

基于谱间 DPCM 和整数小波变换的 超光谱图像无损压缩*

吴冬梅¹, 王军¹, 张海宁²

(1 西安科技大学 通信与信息工程学院, 西安 710054)

(2 西安工业大学 电子信息工程学院, 西安 710032)

摘 要:分析了干涉成像光谱仪所获取图像的谱间和空间相关性,提出了一种混合无损压缩方案. 首先进行谱间 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. 实验结果表明,该算法可实现无损压缩,压缩比平均可达 2.018,较二维整数小波变换算法提高 40.3%. 并且算法复杂度较低,只有加减和移位运算,易于硬件实现.

关键词:超光谱图像;无损压缩;谱间 DPCM;整数小波变换;二值自适应算术编码

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)01-0156-4

0 引言

超光谱遥感图像是三维立体图像,即在普通二维图像的基础上多了一维光谱信息,其谱段数一般在几十到几百个,因此超光谱图像的数据量巨大. 其数据压缩与普通图像有所不同,一方面,遥感图像信息的获取一般是通过航空遥感或卫星遥感等手段,所花代价昂贵,而且信息本身也十分重要,因此在对遥感图像压缩中要求失真度小,一般采用无损或近无损压缩;另一方面,在诸如军事侦察、气象预报等许多应用场合均要求实时传送图像,因此要求压缩系统要有很高的速度,并且易于用硬件实现.

文献[1]介绍了几种超光谱图像的无损压缩方法,基于小波变换的压缩方法有 3DSPIHT 和 3DEZW, 3DSPIHT 算法采用 K-L 变换去除谱间相关性,接着进行谱内小波变换,生成三维分级树结构,然后沿三维分级树结构进行 SPIHT 的扫描编码;预测算法主要有基于上下文的自适应无损压缩算法 CALIC. 作为对比也采用国际标准 JPEG-LS 和 JPEG2000 进行了超光谱图像的无损压缩,并比较了几种无损压缩算法的压缩比,平均压缩比在 1.55~1.95 之间^[1]. 并且上述几种算法复杂度较高,难于硬件实现.

本文针对超光谱遥感图像,研究压缩比达到 2 以上的无损压缩算法,并力求降低算法复杂度,以便进一步的硬件实现.

1 超光谱图像特性分析及压缩方案

成像光谱仪有很多种类,主要有色散型、滤光片型、声光调制型等,它们得到的直接就是光谱图像,

光谱分辨率高的也可称超光谱图像. 而干涉型的光测量得到的是干涉图像,要经过傅里叶变换后才能得到光谱图像. 在干涉型中又分为很多种形式,有纯时间调制的,也有纯空间调制的. 本文讨论的是由一台实际的时空混合调制型的干涉成像光谱仪,通过推扫获得的“图谱合一”图像. 其超光谱信息需要从“图谱合一”图像序列(512 幅一组)中恢复^[2]. 本文中提到的超光谱图像均指通过推扫获得的“图谱合一”图像. 由于该图像是三维图像,所以它的相关性包含空间相关性和谱间相关性两方面.

对超光谱图像的空间相关性进行分析,得到行自相关系数均值为 0.962 9,列自相关系数均值为 0.961 2,说明行列之间的相关性大体相同. 但超光谱图像的自相关系数比标准测试图 Lena 图像的自相关系数要小,即超光谱图像的相关性低于 Lena 图像. 说明超光谱遥感图像涉及到的目标多、范围广,和一般图像相比,超光谱遥感图像的细节多、纹理丰富,其结构特征很难有整体的统一性,因此像素值连续性差、相关性低.

