



地球观测与导航技术丛书

面向任务的 遥感信息聚焦服务

李德仁 朱 庆 朱欣焰 眭海刚 著



科学出版社
www.sciencep.com

地球观测与导航技术丛书

面向任务的遥感信息聚焦服务

李德仁 朱 庆 朱欣焰 睦海刚 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

针对多样化并发任务条件下,多平台、多传感器、多时间分辨率、多空间分辨率和多频谱分辨率遥感数据及其处理服务的广泛共享、有机聚合与高效协同问题,本书系统介绍了面向任务的遥感信息聚焦服务理论与方法,包括遥感信息共享的多维动态全局逻辑模型——遥感信息球模型,以及基于此模型的任务理解、语义搜索与动态聚合的服务方法等,并结合地震灾害应急响应应用需求详细介绍了典型的遥感信息聚焦服务流程与主要技术内容。

本书可作为地球空间信息学及相关学科的各类专业技术(管理)人员进行科学研究、教学、生产和管理等工作的参考书,也可作为本科高年级学生或研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

面向任务的遥感信息聚焦服务/李德仁,朱庆,朱欣焰,眭海刚著.
—北京:科学出版社,2010
(地球观测与导航技术丛书)
ISBN 978-7-03-028891-2
I. ①面… II. ①李…②朱…③朱…④眭… III. ①遥信系统 IV. ①TP79
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 173743 号

责任编辑:韩 鹏 朱海燕 刘希胜 马云川 / 责任校对:何艳萍
责任印制:钱玉芬 / 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>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 11 月第一次印刷 印张:13 1/4 插页:4

印数:1—3 000 字数:292 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业与信息化部和科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划（863 计划）将早期的信息获取与处理技术（308、103）主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”计划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示 973 和 863 主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009 年 10 月

前 言

进入 21 世纪, 人类面临更加严峻的人为和自然灾害的挑战, 随着财富的不断增加, 孕育的风险也愈来愈多。以遥感、地理信息系统和卫星定位与导航等为代表的现代地球空间信息技术在危机管理和应急响应等方面发挥着越来越重要的作用。特别是现代卫星遥感技术具有覆盖范围广、速度快、适应性强和信息丰富等特点, 其在应急响应和军事应用中的作用日益突出。在 1972 年斯德哥尔摩联合国环境会议上正式提出并付诸实施的全球环境监测系统 (Global Environmental Monitoring System, GEMS), 30 多年来极大满足了全球土地管理、自然资源利用、环境保护和重大自然灾害应急响应等需求。遥感技术与装备也广泛应用于国防建设, 并大大提升了战场态势感知、指挥通信、精确作战等方面的能力。例如, 随着遥感技术与装备的应用和发展, “侦察—跟踪—决策—打击”的作战链大大缩短: 在海湾战争中, 美军空袭从发现到攻击目标需要 3 天; 在科索沃战争中, 这一时间缩短到 2 小时; 阿富汗战争时这一时间进一步缩短到 19 分钟; 而在伊拉克战争中这一时间控制在 10 分钟。我国在国家中长期科技发展规划中也特别设立“高分辨率对地观测系统”国家科技重大专项, 到 2020 年重点发展基于卫星、飞机和平流层飞艇的高分辨率先进观测系统; 形成时空协调、全天候、全天时的对地观测系统; 建立对地观测数据中心等地面支撑和运行系统, 提高我国空间数据自给率, 形成空间信息产业链。随着对地观测卫星的陆续发射, 每天都可以获取 TB 级卫星数据, 数据获取能力提高和数据处理能力不足的矛盾日益突出。

面对不同任务需求的多样性与并发性, 多平台、多传感器、多时间分辨率、多空间分辨率和多频谱分辨率的遥感数据处理错综复杂, 由于缺乏各类遥感信息资源广泛共享及其有机聚合和高效协同的完整理论方法与成熟技术, 难以准确、快速地对数据及其处理资源进行动态的组织。现有的遥感信息服务往往只针对有限数据源和特定应用, 是一种典型的自上而下的数据驱动模式。这种模式以影像数据产品为中心, 服务方式单一、不灵活、效率低, 越来越不适应个性化的复杂多样的任务需求, “数据既多又少”的矛盾十分突出。比如, 在汶川地震前期, 遥感反应不及时, 一方面获取的可见光遥感影像数据受多云多雨天气影响, 质量难以满足需要, 而雷达遥感影像又缺乏有效的解译手段; 另一方面缺乏应急任务驱动下的遥感数据快速获取与处理服务的成套技术。地球空间信息服务的最高标准是在规定的时间 (Right Time) 将所需位置 (Right Place) 上的正确数据/信息/知识 (Right Data/Information/Knowledge) 送到需要的人手上 (Right Person)。这就形成了本书的主题: 面向任务的遥感信息聚焦服务。将长期以来数据导引的产品制作和分发模式转变成需求导引的聚焦服务模式, 从而以服务代替产品, 适应当今信息时代的一大趋势。

