

Data Compression
of Hyperspectral
Remote Sensing Image

高光谱遥感图像
数据压缩

罗建书 周敏 孙蕾 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

高光谱遥感图像数据压缩

Data Compression of Hyperspectral Remote Sensing Image

罗建书 周敏 孙蕾 著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

高光谱遥感图像数据压缩/罗建书,周敏,孙蕾著. —北京:国防工业出版社,2011.3
ISBN 978-7-118-07119-1

I. ①高... II. ①罗... ②周... ③孙 III. ①光谱
分辨率-光学遥感-研究 IV. ①TP722

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 002242 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 10½ 字数 175 千字

2011 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

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	刘成海			
副主任委员	宋家树	蔡 镛	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
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

序

“欲穷千里目,更上一层楼”。为了能够站得更高,看得更远,人类已经走出地球,从太空的角度来探索我们的家园。高光谱遥感技术便是在人类探索自然、改造自然的实践过程中发展起来的新兴技术。

随着遥感器、大气和地形的相互作用被认知,人们对遥感对象的认识能力不断深化。从19世纪初的航空摄影,第二次世界大战期间出现的彩色航空摄影,到20世纪60年代逐步发展起来的多光谱遥感,光谱成像的范围已经从肉眼能够辨识的可见光部分扩展到红外、微波和紫外部分。20世纪80年代,成像光谱仪能够在电磁波谱的中红外、近红外、可见光和紫外区域,获取更多更窄的光谱图像数据,将高光谱分辨率图像以全新的面貌呈现在科学界面前,开创了高光谱、高空间分辨率“图谱合一”的高光谱遥感技术新时代。高光谱遥感成为融合电磁学、光学、信号处理等多学科交叉领域的新兴学科,引起学术界的广泛关注。人们通过将反射光谱数据和已知吸收特性的光谱数据相比较,能够对地物进行分类和识别。高光谱遥感图像对地物光谱的细微的辨别能力被广泛的应用在农业,林业,地质调查,环境检测,军事侦察等多个领域。

目前,国内外关于高光谱遥感的书籍非常多,在选材、结构和侧重点方面各具特色。本书结合了作者长期从事高光谱遥感图像处理、小波分析理论及应用的研究成果,注意参考和比较了同类书籍,将重点放在高光谱遥感图像的压缩算法研究上。高分辨力遥感技术的空前发展是以产生大量数据为代价的,随着空间分辨率、光谱分辨率、时间分辨率和数据量化深度的不断提高,高光谱数据急剧增加,信息获取与数据传输之间的矛盾日益加剧,对高光谱遥感技术的发展提出了巨大挑战。因此高光谱遥感图像压缩技术对高光谱遥感的发展至关重要。该书的选题在国内外的遥感书籍中十分少见,特色鲜明,充分反映出当前高光谱遥感图像压缩的前沿技术及作者本人的独到见解,在科研和应用上都具有很好的参考价值。

该书的撰写工作历时三年,反复修改,付出了很多的努力。希望该书能为促进研究成果交流起到积极作用,为发展高光谱遥感压缩技术做出应有的贡献。

秦前清

2010年10月

前 言

高光谱遥感是 20 世纪末发展起来的,是融合电磁学、光学、信号处理等多学科交叉领域的新兴学科.高光谱遥感的蓬勃发展为人类从航空航天载体上探索地球提供了可能,为人类认识自然,开发资源,监控环境提供了新的途径.高光谱遥感技术的快速发展体现在高光谱遥感图像的空间谱间分辨力的提高上.高光谱遥感图像以高空间、谱间分辨力及“图谱合一”的特点在农业、林业、军事、环境、地质等各个领域得到了广泛的应用.这使得高光谱数据急剧增加,给高光谱数据的传输和存储带来了巨大的压力,因此研究高光谱图像压缩算法对高光谱遥感技术的发展有着至关重要的意义.