谱间相关性是指各波段光谱图像在同一空间位置的像素有相似性. 产生这种相似性的原因有以下两点:1)光谱图像每个波段图像的像素值,是相同区域地物对各个波段光的反射强度值,相邻波段的地物反射率是相近的,由此产生了一定的相关性;2)由于不同波段的图像所涉及的地面目标相同,它们具有相同的空间拓扑结构^[3]. 经计算得到超光谱图像序列的谱间相关系数最低为 0.955 0,最高达到 0.971 3,平均 0.967 5,表明超光谱图像有较强的谱间相关性.

根据以上分析,以 512 幅一组的“图谱合一”图像序列为研究对象,提出了以下压缩方案:以超光谱图像序列前一帧作为后一帧的参考图像,首先进行

* 陕西省自然科学基金(2004F30)资助

Tel: 029-85583167 Email: wdm562@163.com

收稿日期: 2007-04-23

谱间预测,去除其谱间相关性;再对残差图像进行整数小波变换,并对小波系数进行二值自适应算术编码,去除其空间相关性.图 1 是超光谱图像压缩算法框图.

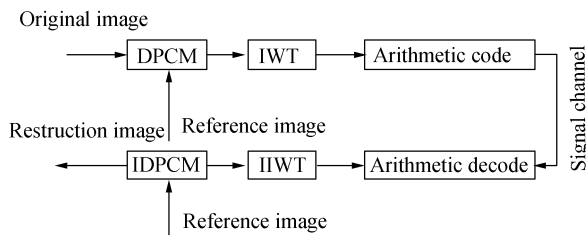


图 1 超光谱图像压缩算法框图

Fig. 1 The lossless compression algorithm of hyper-spectral image

2 压缩算法原理

2.1 谱间预测

当图像相邻像素间具有很强的相关性,可以由前面的像素值预测当前的像素值,由实际值减去预测值得到预测误差.强相关性使得预测值比较接近实际值,因此预测误差序列是均值为零和具有更小方差的序列.如果在整个编解码系统中不使用量化器,那么就可以实现无损压缩.

针对超光谱图像序列(512 帧)采用谱间预测,第一步,对超光谱图像序列 1 000 不经压缩直接进行传输,作为参考帧;第二步,系统输入原始图像 1 001,以 1 000 作为参考帧进行谱间预测,得到波段残差图像;第三步,残差图像经后续处理后,通过信道传输.在接收端,收到的残差图像与参考图像经逆预测得到恢复图像 1 001.之后均以前一帧作为后一帧的参考帧,如当传输原始图像 1 002 时,以 1 001 作为参考图像,按上述步骤完成,依此类推,直到 512 幅一组全部传输完.由于本文采用的压缩算法是完全的无损压缩,恢复图像和原始图像间的均方误差为零,因此在接收端用恢复图像作参考帧不会带来误差积累.

在具体实现时,考虑到实验用超光谱图像其相邻帧之间存在列的平移,有较大的数据冗余,而干涉条纹的空间位置相对固定.以超光谱图像 1 000 作为参考图像对 1 001 进行谱间预测时,采用 1 001 右移一列与 1 000 相减得到预测误差图像,这样,使图中主要剩下干涉条纹.从应用的角度看,预测过程中所进行的运算为加法或减法运算,易于硬件实现.

2.2 基于提升算法的整数小波变换

第二代小波的基本思想是建立在双正交小波和完全可恢复滤波器组的理论上,在保持小波双正交特性的条件下,通过提升和对偶提升过程,来改

善小波及其对偶的性能,以满足各种应用的需要.提升方法完全是基于时域的,其小波基的构造不依赖于傅里叶变换,也不需要频谱分析工具,因此可以在非平移不变区域上构造小波,非常适合于非线性、自适应、非奇异采样和整数到整数的变换.在时域中提升小波变换可以分为以下四个步骤来实现^[4-5].