针对国民经济建设、社会发展和国防建设的重大需求以及地球空间信息技术发展的国际学术前沿问题, 由武汉大学、国防科学技术大学、北京航空航天大学等单位联合攻

关,系统研究了面向用户的任务理解、语义搜索和动态聚合遥感信息获取、传输与处理服务的关键科学问题,创立了“面向任务的遥感信息聚焦服务理论”,建立了基于“信息球”的遥感信息共享模型和聚焦服务机制,奠定了任务驱动下多源异构遥感信息高效按需服务与主动服务的理论与方法基础。针对多层次、多样化的遥感信息应用任务需求和多源异构遥感信息资源(包括影像数据资源、空间信息资源、地学知识资源、存储资源、计算与处理资源、网络传输资源和传感器资源等)之间复杂的准确匹配映射难题,对抽象的任务空间和资源空间进行统一描述,并在信息空间建立了一个以地球空间为基础的遥感信息多维动态全局逻辑模型——遥感信息球模型。在此基础上提出了面向用户的遥感信息聚焦服务架构及其集群演化方法,提高了聚焦服务性能;提出了遥感信息用户需求特征模型及其主动分发服务机制,通过建立遥感信息与用户需求特征之间的匹配关系,实现了遥感信息主动分发,提高了分发的时效性;进一步提出了基于信息球的渐进求精的遥感信息服务智能搜索与语义知识导航的遥感信息服务动态组合方法,为遥感信息资源的发现、选择和聚合开辟了新途径;提出了聚焦服务链的自主演化和自适应在线整合方法,解决了多任务并发和时变、空变条件下的聚焦服务难题。

本书是国家973计划“面向任务的遥感信息应用服务方法”课题组集体智慧的结晶,汇集了杨晓霞、李海峰、陈旭、夏宇、詹勤、孙扬等研究生的博士学位论文成果。其中,第1章由李德仁、朱庆、朱欣焰、眭海刚撰写;第2章由李德仁、朱庆、朱欣焰、刘华、刘斌、夏宇撰写;第3章由朱欣焰、眭海刚、陈旭、詹勤、唐九阳、孙扬撰写;第4章由肖志峰、陈旭、杨晓霞撰写;第5章由朱庆、杨晓霞、李海峰撰写;第6章由朱庆、李海峰、杨晓霞撰写;第7章由唐炉亮、常晓猛、李清泉撰写;第8章由眭海刚、杨晓霞撰写。全书由李德仁、朱庆、朱欣焰和眭海刚统稿。本书可作为地球空间信息学及相关学科的各类专业技术(管理)人员进行科学研究、教学、生产和管理等工作的参考书,也可作为本科高年级学生或研究生教材。

由于当代遥感技术发展很快,我们的视野有限,书中不足之处敬请读者批评指正。

作 者

2010年4月于武汉珞珈山下

目 录

丛书出版说明

前言

第1章 对地观测技术的发展现状与趋势	1
1.1 对地观测技术发展的机遇与挑战	1
1.2 对地观测技术在应急响应与国防中的应用	2
1.3 遥感技术国内外研究现状	3
1.3.1 多平台多传感器技术的发展	3
1.3.2 遥感信息处理技术的发展	7
1.3.3 遥感图像处理系统的发展	12
1.4 遥感信息应用服务	16
1.4.1 遥感信息共享与互操作	16
1.4.2 遥感信息分发服务	18
参考文献	20
第2章 遥感信息聚焦服务理论	22
2.1 任务驱动的遥感信息聚焦服务模式	23
2.2 遥感信息聚焦服务理论内涵	24
2.3 遥感信息聚焦服务架构	25
2.3.1 遥感信息聚焦服务系统基本组成与交互协议	27
2.3.2 遥感信息集群自主演化方法	34
2.3.3 遥感信息主动分发机制	40
参考文献	47
第3章 多源遥感信息共享模型	48
3.1 遥感信息的描述规范	48
3.2 遥感信息本体建模方法	50
3.3 多源遥感信息处理服务统一描述方法	56
3.3.1 基于形式概念分析的多源遥感信息处理服务分类	56
3.3.2 基于本体的多源遥感信息处理服务语义描述	61
3.4 遥感信息多维逻辑组织模型——遥感信息球	67
3.4.1 遥感信息球概念	67
3.4.2 基于语义的遥感信息多维索引	68
3.4.3 多维遥感信息降维可视化方法	77
参考文献	81

