

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

柴 焱, 计文平, 沈兰荪
(北京工业大学信号与信息处理研究室, 北京 100022)

摘 要: 利用高光谱图像空间、谱间相关性不同的特点, 本文提出了一种基于混合整型变换和三维分层树集合划分算法(3D-SPIHT)的高光谱图像无损压缩方法, 首先将波段进行分组, 针对每一分组, 采用不同的整型变换技术去相关, 然后对变换系数进行系数重组, 采用高效的基于小波系数特点的 3D-SPIHT 编码方法得到嵌入式码流, 具有一定的抗误码性能. 实验结果表明, 该方法能够有效的去除高光谱图像的空间和谱间相关性, 与现有的国际标准 JPEG-LS、JPEG2000 和基于三维离散余弦变换(3D-DCT)或三维离散小波变换(3D-DWT)的编码方法相比, 压缩后的平均比特率均有明显降低.

关键词: 高光谱图像; 无损压缩; 整型变换; 系数重组; 三维分层树集合划分算法

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2007) 09-1770-04

Hyperspectral Image Lossless Compression Algorithm
Based on Hybrid Transform and 3D-SPIHT

CHAI Yan, JI Wenping, SHEN Lansun
(Signal and Information Processing Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Using the spatial and spectral correlation within the hyperspectral images, a lossless compression algorithm is presented. Band grouping is used to divide images into different groups. Different hybrid integer transform based on spatial/ spectral correlation is taken for each group and to achieve progressive bit stream, coefficients are reorganized to obtain the same structure as wavelet transformation. Transformation coefficients are then coded by bit plane based 3D-SPIHT coding algorithm. Experimental results show that the proposed method can remove the spatial and spectral redundancy more efficiently than JPEG-LS, JPEG2000 and the algorithms based on integer 3D-DCT or 3D-DWT. With band grouping and progressive bit stream, the proposed method can achieve better error resilient performance.

Key words: hyperspectral image; lossless compression; integer transform; coefficient reorganization; 3D-SPIHT

1 引言

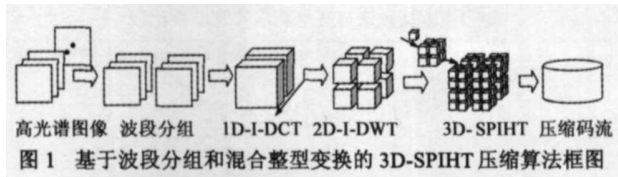
遥感技术自 20 世纪 60 年代兴起以来, 得到了迅速的发展. 随着新型传感器的出现, 遥感图像的时间、空间和光谱分辨率不断提高, 数据量也呈几何级数增长, 给数据的传输和存储带来了极大的挑战, 亟待对其进行高效的压缩编码. 高光谱图像获取代价昂贵, 具有长期保存价值, 通常采用无损压缩方法. 针对高光谱图像的特点, 人们提出了不少高光谱图像无损压缩方法, 通过波段排序^[1]、排序置换^[2]、预测变换^[3,4]、矢量量化^[5]等方法, 或几种方法结合使用. 为更有效地去除高光谱图像

空间相关性和谱间相关性, 本文提出了一种新的基于混合整型变换和 3D-SPIHT 的高光谱图像无损压缩方法.

2 基于混合整型变换和 3D-SPIHT 的高光谱图像无损压缩编码

本文提出的高光谱图像压缩算法原理框图如图 1 所示. 首先对高光谱图像进行波段分组, 每 8 波段为一组独立编码, 提高抗误码性能, 针对每一分组分别采用整型 DCT 去除谱间相关性, 采用基于(5, 3)小波滤波器的二维整型 DWT 变换去除空间相关性, 对变换系数进行 DCT 系数重组和 3D-SPIHT 扫描, 然后进行基于上下

