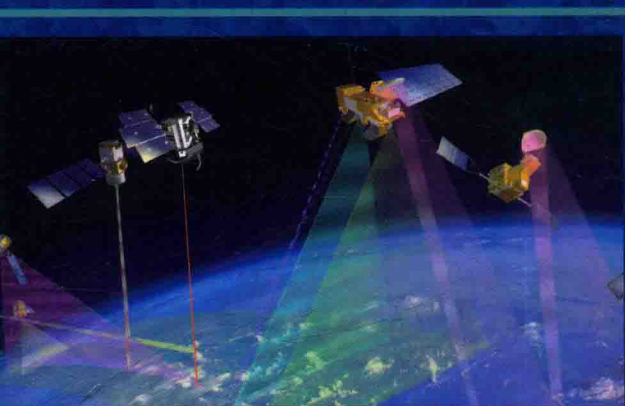


面向对象高可信SAR数据处理（上册） ——理论与方法

张继贤 黄国满 李平湘 李 震 陈尔学 等 著



科学出版社

面向对象高可信 SAR 数据处理(上册)

——理论与方法

张继贤 黄国满 李平湘 李 震 陈尔学 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以国家高技术研究发展计划(863计划)“十二五”主题项目“面向对象的高可信 SAR 处理系统”为背景,针对合成孔径雷达数据在地貌地物、森林植被等方面的处理与解译难题,阐述利用多角度、多波段、多极化、极化干涉等多模式航空航天 SAR 数据,建立基于散射机理的地物特性知识库,构建地形辐射校正、极化干涉处理、立体测量、基于知识的地物解译等模型,开发高分辨率机载极化干涉 SAR 数据获取硬件系统与 SAR 影像高性能解译软件系统,实现以精度高、可靠性强、识别类型丰富为特征的 SAR 影像高可信处理与解译的原理、技术与方法,并对成果在测绘、林业等行业的应用示范效果进行了展示和分析。

本书包括上下两册,可供摄影测量、遥感、地形测绘、林业遥感、资源环境遥感监测等领域的科技工作者、高等院校师生和从事相关工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

面向对象高可信 SAR 数据处理. 上册, 理论与方法 / 张继贤等著.
— 北京: 科学出版社, 2018.4

ISBN 978-7-03-057109-0

I. ①面… II. ①张… III. ①合成孔径雷达—图象处理 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 071052 号

责任编辑: 王 哲 霍明亮 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 迷底书装

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 4 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2018 年 4 月第一次印刷 印张: 20 1/2 插页: 14

字数: 410 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 一

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 和光学系统是遥感对地观测系统的左膀右臂, 因此 SAR 是对地观测领域不可或缺的重要组成部分。张继贤多年来带领团队潜心于 SAR 数据获取、处理及解译技术研究, “十一五” 期间研制了我国首套机载多波段多极化干涉 SAR 测图系统, 填补了我国在该领域的空白, 总体达到了国际先进水平, 多项关键技术国际领先。但是, 与光学遥感数据的处理技术和手段相比, SAR 数据理解译技术成熟度仍处于相对较低的水平, 国内外 SAR 处理软件带有明显的专业性, 还缺乏通用化的 SAR 数据处理软件, 制约了 SAR 技术的普及与应用。2011 年, 科技部批准了 863 计划“十二五” 主题项目“面向对象的高可信 SAR 处理系统” 的立项, 张继贤带领他的团队踏上新的征程, 开展了卓有成效的研究。

经过五年的攻关研究, 项目组突破了 SAR 影像精准处理、高精度三维信息提取与面向对象地物解译等 SAR 影像处理与解译核心技术, 研发了能处理国际国内主流航空航天 SAR 数据、功能全面、性能高效、具有 PB 级影像数据管理和并行处理解译能力的 SAR 影像处理解译系统, 并在高精度信息提取、SAR 影像地物高可信解译、地形测绘及林业等领域具有独特的优势。该系统与我国 SAR 对地观测传感器一起构成了我国航空航天 SAR 数据获取、影像处理、解译与应用的完整技术体系, 对于提高我国地理信息产业的技术水平, 增强我国空间信息产业的国际竞争实力, 提升国家科技自主创新能力, 培育地理信息相关行业新的经济增长点, 将起着非常重要的作用。