本书是在综合国内外最新研究成果和多年从事高光谱遥感图像压缩研究心得的基础上,经过反复酝酿编写而成,旨在跟随高光谱遥感技术的发展,将国内外高光谱遥感图像压缩的理论和方法系统地介绍给读者.本书内容分为两大部分.前一部分对应于第 1 章至第 4 章,主要介绍了高光谱遥感图像的基本概念和高光谱遥感图像压缩的基本方法.后一部分对应于第 5 章和第 6 章,吸取了作者近年来在高光谱遥感图像压缩领域所做的工作.

该书的结构如下:

第 1 章绪论,对高光谱遥感图像压缩的现状与发展动向做了概括的介绍.

第 2 章高光谱遥感图像概述,介绍了高光谱遥感图像的基本概念、数据格式和应用背景.分析了高光谱遥感图像的相关性.

第 3 章数据压缩基本理论,介绍了数据压缩的基本概念、压缩编码模型、常用的变换方法及量化方法.介绍了 JPEG、JPEG-LS、JPEG2000 静态图像压缩标准.该章为高光谱遥感图像压缩提供了理论支撑.

第 4 章高光谱遥感图像压缩编码,介绍了四类高光谱遥感图像压缩技术:波段排序(预处理)、预测编码、变换编码及矢量量化编码.

第 5 章基于最佳线性预测的高光谱遥感图像压缩方法,结合作者近年在高光谱遥感图像压缩领域取得的研究成果,介绍了一系列基于最佳线性预测的高光谱遥感图像压缩算法.

第 6 章基于多元小波的高光谱遥感图像压缩,介绍了多元小波理论及其在

高光谱遥感图像压缩中的应用,这部分是作者在小波构造理论及其应用上取得的学术成果.

本书的编写得到诸多同行和专家的帮助和支持.在历时三年的撰写过程中,武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室秦前清教授、国防科技大学理学院成礼智教授始终给予了热情的鼓励,提出很多宝贵的意见和建议.硕士研究生张训峰、李景超、况军等为本书提供了大量有价值的材料,在此一并表示衷心的感谢.

由于作者的水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正.

作者

2010年6月

目 录

第1章 绪论	1
第2章 高光谱遥感图像概述	6
2.1 高光谱遥感成像过程和基本概念	6
2.1.1 遥感成像过程	6
2.1.2 高光谱遥感的基本概念	8
2.2 高光谱遥感图像的数据格式	10
2.3 高光谱遥感图像分析	12
2.3.1 高光谱遥感图像空间相关性分析	12
2.3.2 高光谱遥感图像谱间相关性分析	15
2.4 高光谱遥感的应用	17
第3章 数据压缩基本理论	19
3.1 数据压缩的基本概念	19
3.2 编码模型	21
3.2.1 霍夫曼(Huffman)编码	21
3.2.2 算术编码	22
3.2.3 游程编码	23
3.3 变换方法	23
3.3.1 K-L变换	23
3.3.2 离散余弦变换	25
3.3.3 小波变换	27
3.4 量化方法	29
3.4.1 标量量化	29
3.4.2 矢量量化	30
3.5 图像压缩标准	32
3.5.1 JPEG	32
3.5.2 JPEG-LS	34
3.5.3 JPEG2000	37

