

文章编号 1004-924X(2007)04-0592-07

边缘保持正则化低码率压缩图像后处理算法

谭毅华, 田金文, 柳 健

(华中科技大学 图像识别与人工智能研究所多光谱信息处理技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:从图像恢复的角度, 提出以正则化方法完成后处理任务。分析了正则化方法的模型, 并给出了边缘保持的正则化函数所应具有的特性。从复杂性、健壮性和对边缘细节粒度控制的能力三个方面选择了相应的势能函数, 然后以半二次正则化将能量函数进行转换, 使其快速达到最小化。最后给出了整个交替迭代后处理算法的描述。该方法对图像边缘细节具有自适应性, 并能较快地取得最小值。实验结果显示, 该算法能有效地提高低码率压缩图像的客观质量和视觉效果。

关键词:图像压缩; 后处理; 低码率; 正则化; 边缘保持

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Post-processing of low rate compressed image using edge preserving regularization

TAN Yi-hua, TIAN Jin-wen, LIU Jian

(*State Key Laboratory of Multi-spectral Information Processing Technologies, Institute of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

Abstract: A regularization method is proposed to implement the post-processing task from the view of image restoration. The mathematical model of regularization is analyzed, also the properties of the regularization function with edge preserving. Then, the potential function is chosen and modified according to the tradeoff among the complexity, robustness and the granularity control, and the half-quadratic regularization strategy is applied for the reason of achieving the fast minimization of the energy function. Finally, the specific alternative iteration for the minimization process is described. The proposed method is adaptive to the edge details of images and can reach the minimum values fastly. The experimental results show that the method can improve the subject and visual quality of image. Compared with the MAP based algorithm, it may preserve more image details.

Key words: image compression; post-processing; low bit-rate; regularization; edge preserving

收稿日期:2006-12-22; 修订日期:2007-02-20.

基金项目:湖北省自然科学基金项目(No. 2006ABA088)

1 引言

随着 Internet 和无线网络的兴起,视觉通信成为充满着商机和技术挑战的领域。视觉通信中的信道容量很难满足传输高质量图像的要求。例如,Internet 网络可能由于用户激增,导致网络速度只有几十甚至几 kbps,为适应网络传输,只能降低传输视频码流的码率。在军事侦察上,有时需要高分辨率的图像,但囿于传输信道容量有限,只能对其做高倍比的压缩。此时直接的后果就是,尽管客户端或地面站接收到了视频或图像,但视觉内容的质量急剧下降,在画面上出现边缘模糊,边缘振荡(振铃效应)等现象。如果采用基于块的 DCT 压缩算法,还会出现块效应,在块和块之间产生明显的分界线。视频则由于时域上的相关性,在相邻两帧出现量化级数差别较大时,会引起点状噪声;对于连续运动的目标由于运动估计不准确,出现运动不连续而产生抖动现象。从图像质量上来说,在低码率压缩情况下,基于小波变换压缩恢复的图像质量明显优于传统的基于块的变换编码。但不幸的是,在高频子带系数的量化误差将会使恢复的图像在边缘处变模糊或引入振铃效应,而低频及高频子带系数的量化误差均会在平坦区域产生虚假轮廓效应、颗粒噪声及斑点噪声等。

图像后处理的目标就是尽可能地消除各种编码效应,改善压缩重建图像的视觉质量,逼近其理想图像。也即从压缩重建图像 Y 中估计出理想图像 X ,其质量有所提高。已有的研究工作大多是关于如何去除扰人的块效应以及振铃效应。这些方法大致可以分为以下几类。

图像增强。由于块效应和振铃效应主要源于高频振荡,最直接的方法便是对产生效应的区域作低通滤波。Reeves 和 Kim 首先提出以空间变化的低通滤波器消除块效应^[1]。为了保持解码后图像的锐度,必须精细地选择滤波器的系数,即滤波器必须根据图像的局部图像特征确定。关于这方面的研究有大量的工作可供参考^[2-4]。Macq 等人基于人眼视觉特性提出了一个感知自适应的后处理系统,根据视觉的掩模效应消除噪声^[5]。

