

基于运动补偿和码率预分配的干涉 多光谱图像压缩算法*

孔繁铨, 吴成柯, 王柯伊, 庄怀宇

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 西安 710071)

摘 要:提出了一种基于运动补偿的三维小波变换和基于码块预测的码率预分配的图像压缩算法. 利用干涉多光谱图像成像推扫平移特性, 在小波变换中使用运动补偿来减少帧间相关性, 并对图像组中各个图像小波变换和量化后 EBCOT 编码码块的有效比特平面进行独立的熵估计, 以图像估计熵总和指导整个图像组码率预分配, 以解决平均分配码率对重建图像质量带来的影响. 实验结果表明: 该算法在 8 倍压缩时, 图像序列的平均峰值信噪比比 3D-SPIHT 提高了 0.85~1.25 dB, 比单帧 JPEG2000 提高了 1.91~4.25 dB, 算法复杂度低, 易于硬件实现.

关键词:图像处理; 多光谱图像序列压缩; 运动补偿; 熵估计; 码率分配

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)06-1162-5

0 引言

干涉多光谱图像被广泛应用在环境监测、地质、农业、医学和军事等领域. 它除了具有空间二维信息, 还具有一维光谱信息, 该信息要求在压缩后的图像中完整恢复各像素点的光谱曲线. 这极大地扩展了应用范围, 但也使采集数据体积十分庞大, 给储存与传输带来巨大的困难. 如何在不破坏恢复光谱数据前提下, 有效的进行数据压缩是目前环境卫星多光谱技术中迫切需要解决的难点.

在多光谱图像中不仅有空间相关, 还存在谱间相关^[1]. 为了去除这些图像数据中的冗余信息, 通常采用基于三维小波变换和编码的压缩算法^[2]. 这些压缩算法利用图像序列之间的相关性进一步提高了压缩效果, 但存在明显的缺点, 由于需要多幅图像才能够实现序列的小波变换, 一般至少需要把 16 帧输入图像作为一组图像进行压缩, 这样系统复杂度高、编码时延大、内存需求大, 难以实现图像实时传输. 此外由于干涉多光谱卫星图像序列的相邻图像之间在空间上具有明显的推扫平移特性, 而三维小波变换没有利用平移特性. 因此许多学者^[3-6, 9-10]在这方面进行了大量的研究工作来提高编码效率. 文献^[3]提出的一维 DWT+EBCOT 的多光谱图像压缩算法, 文献^[4-5]提出的帧间小波域块匹配的图像序列压缩算法, 都有效地去除了谱间冗余, 而且存储

量少和复杂度低. 但是前者没有考虑小波变换后时域低频帧的信息量远远大于时域高频帧的信息量, 后者没有考虑模板图像与差值图像之间图像信息量相差很大, 按相同码率进行压缩, 则会带来较大的多光谱图像序列整体质量损失.

基于以上考虑, 本文提出了一种干涉多光谱图像序列压缩算法. 该算法只需要存储 4 帧图像, 不需要进行三维小波编码, 从而降低了对系统存储量的要求, 减少了编码的延时, 算法复杂度低, 易于硬件实现. 为实现该类图像序列的实时编码与传输提供了可能.

1 基于运动补偿三维小波编码框架

1.1 基于运动补偿三维小波变换编码系统

本文算法根据干涉多光谱图像的平移特性, 首先根据运动矢量进行运动补偿时域提升滤波, 然后对经过滤波后的每一帧数据用双正交的 9-7 小波滤波器进行空域分解. 分别对各幅图像小波变换和量化后码块的有效比特平面进行独立的熵估计, 根据得到的图像估计熵总和来指导整个图像组(Group of Picture, GOP)码率分配, 再用 EBCOT 编码每一幅图像, 最后码流与运动矢量信息一起封包输出. 本文提出的多光谱图像压缩编码方案的流程如图 1.

