

高光谱图像压缩技术研究进展

万建伟¹ 粘永健¹ 苏令华^{2,3} 辛勤¹

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院 长沙, 410073; 2. 空军大连通信士官学校 大连, 116600;
3. 空军工程大学电讯工程学院 西安, 710077)

摘要: 高光谱遥感已经成为遥感领域的前沿科技, 在军事侦察以及国民经济中发挥着重要作用。高光谱遥感的光谱通道数达到上百个, 光谱分辨率的不断提高使得高光谱图像的数据量急剧膨胀。对于星载成像光谱仪获取的高光谱图像, 庞大的数据量已经给数据的存储与传输带来巨大压力, 严重制约着高光谱图像的后续应用, 因此, 必须利用有效的压缩技术对高光谱图像进行压缩。高光谱图像压缩技术可分为无损压缩与有损压缩, 在实际应用中, 需要根据具体的应用需求选取不同的压缩方式。本文首先对高光谱遥感的基本概念进行了简介, 然后从无损压缩与有损压缩两个方面对高光谱图像压缩技术的研究进展进行了综述, 最后, 指出了高光谱图像压缩技术的发展方向。

关键词: 高光谱遥感; 无损压缩; 有损压缩; 质量评估

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)09-1397-11

Research Progress on Hyperspectral Imagery Compression Technique

WAN Jian-wei¹ NIAN Yong-jian¹ SU Ling-hua^{2,3} XIN Qin¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha, 410073;
2. Dalian Communication Sergeant School of Air Force, Dalian, 116600;
3. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710077)

Abstract: Hyperspectral remote sensing has already become the advanced science and technology in the field of remote sensing, which plays an important function on military scout and national economy. The number of spectral channels can reach in the hundreds, with the increase of spectral resolution, the datasets of hyperspectral imagery become larger and larger. For the hyperspectral imagery acquired by imaging spectrum instrument on satellite the huge datasets have brought great press for data storage and transmission, which restricts the practical applications of hyperspectral imagery, therefore, it is necessary to compress hyperspectral imagery by efficient compression technique. The compression technique for hyperspectral imagery can lossy compression and lossless compression, For practical application, the compression type should be selected according to the application requirement. In this paper, the basic concept of hyperspectral remote sensing technique is introduced firstly, then, the research progress of hyperspectral imagery compression technique is summarized, which includes lossless compression and lossy compression. Finally, the research direction for hyperspectral imagery compression is pointed out.

Key words: hyperspectral remote sensing; lossless compression; lossy compression; quality evaluation

1 引言

一切物体均具有反射或者辐射不同波长电磁波的特性, 通过识别电磁波而达到识别物体及其存在环境的技术称为遥感^[1]。遥感(Remote Sensing), 即“遥远的感知”, 它是20世纪60年代发展起来的一项综合对地观测技术, 它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^[2]。遥感技术是以电磁辐射理论为基础, 集合了电磁波理论、光谱学与色度学、物理与几何光学、地理学、地质学、大气

科学以及海洋科学等众多学科^[3]。遥感作为人类获取信息的重要手段, 经过几十年的发展, 已经在国民经济各个领域有着广泛的应用, 并且成为当今最为活跃的科技领域之一。

遥感技术将人们研究地表信息的能力由陆地延伸到太空, 极大地拓宽了人们的研究视野。伴随着遥感技术的不断进步, 20世纪80年代初期, 成像光谱学的出现, 使得遥感技术进入到高光谱遥感阶段(Hyperspectral Remote Sensing, HRS)。高光谱遥感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

图像革命性的结合在一起^[4],即“图谱合一”,极大地提高了人们认知客观世界的能力,因此,高光谱遥感受到了世界各国的普遍关注。高光谱遥感具有光谱连续的特点,所获取数据能够提供丰富的地物细节,在海洋遥感、植被研究、精细农业、地质勘察、大气和环境遥感以及军事侦察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创新^[3],开创了高光谱与高空间分辨率兼有、光谱与图像合一的遥感技术新时代。

高光谱遥感与常规遥感相比,随着光谱分辨率的不断提高,所获取的数据量呈指数级增加。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。对于星载成像光谱仪获取的高光谱图像而言,庞大的数据量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,因此,必须采取有效的压缩方式对高光谱数据实施压缩。本文首先介绍了高光谱遥感的基本概念,然后综述了高光谱图像压缩技术的研究进展;最后对压缩技术的发展趋势进行了展望。

2 高光谱遥感技术简介

遥感技术最初是处于全色、彩色及光谱扫描成像阶段。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,遥感技术从此进入了高光谱遥感时代。高光谱遥感又称为成像光谱(Imaging Spectrometry)遥感,它利用很多很窄的电磁波段从感兴趣的物体中获取有关数据,实现了遥感技术光谱分辨率的突破性提高。“光谱分辨率”是指探测器在波长方向上的记录宽度,又称为“波段宽度”^[5]。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^[2]。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多,光谱通道数多达数十甚至数百个,而且各光谱通道间往往是连续的,如图1所示^[5]。

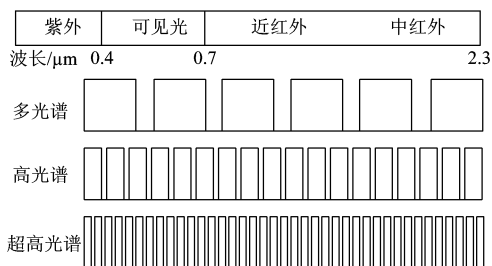


图1 传感器光谱分辨率的分类

成像光谱仪在空间成像的同时,能够以相同的空间分辨率记录下几十或者成百的光谱通道数据,将它

们叠合在一起可以构成高光谱立方体。高光谱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有机结合在一起,从高光谱立方体的每个像元均可提取一条连续的光谱曲线,不同的地物对应不同的光谱特征,这就是光谱的“指纹效应”,如图2所示。成像光谱仪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物的细节信息进行反演成为可能。

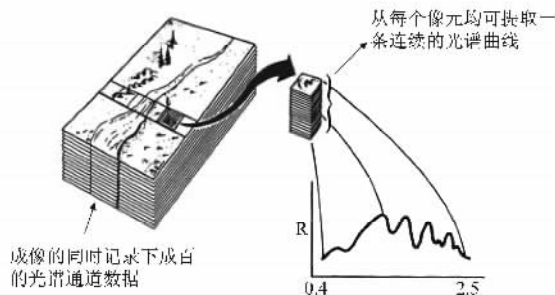


图2 高光谱遥感的基本概念

3 高光谱图像压缩技术研究进展

高光谱数据可以看作准三维图像,在空间维的基础上,增加一维光谱信息。其空间图像维描述地表二维空间特征,光谱维揭示图像每一像元的光谱曲线特征,此实现了遥感数据图像维与光谱维信息的有机融合。与视频图像相比,高光谱图像在各个波段中的内容是相同的,不存在视频图像中的运动信息,因此,高光谱图像也可以认为是三维静止图像。

