



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

吴良斌 编著

SAR 图像处理 与目标识别

SAR IMAGE PROCESSING
AND TARGET RECOGNITION

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家

SAR 图像处理与目标识别

吴良斌 编著



航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书针对实际工程需求和特点展开,对 SAR 图像处理与目标识别的方法、原理和应用进行了系统的研究,全书共分为 9 章。第 1 章为 SAR 图像的特性分析。第 2~第 4 章分别介绍了 SAR 图像去噪声技术、图像配准和图像融合。第 5 章和第 6 章主要研究了 SAR 图像目标分割和目标检测的实现方法。第 7 章对 SAR 图像目标识别进行了研究。第 8 章描述了基于压缩感知的雷达图像重建算法。第 9 章系统地介绍了基于小波变换的 SAR 图像压缩方法。本书深入浅出,涵盖了 SAR 图像研究及相关领域的前沿成果,适合信号处理等相关领域的研究人员及在校学生参考使用。

图书在版编目 (C I P) 数据

SAR 图像处理与目标识别/吴良斌编著. --北京:
航空工业出版社, 2013. 1
(中航工业首席专家技术丛书)
ISBN 978-7-5165-0121-4

I. ①S… II. ①吴… III. ①遥感图象—数字图象处
理 IV. ①TP751. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 290289 号

SAR 图像处理与目标识别 SAR Tuxiang Chuli yu Mubiao Shibie

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010-64815615 010-64978486

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2013 年 1 月第 1 版

2013 年 1 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 19.25 彩插: 4 字数: 481 千字

印数: 1—3000

定价: 98.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从 2009 年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21 世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。

A stylized, cursive Chinese signature in black ink, reading '林左鸣' (Lin Zuo Ming).

中国航空工业集团公司董事长

前言

SAR 成像因其全天候、穿透云雾和植被的能力，具有光学传感器无法比拟的优点，是军用和民用的重要探测手段。围绕 SAR 成像设备的研发与应用，SAR 图像处理技术成为这一领域中的重要技术，正引起广泛的关注。其作为对成像设备支持的数据处理技术，是提升系统的整体性能的重要信息手段，是拓展系统应用的有力工具。而 SAR 图像因成像机理不同，导致处理分析时较光学图像难度增大，需要采用特殊的信息处理技术。本著作正是围绕 SAR 图像处理的需求，对其相关图像处理技术进行研究、汇集取得的成果。

全书共分 9 章。第 1 章介绍有关合成孔径雷达图像特性分析中的分辨率特征、强度特征、统计特征以及几何特征，并阐述了 SAR 图像的几种模型；第 2 章介绍 SAR 图像去噪声技术，它对后继应用的图像分割、目标检测与识别精度产生影响，是后处理的关键技术之一；第 3 章是 SAR 图像配准，这也是 SAR 图像处理中的目标识别所需要的预处理技术之一，只有在精确的配准后进行的图像分割和提取，才能够获得较高的目标识别率；第 4 章是 SAR 图像融合，对不同分辨率或不同传感器获取的图像进行融合处理，使融合后的图像具有更多更丰富的信息；第 5 章系统分析了 SAR 图像目标分割，从不同的技术层面阐述了当今常用的几种 SAR 图像目标分割技术；第 6 章为基于 Beamlet 的 SAR 图像目标检测，主要研究了 Beamlet 变换域的 SAR 图像目标检测的实现方法；第 7 章主要研究了基于模型特征的 SAR 目标识别方法，试验实现了 2DPCA 特征值的提取；第 8 章基于压缩感知的雷达图像重建算法，在对压缩感知理论整体框架进行分析和研究的基础上，对重建算法中的贪婪迭代算法进行了研究；第 9 章基于小波变换的 SAR 图像压缩方法，系统地描述 SAR 图像特点、压缩算法、率失真分析、基于小波 SAR 图像压缩算法等，在此基础上对小波嵌入式压缩编码进行了系统实现，取得了良好的预期效果。

本书的特色是学以致用。在系统地阐述 SAR 系统和图像处理的基础上，结合中航工业雷达与电子设备研究院的实际工程需求，将压缩感知、Grouplet、Beamlet 和 Bandlet 引入 SAR 图像处理中，具有一定的前沿性和创新性。针对 SAR 图像处理工作应用方面的创新，将其中的去噪声、目标分割、融合、目标识别和利用邻域生长法对分割目标进行重建等技术应用于工程实践，具有广泛的应用前景。