1.2 运动补偿和时域一维变换

由于干涉多光谱图像经过校验后只存在平移运动, 因此对于相邻两幅图像 A 和 B, 可根据简单的块匹配^[7]运动估计方法, 求出 B 帧的平移运动估计值

$$B(m, n) = A(m - d_m, n - d_n) + \Delta(m, n) \quad (1)$$

式中 (d_m, d_n) 表示图像 B 中 (m, n) 点像素的运动矢

* 国家自然科学基金重点项目(60532060)资助

Tel: 029-88204210 Email: kongfq@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2006-08-25

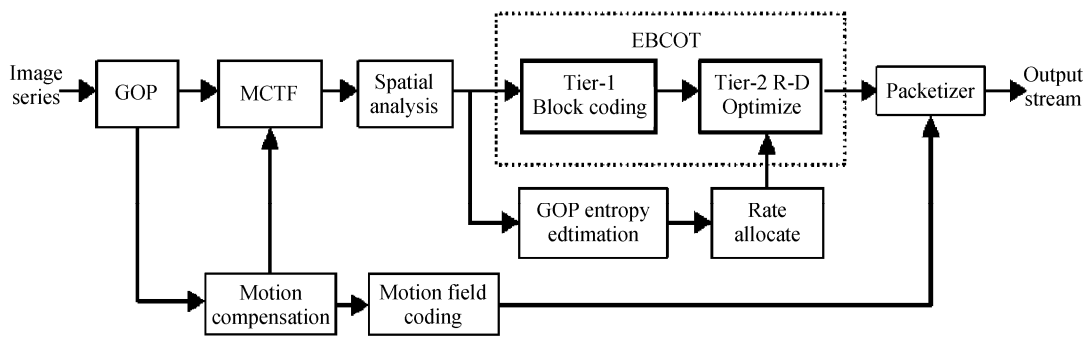


图1 系统框架

Fig. 1 System structure

量, $\Delta(m, n)$ 为像素点差值. 对图像 A, B 采用 Haar 小波沿平移运动轨迹进行滤波, 滤波得到的低频分量插入到参考帧中的对应位置, 高频分量插入到当前帧中的对应位置, 即

$$L[m-d_m, n-d_n] = \frac{1}{\sqrt{2}}(B[m, n] + A[m-d_m, n-d_n]) \quad (2)$$

$$H[m, n] = \frac{1}{\sqrt{2}}(B[m, n] - A[m-d_m, n-d_n]) \quad (3)$$

由于干涉多光谱图像序列只是纯粹的平移运动, 因此经过两级运动补偿时域变换后, 可有效地去除帧间的时间冗余信息. 因此本方案采用两级运动时域变换, 把多光谱图像序列分成 GOP 的方式进行编码, 每个图像组由 4 幅图像组成.

2 基于码块预测的码率预分配算法

对三维时-空小波系数可以采用三维小波编码方法对整个 GOP 中的三维时-空子带进行编码, 如 3D-SPIHT^[2]、3D-SPECK 等. 但是采用三维小波编码方法需要的内存比较大, 实时性差. 相比之下, 如果采用二维小波图像编码方法, 则内存需求小, 实时性好. 但是带来一个问题, 由于小波变换后时域低频帧的信息量远远大于时域高频帧的信息量, 如果将各个变换后的图像按同一压缩比进行压缩, 则会造成较大的多光谱图像序列整体质量损失. 解决此问题的有效方法是, 在对图像序列压缩编码前, 估算各个图像的信息熵, 在保持总码率不变情况下, 以此合理分配图像的码率.