第 4 章 遥感信息及其服务的智能搜索方法	82
4.1 遥感信息语义注册中心	83
4.1.1 遥感信息语义注册模型	84
4.1.2 遥感信息语义注册中心的接口和交互协议	89
4.2 遥感信息语义搜索描述语言	90
4.2.1 语义关系查询语言	91
4.2.2 语义规则描述语言	93
4.3 遥感信息及其服务的智能搜索方法	94
4.3.1 遥感信息语义查询扩展方法	95
4.3.2 遥感信息处理服务多层次语义匹配方法	98
4.4 遥感信息处理服务分类选择方法	100
4.5 案例分析	103
参考文献	105
第 5 章 遥感信息处理服务动态组合方法	107
5.1 遥感信息聚焦服务的多层次语义约束模型	108
5.1.1 任务语义约束	110
5.1.2 数据语义约束	110
5.1.3 服务功能语义约束	111
5.1.4 服务质量语义约束	114
5.2 渐进精化的遥感信息处理服务组合方法	115
5.2.1 建立需求相关服务关系图	116
5.2.2 基于 AO* 的服务路径搜索算法	118
5.2.3 案例分析	119
5.3 基于关键路径响应时间的遥感信息服务链优化方法	122
5.3.1 响应时间计算模型	123
5.3.2 基于关键路径响应时间的遥感信息服务优化组合算法	125
5.3.3 案例分析	128
参考文献	129
第 6 章 遥感信息处理服务链自主演化方法	131
6.1 遥感信息处理服务链变化驱动力分析	132
6.1.1 服务链情境本体	132
6.1.2 任务情境本体	133
6.1.3 服务环境情境本体	134
6.2 基于最小冲突启发式的遥感信息处理服务链重构方法	135
6.2.1 基本概念	136
6.2.2 流程约束和完整性约束	137
6.2.3 基于最小冲突启发式的回归搜索算法	139
6.2.4 实验及分析	143
6.3 QoS 感知的多任务遥感信息处理服务优化组合非合作博弈方法	149

6.3.1	多任务遥感信息处理服务优化组合非合作博弈模型	149
6.3.2	最优反应迭代算法	151
6.3.3	实验及分析评价	154
	参考文献	159
第7章	遥感信息多任务服务链自适应在线整合方法	162
7.1	遥感信息多任务服务链自适应在线整合模型	165
7.1.1	自适应在线整合框架	165
7.1.2	自适应在线整合模型	165
7.1.3	整合资源的动态监测	167
7.1.4	整合资源知识库	168
7.1.5	在线整合的智能调度	168
7.2	基于蚁群算法的整合负载自适应分配算法	169
7.2.1	服务执行时间预测模型	170
7.2.2	服务执行负载增量预测模型	171
7.2.3	基于蚁群算法的处理服务自适应调度	172
	参考文献	175
第8章	遥感信息聚焦服务在地震灾害快速监测中的应用	176
8.1	地震灾害对遥感信息的需求分析	176
8.1.1	灾害监测遥感数据要求	176
8.1.2	灾害遥感监测的业务需求	178
8.2	地震灾害快速监测中的遥感信息聚焦服务流程	181
8.2.1	建立约束模型	182
8.2.2	智能搜索	182
8.2.3	遥感信息服务组合	183
8.2.4	遥感信息服务链演化	185
8.2.5	服务链在线整合	188
8.3	遥感影像处理在汶川地震灾害监测中的典型应用	188
8.3.1	高时空分辨率遥感数据获取	188
8.3.2	遥感数据快速处理	191
8.3.3	典型灾害信息检测与提取	192
8.3.4	次生灾害监测	196
	参考文献	197

彩图

第 1 章 对地观测技术的发展现状与趋势

20 世纪 60 年代以来,人类在航空航天信息获取和卫星对地观测方面成绩斐然,卫星遥感技术快速发展。人类已迈向构建天地一体化对地观测系统的阶段,一种跨国家、跨组织的综合、持续、协同的分布式对地观测系统正在悄然形成,其目的是协调目前全球各自独立运行的各种监测平台、资源和网络,弥合系统之间的鸿沟,支持系统间的协同工作,逐步建设一个由多系统组成的综合、持续、协同的分布式对地观测系统,以保障监测和跟踪全球各个角落地球环境的变化,为全球性、国家性、地区性、部门性的环境、健康、灾害等社会公益事业的政策制定、决策与服务提供更快、更多、更好的数据与信息服务。

1.1 对地观测技术发展的机遇与挑战

随着航天技术、计算机技术、通信技术、信息处理技术的进步,现代空间遥感技术得到了空前发展。20 世纪地球科学进步的一个突出标志是人类能够脱离地球而从太空观测地球,对地观测技术已成为国际上太空竞争的重要热点之一。现有的高空间、高光谱、多时相、全天候的遥感对地观测技术,已使人类第一次能够将自己赖以生存的星球作为一个整体来观测和研究,为地球科学的研究和人类社会的可持续发展作出了巨大的贡献(龚健雅,2007)。

人类正面临着人口急剧增加、资源逐渐枯竭、环境日益恶化、灾害频繁发生、恐怖事件愈演愈烈等严重的社会与经济问题,迫切需要利用对地观测技术提供实时动态的地球空间信息,这为对地观测技术的发展提供了前所未有的机遇。我国科技发展中长期规划中,已将航天对地观测系统列入重大专项。到 2020 年,国家计划投入 2000 多亿元建立天基信息系统,届时在轨运行卫星将达上百颗,具有准实时、全天候获取各种空间数据的能力,并逐步形成集高空间、高光谱、高时间分辨率和宽地面覆盖于一体的卫星(群)对地观测系统。对地观测系统的数据获取与信息处理涉及地球科学、信息科学、空间科学和认知科学等众多领域,需要通过多学科交叉聚集多领域的专家,系统而深入地研究地表物体的反射及散射特性、大气传输模型、地物成像机理与波谱特性、地球空间关系模型、空间信息采样定律、地球空间信息统一基准、遥感影像自动几何定位、地物目标自动识别、空间数据挖掘与知识发现以及空间信息智能服务等一系列理论与方法。如何快速地对获取的对地观测数据进行有效处理和自动信息提取、及时获得知识、充分发挥对地观测系统的使用效能,已成为我们面临的重大挑战。

