

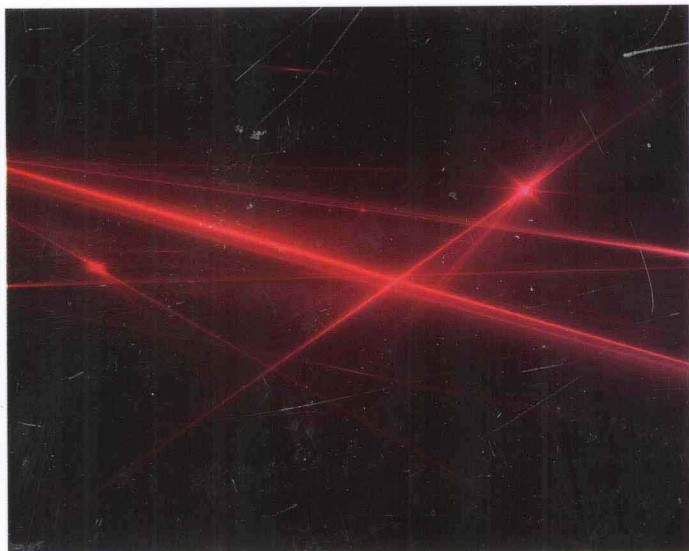
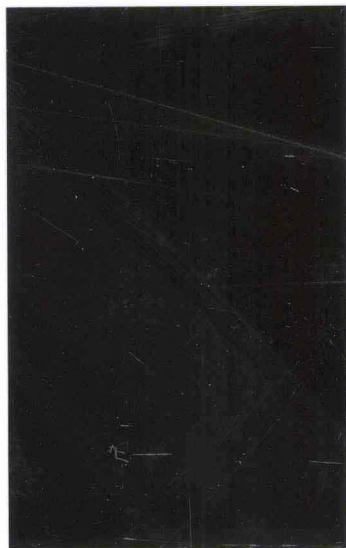


国防科技图书出版基金

Processing Techniques of Hyperspectral Imagery

高光谱图像 处理技术

王立国 赵春晖 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

高光谱图像处理技术

Processing Techniques of Hyperspectral Imagery

王立国 赵春晖 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

高光谱图像处理技术/王立国,赵春晖著. —北京:
国防工业出版社,2013. 5
ISBN 978-7-118-08646-1

I. ①高... II. ①王... ②赵... III. ①遥感图象-图
象处理-研究 IV. ①TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 047353 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷责任有限公司
新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17 字数 311 千字
2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 陆 军 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

随着现代科学技术的迅猛发展,高光谱遥感科学作为一门综合性的高新技术,在理论、技术和应用上都得到了广泛而长足的发展。高光谱遥感同时利用空间图像和光谱特征来获取地物信息,实现了图谱合一,为人类认识世界和改造世界提供了强有力的技术支持。目前,高光谱遥感已广泛地应用到军事、农业、森林、草地、海洋、地质、生态等领域。近年来,国际上遥感类 SCI 期刊的数量和影响因子均有增长,专门针对高光谱的国际学术会议也在相继出现。

高光谱图像处理技术的发展程度直接决定了信息获取和利用的程度。我国十分重视该项技术的发展,“863”、“973”发展计划和国家自然科学基金等领域对其支持的力度越来越大,全国各高校和科研院所投入的人力越来越多,取得的成果也越来越丰富。但这一现状仍无法满足学者对于该技术的广度和深度需求。本书结合著者多年从事相关技术的研究,将高光谱图像的主要处理技术,即分类、端元提取、光谱解混、亚像元定位、超分辨率复原、异常检测、降维压缩等较新的研究成果进行了系统的整理和详尽的阐释,旨在为读者了解、学习和研究高光谱图像处理技术贡献微薄之力。

