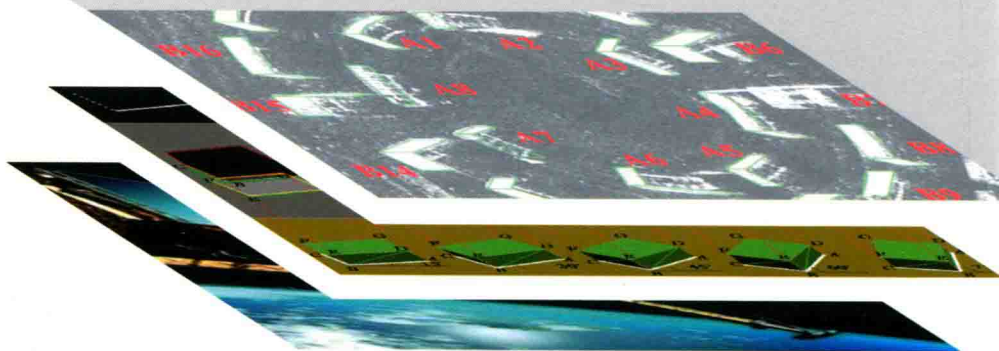




城市雷达遥感机理与方法

张风丽 邵 芸 王国军 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

城市雷达遥感机理与方法

张风丽 邵 芸 王国军 著



科学出版社

内 容 简 介

本书首先阐述城市目标高分辨率 SAR 图像特征形成机理,介绍可辅助 SAR 图像理解和信息提取的城市目标/场景高分辨率 SAR 图像模拟器,以及近年来作者团队发展的城市目标提取算法、高分辨率 SAR 图像自动理解方法,最后介绍国内外首个具有应用推广意义的城市目标/场景高分辨率 SAR 图像解译标志库。

本书可供从事微波遥感应用研究、城市环境与灾害遥感监测研究的科研与技术人员,以及高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市雷达遥感机理与方法 / 张风丽, 邵芸, 王国军著. —北京: 科学出版社, 2017.11

ISBN 978-7-03-054739-2

I. ①城… II. ①张… ②邵… ③王… III. ①城市—雷达—遥感技术 IV. ①TN953

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 246384 号

责任编辑: 赵艳春 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 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>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本: 720×1 000 B5

2017 年 11 月第一次印刷 印张: 21 1/2 插页: 7

字数: 415 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

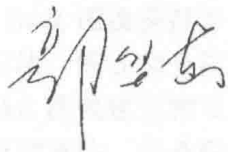
序

合成孔径雷达具有全天时、全天候、穿云破雾而快速成像的能力,是城市遥感的一项前沿技术,正在城市建设、规划与管理中发挥着不可替代的作用。近年来,一系列分辨率优于1m的SAR卫星的发射升空,开启了高分辨率雷达遥感的新时代。空间分辨率的提高为城市观测提供了更精细的数据资源,但同时给SAR图像理解、处理和目标信息提取带来了新的困难和挑战。由于城市目标几何结构与空间关系的特殊性,电磁波与城市目标/场景的相互作用机理格外复杂,加上SAR成像几何畸变与辐射噪声的影响,城市目标的高分辨率SAR图像处理和信息提取研究面临着一系列挑战。

近年来,在国家自然科学基金、国家重点研发计划、国家863计划、中国科学院知识创新工程,以及国际合作项目的支持下,中国科学院遥感与数字地球研究所的张风丽、邵芸及其团队,围绕城市雷达遥感开展了系统的机理与方法研究。他们的研究成果在2008年汶川大地震、2010年4月玉树地震、2013年黑龙江特大洪涝等灾害监测与应急响应中发挥了重要作用,相关监测与评估结果多次被行业部门采纳,为房屋倒塌、道路损毁评估和实施紧急救援等提供了有效的信息支持。

作者围绕城市管理的重大需求,针对雷达遥感应用的难题,多年来潜心研究,并提炼自己的研究成果,毫无保留地奉献给读者,让我们看到了青年雷达遥感工作者对于科学的热爱和执着。作者针对建筑物和道路两类目标,系统分析了城市目标/场景高分辨率SAR图像特征形成机理,阐述了高分辨率SAR图像理解、目标提取与参数反演等最新成果,同时介绍了他们构建的具有广泛应用意义的城市目标/场景高分辨率SAR图像解译标志库。该书是他们近年来研究成果的系统总结,反映了该领域国内外研究的最新进展,是一部极具科学价值的著作,对从事城市雷达遥感研究与应用的科技人员有很高的参考价值,也可供行业部门相关人员和高校师生阅读参考。