1.2 对地观测技术在应急响应与国防中的应用

进入 21 世纪,世界各国连续几年发生多次举世震惊的特大自然灾害,其中有代表性的几次灾害包括 2004 年暴发的印度洋海啸、2005 年发生在美国的“卡特里娜”飓风、2006 年 5 月 27 日在印度尼西亚发生的地震、2007 年 11 月 15 日袭击孟加拉国的“锡德”强热带风暴、2008 年 5 月在缅甸发生的“纳尔吉斯”飓风、2008 年中国南方雪灾及四川汶川“5·12”地震、2010 年 1 月的海地地震和 2010 年 8 月甘肃舟曲特大泥石流,这一系列的灾难造成了巨大的经济损失和人员伤亡。随着中国经济持续高速发展和生产规模不断扩大,自然灾害损失也呈逐年上升趋势。灾害的监测预警和防灾减灾关系到生产安全、工程安全、公共安全和持续稳定发展,是国家和社会的重大需求,是构建和谐社会的重要保障。随着空间信息技术的飞速发展,尤其是高时空分辨率遥感传感器技术的发展,空间信息技术在减灾中的作用日益凸显(李德仁等,2008)。

利用卫星遥感技术对自然灾害进行监测和预报,已被广泛证明是一种行之有效的技术手段。中国在利用卫星遥感技术进行自然灾害监测预警方面进行了广泛的研究与实践,取得了宝贵的经验。以地质灾害为例,我国华东、华北、华南、东北、西北、西南等分别针对本地区地质灾害的空间分布与灾害特点进行了遥感调查、灾害特征研究和灾害影响分析,尤其是以长江三峡山体滑坡、川藏公路边坡失稳的遥感研究较多;构造地震、气象灾害、农业灾害、洪涝干旱等方面的遥感减灾研究成果也颇丰。如今,光学遥感、红外遥感、微波遥感、高光谱遥感等卫星与航空遥感数据,已成为自然灾害监测预警及防灾减灾的有效手段(李德仁,2007)。

遥感对地观测已经成为现代化战争的主要信息源和重要技术支撑,国家间国防实力的竞争很大程度上取决于空间技术和信息技术的竞争。谁掌握了先进的信息获取技术,谁具有更发达的空间对地观测技术,谁就有能力把握制天权、制空权和制信权,谁把握了信息的主动权,谁就可能掌握战争的主动权。遥感对地观测技术和信息贯穿着整个战争,从战略决策、战场指挥、目标侦察、跟踪监视、精确定位,实施打击到效果评估,形成了一个完整的一体化信息链,使人和武器的作用得到充分的协调和发挥,从而对武器起到了一种倍增器的作用。遥感对地观测技术已成为支撑现代军事信息化作战、提高军事信息化水平、直接支持各军兵种作战单元、夺取战场信息优势的重要技术手段。

美军自海湾战争以来,针对对地观测系统支持作战应用的问题,在基础理论、应用技术、应用装备等方面开展了一系列的研究。通过十多年的发展和建设,已经具备了组织调动 100 颗以上卫星和相关资源支持作战的能力。依靠卫星与应用系统的支援,美军的空袭行动,从获取信息到实施攻击的“杀伤链”时间,海湾战争为 3 天,科索沃战争为 101 分钟,而阿富汗战争下降为 19 分钟,伊拉克战争更是缩短到了 10 分钟,使战场目标“发现即摧毁”成为现实。近年来,美军卫星应用从战略层面向战役战术层面不断渗透,多种卫星应用系统集成化,进一步提高了作战力量对卫星资源的使用效率,部队战斗力得到了大幅度的整体提高。2005 年 2 月 5~11 日,美空军举行了“施里弗-3”太空军事演习,验证了美军已经具备航天信息直接支持作战应用的能力。

美国航天司令部《2020 年设想》提出,空间在未来将变得更加重要,所有的军事

行动都将依赖于天基能力,为了对高价值目标进行实时识别与特性描述,对目标群进行探测、监视、监控和跟踪。需要发展星间或卫星与其他传感器之间的“交叉提示”技术、信息融合技术以及网络技术与宽带通信技术等,以综合利用部署在天基平台或天基与空基、海基、陆基平台上的可见光、红外、微波多种探测手段,对同一目标进行多角度、多谱段监视。为此美军在其《国防部基础研究计划》中,除在系统体系结构、信息传输等方面加大研究外,在应用服务方面重点强调支持智能实时计算、战术图像的目标识别和交互处理等方面的基础研究,凸显对地观测技术在作战中的应用地位。

1.3 遥感技术国内外研究现状

1.3.1 多平台多传感器技术的发展

卫星遥感是综合对地观测的重要组成部分,也是国际对地观测技术竞争的关键点之一,呈现出“三全”(全天候、全天时和全球观测)、“三高”(高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率)、“三多”(多平台、多传感器和多角度)的发展趋势。

