

MODIS 多光谱图像压缩研究

李元祥^① 邓黎^② 敬忠良^①

^①(上海交通大学空天科学技术研究院 上海 200240)

^②(解放军理工大学气象学院 南京 211101)

摘要: 为有效存储 MODIS 多光谱图像数据, 该文提出一种基于谱间预测和整数小波变换的多光谱图像压缩算法。首先通过构造谱间最优预测器去除谱间冗余, 再利用整数小波变换和 SPIHT 算法对预测误差图像去除空间冗余, 最后进行自适应算术编码。该方法可实现 MODIS 多光谱图像的无损、近无损和有损压缩, 取得了满意的实验结果; 在不同小波基条件下与 3D-SPIHT 算法比较, 表明了该方法的有效性。

关键词: MODIS 多光谱图像; SPIHT 编码; 最优预测; 整数小波变换

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)10-2352-04

Compression for MODIS Multispectral Images

Li Yuan-xiang^① Deng Li^② Jing Zhong-liang^①

^①(Institute of Aerospace Science & Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

^②(Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: In order to store MODIS multispectral images effectively, a new hybrid compression algorithm based on optimal inter-band prediction and integer wavelet transform is proposed. First, an optimal inter-band predictor is designed for de-correlating the spectral redundancy, and the error images are created for later use. Next, spatial redundancy is removed by using an efficient integer wavelet coding method and SPIHT algorithm. Then, the adaptive arithmetic encoder is employed for binary code stream. The proposed method can implement the lossless compression, near-lossless compression and lossy compression with high compression ratio. The experimental results show that this method is more efficient than the traditional 3D-SPIHT algorithm and other wavelet transform methods with different wavelet bases.

Key words: MODIS multispectral images; SPIHT code; Optimal prediction; Integer wavelet transform

1 引言

中分辨率成像光谱仪(MODerate-resolution Imaging Spectro-radiometer, MODIS)是美国 EOS 系列卫星的主要探测器, 具有 36 个光谱通道, 分布在 0.4~1.4 μm 的电磁波谱范围内, 其地面分辨率分别为 250m, 500m, 1000m^[1]; 每天产生的多光谱图像数据高达 50GB 以上。有限的信道容量与传输海量遥感数据的需求之间的矛盾日益突出, 给数据的存储和传输都带来了极大的困难。因此, 对多光谱图像数据进行有效的压缩是遥感数据存储和传输中一个迫切需要解决的问题。

与自然图像相比, 多光谱遥感图像纹理细节丰富、空间局部相关性较弱, 因此压缩比较低, 如何有效地去除多光谱图像数据的空间和谱间冗余是压缩算法的关键。通常采用的方法主要有预测树、矢量量化和变换等^[1-4]; 由于小波变换具有较好的去相关特性, 在此基础上发展起来的嵌入式零树

编码算法受到广泛重视^[4-6], 但小波变换是在实数域上进行的, 压缩过程不可逆, 且计算速度较慢, 得到的还原图像由于量化误差的存在而失真较大。本文在分析 MODIS 图像数据特点的基础上, 提出一种基于谱间最优预测和整数小波变换的 MODIS 多光谱图像压缩算法。该算法先用谱间最优预测器去除 MODIS 数据的谱间冗余, 再用整数小波变换和 SPIHT 算法去除 MODIS 数据的空间冗余, 最后对得到的二进制码流进行自适应算术熵编码。由于整数小波变换能实现整数到整数的变换, 因此, 该算法可实现多光谱图像的无损压缩和有损压缩。

2 MODIS 资料预处理

MODIS 探测器光、电器件在反复扫描地物的成像过程中, 受到扫描探测元正反扫描响应差异、传感器机械运动和温度变换等影响, MODIS 图像存在较为严重的条带噪声。另外, 由于 MODIS 探测器对地球观测的视野几何特性、地球表面的曲率、地形起伏和 MODIS 探测器运动中的抖动等因素的共同影响, MODIS 数据存在几何畸变, 特别是在 1B

数据的扫描条带之间的错位现象十分严重, 俗称“弯弓”效应^[7]。这些噪声会扩大图像的频谱范围, 提高原始图像的零阶熵, 降低各像素间的相关性, 严重影响图像的压缩效果, 因此, 在进行 MODIS 多光谱图像压缩前必须去除这些噪声。