值此书出版之际,我非常乐意将其推荐给广大读者。希望该书有助于降低雷达遥感应用的门槛,提升雷达遥感在城市监测中的应用效果,促进雷达遥感科学的发展。同时,期待该书对我国雷达遥感与应用领域的人才成长发挥其特有的作用。



2017年7月

前 言

城市是人口密集、社会经济活动和资源相对集中的空间地域。我国正处于快速城镇化发展阶段,1978~2013年,城镇常住人口从1.7亿增加到7.3亿,城镇化率从17.9%提升到53.7%。综合提高城市土地利用动态监测、灾害应急响应能力,对现代城市建设与管理及保障广大人民群众生命财产安全具有重要意义。星载合成孔径雷达具有全天时、全天候、可穿透云雾快速成像的能力,对于时效性要求较高的灾害应急监测、国土资源监测等具有重要意义,特别是在多云多雨地区发挥着不可替代的作用。城市监测是SAR遥感应用的一项重要内容,在灾害损失评估、城市建设与规划、军事监视等领域具有广泛应用。

空间分辨率的提高为利用雷达遥感数据进行城市监测提供了宝贵数据源。2007年以来,意大利的COSMO-SkyMed、德国的TerraSAR-X、加拿大的RADARSAT-2、日本的ALOS-2等卫星相继发射成功,星载SAR图像空间分辨率达到米级,开启了高分辨率雷达遥感的新时代。但建筑物、道路等城市目标在高分辨率SAR图像上的特征与中低分辨率SAR图像表现出极大的不同。在高分辨率SAR图像上,城市目标的多维特征得以体现,但由于城市目标本身几何结构及空间关系的特殊性,电磁波与城市场景目标间的相互作用非常复杂,加上SAR成像几何畸变与噪声的影响,给城市高分辨率SAR图像理解和应用带来了巨大的挑战,城市目标的高分辨率SAR图像处理和信息提取算法研究仍处于非常初级的阶段。因此,亟须开展城市目标高分辨率雷达遥感监测机理与方法研究,为相关应用提供方法支撑。本书对作者近年来在该领域的研究成果进行总结,供相关领域的科研人员阅读参考。

建筑物和道路是城市场景的两类主要人工目标,因此,本书主要介绍利用高分辨率雷达遥感数据对这两类目标进行监测的机理和方法。因为建筑物目标的散射机理和图像特征更为复杂,所以本书更侧重于对建筑物监测机理与方法进行介绍。

本书的主要内容如下:第1章主要介绍城市雷达遥感监测的意义和现状;第2章介绍城市目标在高分辨率SAR图像上的典型特征;第3章针对建筑物目标SAR图像特征的复杂性,分析建筑物目标高分辨率SAR图像特征的形成机理;第4章介绍作者开发的SAR成像机理与射线追踪算法相结合的建筑物目标SAR图像模拟方法,以及基于该模拟系统进行建筑物目标图像理解和参数提取的方法;第5章介绍高分辨率SAR图像预处理方法;第6章介绍一系列的高分辨率SAR图像建筑物目标提取与参数反演算法,包括建筑物边界提取方法、建筑物高度反演方法,以及融合利用双视向SAR图像提取建筑物目标参数的方法;第7章介绍基于高分辨率SAR

图像进行道路提取的方法,包括道路基元提取方法、基于张量投票和 Snakes 模型的半自动提取方法,以及基于 MRF 模型的道路网自动提取方法;第 8 章介绍建筑物目标 SAR 图像自动标注与理解方法,可以在先验知识模型的驱动下借助 SAR 图像模拟和目标参数提取算法实现建筑物目标 SAR 图像的自动理解;第 9 章在机理、算法、实例研究的基础上,构建一套具有推广意义的城市目标与场景高分辨率 SAR 图像解译标志库。