1. 全球综合观测趋势

由于对地观测系统是开展地球系统科学研究的最为有效的手段,许多发达国家和不少发展中国家纷纷致力于掌握独立运行的对地观测体系,目前,在全球范围内正在形成一个空-天-地一体化,大、中、小卫星平台相结合的,相辅相成的多维立体综合观测体系,全球综合观测已成大趋势(陈述彭,2007)。美国联邦政府2004年宣布的四项重点研发计划:第一项就是太空计划,第三项是以建立全球综合地球观测系统为核心的全球研究计划。欧盟第六框架计划共涉及九个领域,第二领域即为航空航天领域,其中航天部分就是遥感、导航和卫星通信。美国地球观测系统卫星的发射有三个特点:其一是EOS-AM和EOS-PM卫星为代表的全球综合性半日周期观测形成系列;其二是即时观测卫星、半日周期卫星、数周周期地球观测卫星形成系列;其三是对陆地、海洋和大气以及对极地和热带的观测卫星形成系列。这样的卫星布局,保障了美国地球观测系统科学目标的实现。法国政府支持的四大主要优先科技领域第三项就是空间科技,它在政府科研总经费投入中占15.7%,位居第二。印度“十五”计划(2002~2007年)将空间科技列为第一优先领域,其新政府2004年重申延续上届政府的科技政策,并将空间科技列为印度科技发展的三大优先领域之首。联合国把空间遥感作为实现千年发展目标的必不可少的重要手段。我国航天白皮书也已颁布,国家正在全面统筹,拟建设国家综合对地观测系统。国际对地观测卫星委员会(Committee on Earth Observation Satellites, CEOS)于1995年提出了全球综合观测的策略(Integrated Global Observing Strategy, IGOS)。这一策略以大气、海洋、陆地观测为骨干,涵盖全球环境空间和地面观测的各主要组成系统。2005年2月16日,近60个国家的政府和欧盟签署了全球综合地球观测系统(Global Earth Observation System of Systems, GEOSS)10年执行计划。该计划强调在观测战略上实现整体优化,在整体设置上实现系统互操作和资料共享,在能力建设上进行充分的合作,并共同致力于填充观测空白和统一观测方法与标准等。

除全球性的综合地球观测系统计划之外,实际上更为现实的是各个国家,特别是一些发达国家和国家集团所形成并付诸实施的的对地观测计划,其中最重要的是美国和欧盟实施的的对地观测计划。美国对地观测计划中比较有代表性的是 20 世纪 80 年代提出的地球观测系统(Earth Observing Satellites, EOS)和随后提出的地球科学事业计划(Earth Science Enterprise, ESE)。欧盟提出了全球环境及安全监测计划(European Global Monitoring for Environment and Security, GMES),该计划主要建立一个空-天-地一体化的地球环境观测系统,并且将这个系统与欧盟各成员国的需求和用户密切连接,将其作为 21 世纪开创新地球观测与获得巨大效益的重要发展战略。

2. 高分辨率(空间与光谱)发展趋势

随着经济社会的发展,特别是国际军事斗争的激化,人们对高分辨率遥感信息的需求愈益强烈,而高分辨率遥感技术的发展也日益得到更大的重视。可以粗略地认为,自 20 世纪 70 年代以来,卫星遥感的空间分辨率几乎以每 10 年一个数量级的速度提高,1~5m 已经成为 21 世纪前 10 年新一代卫星空间分辨率的基本指标。光谱分辨率也已经从 70 年代的 50~100nm 提高到目前的 5~10nm。具有中等空间分辨率遥感卫星的重复观测周期已经小于 1 天。70 年代美国第一颗资源卫星(陆地卫星)的地面分辨率为 80m,80 年代法国 SPOT 卫星达到 10m,90 年代的印度卫星、俄罗斯卫星达到 5.8m 和 2m,1999 年 9 月发射的美国空间影像公司的 IKONOS 卫星的空间分辨率达到 1m,而 2001 年美国数字地球公司发射的 QuickBird 卫星的空间分辨率则高达 0.61m。2007 年 9 月美国数字地球公司发射的 WorldView-1 卫星的空间分辨率则高达 0.5m,平均重访周期为 1.7 天,每天能够拍摄多达 75 万平方公里范围的影像。卫星还具备很高的地理定位精度和极佳的响应能力,能够迅速瞄准要拍摄的目标,有效地进行同轨立体成像。新发射成功在轨运行的 GeoEye-1 是目前空间分辨率最高的商业成像卫星,GeoEye-1 卫星采集影像的分辨率为全色(黑白)0.41m,多光谱 1.65m。GeoEye-1 对地面目标的定位精度达到 3m,这就意味着用户不需要地面控制点以 3m 定位精度对自然和人工地物进行制图,星载仪器的精度达到了空前的水平。GeoEye-1 对地球上一点的重访周期为 3 天,或者更短。除美国外,俄罗斯、法国、德国、以色列、印度、日本甚至韩国等国都相继积极发展高分辨率成像卫星。法国的“昴星团”(Pleiades)卫星具有全色分辨率 0.7m、多光谱分辨率 2.8m 的高性能;日本为其军事侦察目的正在加紧构建他们的全球间谍卫星网,这个间谍卫星网由 3 颗光学卫星和 1 颗雷达卫星联网组成,据悉卫星的最高空间分辨率为 1m,并号称以监视朝鲜、观测全球为其主要目标。2006 年 7 月 28 日韩国也通过俄罗斯的火箭将他们的一颗名为“阿里郎”2 号的多用途卫星发射升空,据报道其分辨率也达到 1m,多光谱分辨率为 4m。韩国还正在研制并准备在近几年发射“阿里郎”3 号高分辨率光学成像卫星。