本书吸收现有著作的特点，把最新的理论与实际相结合，由中航工业雷达与电子设备研究院 SAR 图像处理研究团队经过近 10 年持续开展创新性理论研究和应用探索，在 SAR

图像处理方面取得的研究成果凝聚而成。这里特别感谢闫敬文教授、卢刚博士、屈小波博士、张安发、寇业泉、林小芬、林哲和王玥等人在 SAR 图像处理理论研究、数据测试、文字整理和联系出版等方面做出的工作。正是由于全体团队成员的努力和紧密配合，才使得本书在有限时间内完成，在此向他们表示深深的谢意！

本书可作为相关的科研部门、院所和高校专家学者的 SAR 图像处理教学科研参考书，也可作为“985”和“211”学校高年级本科生和研究生的 SAR 图像处理教材使用。

在编著本书的过程中，虽然我们做出了不懈努力，但由于水平和经验的限制，缺点和不足之处在所难免，欢迎专家和读者批评指正。

本书受国家自然科学基金（40971206）资助。

吴良斌

2012 年 9 月 21 日

符 号 表

B_r	雷达系统发射信号带宽
c	光速
f_c	载频
f_{Dc}	多普勒中心频率（多普勒质心）
f_R	多普勒调频率
K_v	修正的第三类贝赛尔函数
L_s	合成孔径长度
median ()	中值运算
rect ()	矩形窗函数
T_r	脉冲重复周期
V	不均匀介质中的体散射系数
α	发射脉冲的线性调频率
Γ_1	表面粗糙度
Γ_2	二次表面粗糙度
ε	复介电常数
θ	入射角
λ	工作波长
σ	散射系数
σ^0	后向散射系数
τ_p	脉宽宽度
φ	地物目标的参数方位角
*	二维卷积

目 录

第 1 章 SAR 图像特性分析	(1)
1.1 合成孔径雷达成像的基本原理	(1)
1.2 SAR 图像的分辨率特征	(8)
1.3 SAR 图像的强度特征	(10)
1.4 SAR 图像的几何特征	(13)
1.5 SAR 图像的统计分布特征	(14)
1.6 SAR 图像的噪声特征	(15)
1.6.1 SAR 图像相干斑形成机理	(15)
1.6.2 SAR 图像相干斑模型	(16)
1.7 SAR 图像指标	(21)
1.8 本章小结	(22)
参考文献	(23)
第 2 章 SAR 图像去噪声	(25)
2.1 SAR 图像分布模型	(25)
2.2 SAR 图像滤波	(27)
2.2.1 空间域滤波算法	(29)
2.2.2 小波域全局阈值滤波	(32)
2.2.3 基于纹理模型的空间自适应小波滤波	(33)
2.2.4 基于隐马尔可夫树模型的小波滤波算法	(34)
2.2.5 基于双正交小波域局部统计特性的滤波算法	(36)
2.2.6 基于正交带波域的滤波算法	(37)
2.2.7 基于曲波变换域的滤波算法	(52)
2.2.8 基于轮廓波变换域的滤波算法	(54)
2.2.9 基于带波变换域的滤波算法	(60)
2.3 滤波算法的效果对比	(63)
2.4 本章小结	(65)
参考文献	(66)
第 3 章 SAR 图像配准	(70)
3.1 SAR 图像配准概况	(70)
3.1.1 图像配准的定义	(70)
3.1.2 图像配准的模型	(71)
3.1.3 图像变换	(71)
3.1.4 图像配准的一般方法	(72)
3.2 图像配准预处理	(72)