文的算术编码,得到具有渐进传输特性的压缩码流。



2.1 整型变换

传统的 WT、DCT 等变换在压缩编码过程中,变换后的系数都是小数,这样将导致失真,因而在无损压缩时,必须输出误差图像,才能保证不失真地恢复出原始图像。Swelden 提出一种提升方案(lifting scheme)^[6],通过构造紧支集双正交小波将整数映射到整数,在实现图像无损压缩时,不存在传输误差图像的问题。文献[7]仿照提升小波方法给出了一种整型 DCT 变换的实现思路。任意有限维的可逆线性变换是否可以用整数映射来实现,在于变换是否可分解为一系列可整数实现的基本结构,即变换矩阵是否存在一系列可整数实现的基本可逆矩阵(Elementary Reversible Matrix, ERM),这种矩阵分解的思想也可称为提升。通常提升矩阵指的是上三角阵或下三角阵。文献[7]还指出对于 $N \times N$ 的非奇异矩阵,除排列矩阵外,可以有不超过 $N+1$ 个单行基本可逆矩阵(SERM, Single-Row ERM)分解。本文就是利用这种分解方法实现整型 DCT 变换矩阵的。

2.2 混合整型变换

现有的高光谱图像压缩方法很多都是利用小波变换进行谱间去相关,然后按照二维图像压缩方法进行处理。但少有文献分析为什么在谱间选择小波变换,选择何种小波滤波器。本文通过实验分析了选择不同的滤波器和不同的变换方法对压缩结果的影响。表 1 为采用不同变换方法去相关后的图像零阶熵值:

表 1 整型 DCT 和整型 DWT 去相关的结果比较

OMIS-I	2D-DCT (bpp)	3D-DCT (bpp)	2D-DWT (bpp)	3D-DWT (bpp)
S1	3.84	3.34	3.66	3.36
S2	3.76	3.31	3.61	3.35
S3	4.33	3.59	4.19	3.66
S4	3.48	3.13	3.42	3.25

由表 1 可知,相对于二维整型 DCT 变换,采用二维整型 DWT 变换后图像的熵值更低,说明小波变换能更有效的去除高光谱图像的空间冗余;而相对于三维整型 DWT 变换,采用三维整型 DCT 变换后图像的熵值更低,说明整型 DCT 变换去除高光谱图像谱间相关性的效果更好。因此本文算法对高光谱图像在空间去相关采用整型 DWT 变换,在谱间去相关采用整型 DCT 变换。

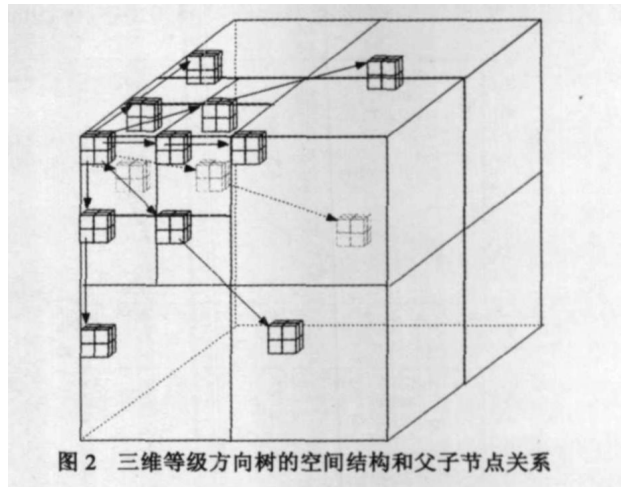
2.3 DCT 系数重组

在变换编码中,许多图像编码方法都是基于小波

变换的,如 EZW、SPIHT、ZTE、EBCOT 的方法。所有这些基于小波的算法,其高压缩性能很大一部分归功于它的编码部分,因为它们都采用了高效的位平面量化方法,充分利用了变换系数的分布规律,但这些不是小波变换独有的性质,其他的变换也可以使用这些编码方法。文献[8]首次提出 DCT 变换系数重组的思想,基于 DCT 变换实现嵌入式图像编码方法,结果好于其他以 DCT 为基础的图像编码方法,图像重建质量还优于 Shapiro 的 EZW 编码方法。

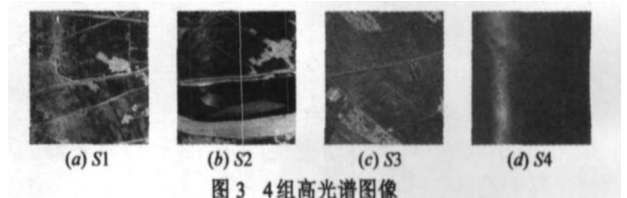
2.4 3D-SPIHT 编码

为了将这种高效的嵌入式编码方法应用于高光谱图像压缩,就要设法将 2D-SPIHT 零树编码算法推广到 3D-SPIHT^[9]。首先通过三维小波变换获得金字塔型小波系数结构,每个节点具有 8 个后代或者没有后代(叶节点),每 $2 \times 2 \times 2$ 相邻节点形成一组。同样,以最高一级金字塔结构中的系数作为根节点并且仍以 $2 \times 2 \times 2$ 的相邻节点组成一组,其中每一组的左上节点没有后代。因此,类似的父子节点的树型关系如图 2 所示。本文方法将 DCT 系数重排之后也得到了类似 3D-SPIHT 的系数结构,来进行后面的熵编码形成嵌入式码流。