本书第 1 章主要由张风丽、王国军、徐旭、符喜优完成;第 2 章主要由王国军、徐旭、符喜优完成;第 3 章主要由张风丽、邵芸、王国军完成;第 4 章主要由王国军、张风丽、徐旭完成;第 5 章主要由张风丽、徐旭、刘璐、张斌完成;第 6 章主要由张风丽、王国军、徐旭、刘璐完成;第 7 章主要由张风丽、符喜优完成;第 8 章主要由邵芸、张风丽、王国军完成;第 9 章主要由张风丽、邵芸、王国军、卞小林完成。全书最后由张风丽、邵芸定稿。

本书作者近年来一直从事城市雷达遥感机理与方法研究,先后得到了国家自然科学基金项目(编号:41671359、61471358、41431174、41001213)、国家重点研发计划项目(2016YFB0502500)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号:KZCX2-EW-320、Y0S04400KB)、国家 863 计划项目(编号:2011AA120403、2007AA1202040203),以及 ALOS-2 国际合作项目(编号:PI 1404)、TanDEM 国际合作项目(编号:OTHER6984)等的支持。本书用到的机载 SAR 数据全部由中国科学院电子学研究所提供,在此表示感谢。本书撰写过程中,得到了中国科学院遥感与数字地球研究所、中科卫星应用德清研究院等单位的支持,并在国家科学技术学术著作出版基金的资助下得以出版,一并致谢。

限于作者水平有限和时间仓促,书中难免存在不足之处,恳请读者不吝批评指正。

作者

2017 年 3 月

目 录

序

前言

第 1 章 城市雷达遥感的意义和现状	1
1.1 城市雷达遥感的意义	1
1.2 建筑物目标 SAR 监测研究进展	3
1.2.1 建筑物目标散射机理及 SAR 图像理解	3
1.2.2 高分辨率 SAR 图像建筑物目标提取与三维重建	4
1.3 道路目标 SAR 图像提取研究进展	7
1.3.1 SAR 图像道路局部检测	7
1.3.2 SAR 图像道路全局连接	10
参考文献	12
第 2 章 城市目标高分辨率 SAR 图像特征	17
2.1 城市高分辨率 SAR 图像特点	17
2.2 建筑物目标高分辨率 SAR 图像特点	19
2.3 建筑物目标 SAR 图像几何畸变特征	21
2.4 建筑物目标的特殊散射及分析	25
2.4.1 二次散射及多次散射	25
2.4.2 散射中心模型	28
2.5 道路目标高分辨率 SAR 图像特点	30
参考文献	33
第 3 章 建筑物目标 SAR 图像散射特征形成机理分析	34
3.1 建筑物目标 SAR 图像尺度特征分析	36
3.1.1 距离向尺度特性分析	36
3.1.2 方位向尺度特性分析	37
3.1.3 距离向和方位向尺度特性综合分析	38
3.2 基于距离向剖面分析的散射特征定量关系模型	38
3.2.1 平顶建筑物	39
3.2.2 尖顶建筑物	43

3.3	建筑物目标 SAR 图像散射特征方位敏感性分析	49
3.3.1	建筑物目标散射特征基元与分解合成方法	49
3.3.2	方位角对建筑物目标散射特征基元的影响	51
3.3.3	建筑物目标散射特征基元模拟计算	55
3.4	遮挡效应对建筑物目标 SAR 图像散射特征的影响	57
3.4.1	建筑物目标叠掩阴影干扰分析	57
3.4.2	墙地二次散射遮挡分析	59
	参考文献	62
第 4 章	建筑物目标高分辨率 SAR 图像模拟	63
4.1	SAR 图像模拟方法综述	64
4.2	SAR 模拟系统构建	66
4.2.1	SAR 成像几何模型	66
4.2.2	目标/场景三维模型	67
4.2.3	目标散射模型	68
4.3	回波信号模拟	69
4.3.1	模拟系统参数初始化	70
4.3.2	射线追踪电磁波与目标/场景相互作用	71
4.3.3	回波信号属性计算	73
4.4	模拟图像生成与散射机制分析	75
4.4.1	二维模拟 SAR 图像生成	75
4.4.2	散射单元直方图	77
4.4.3	散射中心定位及散射贡献来源分析	78
4.4.4	模拟分析示例	80
4.5	基于 SAR 图像模拟的 SAR 图像理解	91
4.5.1	模拟 SAR 图像与真实 SAR 图像配准	91
4.5.2	图像特征匹配分析与标注	93
4.6	基于 SAR 图像模拟和迭代匹配的建筑物高度反演	100
	参考文献	103
第 5 章	高分辨率 SAR 图像预处理方法	105
5.1	SAR 图像滤波	105
5.1.1	传统滤波方法	106
5.1.2	基于局部统计特性的自适应滤波算法	106
5.1.3	图像滤波效果评价指标	109
5.1.4	实验结果与分析	109