《面向对象高可信 SAR 数据处理 (上册) ——理论与方法》和《面向对象高可信 SAR 数据处理 (下册) ——系统与应用》是项目组近五年来在 SAR 数据高可信处理与解译方面的理论研究、技术攻关、软件开发和示范应用等系列成果的结晶。相信本书的出版, 对于进一步提高我国 SAR 数据理解译水平、推动 SAR 技术服务于国民经济建设和人民群众生活, 能够起到积极作用。

中国科学院院士
中国工程院院士

张继贤

序 二

SAR 在高精度地形测绘、地表形变监测、全天候资源环境监测等领域具有独特的优势。在传感器方面,我国已研发多套极化/干涉/极化干涉 SAR,实现了 SAR 传感器载荷与飞行平台的集成,掌握了航空航天 SAR 遥感数据获取关键技术。但是在 SAR 数据处理方面发展严重滞后,仍存在多项技术不足,例如,没有形成具有竞争力的产品化高可信 SAR 处理系统,数据处理自动化、集成化程度还较低;高性能计算和专用处理设备等快速实时处理技术应用于 SAR 数据还处于起步阶段;SAR 影像地物解译存在许多问题,尤其在复杂地形条件下,地物分类解译精度较低,亟须在定量分析的基础上建立针对多模态 SAR 的面向对象解译方法;SAR 目标检测与识别技术有待进一步提高。

先进的 SAR 处理技术是目前国际上科技竞争的战略制高点,是国家核心竞争力的重要组成部分。生态文明建设、资源可持续利用、“一带一路”建设等国家重大战略对精确、快速和高可信的 SAR 处理技术也提出了迫切需求。在国外涌现出新一代高分辨率、高性能 SAR 获取与处理系统的背景下,大力发展我国 SAR 数据高可信处理核心技术,开展 SAR 遥感数据高可信处理关键技术攻关与平台研制,是提升我国应急响应水平、实现可持续发展的重要技术保障。因此,以突破高端 SAR 关键技术、提升国家核心竞争力为目标开展相关研究具有紧迫性和必要性。863 对地观测与导航领域战略规划将 SAR 地物解译技术与系统研究列为“十二五”重点任务,并优先启动了“面向对象的高可信 SAR 处理系统”重点项目。

项目组深入开展 SAR 数据处理和地物解译的理论研究和关键技术攻关,通过近五年的努力,构建了具有自主知识产权的高性能 SAR 地物解译系统与平台,打破了 SAR 处理系统长期依赖国外进口的局面。《面向对象高可信 SAR 数据处理(上册)——理论与方法》和《面向对象高可信 SAR 数据处理(下册)——系统与应用》系统阐述了项目组近五年在 SAR 高可信处理与解译的理论研究、关键技术攻关和软件研制方面的科研成果,是作者多年来辛勤工作的结晶。希望本书的出版能够有力促进我国遥感与地理信息战略性新兴产业的发展和繁荣。

中国工程院院士

张祖勋

前 言

当前,高空间分辨率、高时间分辨率、多波段、多极化及多角度的多模态航空航天 SAR 数据获取已经成为国际遥感领域的主流发展方向,大量丰富的 SAR 数据的出现为对地观测领域提供了重要数据源。由于缺乏对 SAR 成像机理的深刻认识,缺乏量化的处理手段,缺乏快速并行处理系统,简单借用光学影像处理的思路处理 SAR 影像等原因, SAR 影像处理与解译几何精度低、可判别的类别少、解译可信度低、处理效率低, SAR 影像数据的应用受到极大限制。在此背景下,2010 年起,中国测绘科学研究院联合中国林业科学研究院资源信息研究所、武汉大学、中国科学院对地观测与数字地球科学中心、中国科学院电子学研究所、中国电子科技集团公司第三十八研究所、中国科学院遥感与数字地球研究所、上海交通大学、北京大学等科研院所和高校,开展了国家高技术研究发展计划(863 计划)“十二五”主题项目“面向对象的高可信 SAR 处理系统”研究。