图像恢复。图像恢复的方法将编码效应的去除视为病态的图像恢复问题,因此,大量的图像恢复算法经修正后可应用于后处理情况。有基于各种准则的算法,如基于最小均方误差(MMSE)^[6],基于最大后验概率准则(MAP)^[7-8]等;有受约束的最优化恢复,如受约束的最小均方^[9];有基于约束的投影方法,如凸集投影法(POCS)^[10-11]等。

基于模型的恢复。小波压缩方法重建的图像主要在边缘处产生失真,因此 Fan 等人提出首先建立边缘的模型,然后对压缩图像的重要边缘按此模型恢复,使其更接近原始边缘^[12]。在这种基于边缘模型的边缘重建算法中,压缩过程被近似地视为一个图像数据经低通滤波器滤波的过程,但其模型的建立非常困难。

基于小波变换的压缩算法容易引起边缘处的振铃效应^[13],消除编码效应的同时应更好地保持图像的边缘信息。本文从图像恢复的观点,在考虑图像先验知识的基础上,引入边缘保持的约束,以正则化方法对压缩图像进行迭代的后处理,消除编码效应,以改善图像的质量,逼近其理想图像。

2 边缘保持正则化后处理方法

正则化方法特别是有约束最小均方(CLS)方法已成功应用于许多图像恢复问题。此类方法首先定义两个对恢复图像互相冲突的约束函数,然后取两函数的权均值形成目标函数,通过最小化此目标函数恢复出理想的图像。假设压缩后的重建图像其观察模型为:

$$Y = X + \eta, \quad (1)$$

其中 Y 为压缩后的观察图像矢量表达, X 为原始图像矢量表达, η 为量化产生的噪声。为从 Y 恢复出 X ,应用正则化后,可建立如下目标函数:

$$J(X) = J_f(X, Y) + \lambda J_r(X), \quad (2)$$

上式中 $J_f(X, Y) = \|Y - X\|^2$ 为图像保真项,而 $J_r(X) = \sum_{i=1}^K \varphi(X_i)$ 为受罚的正则化项, K 为像素总数。此处的 $\varphi: R \rightarrow R$ 为实值势能函数, λ 为正则化参数,调节恢复过程在数据保真度和先验知识约束之间进行折中。通常假定图像总体为

分段平坦的,因此光滑特性是关于图像的先验知识,在正则化项添加此约束可令 $\varphi = \| \mathbf{C}\mathbf{X} \|^2$,其中 C 为高通滤波器。该约束便于目标函数的最小化,利用其二次性可由经典的最陡下降法求得全局最优解。但这样的假设和图像的实际分布并不相符,其结果将会引起图像的过度平滑。因此,正则化项应既可以保持图像的边缘特征,又能施加图像具有光滑性的约束。

2.1 边缘保持正则化势能函数

大量的实验结果表明,采用边缘保持的正则化做图像恢复时的质量优于其它正则化方法^[14]。正则化项能量的形式为:

$$J_r(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^K \varphi(d_i^T \mathbf{X}), \quad (3)$$

其中 d_i^T 为线性算子,序列 $\{d_i^T \mathbf{X}\}$ 的元素为相邻像素之间的一阶差分,即梯度, K 为像素总数。其中 φ 作为势能函数,它给图像每点处的梯度赋予一代价。同时为了使式(3)具有边缘保持特性,必须使势能函数 φ 具有边缘保持特性。文献[15]通过将边缘保持项转化为带权的拉普拉斯算子,对边缘保持特性的物理意义作了阐释,即在最小化代价函数过程中,使得平滑区域作均匀散射,而在边缘出现位置则不做平滑处理。为满足该特性,文献[16]给出了相关的证明,若使 φ 自适应于图像的间断性条件,以一维连续函数的形式表达的函数 φ 应满足以下条件:

- (1) $\varphi(t) \geq 0, \forall t$, 且 $\varphi(0) = 0$;
- (2) φ 在 $t \geq 0$ 时应为递增函数;
- (3) φ 应为偶函数,以使绝对值相等而符号相反的梯度对等价函数的贡献相等;
- (4) φ 连续可微;
- (5) $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\varphi'(t)}{2t} = M < +\infty$;
- (6) $\lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{\varphi'(t)}{2t} = 0$;
- (7) $\frac{\varphi'(t)}{2t}$ 连续并在 $[0, +\infty]$ 严格递减。

