

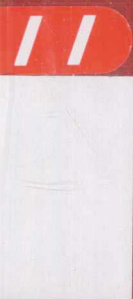


SAR图像提高分辨率技术

(第二版)

Technique of SAR Image
Superresolution (Second Edition)

王正明 朱炬波 谢美华 著



科学出版社

013067077

TN958

23-2

SAR 图像提高分辨率技术

(第二版)

王正明 朱炬波 谢美华 著



科学出版社

北京



北航

C1674787

TN958
23-2

内 容 简 介

本书系统介绍了星载合成孔径雷达(SAR)图像提高分辨率数据处理方法的有关理论和技术,主要包括 SAR 图像提高分辨率的内涵、SAR 图像先验信息的开采与建模方法、SAR 图像相干斑抑制方法等,重点介绍了单幅 SAR 图像提高分辨率的谱估计方法、正则化方法、稀疏表示方法、偏微分方程方法,以及多幅 SAR 图像处理方法,并给出了各方法之间的联系和综合应用分析,最后给出了 SAR 图像质量评价准则和分辨率计算方法。

本书具有理论性和实用性,适合从事 SAR 图像处理与应用的科研人员、高等院校教师、研究生和高年级本科生使用,还可供从事成像雷达系统研究、制造的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

SAR 图像提高分辨率技术/王正明,朱炬波,谢美华著.—2 版.—北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-038421-8

I. S… II. ①王… ②朱… ③谢… III. ①合成孔径雷达-高分辨率-图像处理 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013) 第 195437 号

责任编辑:李 欣/责任校对:张凤琴
责任印制:赵德静/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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 8 月第 二 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 8 月第三次印刷 印张: 25 3/4

字数: 519 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

本书第一版由科学出版社于 2006 年 10 月出版, 2008 年 1 月重印. 第一版出版后, 得到同行的广泛关注和好评. 近七年来, SAR 图像提高分辨率的硬件、软件技术都有许多新的进展, 尤其是硬件的发展很快, 为了更好地反映新的科技进展, 许多同行建议作者作一些修改, 主要是充实一些新的内容, 同时梳理整合少部分冗余的内容.

第二版的主要修改如下:

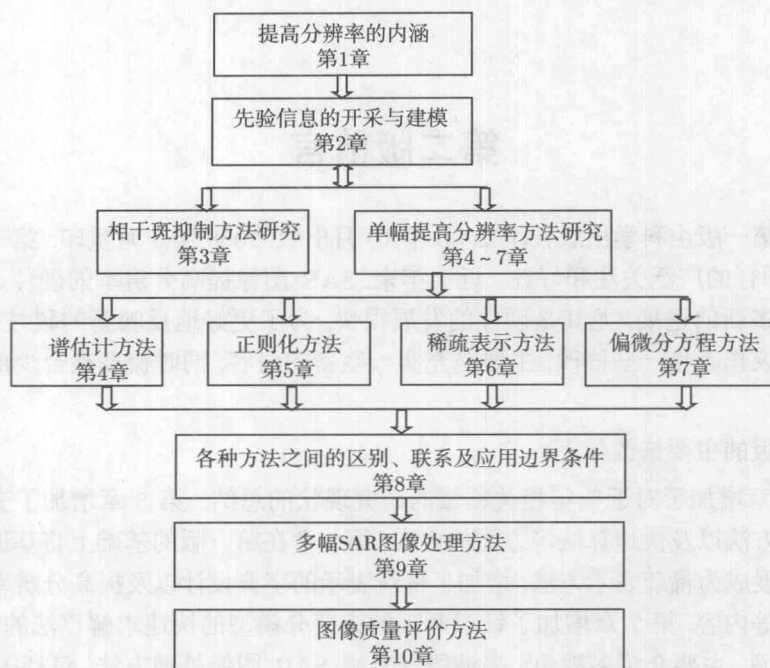
第 1 章增加了对近些年相关领域的研究现状的总结. 第 5 章增加了变范数约束正则化方法以及快速算法等方面的内容. 第 6 章在第一版的基础上将基追踪方法进一步扩展成为稀疏表示方法, 增加了稀疏表示的字典设计以及提高分辨率的匹配追踪方法等内容. 第 7 章增加了针对两项约束变分模型的快速求解算法的介绍. 新增了第 9 章, 主要介绍多视角、多波段等多幅 SAR 图像处理方法, 包括多幅 SAR 图像的配准方法、多幅 SAR 图像去噪的向量总变分方法以及基于点散射模型的多幅 SAR 图像提高分辨率方法等. 原来的第 9 章调整为第 10 章, 在第一版的基础上, 根据作者对分辨率问题的理解, 提出了分辨率标准与计算方法. 其余各章节主要进行了一些文字调整.