通过五年的协作攻关,针对 SAR 数据在地形地物、森林植被等方面的处理与解译难题,利用多角度、多波段、多极化、极化干涉等多模式航空航天 SAR 数据,建立了基于散射机理的地物特性知识库,突破了地形辐射校正、极化干涉处理、立体测量、基于知识的解译等核心技术;形成了多项创新性成果,如稀少控制点 SAR 影像严密定位通用模型、复杂地形条件下的全极化 SAR 地形辐射校正方法、基于多源知识的复杂电磁散射模型优化方法、模型和知识库支持下的高可信地物解译技术、大范围低相干地区的高精度地形反演技术、X 波段 InSAR 植被垂直结构信息提取技术、大容量 SAR 数据快速处理等关键技术;形成了双天线多模式全极化干涉 SAR 数据获取硬件系统、面向对象的高可信解译软件系统等重要成果;实现了以精度高、可靠性强、识别类型丰富为特征的 SAR 影像高可信处理与解译,构建了行业重大应用示范系统,在地形测绘、植被覆盖监测等领域得到示范应用。

本书以该项目的研究内容为基础,对相关成果进行了较系统的阐述。

高分辨率 SAR 影像精确处理技术:包括全极化 SAR 数据幅度相位地形补偿技术, SAR 影像自适应相位保持滤波与高精度配准方法, SAR 影像高精度定位技术。

高精度三维信息提取技术:包括多模式 SAR 干涉提取 DEM (Digital Elevation Model) 技术,大范围地表低相干地区的 DInSAR 形变反演技术, SAR 立体及立体、干涉联合提取三维信息技术,森林垂直结构参数反演模型和方法。

地物散射模型与知识库:包括典型地物目标散射机理和模型库;典型地物类别后向散射特性测量规范,典型目标后向散射实测库;典型地物目标航空航天 SAR 影像特征库;基于模型的目标特性扩展技术,典型地物综合判别工具。

面向对象 SAR 影像地物高可信解译技术：包括基于知识的 SAR 影像地物高可信解译技术，SAR 影像高精度土地覆盖分类与森林类型识别方法，SAR 影像地物高可信变化检测技术。

SAR 影像高性能处理解译系统：包括 SAR 影像处理算法加速单元及系统运行平台开发技术，系统集成技术，SAR 影像高性能处理解译系统构建技术。

SAR 遥感综合试验与应用示范：包括航空极化干涉 SAR 数据获取集成系统构建；综合试验区航空航天 SAR 数据获取，对以上模型、方法和系统的精度、性能验证，高精度地形测绘、土地利用与植被覆盖信息提取应用示范。

本书包括《面向对象高可信 SAR 数据处理（上册）——理论与方法》和《面向对象高可信 SAR 数据处理（下册）——系统与应用》，全书由张继贤拟定大纲，组织撰写。各章主要执笔人为：第 1 章张继贤、黄国满、王志勇、范洪冬、王开志等；第 2 章张继贤、黄国满、张永红、赵争、杨书成、卢丽君、吴宏安；第 3 章张继贤、黄国满、杨书成、程春泉；第 4 章李震、陈权、陈尔学；第 5 章杨杰、吴涛、郭明、王超、陈尔学；第 6 章吴涛、王超、杨杰、李平湘；第 7 章李平湘、杨杰、陈尔学；第 8 章张继贤、黄国满、王亚超、赵争；第 9 章张继贤、黄国满、卢丽君、杨景辉、赵争、韩颜顺；第 10 章陈尔学、李平湘、李震、焦健；第 11 章张继贤、黄国满、程春泉、杨书成、赵争、王萍；第 12 章陈尔学、李震、李平湘。全书由张继贤、黄国满、程春泉统稿，由张继贤审定。

本书由国家高技术研究发展计划（863 计划）“十二五”主题项目“面向对象的高可信 SAR 处理系统”（2011AA120400）资助。项目开展期间得到了国内相关单位和同行的无私帮助，作者在此表示衷心感谢。由于水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者提出宝贵意见。

作者

2017 年 7 月

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 SAR 数据处理基础知识	1
1.1 SAR 成像基本原理	1
1.1.1 侧视雷达成像	1
1.1.2 SAR 成像方法	3
1.2 SAR 影像成像几何	5
1.2.1 距离-多普勒几何模型	5
1.2.2 SAR 成像几何形变特点	7
1.3 InSAR 基本原理	8
1.3.1 InSAR 测量原理	8
1.3.2 雷达差分干涉测量原理	10
1.4 立体 SAR 测量基本原理	12
1.5 极化 SAR 基础知识	14
1.5.1 电磁波的极化及其表征	14
1.5.2 极化 SAR 数据的矩阵描述	19
1.5.3 极化合成	23
1.6 极化干涉 SAR 基本原理	27
1.7 SAR 影像幅度相位地形补偿	28
1.7.1 全极化 SAR 数据的幅度相位调制模型	28
1.7.2 全极化 SAR 数据地形估计	31
1.7.3 全极化 SAR 数据地形辐射补偿	32
参考文献	33
第 2 章 SAR 干涉测量	35
2.1 SAR 复影像干涉对和极化干涉对配准	35
2.1.1 SAR 通用配准方法	35
2.1.2 干涉 SAR 复影像配准	38
2.2 InSAR 自适应相位保持滤波	40

