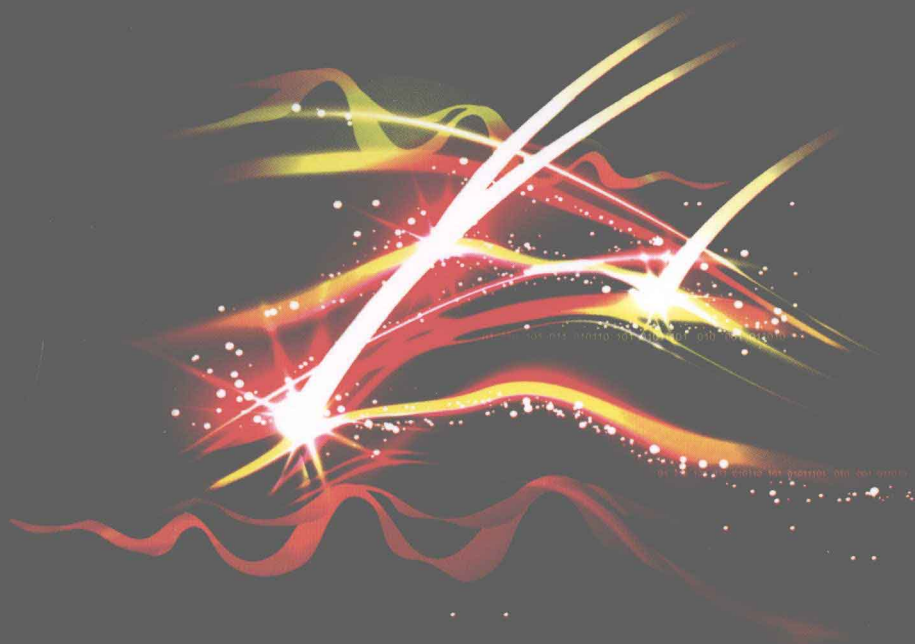


*Applied Compression of Hyperspectral
Remote Sensing Images*

实用高光谱 遥感图像压缩

万建伟 粘永健 苏令华 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

实用高光谱遥感 图像压缩

Applied Compression of
Hyperspectral Remote Sensing Images

万建伟 粘永健 苏令华 著
李纲 辛勤 程翥

国防工业出版社

·北京·

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 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰
副主任委员 宋家树 蔡 镛 杨崇新
秘 书 长 杨崇新
副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明
委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴
刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁
李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生
吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠
陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起
崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

高分辨率对地观测已经成为世界各国在航天领域竞争的焦点。遥感作为对地观测的主要实现手段,经过几十年的发展,已经从最初的全色遥感阶段发展到多光谱遥感和高光谱遥感阶段。高光谱遥感的光谱分辨率达到纳米量级,在可见光到近红外光谱区间的波段数多达数十到数百个。较高的光谱分辨率使得高光谱图像能够提供更为精细的地物细节信息,在地质调查、矿床探测、精细农业、海洋遥感、环境与灾害监测以及军事侦察等领域得到了广泛应用。在高光谱遥感技术发展过程中,随着光谱分辨率和空间分辨率的不断提高,成像光谱仪获取的数据量急剧膨胀,给数据的存储和传输带来了巨大的压力。当前,高光谱遥感已经发展到以“航天高光谱遥感”为主的阶段,一系列装载有高光谱成像仪的民用卫星相继发射成功,同时,军用卫星上携带高光谱成像仪的趋势也在快速增长。对于卫星数据链路,日益增长的数据量给星载压缩系统的数据存储与传输带来了负担,对高光谱图像压缩算法的性能提出了较高的要求。

高光谱图像的压缩技术已经成为遥感领域研究的热点问题,受到了世界各国学者的广泛关注。在静止图像压缩领域,已经制订了统一的国际压缩标准,而在高光谱图像压缩领域,还未形成一个成熟的压缩标准。目前,对于我国星载多光谱或高光谱图像的压缩,均未考虑波段之间的相关性,压缩性能较低,无法有效减小数据的传输带宽。总体看来,高光谱图像压缩技术仍处于理论研究阶段,离实用化还有很长的路要走。

