

一种基于网格编码量化的高光谱 图像无损压缩方法

王 晋 张晓玲 沈兰荪 柴 焱

(北京工业大学信号与信息处理研究室, 北京 100022)

摘 要 由于遥感图像的数据量非常庞大, 给有限的存储空间和传输带宽带来很大的压力, 同时, 由于高光谱图像获取代价昂贵, 具有广泛的应用领域, 且压缩时一般不能丢失任何信息, 即要求无损压缩, 因此没有有效的压缩方法, 高光谱图像的普及应用将受到极大的限制。网格编码量化(TCQ)借鉴了网格编码调制(TCM)中信号集合扩展、信号集合划分和网格状态转移的思想, 其虽具有良好的均方误差(MSE)性能, 而且计算复杂度适中, 但目前TCQ主要被应用于图像的有损压缩, 为了对高光谱图像进行有效的无损压缩, 通过将TCQ引入高光谱图像的无损压缩, 并根据高光谱图像的特点, 提出了一种基于小波变换和TCQ的高光谱图像无损压缩方法。实验结果表明, 与JPEG2000和JPEG-LS中无损压缩算法相比, 该算法对高光谱图像具有更好的压缩性能。

关键词 高光谱图像 无损压缩 小波变换 网格编码量化

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)01-0123-05

A Lossless Hyperspectral Image Compression Method Based on Trellis-coded Quantization

WANG Jin, ZHANG Xiao-ling, SHEN Lan-sun, CHAI Yan

(Signal & Information Processing Lab, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

Abstract Huge amounts of data of hyperspectral images have become a great challenge to data storage and transmission. Due to the special way to obtain hyperspectral images, they are costly, but this kind of image can be used extensively in the meantime. Any information shouldn't be lost during compression, so an efficient lossless compression method seems to be essential. Without an efficient compression scheme, the application of hyperspectral images will be restricted. Trellis coded quantization (TCQ) inherits ideas from trellis coded modulation (TCM) the expanded signal set, set partitioning and trellis state transition. The mean squared error (MSE) performance of TCQ is excellent with modest computing complexity. At present TCQ is mainly used for lossy image compression. In this paper, we aim to develop TCQ scheme to compress hyperspectral images losslessly and find a new approach yielding higher lossless compression ratio. We take advantage of the characteristics of hyperspectral data for compression. A scheme utilizing wavelet transformation and TCQ is presented. Compared with the result of JPEG2000 and JPEG-LS, experiments show that the method presented in this paper has better performance.

Keywords hyperspectral imagery, lossless compression, wavelet transformation, trellis coded quantization(TCQ)

基金项目: 国家自然科学基金项目(60472036, 90304001); 北京市自然科学基金项目(4032008, 4052007); 北京市教委科技发展计划重点项目(KZ200310005004, KM200410005022)

收稿日期: 2004-10-14; 改回日期: 2005-03-08

第一作者简介: 王晋(1982~), 男, 2000年获北京工业大学学士学位。现为北京工业大学信号与信息处理研究室硕士研究生。主要研究方向为图像编码。Email: write_to_me99@emails.bjut.edu.cn

1 引言

成像光谱技术(imaging spectroscopy)是近年来迅速发展起来的,集传感器技术、精密光学机械、微弱信号检测、计算机技术、信息处理技术为一体的综合性技术。由于它将成像技术与光谱技术结合起来,在纳米级的光谱分辨率上,以几十至数百个波段同时对地物成像,因此可同步获得地物的空间信息、辐射信息和光谱信息。由成像光谱仪获取的图像称为高光谱图像。

由于高光谱图像的特点为波段多、光谱分辨率高、空间分辨率高,这就导致高光谱图像的数据量巨大,因而对数据的存储和传输构成极大挑战,而且由于高光谱图像数据来源昂贵,且应用广泛,如果进行有损压缩,则会丢失一些重要的信息,因此一般要求无损压缩。

针对高光谱图像兼有空间相关性和谱间相关性的特点,人们提出了不少高光谱图像无损压缩方法,例如波段排序、排序置换、预测、变换、矢量量化等方法,或是几种方法的综合使用来充分去除高光谱图像的各种冗余,以实现高效、无损的压缩。目前的高光谱图像无损压缩方法大致可以分为预测、变换和矢量量化^[1]3类。