2.2.1	Goldstein 滤波算法	41
2.2.2	信噪比信息的自适应相位保持滤波算法	42
2.2.3	多尺度多方向的自适应中值滤波	43
2.3	多模式 InSAR 处理	47
2.3.1	始于 SLC 影像的不同模式 SAR 干涉处理	47
2.3.2	多基线、多波段、多模式 SAR 干涉结果融合提取 DEM	54
2.4	大范围地表低相干地区的 InSAR 形变反演	58
2.4.1	SAR 距离向频谱滤波	58
2.4.2	稳定点目标提取	65
2.4.3	基于点目标的时间序列 InSAR 技术	73
2.5	森林垂直结构参数反演与森林覆盖区 DEM 精确提取	82
2.5.1	极化 SAR 森林垂直结构参数估测	83
2.5.2	干涉/极化干涉 SAR 森林垂直结构参数反演	85
2.5.3	极化干涉 SAR 森林植被覆盖区 DEM 精确估测	101
	参考文献	105
第 3 章	SAR 影像摄影测量	111
3.1	雷达影像严密几何定位	111
3.1.1	侧视雷达成像影响因素	111
3.1.2	侧视雷达影像距离-共面方程	113
3.1.3	SAR 影像距离-共面方程	116
3.1.4	显函数形式的距离-共面方程	119
3.1.5	SAR 影像严密定位	124
3.2	光学与 SAR 影像联合定位	126
3.2.1	联合定位模型的建立方法	126
3.2.2	多源影像联合定位地面点坐标初值的计算	128
3.2.3	航天光学与 SAR 影像的联合定位	128
3.3	多侧视 SAR 立体测量	130
3.3.1	SAR 立体观测	130
3.3.2	立体 SAR 提取 DEM	131
3.3.3	SAR 立体提取地形要素	137
3.4	SAR 立体、干涉联合三维信息提取	141
	参考文献	144
第 4 章	地物散射模型与知识库	146
4.1	典型地物知识库系统	146

4.2	地物目标散射模型库	147
4.2.1	裸露地表散射模型	147
4.2.2	典型植被散射模型	150
4.2.3	积雪散射模型	164
4.2.4	地物目标散射模型库系统构建	167
4.3	散射特性测量数据库	169
4.3.1	典型地物散射特性测量实验设计	169
4.3.2	散射计测量数据收集	180
4.3.3	后向散射特性数据库系统构建	182
4.4	典型地物 SAR 影像数据库	187
4.4.1	影像数据库存储结构设计	187
4.4.2	SAR 影像数据库示例数据	191
4.4.3	SAR 影像数据库系统构建	193
4.5	综合知识规则及其应用	195
4.5.1	先验知识规则构建	196
4.5.2	综合规则应用示例	200
	参考文献	202
第 5 章	极化 SAR 影像分割	205
5.1	面向对象的 SAR 图像多尺度分割	205
5.2	基于极化散射特征的 SAR 影像分割算法	211
5.3	SAR 影像 SRM 分割	218
	参考文献	230
第 6 章	SAR 图像变化检测	232
6.1	SAR 图像变化检测技术方法	232
6.1.1	图像预处理技术	233
6.1.2	差异图获取技术	233
6.1.3	差异图分割技术	239
6.1.4	变化检测应用研究	244
6.2	基于 EM+MRF 模型的 SAR 图像变化检测技术	245
6.2.1	算法说明	245
6.2.2	实验结果分析	245
6.3	面向对象分割的 SAR 图像变化检测技术	249
6.3.1	面向对象联合多尺度分割	249
6.3.2	对象级的变化测度	250

