

基于方向优化提升策略的遥感图像编码

张立保^{1,2*} 丘兵昌¹ 杨绪业¹ 赵慧刚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 100875)

摘要 传统提升小波变换无法有效重构遥感图像中的非水平与非垂直高频信息, 导致这些地方的高频小波系数仍然较为显著, 降低了遥感图像的编码效率。提出了一种新的基于方向优化的提升小波框架(DOLW)。设计基于梯度的方向预测模型获得提升小波的最优变换方向; 沿最优变换方向对图像进行先垂直后水平的方向提升变换, 削弱遥感图像高频子带中非水平与非垂直方向上的边缘与纹理能量; 利用抽样函数完成分数像素上的插值预测。针对遥感图像的实验表明, 与传统的提升小波变换相比, 新算法获得的重构图像无论峰值信噪比还是主观质量都有显著提高, 对今后遥感图像的压缩编码研究具有重要价值。

关键词 图像处理; 遥感图像处理; 图像压缩; 小波变换; 提升框架; 方向预测

中图分类号 TN919.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0614001

Remote Sensing Image Coding Based on Direction Optimal Lifting Strategy

Zhang Libao^{1,2} Qiu Bingchang¹ Yang Xuye¹ Zhao Huigang¹

(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 The traditional lifting wavelet transform cannot be effectively reconstructed non-horizontal and non-vertical high-frequency information of remote sensing images, which results in these high frequency wavelet coefficients to be still salient relatively and reduces the coding efficiency of remote sensing images. A new lifting wavelet scheme based on direction optimal model called direction optimal lifting wavelet (DOLW) is proposed. The new algorithm first designs a directional prediction model based on gradient to obtain optimal transform direction of lifting wavelet. It executes the directional lifting transform in the direction of the first vertical along the optimal transform direction. The edge and texture energy can be weakened on the non-horizontal and non-vertical direction of the high-frequency subband of the remote sensing image. The new algorithm uses sampling function interpolation to predict the value of sub-pixels. The experimental results for these remote sensing images show that, compared with traditional lifting wavelet transform, the new algorithm improves the peak signal-to-noise ratio (PSNR) and the subjective quality of the reconstructed images significantly. So the new algorithm has important value for the remote sensing image compression and coding in the future.

Key words image processing; remote sensing image processing; image compression; wavelet transform; lifting scheme; direction prediction

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 280.4788

1 引言

近年来,随着遥感技术的发展,遥感影像的时间分辨率、空间分辨率以及光谱分辨率都有了极大的

提高,带给人们极其丰富的地表信息,应用领域也越来越广。但是,这些遥感影像所具有的高分辨率、高解析度以及高信息量特点直接导致了所需存储数据

收稿日期: 2013-10-08; **收到修改稿日期**: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(61071103)、中央高校基本科研业务费专项资金(2012LYB50)

作者简介: 张立保(1977—),男,博士,副教授,主要从事遥感影像压缩与目标识别等方面的研究。

E-mail: libaozhang@163.com

量的急剧膨胀,与目前较为低效的遥感图像编码方法形成了一对尖锐矛盾。为了更好的解决该矛盾,人们将小波变换引入遥感图像编码,希望能在较低解码率下使遥感图像得到更好的重构质量^[1-2]。

同基于离散余弦变换的传统编码算法相比,离散小波变换(DWT)具有更好的能量集中特性,因此对图像有损压缩后的重建质量更高^[2-3]。但是,对卷积以及傅里叶变换的过分依赖使得小波变换本身具有很高的计算复杂度,同时对存储空间的要求也较高,不利于硬件实现^[4]。针对这些问题,文献[4]与[5]提出了一种基于提升框架的小波变换模式,又称为第二代小波变换。提升框架下的小波变换不仅完全继承了离散小波变换的多尺度与多分辨率分析特性,而且采用原位操作,计算速度快,计算时无需额外的存储开销,目前已被 JPEG2000 静止图像国际压缩标准列为核心算法。Daubechies 已经证明,任何离散小波变换或具有有限滤波器的滤波器变换都可以分解为一系列简单的提升步骤。