高光谱图像同时存在着空间相关性与谱间相关性。由于成像光谱仪拥有较高的光谱分辨率,决定了高光谱图像具有较强的谱间相关性,而空间分辨率较低,图像空间中的一个点可能对应实际地物中的很远一段距离,这就决定了高光谱图像的空间相关性相对较低,甚至低于大多数自然图像。因此,高光谱图像压缩需要同时去除谱间冗余与空间冗余,在这一点上,高光谱图像压缩技术与传统的遥感图像压缩技术是有所区别的。

正因为高光谱图像有别于普通的自然图像以及传统的遥感图像,因此,高光谱图像的压缩必须紧密结合自身特征才能取得理想的压缩效果。高光谱图像压缩技术在近十多年来获得了长足的发展,从最初只有几个波段的多光谱图像压缩技术发展至上百个波段的高光谱图像压缩技术。目前,去除高光谱图像空间相关性的技术已经比较成熟,如何有效去除谱间相关性,已经成为高光谱图像压缩技术研究的关键。目前,许多针对高光谱图像自身特点的压缩算法相继提出,这些方法基本上可分为三类:基于预测的方法、基于变换的方法以及基于矢量量化的方法。在有些情况下,单独

使用一种方法往往难以奏效,多种方法相结合的压缩思路已经成为压缩技术发展的趋势。

3.1 高光谱图像无损压缩研究进展

高光谱图像的获取成本较高,数据本身具有长期的保存价值,其最终用途又是不断地发生变化。在此情形下,针对高光谱图像压缩而言,无损压缩方式是较好的选择。本节对国内外关于高光谱图像无损压缩技术的研究进展进行综述,为其下一步的研究提供借鉴。

3.1.1 基于预测的方法

基于预测的方法是最为经典的图像无损压缩方法之一。早在 JPEG (Joint Picture Expert Group) 压缩标准中,预测编码就被应用于无损压缩部分。基于预测的方法主要利用图像中像素之间的相关性,即利用当前像素的空间相邻像素共同对其进行预测,再将当前像素值与预测值相减得到预测残差,然后采用相应的熵编码方法对残差数据进行压缩。影响该方法压缩性能的主要因素在于预测器的设计上,较好的预测算法能够显著降低残差图像的熵值。最基本的线性预测方法为差分脉冲编码调制 (Differential Pulse Code Modulation, DPCM), 如图 3 所示。目前,无损压缩过程基本都与图 3 类似。需要指出的是,图 3 中的量化器对预测残差数据只进行取整操作。

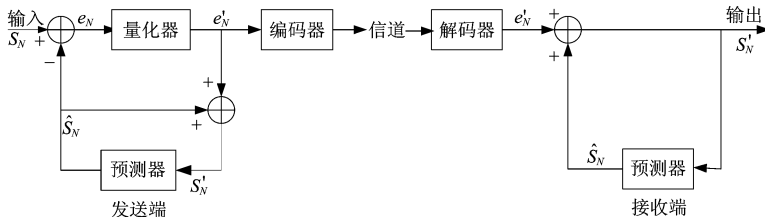


图3 基于DPCM的编解码系统

Memon 在文献[6]中提出预测树的概念,同时利用前向自适应技术与后向自适应技术去除多光谱图像的谱间相关性。张荣等人在预测树的概念上提出了一种侧邻域最小绝对权值 (Side Neighbor Minimum Absolute Weight, SNMAW) 预测树构造方法,极大地简化了预测树的构造复杂度。吴铮等人结合自适应线性预测方法,利用谱间局部统计冗余和结构冗余建立自适应预测器,提出了误差补偿预测树方法,该方法在对多光谱遥感图像进行压缩时取得了较好的效果^[7]。夏豪等人在传统预测树的基础上提出了一种改进方案^[8],通过定义一个幅度拉伸因子来表示相邻波段的局部灰度变化,比较局部上下文梯度来估算该幅度因子,并用它对当前的预测值进行修正,获得了较好的压缩性能^[9]。LUTs (Lookup Tables) 是一种基于查找表的高光谱遥感图像无损压缩算法,其基本思想与预测树类似,通过建立查找表来降低运算复杂度^[10]。

武筱林提出了基于上下文的自适应无损编码 (Context-based, Adaptive, Lossless Image Code, CALIC)^[11],

其压缩效果优于以 LOCO-I (Low Complexity Lossless Compression) 为内核的 JPEG-LS 无损压缩标准,它们在自然图像的压缩中取得了较好效果,但由于未考虑谱间相关性,用于高光谱图像无损压缩的效果较差。在文献[12]中,Wu 和 Memon 将其推广到三维 CALIC,后来 Magli E 等人对该方法进行了改进^[13],提出了一种可实时实现的三维 CALIC 压缩算法。

Rizzo F 在文献[14]中提出谱间线性预测器 (Linear Prediction, LP),该算法将当前波段的前一波段作为参考波段,计算当前像素的上下文与参考波段对应上下文的平均差值,若差值大于某一设定的阈值,则利用其前两个波段的平均预测误差对当前预测值进行修正,并且给出了空间预测与谱间预测两种工作模式。Rizzo F 提出了针对谱间预测的最小均方预测器 (Spectral-oriented Least Squares)^[15],该方法的主要优势是复杂度较低,每次预测只需要 4 次乘法和 6 次加法。Wang 提出了基于相关性条件平均预测 (Correlation based Conditional Average Predictor, CCAP) 的快速无损压缩算法^[16],它采用非线性预测的思想,通过对考察相邻波段上下文之间的相关性来决定是否进行非线性预测,CCAP 对 AVIRIS 型高光谱数据中的 Cuprite 具有非常好的压缩效果,而对它几个成像区域的压缩效果并不理想。Slyz 提出了基于块的谱间预测方案^[17],该方案将高光谱图像各波段都进行分块处理,当前波段的每一块都利用与其相邻的前一波段对应块进行预测。

Aiazzi B 利用 JPEG 中的无损压缩算法对高光谱图像进行谱内预测,在此基础上提出了预测误差反馈机制,用于去除谱间相关性,该方法成功应用于多光谱图像无损压缩^[18]。Zhang J 等人首先对高光谱图像进行波段分组与排序,然后结合预测误差反馈算法进行谱间预测^[19]。大多数无损压缩算法均是利用当前波段之前的波段作为预测波段,一些学者提出了利用双向预测的思路进行谱间去相关。王朗与郭树昆将预测树模型与双向谱间预测算法应用于无损压缩^[20],通过双向谱间多波段预测,利用谱间局部统计冗余和结构冗余,建立了对预测树模型误差进行自适应补偿的预测器模型。虽然双向预测在高光谱图像压缩中有一定的效果,但该方法应用于无损压缩的效果仍需进一步考究。

为了提高谱间预测效果,多波段谱间预测也是经常采用的方案。孙蕾在文献[21]中提出了基于多波段谱间预测方案,初步研究了参考波段数量对无损压缩性能的影响。霍承富与张荣提出了基于搜索最优双预测波段的高光谱图像无损压缩算法^[22],其基本思想是通过建立一个搜索最优双预测波段的二叉树模型,搜索与每一波段相关性最强的两个波段,利用这两个波

段共同对当前波段进行谱间预测。张晓玲提出基于感知器模型的无损压缩方法,利用神经网络的学习能力来训练预测系数,从而提高了预测精度^[23]。在此基础上,张晓玲又提出了三维自适应预测模型,采用预测排序-预测点选择-自适应预测-Rice 编码的方案,获得了较高的无损压缩比。