下图给出了本书的技术路线以及各章之间的联系.

这次修订中, 新增的第 9 章由席如冰执笔, 第 1、2 章由赵侠负责修订, 第 3、7、8 章由谢美华负责修订, 第 4、6 章由汪雄良负责修订, 第 5、10 章由王卫威和王光新负责修订, 全书由王正明和朱炬波负责统稿和定稿. 谢美华在增加内容、修订文字、联系出版等方面做了很多工作.

本次出版正逢国防科技大学 60 周年校庆, 作者的工作一直得到学校的支持, 这次修订再版得到了国防科学技术大学学术著作出版基金资助. 同时也得到国家自然科学基金项目 (No.61072142, No.61271437) 的资助. 本书引用了许多作者的论文、著作, 国防科技大学理学院数学成像课题组的师生提供了有价值的资料、程序和修改意见. 正是得到各方面的支持、资助和鼓励, 才使本书得以再版. 在此, 作者一并表示衷心的感谢.

限于作者的能力和知识面, 研究工作及文字整理还不够系统深入, 疏漏、不当和错误难免, 恳请读者批评指正.



作者

2013年5月于长沙

第一版前言

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种全天候、全天时的高分辨率微波遥感成像雷达. 自 20 世纪 50 年代以来, SAR 的理论和技术在世界范围内受到极大重视并获得飞跃发展. 当前, 机载 SAR 已应用十分广泛, 星载 SAR 也已走向实用阶段, 成为空间对地观测发展的热点, 多频段、多极化、可变视角和可变波束的多模式 SAR 的发展已经成为现实. 未来的 SAR 将进一步朝着超高分辨率和大测绘带发展. 另外, 干涉 SAR、动目标检测和成像技术即将获得进一步的发展, 编队飞行、具有强穿透性的低频 SAR 以及 SAR 的校准等技术将受到更大的重视.

SAR 的应用效能主要取决于获取的 SAR 图像的质量, SAR 图像的质量越高, 其后续的应用性能 (如目标识别) 就会越好. 而分辨率是衡量 SAR 图像质量的最重要的指标之一. SAR 图像的分辨率越高, 人们从中获取的关于目标的信息就越丰富, 许多应用领域对 SAR 图像的分辨率提出了很高的要求. 因此, 高分辨率是 SAR 技术发展的主要目标之一, 提高 SAR 图像的分辨率已经成为 SAR 的研究重点和热点.

理论上, SAR 图像的高分辨率, 在距离向依靠发射宽带信号来实现, 在方位向则依赖于合成孔径技术, 但实际获取的 SAR 图像的分辨率还会受各种误差因素的影响. 提高 SAR 图像的分辨率通常有两种途径: 一是改进和更新硬件设备, 使其具备发射宽带信号和合成大孔径的能力, 同时提高测量精度; 二是通过建立物理模型和数学模型, 利用数据处理方法提高 SAR 图像的分辨率. 改进和更新硬件周期长、代价高且受限于技术发展, 因此, 利用数据处理技术提高 SAR 图像的分辨率显得尤为重要, 目前已成为 SAR 图像处理的一个重要研究方向. 充分挖掘和利用图像的先验信息、建立合理的物理模型和数学模型、设计相应的快速算法, 已成为提高 SAR 图像分辨率的关键技术.

本书主要针对 SAR 图像提高分辨率的数据处理方法进行研究, 在撰写过程中特别注意理论和方法的提炼, 力求将当前已经广泛应用的以及具有应用潜力的 SAR 图像提高分辨率的方法做较为全面的介绍. 同时, 在书中还给出了部分实验结果. 本书的研究成果, 可望在一定程度上缓解对 SAR 系统硬件需求的压力, 也试图成为 SAR 研究成果系统化的一个组成部分.