3.2.1 图像增强	(72)
3.2.2 图像的几何校正	(74)
3.3 基于灰度的图像配准方法	(75)
3.3.1 基于互信息的图像配准算法	(75)
3.3.2 基于联合直方图的图像配准算法	(79)
3.4 基于特征的图像配准方法	(82)
3.4.1 基于 SIFT 特征的图像配准算法	(82)
3.4.2 基于角点特征的图像配准算法	(87)
3.4.3 基于灰度和特征的配准方法的局限性	(89)
3.4.4 基于特征与灰度相结合的图像配准新方法	(90)
3.5 基于变换域的图像配准方法	(94)
3.5.1 平移变化的配准原理	(94)
3.5.2 旋转变化和比例变化的配准原理	(94)
3.5.3 基于快速傅里叶变换的图像配准算法	(95)
3.5.4 仿真结果	(95)
3.6 本章小结	(97)
参考文献	(97)
第 4 章 SAR 图像融合	(99)
4.1 SAR 图像融合概况	(99)
4.1.1 图像融合的层次划分	(100)
4.1.2 图像融合效果评价	(102)
4.2 加权平均融合算法	(104)
4.3 基于拉普拉斯金字塔算法的图像融合算法	(105)
4.4 基于小波变换的图像融合方法	(106)
4.4.1 基于小波变换的图像融合算法	(106)
4.4.2 小波变换域内不同融合算法比较	(107)
4.5 基于轮廓波变换的融合算法	(110)
4.6 基于 Bandlet 变换的图像融合算法	(112)
4.7 基于 PCNN 的图像融合新算法	(114)
4.7.1 脉冲耦合神经网络	(114)
4.7.2 基于 DWT 的 PCNN 的融合新算法	(117)
4.7.3 基于 DWT 的并行 PCNN 融合算法	(119)
4.7.4 基于方向性激励的 PCNN 融合算法	(123)
4.7.5 基于 Grouplet 变换和 PCNN 的图像融合算法	(124)
4.8 仿真结果	(126)
4.9 本章小结	(128)
参考文献	(129)
第 5 章 SAR 图像目标分割	(131)
5.1 SAR 图像目标分割技术发展概况	(131)

5.2 CFAR 分割技术	(132)
5.2.1 单参数 CFAR 分割	(133)
5.2.2 双参数 CFAR 分割	(134)
5.2.3 多分辨率 CFAR	(135)
5.3 基于 MRF 的 SAR 图像目标分割	(135)
5.4 基于全局 Maxflow 的 SAR 图像目标分割	(138)
5.4.1 能量函数最小化理论	(139)
5.4.2 最小割集与最大流	(141)
5.4.3 Otsu 算法	(152)
5.4.4 基于 Maxflow 的最大熵算法的 SAR 图像目标分割	(157)
5.4.5 基于全局 Maxflow 的邻域生长算法的 SAR 图像目标分割	(162)
5.5 本章小结	(166)
参考文献	(167)
第 6 章 SAR 图像目标检测	(170)
6.1 SAR 图像目标检测概况	(170)
6.2 SAR 图像目标检测的基本算法	(171)
6.2.1 SAR 图像目标检测的知识检测	(171)
6.2.2 基于数据相关的基与固定基相结合的 SAR 图像检测算法	(174)
6.2.3 SAR 图像目标检测算法实用性	(176)
6.3 基于 Beamlet 的 SAR 图像目标检测	(176)
6.3.1 Beamlet 的基本理论	(176)
6.3.2 小线检测	(179)
6.3.3 基于 Beamlet 的 SAR 图像目标检测仿真	(181)
6.3.4 Beamlet 的其他应用	(184)
6.4 本章小结	(190)
参考文献	(191)
第 7 章 SAR 图像目标识别	(193)
7.1 SAR 图像目标识别概况	(193)
7.1.1 SAR 目标识别概述及研究现状	(193)
7.1.2 SAR 图像目标自动识别的难点	(194)
7.1.3 SAR 图像目标自动识别的关键技术	(194)
7.1.4 SAR 图像目标识别流程	(195)
7.2 基于 PCA、KPCA 及 2DPCA 的 SAR 图像识别	(196)
7.2.1 PCA 特征提取	(197)
7.2.2 KPCA 及 2DPCA 特征提取方法	(197)
7.2.3 SAR 图像分类识别性能验证	(198)
7.2.4 投影特征的缺点	(199)
7.3 SAR 图像融合目标特征提取	(200)
7.3.1 SAR 图像融合目标特征概述	(200)