Jain S K 在文献[24]中提出了基于非线性预测的高光谱图像无损压缩方案(Non-linear Prediction for Hyperspectral Images, NPHI),然后通过边缘分析算法,将像素分为边缘与非边缘区域,利用上下文中非边缘像素对当前像素进行非线性预测,即基于边缘的预测算法(Edge-based Prediction for Hyperspectral Images, EPHI),与 NPHI 相比。进一步提高了无损压缩性能。Mielikainen J 在 2003 年提出了一种基于聚类 DPCM 的无损压缩算法^[25],首先对高光谱图像进行谱间分类,在每个类内,采用多波段预测的方案进行谱间预测,获得了较高的无损压缩比,但计算复杂度较高,预测系数需要作为附加信息进行传输,并且在参考波段数达到 20 时压缩效果是最优的,这使得预测器的阶数过高,同时对数据内存的要求也极为苛刻,限制了其在实际中的应用。苏令华提出了基于同类邻点预测以及单邻点、多波段预测的方案^[26,27],利用当前像素的同类像素进行预测系数的训练,其不足是预测系数需要作为附加信息进行传送,在一定程度上制约了算法性能的提高。Aiazzi B 引入了分块和模糊预测的概念^[28,29],构造了当前像素的因果预测矢量,对这些矢量进行了模糊聚类处理,分别训练预测系数。选取模糊聚类中相似度大于特定阈值的矢量进行训练;然后引入分块处理的思路,采用迭代处理优化预测系数,最后对预测残差采用算术编码,取得很好的无损压缩结果,在文献[30]中,获得了几乎目前最高的无损压缩比。

通过以上综述可知,基于预测的方法的一系列的改进主要集中在预测器的设计上,其根本目的是要尽可能地提高预测精度,降低预测残差的熵值。结合一些预处理手段,例如波段分组与波段排序等,也可以在一定程度上提高无损压缩性能。另外,如何在压缩性能与运算复杂度之间达到最佳的平衡,也是值得深入研究的问题。

3.1.2 基于变换的方法

基于变换的方法也是高光谱图像无损压缩领域的方法之一。在图像空间域中,冗余信息分布在较大范围的空间像素集中,很难直接进行去相关;而将图像从空间域映射到变换域,图像中的能量得以集中,少数幅值较大的变换系数代表了图像中的大部分能量,而绝大部分变换系数表示的是图像中一些不重要的细节分量。通过利用较少的码字描述幅值较大的系数所代表的主要能量成分,而量化掉幅值较小的变换系数所代

表的细节分量,可以获得较高的压缩比。目前,常用的变换方法主要有卡胡南-洛维变换(Karhunen-Loeve Transform, KLT)、离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)和离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)。在利用基于变换的方法对高光谱图像进行无损压缩时,需要使用整数变换的形式,即变换前后的数据均为整数形式,这样才能达到无损压缩的目的。图4给出了变换编码的原理框图。

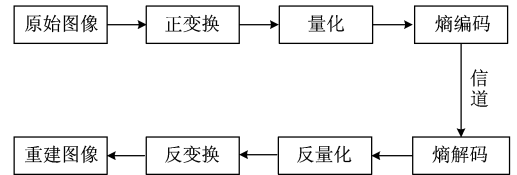


图4 基于变换的图像编解码系统框图

KLT 是统计意义上的最优线性正交变换,与 DCT 和 DWT 不同的是,KLT 的基函数是不固定的,它的变换矩阵依赖于原始数据的统计特性,因而对变换数据具有最优的匹配效果。利用 KLT 能够有效去除高光谱图像的谱间相关性,而信号在空间维上依赖于场景的几何结构并且较难预测,在此情形下,利用 DWT 或者 DCT 可以获得较好的去相关效果^[31]。

KLT 变换后的系数是浮点数,要实现无损编码,必须转换为完全可逆的整数映射。针对一般的有限维可逆线性变换,郝鹏威利用矩阵分解的方法给出了 KLT 的整数实现形式^[32,33]。文献[34]对 KLT 变换的整数实现方式进行研究,把非奇异的变换矩阵因式分解成若干个三角元素可逆矩阵,实现了可逆整数 KLT 变换。Mallat S 于 1989 年第一次将小波变换应用于图像信号的处理,小波变换以其良好的时频局部化能力以及与人眼视觉特性相吻合的多分辨率分析(Multi-Resolution Analysis, MRA)能力,开创了图像编码的崭新领域。为了实现整数小波变换,1996 年,Swelden 提出了基于提升格式(Lifting Scheme)的第二代小波变换^[35],其步骤可分为分离、预测与更新。提升方法既保持了原有的小波特性,又克服了平移伸缩不变性所带来的局限。提升方法可以实现整数到整数的变换,并且能够进行本位运算,因此,JPEG2000 将其作为无损压缩部分的变换步骤。对 DCT 而言,文献^[32,33]也给出了它的整数实现形式。与 DWT 相比,DCT 的性能稍差,并且无法与人眼的视觉特性相吻合,在目前的图像压缩算法中应用相对较少。

Kaarna A 使用 KLT 去除谱间相关性^[36],然后利用整数小波变换去除空间相关性,实现了 AVIRIS 数据的无损压缩。Mielikainen J 对该方法进行了改进^[37]。郝鹏威与石青云使用整数可逆 KLT+JPEG2000 的压缩思路,对 PHI 数据实现了无损压缩^[34]。Luca G L 同样使用 KLT 去除谱间相关性,利用整数 DWT 去除空间相关

性,最后利用基于三维上下文自适应算术编码对变换后的数据进行压缩,其效果要优于单纯的自适应算术编码^[38];同时,作者还探讨了谱间与空间相关性在去除顺序上的差异对压缩性能的影响。Zhang J 和 Liu G Z 提出了一种小波域高光谱图像无损压缩算法,该算法的核心是基于上下文自适应分类的算术编码技术^[39],首先利用整数小波去除空间相关性,与传统方法不同的是,算法并未利用特定的变换去除谱间相关性,而是利用自适应分类算法将相邻的小波图像系数进行分类,在每一类中的小波系数具有相近的幅值,然后利用自适应算术编码器对每一类进行编码,不仅充分利用了谱间相关性,而且很好地发挥了算术编码的优势,取得了较好的无损压缩效果。Wang L 等人提出了无乘法时域可逆重叠变换(Reversible Time-Domain Lapped Transform, RTDLT)与 KLT 相结合的高光谱图像无损压缩算法^[40],该算法将 RTDLT 代替小波变换去除空间相关性,利用低复杂度可逆整数 KLT 去除谱间相关性,实验结果表明算法具有良好的去相关性能。Tang X L 与 Pearlman W A 提出了三维集合分裂嵌入式块算法(Three Dimensional Set Partitioned Embedded Block, 3D SPECK)以及三维等级树集合分裂算法(Three Dimensional Set Partitioned in Hierarchical Trees, 3D SPIHT),结合整数小波变换实现了高光谱图像的无损压缩^[41-43]。张培强提出了基于波段分组的高光谱图像 3D SPIHT 算法^[44],对高光谱图像按照谱段类型进行分组,利用 3D SPIHT 算法实现了高光谱图像的有效压缩。柴焱等人提出了基于混合整型变换和 3D SPIHT 的高光谱图像无损压缩方法^[45],该方法在文献[44]的基础上比较了不同的整型变换技术对压缩性能的影响。黄菁提出了基于三维整数小波变换的压缩方案^[46],首先利用三维整数小波包变换去除高光谱图像的空间和谱间冗余,然后对变换后的每个子带的小波系数构造子带重要性树,通过子带重要性树的分裂对小波系数进行三维嵌入零块编码,最后把编码输出的二进制符号送入算术编码器,并结合高效的上下文模型进行熵编码,实验结果表明该方案的无损压缩性能略优于 3D SPIHT 和 3D SPECK。罗欣等人将变换矩阵分解为三角可逆矩阵实现整数 KLT,利用整数 KLT 与整数小波变换实现高光谱图像无损压缩^[47]。解成俊利用 DWT 去除空间相关性,采用无边界延拓 DWT 和帧间减影混合变换去除谱间相关性,算法运算速度快,便于硬件实现^[48]。