众所周知,网格编码量化(trellis coded quantization, TCQ)技术^[2]最突出的特点在于应用了一种扩展了量化级数的结构化的码书。与其他量化算法相比,TCQ 算法不仅均方误差(mean squared error, MSE)性能较好,而且计算复杂度又非常适中。文献[3]中给出了 TCQ 的一种具体应用,用于实现灰度图像的有损压缩,称作 ACTCQ(arithmetic coding TCQ)算法。由于该算法用于灰度图像的有损压缩具有比较好的性能,因此本文以此算法为基础,并结合高光谱图像的特点,提出了一种基于 TCQ 的高光谱图像无损压缩方法,并将其应用于无损压缩领域。

2 网格编码量化

TCQ 借鉴了网格编码调制^[4](trellis coded modulation, TCM)中的信号集合扩展、信号集合划分和网格状态转移的思想,其中信号集合扩展是指使用具有 2^{R+1} 个码字的码书(它的大小是普通量化使用码书的 2 倍),并以 R 编码率对信源进行量化编

码。采用更精细的码书虽可提高重建图像的信噪比,但由于直接使用具有 2^{R+1} 个码字的码书会使码率上升一倍,为此,人们通过划分扩展的码书来实现控制码率。其一般做法是将扩展的码书划分为 4 个子集 D_0, D_1, D_2, D_3 , 每个子集可看作一个独立的量化器。对于 R 编码率的 TCQ 量化器,其输出是从 $R+1$ 编码率量化器的 2^{R+1} 个码字中选取,这些码字一般被分成 4 个子集,并按 $D_0 D_1 D_2 D_3, D_0 D_1 D_2 D_3, \dots$ 的顺序分布,直到最大值(如图 1 所示),图中 $\{b_i\}$ 表示按从小到大的顺序排列的一组码字。

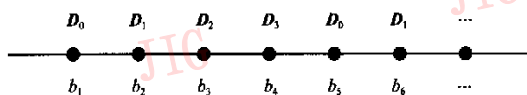


图 1 TCQ 编码器 4 子集码书划分图

Fig. 1 Codebook and partition for 4 subsets TCQ

为了使待编码序列整体编码误差最小,在编码某一输入值与另一输入值时,其状态转移采用网格加以约束,而在编码长度为 n 的序列时,则需要将 n 级网格级联起来,编码要按从左到右的顺序来遍历级联得到的整个网格,而且每一级编码过程中,都需在 4 个量化器中分别找到与输入数据最匹配的码字,并把由最匹配的码字引入的量化误差标记在相应的网格分支上,作为编码代价。最后采用维特比算法在所有合法路径中搜索一条使得输入序列与重构序列间的总体误差最小的最佳网格路径。

传统的 TCQ 编码器使用 1 比特/采样来指定网格中的路径,其余码率被用来指定被选定子集中的码字。对于这种方法,编码率显然大于 1 比特/采样。为了使编码率小于 1 比特/采样,文献[5]中提出一种改进的方法,即通过观察网格的状态转移特性不难发现,对于每个给定的网格状态,下一个码字必须从 $S_0 = D_0 \cup D_2$ 或者 $S_1 = D_1 \cup D_3$ 中选取,本文将 S_0 和 S_1 称为超集合。本方法中的全部编码率都用来指定超集合中的一个码字。由于各个子集是不相交的,因此从一个超集合中指定一个码字就唯一地决定了码字来自于哪个子集,也就指定了下一个状态。文献[5]给出了八态网格图(如图 2 所示),其可以为 TCQ 编码器提供较好的量化性能。

文献[3]提出 ACTCQ 方法,编码器实现思路是:首先将灰度图像进行小波分解^[6],然后对重要的小波系数进行网格编码量化,最后对量化后的码书索引号进行自适应的算术编码^[7],解码器就可以