第 4 章 高光谱遥感图像压缩编码	41
4.1 波段排序	41
4.1.1 最小生成树	42
4.1.2 基于最小生成树的波段重排	43
4.1.3 自适应波段重排	46
4.2 预测编码	48
4.2.1 预测树方法	48
4.2.2 最佳线性预测	52
4.2.3 非线性自适应预测	56
4.3 变换编码	58
4.3.1 3D-SPIHT 算法	59
4.3.2 3D-SPECK 算法	62
4.4 矢量量化编码	65
4.4.1 基于矢量量化的压缩算法	66
4.4.2 快速矢量量化压缩算法	68
第 5 章 基于最佳线性预测的高光谱遥感图像压缩方法	72
5.1 基于多波段谱间预测的高光谱遥感图像无损压缩算法	72
5.1.1 谱间预测算法	72
5.1.2 系数矩阵的快速算法	74
5.1.3 压缩编码算法设计	76
5.1.4 实验结果	77
5.2 基于最佳递归双向预测的高光谱遥感图像无损压缩	78
5.2.1 光谱相关性分析	78
5.2.2 递归双向预测模型	80
5.2.3 递归双向预测系数	81
5.2.4 实验结果	81
5.3 基于谱间预测和码流预分配的高光谱遥感图像有损压缩算法	82
5.3.1 各波段码流分配	83
5.3.2 基于 DPCM 谱间预测的 SPIHT 算法	84
5.3.3 实验结果	85
第 6 章 基于多元小波的高光谱遥感图像压缩	87
6.1 多元小波概论	87
6.1.1 基本定义和符号	87
6.1.2 多元小波的 Mallat 算法	89

6.2 二元可分小波	93
6.2.1 一元小波的构造	93
6.2.2 一元整数小波	102
6.2.3 二元可分小波	104
6.3 二元不可分小波	107
6.3.1 逼近阶与光滑性	108
6.3.2 正交小波的构造	112
6.3.3 紧支撑双正交小波的构造	114
6.3.4 例子	121
6.3.5 二元不可分小波的边界延拓	130
6.4 梅花小波	133
6.4.1 梅花双正交小波	133
6.4.2 基于梅花采样的边界延拓	135
6.5 基于多元小波的高光谱遥感图像压缩算法	141
6.5.1 基于小波变换的二维静态图像压缩	141
6.5.2 基于小波变换的高光谱遥感图像压缩	143
名词索引	145
参考文献	148

Contents

Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Introduction of Hyperspectral Remote Sensing Image	6
2.1 Imaging Technologies of Hyperspectral Remote Sensing Image and Basic Concepts	6
2.1.1 Imaging Procedure of Hyperspectral Remote Sensing Data	6
2.1.2 Basic Concepts of Hyperspectral Remote Sensing Data	8
2.2 Format of Hyperspectral Remote Sensing Data	10
2.3 Analysis of Hyperspectral Remote Sensing Data	12
2.3.1 Spatial Correlation Analysis of Hyperspectral Remote Sensing Data	12
2.3.2 Spectral Correlation Analysis of Hyperspectral Remote Sensing Data	15
2.4 Application of Hyperspectral Remote Sensing Data	17
Chapter 3 Basic Theory of Data Compression	19
3.1 Basic Concepts of Data Compression	19
3.2 Coding Model	21
3.2.1 Huffman Coding	21
3.2.2 Arithmetic Coding	22
3.2.3 Run-Length Coding	23
3.3 Transform Method	23
3.3.1 K-L Transform	23
3.3.2 Discrete Cosine Transform	25
3.3.3 Wavelet Transform	27
3.4 Quantization Method	29
3.4.1 Scale Quantization	29
3.4.2 Vector Quantization	30
3.5 Image Compression Standards	32

3.5.1	JPEG	32
3.5.2	JPEG-LS	34
3.5.3	JPEG2000	37
Chapter 4	Hyperspectral Remote Sensing Image Compression	41
4.1	Band Ordering	41
4.1.1	Minimum Cost Spanning Tree	42
4.1.2	Band Re-ordering Based on Minimum Cost Spanning Tree	43
4.1.3	Adaptive Band Re-ordering	46
4.2	Prediction Coding	48
4.2.1	Prediction Tree Method	48
4.2.2	Optimal linear Prediction	52
4.2.3	Nonlinear Adaptive Prediction	56
4.3	Transform Coding	58
4.3.1	3D-SPIHT Algorithm	59
4.3.2	3D-SPECK Algorithm	62
4.4	Vector Quantization Coding	65
4.4.1	Compression Algorithm Based on Vector Quantization	66
4.4.2	Compression Algorithm Based on Fast Vector Quantization	68
Chapter 5	Hyperspectral Remote Sensing Image Compression Based on Optimal Linear Prediction	72
5.1	Hyperspectral Remote Sensing Image Lossless Compression Based on Multi-band Prediction	72
5.1.1	Interband Prediction Algorithm	72
5.1.2	Matrix Fast Algorithm	74
5.1.3	Design of Compression Algorithm	76
5.1.4	Experimental Results	77
5.2	Hyperspectral Remote Sensing Image Lossless Compression Based on Bi-direction Prediction	78
5.2.1	Spectral Correlation Analysis	78
5.2.2	Recursive Bi-direction Prediction Model	80
5.2.3	Coefficients of Recursive Bi-direction Prediction Model	81
5.2.4	Experimental Results	81
5.3	Hyperspectral Remote Sensing Image Lossy Compression Based on Band Prediction and Rate Pre-Allocation	82