其中条件(5),(6)和(7)为边缘保持的三个条件。文献[15]基于势能函数的导数(称为影响函数 $\gamma(t)$)的形状对其进行了分类。

(1) 单调影响函数 $\gamma(t)$ (MT)。当 $|t| \geq k$ 时, $\gamma(t)$ 为常数,其中 k 为给定的门限。此类函数

的例子有在 MAP 估计中用到的 Huber 函数。

(2) 软重下降影响函数 $\gamma(t)$ (SR)。 $\gamma(\infty) = 0$, 此类函数的例子有柯西势能函数:

$$\varphi_c(t; k) = \log(1 + (t/k)^2), \quad (4)$$

其中 k 为尺度参数。

(3) 硬重下降影响函数 $\gamma(t)$ (HR)。当 $|t| \geq T$ 时, $\gamma(t) \approx 0$, T 为给定的门限。此类广泛应用的函数有 Welsh 函数:

$$\varphi_w(t; k) = 1 - (1/2k) \exp(-kt^2), \quad (5)$$

2.2 边缘保持正则化势能函数的确定

在正则化模型中,正则化函数(算子)的选取是所有正则化处理应用需解决的关键问题。一般而言,正则化函数应根据具体的图像确定。选择时应考虑两个基本原则:

(1) 健壮性。能消除在求解过程中引入大误差时的影响,即当变量值有扰动时,不会引起函数值大的跳跃。

(2) 计算的复杂度低。最小化算法应能稳定地最小化,收敛速度快。

HR 函数和 SR 函数由于具有很好的健壮性以及边缘保持特点,这两类函数广泛应用于计算机视觉领域中的退化估计问题^[16]。对于压缩图像后处理情况,估计方法应能从解码图像中检测出重要的奇异值和边缘,完成边缘保持的图像重建。HR 函数可完全避免奇异值产生较大的函数值跳跃,因此对边缘信号较多的图像信号,该类函数更为合适。尽管该类函数收敛速度较慢,计算复杂度稍高,但通过下节的半二次正则化方法,可予以较好的改善。基于以上讨论,本算法采用 HR 类的 Welsh 函数。

另一方面, Welsh 势能函数的粒度控制力较弱,即可能会过度检测出弱边缘,保留一些不必要的细节信息。对压缩图像则可能保留编码效应引起的虚假轮廓,这是后处理应避免出现的结果。为控制图像的粒度,有必要引入新的代价项至势能函数。在函数存在阶跃处,HR 势能函数产生的代价为常数,而新引入的代价项将产生较小的代价增量。为在保持系统稳定性的同时,又能控制图像的粒度,可在 Welsh 函数中添加二次项,延长势能函数的“拖尾”宽度。因此改进后的 Welsh 势能函数变为:

$$\varphi_N(t, \varepsilon, k) = \varepsilon |t|^2 + (1 - \varepsilon) [\varphi_w(t; k)]^2, \quad (6)$$

上式中 k 为正的尺度参数, $\varepsilon \in [0, 1]$ 为控制图像恢复粒度的参数。若 $\varepsilon = 1$, 对图像的粒度施加惩罚, 保证图像的总光滑性; 若 $\varepsilon = 0$, 势能函数利于图像的局部光滑重建, 允许保持细节信息。显然, ε 值较小时, 可以变动图像局部区域内的光滑性, 控制重建图像的粒度。图 1 绘出了采用 Welsh 势能函数改进后的函数以及相关的影响函数。

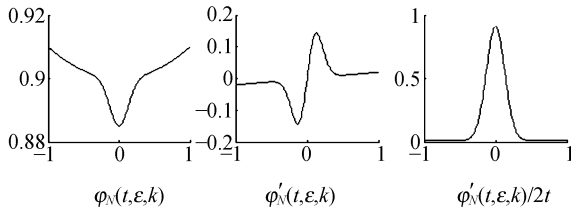


图 1 势能函数 $\varphi_N(t, \varepsilon, k)$ 及其相关函数形状

Fig. 1 Shapes of potential energy function $\varphi_N(t, \varepsilon, k)$ and corresponding functions