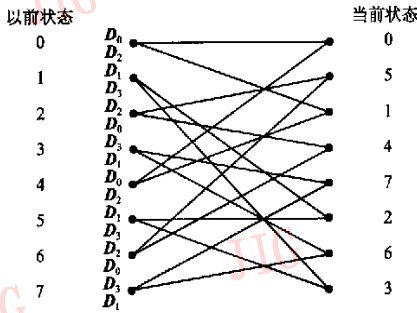


图2 4子集8态网格图

Fig.2 An 8-state trellis with subset labeling

从算术编码比特流中恢复出相应重要小波系数对应的量化值,待得到所有重要小波系数的量化值,并将非重要小波系数赋予零值后,即可对小波图像进行小波重构^[6]来得到有损的重建图像。该算法的特点是使用均一量化步长的码书,由于码书能在编、解码程序执行过程中快速生成,无须事先存储码书,且节约了因训练码书而必须耗费的大量时间,因此这样的编、解码系统具有较强的实用性。ACTCQ 编码器框图如图3所示,反之为解码器。

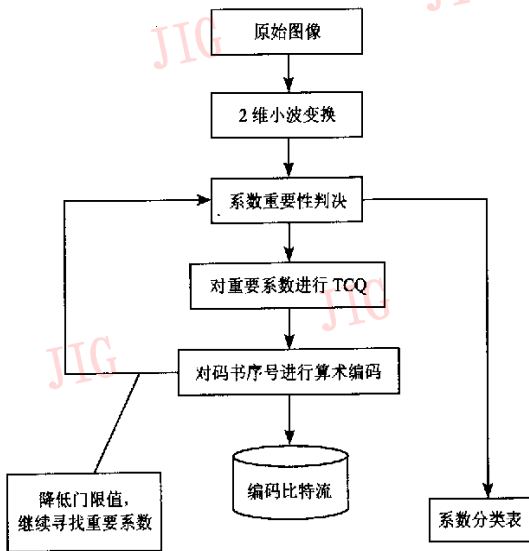


图3 ACTCQ 编码器框图

Fig.3 Diagram of ACTCQ coder

3 基于TCQ的高光谱图像无损压缩方法

鉴于高光谱图像同时具有空间/谱间相关性,故

本文采用2维小波变换来去除空间相关性,而且分别使用DPCM(differential pulse code modulation)预测和小波变换来去除谱间相关性。

本文使用DPCM预测来去除谱间相关性,其实现思路为:把高光谱图像按波段进行分组,并将分组中各波段图像与分组中第1波段图像按照对应位置相减,首先得到差图像;然后再对差图像进行ACTCQ编码。实验结果表明,这样并不能有效地去除谱间相关性,相反会使编码性能恶化。

相对于使用DPCM预测的方法,由于使用小波变换去除谱间相关性取得较好的结果,因此本文首先对高光谱图像组进行3维小波变换。3维小波变换可分为两种:方案1是将各波段图像联合起来看作一个图像立方体,同时进行水平、垂直、光谱维的3维小波变换;方案2是先将各波段图像联合起来进行光谱维的1维小波变换,然后再分别对每个波段进行2维小波变换。考虑到小波变换的级数与参与变换的数据数目有直接的约束关系,当分组中的波段数较少时,若进行如方案1的3维小波变换,光谱维可进行的小波分解级数将直接制约另两维的小波分解级数,且根据文献[8]的建议可知,第2种小波变换方案会获得更好的性能,所以本文决定按照第2种方案设计系统来实现高光谱图像的高效无损压缩。

本文将32个波段作为一个分组,选用双正交的(9,7)浮点型滤波器组进行小波变换,首先在光谱维进行5级1维小波变换;然后对每波段小波图像进行6级2维小波变换;最后使用自适应算术编码来编码误差图像。基于TCQ的高光谱图像无损压缩系统的编码器框图如图4所示,反之为解码器。

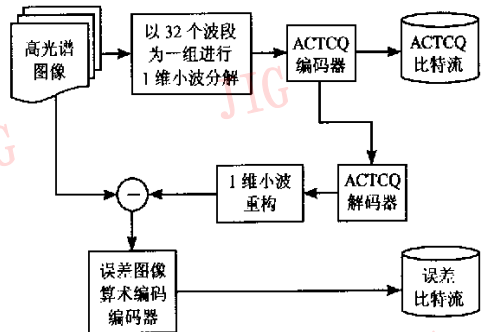


图4 高光谱图像无损压缩编码器框图

Fig.4 Diagram of lossless compression of hyperspectral images

4 实验结果

本文使用的实验图像是用上海技术物理所研制

的成像光谱仪 OMIS-I (operational modular imaging spectrometer) 于 2000 年 6 月在辽东湾航拍的 4 组高光谱图像, 共 128 个波段, 图像大小为 512×512 。图 5 分别为位于 113 波段的 4 幅图像。



