

SAR 图像提高分辨率技术

王正明 朱炬波 等著

科学出版社

北京

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与技术,主要包括 SAR 图像提高分辨率的内涵及处理的机理研究、SAR 图像先验信息的开采与建模方法、SAR 图像的相干斑抑制方法,并重点介绍了基于偏微分方程方法的保分辨率相干斑抑制方法、SAR 图像提高分辨率处理的几种典型方法,给出了各种方法对先验信息的要求及应用的边界条件,最后介绍了 SAR 图像的质量评价准则。

本书具有理论性与实用性,适合于从事 SAR 图像处理的科研人员、高等院校的教师、研究生和高年级大学生使用,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/王正明等著. —北京: 科学出版社, 2006

ISBN 7-03-017785-1

I. S… II. 王… III. 合成孔径雷达-分辨率-图像处理 IV. TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 090876 号

责任编辑: 范庆奎 张启男 杨 然 / 责任校对: 李奕萱

责任印制: 安春生 / 封面设计: 王 浩

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

*

2006 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 10 月第一次印刷 印张: 20 1/4

印数: 1—2 000 字数: 385 000

定价: **52.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

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多种误差因素的影响. 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, 利用数据处理技术提高 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, 本书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.

全书共 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.

图 1 给出了本书的技术路线以及各章之间的联系.

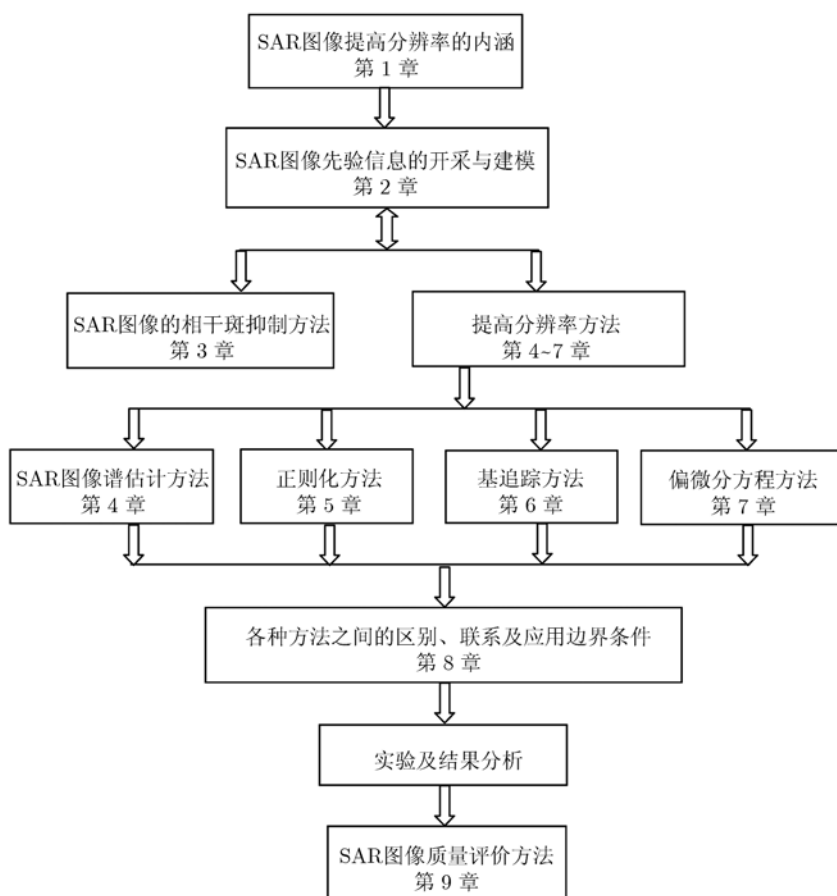


图1 本书的技术路线及各章之间的联系

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。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

2006年5月于长沙

目 录

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	9
第 2 章 SAR 图像先验信息的开采与建模	12
2.1 SAR 成像的基本原理	12
2.2 SAR 成像过程的先验信息	20
2.3 噪声、杂波的先验信息	25
2.4 目标的先验信息	35
2.5 先验信息的统计建模方法	44
参考文献	54
第 3 章 SAR 图像的相干斑抑制方法	56
3.1 概述	56
3.2 不利用局域统计特性的滤波算法	57
3.3 基于局域统计特性的自适应滤波方法	59
3.4 相干斑抑制的偏微分方程方法	64
3.5 应用效果分析	89
参考文献	95
第 4 章 提高分辨率的谱估计方法	97
4.1 概述	97
4.2 基于 Relax 的谱估计方法	98
4.3 极大似然谱估计方法	103
4.4 基于非线性回归模型的谱估计方法	114
4.5 正则化谱外推方法	123

4.6 应用效果分析	128
参考文献	129
第 5 章 提高分辨率的正则化方法	131
5.1 概述	131
5.2 正则化方法	131
5.3 正则化方法的参数选择	139
5.4 正则化方法的求解	147
5.5 应用实例及效果分析	153
5.6 本章小结	169
参考文献	170
第 6 章 提高分辨率的基追踪方法	172
6.1 概述	172
6.2 常见的信号表示方法	173
6.3 基追踪方法的基本原理	179
6.4 基于紧致字典的基追踪方法	191
6.5 基于 Fourier 字典的基追踪方法	200
6.6 基于单位字典的基追踪方法	206
6.7 本章小结	212
参考文献	213
第 7 章 提高分辨率的偏微分方程方法	215
7.1 概述	215
7.2 光学图像提高分辨率的偏微分方程方法	215
7.3 SAR 图像提高分辨率的偏微分方程方法	224
7.4 模型与参数选取	232
7.5 应用效果分析	250
参考文献	256
第 8 章 主要提高分辨率方法的联系	258
8.1 概述	258
8.2 提高图像分辨率的主要方法	258
8.3 提高图像分辨率方法与相关稀疏先验的关系	269

8.4 各主要方法之间的区别与联系	279
8.5 主要提高分辨率方法的边界条件及分析	284
参考文献	287
第 9 章 SAR 图像质量评价方法	289
9.1 概述	289
9.2 SAR 图像传统质量评价方法	289
9.3 基于插值的 SAR 图像分辨率评价方法分析	291
9.4 基于假设检验的分辨率计算方法	305
参考文献	314

第 1 章 SAR 图像提高分辨率的内涵

SAR 是一种高分辨率微波成像雷达, 虽然这类雷达一般比较复杂, 且系统参数甚多, 但是用户关心的只是它的最终产品——SAR 图像. 分辨率是表征 SAR 图像质量的最重要的参数之一, SAR 图像的分辨率越高, 后续的应用性能就会越好. 因此, 提高 SAR 图像的分辨率是 SAR 技术发展的主要目标之一.

本章首先介绍分辨率的概念, 然后阐述 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

分辨率是表征图像质量的重要技术指标之一. 但是, 分辨率的概念却比较笼统, 不同的领域对分辨率可能会有不同的定义. 在 SAR 领域, 主要关心的是 SAR 图像的空间分辨率, 本书中的“提高分辨率”也是指提高 SAR 图像的空间分辨率.

空间分辨率定义为点目标冲激响应半功率点处的宽度 (亦即 3dB 主瓣宽度), 它是衡量 SAR 系统能够分辨地面两个相邻目标最小距离的尺度^[1].