1) Lazy 小波变换

设初始信号为 $s_j, j \in Z^+$, Lazy 小波变换将信号分为偶数序列和奇数序列两组,即

$$s_{1,l}^0 = \text{even}(s_j) = s_{2l} \quad (1)$$

$$d_{1,l}^0 = \text{odd}(s_j) = s_{2l+1} \quad (2)$$

2) 预测(对偶提升)

构造预测算子 P ,利用偶数序列去预测奇数序列,得到预测误差 $d_{1,l}^i$,即

$$d_{1,l}^i = d_{1,l}^{i-1} - \sum_k p_k^i s_{1,l-k}^{i-1} \quad (3)$$

3) 更新(提升)

构造更新算子 U ,通过对 $s_{1,l}^{i-1}$ 更新生成更好的子数据集,以保持原数据集 s_j 的一些特性.

$$s_{1,l}^i = s_{1,l}^{i-1} + \sum_k u_k^i d_{1,l-k}^i \quad (4)$$

4) 伸缩(假设作 M 次对偶提升和基本提升)

$$s_{1,l} = s_{1,l}^M / K \quad (5)$$

$$d_{1,l} = K d_{1,l}^M \quad (6)$$

在无损图像压缩应用中,需要输出结果完全是整数的形式.如果用标准小波变换算法对图像像素值直接作变换,会将整数像素值变为实数,在存储图像时要对实数值作取整操作,这就会造成图像的失真.基于提升算法的小波变换实现了真正意义上的无损可逆变换,因此在图像传输领域,尤其是在无损图像压缩编码方面得到了广泛的应用^[6].与第一代小波相比,提升小波变换具有以下优点:能够在当前位置完成小波变换,从而节省内存;能对任意尺寸图像进行提升变换,可以实现无损的整数小波变换;只有加减和移位运算,易于硬件实现.

2.3 二值自适应算术编码

对小波变换后的系数采用二值自适应算术编码实现压缩,该方法基于自适应算术编码的基本思想,并采用整数加法和移位来实现数据的压缩编码,与一般算术编码相比,它具有极大的灵活性和更高的逼近准确度;与自适应算术编码相比,它能自动控制进位扩散并且实现起来更容易^[7-8].

3 实验结果及分析

本文进行算法仿真所用的计算机配置为 Intel Pentium 4 处理器,CPU 速度为 2.4 GHz,256M 内存,选取 Matlab7.0 作为仿真环境,以大小为 512×

512×8Bit 的 512 帧“图谱合一”图像序列作为研究对象. 首先以 1 000 作为参考帧, 不经压缩直接传输, 然后从 1 001 开始, 以前一帧作为后一帧的参考帧, 依次压缩传输. 由于超光谱图像序列维数较大, 故计算压缩比时, 未经压缩的超光谱图像序列 1 000 传输比特数可忽略不计. 其中整数小波变换采用 S 变换, 它是 Haar 小波变换的整数运算形式, 也是最简单的整数小波变换.

图 2 为以 1 000 作为参考帧对 1 001 进行压缩的图解, 图 2(a)~(b)分别为 1 001 和 1 000 原图, 图 2(c)为 1 001 与 1 000 谱间预测误差图像, 图 2(d)、(e)分别为谱间预测误差图像的一层和三层小波分解图像, 图 2(f)为 1 001 恢复图像. 图 3 为超光谱图像序列中的 1 001~1 032 帧图像的压缩比数据折线图.