无论第一代离散小波变换还是提升框架下的第二代离散小波变换,虽然能够将图像水平和垂直方向上的高频系数能量有效降低,但是都无法高效处理非水平与非垂直的高频信息,从而导致图像经小波后,非水平与非垂直方向的高频小波系数仍具有较高能量,无法获得更高的图像编码效率^[6-8]。上述问题对于遥感图像这种存在大量非水平与非垂直边缘与纹理信息的数据体,影响更为显著^[2]。

在文献[9]中,Taubman 尝试将小波变换的方向与图像内容相结合。该方法将图像分割成图像块,再对每一个图像块利用可逆的重采样滤波器进行采样,使该图像块的方向成为水平或垂直方向,接着对修正后的图像块采用传统的 DWT。但是这个方法具有一定的局限性:1) 图像块之间相互独立的操作使边界上的像素无法利用其相互间的相关性,并且重构图像会产生快效应;2) 空间可伸缩性得到限制,因为经过低通下采样后的图像不再只停留在固定的方格内。

本文提出了一种新的基于方向优化的提升小波变换框架(DOLW)。采用基于梯度的方向预测模型获得提升小波方向的最优变换方向,在小波提升环节沿着最优方向进行预测和更新,从而削弱遥感图像高频子带中非水平或垂直方向上的边缘与纹理能量。对于亚像素上的像素值引入抽样函数插值,使相同压缩比下的遥感图像重构质量获得显著提高。

2 传统提升小波框架

提升小波与经典的离散小波相比,具有原位操作,计算速度快,计算时无需额外的存储开销等优势,被誉为第二代小波^[10-11]。(1)式给出了一维提升小波的基本变换原理:

$$\begin{bmatrix} H \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & -P \\ U & I-UP \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_o \\ X_e \end{bmatrix}. \quad (1)$$

根据(1)式,可以将提升小波分解为:分裂、预测与更新三个步骤。

1) 分裂:将序列 X 分裂成两个互不相交的子集,常分为奇数序列 X_o 与偶数序列 X_e ;

2) 预测:用偶数序列的预测值 PX_e 去预测相邻的奇数序列,奇信号 X_o 减去预测值得到预测残差即细节系数。其中 P 为预测算子,表示相邻偶数序列的线性组合。预测残差 H 的大小体现相邻样本间相关性的强弱,相关性越强,系数值越小。即:

$$H = X_o - PX_e. \quad (2)$$

3) 更新:按照(3)式模式,使原信号的全局特性在子集中继续保持, U 为更新算子, L 为近似信息也称小波低频系数。

$$L = X_e + U[X_o - PX_e]. \quad (3)$$

以上的提升步骤是完全可逆的,因此在分解和合成过程中选择相同的预测算子和更新算子,就不会有任何信息丢失,可以保证完全重建原始序列。

3 基于方向优化的提升小波变换

3.1 基于梯度的方向预测模型

如何获取遥感图像中高频细节信息的方向特征,是本文算法需要解决的核心问题。解决该问题不仅需要考虑高频信息方向预测的准确性,而且要尽可能降低方向预测的计算复杂度。如果对遥感图像中每个像素的每个方向都进行方向预测,从而选择高频能量之和最小的方向作为变换方向,则计算开销将非常之大,因此,设计了一种在较低计算复杂度下获得最优小波提升方向的新方法——基于梯度的方向预测模型。其步骤如下:

1) 将图像分为 $N \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 的图像块,对每一个图像块的每一个像素计算其梯度 G_x 和 G_y ;

2) 估计图像块的局部方向,估计公式如下:

$$\omega = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N 2G_x(i,j)G_y(i,j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [G_x^2(i,j) - G_y^2(i,j)]} \right\}, \quad (4)$$