7.3.2	基于形状特征的 Hu 不变矩特征提取	(201)
7.3.3	基于纹理特征的 Gabor 特征提取	(203)
7.3.4	基于频域特征的 FFT 特征提取	(206)
7.3.5	基于 HGF 混合特征矩的融合特征	(210)
7.4	支持矢量机分类器	(212)
7.4.1	SVM 分类器	(212)
7.4.2	SVM 体系结构	(212)
7.5	基于融合特征和 SVM 分类器的 SAR 图像目标识别	(218)
7.5.1	基于融合特征和 SVM 分类器的 SAR 图像目标识别的处理流程	(218)
7.5.2	联合特征提取及类归一化	(219)
7.5.3	SVM 分类器设计	(221)
7.5.4	融合特征分类效果验证	(221)
7.6	本章小结	(229)
	参考文献	(230)
第 8 章	基于压缩感知的雷达图像重建算法	(232)
8.1	压缩感知概况	(232)
8.1.1	研究的背景和意义	(233)
8.1.2	国内外研究现状	(233)
8.1.3	压缩感知的应用	(235)
8.2	压缩感知理论	(236)
8.2.1	信号的稀疏表示	(238)
8.2.2	压缩感知算法	(239)
8.2.3	常用测量矩阵	(240)
8.2.4	信号重建算法	(242)
8.2.5	压缩感知在雷达成像中的应用	(244)
8.3	基于小波树的正交匹配追踪重建算法	(245)
8.3.1	正交匹配追踪算法	(245)
8.3.2	TOMP 算法	(248)
8.3.3	TOMP 算法的仿真	(250)
8.4	基于分块的三维小波树的正交匹配追踪算法	(252)
8.4.1	三维的基于小波树的正交匹配追踪算法 (3D-TOMP)	(253)
8.4.2	基于分块的三维小波树的正交匹配追踪算法 (3D-TOMP-BL)	(254)
8.4.3	验证结果及分析	(257)
8.5	本章小结	(261)
	参考文献	(263)
第 9 章	基于小波变换的 SAR 图像压缩方法	(267)
9.1	SAR 图像压缩技术发展概况	(267)
9.1.1	SAR 数据压缩背景	(267)
9.1.2	SAR 图像压缩的意义	(268)

9.1.3 图像压缩算法概述	(269)
9.2 SAR 图像统计特征与率失真特性	(271)
9.2.1 SAR 图像统计特征	(271)
9.2.2 SAR 图像的率失真特性	(272)
9.2.3 传统图像压缩原理	(274)
9.2.4 图像压缩的评估标准	(275)
9.3 基于小波变换的 SAR 图像压缩方法	(276)
9.3.1 小波变换	(277)
9.3.2 图像统计特性和适合图像数据压缩小波基的确定	(278)
9.3.3 基于小波变换的嵌入式压缩编码	(279)
9.4 SAR 图像压缩性能仿真测试	(283)
9.5 本章小结	(287)
参考文献	(288)
名词术语表	(290)

第 1 章 SAR 图像特性分析

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR), 具有远距离、能够穿透云雾植被、全天候对地观测的特点, 在遥感、军事、水文、地矿等领域有着广泛的应用^[1-5]。

但 SAR 图像的图像特性会随着不同的配置条件 (包括姿态、俯仰、遮挡、隐蔽、损坏、成像参数等) 发生较大的变化^[6,7], 使得 SAR 图像的目标识别变得非常困难。对 SAR 图像的图像特性分析有利于 SAR 图像处理技术的研究。SAR 图像反映的是观测面的电磁反射特性, 不同于视觉图像, 因此对姿态角具有高度敏感性, 在完全不考虑其他条件的影响下, 需要存储大量的目标模板才能达到识别的目的^[8], 所以分析 SAR 图像的特性规律具有重要意义。

本章从 SAR 成像的基本原理开始, 系统地介绍了 SAR 的发展史、SAR 成像模型、成像算法、分辨率特征、统计分布特征和几何特征等, 为后面 SAR 图像的去噪声、配准、融合、分割、检测和识别处理奠定了基础。