为清楚理解 SAR 图像的空间分辨率的概念, 下面以条带式 SAR 为例, 介绍 SAR 的几个基本概念.

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 所示为条带式 SAR 的基本空间几何关系. 图中, 我们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, 我们称 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:

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

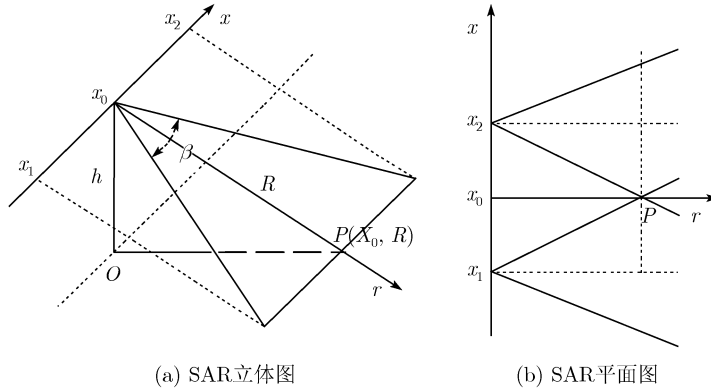


图 1.1 条带式 SAR 空间几何关系示意图

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),它们分别定义为距离向和方位向点目标冲激响应半功率点处的宽度,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。

下面讨论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 范围内取值. 为了书写简便, 通常^[2]取 $k = 1$.

可见, 真实孔径雷达要提高方位向分辨率, 就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, 因子 $\frac{1}{2}$ 是考虑到 SAR 的发射和接收总是共用一幅天线, 从而进一步锐化了波束, L_s 为合成孔径长度. 对于图 1.1 所示的条带式 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, SAR 图像的距离向分辨率和方位向分辨率理论上分别取决于系统工作带宽和合成孔径长度. 但是, 系统实际获取的 SAR 图像的分辨率并不完全由这两个式子决定, 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, 因此, 实测分辨率常劣于系统理论分辨率.

1.2 SAR 图像提高分辨率的含义

SAR 的应用性能取决于获取的 SAR 图像的质量. SAR 图像的质量越高, 其后续的应用性能就会越好. 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, 人们从图像中获取的关于目标的信息就越丰富^[5]. 因此, 提高 SAR 图像的分辨率是 SAR 技术发展的主要目标之一.

一般来说, 有两大类因素会导致获取图像的分辨率较低: 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、成像条件不理想以及系统噪声等, 它们会造成图像的模糊、散焦和几何变形, 使得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: 其一是改进和更新硬件(如增大系统带宽和合成孔径长度), 提高系统理论分辨率; 其二是利用数据软处理方法, 提高算法的精度. 由于改进和更新硬件所需周期长、成本高, 而且受限于技术的发展, 因此, 利用数据软处理技术来提高分辨率显得尤为重要。

利用数据处理方法提高 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 图像的分辨率达到系统理论分辨率; 第二层含义是利用数据处理方法, 使获取的 SAR 图像的分辨率超过系统理论分辨率(即所谓的超分辨). 其中, 第一层含义的提高分辨率技术主要是指运动补偿和自聚焦等误差补偿技术, 关于这一部分, 有关 SAR 的书籍中都有介绍, 限于篇幅, 本书不在此做详细论述. 本书主要研究的是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, 因此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! 如我们考虑一个紧目标 (正的且具有有限的支撑区域的目标) 的成像. 即目标具有以下性质

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

式中, X 表示目标的支撑区域. 式 (1.3.3) 也可表示为

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

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

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

式中, “*” 表示卷积. 由式 (1.3.2), 有

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

由于 sinc 函数的支撑区域是 $(-\infty, +\infty)$, 因此, 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, 这种思想在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, 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 , 则满足先验信息式 (1.3.3) 的目标有

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

对一幅有界的和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:

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

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, 则类似于模型 (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. 如 Sementilli 等有一个结果如下 [7]:

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

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.

提高分辨率的概念始于 1952 年 [8]. 关于提高分辨率这个主题的文献也相当多 [9~31], 其中对提高分辨率的机理有多种不同的理解. 经过综合、整理和提炼大量关于提高分辨率机理的争论和论述, 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以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和噪声水平.

1.4 SAR 图像提高分辨率方法的研究现状及发展趋势

1.4.1 提高分辨率方法的研究现状

有关 SAR 图像提高分辨率这个主题, 目前有相当多的研究工作, 包括提高分辨率的含义、提高分辨率的各种算法构想以及提高分辨率的争议等. 如 Stankwitz 和 Kosek 提出使用空间变迹方法进行提高分辨率 [13]. 假定图像数据是有限带宽的, 他们运用设计的变迹法去除亮目标的旁瓣. 此过程能迭代求解. 然而这种方法不像是提高分辨率, 更像是图像增强. Guglielmi 等 [17] 在概率分布的先验信息上进行提高分辨率. Borison 等 [18] 讨论提高分辨率的方法, 包含带宽外推和旁瓣去除等. 他们还讨论了基于旋转点目标的扩展的连贯处理过程. DeGraaf [19] 将一些提高分辨率方法进行比较, 并得出结论: 所有这些方法都或多或少利用了散射模型.

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: 其一是采用信号超宽带和超长合成孔径; 其二是在不增加信号谱宽和合成孔径长度的情况下, 研究提高分辨率的数据处理方法.

采用信号超宽带和超长合成孔径的方法提高分辨率原理简单,但通常对硬件的要求较高.文献[19]提出了一种用分布式小卫星来提高 SAR 的方位向分辨率的方法.该方法把多个卫星天线的波束进行相干合成,从而达到增加合成孔径长度,提高方位向分辨率的目的.分布式小卫星是近年来出现的一种新的卫星组网形式,它也是 SAR 未来发展趋势之一.超宽带合成孔径雷达 (ultra-wide band SAR, UWB-SAR) 将超宽带技术和 SAR 技术结合在一起而成为一种具有独特应用价值的成像雷达.在军事领域, UWB-SAR 的重要用途在于能够穿透地表和叶簇以探测隐蔽在地下或树林中的人造军用目标.众所周知,电磁波的穿透能力与其波长成正比,因此 UWB-SAR 一般工作在 $10^7 \sim 10^9$ Hz 的 UHF/VHF 波段.同时,为了获得米级甚至亚米级的距离向高分辨率,信号绝对带宽的数量级需达 10^8 Hz 以上,这使得雷达系统的瞬时相对带宽 (绝对带宽与中心频率之比) 远远超过了传统窄带雷达,这也是“超宽带 (UWB)”一名的由来.以美国密执安环境研究所 (ERIM) 与美国海军航空武器中心 (NAWC) 共同开发的 P3-SAR 为例,其信号频率范围是 200~900 MHz,那么瞬时相对带宽几达 130%.如此低的工作频率、如此大的系统瞬时相对带宽,无论是对 SAR 系统研制还是对 SAR 信号处理都会产生许多极具难度的挑战.