式中 N 代表图像块的大小, G_x 和 G_y 分别代表在 x

和 y 方向上的梯度。

该方法针对遥感图像与 Barbara 图像的方向检测效果如图 1 所示。

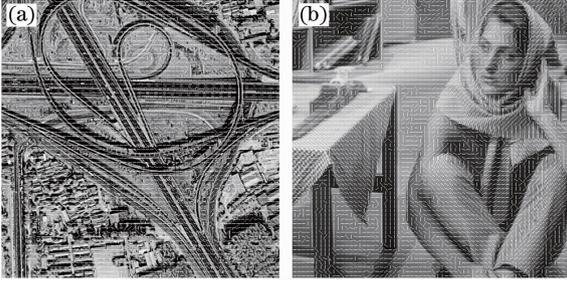


图 1 基于梯度算子的(a)遥感图像 BJP-1 与(b)Barbara 图像的方向预测结果

Fig.1 Direction prediction results of remote sensing image and Barbara based on gradient operator

3.2 垂直方向的优化变换

通常针对图像的提升小波变换为二维变换,需要分解为水平与垂直两个方向的变换。在 DLOW 框架,先对垂直方向进行方向预测,分别用 $-1, -7, -6, -5, 0, 5, 6, 7, 1$ 来标记所选的 9 种可选方向,垂直变换的方向将在这 9 个方向中进行选择。在这 9 种可选方向中,最大精度可达到 $1/4$ pixel,方向分别为 $7, 5, -5$ 和 -7 ,图 2 给出了垂直方向选择的基本示意图。

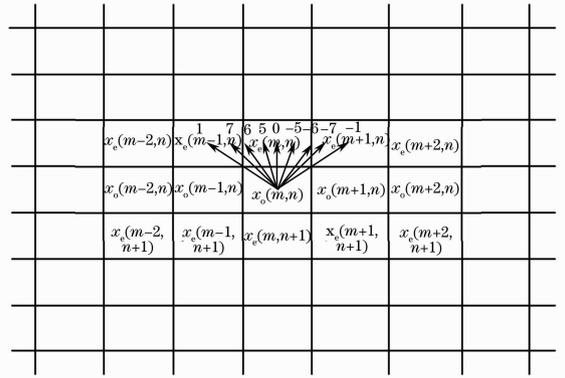


图 2 垂直方向优化变换的 9 个可选方向

Fig.2 Nine optional directions of vertical optimal transform 对于最佳变换方向的选择具体方案如下:

- 1) 根据(4)式计算图像块的方向,设 $\omega(-90 \leq \omega \leq 90)$ 为由(4)式检测到的方向;
- 2) ω_k 为图像块的所有可能的可选方向,那么最佳选择方向 ω_v 可利用(5)式得出,其中 ω_v 所选的最优变换方向, ω_k 是可选方向, T 为阈值

$$\omega_v = \omega_k, \quad \text{if } |90 - \omega - \omega_k| < T. \quad (5)$$

- 3) 对于某些图像块,并不能完全由(5)式来确定。这时采用传统的寻找高频系数最小的变换方向最为最优变换方向。但是,这些图像块的实际数目是非常少的。

在确定最佳变换方向后,对于 DLOW 框架的垂直变换,以 Db9/7 为例,其提升框架的实现过程如下:

$$\begin{cases} h_1(m,n) = x_o(m,n) + \alpha \{x_c[m + \tan(90 - \omega_v), n] + [m + 1 - \tan(90 - \omega_v), n]\} \\ l_1(m,n) = x_c(m,n) + \beta \{h_1[m - 1 + \tan(90 - \omega_v), n] + h_1[m - \tan(90 - \omega_v), n]\} \\ h_2(m,n) = h_o(m,n) + \gamma \{l_1[m + \tan(90 - \omega_v), n] + [m + 1 - \tan(90 - \omega_v), n]\} \\ l_2(m,n) = l_1(m,n) + \delta \{h_2[m - 1 + \tan(90 - \omega_v), n] + h_2[m - \tan(90 - \omega_v), n]\} \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} h(m,n) = \frac{1}{K}h_2(m,n) \\ l(m,n) = Kl_2(m,n) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $\alpha = -1.586134342, \beta = -0.05298011854, \gamma = 0.8829110762, \delta = 0.4435068522, K = 1.149604398, l(m,n)$ 和 $h(m,n)$ 分别为 DLOW 的低频和低频系数。