1.1 合成孔径雷达成像的基本原理

合成孔径雷达的出现是微波探测和遥感发展史上划时代的贡献, 它有效地解决了雷达设计中高分辨率要求与大天线、短波长之间的矛盾, 使分辨率提高了数百倍。SAR 成像处理是将雷达天线接收到的地面后向散射信号转变成图像的过程, 成像过程比较复杂^[9]。在 SAR 出现 40 年的发展过程中, 其成像处理经历了从最初非实时的光学处理和模拟电子处理阶段到今天实时数字处理阶段。目前普遍采用多普勒算法, 来对距离、速度和位移等进行成像^[10,11]。了解算法的数学原理对于掌握合成孔径雷达影像的特点以及成像几何等是十分必要的, 这是对 SAR 影像进行处理的基础^[12]。

(1) 合成孔径雷达发展历史

SAR 是集现代电子科学技术各种成就于一体的高科技系统, 已成功地应用于地面 (含车载)、舰载、机载等方面的各种军事和民事任务。合成孔径雷达是现代雷达领域发展的重要方向^[3], 集中体现了雷达技术的进步, 扩展了原始雷达的概念, 使雷达具有了对目标成像和识别的能力, 有着广泛的应用前景和发展潜力, 一直受到世界各国的高度重视。

合成孔径的概念可以追溯到 20 世纪 50 年代初。1951 年 6 月, 美国 Goodyear (固特异) 航空空间公司的卡尔·威利 (Carl Wiley) 发现侧视雷达通过利用回波信号中的多普勒频移可以改善方位分辨率, 这标志着 SAR 技术的诞生。1953 年 7 月人们得到第一张采用非聚焦孔径综合方法的合成孔径雷达图像。1958 年, 美国密歇根大学得到了第一张全聚焦 SAR 图像。60 年代, 美国在以航天飞机、卫星等载体的空载 SAR 研究中取得了巨大成就。70 年代末, 美国发射的世界上第一颗装载了空间 SAR 的人造卫星, 成功地实施了对地观测, 开创了星载 SAR 的历史。随后, 许多国家在 SAR 的研究方面都取得了快速发