5.2 恒虚警率阈值分割算法	111
5.2.1 目标模型	112
5.2.2 杂波模型	112
5.2.3 CFAR 的检测原理	112
5.2.4 概率分布函数选择	113
5.2.5 CFAR 分割结果及分析	119
5.3 K-means 聚类及改进方法	121
5.3.1 K-means 聚类算法	121
5.3.2 K-means 聚类改进算法	122
5.4 基于 Gabor 纹理特征和 FCM 的 SAR 图像建筑物分割	124
5.4.1 基于 Gabor 滤波的纹理特征提取	124
5.4.2 FCM 聚类与 SAR 图像分割	125
5.5 基于马尔可夫随机场的分割	127
5.6 基于离散隐马尔可夫模型的分类	133
5.6.1 隐马尔可夫模型	133
5.6.2 HMM 分类算法的实现	140
参考文献	144
第 6 章 高分辨率 SAR 图像建筑物目标提取与参数反演	145
6.1 墙地二次散射特征结构中心线提取方法	145
6.1.1 基于形态学细化的骨架提取	146
6.1.2 骨架跟踪算法	147
6.1.3 建筑物最小外接矩形提取	147
6.1.4 基于最小二乘的直线提取	148
6.1.5 实验结果与分析	148
6.2 基于二次散射特征的建筑物几何参数反演	150
6.2.1 建筑物目标二次散射的特点	150
6.2.2 二次散射中心距离徙动机制	151
6.2.3 考虑二次散射中心距离徙动的建筑物参数反演	161
6.3 基于几何模型匹配的 SAR 图像建筑物高度反演方法	165
6.3.1 建筑物 SAR 成像特征几何模型构建	166
6.3.2 基于模型匹配的建筑物高度反演方法	168
6.3.3 实验结果与分析	174
6.4 双视向 SAR 图像建筑物目标参数提取方法	178
6.4.1 配准方法综述	179

6.4.2	城区高分辨率 SAR 图像手动配准	179
6.4.3	基于 Hausdorff 距离的城区高分辨率 SAR 图像配准方法	186
6.4.4	基于 D-S 融合的双视向 SAR 图像建筑物提取	194
6.4.5	基于强散射特征模型的双视向 SAR 图像建筑物高度反演	205
	参考文献	211
第 7 章	高分辨率 SAR 图像道路提取方法研究	214
7.1	SAR 图像道路基元提取方法	214
7.1.1	SAR 图像线状道路基元提取	214
7.1.2	SAR 图像带状道路基元提取	219
7.2	基于模糊连接度的道路基元分割方法	221
7.2.1	模糊连接度理论	222
7.2.2	结合 FCM 分割和 ROEWA 自动提取种子点	222
7.2.3	考虑边缘特征的模糊连接度种子点扩展	223
7.2.4	实验结果与分析	225
7.3	结合张量投票和 Snakes 模型的道路半自动提取	229
7.3.1	基于 Snakes 模型的道路半自动提取	229
7.3.2	利用张量投票算法定义 Snakes 模型外部能量	231
7.3.3	实验结果与分析	235
7.4	基于 MRF 模型的道路网自动提取	239
7.4.1	道路线特征提取	239
7.4.2	基于线特征的 MRF 模型构建	242
7.4.3	MRF 模型能量函数的建立	244
7.4.4	模拟退火法搜索最优道路标记	246
7.4.5	实验结果与分析	248
	参考文献	251
第 8 章	建筑物目标 SAR 图像自动理解	253
8.1	先验知识模型构建	254
8.2	基于均值漂移和区域合并的高亮区域提取	257
8.2.1	均值漂移的思想	257
8.2.2	均值漂移图像分割方法	258
8.2.3	分割后区域合并	260
8.2.4	图像分割结果	262
8.3	候选建筑物目标确定	265
8.3.1	初始平行四边形主对角线的确定	265