本文采用插值法去除 MODIS 条带噪声, 通过定位条带噪声所在的行, 用上下两行数据的插值结果来代替条带噪声。在去除“弯弓”效应时, 以数据间的相关性为判断依据计算各列像元重复数据的个数, 通过去除重复数据和重采样方法去除“弯弓”效应。图 1 是预处理前后的对比示意图。

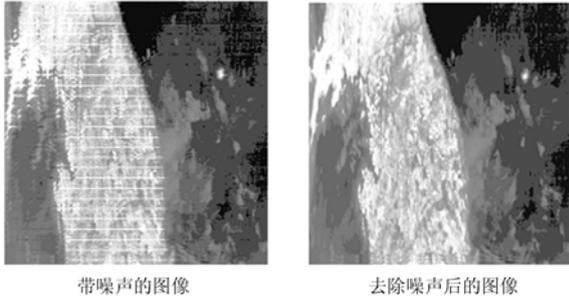


图 1 MODIS 资料预处理前后对比示意图

3 MODIS 多光谱图像压缩算法

3.1 谱内整数小波变换和 SPIHT 编码

为保存遥感图像数据的完整性, 需对其进行无损或近无损压缩。整数小波变换(Integer Wavelet Transform, IWT)具有良好的去相关性、能实现整数到整数的变换、运算速度快等特点, 使之在遥感图像压缩领域受到广泛关注。式(1), 式(2)给出两个常用的整数小波基:

$$5/3 \text{ 小波} \begin{cases} d_{j-1,l} = s_{j,2l+1} - \left[(s_{j,2l} + s_{j,2l+2})/2 + 1/2 \right] \\ s_{j-1,l} = s_{j,2l} + \left[(d_{j-1,l-1} + d_{j-1,l})/4 + 1/2 \right] \end{cases} \quad (1)$$

$$9/7 \text{ 小波} \begin{cases} d_{1,l}^{(1)} = s_{0,2l+1} + \left[\alpha(s_{0,2l} + s_{0,2l+2}) + 1/2 \right] \\ s_{1,l}^{(1)} = s_{0,2l+1} + \left[\beta(d_{1,l}^{(1)} + d_{1,l-1}^{(1)}) + 1/2 \right] \\ d_{1,l} = d_{1,l}^{(1)} + \left[\gamma(s_{1,l}^{(1)} + s_{1,l+1}^{(1)}) + 1/2 \right] \\ s_{1,l} = s_{1,l}^{(1)} + \left[\delta(d_{1,l} + d_{1,l-1}) + 1/2 \right] \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\alpha \approx -1.586134342$, $\beta \approx -0.05298011854$, $\gamma \approx 0.8829110762$, $\delta \approx 0.4435068522$ 。

小波变换很大程度上去除了图像数据的空间相关性, 但同时引进了自身不可避免的各子带间的相关性; 如何有效地减弱这种相关性, 将是进一步去除图像数据空间冗余的关键。Said 和 Pearlman 提出的分层树集划分算法(Set Partitioning In Hierarchical Trees, SPIHT)^[8], 通过空间方向树表示有效值映射, 可有效去除各子带间的相关性。SPIHT 算法是把小波变换后的系数按照其幅值大小, 用位平面来表示各系数的二进制表示, 编码时从最高位到最低位逐

个发送, 达到所要求的码率后就停止传送。由于该算法在分类过程中只进行二元判断, 在所有判断和细化过程中, 均只输出 1bit 的判断或细化结果, 因此能得到较高的压缩比。本文采用 IWT 和 SPIHT 算法相结合的方法去除 MODIS 图像的空间冗余。

3.2 构造谱间最优预测器

MODIS 多光谱图像有较高的光谱分辨率, 有效去除谱间冗余将能进一步提高压缩性能。本文采用 DPCM (Differential Pulse Code Modulation) 方法, 对相邻两个波段图像设计一阶线性预测器, 只要预测误差足够小, 就能有效地表示预测波段, 从而达到去除谱间冗余的目的。

设 $x_{n,i,j}$ 是第 n 波段图像第 i 行第 j 列的灰度值, $\tilde{x}_{n,i,j}$ 是由 $x_{n-1,i,j}$ 预测的第 n 波段同一位置上的灰度值, 则一阶线性预测器如式(3)所示:

$$\tilde{x}_{n,i,j} = a_{n-1}x_{n-1,i,j} + b_{n-1} \quad (3)$$

设图像大小为 $M \times N$, 则整幅图像预测误差的均方差为

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (x_{n,i,j} - a_{n-1}x_{n-1,i,j} - b_{n-1})^2 \quad (4)$$

