

基于复数小波阈值和 w-TV 的去块效应算法

关 艳, 练秋生

(燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

摘 要: 块离散余弦变换在低比特率时其恢复图像的块边界上会出现明显可见的方块效应, 降低了图像的视觉质量。针对该问题提出一种基于复数小波阈值和加权全变差(w-TV)的块效应消除算法, 利用复数小波阈值和加权全变差的特性对图像进行处理。实验证明, 该算法较好地去除了块效应, 尽可能保留了图像的特征结构, 具有良好的视觉效果。

关键词: 块离散余弦变换; 方块效应; 加权全变差; 复数小波阈值

Deblocking Artifacts Algorithm Based on Complex Wavelet Threshold and Weighted-Total Variation

GUAN Yan, LIAN Qiu-sheng

(College of Information Science & Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

【Abstract】 A major drawback of Block Discrete Cosine Transform(BDCT) is that the decoded images, especially at very low bit rates, exhibit highly noticeable blocking artifacts near the block boundaries. This paper proposes the method for combining weighted-Total Variation(w-TV) with complex wavelet threshold. By using the properties of w-TV with complex wavelet threshold, experiment shows that this method can reduce blocking artifacts and keep much more characteristic structures of image, it has the favorable vision effect.

【Key words】 Block Discrete Cosine Transform(BDCT); blocking artifacts; weighted-Total Variation(w-TV); complex wavelet threshold

1 概述

块离散余弦变换(Block Discrete Cosine Transform, BDCT)被当前大多数国际图像、视频压缩标准采用为核心的压缩算法, 如 JPEG, MPEG, H.261, H.263。BDCT 以块为单元进行单独量化和编码, 没有考虑像素在相邻块中的相关性, 所以, 在低比特率编码时粗糙量化使得相邻块的 DCT 系数取样落在不同的量化区间, 从而在块边界上产生方块效应, 此外边缘附近一部分余弦系数在压缩时被丢弃会产生 Gibbs 效应, 且比特率越低, 方块效应和 Gibbs 效应越严重。

现阶段一些后处理的方法已经应用到去除块效应和 Gibbs 效应中, 如基于凸集投影(POCS)的迭代恢复法^[1]和马尔可夫随机场(MRF)的最大后验(MAP)^[2]。基于 POCS 理论有较好的去块效应性能, 但是要经过大量迭代, 计算复杂度太高。MRF-MAP 法可以在一定程度上减少方块效应, 但对图像的平滑程度有很强的依赖性, 不能很好地保护图像的边缘信息。

本文提出加权全变差(weighted-Total Variation, w-TV)法与双树复数小波阈值法相结合的去块效应算法, 能很好地去除块效应和 Gibbs 效应, 对图像的纹理有较强的保护作用, 在客观上可以提高图像的峰值信噪比, 充分发挥了 2 种方法的优势。

2 加权 TV

基于偏微分方程的一类经典去噪方法就是全变差(TV)去噪。全变差方法最大的优点在于不损失图像中固有的不连续性, 在去噪的同时保持图像的边界, 去除噪声时所用的全变差滤波器结构简单, 系数容易计算, 计算系数时包含了图像的边缘信息。

本文图像的压缩以 JPEG 压缩为例, 为了更好地去除块效应和 Gibbs 效应, 对全变差进行调整以适应 JPEG 的块结构, 将通常使用的全变差调整为加权全变差^[3]。

若函数 $u(x) \in L^1(\Omega)$, 其中, $\Omega \subset R^2$ 是凸集, 且 $\nabla u(x) \in L^1(\Omega)$, 则 $u(x)$ 的全变差可定义为

$$TV_{\alpha}(u) = \int_{\Omega} \alpha(x) |\nabla u| dx \quad (1)$$

其中, 权值 α 是定义在 Ω 域上正的、平滑的函数, α 在块边缘处有较大的值而在块中间是较小的值。本文 α 取值参见文献^[3]。

在本文中 α 只与块的大小有关。在 8×8 块结构下, 式(1)的离散形式如下^[3]:

$$TV(u) = \sum_{m,n} \sqrt{a_{m,n}^2 + b_{m,n}^2 + c_{m,n}^2 + d_{m,n}^2} \quad (2)$$