8.3.2 平行四边形相似性判定	267
8.4 建筑物三维重建方法	270
8.4.1 主墙面图像初始范围的确定	271
8.4.2 主墙面图像区域的优化	273
8.4.3 建筑物宽度提取及三维重建	274
8.4.4 三维重建结果和分析	275
8.5 图像标注与理解	277
参考文献	279
第9章 城市目标与场景高分辨率 SAR 图像解译标志库	281
9.1 知识库与解译标志库简介	281
9.2 住宅用地	283
9.2.1 高层居民楼	283
9.2.2 低层居民楼	286
9.2.3 高层居民区	287
9.2.4 低层居民区	291
9.3 商服用地	294
9.3.1 商务区	294
9.3.2 办公区	301
9.4 工业用地	305
9.4.1 厂房仓库	305
9.4.2 污水处理厂	307
9.4.3 天然气罐	309
9.4.4 工业区	310
9.5 公共设施用地	311
9.5.1 公共服务区	311
9.5.2 高速公路	316
9.5.3 主干道	317
9.5.4 普通公路	319
9.5.5 人行天桥	319
9.5.6 水桥	321
9.5.7 公路桥	322
9.5.8 立交桥	324
9.5.9 铁路及火车	324
9.5.10 港口码头	325

9.5.11 机场	326
9.5.12 通信电力塔	327
9.6 工商综合体	327
9.7 城镇或建成区混合体	328
9.8 其他城镇或建成区	328
参考文献	329

彩图

第 1 章 城市雷达遥感的意义和现状

1.1 城市雷达遥感的意义

城市是人口密集、经济活动和资源相对集中的空间地域。随着城市化进程的加速,城市范围不断扩展,城市灾害应急管理与科学发展信息保障具有越来越重要的意义。在众多遥感手段中,光学遥感图像最有利于人类视觉解译,可以相对容易地从图像中提取城市目标参数,为城市遥感监测提供了大量的数据源。然而,光学传感器对天气和光照等条件较为敏感,在天气恶劣或者多云多雨气候条件下,不能及时获取有效的图像,无法为灾害应急和城市动态监测提供及时的数据源。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天时、全天候、可穿透云雾快速成像的能力,在灾害应急和多云多雨地区监测中具有不可替代的作用,已逐渐成为对地观测重要手段之一。

自 2007 年以来,意大利的 COSMO-SkyMed、加拿大的 RADARSAT-2、德国的 TerraSAR-X 和 TanDEM-X 卫星系统先后升空,开启了高分辨率星载 SAR 时代,星载 SAR 图像的空间分辨率达到了 1m。与此同时,我国 SAR 卫星系统也得到了长足的发展。2012 年 11 月 19 日,我国发射了第一颗民用 S 波段 SAR 卫星——环境与灾害监测小卫星星座的 HJ-1C 卫星;2016 年 8 月 10 日,中国首颗分辨率达到 1m 的 C 波段多极化 SAR 卫星“高分三号”发射;此外,《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025 年)》也规划发射若干颗全极化高分辨率 SAR 卫星,形成多波段、全极化、高分辨率 SAR 卫星的组网运行,实现高重访频率的对地观测。在星载 SAR 发展的同时,机载 SAR 分辨率也在不断提高,国内外研制的机载 SAR 系统均已经可以获取亚米级分辨率的数据。

这些高分辨率 SAR 系统为城市目标监测提供大量宝贵数据的同时,也给 SAR 图像理解和应用带来了巨大的挑战。地物目标在高分辨率 SAR 图像上呈现出的信息更加丰富,单体目标的散射特征能够得到明显的展现,但由于城市目标与场景的复杂性,目前 SAR 遥感数据在城市目标监测方面的应用效果并不理想,SAR 图像“不好用,不会用”的问题在城区变得尤为突出。这是 SAR 特殊的成像方式以及城市目标结构的复杂多样性,导致 SAR 图像特征呈现出完全不同于人类视觉的图像特征,给城市目标高分辨率 SAR 图像理解和应用造成很大的困难。具体表现在以下几方面。

(1) SAR 是基于测距原理通过主动发射与接收电磁波而成像的,与人类视觉系统和光学遥感的成像原理有着本质差异。因此, SAR 图像中的人工目标不仅与人类视觉系统所熟知的状态完全不同,而且与光学遥感图像非常不同,即“所见非所知”。

(2) 由于 SAR 系统接收的是组成地物目标的每一个独立单元形成的散射能量,所以呈现在 SAR 图像上的地物目标是散射单元构成的集合体,多表现为离散的点、线组合。