通过以上综述可以看出,基于变换的高光谱图像无损压缩方法大体可分为两类:一类是将高光谱图像看作一组准三维图像序列,利用 KLT 与 DWT 分别去除谱间与空间相关性。另一类是将高光谱图像看作一个三维矩阵,利用立体数据的相关处理方法进行压缩,其中 3D SPIHT、3D SPECK 以及在此基础上的一些改进算

法均属于这一类。

3.1.3 基于矢量量化的方法

矢量量化(Vector Quantization, VQ)的原理是直接对数据块进行量化,而不需要去相关预处理。VQ 是以信息的高阶熵为下限,在高压缩比和平均最小失真之间获得最佳的折衷。高光谱图像任一像元对应的光谱可以用一个矢量来表示,矢量中的每个元素均对应一个特定波长。由于相似的地表具有相似的光谱曲线,因此,矢量量化是高光谱图像压缩的理想方法。图 5 给出了 VQ 的编解码原理框图。

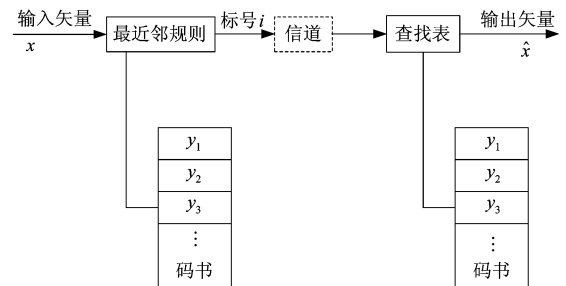


图5 基于矢量量化的编解码系统框图

Ryan M J 提出了一种基于均值归一化矢量量化的高光谱图像无损压缩算法^[49,50],首先将光谱维矢量进行分割,然后降低矢量的动态范围,最后将量化误差进行熵编码,称为 M-NVQ(Mean-Normalized Vector Quantization)。Motta G 提出了一种分段矢量量化方法 LPVQ(Locally optimized design of a Partitioned Vector Quantization)^[51,52],在一种失真最小的准则下,将高光谱数据自适应地划分成具有不同波段数的波段组,应用拓展的 LBG 算法获得关于各组的局部最优码书。该方法减小了码书规模,在一定程度上可以减少码书的搜索时间。

目前,基于 VQ 的压缩方法普遍存在问题是算法的复杂度较高,其计算量随着矢量维数的增加呈指数增长,因此在保持较高压缩性能的前提下,如何尽可能降低复杂度是应用矢量量化的一个关键问题。

3.1.4 其它方法

为了获得较高的无损压缩性能,许多学者综合采用多种压缩算法,前面三个小节介绍的方法中部分也是几种方法的结合。吴铮与何明一提出了基于小波变换和分段 DPCM 混合编码的多光谱遥感图像压缩算法^[53],首先根据波段间相关系数进行分组,然后利用当前波段的前一波段对其进行线性预测,最后对参考波段及预测残差进行小波变换,并利用 SPIHT 算法进行无损压缩。吴冬梅等人提出了基于谱间 DPCM 和整数小波变换的高光谱图像无损压缩^[54],该方案同样进行谱间 DPCM 预测,再对残差图像采用整数小波变换,最后对小波系数进行二值自适应算术编码。陈亮根据高光谱图像所独有的光谱上下文特征,利用光谱角来度量相邻像素间的光谱相似性差异,进而提出了基于光

谱角匹配预测的高光谱图像无损压缩算法^[55]。向露提出了一种基于整数小波的三维自适应预测的无损压缩算法^[56],采用5/3整数小波变换去除空间冗余,然后设计了一种新的线性预测器用于去除不同波段相同子带的相关性。

综上所述,基于矢量量化的压缩方法可以获得较高的压缩效果,但过大的计算量限制了它在实际中的应用;基于预测的方法历史悠久,其压缩效果也是最好的,因此受到了广泛关注;基于变换的方法压缩性能一般,运算复杂度并不高,但更多的是应用于高光图像图像的有损压缩。

3.2 高光图像有损压缩研究进展

虽然高光图像无损压缩能够实现数据的完全重建,但无损压缩中所采用的诸多预处理手段在很大程度上增加了算法的运算量,难以完成高光数据的实时编解码;另一方面,高光数据无损压缩的压缩比普遍较低,一般在3-4之间。在现有的通信带宽条件下,仍无法满足高光数据实时传输的需求。在一些对数据实时性要求较高的场合,比如战场态势下,无损压缩方法显得力不从心。对于星载成像光谱仪获取的高光谱数据,受星上存储能力及卫星链路传输带宽的限制,要实现高光数据的实时传输,必须采用高效的有损压缩方法减小数据量。

高光图像有损压缩仍然可以分为上述三种方法。陈雨时与张晔等提出了基于线性模型最优预测的压缩方案^[57],利用递归双向预测的思想,通过建立谱带间的线性模型,得出了信噪比下的最优预测。孙蕾提出了基于谱间预测与码流预分配的有损压缩方案,在谱间线性预测的基础上,根据各个波段的方差大小进行码率分配,其不足是误码积累现象比较严重^[58]。Zhou Z在自适应波段分组的基础上,在各个分组中选取合理的参考波段,利用线性预测去除谱间相关性,最后对各波段进行JPEG2000压缩^[59]。

针对高光图像有损压缩而言,基于变换的方法在去除谱间相关性的同时,能够有效防止误码传递,并且码流具有嵌入式与可伸缩性等优点。因此,基于变换的方法在有损压缩中得到广泛应用。与高光图像无损压缩类似,谱间相关性的去除可以采用KLT、DCT或者DWT等变换方法。Lee H S等人比较了三种变换的性能,结果表明KLT用于谱间去相关的性能是最优的^[60]。Rucker J T等人重点研究了准三维压缩算法中的码率分配方案,并给出了三种码率分配方案,取得了不同的压缩性能^[61];Du Q等人提出了主分量分析(Principal Component Analysis, PCA)与JPEG2000相结合的准三维压缩方案,讨论了PCA变换后的主分量数量对SNR及异常检测性能的影响,实验结果表明,在获得最优压缩结果的情形下,码率较高时需要保留的主