为了使预测误差达到最小, 采用经典的最小均方误差准则对预测系数进行优化^[9], 可解得:

$$\left. \begin{aligned} a_{n-1} &= \left[\frac{r(n, n-1) - u(n-1)u(n)}{r(n-1, n-1) - u^2(n-1)} \right] \\ b_{n-1} &= [u(n) - a_{n-1}u(n-1)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 $r(k, l) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x_{k,i,j}x_{l,i,j}$, $u(k) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x_{k,i,j}$ 。

3.3 算法流程

结合谱间最优预测和谱内 IWT 的 MODIS 多光谱图像压缩算法流程如下:

- (1) 对 MODIS 多光谱图像进行去除条带噪声和“弯弓”效应的预处理;
- (2) 对第一波段图像进行 IWT, 并直接用 SPIHT 算法进行编码;
- (3) 根据多光谱图像相邻两个波段的像素值 $x_{n,i,j}$ 和 $x_{n+1,i,j}$, 利用式(5)计算预测系数 a_n 、 b_n ;
- (4) 用 $x_{n,i,j}$ 结合式(3)得到下一波段的预测值 $\tilde{x}_{n+1,i,j}$;
- (5) 计算预测误差 $\varepsilon_{n+1,i,j} = x_{n+1,i,j} - \tilde{x}_{n+1,i,j}$;
- (6) 对获得的残差图像进行三层 IWT, 并用 SPIHT 算法对小波系数进行编码。
- (7) 如果 $n < L$ (设多光谱图像共有 L 个波段), 则 $n = n + 1$, 转到(3);
- (8) 对所得到的二进制码流进行自适应算术编码, 得到最后的压缩码流。

解码过程是相应编码过程的逆过程。

4 实验结果

本文的压缩算法用 Visual C++ 6.0 实现, 实验环境为: Pentium IV, CPU 2.0GHz, RAM 512MB。所使用的 MODIS 多光谱遥感图像实验数据来自美国 NASA 官方网站: MOD 021KM.A2006266.0215.005.2006269201938.hdf, 共有 36 个光谱通道, 由于其中有些波段存在较多的无效数据(无效数据由卫星采集、陆地接收误码等原因造成), 故截取其中第 1, 3-7, 20-25, 29-32 共 16 个波段图像进行实验, 每个波段选取的图像大小为 512×512 , 空间分辨率为 1000m, 每个像素 15bit, 小波变换阶次为 3。其中的第 1 波段和第 32 波段图像见后面的图 3(a)和图 3(b)。

4.1 无损压缩

表 1 列出了本文算法和 3D-SPIHT 算法^[6]分别在 5/3 整数小波基和 9/7 整数小波基下得到的压缩比和压缩/解压时间, 并给出了当前流行的无损压缩软件 WinRAR 的压缩结果。

表 1 无损压缩实验结果

编码方法	小波基	压缩比	压缩时间(s)	解压时间(s)
本文算法 (不去除 谱间冗余)	5/3 小波基	2.11	18.68	16.29
	9/7 小波基	1.95	32.90	27.90
本文算法	5/3 小波基	2.16	19.21	16.80
	9/7 小波基	1.98	33.07	27.96
3D-SPIHT 算法	5/3 小波基	1.98	30.72	26.15
	9/7 小波基	1.87	44.50	39.03
WinRAR	-	1.80	-	-

从表 1 可看出: (1)当只进行 IWT 和 SPIHT 编码去除空间冗余, 而不去除谱间冗余时, 得到的压缩比是有限的; 因此有效地去除多光谱图像的谱间冗余对提高压缩比是非常关键的。(2)与 3D-SPIHT 算法相比, 本文算法取得较高的压缩比, 表明采用预测方法可较好地去除谱间冗余。(3)5/3 整数小波基取得的压缩比要高于 9/7 整数小波基, 说明 5/3 小波具有较好的去相关能力, 能更有效地降低图像的零阶熵, 提高压缩比。(4)与 WinRAR 相比, 本文算法也表现出相当的优势。

实现复杂度上, 本文算法平均每个波段的压缩/解压时间在 1.0~1.2s, 能满足实时处理的要求, 而 3D-SPIHT 算法是通过三维空间方向树对重要系数进行判断和编码的, 其算法复杂度较高, 所需的压缩/解压时间较长; 另一方面, 9/7 小波基所需要的时间也比 5/3 小波基长, 这是因为 9/7 小波