(3) 不同于光学成像系统,在 SAR 图像上,城市目标通常表现为稀疏的散射中心分布,并对成像角度敏感,边界以点、短线条为主,连续性和完整性差。

(4) SAR 成像是三维空间到二维平面(方位向和距离向)的映射过程,对于高度变化显著的城市目标而言,这样一个降维过程必然导致信息的损失。因此,在 SAR 图像上,斜距相等但来自不同目标的散射信号将混淆在一个像元内,加上城市目标结构和空间关系复杂,给 SAR 图像解译和信息提取带来巨大的挑战。

建筑物目标是城市的重要地理要素之一,精确获取建筑物目标的三维结构信息对于城市规划、数字城市建设、灾害应急响应以及军事侦察等具有重要意义(Soergel, 2010; 张风丽和邵芸, 2010)。早期在中低分辨率条件下,图像分辨能力不足以表征建筑物目标的几何结构特征,目标散射强度是从图像中获得的主要信息,因此难以从图像中识别和提取单个建筑物目标。当 SAR 图像空间分辨率达到米级水平时,图像反映的目标信息更加丰富,目标形状结构特征能够得以体现,因此利用 SAR 图像目标散射特征识别和提取城市目标成为可能。另外,由于城区环境的复杂性、密集建筑物间电磁波的多次散射、相邻目标的遮挡,以及 SAR 成像固有的几何畸变与噪声的影响,城市目标在高分辨率 SAR 图像上的特征更为复杂,导致目前的城市目标 SAR 监测技术无法满足应用的要求。

道路是另外一类重要的城市目标,是人类交通运输的重要组成部分,对促进物质传输、经济发展、文化交流、军事战备具有重要作用。传统利用遥感图像提取道路的方法是操作人员手工勾画提取,这种方式具有较高的正确性,但是太耗时耗力,而且带有一定的主观性。随着遥感技术的发展,利用遥感图像提取道路信息越来越受到人们的关注。与光学遥感相比, SAR 图像城市道路信息提取具有重要意义,对于灾害应急监测和城市安全保障具有不可替代的作用。虽然近年来人们针对 SAR 图像的特点提出了很多道路提取的方法,但由于 SAR 特殊机制、固有噪声以及相邻地物目标的影响,城市道路目标的提取存在特有的困难和挑战,亟须深入开展研究。

因此, SAR 成像的特殊性和城市目标/场景的高度复杂性使得 SAR 图像的理解、处理和应用都非常困难。城市目标/场景在高分辨率 SAR 图像上通常呈现为离散的点、线、面等,是散射单元的集合体;而且目标边界以点、短线条为主,连续性和完整性差,几何变形严重。这导致城市 SAR 图像理解与认知、信息提取比光学图像困难得多,已成为 SAR 数据应用推广中的核心困难与挑战。因此亟须针对 SAR 图

像的特点开展城市雷达遥感机理与方法研究,提高 SAR 图像在城市目标监测中应用的广度和深度。

1.2 建筑物目标 SAR 监测研究进展

近年来,围绕高分辨率 SAR 建筑物目标的散射机制分析、图像解译与目标信息提取等问题,国内外学者开展了大量的研究,主要来自以下团队。最早开展高分辨率 SAR 城市研究的是以 Franceschetti 为代表的团队,他们先是建立了简单矩形建筑物目标的电磁散射模型 (Franceschetti et al., 2002),之后利用二次散射亮度提取建筑物高度,后又利用模拟图像和 COSMO-SkyMed 聚束模式 SAR 图像进行了验证 (Guida et al., 2010)。以 Soergel 和 Stilla 为首的团队是当今城市 SAR 遥感的领头羊,最开始他们利用人工解译的方法分析建筑物目标在 SAR 图像上的叠掩、阴影和多次散射特征以及目标之间的遮挡关系,后来开发了 SAR 图像模拟器辅助图像的解译。在建筑物目标提取与三维重建方面,该团队主要形成了 3 种不同的思路:①利用多视向 SAR 技术提取简单建筑物目标信息 (Thiele et al., 2010);②引入格式塔心理学的感知编组原理自动重建建筑物目标 (Michaelsen et al., 2010);③引入城市场景上下文信息,综合利用光学图像与 SAR 图像提取建筑物目标 (Wegner, 2011)。德国宇航中心的 Bamler 团队开发了基于射线追踪法的 3D SAR 模拟器,并分析了建筑物目标的散射特征形成机制,用于大型建筑物目标的散射机制分析 (Tao et al., 2014; Auer, 2011)。此外, Brunner 团队利用欧洲微波信号实验室 (European Microwave Signature Laboratory, EMSL) 测量结果和模拟图像分析了建筑物在高分辨率 SAR 图像上的散射特征,基于以上研究结论,发展了一种基于模拟图像与真实图像特征匹配策略的建筑物高度反演和损毁程度提取方法 (Ferro et al., 2013; Brunner et al., 2010)。与国外相比,国内的城市 SAR 研究起步较晚,其中,复旦大学的金亚秋团队基于映射和投影算法进行建筑物目标的 SAR 成像模拟 (Xu and Jin, 2006),然后利用多视向极化 SAR 数据进行建筑物提取和重建 (Xu and Jin, 2007);此外,中国科学院遥感与数字地球研究所、中国科学院电子学研究所、国防科学技术大学等均在高分辨率 SAR 图像建筑物目标识别与参数提取方面开展了大量研究。下面从建筑物目标散射机理解与目标参数提取两个方面分别详细阐述。