光谱分辨率的提高是近年来空间遥感发展的又一重要趋势。美国在 1999 年发射了具有 36 个波段的中分辨率成像光谱仪,随后又发射了超过 200 个谱段的更精细的光谱分辨率的高光谱卫星。在高光谱遥感技术方面,美国仍居领先地位。2000 年 11 月 21 日美国发射号称“新千年第一星”——EO-1 卫星,星上载荷有一台高光谱成像仪(HYPERION)。它可以在 0.4~2.5nm 的光谱范围内以 30m 的地面空间分辨率、10±

0.1nm 的光谱分辨率在 220 个波段同时成像。与此同时,这一卫星还配备了一台先进陆地成像仪(Advanced Land Imager, ALI)和一台具有 256 个波段的大气校正仪(Linear Etalon Imaging Spectrometer Array Atmospheric Corrector, LAC),它在 890~1600nm 光谱段具有 256 个波段,其主要功能是对 Landsat-7 的 ETM+和 EO-1 的 ALI 遥感数据进行水汽校正,它在 1380nm 光谱段也可同时获得卷云的信息。美国于 2004 年 7 月 15 日发射的 EOS-Aura 卫星是 EOS 系列大型航天平台的第三颗卫星,主要以地球大气为其主要观测和研究对象,更主要集中于占地球大气系统 1%成分的气体 and 漂浮微粒。AURA 卫星的观测仪器是高光谱遥感系统,与以陆地观测为主要目标的卫星相比,AURA 卫星上的高光谱仪器的空间分辨率很低。在高光谱遥感领域,欧洲也不甘落后。欧洲空间局(European Space Agency, ESA)于 2001 年 10 月发射成功一台以 PROBA 小卫星为载荷平台的紧密型高分辨率成像光谱仪(Compact High Resolution Imaging Spectrometer, CHRIS)。CHRIS 在 415~1050nm 的光谱成像范围内有 5 种成像模式,在不同成像模式下其波段数目、光谱分辨率和空间分辨率不等,而且能够从 5 个不同的角度(00° , $\pm 55^{\circ}$, $\pm 36^{\circ}$)对地物进行观测,这种遥感方式可以获取地物反射辐射的方向性特征。CHRIS/PROBA 无论是空间分辨率、光谱分辨率还是其工作模式,在目前的星载成像光谱仪中都是先进的。其后于 2002 年 3 月欧洲空间局成功发射了 ENVISAT 卫星,其上搭载的推帚式中分辨率成像光谱仪(Medium Resolution Imaging Spectrometer, MERIS),在可见光与近红外光谱区有 15 个波段,地面分辨率为 300m,每 3 天可以对全球覆盖一次。MERIS 的主要任务是进行沿海区域的海洋水色测量,此外还可以用于反演云顶高度、大气水汽柱含量等。值得一提的是, MERIS 虽然只有 15 个波段,但可通过程序控制选择和改变光谱段的布局,这无疑为未来高光谱遥感器波段的设计和星上智能化布局开拓了新的思路。

为了满足国防建设和经济建设的急迫需求,我国正着手发展一系列自主的高分辨率遥感卫星,并建立天地一体化空间信息获取、处理和分发系统。《国家中长期科学与技术发展规划纲要》确定未来 15 年内我国将实施“高分辨率对地观测系统”重大专项。国家在对地观测与航空航天领域一系列战略的发展规划,显示了我国在未来一段时间内经济社会发展和国防建设对空间信息的巨大需求。

总之,以多平台、多传感器、多尺度为特征的航天航空数据获取,正在朝着高光谱、高空间分辨率和高时间分辨率的方向发展。正在逐步形成集高空间分辨率、高光谱、高时间分辨率和宽地面覆盖于一体的卫星(群)对地观测系统,未来将具备准实时、全天候获取各种遥感数据的能力(Li et al., 2009)。

3. 全天候全天时发展趋势

微波遥感可以全天候、全天时工作。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)因其不受天气条件限制能够穿透地表进行大面积、远距离的观测,并具有高分辨率、侧视成像的特点,备受地球科学以及相关领域研究人员的重视,近年来得到了迅速蓬勃的发展。

1978 年美国成功发射了海洋 1 号卫星——Seasat-A,在卫星上首次装载了合成孔径雷达,标志着 SAR 已成功进入了空间领域。美国自 1981 年以来,利用可重复使用的航