3.3 水平方向的优化变换

对于水平变换,分别用 $-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ 来标记 15 个可选方向,水平变换的方向在这 15 个可选方向中选取。在这 15 个可选方向中,最大的精度可达到 $1/4$ pixel。图 3 给出了水平方向选择的基本示意图。

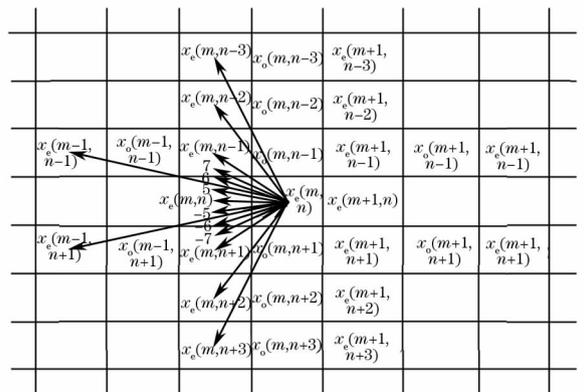


图 3 水平方向优化变换的 15 个可选方向

Fig.3 Fifteen optional directions of horizontal optimal transform

图像经过垂直变换后,由于下采样的操作,导致图像的空间分辨率不足,图像块原有的方向信息将发生变化。因此,在水平变换时,扩展可选方向,确保获得更低的高频系数。此外,所扩展的可选方向,均在整数像素上,这就避免了插值操作,不会增加大的计算量。对于水平变换的预测和更新操作、最优变换方向的选择都和垂直变换类似,这里不再叙述。

3.4 亚像素插值

由以上的可选方向可以看出,部分方向并没有被整数像素所覆盖。因此必须考虑亚像素插值的问题,为了确保图像的可完整重构,这次采用抽样还属插值方法(sinc)。在数字信号处理中,sinc插值由有限个样本内插得到,即

$$x_e[m + \tan(90 - \omega_v), n + i] = \sum_j a_j x_e(m + j, n + i), \quad (8)$$

式中 a_j 为插值系数,Sinc插值算法是基于sinc函数定义的,sinc函数定义如下:

$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} \sin x/x & x \neq 0 \\ 0 & x = 0 \end{cases} \quad (9)$$

采用8个相邻的像素来实现亚像素插值。亚像素插值操作将频繁的进行,因此可以将插值系数通过一个表格列出来,以降低计算复杂度。

4 二维 DOLW 变换框架

在二维 DOLW 变换中,为了充分利用遥感图像的特征,尤其是遥感图像的局部方向特性。需要将遥感图像分成大小相等的若干图像块,进而找出图像块的主导方向。由 3.1 介绍的基于梯度的方向预测模型将平坦区域或主导方向在可选方向中的区域选取出来,对于其他图像块采用传统的方法来选取变换方向,方向检测器如图 4 所示,垂直变换时 $F(\omega) = |90 - \omega - \omega_k|$,水平变换时 $F(\omega) = |\omega - \omega_k|$ 。此外,在垂直变换时的图像块的大小为 8 pixel×8 pixel,水平变换时的图像块大小为 8 pixel×4 pixel。

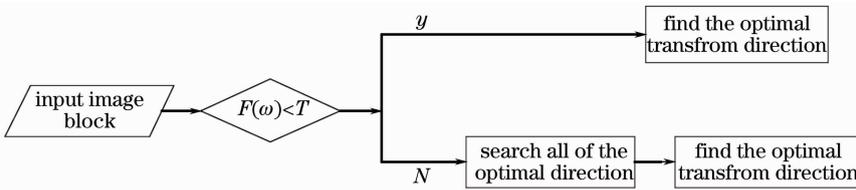


图 4 二维 DOLW 变换的方向检测器

Fig. 4 Direction detector of two dimensional (2D) direction optimal flifting wavelet (DOLW) transform