高光谱图像压缩技术可以分为无损压缩和有损压缩,具体的压缩方式需要根据特定的后续应用进行选取。此外,针对高光谱图像的各种特定应用,如何在压缩过程中尽可能保护图像中的重要信息是一个亟待解决的难题,这也是本书探讨的主要方面。本书内容是作者在该领域多年研究的成果总结,全书共分为6章,按照无损压缩、质量评估以及有损压缩的思路安排各章顺序。第一章为绪论,主要介绍了高光谱遥感的基本概念以及国内外关于高光谱图像压缩技术的研究进展情况。第二章至第六章分别介绍作者在高光谱图像压缩方面所做的工作,其中第二章介绍了基于光谱分类的高光谱图像无损压缩;第三章介绍了基于分布式信源编码的高光谱图像无损压缩;第四章介绍了有损压缩条件下的高光谱图像质量评估;第五章介绍了基于独立分量分析的高光谱图像有损压缩;第六章介绍了基于感兴趣区域编码的高光谱图像有损压缩。

本书主要由国防科技大学万建伟教授、粘永健博士以及空军工程大学苏令华博士共同完成。在本书的写作过程中,实验室的王展教授、李纲副教授、辛勤副教授与程翥副教授给予了大力支持,提供了很多富有建设性的意见和建议,研究生汤毅、何密、黄兵超、袁晓东与程普做了大量工作,重庆通信学院的吴乐华教授审阅了部分章节,在此,对他们的辛勤工作深表感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

万建伟

2011年11月于国防科技大学

目 录

第一章 绪论	1
1.1 高光谱遥感技术简介	2
1.2 高光谱图像压缩的必要性	5
1.3 高光谱图像压缩技术研究进展	7
1.3.1 高光谱图像无损压缩研究进展	8
1.3.2 高光谱图像有损压缩研究进展	16
第二章 基于光谱分类的无损压缩	21
2.1 高光谱图像的相关性分析	22
2.1.1 高光谱图像的谱间相关性	22
2.1.2 高光谱图像的空间相关性	25
2.2 高光谱图像压缩的预处理	28
2.2.1 非监督分类	28
2.2.2 波段排序	33
2.3 预测器设计	36
2.3.1 单波段、13 个同类邻点预测	37
2.3.2 多预测器框架	47
第三章 基于分布式信源编码的无损压缩	57
3.1 分布式信源编码简介	58
3.1.1 熵的概念	59
3.1.2 DSC 的理论基础	60
3.1.3 DSC 的实现	62
3.2 基于 DSC 的高光谱图像无损压缩	67

3.3	实验结果	74
第四章	高光谱图像有损压缩的质量评估	78
4.1	图像质量评估研究进展	79
4.1.1	失真参数标准	80
4.1.2	统计衡量标准	85
4.1.3	敏感度相似的失真参数组合提取	86
4.1.4	图像质量评估发展趋势	87
4.2	基于最优性能的图像质量评估	88
4.2.1	光谱相似度量	89
4.2.2	基于最优性能的质量评估	90
4.2.3	有损压缩方法	91
4.2.4	实验结果	93
4.2.5	实验结论	95
4.3	基于参数提取的图像质量评估	96
4.3.1	基于 C-means 聚类统计的性能评估	97
4.3.2	失真参数提取性能评估	98
4.4	高速数据压缩设备测试系统	102
4.4.1	系统功能	102
4.4.2	系统的主要技术指标	103
4.4.3	系统的实现方案	104
4.4.4	系统可扩展性分析	110
第五章	基于独立分量分析的有损压缩	112
5.1	ICA 简介	113
5.2	RVEIS-STD 算法	114
5.2.1	虚拟维数及其估计	115
5.2.2	非监督端元提取及 FastICA 初始化	119
5.2.3	VD 的修正	122
5.3	实验结果	124
5.3.1	改进的 CEM 算子	124

5.3.2	实验一	127
5.3.3	实验二	139
第六章	基于感兴趣区域编码的有损压缩	147
6.1	VEMICM	149
6.1.1	目标探测	149
6.1.2	CFAR 检测	153
6.1.3	目标区域的获取	155
6.1.4	感兴趣区域描述	156
6.2	感兴趣区域编码	157
6.2.1	感兴趣区域系数的位移	157
6.2.2	小波域感兴趣区域掩膜	159
6.3	高光谱图像感兴趣区域编码	161
6.3.1	高光谱图像的 KLT	162
6.3.2	主分量的选取	165
6.3.3	码率分配策略	167
6.4	实验结果	169
6.4.1	实验一	169
6.4.2	实验二	179
参考文献	185