基要进行二次提升才能完成整数小波变换, 而 5/3 小波只要进行一次提升, 同时 5/3 小波基用简单的移位操作就能完成相应的小波变换。

4.2 近无损压缩

本文算法在 5/3 和 9/7 小波基, 本文算法在第一代 db8 和 haar 小波基以及 3D-SPIHT 算法在 5/3 和 9/7 小波基下, 分别对该 MODIS 多光谱图像进行近无损压缩(比特率为 4bpp, 压缩 4 倍), 峰值信噪比(PSNR)曲线如图 2 所示。

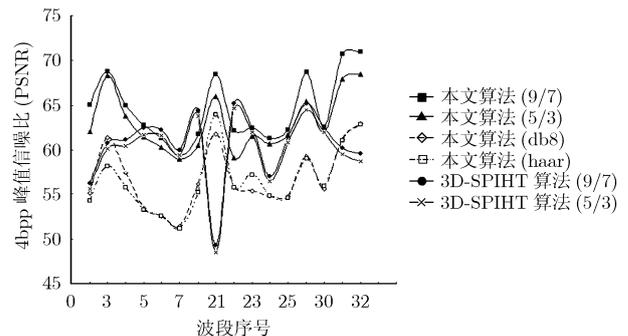


图 2 MODIS 多光谱图像近无损压缩实验结果

从图 2 可看出: (1)近无损压缩时, 都能得到较高的 PSNR (50 以上); (2)第一代小波基的 PSNR 普遍小于整数小波基, 其各波段的 PSNR 动态范围较大, 说明第一代小波变换的压缩效果受各个波段的数据影响较大; (3)本文算法的 PSNR 在大多数波段都高于 3D-SPIHT 算法, 说明谱间预测去相关比变换去相关能获得更好的压缩效果; (4)整数 9/7 小波基的 PSNR 高于整数 5/3 小波基, 说明 9/7 小波更适合图像的有损压缩。

4.3 有损压缩

由于 SPIHT 算法能实现任意码率压缩, 且整数小波变换具有较好的平滑性、消失矩、逼近精度和紧支撑等特性, 因此本文算法在有损压缩上也能取得较好的效果。针对第 1 波段图像, 图 3 给出了本文算法在整数 9/7(图 3(c))和 5/3 小波基(图 3(d)), 3D-SPIHT 算法在整数 9/7(图 3(e))和 5/3 小波基(图 3(f))下, 图像压缩 50 倍(比特率为 0.32bpp)后的还原图像。

从图 3 可看出: (1)与原始图像对比, 图 3(c)效果最好, 该图保留了绝大部分的边缘和纹理等细节信息, 图像损失较少; 且其各个通道的平均 PSNR 达到 39.63, 因此不管是视觉效果还是客观评价, 基于 9/7 小波基的本文算法能取得较好的实验结果。(2)图 3(d)是在整数 5/3 小波基下得到的还原图像, 由于 5/3 小波基的平滑性和消失矩没有 9/7 小波基好, 因此在还原图像中会出现方块效应, 同时也表明了整数 9/7 小波基更适合于图像的有损压缩。(3)图 3(e)和图 3(f)是在 3D-SPIHT 算法下得到的还原图像, 这种算法在大压缩比下图像细节丢失较多, 损失较严重, 尤其是图 3(f)。因此, 本