1.2.1 建筑物目标散射机理及 SAR 图像理解

当 SAR 图像分辨率较低时,建筑物目标在图像上的辐射特性较为显著。随着空间分辨率的提高,建筑物目标在 SAR 图像上的几何结构特征更为显著,因此,目标散射机理的研究与 SAR 图像特征的理解就显得尤其重要。

人工解译是最早用于城市目标/场景 SAR 图像复杂散射机理研究的方法,这种

方法综合目标/场景和 SAR 成像知识,在人脑中生成相应的模拟 SAR 图像,然后通过与真实 SAR 图像的对比,实现 SAR 图像复杂散射机理的解译过程。Soergel 和 Stilla 为首的团队最先利用人工解译的方法分析了建筑物目标在 SAR 图像上的叠掩、阴影和多次散射特征以及目标之间的遮挡关系 (Stilla et al., 2003)。随着计算机技术的发展, SAR 图像模拟成为目标散射机理理解的重要手段。借助 SAR 图像模拟理解目标/场景到图像的正过程和机理,可以为深化 SAR 在城区监测的应用提供理论基础。两种思路本质上相同,区别在于人工解译方法不形成模拟图像,但其优点是能够迅速将有限的分析能力聚焦到 SAR 图像最显著而特殊的散射机制,而且能够具有人脑的智能化,这是现有任何计算机模拟方法所无法比拟的。因此,两种方法各有特点,它们在建筑物目标散射机理及 SAR 图像理解中的应用将在第 3 章、第 4 章、第 8 章中具体展开介绍。

1.2.2 高分辨率 SAR 图像建筑物目标提取与三维重建

利用 SAR 图像进行建筑物目标提取与三维重建的研究始于 20 世纪 90 年代后期,尽管发展较晚,但国内外学者进行了大量研究,取得了颇多成果。根据已公开发表的文献来看,利用高分辨率 SAR 图像进行建筑物三维信息提取的方法按数据源可以分为基于单幅 SAR 图像和多视向 SAR 图像的方法,下面分别介绍。

1. 基于单幅 SAR 图像的建筑物提取与三维重建

在 SAR 图像中,建筑物高度的反演主要依赖于建筑物目标的叠掩、阴影和二次散射亮线等显著散射特征。对于建筑物目标,利用完整的阴影信息或者叠掩信息可以得到建筑物平面轮廓与高度。Bolter 和 Leberl (2000) 分析了建筑物在 SAR 图像上的叠掩和阴影特征,并分别利用模拟图像和真实图像实现了建筑物的信息提取。Bennett 和 Blacknell (2003) 利用 SAR 图像中阴影和叠掩的形状与尺寸信息估算了平顶屋和尖顶屋的高度,并对结果进行了验证。Tupin (2003) 利用边界检测算子提取建筑物的边界和叠掩区域,进而根据叠掩计算建筑物的高度。Guida 等 (2010) 基于建筑物目标几何参数与二次散射、叠掩和阴影间的定量关系实现了基于单幅 SAR 图像的简单建筑物高度反演。Wegner (2011) 从 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 图像和光学图像中提取建筑物边界,采用基于条件随机场模型 (Conditional Random Field, CRF) 的融合方法重建目标三维信息。