2.1 图像熵的估计方法

图像熵的评价方法有很多, 常用的在图像域的预测方法有两种. 一种是基于预测模板的熵估计法, 在图像域加一个预测模板, 对像素预测值与原值进行差值, 最后用累加的差值表示图像的熵值大小. 常见的预测模板有 JPEG-LS^[8] 和 PNG^[9]. 这种预测算法运算量小, 适合实时操作, 是一种比较合适的

压缩率预分配算法, 但此算法对于细节丰富、分布均匀的灰度图像, 效果不十分理想. 另一种是基于边缘检测的熵估计法, 边缘对于一幅图像来说非常重要. 一般说来, 检测出的边缘越丰富, 其图像熵就越大. 检验边缘的算子很多, 如 Sobel 算子、Roberts 交叉算子、Laplace 算子、Prewitt 算子、Canny 算子等等, 效果好的算子首推 9×9 Canny 算子, 但其运算量过于庞大, 不宜实时操作.

2.2 本文的码率预分配算法

考虑到 JPEG2000 就是基于小波变换的 EBCOT 算法为核心的, 其编码的一大特点就是在小波域对码块完全独立编码, 码块率失真计算也是完全独立的. 因此, 可以在小波域对各个码块的熵进行独立估计, 最后将其累加代表整个图像的熵估计, 从而可使图像熵估计与压缩算法相匹配, 以提高码率预分配的准确度, 从而提高重建图像的质量.

根据以上分析, 提出了一种在小波域中的基于码块有效比特平面进行独立的熵估计的图像序列压缩的码率预分配算法.

假如一幅图像小波分解后某一子带的系数为 x_{ij} , $j=0, 1, \dots, N-1$, $i=0, 1, \dots, M-1$, 图像的分辨率为 $N \times M$. 如果图像压缩时用一个步长为 Δ_l 的量化器进行量化, 其中 $l=0, 1, \dots, L-1$, L 为小波变换后的子带类型数, 经过量化后的码块的存在一定的零比特平面, 设码块零比特平片数为 z_b , $b=0, 1, \dots, B-1$, B 为一幅图像的码块个数, 则要进行块编码的有效数据

$$x_{ij}^{bp} = \frac{x_{ij}}{\Delta_l 2^{z_b}} \quad (4)$$

独立计算由系数 x_{ij}^{bp} 组成的各个码块的熵估计值, 可以选择上节所述算法, 但考虑到算法复杂度和熵估计的准确性, 本文采用预测性能优于绝大多数预测模型的基于 JPEG-LS 预测算法, 其预测模板^[8]如图 2(a).

预测公式为

$$\hat{x}_{i+1,j+1}^{bp} = \begin{cases} \min(x_{ij+1}^{bp}, x_{i+1,j}^{bp}) & x_{ij}^{bp} \geq \max(x_{ij+1}^{bp}, x_{i+1,j}^{bp}) \\ \max(x_{ij+1}^{bp}, x_{i+1,j}^{bp}) & x_{ij}^{bp} \geq \min(x_{ij+1}^{bp}, x_{i+1,j}^{bp}) \\ x_{ij+1}^{bp} + x_{i+1,j}^{bp} - x_{ij}^{bp} & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

如果预测的像素为码块的第一行或第一列,则分别用图 2 中(b)、(c)的预测模板,预测值为前一个

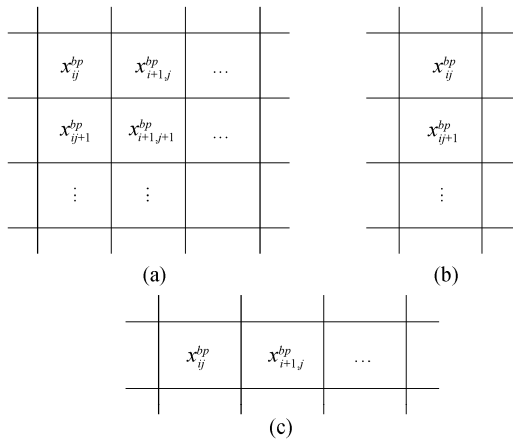


图 2 预测模板的选择

Fig. 2 Selection of predication module

像素点的值. 此时码块的预测熵为

$$H_b = \sum_{i \in b_j \in b} \sum | \hat{x}_{ij}^{bp} - x_{ij}^{bp} | \quad (6)$$

则一幅图像的总估计熵为

$$H_t = \sum_{b < B} H_b \quad (7)$$

式中 $t=0, 1, \dots, T-1, T$ 为图像序列中图像的个数.