5.3.1	Rate Pre-Allocation for Each Band	83
5.3.2	SPIHT Algorithm Based on DPCM Spectral Prediction	84
5.3.3	Experimental Results	85
Chapter 6 Hyperspectral Remote Sensing Image Compression Based on		
	Multi-dimensional Wavelets	87
6.1	Introduction of Multi-dimensional Wavelets	87
6.1.1	Basic Definition and Symbols	87
6.1.2	Mallat Algorithm of Multi-dimensional Wavelets	89
6.2	Bidimensional Separable Wavelets	93
6.2.1	Construction of One-dimensional Wavelets	93
6.2.2	One-dimensional Integer Wavelets	102
6.2.3	Bidimensional Separable Wavelets	104
6.3	Bidimensional Non-separable Wavelets	107
6.3.1	Approximation Order and Smoothness	108
6.3.2	Construction of Orthogonal Wavelets	112
6.3.3	Construction of Compactly Supported Biorthogonal Wavelets	114
6.3.4	Examples	121
6.3.5	Boundary Extension of Bidimensional Non-separable Wavelets	130
6.4	Quincunx Wavelets	133
6.4.1	Quincunx Biorthogonal Wavelets	133
6.4.2	Boundary Extension of Quincunx Wavelets	135
6.5	Hyperspectral Remote Sensing Image Compression Algorithm Based on Multi-dimensional Wavelets	141
6.5.1	Two-dimensional Static Image Compression Based on Wavelet Transform	141
6.5.2	Hyperspectral Remote Sensing Image Compression Based on Wavelets	143
Index		145
References		148

第 1 章 绪 论

成像光谱仪是在高光谱成像技术上, 20 世纪 80 年代开始发展起来的先进的新型遥感器, 高分辨力成像光谱仪 (High Resolution Imaging Spectrometer) 则是成像光谱技术发展的前沿, 具有获取高的空间分辨力和光谱分辨力、超多波段光谱图像的技术能力, 利用它的超光谱图像数据, 可以根据军事目标、伪装及其背景地物的细微光谱差别, 识别目标, 揭露伪装, 是军事航天侦察新技术手段发展的重要方向。同时, 高分辨力成像光谱仪在民用上可以根据地球表面土壤、植被、岩矿石、水、冰雪等众多地物的光谱特征, 直接确认和识别地物, 还能做到地面物质的理化性能诊断和成分分析。在农业的土地利用、作物长势评价与产量预报、植被与草场调查、土壤分类、森林病虫害及火灾监测与治理、地质探矿与资源调查、污染监测与环境保护、城市规划、自然灾害预报与灾情评估、沿海与内陆水系、水质、冰雪、大气研究等方面有着广泛的应用前景, 对促进国民经济持续发展具有十分重要的意义。高分辨力成像光谱仪是选择特定地区精细采样详查观测的航天遥感器, 它获取的信息在经济和国防建设的很多领域有重要应用价值, 因此, 国家高技术航天领域把高分辨力成像光谱仪研究列为重点项目安排, 美国、欧洲空间局等正在进行此项目的研制工作。