本书共 9 章, 由王正明、朱炬波策划和设计, 由六位博士 (生) 执笔完成. 第 1 章和第 2 章由赵侠和周宏潮执笔, 第 3、7、8 章由谢美华执笔, 第 4、6 章由汪雄良

执笔,第5章由王光新执笔,第9章由王卫威执笔.书稿由王正明统稿和定稿,朱炬波校对.

本书从研究提高分辨率的内涵入手,研究 SAR 图像先验信息的开采、建模方法和 SAR 图像提高分辨率的各种方法,并在理论和实验两方面分析和验证了各方法的实际应用效果以及应用边界条件.最后,介绍 SAR 图像质量的评价准则,并对本书中的实验结果进行测试和评估.

全书内容安排如下:

第1章分析和理解 SAR 图像提高分辨率的内涵,阐述 SAR 图像提高分辨率的含义和提高分辨率的机理,介绍 SAR 图像提高分辨率方法的研究现状及发展趋势.

第2章研究 SAR 图像先验信息的开采与建模方法,主要研究关于 SAR 成像、噪声、杂波以及目标的先验信息及其相应的建模方法,为后续各章节先验信息的应用奠定基础.

第3章研究 SAR 图像的相干斑抑制方法.在介绍传统的相干斑抑制方法的基础上,主要研究了一种基于偏微分方程方法的保分辨率相干斑抑制方法.

第4章研究 SAR 图像提高分辨率的谱估计方法.在介绍传统谱估计方法提高分辨率机理的基础上,研究了几种改进的谱估计方法.

第5章研究 SAR 图像提高分辨率的正则化方法.在论述正则化方法的数学理论、目标函数的构造方法以及正则化参数的选取准则的基础上,研究了 SAR 图像提高分辨率的正则化方法,包括模型建立、参数选取、算法设计以及应用分析等.

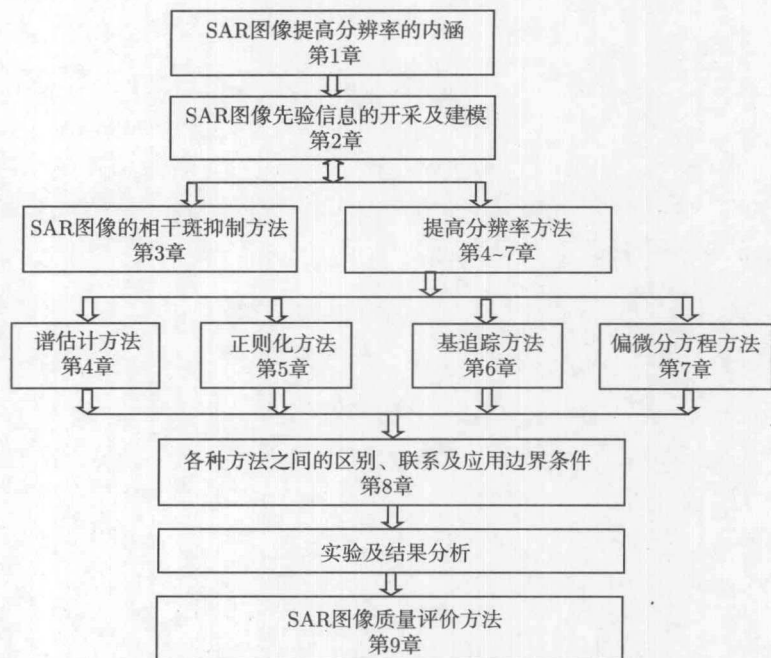
第6章研究 SAR 图像提高分辨率的基追踪方法.在介绍常用信号表示方法和基追踪方法的基本原理的基础上,结合 SAR 图像的数据模型和先验,研究了基于紧致字典、Fourier 字典和单位字典的基追踪方法.

第7章研究 SAR 图像提高分辨率的偏微分方程方法.主要研究内容包括:利用偏微分方程方法提高分辨率的原理,偏微分方程模型的建立,以及参数的选取方法等方面.