采用信号超宽带和超长合成孔径的方法还会带来许多新的问题,尤其对运动补偿和成像处理方法提出了更高要求.目前已有许多自聚焦方法被提出,以实现精确的相位校正;同时一些适合于大距离徙动的成像算法也已被提出,如 Chirp Scaling (CS) 算法等.但它们在应用中还有一些问题有待解决.因此,采用信号超宽带和超长合成孔径的方法在实际应用中受到局限.

与改进硬件相比,通过研究提高分辨率的数据处理方法来提高 SAR 图像的分辨率不但成本低,而且可行性好,具有很大的现实意义.因此,研究提高分辨率的数据处理方法越来越得到研究者的关注,提高分辨率方法的研究近年来已成为图像处理领域最为活跃的研究课题之一.近年来发展起来的提高分辨率方法,如现代谱估计方法、带宽外推方法以及正则化方法等突破了传统瑞利极限的限制,被广泛应用于雷达阵列信号处理、语音、声呐等领域.

目前,国内外关于 SAR 图像提高分辨率技术的研究,主要有单帧图像和多帧图像两方面.由于 SAR 的工作特点,一般情况下,很难获得同一地区的多帧 SAR 图像.因此目前的提高分辨率的数据处理方法大部分是基于单帧 SAR 图像.

提高分辨率技术在雷达成像领域中蓬勃发展的时期则为近十年,研究领域覆盖了 SAR、ISAR 以及 InSAR 成像.总的来说,目前常见的提高分辨率的数据处理方法主要有以下几类:

(1) 通过成像系统的点扩展函数的伪逆并通过反卷积得到提高分辨率图像^[21].

此类方法将雷达成像系统看成对场景反射的电磁信号的一系列矩阵操作,所以,获得目标反射强度分布的问题可以看成一个矩阵求逆问题.理想情形下,成像系统

的点扩散函数 (point spread function, PSF) 需精确已知, 而对 PSF 求逆运算则等价于场景反射强度的最小二乘估计. 这类方法的缺点在于: 对于实际的 SAR 成像系统, 即使经过运动补偿, 残余误差仍然使得 PSF 产生扰动, 从而使得提高分辨率的性能变差.

(2) 带宽外推方法.

由 SAR 成像原理可知, SAR 的分辨率与系统带宽密切相关. SAR 的距离向分辨率和方位向分辨率分别反比于系统带宽和多普勒带宽, 因此, 增大带宽是提高分辨率的有效途径. 分辨率的提高等效于系统带宽 (或成像积累角) 的增大. 雷达系统的带宽总是有限的, 所谓带宽外推, 是指已知带限信号在某一带宽范围内的数据, 由此而求出该带宽以外的数据. 可见, 带宽外推实质是在频域上的数据外推.

对于连续的带限雷达信号, 系统带通以外的频谱理论上可利用解析连续的方法得到. 然而, 解析连续加噪声后不再解析, 且解析连续包含了导数运算, 而求导对噪声非常敏感. 后来, D. Slepian 等人提出长球函数展开法. 由于长球函数能构成完备正交系, 而且在有限区间内仍然保持其正交性, 因此, 可以由带限信号的有限长度段求出长球函数展开的系数, 从而重构原信号. 这种方法对噪声不敏感, 但是, 计算长球函数及其系数, 无论在计算量还是在存储量上都是很大的. 后来发展起来的带宽外推方法将雷达接收的信号模型为自回归 (AR) 过程, 模型参数由实时接受到的信号自适应估计得到. 由模型参数对接收的数据进行外推, 随后对外推的数据用快速 Fourier 变换的方法得到雷达像. 文献[25]采用线性外推的方法得到一维高分辨率距离像, 而文献 [18~24] 采用二维线性外推的方法得到提高分辨率的 SAR 图像.

对于 SAR 图像提高分辨率来说, 带宽外推方法在高信噪比和高目标杂波比的情况下有较好的提高分辨率效果, 但它存在外推模型与观测数据不匹配的问题.

(3) 谱估计方法.

谱估计方法是迄今为止提高分辨率成像研究中最活跃也是较为成熟的一个领域. 谱估计方法用于 SAR 成像, 其主要目的是在从相位历史域数据到 SAR 成像的过程中取代 Fourier 成像, 以获得更高分辨率的 SAR 图像. 谱估计方法可分为参数化方法和非参数化方法. 非参数化谱估计方法又称经典谱估计方法, 主要包括加窗周期图方法、Blackman-Tukey 方法、Welch 方法等; 参数化谱估计方法又称现代谱估计方法, 主要包括 Capon 方法^[20]、APES 方法^[32]、MUSIC 方法^[26,27]、最大似然估计算法^[28]、Relax 算法^[31]等. 一般来说, 就分辨率和精度而言, 参数化方法的性能比非参数化方法好, 但其对数据模型误差更为敏感.

大多数现代谱估计方法对于理想点散射模型能够有效地抑制旁瓣, 提高目标的分辨率, 但对于非点散射模型不是很理想, 如包含分布式散射体的图像以及城区图像等. 另外, 大多数现代谱估计方法需要估计数据的相关阵, 计算量非常大. 近年来, 现代谱估计方法也正在不断地改进和完善. 本书第 7 章也专门对利用现代谱估计方

法提高分辨率进行了研究.

(4) 正则化方法.

正则化方法的提出, 源于对数学中反问题的求解. 应当认识到, 反问题的不稳定性是问题本身所固有的一种特征, 如果没有关于待求解问题的先验信息, 这一本质性的困难是无法克服的. 通常, 人们使用正则化方法求解反问题. 正则化方法是依据问题背景所能提供的关于待求解的先验信息, 尽可能多地、尽可能稳定地还原问题的信息. 从这个意义上说, 正则化方法是符合提高分辨率的机理的.

目前, 根据 SAR 图像的先验信息, 构造适合的约束条件, 利用正则化方法进行提高 SAR 图像的分辨率也发展成为提高分辨率的技术之一^[28,29].

1.4.2 提高分辨率方法的发展趋势

由于应用需求的迫切性, 国内外关于提高分辨率方法的研究热情越来越高, 新方法也层出不穷, 并且在卫星遥感图像处理、成像侦察等领域应用方面都取得了很大的进展. 综合国内外关于 SAR 图像提高分辨率处理的大量文献^[6~36], 关于 SAR 图像提高分辨率技术研究的发展趋势具有以下五个特点:

- (1) 完善现有的提高分辨率方法, 不断地研究和探索新的方法;
- (2) 增强方法鲁棒性的研究, 以尽可能适应不同的应用条件;
- (3) 改善算法收敛性、提高算法计算速度, 以适应可能出现的各种情况;
- (4) 更多考虑目标散射模型和杂波噪声模型, 更多利用各种先验信息和约束条件;
- (5) 提高分辨率方法和实际应用的相结合, 如自动目标识别等.

