

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0225-04

基于自适应方向提升整数小波与优化阈值的遥感图像编码

张立保^{1,2} 王鹏飞¹

(¹ 北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875; ² 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 10875)

摘要 遥感图像通常含有丰富的边缘与纹理特征,一般的整数小波变换只能较好地降低高频子带中水平与垂直边缘及纹理能量而非水平或垂直方向的边缘与纹理能量仍较高。针对该问题提出一种新的基于自适应方向提升整数小波变换(ADL-IWT)与部份偶数优先阈值(PEOT)的遥感图像压缩算法。该算法利用自适应方向提升整数小波削弱遥感图像高频子带中非水平或垂直方向的边缘与纹理能量。同时对部分编码量化阈值区间进一步优化,提高编码算法在这些阈值区间上的重要系数搜索效率。基于 ADL-IWT 和 PEOT 的集合分裂嵌入块(SPECK)编码算法的实验结果表明,新算法不仅支持单一码流下从有损到无损的遥感图像编码,而且有损压缩峰值信噪比好于采用普通 IWT 的 SPECK 算法。

关键词 图像处理;遥感图像压缩;整数小波变换;提升框架;集合分裂嵌入块算法;优化阈值

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0225

Remote Sensing Image Coding Based on Adaptive Directional Lifting Integer Wavelet and Optimal Threshold

Zhang Libao^{1,2} Wang Pengfei¹

(¹ College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)
(² State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract There are rich edge and texture features in the remote sensing image. The common integer wavelet transform (IWT) can only reduce the image energy of horizontal and vertical edges or textures of high frequency subbands, while that of non-horizontal and vertical edges or textures are still high. For resolving the above problem, a new remote sensing image compression algorithm using adaptive directional lifting-based integer wavelet transform (ADL-IWT) and partial even optimal threshold (PEOT) is presented. The new algorithm can reduce the non-horizontal and vertical edge and texture energy of remote sensing image, by using ADL-IWT. Additionally, the new algorithm optimizes partial encoding quantization threshold intervals to improve the search efficiency of the significant coefficients on these threshold intervals. Experimental results based on the SPECK coding algorithm with ADL-IWT and PEOT show that the new algorithm can not only support both lossy and lossless compression of remote sensing image using a single bitstream, but also perform better in peak signal to noise ratio (PSNR) than the SPECK algorithm using the common IWT for lossy compression.

Key words image processing; remote sensing image compression; integer wavelet transform; lifting scheme; SPECK algorithm; optimal threshold

1 引 言

随着对地观测技术的飞速发展,遥感图像在军

事侦察、环境监测以及城市规划等领域已得到广泛研究与应用。目前,遥感图像的空间分辨率已达到

收稿日期: 2010-04-02; 收到修改稿日期: 2010-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(60602035,61071103)、国家 863 计划(2007AA12Z156)和中国科学院遥感应用研究所、北京师范大学遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS201001)资助课题。

作者简介: 张立保(1977—),男,博士,副教授,主要从事遥感图像编码方面的研究。E-mail: libaozhang@163.com

米级甚至厘米级,所包含数据量已达到千兆字节量级,地物的空间特征、几何结构、纹理以及形状等信息都非常丰富,真实反映了各种地物信息。但是,遥感图像数据量比一般景物图像有显著增加,并且图像中的像素间相关性较低,这些问题严重制约了遥感图像的高效压缩。如何既保留图像中重要的地物信息数据又能够有效降低存储与传输的数据量是目前遥感图像压缩领域尚未解决的重要课题。

小波变换是一种信息保持型的变换,原信号的信息与能量完全保留在变换后的系数中,变换只是使原信号能量重新分配,图像压缩主要利用的是小波变换较好的能量集中特性。离散小波变换(DWT)在遥感图像压缩中已得到广泛应用。同其他压缩框架相比,基于DWT的遥感图像压缩具有更高压缩效率,并实现了图像的多尺度分析与渐进传输^[1]。E. Christophe等^[2]提出的基于DWT的三维多级树集合分裂(3D-SPIHT)算法,实现了高效的高光谱图像压缩。C. Nguyen等^[3]提出了基于优化截断点嵌入零块编码(EBCOT)算法的遥感图像压缩策略。

传统DWT计算复杂度高且无法实现真正意义上的无损图像压缩,I. Daubechies等^[4]建立了一种新的小波变换结构——提升框架(LS),并基于提升框架构建了整数小波变换(IWT)^[5]。IWT既保留了DWT的优点,又保证了变换后图像系数均为整数,并且具有很低的计算复杂度,非常适合遥感图像压缩。2007年由Ding等^[6]提出自适应方向提升框架(ADL),ADL在提升框架中引入局部方向选择机制,在单一像素的邻域内优先选择具有最大像素相关性的方向进行预测运算,因此对图像局部窗口中的方向特征敏感,有利于提高遥感图像的目标检测与压缩效果。