其中,

$$a_{m,n} = \alpha_{m \% 8} (u_{m+1,n} - u_{m,n}) \quad b_{m,n} = \alpha_{n \% 8} (u_{m,n+1} - u_{m,n})$$

$$c_{m,n} = \alpha_{(m-1) \% 8} (u_{m,n} - u_{m-1,n})$$

$$d_{m,n} = \alpha_{(n-1) \% 8} (u_{m,n} - u_{m,n-1})$$

其中, % 为模运算。

3 复数小波阈值

1998 年 Kingsbury 提出了复数小波的概念。由于复数小波兼具近似平移不变和方向选择性, 且计算冗余较其他类似方法显著降低, 因此已经在图像去噪、复原、分割以及运动

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60772079)

作者简介: 关 艳(1982 -), 女, 硕士研究生, 主研方向: 图像处理; 练秋生, 副教授、博士

收稿日期: 2009-03-20 **E-mail:** guanyan9099@126.com

估计等领域取得很好的应用成果。但是由于超过一层分解的复数小波变换的输入是复数形式，因此构造其完全重构的逆滤波器非常困难。Kingsbury 进一步提出双树复数小波变换^[4](Dual-Tree Complex Wavelet Transform, DT-CWT)，在保留复数小波其他诸多优点的同时，保证了完全重构性。双树复数小波变换是一种具有近似平移不变性、良好的方向选择性、有限的冗余和高效的计算效率等优良特性的新型小波变换形式。因此，本文使用双树复数小波进行阈值处理，经实验证明在主观和客观两方面都有很大的提高。

通常在小波变换域中对系数进行阈值处理的方法分为硬阈值和软阈值。其中，软阈值处理后的图像与原始图像具有相同的光滑性，但就范数误差最小观点来说，硬阈值处理方法优于软阈值处理方法。因此，本文采用双树复数小波硬阈值方法。

小波阈值法中 2 个基本的要素是阈值和阈值函数。阈值的确定是阈值法中关键的问题，阈值选取的好坏对去噪效果具有决定性的作用。对于比较平滑的块效应图像，通常需要一个很大的阈值才能有效去除块效应；而对于纹理较多的图像，为了较好地保护边缘，应该设置一个较小的阈值，本文中的实验证实，将阈值估计为 $T = (24 \times \sigma) / Q$ 时，图像的视觉效果和信噪比达到最佳。全变差图像去噪对噪声要求有一定的先验知识，要预先知道或估计出噪声的方差，为了得到更好的 PSNR 值，采用文献[5]中的量化方差 σ 的估计值：

$$\sigma^2 = 0.69 \times (\bar{q})^{1.3}, \quad \bar{q} = \frac{1}{9} \sum_{i,j} q_{i,j}$$

其中， \bar{q} 由量化表 $t_q = [q_{i,j}]_{i,j=1,2,\dots,8}$ 得出； \bar{q} 表示量化表中前 9 个数值的平均值，这 9 个数值对应的是 DCT 的低频系数。JPEG 的量化因子是 $Q = 1, 2, \dots, 100$ 。

双树复数小波阈值法有较好的去块效应作用，特别是对图像的纹理有较强的保护作用。虽然该方法客观上可以提高图像的峰值信噪比，但主观上仍然存在一些块效应，去块效应不彻底。因此，采用加权全变差方法来弥补双树复数小波阈值法的不足。

4 带复数小波阈值的极小化全变差

全变差采用新的准则函数达到图像去噪目的，它是利用图像的梯度信息进行复原的： $\min \int_{\Omega} |\nabla u| d\Omega$ (在限制系数范围的约束条件下，使得 $\int_{\Omega} |\nabla u| d\Omega$ 是对 u 的梯度积分的最小值)。