参 考 文 献

- 1 魏钟铨等. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001
- 2 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论. 北京: 国防工业出版社, 2003
- 3 刘永坦. 雷达成像技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003
- 4 张澄波. 综合孔径雷达——原理系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989
- 5 张直中. 雷达信号的选择与处理. 北京: 国防工业出版社, 1979
- 6 Hunt B R. Super-Resolution of Imagery: Understanding the Basis for Recovery of Spatial Frequencies Beyond the Diffraction Limit. http://www.eleceng.adelaide.edu.au/ieec/idc99/paper/hunt_bobby_2.pdf
- 7 Sementilli P, Hunt B, Nadar M. Analysis of the limit to superresolution in incoherent imaging. J. Opt. Soc. Amer. A, 1993, 10: 2265~2276
- 8 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics. New York: McGraw-Hill, 1968
- 9 Brito E, Shiu H Chan, Serigo D Cabrera. SAR Image Formation Using 2-D Re-Weighted Minimum Norm. SPIE Conference on Algorithms for SAR Imagery VI, Orlando, Florida, 1999

- 10 Haywood, Evans R J. Discrete 2-D system identification for imaging rotating radar targets. *Signal Processing*, 1992, 29: 191~211
- 11 Dickey F M, Romero L A. Super-Resolution and Synthetic Aperture Radar. Sandia National Laboratories. <http://infoserve.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/2001/011532.pdf>
- 12 Dickey F M, Romero L A, Delaurentis J M, Doerry A W. Super-resolution, degrees of freedom and synthetic aperture radar. *IEE Proc. radar Sonar Navig.*, 2003, 150(6): 419~429
- 13 Stankwitz H C, Kosek M R. Super-resolution for SAR/ISAR RCS measurement using spatially variant apodization. *Proceedings of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA) 17th Annual Meeting and Symposium, Williamsburg, VA, 1995*, 13~17
- 14 Farsiu S, Robinson D, Elad M, Milanfar P. Advances and Challenges in Super-Resolution. <http://www.cse.ucsc.edu/~milanfar/SR-challengesIJIST.pdf>
- 15 Joyce L S, Root W L. Precision bounds in superresolution processing. *J. Opt. Soc. Am.*, 1984, 1(2): 149~168
- 16 Baker S, Kanade T. Limits on super-resolution and how to break them. *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, 2002, 24(9): 1167~1183
- 17 Guglielmi V, Castanie F, Piau P. Application of superresolution methods to synthetic aperture radar data. *Proc. IGARSS 3*, 1995, 2289~2291
- 18 Borison S L, Bowling S B, Cutomo K M. Superresolution methods for wideband radar. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1992, 5(3): 441~461
- 19 禹卫东. 用分布式小卫星提高星载 SAR 的方位向分辨率. *系统工程与电子技术*, 2002, 24(7): 43~45
- 20 DeGraaf S R. SAR imaging via 2-D spectral estimation methods. *SPIE proc. on Optical Engineering in Aerospace Sensing, Orlando, FL, 1994*, 2230: 36~49
- 21 Haywood B, Evans R J. Discrete 2-D system identification for imaging rotating radar targets. *Signal Processing*, 1992, 29(2): 191~211
- 22 Nuthalapati R M. High resolution reconstruction of SAR image. *IEEE on Aerospace and Electronic System*, 1992, 8(2): 462~472
- 23 董臻, 朱国富. 基于外推的 SAR 图像分辨率增强算法. *电子学报*, 2002, 30(3): 359
- 24 Gupta I J. High-resolution radar imaging using 2-D linear prediction. *IEEE on Antennas and Propagation*, 1994, 42(1): 31~37
- 25 Garbriel W F. Improved range superresolution via bandwidth extrapolation. *Proceeding of the National Radar Conference. NA: Lynnfield, 1993*, 123~127
- 26 Barbarossa S, Marsili L, Mungari G. SAR super-resolution imaging by signal subspace projection techniques. *Proc. of EUSAR. Germany: Konigswinter, 1996*, 267~270
- 27 Odendaal J W, Barnard E, Pistorius C W I. Two-dimensional superresolution radar imaging using the MUSIC algorithm. *IEEE trans on Antennas and Propagation*, 1994, 42(10): 1386~1391
- 28 Cetin M, Karl W C. Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on non-quadratic regularization. *IEEE Trans. Image Processing*, 2001, 10: 623~631
- 29 Cetin M, Karl W C, Castanon D A. Evaluation of a regularized SAR imaging technique based on recognition-oriented features. *SPIE*, 2000, 4053
- 30 Tu M W, Gupta I J, Walton E K. Application of maximum likelihood estimation to radar imaging. *IEEE trans on Antennas and Propagation*, 1997, 45(1): 2027
- 31 Li J, Stoica P. Efficient mixed-spectrum estimation with application to target feature extraction. *IEEE Trans. on Signal Proceeding*, 1996(a), 44(2): 281~295

-
- 32 J. Li, P. Stoica, An adaptive filtering approach to spectral estimation and SAR imaging, IEEE Trans. on Signal Proceeding, 1996(b), 44(6): 1469~1484
 - 33 Gigli A. Overview of foliage/ground penetration and interferometric SAR experiments. SPIE 1994,2230: 209~216
 - 34 Munson D C. A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar. Proc. IEEE, 1983, 71(8): 917~925
 - 35 Riesz F, Nagy B Sz. Functional analysis. Dover Publications Inc. New York, USA, 1990
 - 36 J. L. Walker, Range-doppler imaging of rotating objects. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1980, 16(1): 23~52

第2章 SAR 图像先验信息的开采与建模

SAR 图像先验信息的合理开采与运用, 对于 SAR 图像提高分辨率处理至关重要. SAR 图像处理是一门综合性学科, 它要求对 SAR 成像的物理机理及其数据特性有深入的理解.

对于 SAR 图像而言, 先验信息的来源、挖掘和应用等范围都是很广的, 无论是成像模型、杂波模型、噪声模型、图像概率模型、目标特征, 还是成像过程中的各个环节, 都有可挖掘的信息, 特别是从物理模型和工程背景、已有资料和实测图像中, 均可以得到我们所需要的先验信息. 这里先验信息的种类也是多种多样的, 包括先验模型、物理参数、统计参数、特征参数、几何参数和表示方法等.

SAR 图像先验信息的开采, 主要借助于物理分析、数学分析和实验验证的手段, 从 SAR 成像过程的先验信息、SAR 图像所含目标、杂波和噪声的先验信息以及图像概率模型的先验信息四个方面, 开采有关成像背景、目标、模型及噪声的先验信息.

先验信息的合理建模是先验信息得到有效应用的前提. 因此为了实际应用, 对各类先验信息的获取进行比较深入的工程背景和理论分析, 尽可能地将各种有用的先验信息模型化, 给出其合适的表达形式.

2.1 SAR 成像的基本原理

对于 SAR 图像, 所谓高分辨率包含两方面的含义: 高的距离向分辨率和高的方位向分辨率. SAR 通常采用发射大时间带宽积信号, 利用脉冲压缩技术来获取距离向的高分辨率; 而方位向的高分辨率则是通过天线相对于目标的运动以及信号处理 (合成孔径技术) 来获取.

2.1.1 脉冲压缩技术与线性调频信号

SAR 与一般雷达设备的共同之处是既有探测距离的要求, 又要提高信噪比. 为了既能提高信噪比又不至于对发射信号要求过大的峰值功率, 雷达常依赖于脉冲压缩技术^[1,2], 采用发射大时间带宽积信号. 采用大时间带宽积信号能同时得到最佳的时间和频率联合分辨能力, 而且也是在一定的时间和频率分辨率要求下, 提高雷达发射脉冲能量的利用率, 提高杂波抑制能力的有效途径.