本文引入自适应方向提升整数小波变换(ADL-IWT)并结合部分偶数优化阈值(PEOT)策略,提出基于ADL-IWT与PEOT的集合分裂嵌入块(SPECK)编码算法,优化了遥感图像经整数小波分解后高频子带中各方向边缘与纹理的能量分布,同时提高了部分阈值空间内系数搜索效率,一定程度上改善了遥感图像的有损压缩效果。

2 提升框架下的整数小波

为了降低离散小波变换的计算复杂度以及对快速傅里叶变换的依赖,文献[4]中LS,其实质是将DWT滤波器中的多相矩阵分解为若干交替的上三角阵、下三角阵与常数对角阵的乘积,表示为

$$P(z) = \prod_{i=1}^m \begin{bmatrix} 1 & s_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ t_i(z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 1/K \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $s_i(z)$ 与 $t_i(z)$ 分别为上三角阵与下三角阵中用于分解的Laurent多项式, K 称为缩放因子。Daubechies指出,可以将(1)式进一步分解为3个运算步骤,即分裂、预测及更新,得到

$$d_{i-1}^1 = s_{i,2i+1} - P(s_{i,2i}), \quad (2)$$

$$s_{i-1}^1 = s_{i,2i} + U(d_{i-1}), \quad (3)$$

$$d_{i-1} = d_{i-1}^1 / K, \quad (4)$$

$$s_{i-1} = K s_{i-1}^1, \quad (5)$$

LS不仅具有较低计算复杂度,而且通过对预测算子 P 及更新算子 U 的取整操作,能够实现每次提升后输出结果均为整数,即整数到整数的小波变换。

3 基于ADL-IWT的遥感图像压缩策略

3.1 一般IWT在遥感图像压缩中存在的问题

虽然IWT具有众多DWT所不具备的优势,但是针对遥感图像的压缩效果并不理想。主要原因有两个:

1) 一般IWT对图像分解后,高频子带中只有水平与垂直边缘及纹理能量得到较好的降低,但是遥感图像中存在大量非水平、垂直边缘及纹理信息,一般IWT对于这些信息无法很好分解。

2) 图像经过一般IWT分解,由于取整操作的非线性特征导致高频子带具有较低能量集中性,降低了高频子带的系数动态变化范围。

上述两个问题直接影响了IWT对遥感图像的有损压缩效率,因此这里在小波变换层面引入自适应方向提升整数小波变换降低问题1带来的影响,在编码过程中引入部分偶数优化阈值进一步提高IWT在遥感图像有损压缩中的编码效率。

3.2 基于自适应方向提升框架的整数小波变换

自适应方向LS是2007年由Ding等^[6]提出的,ADL针对一般小波变换对图像边缘、纹理等信息缺乏方向敏感性的问题,在LS中引入局部方向选择机制,在单一像素的邻域内优先选择具有最大像素相关性的方向进行预测运算,因此ADL的最大好处是对图像局部窗口中的方向特征敏感,这非常有利于提高遥感图像的目标检测与压缩效果。基于提升框架的5/3小波与9/7小波的自适应方向提升模型的预测滤波器 $P_0(z_1, z_2)$ 与更新滤波器 $U_0(z_1, z_2)$ 分别表示为

$$\begin{cases} P_0(z_1, z_2) = -[z_1^{-\tan(\theta_v)} + z_1^{\tan(\theta_v)} z_2]/2 \\ U_0(z_1, z_2) = [z_1^{\tan(\theta_v)} + z_1^{-\tan(\theta_v)} z_2^{-1}]/4 \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_0(z_1, z_2) = -1.586134[z_1^{-\tan(\theta_v)} + z_1^{\tan(\theta_v)} z_2] \\ U_0(z_1, z_2) = -0.05298[z_1^{\tan(\theta_v)} + z_1^{-\tan(\theta_v)} z_2^{-1}] \\ P_1(z_1, z_2) = 0.882911[z_1^{-\tan(\theta_v)} + z_1^{\tan(\theta_v)} z_2] \\ U_0(z_1, z_2) = 0.443506[z_1^{\tan(\theta_v)} + z_1^{-\tan(\theta_v)} z_2^{-1}] \end{cases}. \quad (7)$$