第8章讨论了上述各种提高分辨率方法对先验信息的要求和应用的边界条件,分析不同方法之间的区别和联系.

第9章介绍 SAR 图像质量评价方法,分析了传统的瑞利评价准则的缺陷,研究了基于两点目标的分辨率统计判别准则,并对上述各种方法提高分辨率的实验结果进行测试和评估.

下图给出了本书的技术路线以及各章之间的联系.



我们的研究工作是在全国优秀博士论文作者专项基金项目和国家自然科学基金项目的资助下进行的. 汪浩教授和张金槐教授仔细审阅了全书, 并提出了非常重要的修改意见. 吴翊教授、易东云教授和周海银教授等提供了有益的帮助, 课题组的部分硕士研究生提供了有价值的资料和程序. 在各章参考文献的支持下, 本书成为一个有机的整体. 在此一并表示诚挚的感谢.

迄今为止, SAR 图像提高分辨率的方法仍在不断发展和完善, 本书试图在前人的研究基础上, 把提高分辨率的工作进行初步的系统化, 同时, 介绍一些我们的研究工作和研究体会. 但由于作者的能力和知识面有限, 疏漏、不当和错误难免, 恳请读者批评指正.

作者

2005 年 5 月于长沙

目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 SAR 图像提高分辨率的内涵	1
1.1 分辨率的概念	1
1.2 SAR 图像提高分辨率的含义	3
1.3 提高分辨率的机理	4
1.4 SAR 图像提高分辨率方法的研究现状及发展趋势	6
参考文献	12
第 2 章 SAR 图像先验信息的开采与建模	18
2.1 SAR 成像的基本原理	18
2.2 SAR 成像过程的先验信息	26
2.3 噪声、杂波的先验信息	30
2.4 目标的先验信息	39
2.5 先验信息的统计建模方法	48
参考文献	57
第 3 章 SAR 图像的相干斑抑制方法	60
3.1 概述	60
3.2 不利用局域统计特性的滤波算法	61
3.3 基于局域统计特性的自适应滤波方法	63
3.4 相干斑抑制的偏微分方程方法	68
3.5 应用效果分析	93
参考文献	99
第 4 章 提高分辨率的谱估计方法	102
4.1 概述	102
4.2 基于 Relax 的谱估计方法	103
4.3 极大似然谱估计方法	108
4.4 基于非线性回归模型的谱估计方法	119
4.5 正则化谱外推方法	128
4.6 应用效果分析	133

参考文献	134
第 5 章 提高分辨率的正则化方法	137
5.1 概述	137
5.2 正则化方法	137
5.3 正则化方法的参数选择	145
5.4 正则化方法的求解	156
5.5 应用实例及效果分析	165
5.6 本章小结	181
参考文献	182
第 6 章 提高分辨率的稀疏表示方法	184
6.1 概述	184
6.2 常见的信号表示方法	185
6.3 基追踪方法的基本原理	197
6.4 基于紧致字典的基追踪方法	207
6.5 基于 Fourier 字典的基追踪方法	215
6.6 基于单位字典的基追踪方法	222
6.7 提高分辨率的匹配追踪方法	228
6.8 本章小结	233
参考文献	234
第 7 章 提高分辨率的偏微分方程方法	238
7.1 概述	238
7.2 光学图像提高分辨率的偏微分方程方法	238
7.3 SAR 图像提高分辨率的偏微分方程方法	247
7.4 模型与参数选取	258
7.5 应用效果分析	275
参考文献	281
第 8 章 主要提高分辨率方法的联系	284
8.1 概述	284
8.2 提高图像分辨率的主要方法	284
8.3 提高图像分辨率方法与相关稀疏先验的关系	295
8.4 各主要方法之间的区别与联系	305
8.5 主要提高分辨率方法的边界条件及分析	311
参考文献	314
第 9 章 多幅 SAR 图像处理方法	316
9.1 概述	316