通常有两种大时间带宽积信号：调频信号和相位编码信号^[3]。线性调频 (linear frequency modulated, LFM) 信号由于其产生和处理方法简单而最先得应用, 并且时至今日已是较为成熟和应用最广泛的一种大时间带宽积信号。

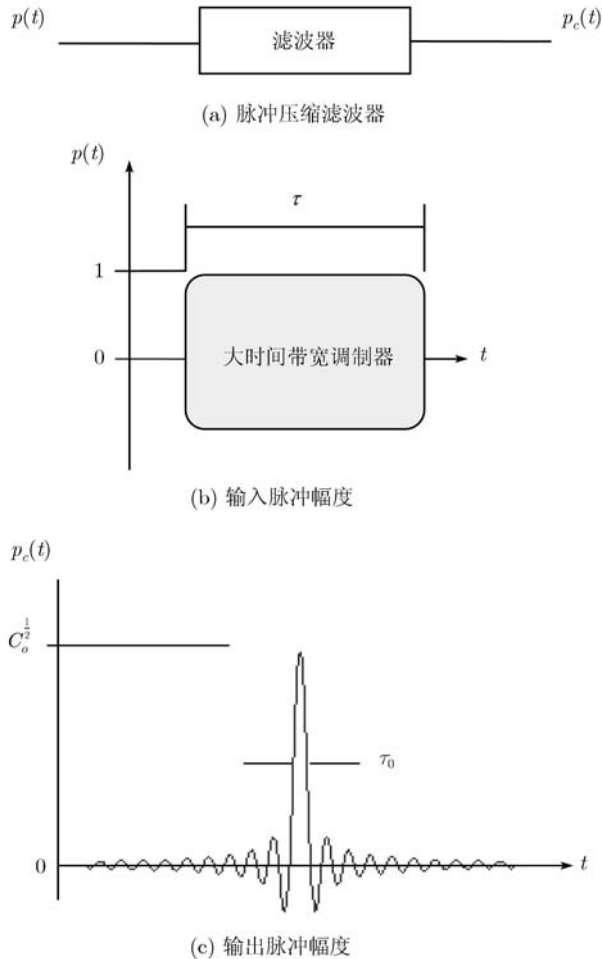


图 2.1 脉冲压缩示意图

将大时间带宽积信号通过匹配滤波器, 校正各频谱分量的相位使之同相并进行叠加, 在匹配滤波器输出端将得到窄脉冲信号, 这个过程称之为脉冲压缩, 示意图见图 2.1. 匹配滤波是实现脉冲压缩的有效手段, LFM 信号经过匹配滤波后实现了脉冲压缩. 下面分析 LFM 信号的脉冲压缩性质.

LFM信号是指在信号持续时间内频率连续线性变化的调频信号. 归一化的LFM信号可写为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2\right)\right], \quad (2.1.1)$$

式中, f_0 为载频, k 为线性调频斜率, T 为信号持续时间, $\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$ 表示矩形函数, 定义如下:

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

对 LFM 信号 $s(t)$ 进行 Fourier 变换, 可近似得到其幅度谱 $|S(j\omega)|$ 和相位谱 $\phi(j\omega)$ 分别为^[1]

$$|S(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{k}} \text{rect}\left(\frac{\omega}{\Delta\omega}\right), \quad \phi(j\omega) = -\frac{\omega^2}{4\pi k} + \frac{\pi}{4}. \quad (2.1.2)$$

式 (2.1.2) 是通过近似得到的, LFM 信号的时间带宽积越大, 其精确度就越高. 也就是说, 在大时间带宽积的条件下, LFM 信号具有以下特点: ①幅度谱接近于矩形, 频谱宽度 Δf 近似为信号频率的调频变化范围 ($\Delta f = kT$); ②相位谱具有平方律特性. 此结论是设计匹配滤波器进行脉冲压缩处理的主要依据^[3].

根据匹配滤波原理, 脉冲压缩的输出波形是输入波形的自相关函数. 由此不难计算出 LFM 信号经脉冲压缩后的输出信号 $g(t)$ 近似为^[1]

$$g(t) \approx T \frac{\sin \pi k t T}{\pi k t T},$$

对上式取模, 则有

$$|g(t)| = T \left| \frac{\sin \pi k t T}{\pi k t T} \right|.$$

可见, LFM 信号经脉冲压缩后, 输出信号的模具有 sinc 函数形状, 图 2.2 为其归一化形状. 当 $t = \pm \frac{1}{kT}$ 时, 输出信号过零点, 如以这两个零点的间隔为主瓣间隔, 则主瓣底宽为 $\frac{2}{kT}$. 通常采用 $\frac{1}{kT}$ 作为输出信号的主瓣宽度, 因为它大约等于 $|g(t)|$ 的半功率点宽度 (也就是输出响应的 3dB 主瓣宽度), 记为 $\tau_0 \triangleq \frac{1}{kT}$.

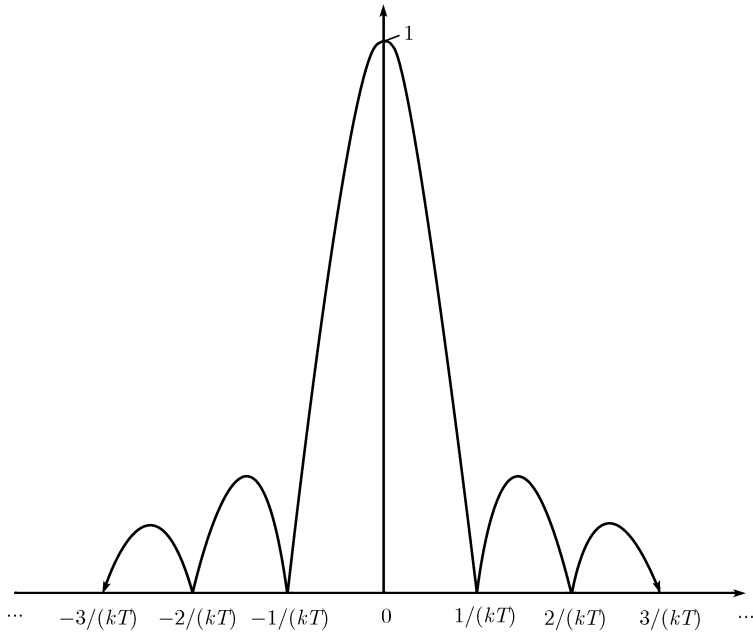


图 2.2 LFM 信号的匹配滤波输出响应

根据以上所述, LFM 信号的脉冲压缩比为

$$r = \frac{T}{\tau_0} = kT^2 = T \cdot \Delta f.$$

此式表明, LFM 信号的脉冲压缩比等于该信号的时间带宽积. 时间带宽积越大, LFM 信号的脉冲压缩性质越好.