6.3.3 实验分析与精度评价	250
参考文献	254
第 7 章 面向对象 SAR 地物高可信解译	257
7.1 SAR 影像点目标高可信解译	257
7.1.1 CFAR 检测技术	257
7.1.2 基于相位信息的检测方法	266
7.1.3 点目标提取	268
7.2 SAR 影像线目标高可信解译	273
7.2.1 单极化 SAR 边缘检测	273
7.2.2 极化 SAR 边缘检测	274
7.2.3 线目标提取	277
7.3 极化 SAR 影像面状地物高可信解译	280
7.3.1 极化 SAR 影像弱后向散射地物精细解译	280
7.3.2 极化 SAR 影像倒塌房屋解译	288
7.3.3 极化 SAR 影像湿地解译	296
参考文献	308

彩图

第 1 章 SAR 数据处理基础知识

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是目前航空航天遥感的重要传感器之一, 具有全天候、全天时的影像获取能力。不同于光学影像的中心投影成像, SAR 是侧视距离成像, 形成了独特的几何特征。SAR 具有干涉和立体两种测量方式, 广泛应用于三维信息和形变信息的提取。同时, SAR 能够发射和接收具有不同极化方式的电磁波, 电磁波的极化状态对地物目标的形状、大小、结构、取向和介电常数都十分敏感, 极化 SAR 可广泛应用于对地物目标的解译。本章对高可信 SAR 数据处理解译涉及的基础性原理和相关知识进行介绍, 是本书后面章节对 SAR 数据进行深入研究和处理的基础。

1.1 SAR 成像基本原理

1.1.1 侧视雷达成像

微波遥感具有全天候、全天时的工作能力, 能够实现实时动态监测, 对一些物体及地表具有一定的穿透能力, 这些优点使其在军事和民用上都发挥了重要作用, 微波遥感已成为当今世界上遥感界研究开发应用的重点。微波遥感按照传感器的工作原理可分为主动式和被动式两类。雷达就是一种主动式的微波遥感传感器, 它有侧视雷达和全景雷达两种形式, 其中在地学领域主要使用侧视雷达。侧视雷达是向遥感平台行进的垂直方向的一侧或两侧发射微波, 再接收由目标反射或散射回来的微波的雷达。通过观测这些微波信号的振幅、相位、极化以及往返时间, 就可以测定目标的距离和特性。按天线的结构不同, 侧视雷达又分为真实孔径侧视雷达和合成孔径侧视雷达。

1. 真实孔径侧视雷达成像

真实孔径侧视雷达向平台行进方向 (称为方位向) 的侧方 (称为距离向) 发射宽度很窄的脉冲电波波束, 然后接收从目标返回的后向散射波。按照反射波返回的时间排列可以进行距离向扫描, 而通过平台的行进, 扫描面在地表上移动, 可以进行方位向扫描。因此, 在方位向, 真实孔径侧视雷达遥感影像与光学线阵遥感影像的成像方法是类似的。

雷达影像的空间分辨率包括两个方面: 距离分辨率和方位分辨率。距离分辨率是指雷达所能识别的同一方位向上的两个目标之间的最小距离, 它由脉冲宽度 τ 和光速 c 来计算。距离分辨率包括斜距分辨率和地距分辨率, 其中斜距分辨率为

$$R_R = c\tau / 2 \quad (1.1)$$

地距分辨率与俯角 θ 有关, 为

$$R_r = c\tau \sec \theta / 2 \quad (1.2)$$

方位分辨率为波瓣角 β 与到达目标的距离 R 之积, 而波瓣角与电磁波长 λ 成正比, 与天线孔径尺寸 D 成反比, 所以方位分辨率为

$$R_s = \lambda R / D \quad (1.3)$$

由此可知, 为提高真实孔径雷达的距离分辨率, 必须降低脉冲宽度。然而脉冲宽度过小则反射功率下降, 反射脉冲的信噪比降低。为解决这一矛盾, 实际采用脉冲压缩技术。要提高方位分辨率, 就必须增大天线的孔径。然而, 在飞机上或卫星上搭载的天线尺寸是有限的。因此, 要通过增大天线孔径来提高方位分辨率很难实现。为此, 通常采用合成孔径雷达的方法。图 1.1 为真实孔径雷达和合成孔径雷达成像示意图。