图 5 高光谱实验图像
Fig. 5 Experimental hyperspectral images

为了解去谱间相关与不去谱间相关压缩的效果, 本文用 S1B 高光谱图像进行比较实验, 表 1 列出了去谱间相关与不去谱间相关进行高光谱图像无损压缩的平均编码率, 图 6 ~ 图 8 则更加详细给出了谱间去相关与不去相关的各项实验结果比较, 图 9 是中间有损重建图像峰值信噪比指标的比较。

表 1 去除谱间相关性对编码率的贡献

Tab. 1 Contribution of spectral decorrelation to bit rate

	ACTCQ 编码率 (bpp)	误差图像编码率 (bpp)	总码率 (bpp)
未去谱间相关	1.041	2.486	3.527
去谱间相关	0.725	2.501	3.226

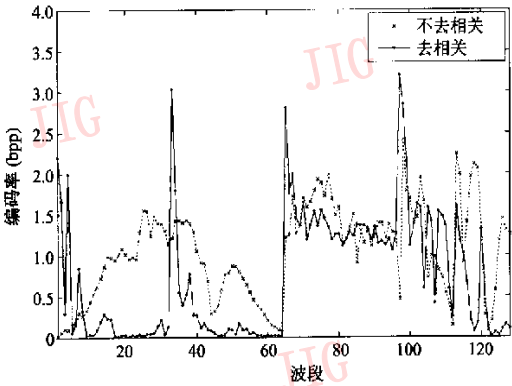


图 6 ACTCQ 编码率的比较
Fig. 6 Comparison of ACTCQ bit rate

由图 6 不难看出, 1 维谱间小波变换使得每个分组内图像的能量主要集中在前几个波段图像中, 并对应着较大的编码率; 大部分中间波段图像能量较小, 对应着较小的编码率。由于有些波段间 (如