分量数要多于码率较低时的主分量数,但该文并未给出能够广泛适用的主分量选取方法^[62]。Penna B提出了一种改进的KLT,并用于谱间去相关,改进之处主要体现在协方差矩阵的估计上,通过采用点数抽取策略降低KLT的计算量,而重建图像质量并未受到明显影响^[63,64]。2000年,Dragotti P L、Poggi G和Ragozini A R P提出了面向高光图像的3D SPIHT压缩算法^[65]。Tang X L和Pearlman W A等人先后提出了改进的3D SPIHT算法和3D SPECK算法^[41-43,66],实现了高光图像从无损-近无损-有损的渐进压缩,同时也实现了高光图像渐进分辨率的压缩。Christophe E等对高光图像中的典型压缩方法进行了深入研究,找到了率失真意义上的最优三维小波分解^[67]。Liu G Z与Zhao F首先根据相邻波段的相关系数特征,采用二进制树波段分组算法将高光图像分成不同的模式组,然后对各组进行非对称三维小波变换(Asymmetric Transform 3D Wavelet Transform, AT-3DWT),获得了较好的压缩结果^[68]。Penna B研究了高光图像能量聚集特性,通过采用更为有效的谱间去相关方法,在3D SPIHT或者3D SPECK基础上进一步提高了压缩性能^[69]。Penna B在JPEG2000压缩标准的基础上,提出了一种嵌入式有损到无损的压缩框架,重点考察几种变换方法在谱间去相关上的性能,具体包括浮点DCT、整数DCT以及DWT^[70],仿真结果表明该算法在无损与有损压缩方面都具有较好的表现。

以上方法基本上都是以获得较高SNR为最终目标,实际上,SNR只是衡量高光图像压缩算法优劣的标准之一。Christophe E给出了几种评价高光图像压缩算法的方法,包括SNR、光谱分类、光谱解混以及异常检测等,并利用这几种评价方法分别测试了KLT+JPEG2000的压缩性能,实验结果表明,SNR与其它几种评价方法并不是成正比关系^[71]。目前,异常检测、地物分类以及目标检测已经成为高光图像重要的应用方向,因此,需要针对具体的应用设计压缩算法。Penna B提出在KLT域检测异常点的算法,对异常点进行平移,使其与背景具有相同的统计分布,可以降低异常信息在压缩过程中的损失^[72],Du Q分析了该算法的不足,采取对异常点进行无损压缩的策略,在获得较高压缩性能的同时,有效保持了图像的异常信息^[73]。Carvajal C与Penna B在KLT+JPEG2000的压缩框架下,设计了一种能够同时提供近无损和有损两个质量层的压缩算法,通过指定一个最大绝对误差控制近无损的压缩程度,以此作为对有损压缩结果的补充,压缩后的图像在分类、光谱解混以及异常检测方面都具有很好的表现^[74]。

利用PCA对高光图像进行压缩的本质是将原始数据的能量投影到以少数几个互不相关的主分量为基底的空间上,PCA在这个过程中发挥了降维的作用。

虽然 PCA 在高光谱图像有损压缩中取得了较大成功,但 PCA 是利用信号的二阶统计特性对图像信息进行刻画,这对一些大目标是比较有效的,但无法保持图像中的小目标信息,因为此类信息通常会出现在特征值较小的主分量中。尤其对于一些无法采用二阶统计特性刻画的信息,PCA 很难进行有效地提取和保护。独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)是 20 世纪 90 年代后期发展起来的一项信号处理新方法^[75],它将信号分解成若干个与高光谱图像特征密切相关的独立分量。与 PCA 相比,ICA 利用高阶统计量提取的独立分量具有更强的统计特性,更有利于高光谱图像的后续处理。目前,ICA 已被尝试应用于高光谱图像的压缩。B. Ramakrishna 等人提出了基于 ICA 的高光谱图像压缩方法^[76],利用 ICA 提取图像中的独立分量,最后采用 SPIHT 或者 JPEG2000 对独立分量进行压缩。Wang Jing 提出了一种基于 PCA 与 ICA 相结合的高光谱图像压缩算法^[77],利用主分量保留图像中的背景信息,使用独立分量保留图像中的小目标。基于 ICA 的高光谱图像压缩算法本质是利用 ICA 提取原始数据的独立分量,由于采用高阶累积量为标准,因而能够有效提取出图像中的异常信息,ICA 在该过程中也具有降维的作用。Wang Jing 详细讨论了 ICA 用于高光谱图像降维的问题,提出了三种降维方案^[78],并在文献^[79]中利用独立分量进行端元提取等。可以说,Wang J, Ramakrishna B 和 Chang C I 等在 ICA 应用于高光谱图像处理方面做出了很大的贡献。Li S P 在 2000 年提出了任意形状小波变换(Shape Adaptive Discrete Wavelet Transform, SA DWT), Cagnazzo M 等将高光谱图像划分成多个区域,利用 KLT 和 SA DWT 分别去除每个区域的谱间和空间相关性,为各个区域分配最优的压缩码率,采用任意形状 SPIHT 算法进行压缩^[80],实验结果表明该方案能够更好地利用不同地物的统计特性,并且具有较好的实际应用前景。

吴家骥提出了一种非对称的三维小波变换和三维集合块分裂的高光谱图像压缩算法,其改进之处主要在于采用非对称小波去除波段间的冗余^[81]。陈雷根据光谱维和空间维所具有的不同统计特性,提出了一种基于非一致小波基的压缩算法,对不同维使用不同的小波基,并与去偶的小波变换结构相结合,能够有效提高压缩性能,并且不需要额外的计算量^[82]。闫敬文提出了一种分组 KLT 与整数小波变换相结合的近无损压缩算法,采用先分组、后分块的思路对高光谱图像进行光谱维 KL 变换,算法较为复杂^[83]。罗建书将分类预测技术应用于 3D SPIHT 算法中,进一步去除了谱间相关性^[84]。侯颖提出了一种基于三维集合分裂嵌入式零块编码的高光谱图像压缩方案^[85],该方案结合了嵌入式零块编码算法和 SPECK 算法的优点,取得了较好的

压缩性能和分类结果。赵春晖在充分考虑高光谱图像相关性特点的基础上,将自适应波段选择的降维方法与基于神经网络的矢量量化方法相结合,实效了高光谱图像的有效压缩^[86]。周正等人提出了自适应谱段分组算法,并结合谱间预测和位平面编码分别消除了高光谱图像的谱间和空间冗余^[87]。苏令华总结了高光谱图像质量评价技术的研究进展情况^[88,89],并给出了一种有效的高光谱图像压缩质量评价方法。张立燕利用低概率异常检测算法检测图像中的奇异点,并对奇异像元进行算术编码,有效保护了图像中的异常信息^[90],但该方法仅对各个波段进行压缩,压缩性能不高。冯燕将 ICA 用于高光谱图像降维与压缩,采用预测与自适应算法编码对降维后的图像进行压缩^[91]。针对高光谱图像小目标检测的应用背景,苏令华和万建伟提出了基于维数修正与 FastICA 的高光谱图像压缩技术,所提取的独立分量有效保持了高光谱图像中的异常目标,实现了对异常目标的有效保护。张钧萍等提出了一种基于感兴趣信息保护的高光谱图像压缩算法^[94],其感兴趣信息包括感兴趣区域以及感兴趣波段两部分,并对感兴趣信息实施了不同程度的保护。