9.2 基于幅度相关性和特征点的 SAR 图像配准方法	317
9.3 基于向量总变分模型的多幅 SAR 图像去噪方法	338
9.4 基于点散射模型的多幅 SAR 图像提高分辨率方法	348
参考文献	359
第 10 章 SAR 图像质量评价方法	361
10.1 概述	361
10.2 SAR 图像传统质量评价方法	362
10.3 基于插值的 SAR 图像分辨率评价方法分析	363
10.4 传统分辨率评价方法的局限性分析	374
10.5 基于假设检验的分辨率分析方法	384
参考文献	396
索引	397

第1章 SAR 图像提高分辨率的内涵

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种全天候、全天时的高分辨率微波遥感成像雷达. SAR 的系统设计、研制及工程实现都很复杂, 但是用户关心的主要是它的最终产品——SAR 图像. 分辨率是表征 SAR 图像质量的最重要的指标之一, SAR 图像的分辨率越高, 人们从中获取的关于目标的信息就越丰富, 后续的应用性能就会越好, 许多应用领域都对 SAR 图像的分辨率提出了很高的要求. 因此, 提高 SAR 图像的分辨率是 SAR 技术发展的主要目标之一.

本章在明确分辨率的概念的基础上, 阐述 SAR 图像提高分辨率的含义, 研究 SAR 图像提高分辨率的机理. 最后分析 SAR 图像提高分辨率方法的研究现状和发展趋势.

1.1 分辨率的概念

SAR 是 20 世纪 50 年代发展起来的一种新型雷达体制, 它利用合成孔径原理, 突破了实孔径天线对分辨率的限制, 并结合脉冲压缩技术, 可以对远距离目标进行距离向和方位向二维高分辨率成像. 在 SAR 领域, 分辨率包括空间分辨率和辐射分辨率, 空间分辨率是衡量 SAR 系统能够分辨地面两个相邻目标最小距离的尺度, 辐射分辨率是衡量 SAR 系统对相邻散射系数的分辨能力的尺度^[1]. 在很多应用领域, 尤为关注的是 SAR 图像的空间分辨率, 本书中的“提高分辨率”是指提高 SAR 图像的空间分辨率.

为清楚理解 SAR 图像空间分辨率的概念和影响空间分辨率的系统参数, 下面以条带式 SAR 为例来阐述 SAR 的一些基本概念.

设天线孔径尺寸为 l 的雷达以速度 v_a 匀速直线前进, 途中向侧视方向发射相干信号并接收地物目标的回波. 图 1.1 为正侧视条带式 SAR 的基本空间几何关系. 该图中, 取包含雷达航线及点目标 P 的斜平面为坐标平面, 并取雷达前进方向为 x 方向 (称为方位向), 与之垂直的雷达视线方向为 r 方向 (称为距离向, 更确切地称为斜距向), 坐标原点选为雷达在 $t = 0$ 时刻的位置. 现在来考察地面上的点目标 P , 如图 1.1(b) 所示, 当雷达处于位置 x_1 时, 波束刚刚触及 P 点; 当雷达到达位置 x_0 时, P 点处于波束中心; 当雷达到达位置 x_2 时, 波束刚刚要离开 P 点. 因此, 区间 $[x_1, x_2]$ 表示了波束能覆盖到 P 点的雷达位置范围, 称 x_1 与 x_2 之间的距离 $|x_1 - x_2|$ 为合成孔径长度, 记为 L_s . 雷达平台运行合成孔径长度所需要的时间称

为合成孔径时间, 记为 T_s . L_s 和 T_s 满足下面的关系式:

$$T_s = \frac{L_s}{v_a}. \quad (1.1.1)$$

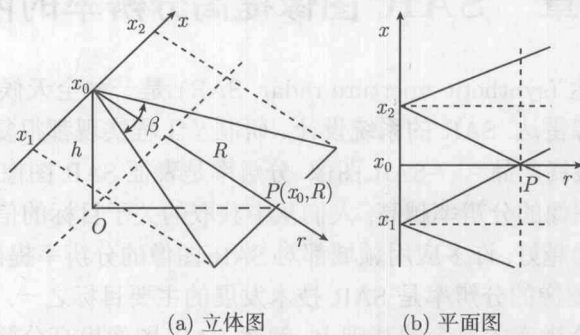


图 1.1 条带式 SAR 空间几何关系示意图

依据 SAR 的空间几何关系, SAR 图像的空间分辨率通常包括距离向空间分辨率和方位向空间分辨率 (分别简称为距离向分辨率和方位向分辨率), 它们分别是衡量 SAR 系统能够分辨地面距离向和方位向两个相邻目标最小距离的尺度。