在压缩图像后处理情况下, 可以将像素的差分表达为水平方向和垂直方向两个分量, 故相应的势能函数表示如下:

$$\begin{aligned} \varphi_N(D_x X_{i,j}, D_y X_{i,j}, \varepsilon, k) = & \varepsilon ((D_x X_{i,j})^2 + \\ & (D_y X_{i,j})^2) + (1 - \varepsilon) ((\varphi_w(D_x X_{i,j}; k))^2 + \\ & (\varphi_w(D_y X_{i,j}; k))^2), \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $D_x X_{i,j} = (X_{i,j+1} - X_{i,j})$, $D_y X_{i,j} = (X_{i+1,j} - X_{i,j})$ 。

2.3 半二次正则化

选择自适应的势能函数作正则化后, 公式(2)转换为:

$$J(X) = \|Y - X\|^2 + \lambda \sum_{i,j} \varphi_N(D_x X_{i,j}, D_y X_{i,j}, \varepsilon, k), \quad (8)$$

根据势能函数产生的最小化公式通常是非二次函数, 可应用非线性共轭梯度法求解, 但该方法收敛速度很慢, 而且当目标函数非凸时, 不能保证收敛到全局最小值。为克服这两个弊端, 可以应用半二次正则化, 对正则化代价函数项进行转换^[16]。其基本的思想是构造增强的代价函数, 它包含一些辅助变量。即引入新的目标函数, 该函数与目标函数 J 同时在 X 处取最小值, 但它的最小化求解可由二次函数最小化方法完成。

定理 1. 设势能函数 φ 满足上节提及的七个

条件, 则:

(1) 存在严格递减的凸函数 $\psi: (0, M] \rightarrow [0, \beta)$, 此处:

$$\beta = \lim_{t \rightarrow +\infty} (\varphi(t) - t^2 \frac{\varphi'(t)}{2t}) \text{ 使得}$$

$$\varphi(t) = \inf_{0 < \omega \leq M} (\omega t^2 + \psi(\omega)), \quad (9)$$

(2) 固定 $t \geq 0$, 上式达到下确界时的 ω_t 有且仅有一个解,

$$\omega_t = \frac{\varphi'(t)}{2t}, \quad (10)$$

从该定理可知, 对于非凸的势能函数 φ , 可找到函数 φ^* , 使得下式成立:

$$\varphi(t) = \inf_{\omega} \{\varphi^*(t, \omega)\}, \quad (11)$$

并且当 ω 固定时, φ^* 为 t 的二次函数。因此, 自适应势能函数对应的二次函数为:

$$\begin{aligned} \varphi^*(D_x X_{i,j}, D_y X_{i,j}, (\omega_x)_{i,j}, (\omega_y)_{i,j}) = & (\omega_x)_{i,j} \\ & (D_x X_{i,j})^2 + (\omega_y)_{i,j} (D_y X_{i,j})^2 + \psi((\omega_x)_{i,j}, \\ & (\omega_y)_{i,j}) \end{aligned}$$

其中

$$(\omega_x)_{i,j} = \varphi_N'(D_x X_{i,j}) / (2D_x X_{i,j}),$$

$$(\omega_y)_{i,j} = \varphi_N'(D_y X_{i,j}) / (2D_y X_{i,j}), \quad (12)$$

故目标代价函数(8)可以对偶化为下式:

$$\begin{aligned} J^*(X, \omega_x, \omega_y) = & \|Y - X\|^2 + \\ & \lambda \sum_{i,j} \{(\omega_x)_{i,j} (D_x X_{i,j})^2 + (\omega_y)_{i,j} (D_y X_{i,j})^2 + \\ & \psi(\omega_x, \omega_y)\}, \end{aligned} \quad (13)$$

当 (ω_x, ω_y) 固定时, 代价函数(13)为二次凸函数, 对其求解可由线性方法完成, 快速地达到收敛。若采用交替迭代法, 则不必显式地求出(13)中的辅助函数 $\psi(\omega_x, \omega_y)$ 解析表达式, 降低问题的复杂性。