4 高光谱图像压缩技术的发展趋势

鉴于高光谱数据不同于一般的遥感数据,采用传统的图像压缩方法难以获得理想的压缩效果,必须紧密结合高光谱数据自身的特点进行压缩方法的研究。此外,高光谱数据的压缩并非其最终目的,压缩方法只有与高光谱图像特定的后续应用相结合才有生命力。如前所述,高光谱数据已经在许多方面获得了广泛使用,针对不同的实际应用所采用的压缩方法往往会有所不同,对高光谱数据压缩质量的要求也不尽相同。因此,必须根据高光谱数据特定的后续应用研究相应的压缩算法。在精细农业、植被研究以及地质勘探等方面,多数情况下主要依靠高光谱数据所提供的被观测对象的光谱特征,以便尽可能精确分析被观测对象的性质与状态,此类应用对高光谱数据传输的实时性要求并不苛刻,故适合采用无损压缩的方式对高光谱数据实施压缩。在战场环境下,高光谱遥感主要应用于军事侦察与伪装识别方面,战机的稍纵即逝对高光谱数据的传输提出了更高的要求,此外,战场恶劣的信道环境也对算法在压缩性能与抗误码性能上的要求更为苛刻,在此情形下,无损压缩已经难以满足实际应用的需求,必须利用高保真的有损压缩技术减少数据量。在军事侦察的应用背景下,异常探测与目标检测已经成为高光谱图像最为重要的两个应用方向,在无任何先验信息的条件下,要求压缩算法能够尽可能保护图像中的异常或小目标信息。

4.1 高光谱图像感兴趣区域编码技术

针对高光谱图像无损压缩而言,结合分类预处理

的压缩技术受到青睐,但如何减小运算量是一个值得深入讨论的课题。由于无损压缩的压缩比普遍较低,其应用范围受到了较大限制。目前,有损压缩并不仅仅追求较高的信噪比,如何在压缩过程中尽可能减少有用信息的损失正成为研究的重点。其中,高光谱图像感兴趣区域编码技术是一个值得关注的热点,尤其在军事侦察上具有较高的应用价值。高光谱图像感兴趣编码技术在实现数据有效压缩的同时,能够较好地保护图像中的感兴趣目标,使得压缩后的图像仍具有较高的实际应用价值。对于该算法而言,在未知任何先验信息条件下,如何自动提取感兴趣的目标是一个难点问题,而这又涉及高光谱图像目标检测方面的内容。此外,在高光谱图像存在多个目标的情况下,如何在压缩过程中更为合理地对 ROI 与 BG 进行码率分配,以达到最佳的压缩效果,也是值得深入研究的内容。

4.2 高光谱图像质量评价技术

高光谱图像质量评价技术也是高光谱图像压缩技术的一个重要发展方向。高光谱图像数据具有别于二维静止图像和视频数据的独特特点。十几年来,在二维静止图像压缩算法研究的基础上,许多新型的、针对高光谱数据独有特点的压缩方法相继被提出。压缩算法的多样性及其不断发展,又带来一个新的关键问题:数据压缩并不是高光谱数据应用的最终目标,数据的三维特点又决定了其应用过程主要是机器算法实现而非人眼的直观感知,在此情况下,衡量图像质量的标准与二维静止图像不尽相同。因此,高光谱图像压缩质量评估成为一项专门技术。目前,高光谱图像质量评价技术的研究尚处于初级阶段,可以预见,高光谱图像质量评价技术的研究必将极大促进高光谱图像压缩技术的发展。

高光谱图像压缩技术并不是孤立的,它与高光谱图像异常检测、目标检测以及分类技术是紧密相连、相辅相成的。因此,从某种意义上说,高光谱图像压缩技术的发展依赖于相关的信号处理新技术的出现,只有这样,高光谱图像压缩领域才会充满生机与活力。

5 结束语

高光谱遥感从诞生到现在已经走过了近 30 年的历程。虽然成像光谱技术已经初步展示了其优越的性能,并在很多领域获得了巨大成功,但到目前为止,国内外常用的成像光谱仪仍以航空机载为主。要使得成像光谱技术进入实用阶段,必须实现航空高光谱遥感向航天高光谱遥感的转变,在这个转变过程中存在许多亟待解决的技术难题。虽然高光谱遥感在硬件上已经取得了较大进步,但与其相关的数据处理技术发展滞后,使得高光谱遥感数据难以得到充分应用,在很大程度上制约着高光谱遥感技术的发展,其中如何对高

光谱数据实施有效的压缩,缩小信号带宽仍是目前成像光谱技术中需要迫切解决的难题之一。

高光谱图像压缩技术的研究多偏重于理论上的创新,今后需要结合我国航天成像光谱仪发展的实际,开展算法的硬件实现,开发出适用于我国星载成像光谱仪的高光谱数据压缩系统。在军事应用背景下,需要紧密结合军事应用需求以及我军现有的武器装备,充分发挥高光谱遥感在军事侦察上的优势,切实提高我军在军事侦察与战场感知方面的能力。

参考文献

- [1] 张晓玲,沈兰荪. 高光谱图像的无损压缩研究进展[J]. 测控技术,2004,23(5):23-27.
- [2] 张良培,张立福. 高光谱遥感[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005.
- [3] 童庆禧,张兵,郑芬兰. 高光谱遥感的多学科应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [4] 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [5] 万余庆,谭克龙,周日平. 高光谱遥感应用研究[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [6] Memon N D, Sayood K, Magliveras S S. Lossless Compression of Multispectral Image Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(2): 282-289.
- [7] 吴铮,何明一,冯燕. 基于误差补偿预测树的多光谱遥感图像无损压缩方法[J]. 遥感学报,2005,9(2):143-147.
- [8] 夏豪,张荣. 基于改进预测树的超光谱遥感图像无损压缩方法[J]. 电子与信息学报,2009,31(4):813-817.
- [9] 何岳,王素玉,沈兰荪. 高光谱图像无损压缩算法的DSP优化实现[J]. 计算机应用研究,2008,25(1):178-181.
- [10] Mielikainen J. Lossless Compression of Hyperspectral Images Using Lookup Table[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2006, 13(3): 157-160.
- [11] Wu X L, Memon N D. Context-Based, Adaptive Lossless Image Coding[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(4): 437-444.
- [12] Memon X. Wu; N. D. Context Based Lossless Intra-band Adaptive Compression-Extending Calic[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 9: 994-1001.
- [13] Magli E, Olmo G, Quacchio E. Optimized Onboard Lossless and Near-Lossless Compression of Hyperspectral Data Using CALIC[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(1): 21-25.
- [14] Rizzo F, Carpentieri B. High Performance Compression of Hyperspectral Imagery with Reduced Search Complexity in