综上所述,可以将二维 DOLW 变换的基本变换步骤概括如下:

- 1) 将图像分为 8 pixel×8 pixel 的图像块;
- 2) 利用图 4 所示的方向检测器并结合基于梯度的方向预测模型找到最优变换方向;
- 3) 进行一维的垂直 DOLW 变换;
- 4) 对于获取的高频子带,采用传统提升小波;
- 5) 对低频子带分为 8 pixel×4 pixel 的图像块,进行一维水平 DOLW 变换;
- 6) 重复步骤 1),直至图像的提升小波分解结束。

5 多级树集合分裂算法

本文对 DOLW 变换后的小波系数采用多级树集合分裂算法(SPIHT)^[12]来编码。SPIHT 利用小波变换的能量集中性和小波系数的各级子带相似性,在特殊的扫描方式下,能有效地从高能量层到低能量层渐进编码,优化系数输出。

SPIHT 算法中,对于位置 (i, j) 的给定系数,设 $C(i, j)$ 为它的孩子坐标集合, $D(i, j)$ 为它的后代坐

标集合, $G(i, j)$ 为它的非孩子子坐标集, $G(i, j) = D(i, j) - C(i, j)$ 。其分集规则为:如果 $D(i, j)$ 关于当前阈值是重要的,则将其分解为 $G(i, j)$ 和 4 个 $C(i, j)$;如果 $G(i, j)$ 关于当前阈值是重要的,则将其分解为 4 个 $G(i, j)$ 。此外,SPIHT 算法通过 3 张链表来存放扫描信息,即显著系数表(LSC)、不显著系数表(LIC)和系数的不显著集合表(LIS)。SPIHT 编码的具体过程可以分为如下四步:

1) 初始化:初始化 LSC 表、LIC 表、LIS 表和最大扫描阈值。最大扫描阈值门限 $T_0 = 2^{n_0}$, $n_0 = \lceil 1b \max |(i, j)| \rceil$; LSC= ϕ , LIC={小波低频系数的所有坐标 (i, j) }, LIS={LIC 中有孩子的系数的所有坐标};

2) 显著性扫描过程:依次判断 LIC 表中每个小波系数的重要性,如果 (i, j) 重要,则输出“1”及其符号位,正负分别用“1”、“0”表示,并将此节点自 LIC 表中删除,添加到 LSC 表的末端;如果 (i, j) 不重要,则输出“0”,不删除此节点,仍然将其保留在 LIC 表中。然后排序扫描 LIS 表中的每个子集,如果子集上所有都不重要,那么该子集仅用“0”编码即可,否

则输出“1”，将该子集空间方向树分裂，并根据新的空间方向树跟新 LIC 和 LSC 表；

3) 细化过程：细化过程仅对 LSC 表中的元素进行，输出 LSC 表中非新添加节点所对应小波系数的二进制表示的第 $n_0 + 1$ 位；

4) 更新阈值门限，重复 2) 和 3)，直到阈值或者比特率符合编码器要求。

6 实验结果与分析

为了验证 DOLW 变换在遥感图像编码中比传统提升小波变换具有更为优秀的表现，选取了 Quickbird 拍摄的具有不同图幅的 6 幅高分辨率遥感图像完成编码与重构检验。其中，BJP-1 与 BJP-2 均为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的遥感图像，BJP-3 与

BJP-4 均为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的遥感图像，BJP-5 与 BJP-6 均为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 的遥感图像。此外，实验中也选取了边缘与纹理信息较为丰富的 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ Barbara 图像作为自然景物图像的代表，进一步验证 DOLW 变换对自然景物图像的编解码质量也有一定改善。