全书共分 9 章。第 2~6 章主要由王立国执笔完成,内容涵盖分类、端元选择、光谱解混、亚像元定位以及超分辨率复原等高光谱图像处理技术,是该著者多年取得的研究成果,希望这些内容在思想或方法上能够为读者提供些许借鉴或启发。第 1 章及第 7~9 章主要由赵春晖执笔完成,其中,第 7、8 章是该著者近年来取得的创新性成果。为了便于读者对高光谱图像的原理、现状和主要处理技术有一个全面的了解,本书特别增加了第 1、9 章内容。第 1 章首先对高光谱遥感的基本理论进行了简单的介绍,主要参考了童庆禧和孙家柄等人的相关作品;进而对高光谱各种典型、主流的处理技术进行了系统的介绍,参考了国内外大量的学术文献。第 9 章则对高光谱遥感技术的应用加以简介,这些内容主要参考了国内该领域学者公开发表的文章。需要说明的是,由于本书主体部分即第 2~8 章是以著者主创内容为行文基础,因此相

关技术的现状及评述主要在第1章中加以简单介绍;另一方面,各知识点先后顺序的确定是考虑了它们之间的前后包含关系,而不是完全依从图像处理角度上的前后次序关系而设计。

第2、3、4章内容的部分工作是第一著者在哈尔滨工业大学读博期间在张晔教授的指导下完成的,因此该著者对于自己的母校和导师表示特别感谢。同时第4章的部分内容是与新南威尔士大学贾秀萍博士合作完成的,对于她的辛勤付出和严谨治学精神表示真诚的感谢和敬意。第5章内容为第一著者与其研究生共同完成,第7、8章内容为第二著者与其研究生共同完成。著者的许多研究生参与了部分内容的研究或整理工作,主要包括刘丹凤(首届研究生国家奖学金获得者)、王群明(黑龙江省优秀硕士学位论文获得者)、刘春红、梅锋、尤佳、张凌燕、张晶(黑龙江省优秀硕士学位论文获得者)、季亚新、胡春梅、邓禄群(哈尔滨工程大学优秀硕士学位论文获得者)、赵妍、孙丽娟、张文升、吴国峰、魏芳杰(首届研究生国家奖学金获得者)、肖倩、石瑶、王正艳、谭健、王琼、赵亮、杨京辉、郝思源、孟凡旺、孙杰,等等,这里向他/她们表示感谢。这里也对本书所参考文献的作者表示衷心感谢,特别感谢本书所重点援引参考文献的全体作者,其中第一作者包括童庆禧、浦瑞良、孙家柄、李二森、刘春红、任武、凌峰、万建伟、滕安国、谭炳香、周磊、娄全胜、裴承凯、杨燕杰、张朝阳,等等,同时感谢国际相关领域的众多专家学者们,他/她们的优秀成果为本书的编写提供了良好的素材。对于以上文献所引用的文献,由于数量众多及篇幅所限,本书未再作进一步注释,这里向相关作者表示歉意。

由于著者水平有限,以及研究内容时间跨度大、编程软硬件条件差异大、涉及研究人员多等实际问题,第2~8章的主体技术内容难免存在各种层面上的问题,第1、9章的内容也难以做到对主流技术、典型应用做出最合理、最科学的编排,所作评述也仅能代表一家之辞。衷心希望读者批评指正和不吝赐教,著者将在后续的工作中进一步完善。

著者

2013年1月1日

目 录

第 1 章 高光谱遥感基本理论及主要处理技术	1
1.1 高光谱遥感基本理论	1
1.1.1 遥感电磁波理论基础	1
1.1.2 太阳辐射与物质的相互作用	2
1.1.3 成像光谱仪及其成像方式	2
1.1.4 高光谱图像的数据特点	5
1.2 高光谱图像分类技术	7
1.2.1 监督分类与非监督分类	7
1.2.2 参数分类与非参数分类	9
1.2.3 确定性分类与非确定性分类	10
1.2.4 其他分类方法	10
1.3 高光谱图像端元选择技术	11
1.4 高光谱图像光谱解混技术	13
1.4.1 非线性模型	14
1.4.2 线性模型	14
1.4.3 线性模型的多端元模式	18
1.5 高光谱图像亚像元定位技术	18
1.5.1 基于空间相关性的亚像元定位	20
1.5.2 基于空间地统计学的亚像元定位	21
1.5.3 基于神经网络的亚像元定位	22
1.5.4 基于像元交换的亚像元定位	23
1.6 高光谱图像超分辨率技术	25
1.7 高光谱图像异常检测技术	27
1.8 高光谱图像降维与压缩技术	29
1.8.1 关于降维:波段选择与特征提取	29
1.8.2 关于压缩:有损压缩与无损压缩	32