- the Compressed Domain[A]. Proceedings of the Conference on Data Compression[C], Snowbird, USA, 2004: 479-488.
- [15] Rizzo F, Motta G, Carpentieria B, et al. Lossless Compression of Hyperspectral Imagery: A Real Time Approach [A]. Proceedings of the SPIE[C], Bellingham, USA, 2005: 262-272.
- [16] Wang H Q, Babacan S D, Sayood K. Lossless Hyperspectral Image Compression Using Context-Based Conditional Averages[A]. Proceedings of the Data Compression Conference[C], Snowbird, USA, 2005: 418-426.
- [17] Slyz M, Zhang L. A Block-Based Inter-Band Lossless Hyperspectral Image Compressor[A]. Proceedings of the Data Compression Conference [C], Snowbird, USA, 2005: 427-436.
- [18] Aiazzi B, Alba P S, Alparone L, et al. Reversible Compression of Multispectral Imagery Based on an Enhanced Inter-Band JPEG Prediction[A]., 1997: 1990-1992.
- [19] Zhang J, Liu G Z. An Efficient Reordering Prediction-Based Lossless Compression Algorithm for Hyperspectral Images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(2): 283-287.
- [20] 王朗,郭树旭. 基于双向波段预测的超光谱图像无损压缩[J]. 吉林大学学报,2009,27(3):304-308.
- [21] 孙蕾,罗建书. 基于多波段谱间预测的高光谱图像无损压缩算法[J]. 电子与信息学报,2007,29(12): 2876-2879.
- [22] 霍承,富张荣. 基于搜索最优双预测波段的超光谱遥感图像无损压缩[J]. 电子与信息学报,2009,31(5): 1144-1147.
- [23] 张晓玲,毋立芳,沈兰荪. 基于感知器的遥感图像无损压缩编码[J]. 电子与信息学报,2001,23(7):712-715.
- [24] Jain S K, Adjero D. A. Edge-Based Prediction for Lossless Compression of Hyperspectral Images[A]. Proceedings of Data Compression Conference [C], Snowbird, USA, 2007: 153-162.
- [25] Mielikainen J, Toivanen P, Kaarna A. Linear Prediction in Lossless Compression of Hyperspectral Images[J]. Optical Engineering, 2003, 43(4): 1013-1017.
- [26] 苏令华,程翥,万建伟. 基于同类邻点预测的高光谱图像无损压缩[J]. 信号处理,2007,23(4):544-547.
- [27] 苏令华,万建伟. 基于单邻点多波段预测的高光谱图像无损压缩算法[J]. 遥感学报,2007,11(2):166-170.
- [28] Aiazzi B, Alba P S, Alparone L, et al. Reversible Compression of Hyperspectral Imagery through Inter-Band Fuzzy Prediction and Context Coding[A]. Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium[C], 1998: 2685-2687.
- [29] Aiazzi B, Alba P S, Alparone L, et al. Lossless Compression of Multi/Hyperspectral Imagery Based on 3-D Fuzzy Prediction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37: 2287-2294.
- [30] Aiazzi B, et al. Crisp and Fuzzy Adaptive Spectral Predictions for Lossless and Near-Lossless Compression of Hyperspectral Imagery[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(4): 532-536.
- [31] Romines K. Hyperspectral Image Compression with Optimization for Spectral Analysis[D]. 2005.
- [32] 郝鹏威,石青云. 可逆线性变换的整数实现[J]. 中国科学,2000,4(2):132-141.
- [33] Hao P W, Shi Q Y. Matrix Factorizations for Reversible Integer Mapping[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2001, 49(10): 2314-2324.
- [34] Hao P W, Shi Q Y. Reversible Integer KLT for Progressive-to-Lossless Compression of Multiple Component Images[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C], 2003: 633-636.
- [35] Sweldens W. The Lifting Scheme: A Custom Design Construction of Biorthogonal Wavelets[J]. Journal of Applied and Computer Harmonic Analysis, 1996, 3(2): 186-200.
- [36] Kaarna A. Integer PCA and Wavelet Transforms for Multispectral Image Compression[A]. Proceedings of International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium[C], Sydney, Australia, 2001, 4: 1853-1855.
- [37] Mielikainen J, Kaarna A. Improved Back End for Integer PCA and Wavelet Transforms for Lossless Compression of Multispectral Images[A]. Proceedings of 16th International Conference on Pattern Recognition[C], Quebec, Canada, 2002, 2: 257-260.
- [38] Galli L, Salzo S. Lossless Hyperspectral Compression Using KLT[A]. Proceedings of International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Alaska, USA, 2004, 1: 313-316.
- [39] Zhang J, Liu G Z. Novel Lossless Compression for Hyperspectral Images by Context-Based Adaptive Classified Arithmetic Coding in Wavelet Domain[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(3): 461-465.
- [40] Wang L, Wu J J, Jiao L C. Lossy-to-Lossless Hyperspectral Image Compression Based on Multiplierless Reversible Integer TDLT/KLT[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(3): 587-591.
- [41] Tang X L, Pearlman W A. Lossy-to-Lossless Block-Based Compression of Hyperspectral Volumetric Data[A]. International Conference on Image Processing[C], Singapore, 2004: 3283-3286.
- [42] Tang X L, Cho S, Pearlman W A. 3D Set Partitioning Coding Methods in Hyperspectral Image[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing