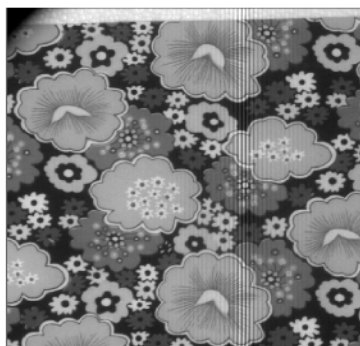
令 W_t 为各幅图像预分配权值则

$$W_t = \frac{H_t}{\sum_{i < T} H_i} \text{ 且 } \sum_{i < T} W_i = 1 \quad (8)$$

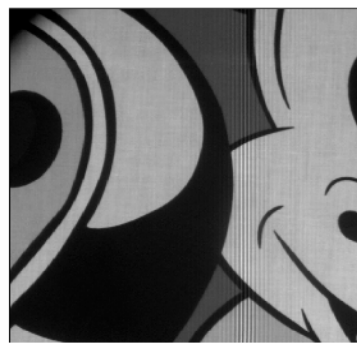
那么一幅图像预分配的字节数即为 $R_t = R_{\max} \times W_t$, 式中 R_{\max} 为原始图像的压缩字节数. 然后每幅图像按 R_t 的压缩字节进行 EBCOT 编码即可.

3 实验结果

本文选取了图 3 的两组分辨率为 512×512 像素具有 512 帧图像的干涉多光谱图像序列进行 8 倍压缩. 为了验证本文方案的性能,在相同条件下做了如下四组实验:1)为无运动补偿的 3D-SPIHT 编码方法,时域做 3 级分解,空间做 3 级分解,16 幅图像组成一个 GOP;2)单帧 JPEG2000 编码,即每一幅图像只做帧内变换和编码,空间分解级数为 5 级;3)文献[4-5]提出的帧间小波域匹配算法,简称 MA-EBCOT;4)本文算法,四帧组成一个 GOP,空间做 3 级分解. 表 1 中给出了两组干涉多光谱图像用不同算法在 8 倍压缩时的平均峰值信噪比.



Test 1 sequence



Test 2 sequence

图 3 本文测试图像序列

Fig. 3 Test image series

表 1 不同算法压缩结果比较

图像序列	帧数	本文算法	平均 PSNR/dB		
			MA-EBCOT	3D-SPIHT	JPEG2000
Test 1 序列	512	44.64	43.94	43.40	40.39
Test 2 序列	512	48.03	47.75	47.18	46.12

从表 1 可知,与 3D-SPIHT、单帧 JPEG2000 和 MA-EBCOT 相比,本文的算法利用干涉多光谱图像序列的平移特性有效的提高整体编码效率. 为了便于比较,图 4 和图 5 分别显示了 Test 1 序列和 Test 2 序列在 8 倍压缩下,不同算法压缩的前 96 帧重建图像峰值信噪比 PSNR 的比较. 在不同的测