结合建筑物目标在高分辨率 SAR 图像上的散射特征,一些研究者借助计算机与模式识别新算法实现目标参数的提取与重建。Quartulli 和 Datcu (2004) 引入随机几何模型方法,从单幅 SAR 图像中提取并重建建筑物目标,模型基于建筑物的叠掩-二次散射-阴影在图像空间的拓扑几何关系,并且加入建筑物屋顶类型,将场景模型与图像数据的匹配度作为目标函数求解整个场景中建筑物个数、屋顶类型、长、宽、

高等参数。Michaelson 等 (2010) 引入了视觉编组和认知心理学原理, 将建筑物目标在 SAR 图像中的特征进行了编组, 实现了建筑物边界的提取。Jahangir 等 (2007) 对不同类型的建筑物在 SAR 图像上形成的阴影特征进行了分析, 并基于区域活动轮廓法提取了阴影特征, 在此基础上反演了不同类型建筑物的高度。Guida 等 (2010) 建立了建筑物二次散射特征与高度之间的电磁散射模型, 利用二次散射的灰度信息对建筑物高度进行反演。Ferro 等 (2013) 假设建筑物为平行六面体, 通过检测建筑物在 SAR 图像中的亮线、亮面、暗面等特征并以一定规则进行组合, 实现了场景内建筑物边界轮廓的自动提取。

与此同时, 国内学者也围绕高分辨率 SAR 图像建筑物目标的信息提取开展了很多研究。朱俊杰等 (2006) 分析了建筑物在 SAR 图像上的叠掩和角反射特征, 并利用图像分割和边缘提取方法对叠掩进行提取并获得了建筑物的高度, 将该方法应用于城区机载 SAR 数据, 取得了较好的高度反演结果。邹斌等 (2009) 利用灰度累计方法分割出建筑物叠掩和阴影区域, 然后从模拟 SAR 图像重建平顶建筑物。傅兴玉等 (2012) 基于建筑物 L 形叠掩结构反演目标的三维参数信息, 并利用 0.5m 机载 SAR 数据验证了方法的有效性。Zhang 等 (2011) 结合图像分割与 Hough 变换等方法, 利用建筑物表现出的 L 形结构特征实现了建筑物的边界提取。

然而, 单纯利用阴影或者叠掩信息反演建筑物参数存在以下问题。首先, 利用阴影或者叠掩信息反演建筑物高度需要提取完整的阴影或者叠掩范围, 导致该方法仅适用于稀疏建筑物, 在应用于建筑物密集区域时, 由于建筑物的阴影或者叠掩通常受到邻近目标的干扰而不完整; 其次, 阴影区域较难与道路、广场等暗目标区分开来; 最后, 人工建筑物墙面的不均匀性导致 SAR 图像中叠掩区域内像元灰度一致性较差, 因此叠掩区域的检测精度低, 从而影响高度反演的精度。

针对这些问题, 一些研究者提出了基于模型匹配的建筑物参数提取方法。这类方法基于模型匹配将建筑物参数作为变量构造三维模型, 借助 SAR 图像模拟得到模拟图像或散射特征, 并通过与真实 SAR 图像进行匹配, 将匹配度最高时的参数作为提取结果。Balz 和 Haala (2006) 用 SAR 图像模拟对建筑物的叠掩和阴影特征进行三维重建, 然后用模拟和真实 SAR 图像进行比较, 并结合人工交互来进行最优参数的计算。Quartulli 和 Datcu (2004) 等将场景中建筑物的边界和位置信息等均设为变量构造出场景模型, 并与真实 SAR 图像进行匹配, 通过对匹配函数的优化实现了建筑物信息的提取。Brunner 等 (2010) 提出了一种“假设、模拟、匹配”的方法, 在建筑物只有高度未知的情况下, 通过对高度进行假设并生成模拟图像, 当与真实 SAR 图像达到最佳匹配时实现建筑物的高度反演。傅兴玉等 (2012) 对该方法进行了改进, 将建筑物在 SAR 图像中形成的几何结构特征区域引入图像匹配中, 优化了匹配函数, 提高了建筑物重建的精度。蒋李兵等 (2012) 考虑到 SAR 图像模拟过程计算复杂度较高, 利用正交投影模型实现建筑物几何特征模型的快速生成, 并综合