展，以满足军事和民事需要^[13]。SAR 目标检测在地矿探测方面的应用如图 1-1 所示（相应彩图见彩色插图 1）。

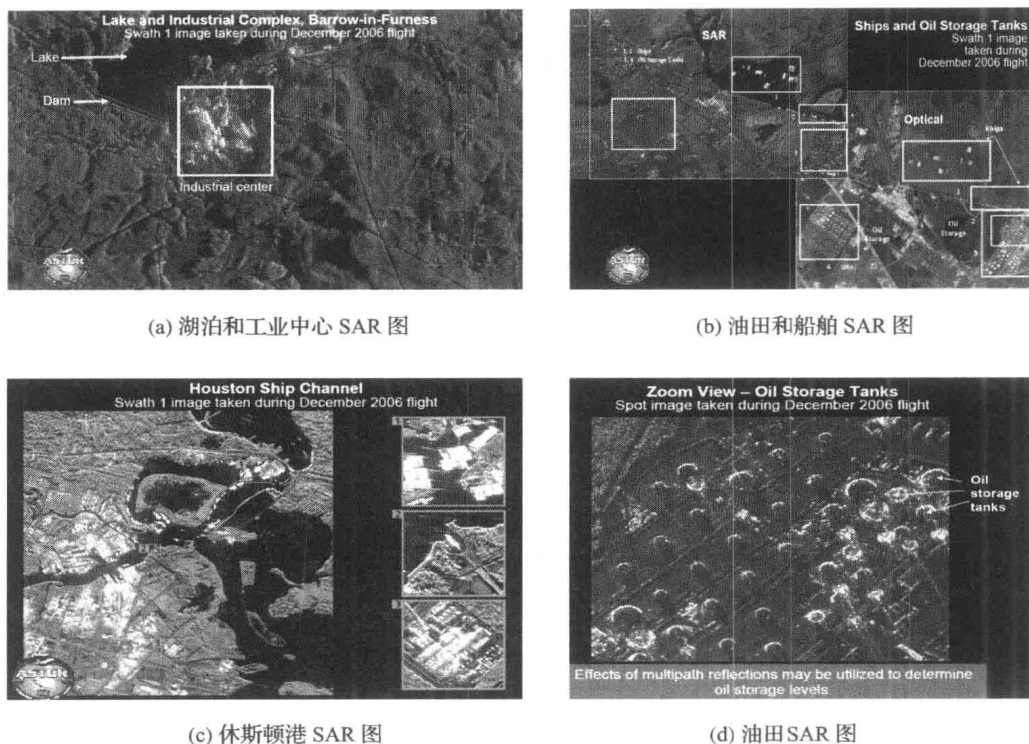


图 1-1 目标 SAR 图

(2) 合成孔径雷达成像模型

合成孔径雷达通过天线向一侧发射电磁波脉冲，回波按地物与天线的距离，先后被散射返回天线，通过累加再被依次记录下来，并通过飞行器的运动和记录胶片（或磁带）的运动配合形成条带影像的另一维，如图 1-2 所示。图 1-2 中平行于飞行航线的方向称为方位向，垂直于航线的方向称为距离向。SAR 图像的灰度与后向散射波强度相关，反映地表的粗糙性、介电常数等性质。

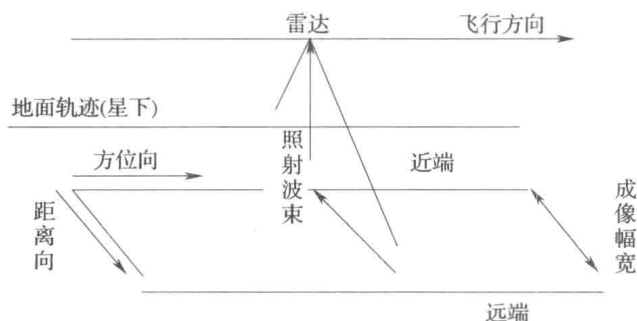


图 1-2 侧视 SAR 成像原理

合成孔径雷达成像算法是对接收到的雷达回波信号进行一定的数学运算，还原目标的散射特性，获得灰度与不同散射特性几何分布相对应的可视图像。在距离向，它利用发射

大时间带宽积的线性调频信号，采用脉冲压缩技术来获取高分辨率；在方位向，它通过同一雷达传感器在等间隔位置上发射和接收脉冲信号，然后根据传感器不同位置接收的回波信号的相位变化进行相干处理，利用雷达和目标之间的相对运动产生巨大的有效孔径，从而达到方位向高分辨率的目的，即利用方位向的多普勒相位来获取高分辨率，亦等效于一个脉冲压缩过程^[14]。

SAR 成像的基本任务是获得照射场景内目标的后向散射响应，得到目标区域的后向散射系数的二维分布。



如图 1-3 所示。

图 1-3 合成孔径雷达理论模型

其中， x 表示方位向位置， r 表示距离向位置， $\sigma(r, x)$ 表示散射系数， $\hat{\sigma}(r, x)$ 表示雷达图像。先来考虑回波信号 $s(t)$ ，假设雷达发射信号为一线性调频脉冲串 $f(t)$ ，则 $f(t)$ 可表示为：

$$f(t) = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} p(t - nT_r) = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} \text{Re} \{ \text{rect}(t - nT_r) \exp[j2\pi f_c(t - nT_r) + j\pi \cdot \alpha(t - nT_r)^2] \} \quad (1-1)$$

其中， f_c 为载频； α 为发射脉冲的线性调频率； T_r 为脉冲重复周期； $\text{rect}()$ 为矩形窗函数，其宽度为 τ_p （脉宽）。 t 时刻，斜距为 $R(t)$ 的地面点目标的回波函数为：

$$s_{\text{echo}}(t) = \sigma W_a \left[t - \frac{R(t)}{c} \right] \cdot f \left[t - \frac{R(t)}{c} \right] = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} \sigma W_a \left[t - \frac{R(t)}{c} \right] \cdot p \left[t - nT_r - \frac{R(t)}{c} \right] \quad (1-2)$$

其中， $W_a()$ 是方位天线的方向性函数， σ 表示散射系数， c 为光速。

而 SAR 回波应表示为复信号：

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{-\infty}^{+\infty} \sigma W_a \left[t - \frac{R(t)}{c} \right] \text{rect} \left[t - nT_r - \frac{2R(t)}{c} \right] \cdot \\ &\quad \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(t) + j\pi \alpha \left[t - nT_r - \frac{2R(t)}{c} \right]^2 \right\} = \\ &= \sum_{-\infty}^{+\infty} \sigma W_a \left[t - \frac{R(t)}{c} \right] \text{rect} \left[t - nT_r - \frac{2R(t)}{c} \right] \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(t) \right\} \cdot \\ &\quad \exp \left\{ j\pi \cdot \alpha \left[t - nT_r - \frac{2R(t)}{c} \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (1-3)$$