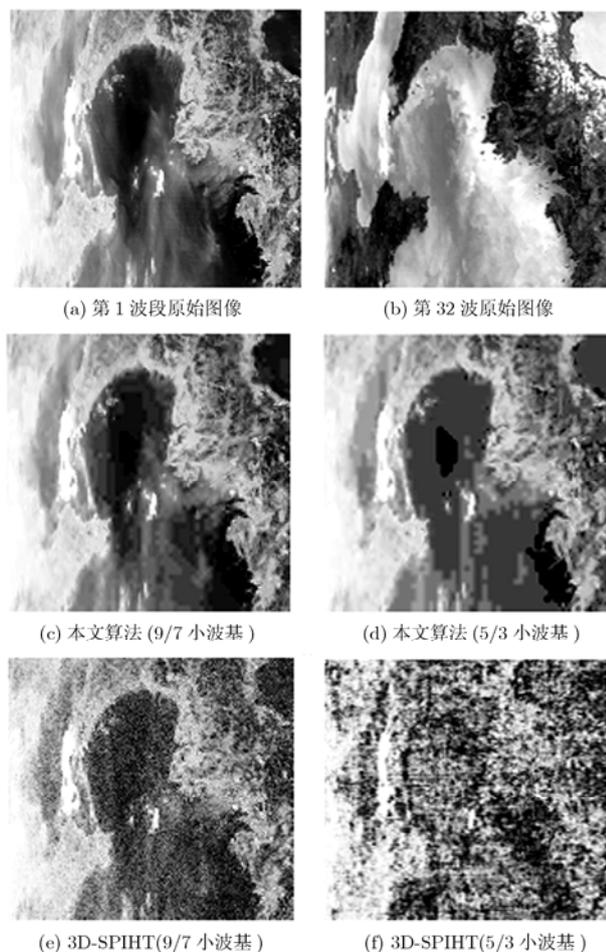


图 3 MODIS 图像大压缩比有损压缩(压缩 50 倍)

文算法在大压缩比的有损压缩中有较大优势。

5 结束语

本文在分析了 MODIS 多光谱图像数据特点的基础上,提出了基于谱间最优预测和整数小波变换的 MODIS 图像压缩算法。从实验结果看,不管是无损压缩、近无损压缩还是大压缩比的有损压缩,本文算法均能取得令人较满意的结果。实验结果表明:(1)整数小波比第一代小波更适合于图像压缩编码;(2)5/3 小波基适合于图像无损压缩;(3)9/7 小波基适合于图像有损压缩;(4)在波段数较少的情况下,采用预测的方法比变换的方法能更好地去除谱间冗余。本文算法复杂度低,能较快地完成图像的编解码;因此具有较好的应用前景。

在 36 个波段的 MODIS 多光谱图像中,不少波段存在无效数据,实验中所选取的波段数有限(仅 16 个),谱间进行小波变换时并不能充分发挥小波去相关的优势。当波段数较多时,预测方法与小波变换方法的去除谱间冗余能力值得进一步研究。此外,实验中截取的 16 个波段是按照 MODIS 通道的自然顺序排列的;按照通道的中心波长的长短对各波段图像进行排列,重排后的多光谱图像压缩也值得研究。

参考文献

- [1] Kaarna A and Parkkine J. Transform based lossy compression of multispectral images[J]. *Pattern Analysis & Applications*, 2001, 4(1): 39-50.
- [2] Tang Caimu, et al. Efficient inter-band prediction and wavelet based compression for hyperspectral imagery: A distributed Source coding approach[C]. *Data Compression Conference, Snowbird, Utah, USA*, 2005: 437-446.
- [3] 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.
Wu Zheng and He Ming-yi. Multispectral imagery compression by hybrid DWT and partitioning DPCM. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(6): 747-754.
- [4] 付文秀, 王世刚, 高燕梅. 结合矢量量化的 SPIHT 算法用于多光谱图像压缩[J]. *通信学报*, 2004, 25(6): 109-114.
Fu W X, Wang S G, and Gao Y M, et al. Application of SPIHT with vector quantization to compression of multispectral image. *Journal of China Institute of Communications*, 2004, 25(6): 109-114.
- [5] Dragotti P L, Poggi G, and Ragozini A. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 416-428.
- [6] 马晨光, 郭雷. 基于 3 维 SPIHT 编码的超光谱图像压缩[J]. *量子电子学报*, 2005, 22(5): 680-684.
Ma C G and Guo L. Hyperspectral image compression based on 3D SPIHT coding algorithm. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(5): 680-684.
- [7] 郭广猛. 非星历表法去除 MODIS 图像边缘重叠影响的研究[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(3): 172-175.
Guo G M. Eliminating bowtie effect of MODIS data without Ephemeris. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(3): 172-175.
- [8] Said A and Pealman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, 6(3): 243-250.
- [9] Wu X and Memon N. Context-based lossless interband compression — extending CALIC [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(6): 994-1001.

李元祥: 男, 1968 年生, 副教授, 研究方向为航空航天信息与控制、图像处理、模式识别、中文信息处理等。

邓黎: 男, 1981 年生, 工程师, 研究方向为遥感图像处理、图像编码。

敬忠良: 男, 1960 年生, “长江学者奖励计划”特聘教授, 研究方向为多传感器信息融合与控制、目标跟踪、随机模糊神经网络等。