随着成像光谱技术的飞跃发展, 高光谱数据的光谱分辨力和空间分辨力越来越高, 数据量化的深度也有所增加, 同时卫星不间断周期性扫描次数也在不断增加。这些因素都导致了高光谱遥感图像数据量的激增。高光谱遥感图像巨大的数据量给高光谱遥感图像的传输和存储带来巨大压力, 严重制约了高光谱遥感技术的发展, 因此高光谱图像压缩技术成为高光谱遥感领域的研究热点。

由于高光谱图像要用于诸如卫星勘探、制导等领域, 另一方面受到卫星上所用计算机以及数据传输设备等限制, 故高光谱遥感图像的编码技术必须满足下述要求:

(1) 高保真度。要求解压后得到的恢复图像与原始图像相比, 不影响分析和识别的应用, 视觉上可以接受, 无跳跃感, 同时, 对于关键性感兴趣区域还要做到不可察觉的失真。

(2) 高压缩比。为了适应分辨力与采样率不断提高的情形下高光谱遥感图像的实时传输与存储的要求, 必须要求编码算法能实现高压缩比。

(3) 可靠性高, 误码率低. 要求对各种不同类型的高光谱图像进行压缩后恢复图像质量尽可能一致, 能够自动检测并防止误码的扩散, 从而保证传输系统的正常稳定运行.

(4) 算法简便, 耗内存低. 高光谱遥感图像数据量巨大, 压缩算法的设计应力争做到软件高效、硬件低成本, 以便设计出实时压缩处理系统.

目前, 高光谱遥感图像压缩技术主要有三大类: 预测, 变换和矢量量化.

1. 预测

基于预测的压缩算法的主要思想是利用信号间的相关性, 根据前面的信号预测当前信号的值, 再将当前信号的值减去预测值得到预测残差. 当预测残差的幅值远远小于当前信号的幅值时, 就能达到好的压缩效果. 预测技术体现在高光谱遥感图像压缩算法中包括空间预测和谱间预测两个方面. 空间预测是对静态图像进行无损压缩的常见技术, 利用图像在空间域的连续性, 可以有效地去除空间冗余. JPEG、JPEG-LS 等图像压缩标准都是基于预测技术的. 谱间预测技术是利用高光谱遥感图像强烈的谱间相关性, 用前一波段的像素值去预测当前波段空间位置上相同的点的像素值. 由于高光谱遥感图像的谱间相关性非常强烈, 预测能够有效地降低信息熵. 预测的方法思想简单, 计算量小, 工程实现容易, 在无损压缩中应用广泛.

2. 变换

基于变换的方法是将信号变换到其他的域, 去除信号间的相关性, 将能量集中来达到压缩的效果. 目前信号变换的工具很多, 傅里叶变换、小波变换、KLT、DCT 等方法都能达到集中能量的效果. 归一正交变换对信号进行变换在保持总能量守恒的情况下重新分配了能量, 根据码率和失真度的要求, 舍弃变换系数幅值小的部分, 经过逆变换后, 只会引起较小的误差. 对于高光谱遥感图像而言, 在对图像进行空间域编码时, 变换是极为有效地去除冗余的方法. 基于变换的遥感图像压缩算法去相关性强, 计算量比预测的方法大, 主要应用于有损压缩.

3. 矢量量化

矢量量化是将数据分块, 将每个数据块看成一个矢量. 通过训练将相似的矢量聚为一类, 指定一个代表矢量并分配索引, 生成码书. 编码时对每个矢量用与之最近的矢量的聚类索引来代替该矢量, 从而实现压缩. 高光谱遥感图像的每个像元对应的光谱曲线可以用一个矢量来表示, 由于同一类地物的光谱特征相似, 因此矢量量化是高光谱遥感图像压缩的理想方法. 矢量量化编码方法理论上是可以达到信号的信息熵的. 但是由于编码的复杂度随着矢量维数的增加呈指数增长, 计算量非常巨大, 工程实现难度比较大.