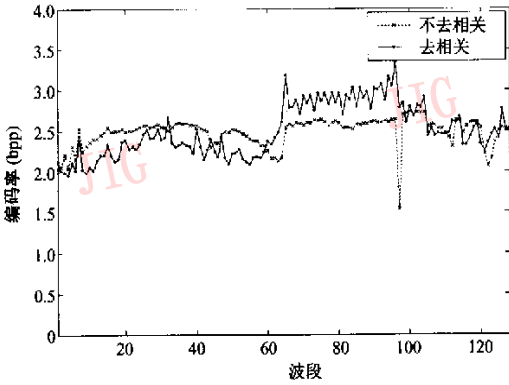


图 7 误差图像编码率的比较
Fig. 7 Comparison of error image bit rate

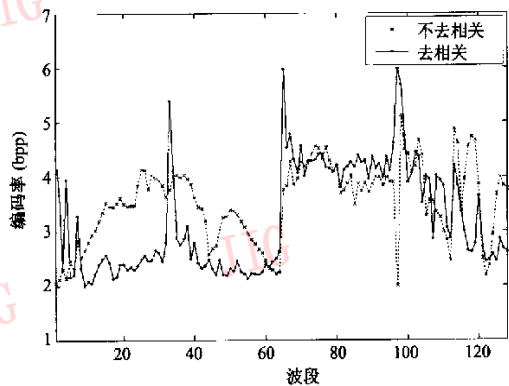


图 8 总码率的比较
Fig. 8 Comparison of total bit rate

65 ~ 128 波段) 相关性不是很高, 所以对它们使用光谱维小波变换来去相关的效果就不是很好。

由图 7 可以看出, 去谱间相关与不去谱间相关

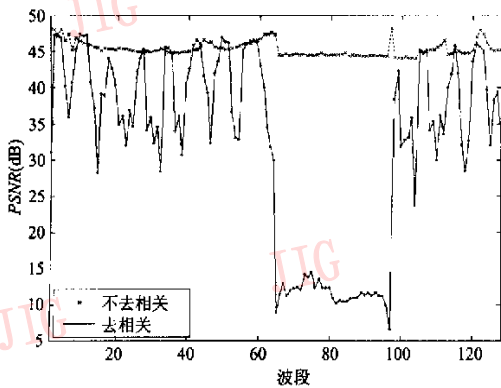


图 9 各波段重建图像峰值信噪比的比较
Fig. 9 Comparison of PSNR

时,误差图像的编码率都比较平缓,但两条曲线在 64 波段发生了变化,其表明,对相关性的不是很高的 65 ~ 128 波段图像进行去相关操作,会使有损重建图像的质量有所下降,图 9 中峰值信噪比的比较更明显地表明这一点。

将 ACTCQ 编码率和误差图像编码率相加即可得到总码率的比较情况。由于去谱间相关使得 ACTCQ 码率下降很多,而误差图像编码率增长幅度却相对较小,所以去谱间相关会使总码率有比较明显的下降,根据表 1 中给出的总码率数据可知,去除谱间相关使得总码率有 0.3bpp 的下降,这表明本文算法在谱间相关性上的处理是比较成功的。

图 9 中峰值信噪比的下降可以解释为:去除谱间相关性后,各波段图像的 ACTCQ 编码率的大幅下降必然会导致峰值信噪比性能的下降,尤其是对于相关性不是很高的波段,有损重建图像的恢复质量不高。

本文使用相同的系统对 S1B、S2B、S3B 及 S4B 高光谱图像进行了测试,并与 JPEG2000^[9]、JPEG-LS^[10]等无损压缩算法的实验结果进行了比较(如表 2 所示)。

表 2 各组高光谱图像无损压缩编码率及比较
Tab.2 Results of several hyperspectral images using the proposed method

高光谱图像	编码率(bpp)		
	JPEG2000	JPEG-LS	本文算法
S1B	3.51	3.34	3.23
S2B	3.42	3.27	3.16
S3B	4.02	3.81	3.50
S4B	3.16	3.08	2.93

表 2 实验数据表明,本文提出的算法能够有效地提高高光谱图像的压缩性能。

5 结 论

本文利用高光谱图像的特点(即高光谱图像的波段内具有空间相关性,波段间具有谱间相关性),提出了一种基于 3 维小波变换网格编码量化和自适应算术编码的无损压缩方案。实验结果表明,先将图像变换到小波域,再进行 TCQ 系数量化,能够获得较好的压缩结果。实验数据表明,本文算法的性能要优于 JPEG2000 和 JPEG-LS 标准。另外,本文提出的算法由于使用均一步长的码书,从而避免了训练码书所需花费的大量时间,具有较强的实用性。

参考文献(References)

1 Zhang Xiao-ling, Shen Lan-sun. Research advances on lossless compression of hyperspectral image [J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(5):23 ~ 27. [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 Marcellin M W, Fischer T R. Trellis coded quantization of memoryless and Gaussian-Markov sources[J]. IEEE Transactions on Communications, 1990, 38(1):82 ~ 93.

3 Joshi R L, Crump V J, Fischer T R. Image subband coding using arithmetic coded trellis coded quantization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1995, 5(6):515 ~ 523.

4 Ungerboeck G. Channel coding with multilevel/phase signals [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1982, 28(1):55 ~ 67.

5 Marcellin M W. On entropy-constrained trellis coded quantization [J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 42(1):14 ~ 16.

6 Shen Lan-sun, Zhuo Li, Tian Dong, et al. Video coding and low bit rate transmission [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2001. [沈兰荪,卓力,田栋等. 视频编码与低速率传输[M]. 北京:电子工业出版社, 2001.]

7 Witten I H, Neal R M, Cleary J G. Arithmetic coding for data compression[J]. Communications of the ACM, 1987, 30(6):520 ~ 540.

8 Fowler James E. Qcc Pack [CP/OL]. Website: <http://qccpack.sourceforge.net>.

9 Touradj Ebrahimi. The JPEG2000 still image coding system; an overview[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46(4):1103 ~ 1127.

10 Weinberger Marcelo J, Seroussi Gadiel, Sapiro Guillermo. The LOCO-I lossless image compression algorithm: Principles and standardization into JPEG-LS [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(8):1309 ~ 1324.