- [C], Barcelona, Spain, 2003: 239-242.
- [43] Tang X L, Pearlman W A. Progressive Resolution Coding of Hyperspectral Imagery Featuring Region of Interest Access[A]. Proceedings of SPIE [C], Orlando, USA, 2005: 270-280.
- [44] 张培强. 基于波段分组的3D-SPIHT 高光谱图像无损压缩算法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(4): 425-430.
- [45] 柴焱, 计文平, 沈兰荪. 一种基于混合整型变换和3D-SPIHT 的高光谱图像嵌入式无损压缩方法[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1770-1773.
- [46] 黄菁, 朱日宏, 李建欣. 基于三维整数小波变换的高光谱图像编码方法[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(12): 2274-2279.
- [47] 罗欣, 郭雷, 杨诸胜. 基于可逆整数变换的高光谱图像无损压缩[J]. 光子学报, 2007, 36(8): 1457-1462.
- [48] 解成俊, 田永清. 基于DWT和减影混合变换的超光谱图像无损压缩算法研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(1): 255-257.
- [49] Ryan M J, Arnold J F. The Lossless Compression of AVIRIS Images by Vector Quantization[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(3): 546-550.
- [50] Ryan M J, Pickering M R. An Improved M-NVQ Algorithm for the Compression of Hyperspectral Data[A]. Proceedings of International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Hawaii, USA, 2000: 600-602.
- [51] Motta G, Rizzo F, Storer J A. Compression of Hyperspectral Imagery[A]. Proceedings of the Data Compression Conference[C], Snowbird, USA, 2003: 333-342.
- [52] Motta G, Rizzo F, Storer J A. Partitioned Vector Quantization: Application to Lossless Compression of Hyperspectral Images[A]. Proceedings of International Conference on Multimedia and Expo[C], Baltimore, USA, 2003: 553-556.
- [53] 吴铮, 何明一. 基于小波变换和分段DPCM混合编码的多光谱遥感图像压缩算法[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(6): 747-754.
- [54] 吴冬梅, 王军, 张海宁. 基于谱间DPCM和整数小波变换的超光谱图像无损压缩[J]. 光子学报, 2008, 37(1): 156-159.
- [55] 陈亮, 刘代志, 黄世奇. 基于光谱角匹配预测的高光谱图像无损压缩[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1894-1898.
- [56] 向露, 况军, 韦文超. 基于整数小波和三维自适应的高光谱图像无损压缩算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(13): 197-199.
- [57] 陈雨时, 张晔, 张钧萍. 基于线性模型最优预测的高光谱图像压缩[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(3): 368-372.
- [58] 孙蕾, 罗建书, 谷德峰. 基于谱间预测和码流预分配的高光谱图像压缩算法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 752-757.
- [59] Zhou Z, Tan Y, Liu J. Satellite Hyperspectral Imagery Compression Algorithm Based on Adaptive Band Regrouping[A]. International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing[C], Wuhan, China, 2006: 1-4.
- [60] Lee H S, Younan N H, King R L. Hyperspectral Image Cube Compression Combining JPEG-2000 and Spectral Decorrelation[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Toronto, Canada, 2002: 3317-3319.
- [61] Rucker J T, Fowler J E, Younan N H. JPEG2000 Coding Strategies for Hyperspectral Data[A]. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Seoul, South Korea, 2005: 128-131.
- [62] Du Q, Fowler J E. Hyperspectral Image Compression Using JPEG2000 and Principal Component Analysis[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(2): 201-205.
- [63] Penna B, Tillo T, Magli E, et al. A New Low Complexity KLT for Lossy Hyperspectral Data Compression [A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Denver, USA, 2006: 3525-3528.
- [64] Penna B, Tillo T, Magli E, et al. Transform Coding Techniques for Lossy Hyperspectral Data Compression [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1408-1421.
- [65] Dragotti P L, Poggi G, Ragozini A R P. Compression of Multispectral Images by Three-Dimensional SPIHT Algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 416-428.
- [66] Tang X L, Pearlman W A, Modestino J W. Hyperspectral Image Compression Using Three-Dimensional Wavelet Coding [A]. Proceedings of the SPIE/IS&T Electronic Imaging [C], Santa Clara, 2003: 1037-1047.
- [67] Christophe E, Mailhes C, Duhamel P. Hyperspectral Image Compression: Adapting SPIHT and EZW to Anisotropic 3D Wavelet Coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(12): 2334-2346.
- [68] Liu G, Zhao F. Efficient Compression Algorithm for Hyperspectral Images Based on Correlation Coefficients Adaptive 3D Zerotree Coding [J]. IET Image Processing, 2008, 2(2): 72-82.
- [69] Penna B, Tillo T, Magli E, et al. Progressive 3-D Coding of Hyperspectral Images Based on JPEG 2000 [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 125-129.
- [70] Penna B, Tillo T, Magli E, et al. Embedded Lossy to Lossless Compression of Hyperspectral Images Using JPEG

- 2000[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C], Seoul, Korea, 2005: 140-143.
- [71] Christophe E, Leger D, Mailhes C. Quality Criteria Benchmark for Hyperspectral Imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(9): 2103-2114.
- [72] Penna B, Tillo T, Magli E, et al. Hyperspectral Image Compression Employing a Model of Anomalous Pixels[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(4): 664-668.
- [73] Du Q, Zhu W, Fowler J E. Anomaly-Based Hyperspectral Image Compression[A]. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C], Boston, USA, 2008: 974-977.
- [74] Carvajal G, Penna B, Magli E. Unified Lossy and Near-Lossless Hyperspectral Image Compression Based on JPEG 2000[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4): 593-597.
- [75] 周宗潭,董国华,徐昕,等. 独立成份分析[M]. 北京: 电子工业出版社,2007.
- [76] Ramakrishna B, et al. Spectral/Spatial Hyperspectral Image Compression in Conjunction with Virtual Dimensionality[A]. Proceedings of the SPIE[C], Boston, USA, 2005: 772-781.
- [77] Wang J, Chang C-I. Mixed PCA/ICA Spectral/Spatial Compression for Hyperspectral Imagery[A]. Proceedings of the SPIE[C], Boston, USA, 2005: 11-22.
- [78] Wang J, Chang C-I. Independent Component Analysis-Based Dimensionality Reduction with Applications in Hyperspectral Image Analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(6): 1586-1600.
- [79] Wang J, Chang C-I. Applications of Independent Component Analysis in Endmember Extraction and Abundance Quantification for Hyperspectral Imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2601-2616.
- [80] Cagnazzo M, Poggi G, Verdoliva L. Region-Based Transform Coding of Multispectral Images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(12): 2916-2926.
- [81] 吴家骥,吴振森,吴成柯. 超光谱图像的三维小波嵌入零块压缩编码[J]. 软件学报,2007,18(8):461-468.
- [82] 陈雷. 一种非一致小波基的超光谱图像压缩方法[J]. 光电工程,2009,36(6):31-36.
- [83] 闫敬文,屈小波,陈嘉臻. 分组 Karhun-Loeve 变换/整数小波变换高光谱影像无损压缩新方法[J]. 光学学报,2007,27(10):1740-1744.
- [84] 罗建书,卓红艳,孙蕾. 基于分类和 3D-SPIHT 算法相结合的多光谱图像压缩[J]. 电子与信息学报,2006, 28(9):1607-1610.
- [85] 侯颖,刘贵忠. 基于三维集合分裂嵌入式零块编码算法的超光谱图像压缩[J]. 光学学报,2008,28(1):67-73.
- [86] 赵春晖,陈万海,张凌雁. 一种基于矢量量化的高光谱遥感图像压缩算法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2006, 27(3):447-452.
- [87] 周正,谭毅华,柳健,等. 基于自适应谱段分组的超光谱图像压缩算法[J]. 华中科技大学学报,2009, 36(3):77-80.
- [88] 苏令华,万建伟. 高光谱图像压缩质量评价技术研究进展[J]. 中国图象图形学报,2008,13(8):1389-1395.
- [89] 苏令华,杨俊岭,万建伟. 矢量量化高光谱数据压缩性能评估[J]. 计算机工程与科学,2007,29(9):68-70.
- [90] 张立燕,谌德荣,李世义,等. 基于低概率检测的高光谱图像无损压缩方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008,28(1):307-310.
- [91] 冯燕,何明一,宋江红,等. 基于独立成分分析的高光谱图像数据降维及压缩[J]. 电子与信息学报,2007, 29(12):2871-2875.
- [92] 苏令华,李纲,衣同胜,等. 一种稳健的高光谱图像压缩方法[J]. 光学精密工程,2007,15(10):1609-1615.
- [93] 苏令华,衣同胜,万建伟. 基于独立分量分析的高光谱图像压缩[J]. 光子学报,2008,37(5):973-976.
- [94] Zhang J P, Peng W M, Chen Y S, et al Imagery Compression Based on the Protection of Information of Interest [A]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Boston, USA, 2008: 966-969.

作者简介



万建伟(1964-),男,汉族,江西南昌人,教授,博士生导师,主要从事图像处理与雷达信号处理方面的研究。



粘永健(1982-),男,汉族,山东莱阳人,博士研究生,主要研究遥感图像处理。



苏令华(1979-),男,汉族,山东枣庄人,博士后,主要从事现代信号处理方面的研究。

辛勤(1973-),男,汉族,江西南昌人,博士,副教授,主要从事现代信号处理方面的研究。