表 1 比较了传统提升小波变换与 DOLW 变换对图像分解后，高频子带的能量变化情况。实验选择的参考指标是小波变换后高频子带系数的平均值，所选取的小波基函数为 Db9/7 小波基函数，表中数字的单位是 pixel。从表 1 不难看出，采用 DOLW 变换后，各图像的高频系数平均值较传统提升小波变换都得到了有效降低，从而证明了 DOLW 变换能够有效降低高频子带的能量。

表 1 图像经传统提升小波变换与 DOLW 变换后高频系数平均幅度值的比较

Table 1 Comparison of the average amplitude values of high frequency coefficients between traditional lifting wavelet transform and DOLW

Images /pixel	Average amplitude values of high frequency coefficients /pixel	
	Traditional lifting wavelet transform	DOLW
BJP-1 (512×512)	19.62	17.47
BJP-2 (512×512)	4.92	4.66
BJP-3 (1024×1024)	3.43	3.18
BJP-4 (1024×1024)	10.18	9.60
BJP-5 (2048×2048)	17.73	16.78
BJP-6 (2048×2048)	3.99	3.78
Barbara (512×512)	6.06	3.27

表 2 给出了 0.125、0.25 以及 0.5 bpp 三种解码率下，传统提升小波变换与 DOLW 变换对遥感图像重构质量的影响，所选用的小波基函数仍然是 Db9/7，表中数值为峰值信噪比 (PSNR)，单位是分贝 (dB)。从实验结果不难看出，采用 DOLW 变换

的图像编码算法在性能上明显优于传统提升小波变换，相同解码率下，峰值信噪比最高可提高 0.6 dB，而且遥感图像的纹理与边缘信息越丰富，峰值信噪比的提高也愈加明显，这进一步证明了本文算法的有效性。

表 2 不同解码率下传统提升小波变换与 DOLW 变换解码遥感图像质量比较

Table 1 Comparison of the quality of the remote sensing image decoding between traditional lifting wavelet transform and DOLW based on different decoding rates

Images /pixel	Peak signal-to-noise ratio (PSNR) of the remote sensing image decoding /dB					
	Traditional lifting wavelet transform			DOLW		
	0.125 bpp	0.25 bpp	0.5 bpp	0.125 bpp	0.25 bpp	0.5 bpp
BJP-1 (512×512)	15.17	16.69	18.61	15.53	17.17	19.21
BJP-2 (512×512)	20.80	23.73	27.29	20.94	23.88	27.50
BJP-3 (1024×1024)	27.71	29.87	33.08	27.74	30.05	33.35
BJP-4 (1024×1024)	19.28	21.11	23.74	19.18	21.14	23.82
BJP-5 (2048×2048)	15.70	17.27	19.17	15.75	17.34	19.32
BJP-6 (2048×2048)	22.81	25.96	29.56	22.90	26.07	29.71

图 5 给出了高分辨率遥感图像 BJP-1 分别采用传统提升小波变换与 DOLW 变换编码后，在解码率为 0.5 bpp 时，公路部分的解码效果比较。图 6 展

示了另一幅高分辨率遥感图像 BJP-4 分别采用传统提升小波变换与 DOLW 变换编码后，在解码率为 0.5 bpp 时，建筑物区域的解码效果比较。图 7 给

出了高分辨率遥感图像 BJP-5 分别采用传统提升小波变换与 DOLW 变换编码后,在解码率为 0.5 bpp

时,建筑物区域的解码效果比较。

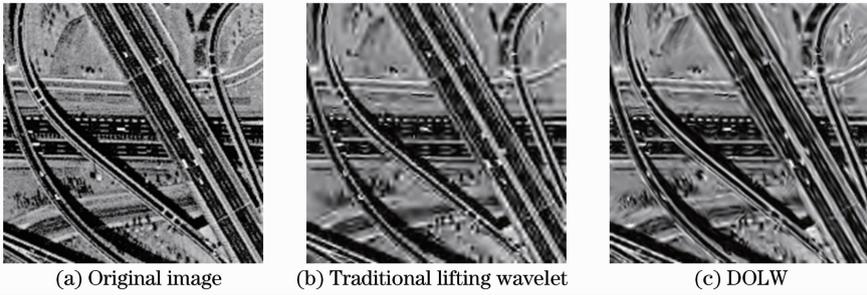


图 5 解码率为 0.5 bpp 下遥感图像 BJP-1 中公路部分解码效果比较

Fig. 5 Comparison of decoding performance of highway part of BJP-1 between traditional lifting wavelet transform and DOLW at 0.5 bpp