试序列情况下,明显表明本文的算法性能高于其它算法. 同时观察在图像内容比较复杂的 Test 1 序

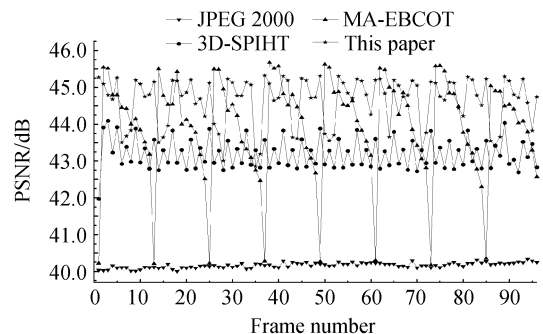


图 4 Test 1 图像序列重建质量比较

Fig. 4 Comparison of the reconstructed Test 1 series quality

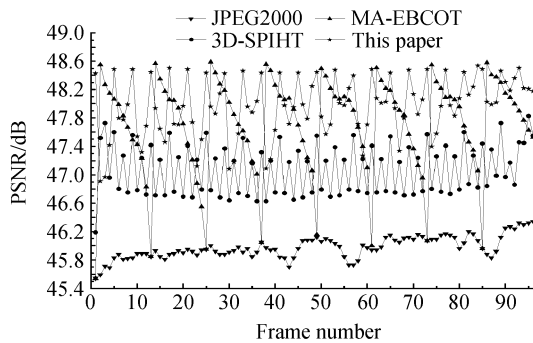


图5 Test 2 图像序列重建质量比较

Fig. 5 Comparison of the reconstructed Test 2 series quality. 本文算法比其他算法有更高的效率. 本文算法平均分别提高 0.7 dB、1.25 dB 和 4.25 dB 对于 MA-EBCOT、3D-SPIHT 和单帧 JPEG2000. 对于图像内容平均的 Test 2 序列, 本文算法仍取得比较好的效果, 平均分别提高 0.28、0.85 dB 和 1.91 dB. 可见在两种情况下, 编码效果更好, 而 3D-SPIHT 和单帧 JPEG2000 都没有充分利用多光谱图像的平移特性来提高编码效率, MA-EBCOT 没有考虑模板图像与差值图像之间图像信息量相差很大的特点, 所以都不能使图像序列质量达到理想效果.

从 Test 1 图像序列中恢复的光谱的实验结果表明: 用 8 倍压缩后, 恢复的图像利用光谱图像恢复算法生成 46 幅单色光谱图, 随机取一个像素点, 描绘 46 谱段曲线如图 6, 实线为原始光谱曲线. 由这些曲线可以看出, 本文算法在拟合原始光谱曲线的能力上有明显提高. 以均方误差 (MSE) 参考: JPEG2000: 151.65; 3D-SPIHT: 56.17; MA-EBCOT: 61.24; 本文算法: 24.87.

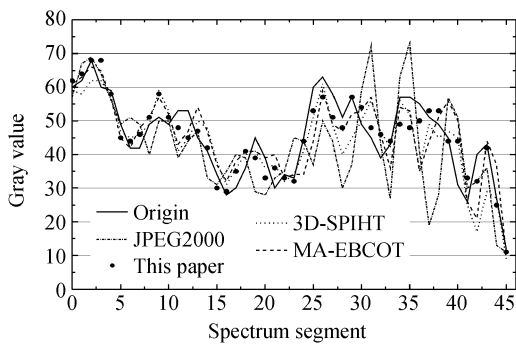


图6 单点重建光谱曲线

Fig. 6 The reconstructed spectrum curves

4 结论

针对基于三维小波变换和编码的干涉多光谱图像序列压缩算法系统复杂度高, 编码时延大, 内存需求大, 而单幅图像独立编码又不能充分利用帧间相关性来提高编码效率, 本文提出了一种基于运动补偿和码率预分配的干涉多光谱图像压缩算法. 从实验结果看, 该算法具有下列优点: 将图像序列的平移

特性引入编码算法, 从而有效提高了系统的编码效率; 同时没有进行三维小波编码, 只是根据基于码块有效比特平面进行独立熵估计的码率预分配算法来合理分配码率, 避免了基于三维小波编码算法对系统大存储量要求和编码时延大的缺陷; 且重建图像序列质量得到显著增强, 压缩效果更好.