天飞机的优势,在“哥伦比亚号”、“挑战者号”和“奋进号”航天飞机上开展了三次航天飞机雷达的系统试验,即 SIR 计划,其中包括 SIR-A, SIR-B 和 SIR-C/X-SAR 三次雷达对地观测,获取了地球表面大量的雷达遥感数据,并取得了很大的成功。从 1988 年开始,美国先后向太空投放了 4 颗军事侦察“长曲棍球”(Lacrosse)合成孔径雷达卫星,其空间分辨率达 1m,在 90 年代的海湾战争中发挥了至关重要的作用。美国成功发射 SAR 卫星后,各国相继在微波遥感领域开展了大量的技术与应用研究。20 世纪 90 年代初期雷达卫星几乎同期在许多国家相继研制并发射成功。1991 年苏联发射了 Almaz-1 雷达卫星。同年欧洲空间局先后发射了欧洲遥感卫星 ERS-1 和 ERS-2 (European Remote Sensing Satellite) (单极化)。1992 年日本也发射了日本地球遥感卫星 JERS-1 (Japanese Earth Resource Satellite)。1995 年加拿大发射了雷达卫星 RADAR-SAT-1,这是一颗真正意义上兼顾科学技术实验和商业化的雷达卫星。

2002 年,欧洲空间局在其综合性环境卫星大平台 ENVISAT 上装载了一台功能较完善的卫星雷达系统 ASAR。2005 年,经过多年推延之后,日本将一颗功能强大的先进陆地观测卫星 ALOS (全极化)发射入轨,星上装有一台星载雷达系统 PALSAR。值得一提的是美国于 2000 年执行了一项全球性的“航天飞机雷达测图计划”(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)。SRTM 是由美国牵头的一项国际性计划,它是把数台改进型的特殊雷达载入“奋进号”航天飞机对全球进行航天遥感测绘,旨在获取最完整的地球高分辨率数字地形数据库。飞行 9 天多,采集了全球约 80% 地区的地形数据,其采集规模、数据精度均达到了前所未有的高度。传统的测绘技术(包括航空摄影测量技术)在 20 世纪用了 100 年时间才完成了全球 70% 地区的地形图测绘,而 SRTM 只用短短 9 天多时间就完成了,这在科学技术上是一大飞跃,也是测绘科学发展的一个里程碑。

近年来,许多国家又先后研发了新一代的 SAR 卫星。比较有代表性的有:①2007 年 12 月 14 日发射的加拿大空间局 RADARSAT-2 卫星,它继承了 RADARSAT-1 的优点,具有 12 种波束模式,尤其具有全极化功能。②2007 年 6 月 15 日发射的德国 TerraSAR-X 卫星,是一颗兼顾科学研究和商业运行的高分辨率 SAR 卫星,鉴于其稳定且精确的轨道定位能力,可为 PS InSAR 应用提供理想的数据源。③意大利的 COSMO-SkyMed 系列卫星,现已发射三颗,最近的一颗 COSMO-SkyMed3 于 2008 年 10 月 26 日由“德尔它 2”火箭成功发射升空,该项目被称为 COSMO-SkyMed 星座,由 4 颗 X 波段 SAR 卫星组成,地面分辨率 3m,多视角观测。④2008 年 1 月发射的以色列 TecSAR 和 RISAT, TecSAR 和 RISAT-2 无论是外形还是成像模式均十分相似,两者均采用了盘状天线,成像模式均包括条带、扫描、聚束和 Mosaic 模式。TecSAR 工作在 X 波段, RISAT-2 工作在 C 波段。RISAT-2 已于 2009 年 4 月成功发射升空。⑤德国预计于 2015~2020 年发射 TanDEM-L 卫星,该卫星搭载 L 波段合成孔径雷达,利用干涉测量和极化干涉测量,获取全球三维结构信息和动态变化信息。这一新的合成孔径雷达卫星体系 2009 年年底才被正式提出,目前,还处于概念设计阶段。值得一提的是,德国已经和美国建立了合作伙伴关系,合作开发 TanDEM-L 卫星系统。

据不完全统计,现已拥有星载 SAR 的国家或组织有美国、俄罗斯、欧洲空间局、加拿大、日本、德国、中国、以色列和印度,韩国、阿根廷的星载合成孔径雷达

KOMPSAT-5 预计会在近几年发射。可以认为,一个全天候的微波遥感对地观测时代已经到来。

1.3.2 遥感信息处理技术的发展

遥感信息处理方面的发展趋势可以描述为:遥感信息处理和提取技术的高精度化和智能化、遥感信息分析与应用技术的实用化和业务化。

1. 遥感影像地面预处理技术

卫星遥感所获取的对地观测数据主要是数字影像,而影像是由地物辐射经大气层后被传感器接收所形成,由于遥感平台的运动、地球的转动等一系列因素的影响使影像在几何上产生变形,在灰度上产生衰减。为了能从对地观测数据中精确提取所需要的地理空间信息,必须对所获取的遥感影像进行精确几何纠正和辐射校正。