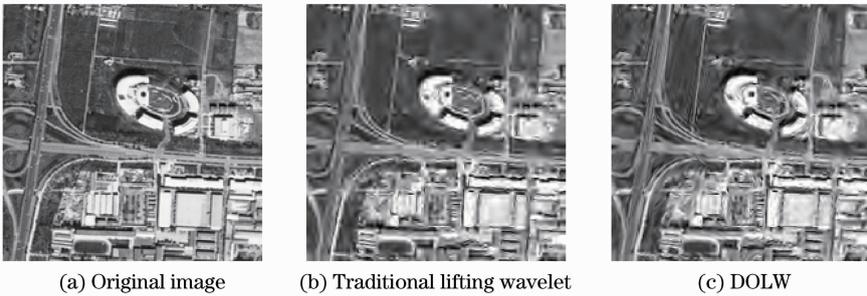


图 6 解码率为 0.5 bpp 下遥感图像 BJP-4 中建筑物部分解码效果比较

Fig. 6 Comparison of decoding performance of building part of BJP-4 between traditional lifting wavelet transform and DOLW at 0.5 bpp

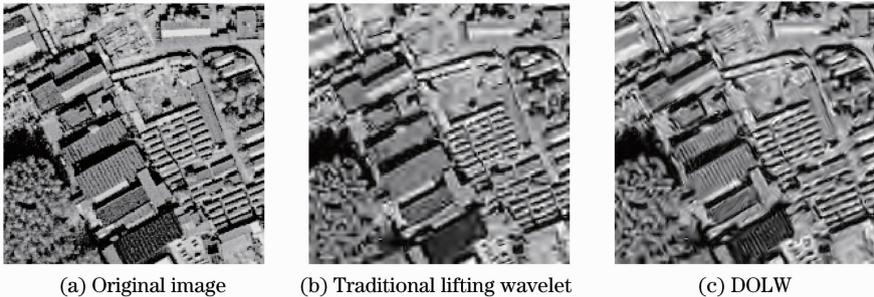


图 7 解码率为 0.5 bpp 下遥感图像 BJP-5 中建筑物部分解码效果比较

Fig. 7 Comparison of decoding performance of building part of BJP-5 between traditional lifting wavelet transform and DOLW at 0.5 bpp

从图 5 不难看出,在相同解码率下,与传统提升小波变换相比,本文提出的 DOLW 变换很好保留了非水平与非垂直的道路和桥梁边缘信息,而采用传统提升小波变换的解码图像中,非水平与非垂直的道路和桥梁边缘存在明显的锯齿状噪声。从图 6 可以看出,采用 DOLW 变换的解码重构图像能够更好保留建筑物与公路的非水平与非垂直边缘细节信息。从图 7 也可以看出,采用本文提出的 DOLW 变换编码后的遥感影像在较低比特率下,纹理与边缘

的重构效果明显好于采用传统提升小波变换的解码图像。

图 8 给出了解码率为 0.5 bpp 时,自然景物图像 Barbara 纹理信息最为丰富的裤子与围巾部分的解码重建效果比较。从图上可以很直观的看出,相同解码率下,采用 DOLW 变换的解码图像裤子与围巾的纹理细节得到了很好的保持,而采用传统提升小波变换的重构图像的纹理信息损失比较严重。这进一步证明了本文算法的有效性。