2.1.2 SAR 信号特征

设 SAR 发射如下的具有大时间带宽积的 LFM 信号:

$$s(t) = \text{Re} [u(t) e^{j\omega_c t}], \quad u(t) = A e^{j\frac{1}{2}k_r t^2},$$

式中, A 为发射信号幅度, k_r 为线性调频率, ω_c 为载频. 则离雷达的距离为 R 的单位点目标的回波信号可以表示为

$$s_r(x, t) = \text{Re} \left[K u \left(t - \frac{2R}{c} \right) e^{j\omega_c \left(t - \frac{2R}{c} \right)} e^{-j\frac{2k_r}{\lambda R} (x-X)^2} \right],$$

式中, K 表示天线增益, $u \left(t - \frac{2R}{c} \right) e^{j\omega_c \left(t - \frac{2R}{c} \right)}$ 为发射信号经过时延 $\frac{2R}{c}$ 后的信号形式, 它决定 SAR 的距离向分辨率; $e^{-j\frac{2k_r}{\lambda R} (x-X)^2}$ 为方位回波多普勒信号, 它决定雷

达的方位向分辨率. 将 $u(t)$ 的表达式代入上式得

$$s_r(x, t) = \operatorname{Re} \left[K A e^{j\omega_c(t-\alpha)} e^{j\frac{1}{2}k_r(t-\alpha)^2} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda R}(x-X)^2} \right]. \quad (2.1.3)$$

由式 (2.1.3) 可见, SAR 发射 LFM 信号, 经点目标散射后的回波信号在距离向和方位向均表现为 LFM 信号形式. 也就是说, SAR 的回波信号是具有双重意义的 LFM 信号, 具体解释如下:

(1) 距离向的 LFM 信号为 $e^{j\omega_c(t-\alpha)} e^{j\frac{1}{2}k_r(t-\alpha)^2}$, 调频斜率为 k_r , 若发射信号脉冲宽度为 τ , 则距离向带宽为 $B = \frac{1}{2\pi} k_r \tau$.

(2) 方位向的 LFM 信号为 $e^{-j\frac{2\pi}{\lambda R}(x-X)^2}$, 将其表示成以时间为自变量的函数, 有

$$s_a(t) = e^{-j\frac{2\pi v_a^2}{\lambda R}(t-t_0)^2}.$$

可见, 方位向 LFM 信号的调频斜率为 $k_a = -\frac{4\pi v_a^2}{\lambda R}$. 在合成孔径时间 T_s 内, 多普勒频率的变化范围称为多普勒带宽, 用 Δf_d 表示, 则有

$$\Delta f_d = \frac{1}{2\pi} |k_a| T_s. \quad (2.1.4)$$

回波信号 (2.1.3) 经二维匹配滤波后的输出即为 SAR 图像. 根据脉冲压缩原理, 理论上, SAR 图像的距离向分辨率 ρ_r 和方位向分辨率 ρ_a 分别为

$$\rho_r = \frac{c}{2B}, \quad (2.1.5)$$

$$\rho_a = \frac{v_a}{\Delta f_d}. \quad (2.1.6)$$

对于条带式 SAR, 将式 (1.1.1) 和式 (1.1.7) 代入式 (2.1.4), 得

$$\Delta f_d = \frac{1}{2\pi} |k_a| T_s = \frac{2v_a^2}{\lambda R} T_s = \frac{2\beta_{0.5} v_a}{\lambda},$$

从而有 $\rho_a = \frac{v_a}{\Delta f_d} = \frac{\lambda}{2\beta_{0.5}} = \frac{l}{2}$, 这与式 (1.1.8) 是一致的.

2.1.3 系统冲激响应

前文的分析表明, SAR 系统本质上相当于一个具有二维脉冲压缩作用的滤波器, 如图 2.3 所示, 图中, $h(x, r)$ 表示系统冲激响应, (x, r) 表示方位——斜距二维变量.

如果系统冲激响应为理想的单位冲激函数 (即 δ 函数), 则 SAR 图像将是地域微波散射系数的正确复现. 因此, 为了使 SAR 图像尽可能逼真地反映地域微波散射系数的真实情况, 应该要求 SAR 的系统冲激响应尽可能接近 δ 函数.

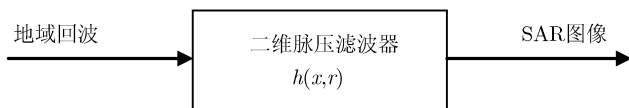


图 2.3 SAR 理论模型

下面来分析 SAR 的系统冲激响应的具体表达形式。

回波信号 (2.1.3) 经同步检波, 减去载频 ω_c , 并将幅度归一化得

$$s_{rd}(x, t) = \text{Re} \left[e^{j\frac{1}{2}k_r(t-\alpha)^2} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda R}(x-X)^2} \right].$$

此信号经匹配滤波后的输出信号即为 SAR 系统的冲激响应. 通过计算可得冲激响应 $h(x, r)$ 的表达式如下^[1]:

$$h(x, r) = \text{Re} \left\{ \left[\tau e^{-j\frac{1}{2}k_r t^2} \frac{\sin \left[\pi \left(\frac{r}{\rho_r} \right) \right]}{\pi \left(\frac{r}{\rho_r} \right)} \right] \left[L_s e^{j\frac{2\pi}{\lambda R} x^2} \frac{\sin \left[\pi \left(\frac{x}{\rho_a} \right) \right]}{\pi \left(\frac{x}{\rho_a} \right)} \right] \right\}. \quad (2.1.7)$$

式中, τ 为信号脉宽. 由式 (2.1.7) 可见, SAR 的系统冲激响应在距离向和方位向均为 sinc 函数形式, 而非理想的 δ 函数, 其示意图如图 2.4 所示.

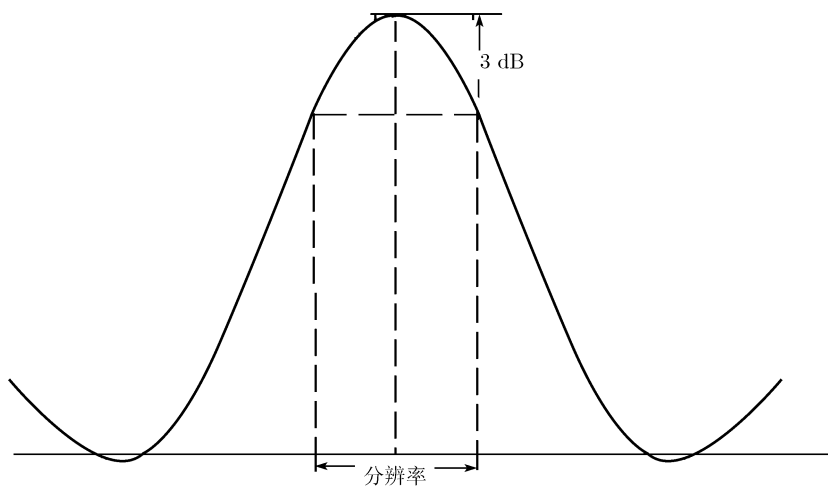


图 2.4 SAR 系统冲激响应

SAR 的系统冲激响应的特征决定了 SAR 图像的质量, 它的主要特征参数如下:

(1) 主瓣宽度：指冲激响应的 3dB 宽度。距离向和方位向的主瓣宽度分别决定 SAR 的距离向分辨率和方位向分辨率。

(2) 杂波宽度：所谓杂波宽度是指这样的矩形宽度，该矩形的长等于冲激响应平方的高度，面积等于冲激响应平方所包围的面积。由于误差因素影响，实际的 SAR 系统冲激响应并不严格是 sinc 函数波形，此时采用 3dB 宽度表示分辨率不太方便，可以采用冲激响应的杂波宽度定义系统的分辨率。