参考文献	33
第2章 高光谱图像分类技术	34
2.1 典型分类方法	34
2.2 典型评价准则	36
2.3 SVM 分类方法	37
2.3.1 理论基础	38
2.3.2 分类原理	39
2.3.3 最简多类分类器的构造	45
2.3.4 最小二乘 SVM 及其 SMO 优化算法	48
2.3.5 三重加权分类方法	50
2.4 SVM 分类性能的评价	54
2.4.1 基本 SVM 分类性能评价	55
2.4.2 最简多类分类器性能评价	56
2.4.3 三重加权分类性能评价	57
2.5 本章小结	59
参考文献	59
第3章 高光谱图像光谱端元选择技术	61
3.1 N - FINDR 光谱端元选择算法	61
3.1.1 相关理论介绍	61
3.1.2 N - FINDR 算法	63
3.2 基于距离尺度的快速 N - FINDR 算法	64
3.2.1 距离尺度替换体积尺度	65
3.2.2 基于 PPI 思想的数据排序	66
3.2.3 复杂性分析和效率评价	67
3.3 基于线性 LSSVM 的距离测算	67
3.4 光谱端元选择的鲁棒性方法	68
3.4.1 预处理阶段:鲁棒协方差矩阵的获取	69
3.4.2 光谱端元选择阶段:野值点的去除	70
3.5 性能评价	71
3.5.1 基于距离尺度的快速 N - FINDR 算法	71
3.5.2 鲁棒性评价	72
3.6 快速 N - FINDR 算法的两个应用	76

3.6.1 构建 LSMM 新的求解算法	76
3.6.2 构建快速无监督波段选择算法	77
3.7 本章小结	80
参考文献	81
第4章 高光谱图像光谱解混技术	82
4.1 基于 LSMM 的 LSMA 方法	82
4.2 全约束 LSMA 的两种新型求解方法	84
4.2.1 迭代求解中的参量替换方法	84
4.2.2 几何求解方法	85
4.3 基于 LSVM 的光谱解混原理	88
4.3.1 LSVM 与 LSMM 的解混等效性证明	88
4.3.2 LSVM 解混的独特优势	89
4.4 结合空间信息的光谱解混方法	90
4.5 带有解混残差约束条件的 SVM 光谱解混模型	92
4.5.1 基于原始 LSSVM 的光谱解混	92
4.5.2 基于解混残差约束 LSSVM 的解混模型的建立及其闭式解 的推导	94
4.5.3 新模型中单端元替换为多端元的方法	96
4.6 性能评价	97
4.6.1 基本 SVM 光谱解混性能评价	97
4.6.2 鲁棒性加权 SVM 解混评价	99
4.6.3 结合空谱信息的解混方法评价	101
4.6.4 带有解混误差约束的新型 SVM 解混模型的性能评价	103
4.7 光谱解混的模糊精度评价方法	105
4.7.1 模糊精度评价方法	105
4.7.2 模糊精度评价方法在具体实验中的应用	108
4.8 本章小结	113
参考文献	113
第5章 高光谱图像亚像元定位技术	115
5.1 基于 LSSVM 的线性特征地物亚像元定位技术	117
5.1.1 基于 LSSVM 的亚像元定位技术	117
5.1.2 人工合成训练样本的方法	119

5.2	基于空间引力模型的亚像元定位方法	121
5.2.1	基于修正的亚像元/像元空间引力模型的亚像元定位	121
5.2.2	基于混合空间引力模型的亚像元定位	124
5.3	结合 MRF 和亚像元位移遥感影像的亚像元定位	128
5.3.1	基于 MRF 的亚像元定位	128
5.3.2	结合 MRF 和亚像元位移遥感影像的亚像元定位	131
5.4	性能评价	134
5.4.1	基于 LSSVM 的线性特征地物亚像元定位	134
5.4.2	MSPSAM 和 MSAM	137
5.4.3	结合 MRF 和亚像元位移遥感影像的亚像元定位	142
5.5	本章小结	145
	参考文献	146
第 6 章	高光谱图像超分辨率技术	148
6.1	基于 POCS 算法的超分辨率复原	148
6.1.1	POCS 基本理论	148
6.1.2	基于 POCS 算法的超分辨率复原	150
6.2	基于 MAP 算法的超分辨率复原	153
6.2.1	MAP 基本理论	153
6.2.2	基于 MAP 算法的超分辨率复原	156
6.3	单谱段图像的分辨率提高方法	157
6.3.1	几何对偶模型的建立与插值方法	157
6.3.2	混合插值方法	160
6.4	性能评价	162
6.4.1	POCS 和 MAP 超分辨率方法	162
6.4.2	对偶性插值方法	166
6.5	本章小结	170
	参考文献	171
第 7 章	高光谱图像异常检测技术	172
7.1	基于形态学理论的核检测算法	172
7.1.1	基于形态学的波段选择	172
7.1.2	基于形态学的核 RX 算法	175
7.2	自适应核异常检测算法	177