本文中的约束条件是限制带噪图像的变换系数范围。限制系数范围是先对块图像进行 DCT 变换，得到变换系数 $B_{m,n}$ ，确保每个变换后的 DCT 系数仍然在压缩时的量化区间内，从而达到最优化的目的。这里的量化区间是由原压缩图像的量化系数得到的。经压缩图像量化后的变换系数 $W_{m,n}$ 的量化区间为 $[W_{m,n}^{\min}, W_{m,n}^{\max}]$ ：

$$\begin{cases} W_{m,n}^{\min} = t_q (W_{m,n} - 0.5) \\ W_{m,n}^{\max} = t_q (W_{m,n} + 0.5) \end{cases}$$

它使用与原压缩图像相同的量化表 t_q 。将所有的变换系数 $B_{m,n}$ 限制到区间 $[W_{m,n}^{\min}, W_{m,n}^{\max}]$ 中：

$$B_{m,n} = \begin{cases} W_{m,n}^{\min} & \text{if } B_{m,n} < W_{m,n}^{\min} \\ B_{m,n} & \text{if } W_{m,n}^{\min} \leq B_{m,n} \leq W_{m,n}^{\max} \\ W_{m,n}^{\max} & \text{if } B_{m,n} > W_{m,n}^{\max} \end{cases}$$

由于该模型中的目标函数是凸函数，因此可利用带投影的梯度下降法进行求解，即有

$$\begin{cases} u^0 = \hat{u} \\ u^{k+1} = u^k - t_k P(g(TV(u^k))) \end{cases}$$

其中， t_k 为迭代步长； $g(\cdot)$ 为次梯度； $P(\cdot)$ 为正交投影。

综上所述，本算法可归纳为：

- (1) 得到 JPEG 解压后的块图像，选定 t_k 的值为： $t_k = 1/(k+1)$ ， k 为迭代次数；
- (2) 计算 $g(TV(u^k))$ ，建立迭代方程： $u^{k+1} = u^k - t_k g(u^k)$ ；
- (3) 进行 DCT 变换，得到变换系数 $B_{m,n}$ ，将所有的变换系数 $B_{m,n}$ 限制到区间 $[W_{m,n}^{\min}, W_{m,n}^{\max}]$ 中，再进行 IDCT 变换；
- (4) 进行双树复数小波硬阈值处理；
- (5) 重复步骤(3)；
- (6) 经过 k 次迭代最后得到重构后的图像。

5 实验结果及分析

图像质量的好坏通常用信噪比和视觉效果来衡量。为验证本文算法去方块效应的性能，分别利用全变差、加权全变差、双树复数小波阈值以及本文提出的方法(加权全变差加复数小波阈值)进行仿真实验。实验使用 Lena(512×512)和 Boats(512×512) 2 幅灰度图作为测试图像。图 1 是 3 种不同方法迭代 30 次时的 PSNR 值，可以看出，本文方法不仅 PSNR 值好于其他 2 种方法，而且经过极少次迭代就可以近似收敛。图 2(a)是经双树复数小波阈值处理的图像，可以看出 Gibbs 效应和块效应没有完全的去掉，而本文方法有效地去除了 Gibbs 效应和块效应。

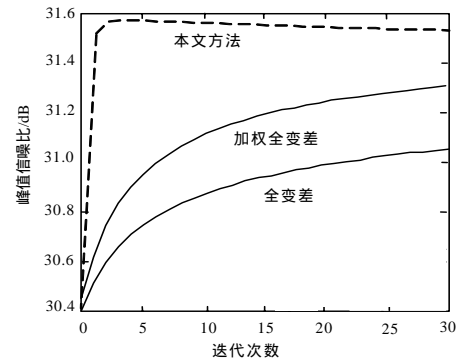
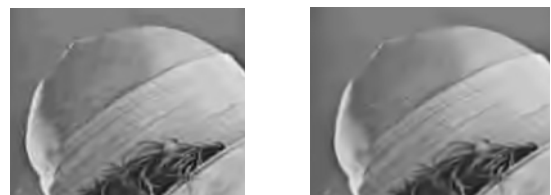