下面阐述决定距离向分辨率和方位向分辨率的参数。

1.1.1 距离向分辨率

理论上, SAR 图像的距离向分辨率 ρ_r 由系统发射波形的频带宽度 (简称带宽) B 决定^[2]

$$\rho_r = \frac{c}{2B}, \quad (1.1.2)$$

式中, c 为光速。

需要注意的是, 式 (1.1.2) 所示的分辨率是发生在斜距方向上, 因此又称为斜距分辨率。在实际应用中, 人们更关心的是正交于雷达航迹方向的沿地表的分辨率 ρ_{gr} (称为地距分辨率)。当雷达波束在目标处的入射角为 θ 时, ρ_{gr} 和 ρ_r 之间的关系为

$$\rho_{gr} = \frac{\rho_r}{\sin \theta} = \frac{c}{2B \sin \theta}. \quad (1.1.3)$$

1.1.2 方位向分辨率

真实孔径雷达的方位向分辨率 ρ_a 为^[3]

$$\rho_a = \beta_{0.5} \cdot R, \quad (1.1.4)$$

式中, R 为目标与雷达之间的距离, $\beta_{0.5}$ 为半功率点波束宽度, 满足

$$\beta_{0.5} = k \frac{\lambda}{l}, \quad (1.1.5)$$

式中, λ 为天线辐射电磁波的波长, l 为天线孔径尺寸, k 是与天线加权或天线孔径上的电流有关的常数, 一般在 0.886~1.4 取值, 通常取 $k = 1$ ^[2].

可见, 真实孔径雷达要提高方位向分辨率, 必须增大天线孔径尺寸或提高雷达工作频率. 但是, 在工作频率很高时, 要达到和保持允许的天线机械和电气公差非常困难, 而且, 由于受体积和重量等的限制, 也不能无限制地增大天线孔径尺寸. 因而, 常规真实孔径雷达的目标方位向分辨率是非常有限的, 而且对远距离目标的分辨率很差^[2,3].

SAR 的方位向分辨率由下式决定^[2]:

$$\rho_a = \frac{1}{2} \beta_{0.5} \cdot R = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{L_s} \right) \cdot R, \quad (1.1.6)$$

式中, L_s 为合成孔径长度, 因子 $\frac{1}{2}$ 是考虑到 SAR 的发射和接收共用一幅天线, 从而进一步锐化了波束. 对于图 1.1 所示的正侧视条带式 SAR, 有

$$L_s = \frac{\lambda R}{l}. \quad (1.1.7)$$

从而, 条带式 SAR 的方位向分辨率为^[2,4]

$$\rho_a = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{L_s} \right) \cdot R = \frac{l}{2}. \quad (1.1.8)$$

式 (1.1.3) 和式 (1.1.6) 表明, 理论上, SAR 图像的距离向分辨率取决于系统工作带宽, 方位向分辨率取决于合成孔径长度. 但是, 系统实际获取的 SAR 图像的分辨率并不完全由这两个参数决定, 这是因为在实际 SAR 图像的获取过程中, 还受到系统各组成部分的误差因素以及外界环境的影响. 基于此, SAR 的分辨率又有系统理论分辨率和实测分辨率之分, 前者是指由式 (1.1.3) 和式 (1.1.6) 决定的分辨率, 后者是指实际获取的 SAR 图像的分辨率. 由于 SAR 图像获取过程中误差不可避免地存在, 故实测分辨率常劣于系统理论分辨率.

需要注意的是, 在实际 SAR 图像质量评估时, 空间分辨率的计算主要根据点目标冲激响应的半功率主瓣宽度 (即 3dB 主瓣宽度) 得到. 这样得到的空间分辨率实质上是系统的名义分辨率, 它只是表征系统分辨点目标能力的一种理论尺度, 与雷达对实际目标的分辨并不完全等同^[4].