3 实验结果与分析

实验图像为上海技术物理研究所研制的实用型模块化成像光谱仪 OMIS-I 获得的 128 波段($0.46\mu\text{m} \sim 12.5\mu\text{m}$)高光谱图像,这里对图 3 所示的 4 组高光谱图像进行实验,每组图像大小为 $512 \times 512 \times 128$,为了便于计算,将像素深度量化为 8bpp。



实验采用 5 种压缩编码方法,包括 JPEG 2000、JPEG-

LS 和 3 种不同整型变换与 3D-SPIHT 和基于上下文的自适应算术编码相结合的方法. 为了提高运算速度、减少内存消耗、增强抗误码性能, 每种方法都采用了分波段处理的方法, 8 个波段为一组, 128 个波段共分成 16 组. 作为对比, 我们给出了图像压缩国际标准 JPEG2000 和 JPEG-LS 的压缩结果. 由于 JPEG2000 标准^[10]中建议采用 Daubechies(9, 7) 滤波器进行有损变换, 采用 LeGall(5, 3) 滤波器进行无损变换, 并且它们都可用提升方法^[11, 12]来实现, 本文给出这 2 种滤波器的变换编码对比结果. 针对不同的整型小波滤波器, 在空域采用了 3 级小波变换, 谱间采用了 2 级小波变换.

表 2 中实验结果可见, 针对每种变换方法, 不同滤波器的平均结果并不相同. 采用整型(5, 3) 滤波器的结果要明显好于采用整型(9, 7) 滤波器的结果, 说明整型(5, 3) 滤波器更能适合空间相关性相对较低、纹理较为复杂的高光谱图像. 本文算法结果相对于 3D-DCT 的结果, 平均比特率能够降低 0.05bpp, 相对于采用整型(5, 3) 滤波器的 3D-DWT 的结果, 平均比特率能够降低 0.01~0.04bpp. 与图像压缩国际标准 JPEG2000 相比, 本文算法平均比特率能够降低 0.09~0.5bpp, 与 JPEG-LS 标准相比, 本文算法平均比特率能够降低 0.01~0.29bpp.

针对不同图像, 压缩效率均有不同提高.

表 2 本文算法与其他算法实验结果比较

OMIS-I 图像	JPEG2000 (bpp)	JPEG LS (bpp)	3DDWT-3DSPIHT (bpp)		3DDCT- 3DSPIHT	1DDCT-2DDWT- 3DSPIHT (bpp)	
			9/7	5/3	(bpp)	9/7	5/3
S1	3.51	3.34	3.62	3.27	3.31	3.49	3.26
S2	3.42	3.27	3.60	3.24	3.26	3.47	3.22
S3	4.02	3.81	3.83	3.53	3.57	3.72	3.52
S4	3.16	3.08	3.49	3.11	3.07	3.32	3.07

上述结果是 128 波段的平均值, 反映的是所有波段的整体特征. 但整体结果最好, 并不意味着组成全部波段的每个分组的结果也是最好, 为此我们进一步给出三种算法针对每组图像的实验结果, 见图 4(a)~(d). 由图 4 可以看出, 没有一种算法对所有的分组数据都是最优的, 由于不同组号对应不同波段, 不同变换方法分别在不同波段取得了最好的去相关效果. 由此可知, 针对某一固定遥感器获得的图像, 对不同波段采用不同的变换方法, 能得到更好的压缩结果. 例如, 对于遥感器 OMIS-I, 1~8 组采用 3D-DWT, 9~13 组采用 3D-DCT, 14~16 组采用 1D-DCT+2D-DWT, 在各个波段都能取得最好的去相关效果. 但这种方法的推广性相对较差, 只适用于 OMIS-I, 换作其他遥感器则需重新测定.