(6),(7)式均为小波变换, θ_v 表示任意像素与周边相邻像素或内插子像素间的方向角。从(6),(7)式不难看出, 由于在预测与更新滤波器中引入了方向角 θ_v , 因此在图像的小波变换中 ADL 框架可以对像素周边局部空间内的任意方向加以预测, 而非仅仅对水平或垂直方向预测, 最终选择预测误差最小的像素或内插像素值作为预测器输出结果, 这就有效利用了任意方向上的边缘与纹理信息, 有效提高了 IWT 在遥感图像中的压缩效率。

4 部分偶数优化阈值编码算法

ADL-IWT 较好地降低了遥感图像丰富的边缘与纹理信息在高频子带中的能量, 但是没有解决 IWT 中取整操作导致的高频子带较低能量集中性, 本节引入阈值优化策略, 通过调整部分编码量化阈值空间内重要系数的分布特性提高 IWT 对遥感图像的有损压缩效率。其中阈值优化策略是建立在 SPECK 编码算法之上的。SPECK 算法是 A. Islam 等^[7]提出的。该算法将集合块分割与链表编码有机结合, 利用小波变换后图像中的各子带内部系数间相关特性, 通过集合分割(SP)与倍频分割(OBP)在各子带内部分块编码, 并借助链表组织系数与输出。SPECK 编码支持多分辨率下的渐进编解码, 但其编码复杂度远小于 JPEG2000 推荐的 EBCOT 框架。文献^[7]指出, SPECK 算法编码的平均速度是

EBCOT 的 4.6~15.7 倍, 解码的平均速度是 EBCOT 的 8.1~12.1 倍。

部分偶数优化阈值策略的思想是在 SPECK 编码过程中, 通过改变部分量化阈值区间的长度来调整该区间内重要系数数量, 从而降低对该区间重要系数的搜索代价, 提高编码效率。

对遥感图像采用 ADL-IWT 进行适当层次的小波变换后, 应对所有小波系数完成压缩编码。利用了改进的 SPECK 算法进行具体编码。SPECK 编码算法包括了集合重要性确定、子带块四叉树分割及链表编码 3 部分。在集合重要性确定环节, 传统 SPECK 算法中需要编码的阈值平面数量 n_{\max} 表示为

$$n_{\max} = \lfloor \text{lb}(\max_{(i,j) \in X} |f_{i,j}|) \rfloor, \quad (8)$$

从最大位平面开始, 按照 2 的整数幂形式依次递减阈值平面数 n , 直至 n 为 0, 在每个阈值平面内, 相应阈值区间内含有重要系数的块集合 S 表示为

$$\max_{(i,j) \in S} \{ |f_{i,j}| \} \geq 2^n \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (9)$$

$$\Gamma_n(S) = \begin{cases} 1, & \text{if } 2^n \leq \max_{(i,j) \in S} |f_{i,j}| < 2^{n+1} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

式中 $f_{i,j}$ 是属于块集合 S 的任意小波图像系数。

这里提出的部分偶数阈值优化算法实现过程包括 4 步:

- 1) 设定 t_1 与 t_2 两个阈值, 其中 $t_1 < t_2$, 将 n_{\max} 个编码阈值平面分成 3 个区间。
- 2) 如果 $f_{i,j} \geq 2^{t_2}$, 则按照(9),(10)式的阈值确定策略搜索块集合 S 中的重要系数。
- 3) 如果 $2^{t_1} \leq f_{i,j} < 2^{t_2}$, 策略搜索块集合 S 中的重要系数表示为

$$\max_{(i,j) \in S} \{ |f_{i,j}| \} \geq (2k)^2 \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (11)$$

$$\Gamma_k(\Omega) = \begin{cases} 1, & \text{if } (2k)^2 \leq \max_{(i,j) \in S} |f_{i,j}| < (2k+2)^2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

4) 如果 $f_{i,j} < 2^{t_1}$, 继续按照(5),(6)式的阈值确定策略搜索块集合 S 中的重要系数。

上述步骤中, t_1 与 t_2 的取值可以根据图像整数小波分解后的系数分布特性决定。如果从图像的最大小波系数开始均采用偶数平方量化阈值编码, 则需要编码的阈值区间较多, 反而会增加编码复杂度, 因此这里

提出仅对系数分布较为密集的关键阈值区间细分, 而对于其他区间仍采用 2 的整数幂作为量化阈值。

5 实验结果

表 1 给出了基于 ADL-IWT 与 PEOT 的 SPECK 编码算法与基于一般 IWT 的 SPECK 算法

针对 1024 pixel×1024 pixel 北京地区 Quickbird 拍摄高分辨率遥感图像进行有损编码后的峰值信噪比 (PSNR) 比较。

表 1 本文算法与基于 IWT 的 SPECK 算法对北京地区高分辨遥感图像有损压缩 PSNR 比较

Table 1 Comparison of the lossy compression PSNR performance between our algorithm and SPECK based on IWT for high resolution remote sensing image of Beijing