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction of Hyperspectral Remote Sensing	2
1.2 Necessity of Compression of Hyperspectral Images	5
1.3 Progress of Compression Technology of Hyperspectral Images	7
1.3.1 Progress of Lossless Compression of Hyperspectral Images	8
1.3.2 Progress of Lossy Compression of Hyperspectral Images	16
Chapter 2 Lossless Compression Based on Spectral Classification	21
2.1 Correlation Analysis of Hyperspectral Images	22
2.1.1 Spectral Correlation of Hyperspectral Images	22
2.1.2 Spatial Correlation of Hyperspectral Images	25
2.2 Pretreatment of Hyperspectral Image Compression	28
2.2.1 Unsupervised Classification	28
2.2.2 Bands Reordering	33
2.3 Design of Predictors	36
2.3.1 Prediction with Thirteen Adjacent Pixels of the Same Class in Single Band	37

2.3.2	Multi – predictors Scheme	47
Chapter 3	Lossless Compression Based on Distributed	
	Source Coding	57
3.1	Introduction of Distributed Source Coding	58
3.1.1	Conception of Entropy	59
3.1.2	Academic Foundation of Distributed Source Coding	60
3.1.3	Realization of Distributed Source Coding	62
3.2	Lossless Compression of Hyperspectral Images Based on DSC	67
3.3	Experimental Results	74
Chapter 4	Quality Assessment of Lossy Compression of	
	Hyperspectral Images	78
4.1	Research Progress of Quality Assessment of Hyperspectral Images	79
4.1.1	Distortion Parameters Standards	80
4.1.2	Statistical Measurement Standards	85
4.1.3	Extraction of Distortion Parameters with Similar Sensitivity	86
4.1.4	Development Trends of Quality Assessment	87
4.2	Quality Assessment Based on Optimal Performance	88
4.2.1	Spectral Similarity Measurement	89
4.2.2	Quality Assessment Based on Optimal Performance	90
4.2.3	Lossy Compression Methods	91
4.2.4	Experimental Results	93
4.2.5	Experimental Conclusion	95
4.3	Quality Assessment Based on Parameter	

Extraction	96
4.3.1 Performance Assessment Based on Statistic of C – means Clustering	97
4.3.2 Performance Assessment Based on Distortion Parameter Extraction	98
4.4 Testing System of High Speed Data Compression Device	102
4.4.1 Functions of the System	102
4.4.2 Main Technical Specifications of the System	103
4.4.3 Realization Scheme of the System	104
4.4.4 Expandability Analysis of the System	110
Chapter 5 Lossy Compression Based on Independent Component Analysis	112
5.1 Introducion of ICA	113
5.2 RVEIS – STD	114
5.2.1 Virtual Dimension and its Estimation	115
5.2.2 Unsupervised Endmember Extraction and FastICA Initialization	119
5.2.3 Correction of VD	122
5.3 Experimental Results	124
5.3.1 Modified CEM Operator	124
5.3.2 Experiment 1	127
5.3.3 Experiment 2	139
Chapter 6 Lossy Compression Based on Coding of Region of Interest	147
6.1 VEMICM	149
6.1.1 Target Detection	149
6.1.2 CFAR Dectection	153
6.1.3 Acquisition of Target Area	155

6.1.4	Description of Region of Interest	155
6.2	Coding of Region of Interest	157
6.2.1	Shift of Coefficients of Region of Interest	157
6.2.2	Mask of Region of Interest in Wavelet Domain	159
6.3	Coding of Region of Interest of Hyperspectral Images	161
6.3.1	KLT of Hyperspectral Images	162
6.3.2	Selection of Principle Components	165
6.3.3	Strategy of Rate Allocation	167
6.4	Experimental Results	169
6.4.1	Experiment 1	169
6.4.2	Experiment 2	179
References		185

第一章 绪 论

自 20 世纪 90 年代以来,高分辨率对地观测技术得到了迅猛发展,实现了空中对地表的全方位和多角度的监测,成为了当今世界各国在航空航天领域竞争的焦点之一。高分辨率对地观测技术使得人们研究地球表面信息的能力由陆地延伸到空中,极大地拓宽了人类的视野。目前,高分辨率对地观测主要依靠遥感(Remote Sensing)技术实现。遥感是 20 世纪 60 年代发展起来的一项综合对地观测技术,该项技术能够不直接接触目标、区域或现象而获取相关数据,并加以分析以获得所需的信息^[1]。遥感技术是以电磁辐射理论为基础,同时涉及电磁波理论、光谱学、物理学、光学、地理学、地质学以及海洋科学等众多学科^[2]。目前,遥感作为人类获取信息的重要手段,已经在民用和军用的各个领域得到了广泛应用,并成为当今重要的科技领域之一。

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)、激光雷达(Light Detection And Ranging, LIDAR)以及高光谱遥感(Hyperspectral Remote Sensing, HRS)是最具发展前景的三种遥感信息获取技术^[3]。根据遥感探测方式的不同,可以将遥感分为主动遥感与被动遥感两种方式^[4],其中激光雷达和合成孔径雷达属于主动遥感,而高光谱遥感属于被动遥感,这里主要关注高光谱遥感技术。