7.2.1	支持向量数据描述方法	178
7.2.2	自适应核异常检测算法	180
7.3	核异常检测中光谱相似度量核的构造	185
7.3.1	高斯径向基核的局限性	185
7.3.2	光谱相似度量核函数	186
7.4	性能评价	189
7.4.1	基于形态学的核检测算法效果验证	189
7.4.2	自适应核异常检测算法效果验证	192
7.4.3	基于光谱相似度量核的异常检测算法效果验证	195
7.5	其他异常检测算法简介	199
7.5.1	基于空域滤波的核 RX 高光谱异常检测算法	199
7.5.2	基于多层窗口分析的核检测算法	201
7.6	本章小结	205
	参考文献	205
第 8 章	高光谱图像降维及压缩技术	207
8.1	降维技术	207
8.1.1	基于 SVM 的波段选择	207
8.1.2	典型端元选择方法在波段选择中的应用	211
8.1.3	仿真实验	213
8.2	压缩技术	215
8.2.1	基于矢量量化的压缩算法	215
8.2.2	基于提升格式的压缩算法	219
8.3	本章小结	224
	参考文献	225
第 9 章	高光谱遥感应用简介	226
9.1	农业	226
9.1.1	小麦	226
9.1.2	水稻	227
9.1.3	大豆	227
9.1.4	玉米	228
9.2	森林	228
9.2.1	森林调查	228

9.2.2	森林生化组成与森林健康状态	230
9.2.3	森林灾害	231
9.2.4	外来物种监测	232
9.3	草地	232
9.3.1	草地生物量估算	232
9.3.2	草地种类识别	233
9.3.3	草地化学成分估测	234
9.4	海洋	235
9.4.1	海洋遥感中的基础研究	235
9.4.2	海洋与海岸带资源环境监测中的应用研究	236
9.4.3	国际相关发展动态	236
9.5	地质	237
9.5.1	岩矿识别	237
9.5.2	资源勘查	238
9.6	环境	241
9.6.1	大气污染监测	241
9.6.2	土壤侵蚀监测	241
9.6.3	水环境监测	242
9.7	军事	242
	参考文献	244
附录 1	本书主要符号及缩写说明	245
附录 2	著者主要相关文章	246

Contents

Chapter 1 Basic Theory and Main Processing Techniques of Hyperspectral Remote Sensing	1
1.1 Basic Theory of Hyperspectral Remote Sensing	1
1.1.1 Theory of Remote Electromagnetic Wave	1
1.1.2 Interaction of Solar Radiation and Materials	2
1.1.3 Imaging Spectrometer and Spectral Imaging Modes	2
1.1.4 Imaging Characteristics of HSI	5
1.2 Classification Technique of HSI	7
1.2.1 Supervised Classifications and Unsupervised Classifications	7
1.2.2 Parameter Classifications and Nonparameter Classifications	9
1.2.3 Crisp Classifications and Fuzzy Classifications	10
1.2.4 Other Classification Methods	10
1.3 Endmember Extraction Technique of HSI	11
1.4 Spectral Unmixing Technique of HSI	13
1.4.1 Nonlinear Model	14
1.4.2 Linear Model	14
1.4.3 Multi-endmember Mode of Linear Model	18
1.5 Sub-pixel Mapping Technique of HSI	18
1.5.1 Spatial Correlation-Based Sub-pixel Mapping	20
1.5.2 Spatial Geostatistics-Based Sub-pixel Mapping	21
1.5.3 Neural Networks-Based Sub-pixel Mapping	22
1.5.4 Pixel-swapping Strategy	23
1.6 Super-resolution Technique of HSI	25
1.7 Anomaly Detection Technique of HSI	27
1.8 Dimensionality Reduction and Compression Technique of HSI	29
1.8.1 About Dimensionality reduction Band selection and Feature Extraction	29
1.8.2 About Compression; Loss compression and Lossless compression	32