Bit rate bit/pixel	SPECK based on IWT /dB	Our algorithm /dB
0.5	16.82	16.93
1.0	19.28	19.62
2.0	24.15	24.26

从表 1 不难看出,不同解码率下,基于 ADL-IWT 与 PEOT 的 SPECK 编码算法对高分辨率遥感图像的解码重建 PSNR 均好于基于一般 IWT 的

SPECK 算法。图 1 进一步给出了基于该算法得到的不同解码率下北京地区高分辨率遥感图像的解码重建结果。

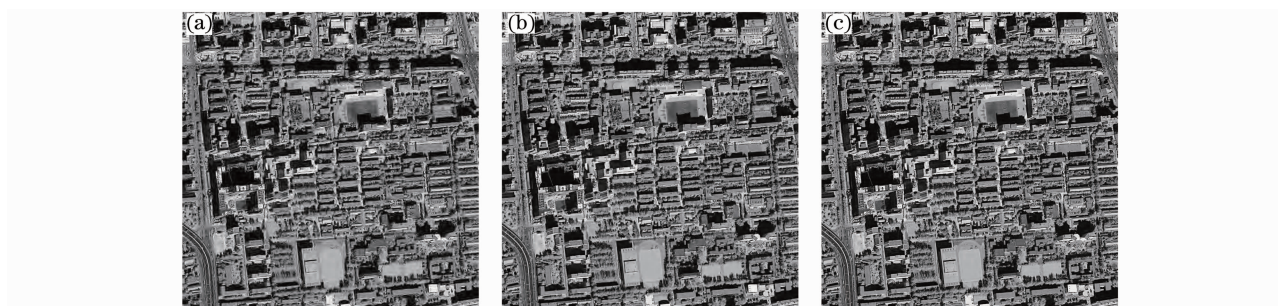


图 1 基于 ADL-IWT 与 PEOT 的 SPECK 编码算法在不同解码率下对北京地区高分辨率遥感图像的解码重建结果。(a) 0.5 bit/pixel, (b) 1.0 bit/pixel, (c) 2.0 bit/pixel

Fig. 1 Reconstructing results of high resolution remote sensing image of Beijing based on SPECK algorithm with ADL-IWT and PEOT at different decoding rates. (a) 0.5 bit/pixel, (b) 1.0 bit/pixel, (c) 2.0 bit/pixel

6 结 论

针对遥感图像经一般 IWT 对图像分解后,高频子带中非水平、垂直边缘及纹理信息能量较高的问题,引入 ADL-IWT,有效降低了遥感图像经 IWT 分解后高频子带的边缘与纹理能量;同时,在编码过程中引入 PEOT 量化阈值分割策略进一步提高 ADL-IWT 在遥感图像有损压缩中的编码效率。实验结果表明,该算法对遥感图像取得了较好有损压缩效果,对进一步研究基于 IWT 的遥感图像压缩具有一定的理论与实际意义。

参 考 文 献

- 1 Ma Jing, Wu Chengke, Chen Dong *et al.*. Compression of interference multispectral image based on weighted rate-distortion optimization for SPIHT[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 430~436
- 马 静, 吴成柯, 陈 东 等. 基于加权率失真优化 SPIHT 算法

- 的干涉多光谱图像压缩[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 430~436
- 2 E. Christophe, W. A. Pearlman. Three-dimensional SPIHT coding of hyperspectral images with random access and resolution scalability [C]. *Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 2006. 1897~1901
- 3 C. Nguyen, G. R. Redinbo. Fault tolerance design in JPEG 2000 image compression system [J]. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2005, **2**(1): 57~75
- 4 I. Daubechies, W. Sweldens. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. *J. Fourier Analysis Application*, 1998, **4**(3): 247~269
- 5 A. R. Calderbank, I. Daubechies, W. Sweldens *et al.*. Wavelet transforms that map integers to integers [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 1998, **5**(31): 332~369
- 6 Wenpeng Ding, Feng Wu, Xiaolin Wu *et al.*. Adaptive directional lifting-based wavelet transform for image coding[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16**(2): 416~427
- 7 A. Islam, W. A. Pearlman. Embedded and efficient low-complexity hierarchical image coder [C]. *SPIE*, 1999, **3653**: 294~305