实际上， t 包含了一个快变化（脉冲内时间变化）和一个慢变化（脉冲间时间变化）， $R(t)$ 可看成随着时间慢变化，接收回波信号的频率和相位也随时间慢变化，这种效应其实就是多普勒效应。多普勒相位定义为：

$$\phi_d = -\frac{4\pi}{\lambda} R(t) \quad (1-4)$$

考虑到 $W_a(t)$ 和 $R(t)$ 对雷达发射波形是时间 t 的慢变化函数，所以可作以下近似：

$$W_a(t) = W_a(nT_r) \quad (1-5)$$

$$R(t) = R(nT_r) \quad (1-6)$$

进一步, $s(t)$ 表示为:

$$s(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \sigma W_a\left(nT_r - \frac{R(t)}{c}\right) \text{rect}\left[t - nT_r - \frac{2R(nT_r)}{c}\right] \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(nT_r)\right\} \cdot \exp\left\{j\pi \cdot \alpha \left[t - nT_r - \frac{2R(nT_r)}{c}\right]^2\right\} \quad (1-7)$$

通过变量转换, 将一维信号 $s(t)$ 转换为二维形式。令

$$t = kT_r + \tau' \quad (1-8)$$

$$t_k = kT_r \quad (1-9)$$

则

$$\begin{aligned} s(\tau', t_k) &= \sigma W_a(t_k) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_k)\right\} * \left\{\delta(t_k) \delta\left[\tau' - \frac{2R(t_k)}{c}\right]\right\} *_{\tau'} \\ &\quad [\text{rect}(\tau') \exp(j\pi \cdot \alpha \tau'^2)] = \\ &\quad \sigma W_a(t_k) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_k)\right\} \delta\left[\tau' - \frac{2R(t_k)}{c}\right] * \\ &\quad [\delta(t_k) \text{rect}(\tau') \exp(j\pi \cdot \alpha \tau'^2)] \end{aligned} \quad (1-10)$$

其中, $*$ 表示二维卷积, $*_{t_k}$ 表示对 t_k 的卷积, $*_{\tau'}$ 表示对 τ' 的卷积。如果 σ 取 1 时, $s(\tau', t_k)$ 等于点目标的冲激响应 $h(\tau', t_k)$:

$$\begin{aligned} h(\tau', t_k) &= W_a(t_k) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_k)\right\} \delta\left[\tau' - \frac{2R(t_k)}{c}\right] *_{\tau'} \\ &\quad [\text{rect}(\tau') \exp(j\pi \cdot \alpha \tau'^2)] = \\ &\quad h_a(\tau', t_k) *_{\tau'} h_r(\tau') \end{aligned} \quad (1-11)$$

其中

$$h_a(\tau', t_k) = W_a(t_k) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_k)\right\} \delta\left[\tau' - \frac{2R(t_k)}{c}\right] \quad (1-12)$$

$$h_r(\tau') = \text{rect}(\tau') \exp(j\pi \cdot \alpha \tau'^2) \quad (1-13)$$

令 $x = v_g \cdot kT_r$, $r = \frac{c}{2} \tau'$, v_g 表示载机飞行速度, x 表示方位向位置, r 表示距离向位置, 则有:

$$\begin{aligned} h(r, x) &= W_a(x) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(x)\right\} \delta[r - R(x)] *_{\tau'} \\ &\quad \left[\frac{2}{cv_g} \text{rect}\left(\frac{2r}{c}\right) \exp\left(j \frac{4\pi\alpha}{c^2} \cdot r^2\right)\right] = \\ &\quad h_a(r, x) *_{\tau'} h_r(r) \end{aligned} \quad (1-14)$$

其中

$$h_a(r, x) = W_a(x) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(x)\right\} \delta[r - R(x)] \quad (1-15)$$

$$h_r(r) = \left[\frac{2}{cv_g} \text{rect}\left(\frac{2r}{c}\right) \exp\left(j \frac{4\pi\alpha}{c^2} \cdot r^2\right)\right] \quad (1-16)$$