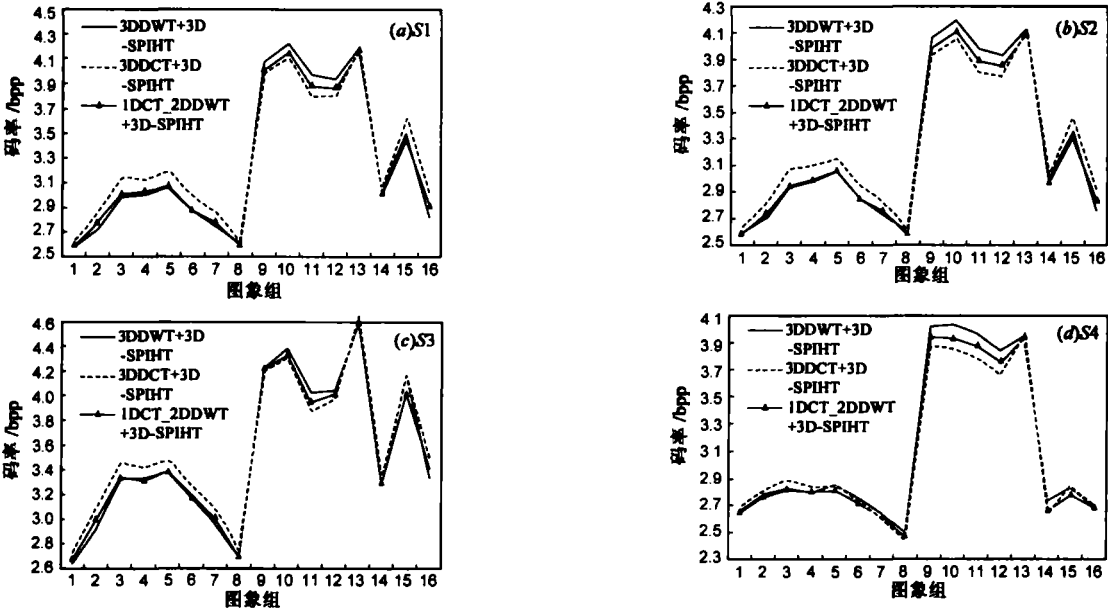


图 4 三种算法在不同分组下的结果

同样, 为了判断整型小波滤波器在不同分组波段中的效果, 我们给出(9, 7)和(5, 3)两种整型小波滤波器在 16 个分组中的结果见图 5. 由图 5 可知, 针对不同的光谱图像, 在不同的分组, 采用整型(5, 3) 滤波器的结果明显优于采用整型(9, 7) 滤波器的结果, 这跟 JPEG2000 标准中对于整型变换应采用(5, 3) 滤波器的建议是一致的.

文算法采用整型 DCT 变换进行谱间去相关, 整型 DWT 进行空间去相关, 同时选用(5, 3) 滤波器能够达到理想的高光谱图像压缩性能.