1.2 SAR 图像提高分辨率的含义

分辨率是衡量 SAR 图像质量的最重要的指标之一. 当分辨率与目标尺寸相当时, 目标在图像中表现为一个亮点, 当分辨率比目标尺寸小得多时, 根据图像可得

到目标不同部位的信息,这即是说,分辨率越高(指分辨率数值越小),人们从图像中获取的关于目标的信息就越丰富^[5].因此,在 SAR 图像应用时,人们总是希望获得更高分辨率的图像以增加情报侦察的信息量、提高地理测绘的几何精度或提高目标识别的准确度等.

一般来说,有两大类因素会导致 SAR 图像的分辨率较低.其一是 SAR 的系统理论分辨率有局限,不能达到期望的要求;其二是 SAR 图像获取过程中存在不可避免的误差因素,如平台的非理想运动、大气扰动、数据采集误差、成像算法误差以及系统噪声等,这些因素会造成分辨率和图像质量进一步降低.

与之相应,提高 SAR 图像的分辨率通常有两种途径:其一是优化设计成像系统,改进或更新系统硬件(如增大系统带宽和合成孔径长度等),提高系统理论分辨率;其二是利用数据后处理方法提高图像的分辨率.由于改进或更新系统硬件代价大、周期长,而且受限于技术的发展,故基于现有的硬件设备,通过建立物理模型和数学模型,研究提高 SAR 图像分辨率的数据后处理技术,具有特别重要的理论意义和应用价值.

利用数据后处理方法提高 SAR 图像的分辨率具有两层含义:第一层含义是利用数据处理方法,抑制误差因素影响,使 SAR 图像的分辨率尽量达到系统理论分辨率;第二层含义是利用数据处理方法和图像的先验知识,使获取的 SAR 图像的分辨率超过系统理论分辨率.其中,第一层含义的提高分辨率技术主要包括运动补偿、自聚焦等误差补偿技术,关于这一部分,有关 SAR 的一些书籍中已有介绍,限于篇幅,本书对此不作详细论述.本书主要研究第二层含义的提高分辨率技术.

1.3 提高分辨率的机理

SAR 图像的形成过程可描述为

$$g(x) = \int h(\xi - x)f(\xi)d\xi, \quad (1.3.1)$$

式中, g 是观测图像, h 是成像系统的点扩展函数, f 是被成像物体.该式经 Fourier 变换后得频域表达形式如下:

$$G(u) = H(u)F(u), \quad (1.3.2)$$

式中, G 、 H 和 F 分别为 g 、 h 和 f 的 Fourier 变换.

式 (1.3.2) 表明, F 的重构可通过 G 与 H 求商来完成.但是,由于 H 在截止频率之外为零,故重构截止频率之外的 F 似乎是不可能的.因此,从这个角度看,提高分辨率似乎既无理论意义也无实际意义^[6].

然而还存在这样一个事实: 在截止频率以下的信息直接与截止频率以上的信息相关. 如考虑一个紧目标 (正的且具有有限支撑区域的目标) 的成像, 即目标具有以下性质

$$\begin{aligned} f(x) &> 0, \quad x \in X, \\ f(x) &= 0, \quad x \notin X, \end{aligned} \quad (1.3.3)$$

式中, X 表示目标的支撑区域. 式 (1.3.3) 也可表示为

$$f(x) \operatorname{rect}(x/X). \quad (1.3.4)$$

将 $f(x)$ 的 Fourier 谱分为两部分: $F_a(u)$ 和 $F_b(u)$, 其中, $F_a(u)$ 为截止频率以上的谱成分, $F_b(u)$ 为截止频率以下的谱成分, 则有

$$F(u) = [F_a(u) + F_b(u)] * \operatorname{sinc}(Xu), \quad (1.3.5)$$

式中, “*” 表示卷积. 由式 (1.3.2), 有

$$G(u) = H(u) \{ [F_a(u) + F_b(u)] * \operatorname{sinc}(Xu) \}. \quad (1.3.6)$$

由于 sinc 函数的支撑区域是 $(-\infty, +\infty)$, 故将有高于截止频率的目标谱成分通过卷积被引入到低于截止频率以下的成分中, 即通过传递函数包含在所获取的图像中. 显然, 如果有一种方法能找到这些信息, 这就是提高分辨率的基础. 但是, 这种思想实施起来有以下两个困难:

(1) 这些高频谱分量非常小. 因为它是由信号与 sinc 函数的“小尾部”卷积得到的, 并且可能被成像过程中的噪声掩盖.