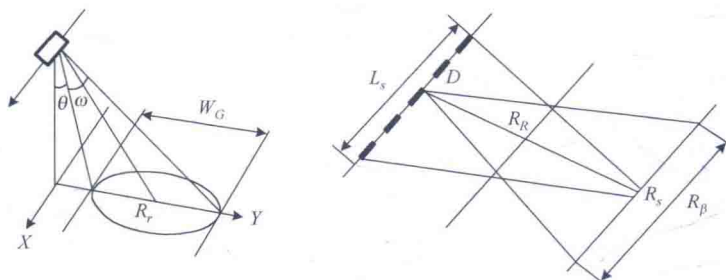


图 1.1 真实孔径雷达和合成孔径雷达成像示意图

2. 合成孔径侧视雷达成像

合成孔径侧视雷达成像的方向与平台的飞行速度方向正交, 它一般生成二维影像。其中的一维称为作用距离, 它是雷达到目标的“视距”距离。在这一点上, 合成孔径雷达与大多数其他工作方式的雷达相似, 作用距离由精确测量来自目标的雷达回波脉冲的传输时间来确定。在最简单的合成孔径雷达中, 作用距离分辨率由发射脉冲的宽度决定, 即脉冲越窄, 测得的距离精度越高。另一维称作方位, 它与作用距离正交。方位维能使合成孔径雷达获得不同于其他雷达的相对精确的方位分辨率。合成孔径原理的基本思想是用一个小天线作为单个辐射单元 (孔径为 D), 将此单元沿一直线不断移动, 在移动中选择若干个位置, 在每个位置上发射一个信号, 接收相应发射位置的回波信号, 并将回波信号的幅度连同相位一起储存下来。当辐射单元移动一段距离后, 把所有不同时刻接收到的回波信号消除因时间和距离不同引起的相位差, 修正到同时接收的情况。即利用雷达与目标的相对运动, 把雷达在不同位置接收到的目标回波信号进行相干处理, 可以使小孔径天线起到大孔径天线的作用, 得到与天线阵列

相同的效果。因此, SAR 成像在距离向与真实孔径雷达相同, 采用脉冲压缩来实现高分辨率, 在方位向上则通过合成孔径原理来实现。

合成孔径雷达技术是干涉合成孔径雷达 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技术和差分干涉合成孔径雷达 (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR) 技术的基础。InSAR 是以同一地区的两张 SAR 影像为基本处理数据, 通过求取两幅 SAR 影像的相位差, 获取干涉影像, 然后从干涉条纹中获取地形高程数据的空间对地观测新技术。DInSAR 是指利用同一地区的两幅干涉图差分处理来获取地表微量形变的测量技术。其中一幅是通过形变事件前的两幅 SAR 影像获取的干涉影像, 另一幅是通过形变事件后两幅 SAR 影像获取的干涉影像。因此, 干涉雷达技术和差分干涉雷达技术是合成孔径雷达技术的应用延伸与扩展。

1.1.2 SAR 成像方法

本节将简单介绍一下 SAR 的成像几何关系、基本成像方法以及存在的缺点和不足。首先介绍 SAR 成像中目标与平台的几何模型以及几个重要的参数 (Cumming, 2008)。

距离向 (range): 构成最终 SAR 影像的一个维度, 如图 1.2 所示, 又称快时间方向, 因为该方向一般会发射非常高带宽的电磁波, 造成采样率非常高。相邻采样点之间的距离称为一个距离门。图中相关参数的意义为: T_a 表示慢时间, R_o 表示斜距, θ_{sq} 表示侧视角, H 表示航高。

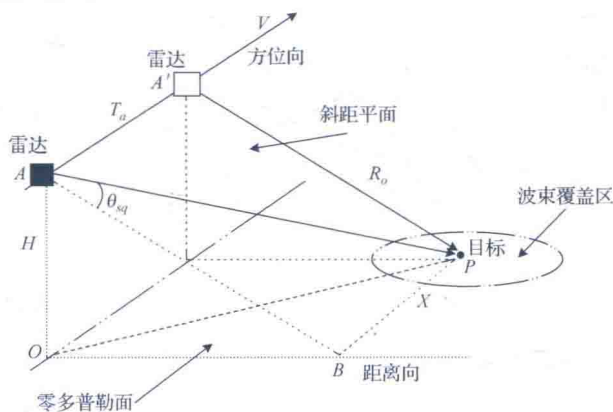


图 1.2 机载 SAR 参数图

方位向 (azimuth): 一般认为是飞行方向, 构成最终 SAR 影像的另一个维度。又称慢时间方向。与方位向比较接近的一个概念是距离横向 (cross-range), 指与雷达发射波中心 (图 1.2 中 AP 方向) 垂直的方向。显然只有发射波中心线与方位向垂直时, 距离横向才与方位向重合。