4 结论

本文针对高光谱图像的无损压缩问题, 提出了一种新的基于波段分组, 混合整型变换和 3D-SPIHT 的嵌入式编码方法. 该方法利用高光谱图像空间、谱间相关

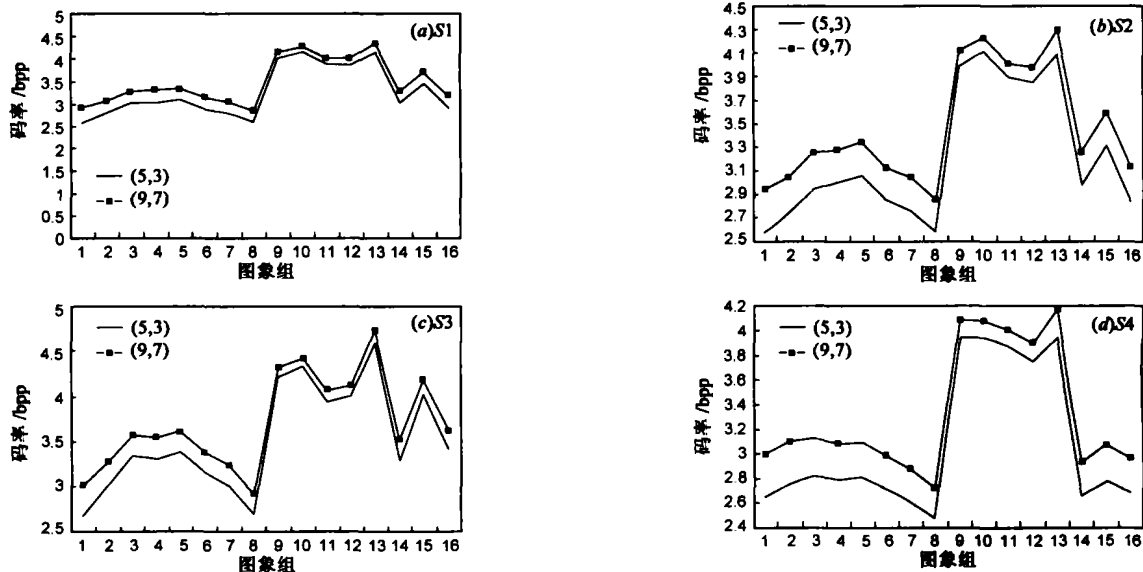


图 5 (9,7)和(5,3)整型滤波器实验结果比较

性不同的特点,采用整型 DCT 变换进行谱间去相关,采用基于 (5,3) 小波滤波器的整型 DWT 变换进行空间去相关,并通过 DCT 系数重组,利用了 3D-SPIHT 嵌入式编码方法.实验结果表明本文算法优于现有的图像压缩国际标准 JPEG2000 及 JPEG-LS 和其他基于单一三维变换的高光谱图像无损压缩方法,能够获得更高的压缩性能.同时,由于采用了波段分组和嵌入式编码技术,使得压缩后的码流具有可扩展特性和良好的抗误码性能,更适用于图像的网络传输,具有很高的实用价值.

参考文献:

- [1] TATE S R. Band ordering in lossless compression of multispectral images[J]. IEEE Transactions on Computers, 1997, 46(4): 477–483.
- [2] ARNAVUT Z. Permutations and prediction for lossless compression of multispectral TM images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 999–1003.
- [3] AIAZZI B, ALBA P, ALPARONE L, et al. Lossless compression of multi/hyper spectral imagery based on a 3 D fuzzy prediction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2287–2294.
- [4] 柴焱, 张晓玲, 沈兰荪. 一种基于 2D/3D 混合自适应预测的高光谱图像无损压缩方法[J]. 电子学报, 2005, 33(12A): 117–120.
CHAI Yan, ZHANG Xiaoling, SHEN Lansun. Lossless compression of hyperspectral images based on 2D/3D hybrid adaptive prediction[J]. Chinese Journal of Electronics, 2005, 33(12A): 117–120(in Chinese)
- [5] PICKERING M R, RYAN M J. Compression of hyperspectral data using vector quantisation and the discrete cosine transform[J]. Proceedings of 2000 International Conference on Image

Processing[C]. Vancouver: IEEE, 2000, 2: 195–198.

- [6] SWELDENS W. The lifting scheme: a custom design construction of biorthogonal wavelets[J]. Appl Comput Harmon Anal, 1996, 3(2): 186–200.
- [7] HAO Pengwei, SHI Qingyun. Matrix factorization for reversible integer mapping[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(10): 2314–2324.
- [8] XIONG Zixiang, GULERYUZ Onur G, ORCHARD Michael T. A DCT-based embedded image coder[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1996, 3(11): 289–290.
- [9] DRAGOTTI P L, POGGI G, RAGOZINI R P. Compression of multispectral images by three dimensional SPIHT algorithm[J]. IEEE Transactions on GRS, 2000, 38(1): 416–428.
- [10] ISO/IEC FDIS 15444-1. JPEG2000 part 1 final draft international standard[S]. Aug, 2000.
- [11] DAVID B H TAY. A class of lifting based integer wavelet transformation[A]. International Conference on Image Processing[C]. Thessaloniki, Greece: IEEE, 2001, 1: 602–605.
- [12] CALDERBANK A R, DAUBECHIES I, SWELDENS W, et al. Lossless image compression using integer to integer wavelet transforms[A]. IEEE International Conference on Image Processing[C]. Santa Barbara, CA: IEEE, 1997, 1: 596–599.

作者简介:



柴 焱 男, 1980 年生于北京, 现为北京工业大学信号与信息处理研究室硕士生. 主要研究方向为高光谱图像编码与处理.

E-mail: chaiyan@emails.bjut.edu.cn