传统的遥感影像星地直接定位方法大多使用卫星成像几何模型,它与传感器物理和几何特性密切相关,对于不同类型的传感器需要建立不同的成像几何模型。随着遥感技术的发展,传感器的结构越来越复杂,除了框幅式中心投影成像外,单线/三线阵推帚式成像越来越普遍。这就使构建几何模型变得越来越困难,研究一种与具体传感器无关的广义传感器模型已成为一个重要研究方向。在已有的经验传感器模型中,其目标空间与影像空间的转换关系是通过一般的数学函数来描述的,可用多种不同形式如多项式、直接线性变换以及有理函数等来表示。用经验传感器模型代替严格成像几何模型最早应用在美国的军事部门中,目前一些高分辨率商业遥感卫星(如 IKONOS 等)使用的就是有理多项式模型(Rational Polynomial Camera Models, RPC)。尽管 RPC 理论在十几年前就已经出现,但 RPC 的应用较少,相关研究也不多,直到 IKONOS 卫星成功发射以后才受到普遍关注并推动了对其全面的研究。国际摄影测量与遥感学会已成立专门工作组研究有关 RPC 的精度、稳定性等。

近几年,西方发达国家在遥感影像星地直接定位技术方面已取得了重要突破。美国的 IKONOS 和 QuickBird 高分辨率卫星采用星载全球定位系统(Global Positioning System, GPS)和星敏传感器确定传感器空间位置和姿态,在无地面控制情况下,对地面目标的定位精度可达 10~15m;法国的 SPOT-5 卫星利用 DORIS 系统测定卫星的轨道参数, X、Y、Z 位置精度均优于 5cm,制作正射影像可达到实地上 15m 的精度。利用控制点影像库进行卫星遥感影像的精确几何纠正已成为一种成熟的技术,核心问题仍是影像的自动匹配,目前国际上的水平已经能够实现全自动处理。

值得关注的是,日以数亿计的海量遥感数据获取与遥感应用之间的差距使得遥感预处理技术的实时性逐渐得到重视。实时性在国外军用图像处理系统中表现得特别突出,如美国海军联合部队图像处理系统设计时特别强调了实时性,包括实时和准实时的图像接收以及快速的信息利用和分发。因此,这些系统设计时采用了多项技术满足信息处理的快速综合要求,如软硬件集成加速技术,以及软件图像处理快速算法。但由于军事的保密性,这些硬件的集成加速技术在实现细节上没有详细的描述。

2. 高性能遥感影像计算

数字传感器和多视点摄影的数据量急剧增加,使得快速自动处理成为遥感影像计算的新瓶颈。传统遥感图像处理工作站无法处理应急响应中的非常规影像数据,并且基于单机的串行数据处理流程和作业模式已极大地束缚了航空航天遥感测绘的生产效率,难以满足海量遥感影像快速处理和应急响应的需求。

遥感影像数据处理技术的进步主要表现在定标校正、自动识别、三维量测、信息提取以及海量数据的并行处理等方面。遥感影像的三维量测已经实现了全自动化。从空中三角测量、数字高程模型到数字正射影像的全过程,几乎都可利用计算机视觉方法替代人的手眼操作,实现全自动化。同时,遥感影像高性能处理的巨大需求也促进了遥感影像高性能处理技术的发展,目前已有包括美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、美国马里兰大学遥感信号与图像处理实验室、法国 InfoTerra 公司、中国科学院计算技术研究所、国防科学技术大学、武汉大学、中国测绘科学研究院等国内外知名研究机构和企业开展了此领域的研究与开发工作,设立了相关的研究与开发项目。高性能网格计算已成为解决海量遥感影像数据并行快速实时处理的有力手段,是新一代遥感数据处理的发展趋势。

国际上高性能遥感数据处理系统的典型代表是由法国 InfoTerra 公司研制的像素工厂(ISTAR Pixel FactoryTM)系统。像素工厂的输入为多源遥感数据,可以是航空数据、高分辨率光学卫星数据和雷达数据等,经过集群并行处理,快速输出各级数据产品。该遥感数据处理系统采用计算机集群系统为其硬件处理平台,并在该集群硬件平台上开发了适合遥感数据大规模并行处理功能和算法,提供了遥感数据处理任务管理与调度功能,使得这个遥感集群处理系统相对于单机遥感处理系统,性能有了极大的提高,主要表现在多任务支持、处理吞吐量、可靠性强和集中式管理等。

国内类似的产品之一是由武汉大学研制的数字摄影测量网格(Digital Photogrammetry Grid, DPGrid)(张祖勋等,2009)。DPGrid 打破了传统的摄影测量流程,集生产、质量检测、管理为一体,合理地安排人、机的工作,充分应用当前先进的数字影像匹配、高性能并行计算、海量存储与网络通信等技术,实现航空航天遥感数据的自动快速处理和空间信息的快速获取,正射影像生产效率大幅提高,大大缩短地图更新周期。该系统已经推广应用于国家基础测绘、城市基础地理信息动态更新、国土资源调查和应急测绘等各个领域。

3. 遥感影像智能解译

随着遥感科学技术的发展,各种新型的高空间、高光谱、高动态遥感卫星可以对地球进行多尺度、多层次、多角度、多谱段地连续观测,源源不断地提供丰富的数据源,大大地扩展了可供利用的信息源。然而,当前常规的遥感处理理论和方法基本上是遵循了数理统计分析的理论模式,所能处理的数据量十分有限,自动化和智能化水平不高,已不能满足处理海量遥感影像数据的需求。如何快速有效地自动提取和解译地物目标信息已成为遥感科学领域迫切需要解决的科学问题,需要结合测绘、遥感、计算机、地理以及电子等科学技术手段进行综合研究。