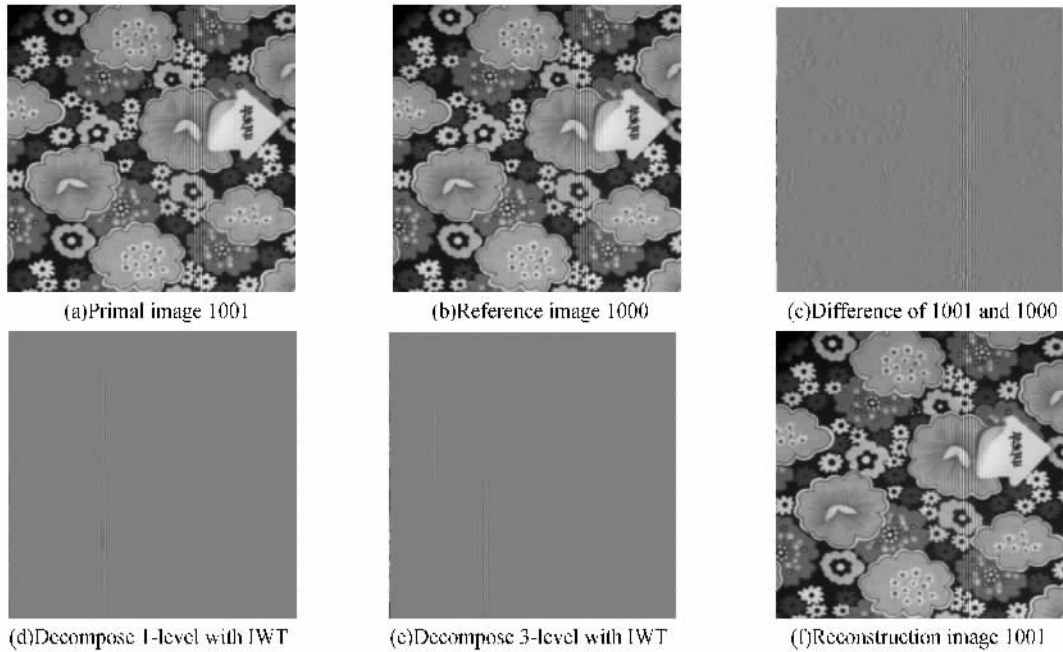


图 2 超光谱图像压缩实验图

Fig. 2 Experimental results of hyper-spectral image

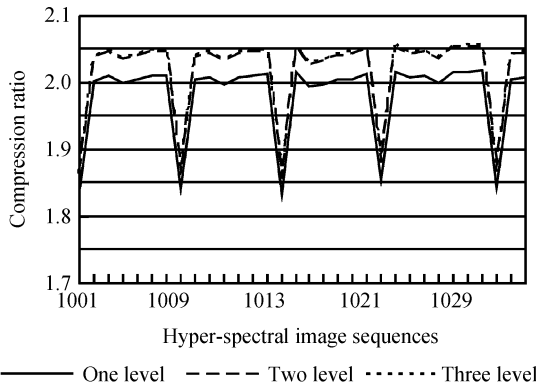


图 3 超光谱图像序列压缩比折线图(帧 1 001~1 032)

Fig. 3 Compression ratio of hyper-spectral image(frame 1 001~1 032)

表 1 为对超光谱图像序列 1 001~1 032 采用不同压缩方法时, 得到的压缩比平均值. 当采用小波三层分解时, 本文算法压缩比平均值达到 2.018, 经验证, 恢复图像和原始图像间的均方误差

表 1 32 序列超光谱图像压缩比均值

压缩方法	单幅图像二维整数小波变换(三层分解)	谱间预测加帧内二维 DPCM	本文算法(三层小波分解)
压缩比均值	1.438	1.662	2.018

为零, 表明本文采用的压缩算法是完全的无损压缩.

4 结论

对超光谱图像序列中的单幅图像, 使用二维整数小波变换(三层分解)和算术编码算法, 压缩比为 1.438, 而本文算法增加了谱间预测后, 压缩比达 2.018. 表明谱间预测可有效去除超光谱图像序列的谱间相关性, 压缩比提高了 40.3%.

若采用三维 DPCM 算法, 即谱间预测加帧内的二维 DPCM, 再对残差图像进行算术编码, 压缩比为 1.662, 本文算法使用二维整数小波变换后, 压缩比提高了 21.4%. 说明混合编码方法可以有效地提高压缩比, 是未来编码研究发展的方向, 在混合压缩算法中, 选取合适的组织方案对压缩比的提高有很大的帮助.