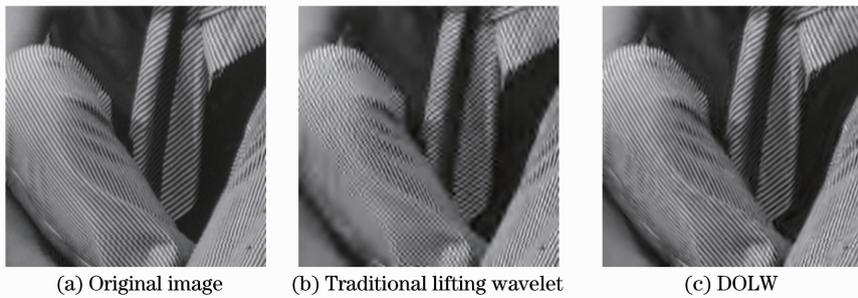


图 7 解码率为 0.5 bpp 下图像 Barbara 中裤子与围巾部分解码效果比较

Fig. 8 Comparison of decoding performance of trousers and shawl of Barbara between traditional lifting wavelet transform and DOLW at 0.5 bpp

7 结 论

针对传统提升小波变换无法很好重构遥感影像非水平与非垂直高频细节信息的问题,提出了一种新的基于方向优化的 DOLW,通过引入基于梯度算子的最优方向预测模型有效降低了遥感影像在小波分解后高频子带的能量,通过大量针对遥感图像的实验可以看出,DOLW 不仅在客观上可以提高相同解码率下图像重构的峰值信噪比,而且在主观上对图像的非水平、非垂直边缘与纹理信息的视觉效果也有较好改善。因此,相信新算法对今后遥感图像的压缩编码具有重要的理论与应用价值。

参 考 文 献

- Zhang Libao, Wang Pengfei. Fast detection of regions of interest in high resolution remote sensing image[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0714001.
张立保,王鹏飞. 高分辨率遥感影像感兴趣区域快速检测[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0714001.
- Li Bo, Yang Rui, Jiang Hongxu. Remote-sensing image compression using two-dimensional oriented wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 236-250.
- Zhang Libao, Huang Ying. Image coding algorithm using optimal scaling scheme and quadtree partitioning[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3460-3463.
张立保,黄颖. 一种结合最优缩放框架与四叉树分割的图像编

码算法[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3460-3463.

- W Sweldens. The lifting scheme: a custom-design construction of biorthogonal wavelets[J]. Appl Comput Harmon Anal, 1996, 3(2): 186-200.
- I Daubechies, W Sweldens. Factoring wavelet transform into lifting steps[J]. Fourier Anal Appl, 1998, 4(3): 245-267.
- Y Liu, N N King. Weighted adaptive lifting-based wavelet transform for image coding [J]. IEEE Trans Image Process, 2008, 17(4): 500-511.
- R L Claypoole, G M Davis, W Sweldens, et al.. Nonlinear wavelet transforms for image coding via lifting[J]. IEEE Trans Image Process, 2003, 12(12): 1449-1459.
- C L Chang, B Girod. Direction-adaptive discrete wavelet transform for image compression[J]. IEEE Trans Image Process, 2007, 16(5): 1289-1302.
- D Taubman, A Zakhor. Orientation adaptive subband coding of images[J]. IEEE Trans Image Process, 1994, 3(4): 421-437.
- Y Tannka, M Hasegawa, S Kato, et al.. Adaptive directional wavelet transform based on directional prefiltering [J]. IEEE Trans Image Process, 2010, 19(4): 934-945.
- Zhang Libao, Wang Pengfei. Remote sensing image coding based on adaptive directional lifting integer wavelet and optimal threshold[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(s1): 225-228.
张立保,王鹏飞. 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[J]. 中国激光, 2010, 37(s1): 225-228.
- Taubman D S, Marcellin M W. JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice [M]. Wei Jiangli, Bai Zhengyao Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 219-227.
陶布曼,马塞兰. JPEG2000 图像压缩基础、标准和实践[M]. 魏江力,柏正尧译. 北京:电子工业出版社, 2004. 219-227.

栏目编辑:李志兰