(2) 由卷积引入的谱成分和截止频率以下的谱成分没有显著的区别. 方程 (1.3.5) 表明, 它们是通过线性组合的方式联系在一起, 两者的分离并不很容易.

提高分辨率算法必须利用先验信息. 记目标的估计为 f_e , 则对满足先验信息 (1.3.3) 的目标, 有

$$G_e(u) = F_e(u)H(u). \quad (1.3.7)$$

对一幅有界的、非负的实际观测图像, 在处理过程中必须施加以下的约束条件: 解的空间截断和非负的数字截断. 由此带来的运算是一个非线性操作运算, 而信号的非线性操作具有附加高频成分的性质. 因此, 通过对约束操作引入的高频分量的逐步调整, 即可实现图像提高分辨率.

在给定系统传递函数的条件下, 具体的带约束操作的优化准则如下:

$$\operatorname{Min}_{f_e} \{ [g(x) - f_e(x) * h(x)]^2 \},$$

满足 $f_e(x) > 0, x \in X; f_e(x) = 0, x \notin X$.

由 Parseval 定理, 上述问题等价于

$$\text{Min}_{F_e} \left\{ [G(u) - F_e(u) H(u)]^2 \right\}.$$

这是频域的优化准则形式.

有多少在截止频率以外的信息能够被恢复? 考虑到噪声因素, 则类似模型 (1.3.6), 有

$$G(u) = H(u) \{ [F_a(u) + F_b(u)] * \text{sinc}(Xu) \} + N(u), \quad (1.3.8)$$

式中, $N(u)$ 表示噪声谱. 按上述最优化过程求解, 当最优解接近噪声水平时, 解开始在解空间徘徊, 这个徘徊可被检测到并可用于作为终止优化过程的准则. 我们认为, 提高分辨率算法的性能依赖于噪声存在时能够被恢复的截止频率以外的空间频谱分量的多少. Sementilli 等^[7] 有一个结果如下:

$$f_e = \frac{3}{4\pi X} \left[\text{sinc}^{-1} C_1 - \text{sinc}^{-1} \left(\frac{C_1 T}{\sigma_n} \right) \right], \quad (1.3.9)$$

式中, C_1 为峰值旁瓣比, T 为容许的误差水平, σ_n 为噪声标准差. 式 (1.3.9) 也进一步说明, 提高分辨率技术的性能依赖于有足够多的截止频率以下的频谱分量在噪声水平之上.

提高分辨率的概念自 1952 年提出以来^[8], 在光学图像中的应用日益广泛, 原理趋于成熟^[9~13]. 然而, 人们对相应的提高分辨率理论在 SAR 图像上的应用则有着不同的理解, 曾有过激烈的争论, 但由于有着强烈的实际需求, 这些争论并没有阻挡人们对其研究的热情及其进展. 至今为止, 研究提高分辨率的文献已经非常多^[14~63], 经过综合、整理和提炼关于提高分辨率机理的大量争论和论述, 我们认为: SAR 图像提高分辨率技术的本质是外推成像系统带宽之外的图像频谱, 以使图像获得更多的细节; 提高分辨率的目的, 是通过对收集到的信号进行处理, 来获得比物理传感器所能提供的分辨率 (系统理论分辨率) 更高的分辨率.

在具体的提高分辨率方法实施中, 我们认为: 先验信息是提高分辨率的前提, 提高分辨率必须附加先验信息; 而利用各种先验信息建立精确的目标和背景的节省参数模型, 同时改进参数的估计方法、提高参数估计的精度是提高分辨率的重要手段. 这种情况下, 提高分辨率的性能主要取决于模型的准确度和参数估计的精度. 需要注意的是, 分辨率并不是可以无限制地提高, 其极限主要取决于先验信息的质量、噪声水平以及实际待处理的图像质量.

1.4 SAR 图像提高分辨率方法的研究现状及发展趋势

如前所述, 为了实现提高分辨率的目的, 通常有两种途径可供选择: 其一是优