(3) 积分旁瓣比：积分旁瓣比定义为冲激响应旁瓣能量与主瓣能量的比值，它是局部图像对比度的衡量指标，积分旁瓣比越小，图像质量越高。

(4) 峰值旁瓣比：峰值旁瓣比定义为冲激响应的最高旁瓣峰值与主瓣峰值的比值。峰值旁瓣比的大小决定了强目标“掩盖”弱目标的能力。

2.1.4 SAR 图像数据

本小节讨论在后面章节将会用到的一些 SAR 数据产品。

SAR 通过安装在运动平台上的雷达发射信号，接收它们来自目标的回波信号，并将信号下传到地面站。地面站接收、处理和分发 SAR 数据，给出各种数据产品。图 2.5 给出了 SAR 数据的处理流程。根据 SAR 信号处理的不同阶段，SAR 数据产品可分为下述的几种类型^[4,5]。

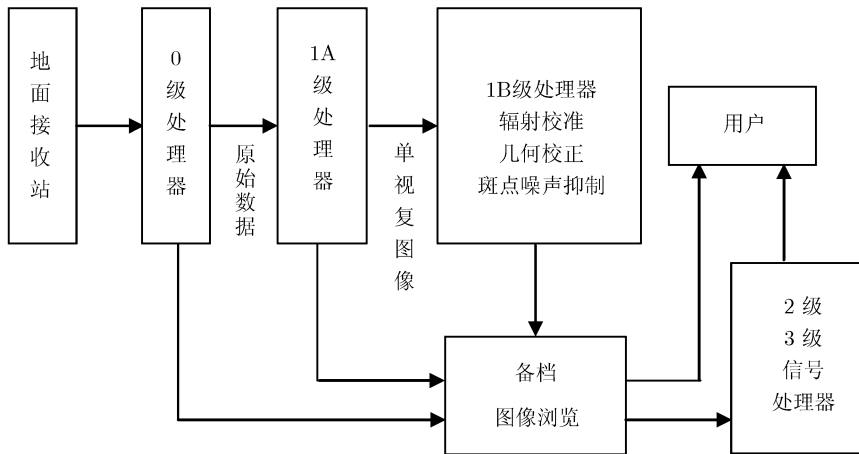
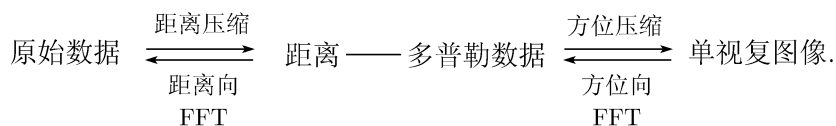


图 2.5 SAR 数据处理流程

(1) 原始数据：地面接收站和零级处理器给出 SAR 原始数据，它是在成像处理前的二维数据，这类数据很难称之为图像。尽管提供的原始数据是二维表格形式，其方向与接收器的物理方向（波的发射方向、卫星移动方向）相联系，然而在这类数据中的信息不是那么直观。这种数据的优点是信息含量高，误差成分少，通常都附带

多种补充信息 (遥测、发射的信号等)。

(2) 单视复数据: 1A 级处理器输出数据。对原始数据进行距离向处理 (距离压缩) 和方位向处理 (方位压缩) 之后, 我们就可以得到一个复数据的二维表, 其方向和接收器的物理方向始终保持一致, 这个时候已经可以称之为图像了, 通常称之为单视复图像 (single look complex, SLC)。此类数据最大的优点就是复数资源, 既包含幅度信息, 又包含相位信息。另外, 至 1A 级处理, 处理步骤基本上是可逆的, 即



(3) 幅度数据: 1B 级处理器输出数据。这类数据不再是复数形式, 而是幅度形式。1B 级处理器完成后处理任务, 包括辐射校正、几何校准以及为减少斑点噪声的低通滤波。这类数据的直接优点就是便于视觉理解。另外, 幅度数据通常是多视的, 而且此操作一般不可逆。

(4) 2 级、3 级处理器输出数据: 这类数据为高水平非图像产品, 它们给出的是与地形地貌特征有关的数据。

在不同的数据域, 数据模型会有不同, 从而会有不同的数据处理方法。后续章节的各种提高分辨率的技术是在不同的数据域上进行的。

2.1.5 影响分辨率的因素分析

设想有两个距离邻近的目标将雷达信号先后反射回来, 通过接收设备输出了两个相邻部分重叠的峰形波。只要这两个峰形波不完全重合, 即使它们在位置上错开极小, 在没有噪声的情况下, 从理论上讲这两个目标还是可能区分的。但显然的是, 错开越小, 区分必定越困难, 这时只要稍微存在噪声, 就将完全无法区分, 而实际上噪声又是不可避免的。

系统能达到的分辨率取决于三个因素: 信噪比、信号形式和信号处理^[5]。信噪比越大, 分辨率必然越好。最佳的信号处理设备必然是与信号相匹配的滤波器。关于信号形式, 不同的信号形式具有不同的分辨率, 可称为信号固有的分辨率。要达到高的分辨率, 应该选择这样的信号: 它通过匹配滤波器后应输出很窄的峰形波。而根据匹配滤波原理, 只有具有宽频谱的信号通过匹配滤波器后才会输出窄峰形波, 由此可见, 信号的带宽决定了分辨率的理论值。

对于 SAR 系统而言, SAR 回波信号在距离向和方位向都表现为 LFM 信号, 根据 LFM 信号的脉冲压缩性质, 理论上, SAR 图像的分辨率由式 (2.1.5) 和式 (2.1.6) 决定, 即距离向分辨率取决于雷达系统带宽, 方位向分辨率取决于多普勒带宽。但

也正是由于 SAR 回波信号表现为 LFM 信号, 因此任何造成 LFM 信号畸变的因素都将影响系统冲激响应形状, 从而影响 SAR 图像的分辨率.

系统中存在的各种相位误差是造成 LFM 信号畸变的主要原因, 因而也是造成图像分辨率下降的重要因素^[1]. 从整个 SAR 成像系统的组成出发, 考察其中可能引起相位误差的各个环节, 将相位误差的主要来源概括为以下四个方面:

(1) 雷达系统误差: 包括在整个成像过程中来自整个雷达系统及其各部件的相位误差. 如基准信号源频率不稳定性, LFM 信号产生中的非线性, 受介电材料、路径长度、发射信号载频和带宽等因素影响的波导泄漏, 接收机到信号处理机间 A/D 量化误差, 动态范围过小, 以及各类传感器的测量误差等. 系统误差可以看作固定误差, 并可通过对整个雷达系统、分系统及其各组成部件的离线定标和校正来消除.

(2) 空间传播误差: 主要是指雷达信号的发射和接收之间, 由于空间传播所引入的相位误差. 这类误差主要受到传播介质、发射载频和功率等的影响, 通过雷达系统工作状态的合理设计, 尽量地予以避免.

(3) 相对运动误差: 是指由于雷达平台和成像目标间的相对运动而形成的非相关相位误差. 雷达与目标之间同时存在着的相对平动和相对转动所造成的空间变化的散射点相位历程, 使得在成像之前必须要对成像区域中心(参考点)进行运动补偿. 雷达平台的运动状况之所以与成像关系如此密切, 其根本原因是它将直接影响回波多普勒信号的相位和幅度, 从而使其压缩波形产生畸变. 补偿不准确相当于在回波谱域上乘上了一个相位误差函数, 这些将严重地影响到最终图像的质量甚至无法成像.