图 1 不同方法的迭代次数的 PSNR 值



(a) 双树复数小波 (b) 本文方法

图 2 Lena 图像 2 种不同方法的比较

在 $Q=10$ 的情况下解压后的 PSNR=30.396 9 dB，图 2(a) 的 PSNR=31.446 2 dB，图 2(b) 的 PSNR=31.571 3 dB。

图 3(a) 使用 JPEG 标准对 2 幅原图像进行了压缩仿真实验。各种方法均是在 $Q=10$ 的情况下进行的。图 3(b) 用 TV 范数进行图像处理，TV 范数指的是权重 α 取值为 1。从重构后的图像可以看出还有大量的块效应没有去除。图 3(c) 只用加权全变差处理的图像，不难发现图的视觉效果不佳。图 3(d) 是采用本文方法处理后的图像，这种新方法比前面几种方法能更有效地去除块效应，并有效地保持了有意义的图像特征，使得恢复图像看起来更加真实、自然。

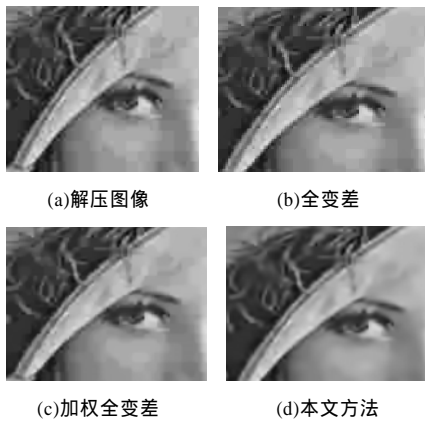


图3 Lena 图像的实验结果

本文客观评价指标采用的是 $PSNR$ 并且将 Lena 和 Boats 在不同比特下应用不同 DCT 域后处理方法进行了比较。为了证明硬阈值优于软阈值, 在实验中进行了比较。表 1 中各项指标显示, 本文方法有较为明显的改进, 且在低压缩比下, 这种优势更加明显。

表 1 不同方法的 $PSNR$ 值比较

Q	实验图像	dB				
		JPEG 压缩	全变差	加权全变差	本文(软阈值)法	本文(硬阈值)法
		$PSNR$	$PSNR$	$PSNR$	$PSNR$	$PSNR$
5	Lena	27.32	27.80	28.08	27.74	28.81
	Boats	25.48	25.92	26.13	25.65	26.43
10	Lena	30.40	31.06	31.30	30.75	31.57
	Boats	28.13	28.71	28.86	28.17	28.98
20	Lena	32.96	33.63	33.69	33.39	33.73
	Boats	30.48	31.06	31.08	30.68	31.08

(上接第 207 页)

表 1 2 种方法的性能指标比较

图像	性能指标	Canny+后处理	改进的 Canny+后处理
Barbara	EPP	0.100 5	0.098 7
	MSE	200.958 0	203.844 5
	$PSNR/dB$	25.099 8	25.037 8
Lady	EPP	0.074 3	0.072 4
	MSE	183.317 0	161.078 4
	$PSNR/dB$	25.498 8	26.060 4

比较图 1(b)、图 1(c)可以看到, 两者几乎相同。这是因为该输入图像几乎不存在曲率很大的纹理成分, 所以本文算法利用曲率加权抑制不规则边缘的功能不能充分发挥。但仔细观察还是可以看到一些差别, 例如左裤腿上的皱纹, 图 1(c)较图 1(b)简化了。从表 2 的数据也可看出, 图 1(c)中的像素总数比图 1(b)少一些。图 1(d)和图 1(e)分别是利用图 1(b)和图 1(c)按 TV 修补模型图像编码方法所得的重构图像。可以看出, 两者没有视觉上可察觉的差别。