高光谱遥感是 20 世纪 80 年代初期发展起来的,它能够将确定物质或地物性质的光谱与把握其空间和几何关系的图像革

命性地结合在一起^[5],在很大程度上提高了人们认知客观世界的的能力。目前,高光谱遥感已经发展成遥感领域的前沿技术,受到了世界各国遥感学者甚至政府部门的高度关注。高光谱遥感具有光谱连续的特点,光谱分辨率极高,使得获取的数据能够提供丰富的地物细节,在海洋遥感、植被研究、地质勘探、大气和环境遥感以及军事侦察等方面获得了广泛应用。可以说,“在遥感的发展史上,高光谱遥感的出现是遥感在概念和技术上的一次重大飞跃”^[2]。

目前,高光谱遥感朝着高空间分辨率、高光谱分辨率以及高时间分辨率的“三高”方向发展^[6],与传统遥感相比,随着这三种分辨率的不断提高,所获取的数据量呈指数量级增加。目前,高光谱遥感正由以“航空系统”为主转向以“航空航天系统”为主的发展阶段。在其发展过程中,一个突出问题就是数据量过大,尤其对于卫星数据链路,庞大的数据量已经给数据的存储与传输带来巨大压力,信息获取和数据传输之间的矛盾日益加剧。针对高光谱图像的压缩算法仍停留在理论研究阶段,还未形成一个成熟的压缩标准在实际中得以应用,低效的数据压缩技术在一定程度上阻碍了高光谱遥感技术的发展,因此,研究高效实用的高光谱数据压缩技术具有重要的理论与实际应用价值。

1.1 高光谱遥感技术简介

遥感技术最初是以全色、彩色以及光谱扫描为主。20世纪80年代出现的成像光谱技术能够在电磁波谱的紫外、可见光、近红外和中红外区域,获取许多非常窄且光谱连续的图像数据,这一技术的出现使得遥感技术进入了高光谱遥感时代^[2]。高光谱遥感能够利用很多较窄的电磁波波段从感兴趣的物体中获取相关数据,实现了遥感技术光谱分辨率的突破性提高。一般

认为,光谱分辨率在 $10^{-1}\lambda$ (λ 为波长) 范围内的遥感称为多光谱遥感;光谱分辨率在 $10^{-2}\lambda$ 范围内的遥感称为高光谱遥感;光谱分辨率达到 $10^{-3}\lambda$ 时为超高光谱遥感^[7]。多光谱遥感在可见光和近红外光谱区间仅有几个波段,而高光谱遥感波段数量较多,在可见光与近红外区域的光谱通道数通常多达数十个甚至数百个,而且各光谱通道间往往是连续的,如图 1.1 所示。

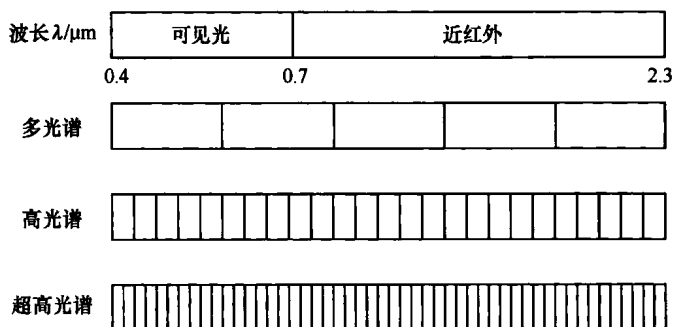


图 1.1 成像光谱技术的分类

高光谱遥感器在空间成像的同时,在光谱维方向上能够连续记录下几十或者成百的光谱通道数据,这些光谱通道数据具有相同的空间分辨率,它们共同构成了一个高光谱数据立方体。高光谱数据立方体是将高光谱数据表示为光谱信息集,它是在二维空间的基础上增加了一维光谱信息,从而形成了三维的空间坐标。成像光谱技术将传统的遥感成像技术与光谱技术进行了有机结合,从高光谱数据立方体的每个像元均可提取一条连续的光谱曲线,如图 1.2 所示^[2]。不同的地物对应不同的光谱特征,其光谱曲线也就存在着一定的差异。高光谱遥感器能够以完整的光谱曲线记录所观测到的各种地物,这使得利用高光谱数据对地表信息的精确识别成为可能。

我国的对地观测技术已经发展了近 30 年,在高光谱遥感的理论研究上取得了长足的进步,其中中国科学院遥感所童庆禧