参考文献

- [1] SU Li-juan, XIANG-LI Bin, YUAN Yan. A new lateral shearing interferometer stationary fourier transform spectrometer of high spectrum resolution resolving power[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 684-687.
苏丽娟, 相里斌, 袁艳. 高光谱分辨率横向剪切静态干涉光谱仪[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 684-687.
- [2] DRAGOTTIE P L, POGGI G, RAGOZINI R P. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2000, **38**(1): 416-428.
- [3] WANG Qi, GUO Lei. Multispectral images compression based on 1+2D wavelet coding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1126-1129.
王琪, 郭雷. 基于 1+2 维小波变换的多光谱图像压缩[J]. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1126-1129.
- [4] ZHOU You-xi, XIAO Jiang, WU Cheng-ke, et al. The image compression scheme for remote sense superspectral images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 594-597.
周有喜, 肖江, 吴成柯, 等. 遥感干涉超光谱图像压缩编码[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 594-597.
- [5] XIAO Jiang, ZHOU You-xi, WU Cheng-ke, et al. The image compression technology of the large aperture static imaging interference spectrometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1495-1498.
肖江, 周有喜, 吴成柯, 等. 大孔径静态干涉光谱仪图像压缩技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1495-1498.
- [6] LÜ Qun-bo, XIANG-LI Bin. Interference spectral image compress based on classification algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 681-684.
吕群波, 相里斌. 基于光谱分类的干涉光谱图像压缩[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 681-684.
- [7] ORCHARD M T, SULLIVAN G J. Overlapped block motion compensation: An estimation-theoretic approach [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1994, **3**(5): 693-699.
- [8] ITU-T. ISO/IEC 14495-1-1998, Information technology-lossless and near-lossless compression of continuous tone still images-baseline [S].
- [9] WU Zong-ze, ZHU Yue-xin, ZHENG Nan-ning. New compression ratio pre-dispensation algorithm for multi-tiles images in JPEG2000[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2003, **37**(10): 1020-1024.
吴宗泽, 朱悦心, 郑南宁, 等. 一种新的 JPEG2000 多图像片压缩率预分配算法[J]. *西安交通大学学报*, 2003, **37**(10): 1020-1024.
- [10] WU Xiao-hua, LI Zi-tian, ZHANG Fan. Analysis and near-lossless compression based on CPLD of interference

hyperspectral image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1346-1350.
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): 1346-1350.

[11] DENG Jia-xian. Decision of ROI scaling value and ROI coding [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 944-949.
邓家先. 感兴趣区域提升幅度确定及编码[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6): 944-949.

Compression of Interferential Multi-Spectral Image Based on Motion Compensation and Rate Pre-Allocation Algorithm

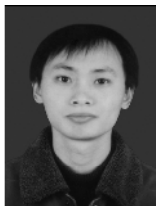
KONG Fan-qiang, WU Cheng-ke, WANG Ke-yan, ZHUANG Huai-yu

(National Key Lab on ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Received date: 2006-08-25

Abstract: A new multi-spectral image compression algorithm combining three-dimensional wavelet transform based on motion compensation and rate pre-allocation algorithm based on code block prediction was proposed. In order to reduce strong correlation between image series, motion compensation was used in this wavelet transform. After wavelet transform and quantification, a prediction module was introduced to estimate the entropy of EBCOT code block within available bit plane, then the summation estimate entropy of each image was used to allocate the rate for each image to eliminate influence of the reconstructed image quality using equal allocation. The experimental results show that the proposed algorithm outperforms 3D-SPIHT 0.85 ~ 1.25 dB in average PSNR of image series with eightfold compression. Compared to JPEG2000 algorithm, the proposed algorithm improves 1.91 ~ 4.25 dB. The proposed algorithm is suitable for hardware implementation with low computation.

Key words: Image processing; Multi-spectral image series compression; Motion compensation; Entropy estimate; Rate allocation



KONG Fan-qiang was born in Zhejiang Province, and on January 10, 1980. He is a Ph. D. student at the Department of Communication Engineering of Xidian University. His research interests are in compression and processing of remote sensing images and modeling of telecommunication system.