波束中心穿越时刻: 对于一个特定的目标, 从开始照射到结束照射过程中, 波束中心照射到目标时那个方位时刻, 一般用 η_c 表示, 有时也称为波束中心偏移时间。

方位向合成孔径时间：对于某一个目标点从开始照射到结束照射之间的时间长度。

成像处理主要有距离-多普勒算法、Chirp-Scaling 算法、 ωk 算法等，本书介绍具有典型代表性的 Chirp-Scaling 算法。

Chirp-Scaling 算法根据 Papoulis 提出的 Scaling 原理，通过对 Chirp 信号进行频率调制，实现零频率位置的左右平移，这就可以在距离压缩后所有距离门上的点都有相同的距离徙动曲线，极大地方便了徙动矫正操作，同时可以用频域相位补偿代替时域插值，大大地提高了效率与精确度，所以在成像处理领域 Chirp-Scaling 算法被誉为一座重要的里程碑 (Wang et al., 2009)。

Chirp-Scaling 算法的处理流程如图 1.3 所示，全部完成对原始数据的处理需要四次傅里叶变换和三次相位相乘。

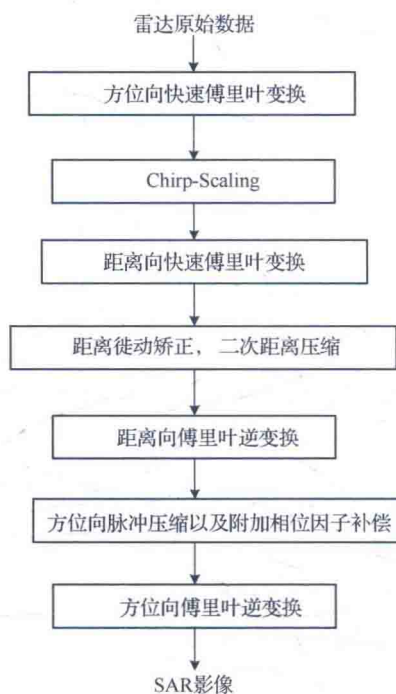


图 1.3 Chirp-Scaling 算法的处理流程

图 1.3 Chirp-Scaling 算法的处理流程

(1) 先进行方位向快速傅里叶变换从而变换到距离多普勒域，这是第一次傅里叶变换。

(2) 构造 Scaling 因子，通过按行对 (1) 中变换后的数据进行相位相乘以实现 Chirp-Scaling 操作，完成相乘之后所有的距离徙动曲线都与参考距离门处的目标一致。这是第一次相位相乘。

(3) 对完成第 (2) 步之后的矩阵数据每行做傅里叶变换，使之变成二维频域。这是第二次傅里叶变换。

(4) 构造频域匹配滤波器，在二维频域完成距离向脉冲压缩、二次距离压缩和一致距离徙动矫正，到这里是第二次相位相乘。

(5) 变回距离多普勒域，这是第三次傅里叶变换。

(6) 由于方位向调频斜率是关于距离的函数，所以需要构造各个距离门的方位匹配滤波器，完成所有距离门的方位压缩。

(7) 因为以上 Scaling 操作会引入附加相位因子，所以需要再次进行相位相乘来抵消这个多余的相位。对方位进行傅里叶逆变换回到二维时域，完成所有的处理操作，这是最后一次傅里叶变换。

从上面可以看出 Chirp-Scaling 算法与 Range-Doppler 算法有着很大的区别。Chirp-Scaling 算法根据线性调频信号的特殊性从而避免了 Range-Doppler 算法中的 sinc 插值操作。而 Range-Doppler 算法效率低下的根本原因就是进行距离徙动改正时插值操作，显然无论是从效率还是精度，Chirp-Scaling 算法都优于 Range-Doppler 算法。

在正侧视的条件下五个点目标的 Chirp-Scaling 算法成像仿真如图 1.4 所示。

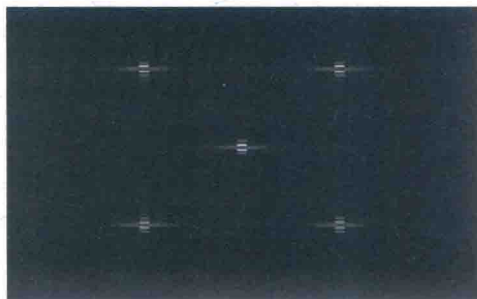


图 1.4 正侧视点目标的 Chirp-Scaling 算法成像

1.2 SAR 影像成像几何

1.2.1 距离-多普勒几何模型

R-D (Range-Doppler) 模型作为目前 SAR 几何处理主流的构像模型, 可用影像所提供的辅助信息对影像像素进行定位。R-D 模型定位精度主要取决于传感器状态矢量数据的准确性、地球模型的有效性以及斜距和多普勒信息的测量精度。通过提高这些参量的测量精度, 定位精度将会有进一步提高。