文献[1]中较好的 3D-SPIHT 算法的平均压缩比约为 1.93, 而本文算法达到 2.018, 较 3D-SPIHT 算法有所提高. 更重要的是 3D-SPIHT 的算法复杂度较高, 而本文压缩方案中, 谱间 DPCM 仅需简单的加、减法运算; 整数小波变换只有加减和移位运

算,能对任意尺寸图像进行提升变换,能够在当前位置完成小波变换,节省内存;二值自适应算术编码也只采用整数加法和移位来实现数据的压缩编码,避免了乘法运算.因此本文算法复杂度较低,易于硬件实现.

参考文献

- [1] ZHANG Lei, HUANG Lian-qing. Summarization of hyper-spectral image data compression algorithms [J]. *OME Information*, 2005, **1**(4): 30-33.
张雷,黄廉卿.超光谱图像数据压缩方法综述[J].光机电信息, 2005, **1**: 30-33.
- [2] WU Xiao-hua, LI Zi-tian, ZHANG Fan. Analysis and near-lossless compression based on CPLD of interference hyper-spectral image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1346-1348.
吴小华,李自田,张帆.干涉超光谱图像分析与近无损压缩 CPLD 实现[J].光子学报, 2005, **34**(9): 1346-1348.
- [3] ZHOU You-xi, XIAO Jiang. The image compression scheme for remote sense superspectral images [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 594-597.
周有喜,肖江.遥感干涉超光谱图像压缩编码[J].光子学报, 2005, **34**(4): 594-597.
- [4] DAUBECHIES I, SWELDENS W. Factoring wavelet transform into lifting step [R]. Technical Report, Bell Laboratories, Lucent Technologies, 1996.
- [5] ADAMS M, KOSENTINI F. Reversible integer to integer wavelet transforms for image compression: performance evaluation and analysis [J]. *IEEE Trans, Image Processing*, 2000, **9**(9): 1010-1024.
- [6] SUN Ji-xiang, et al. Image compression and projection reconstruction [D]. Beijing: Science Press, 2005.
孙即祥,等.图像压缩与投影重建 [D].北京:科学出版社, 2005.
- [7] XIE Lin, YU Lu, QIU Pei-liang. Research on context-based adaptive binary arithmetic coding [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2005, **39**(6): 910-915.
谢林,虞露,仇佩亮.基于上下文的自适应二进制算术编码研究 [J].浙江大学学报, 2005, **39**(6): 910-915.
- [8] YAN Zhe-nan, ZHAO Feng-guang. A efficient arithmetic codes suiting for hardware design [J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2000, **21**(2): 86-89.
严哲南,赵风光.一种适合硬件实现的高效算术编码 [J].通信学报, 2000, **21**(2): 86-89.

Research of Hyper-spectral Image Lossless Compressing Technology Based on DPCM Between Spectra and IWT

WU Dong-mei¹, WANG Jun¹, ZHANG Hai-ning²

(1 School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(2 School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Received date: 2007-04-23

Abstract: The spectral correlation and spatial correlation of images from interferential imaging spectrometer is analyzed and calculated. The mixed lossless compression scheme is proposed. This scheme includes three aspects: DPCM between Spectra, Integer Wavelet Transform to prediction error image and adaptive bit-level Arithmetic Coding to Wavelet coefficient. The experimental data shows that the algorithm has carried out lossless compression, the average of compression ratio is up to 2.018. It is increase 40.3% in comparison with Integer Wavelet Transform of two dimensions. This algorithm use addition-subtraction and shifts to complete data compression. Implementation with hardware is easier.

Key words: Hyper-spectral image; Lossless -compressing; DPCM between spectra; Integer wavelet transform (IWT); Adaptive bit-level arithmetic coding



WU Dong-mei was born in 1964. She received her M. S. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1988. Now she is a professor of Xi'an University of Science and Technology. Her current research interest is digital signal processing and Image processing.