References	33
Chapter 2 Classification Technique of HSI	34
2. 1 Typical Classification Methods	34
2. 2 Typical Assessment Criteria	36
2. 3 SVM-Based Classification Method	37
2. 3. 1 Theory Foundation	38
2. 3. 2 Classification Principle	39
2. 3. 3 Construction of the Simplest Structure of Multi-class Classifier	45
2. 3. 4 Least Squares SVM and Its SMO Optimation Algorithm	48
2. 3. 5 Triply Weighted Classification Method	50
2. 4 Performance Assessment for SVM-Based Classification	54
2. 4. 1 Performance Assessment for Original SVM-Based Classification	55
2. 4. 2 Performance Assessment for Multi-class Classifier with the Simplest Structure	56
2. 4. 3 Performance Assessment for Triply-weighted Classification	57
2. 5 Chapter Conclusions	59
References	59
Chapter 3 Endmember Extraction Technique of HSI	61
3. 1 Endmember Extraction Method: N-FINDR	61
3. 1. 1 Introduction of Related Theory	61
3. 1. 2 N-FINDR Algorithm	63
3. 2 Distance Measure-Based Fast N-FINDR Algorithm	64
3. 2. 1 Substituting Distance Measure for Volume One	65
3. 2. 2 PPI Concept-Based Pixel Indexing	66
3. 2. 3 Complexity Analysis and Efficiency Assessment	67
3. 3 Linear LSSVM-Based Distance Calculation	67
3. 4 Robust Method in Endmember Extraction	68
3. 4. 1 In Preprocessing Stage: Obtaining of Robust Covariance Matrix	69
3. 4. 2 In Endmember Extraction Stage: Delection of Outliers	70
3. 5 Performance Assessment	71
3. 5. 1 Distance Measure-Based Fast N-FINDR Algorithm	71
3. 5. 2 Rubostness Assessment	72
3. 6 Two Applications of Fast N-FINDR Algorithm	76
3. 6. 1 Construction of New Solving Algorithm for LSMM	76

3.6.2	Construction of Fast and Unsupervised Band Selection Algorithm	77
3.7	Chapter Conclusions	80
	References	81
Chapter 4	Spectral Unmixing Technique of HSI	82
4.1	LSMM-Based LSMA Method	82
4.2	Two New Solving Methods for Full Constrained LSMA	84
4.2.1	Parameter Substitution Method in Iteration Solving Method	84
4.2.2	Geometric Solving Method	85
4.3	The Principle of LSVM-Based Spectral Unmixing	88
4.3.1	Equality Proof of Linear SVM and LSMM for Spectral Unmixing	88
4.3.2	The Unique Superiority of LSVM-Based Unmixing	89
4.4	Spatial-spectral Unmixing Method	90
4.5	SVM Spectral Unmixing Model with Unmixing Residue Constraints	92
4.5.1	Original LSSVM-Based Spectral Unmixing	92
4.5.2	Construction of Spectral Unmixing Model Based on Unmixing Residue Constrained LSSVM and Derivation of Its Closed form Solution	94
4.5.3	Substituting Multiple Endmembers for Single One in the New Model	96
4.6	Performance Assessment	97
4.6.1	Performance Assessment for Original SVM-Based Spectral Unmixing	97
4.6.2	Assessment on Robust Weighted SVM-Based Unmixing	99
4.6.3	Assessment on Spatial-spectral Unmixing Method	101
4.6.4	Performance Assessment on New SVM Unmixing Model with Unmixing Residue Constraints	103
4.7	Fuzzy Method of Accuracy Assessment of Spectral Unmixing	105
4.7.1	Fuzzy Method of Accuracy Assessment	105
4.7.2	The Application of Fuzzy Accuracy Assessment Method in Experiments	108
4.8	Chapter Conclusions	113
	References	113
Chapter 5	Sub-pixel Mapping Technique of HSI	115
5.1	Sub-pixel Mapping for Land Class with Linear Features Using	