(4) 目标模型误差: 传统雷达成像一般是基于理想点散射模型, 这与真实目标散射的复杂性不相匹配, 例如, 在较大相对带宽和积累角度下, 散射中心表现出来对观测角或频率变化敏感的非点散射性质, 以及由于不满足远场散射条件的波前弯曲. 这些目标模型的近似将在成像过程中引入等效相位误差.

随着对分辨率要求的提高, SAR 平台的运动误差成为主要的误差源, 它几乎成了制约 SAR 图像分辨率的决定因素^[1,6]. 关于 SAR 的运动误差对 SAR 成像影响, 限于篇幅, 本书不再详细论述, 有兴趣的读者可参阅文献 [1]、[7] 和 [8].

2.2 SAR 成像过程的先验信息

SAR 图像的质量和成像过程中的每个环节都密切相关, 成像过程中的先验信息的提取和利用, 将对 SAR 图像的提高分辨率处理提供有利条件. 本节主要介绍关于 SAR 成像过程中的先验信息, 包括 SAR 成像的工程背景、成像算法、成像模型以及其中影响 SAR 图像质量的各种误差因素, 并分析各种误差因素影响的等效表现形式, 说明它们对 SAR 图像会产生的影响.

2.2.1 SAR 成像的工程背景

与 SAR 成像工程背景相关的先验信息, 主要包括 SAR 成像环境的先验信息、SAR 的成像算法、影响 SAR 图像质量的各种误差因素以及 SAR 模糊性。

2.2.1.1 SAR 成像环境的先验信息

以星载 SAR 为例, 由于载体的特殊性, 使得在星载 SAR 成像研究中通过研究轨道卫星的特性而获得关于成像环境的一些先验的信息。

在许多科学应用中, 要求把 SAR 图像与场景的雷达后向散射系数定量关联起来, 希望星载 SAR 能够在近似相同的高度观测地球表面, 为了实现这个要求, SAR 卫星的轨道一般选取“冻结”轨道, 其轨道构形见图 2.6。

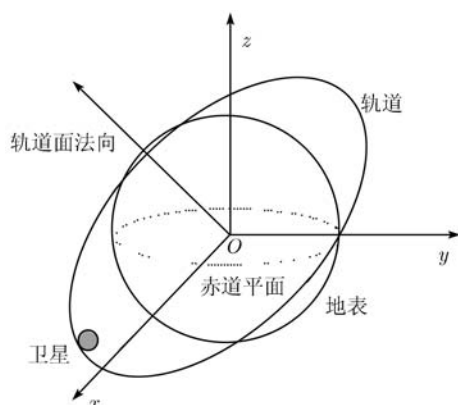


图 2.6 SAR 卫星的轨道构形

“冻结”轨道满足条件: 偏心率 $e \approx 0.001$, 且近地点幅角 $\omega = \pm 90^\circ$, 从而达到在近似相同的高度上对地球同一纬度进行观测的目的; 另一方面, 常常希望在卫星对同一目标的多次观测中, 该目标处的太阳照射关系保持不变, 这是因为太阳的照射关系能够改变某些目标的散射特性, 而且, 比较固定的卫星轨道平面与太阳光的照射关系还能够简化卫星能源系统和热控系统的设计, 因而, SAR 卫星轨道一般采用太阳同步轨道; 为了对地面目标进行重复观测和比较研究, 常常把 SAR 卫星轨道设计成观测周期可以控制的重复轨道。

综合上面的叙述, SAR 卫星轨道通常应该选择为近圆的、太阳同步的、重复的“冻结”轨道 [7]。

轨道卫星轨道高度的选择也是十分重要的, 它在很大程度上决定了卫星的覆盖特性、重复观测周期、SAR 仪表的性能和卫星寿命。轨道高度的下限, 主要由地球高层大气的效应所决定。虽然较低的轨道高度可以减小 SAR 仪表对卫星功率的需求, 但是卫星受到的空气阻力却随着高度的下降而指数性的增大, 另外大气中的原子氧

会对卫星的表面材料产生腐蚀作用, 所以轨道高度不能过低. 轨道高度的上限, 主要由运载火箭的运载能力决定. 卫星功率的限制是选择 SAR 卫星轨道高度上限的另一个重要条件. 此外还有地磁场捕获的带电粒子区域 (即地球辐射带) 对卫星工作的影响. 由于上述种种原因, 通常 SAR 卫星的轨道高度一般会选择在 400~1000 km 的范围内.

另外, 地球模型不是球形, 因此即使对于圆形轨道, 卫星的地面高度也是变化的, 由于地球的形状很复杂, 即使使用高阶地球模型, 也不能“逼真”真实的地球, 特别是地球表面的高程差最大可达 8km, 所以在星载 SAR 的目标成像处理过程中, 可以选用合适的地球模型和对应目标的高程作为辅助参数.

卫星的轨道和姿态数据具有不确定性, 为了得到精确的成像参数, 必须引入从 SAR 数据流中提取这些参数值的杂波锁定和自聚焦方法.

2.2.1.2 SAR 的成像算法

雷达在某时刻发射电磁波信号, 经过一定的传播延迟, 电磁波入射测绘带; 在与测绘带内的散射体相互作用后, 反射信号携带着测绘带的散射特征信息沿入射路径返回雷达, 形成雷达接收信号. 雷达接收信号经由雷达接收机通过混频、中放和正交相干检波后输出视频信号 (SAR 原始回波信号).

SAR 的回波信号可以表示为目标的散射特性乘以距离向天线方向图, 再相继与两个脉冲响应函数卷积. SAR 成像的目的就是根据接收的回波信号 $s(x, r)$ 重构目标场 $\sigma(x, r)$. SAR 回波信号可以看作是目标后向散射特性通过一个二维线性系统的输出. 因此, SAR 成像处理最直观的方法就是在时域采用一个二维时变滤波器, 对 SAR 回波信号直接进行二维匹配滤波. 这种方法可以完全避免距离迁移引起的回波信号在距离和方位维耦合的影响, 但其运算量极大, 无法做到实时处理.

为了解决这个问题, 各国学者先后提出了距离 - 多普勒 (R/D) 算法及其改进方法、波数域算法、CS 算法及其改进算法等. 成像算法的选择和使用也会对 SAR 图像的质量产生影响. 了解 SAR 图像的具体成像算法以及其中可能会有的误差, 然后有针对性地处理, 将会有利于提高分辨率.

2.2.1.3 SAR 的模糊性

SAR 的模糊性是指来自观测带内的有用回波信号受到非人为干扰的其他回波信号的“污染”(或“混叠”), 经信号处理后引起雷达图像质量下降的现象. 模糊性是制约 SAR 图像质量的关键因素之一, 并且还制约着可达到的观测带宽度.

对于非干涉模式工作的 SAR 而言, 其最终产品是具有距离维和方向维的二维雷达图像. 因此 SAR 的模糊性可划分为距离模糊性和方位模糊性. 距离模糊性与回波时延密切相关, 方位模糊性与回波信号的多普勒频率密切相关.