R-D 模型依据 SAR 影像成像原理, 描述了传感器和目标点在地理坐标系下的物理几何关系, 由 Brown 于 1981 年首先提出。SAR 影像投影方式为距离投影, 符合距离方程; SAR 根据多普勒频移进行成像, 而且成像点和飞行平台之间符合多普勒方程; 地物点在地心直角坐标系中同时应满足地球椭球方程。图 1.5 为地心坐标系下, 在某时刻 SAR 传感器对地观测的示意图, 其中 S 为传感器位置, T 为地面目标点。

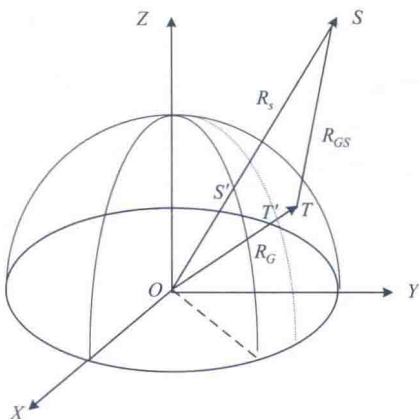


图 1.5 SAR 成像示意图

1. 距离方程

如图 1.5 所示, 传感器的位置与速度向量分别为 $\mathbf{R}_S = (X_S, Y_S, Z_S)$ 和 $\mathbf{V}_S = (V_X, V_Y, V_Z)$, 对应影像点 (i, j) 的地物目标点 T , 地理坐标为 $\mathbf{R}_T = (X, Y, Z)$, 其斜距 R 可根据式 (1.4) 计算:

$$\begin{aligned} R &= |\mathbf{R}_S - \mathbf{R}_T| = |(X_S, Y_S, Z_S)^T - (X, Y, Z)^T| \\ &= \sqrt{(X_S - X)^2 + (Y_S - Y)^2 + (Z_S - Z)^2} = R_0 + m_j \times j \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中, R 为斜距; R_0 为初始斜距; m_j 为距离向像元大小; j 为距离向像元坐标。

2. 多普勒方程

图 1.6 (舒宁, 2003) 表示了因雷达天线和目标的相对运动所形成的回波与飞行方向不垂直的情况, 雷达在 D 处朝飞行方向一侧发射波束, 照射到地面的宽度为 L (图 1.6 中为夸张显示), 它与 x_0 处目标的距离为 R_0 , x_0 处的目标的后向散射回波由雷达天线在 C 处接收, C 点与目标之间的距离为 R 。若 C 点处的坐标 (在飞行方向) 为 x , 则 R 可表达为

$$R^2 = R_0^2 + (x - x_0)^2 \quad (1.5)$$

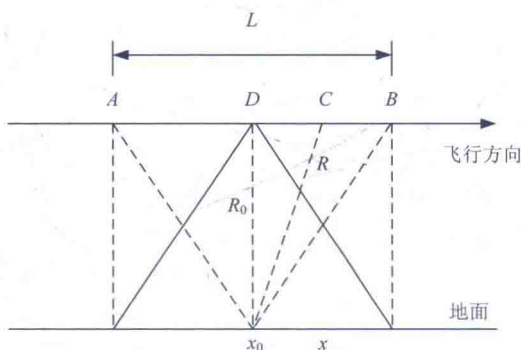


图 1.6 雷达波束发射与地物回波示意图

式 (1.5) 对时间求导, 得

$$2R \frac{dR}{dt} = 2(x - x_0) \frac{dx}{dt} \quad (1.6)$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{(x - x_0)}{R} \frac{dx}{dt} = \frac{(x - x_0)v}{R} \quad (1.7)$$

这里将 R_0 作为常量, 又由于回波的相位函数一般表示为

$$\varphi(t) = 2\pi f_0 \left(t - \frac{2R}{S} \right) \quad (1.8)$$