从图 2(b)和图 2(c)的比较可以看出, 本文算法得到的边缘图明显优于现行的 Canny 算法, 表现在其抑制了左手臂上和头发上的纹理型杂乱“边缘”, 同时检测出颈部左侧的完整边缘和脸部左侧的大部分边缘。从原图像可以看到, 这些边缘用梯度来考察是很弱的, 所以, 不能用现行的 Canny 自动阈值方法得到。如果用较低阈值的 Canny 方法调用 edge.m 函数, 这些边缘也可以得到。但这样必须付出更大的代价——产生更多“无意义的”杂乱边缘。因为从表 2 可看到, 在目前的阈值下, 图 2(b)的像素数目已经比图 2(c)多了约 2%。从图 2(d)与图 2(e)的比较也可看出, 利用改进的 Canny 算法, 图 2(c)重构的图像比图 2(d)好, 例如图 2(d)的脸部左侧存

6 结束语

本文提出基于复数小波阈值和加权全变差去块效应算法, 该方法不仅能去除块效应, 对 Gibbs 效应也有很好的抑制作用。在用双树复数小波进行阈值处理时, 选择的阈值是与全变差迭代次数有关的, 这样能更有效地提高峰值信噪比。实验结果说明本文方法在对图像进行去噪的同时能够保护图像的纹理, 无论从数据还是从视觉上比较, 图像的质量都得到很好的提高。

参考文献

- [1] Lee Y L, Kim H C, Park H W. Blocking Effect Reduction of JPEG Images by Signal Adaptive Filtering[J]. IEEE Trans. on Image Proc., 1998, 7(2): 229-234.
- [2] Zakhor A. Iterative Procedures for Reduction of Blocking Effects in Transform Image Coding[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 1992, 2(6): 91-95.
- [3] Alter F, Durand S Y, Froment J. Deblocking DCT-based Compressed Images with Weighted Total Variation[C]//Proc. of IEEE Int'l. Conf. on Acoustic, Speech and Signal. [S. l.]: IEEE Press, 2004.
- [4] Kingsbury N G. The Dual-tree Complex Wavelet Transform: A New Efficient Tool for Image Restoration and Enhancement[C]//Proc. of EUSIPCO. '98. [S. l.]: IEEE Press, 1998.
- [5] Foi A, Katkovnik V, Egiazarian K. Pointwise Shape-adaptive DCT for High-quality Denoising and Deblocking of Grayscale and Color Images[J]. IEEE Trans. on Image Proc., 2007, 16(5): 1395-1411.

编辑 张正兴

在明显缺陷。虽然从 $PSNR$ 来看, 图 2(c)比图 2(b)仅高不足 0.5 dB, 但视觉效果却有明显的提高。这说明, MSE 对于评价基于边缘信息的图像编码而言并不适用。

4 结束语

为了满足基于边缘信息的图像编码系统对边缘提取的严格要求, 本文提出了一种改进的 Canny 边缘检测算法。其核心是用曲率加权梯度模值取代梯度模值作为检测依据。从理论上讲, 它更好地反映了图像的结构特征, 因此, 较仅以梯度模值作为检测依据的现行 Canny 算法性能更优。实验结果验证了这一预期目标。之后将以此边缘提取算法为基础, 致力于开发多尺度的基于边缘信息的图像编码系统。

参考文献

- [1] 王大凯, 彭进业. 小波分析及其在信号处理中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] Chen T, Shen Jianhong. Mathematical Models for Local Nontexture Inpaintings[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2002, 62(3): 1019-1043.
- [3] Rudin L, Osher S, Fatemi E. Nonlinear Total Variation Based Noise Removal Algorithms[J]. Physica D, 1992, 60(4): 259-268.
- [4] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Transactions on PAMI, 1986, 8(6): 679-698.
- [5] Kurt B. Image Compression Based on Centipede Model[J]. ARI of the Buletin of the Istanbul Technical University, 2005, 54(2): 1-15.

编辑 张帆