3 迭代求解算法

若不做半二次正则化处理, 目标函数只能通过非线性共轭梯度法或拟牛顿法求解。这两种方法求解的困难在于, 除了收敛速度慢外, 非线性共轭梯度法需要在每步多次计算代价函数值, 以满足代价函数减小的条件约束, 而拟牛顿法需要在每步计算 Hessian 矩阵, 计算的复杂度相当高。通过半二次正则化处理后, 目标函数转为凸函数, 但仍有多变量, 最小化求解也是比较困难的。考虑到变量之间存在一定的联系, 可以做松弛约

束,即交替迭代最小法求解。首先,固定图像场变量,使目标函数在辅助变量 (w_x, w_y) 达到最小;然后固定变量 (w_x, w_y) ,使目标函数相对图像场 X 达到最小。经过若干次交替迭代,目标函数相对多变量趋于平稳状态,最终取得最小值。因此,每次迭代可分为两步:

$$(1) (w_x, w_y)^{(k+1)} = \arg \min_{(w_x, w_y)} J^*(X^{(k)}, w_x, w_y);$$

$$(2) X^{(k+1)} = \arg \min_{(X)} J^*(X^{(k)}, (w_x, w_y)^{(k+1)}).$$

最小化算法的第一步相当直接,应用定理 1 中的结论,以公式(12)计算可得到 $k+1$ 步的辅助变量值。对于步骤 2,由于此时固定辅助变量,因此目标函数为 X 的二次项,利用线性共轭梯度法求解,可经有限步迭代收敛。

设 x 方向的差分矩阵为 G_x , y 方向的差分矩阵为 G_y ,而辅助变量构成的对角矩阵分别为 D_{wx} 和 D_{wy} , I 为单位对角矩阵,形成的 X 二次项为 $X^T G X$,可以求得之间的关系为:

$$G = I + \lambda D_{wx} G_x + \lambda D_{wy} G_y, \quad (14)$$

在上述步骤(2)中,方程(13)的最小化等效于下式矩阵形式的最小化:

$$J_X = X^T G X - 2Y^T X + Y^T Y, \quad (15)$$

设根据 $X^{(k)}$ 求得目标函数(15)的梯度为 g_k ,则线性共轭梯度法的迭代公式为:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \rho_k s_k, \quad (16)$$

其中,

$$\rho_k = \frac{-g_k^T s_k}{s_k^T G s_k}$$

$$s_{k+1} = -g_{k+1} + \beta_k s_k$$

$$\beta_k = \frac{g_{k+1}^T g_{k+1}}{g_k^T g_k} \text{ (Fletcher-Reeves 公式)}, \quad (17)$$

为了使迭代算法中止,需要设计相应的迭代中止条件。图像在每次迭代的变化反映在目标函数能量的减少上。因此对于共轭梯度法的中止条件可以设置为 $\Delta J_X < \delta$ 。但对于全局迭代,为了避免计算函数 $\psi(w)$,设定迭代中止条件为图像的相对范数趋于某个极小值,即 $\|X^{(k+1)} - X^{(k)}\| / \|X^{(k)}\| < \eta$ 。式中 δ 和 η 均为极小正数。

4 实验结果

本节将报告边缘保持正则化算法应用于低码率小波压缩图像的实验结果。静态图像的压缩算法为 JPEG2000。实验中实现了基于 MAP 的算法^[8],文中提出的边缘保持正则化后处理算法以 ERP 表示。实验图像为 512×512 的 8 bit 灰度图像 Lena 与 Peppers 以及 256×256 的 8 bit 灰度图像 Cameraman 和 Bird。算法中图像正则化因子 $\lambda = 0.08$,Welsh 势能函数 $k = 2.5$,粒度控制因子 $\epsilon = 0.6$ 。

表 1 不同码率下压缩图像及相应后处理图像的 PSNR 值 (dB)

Tab. 1 PSNR of compressed images and post-processed images at variant rates (dB)

bpp	Lena			Peppers			Cameraman			Bird		
	J2000	MAP	ERP	J2000	MAP	ERP	J2000	MAP	ERP	J2000	MAP	ERP
0.1	29.94	29.33	29.95	29.72	29.54	29.94	23.40	23.32	23.48	31.71	31.72	31.88
0.2	32.90	32.94	32.98	32.59	32.41	32.81	26.21	25.98	26.66	35.90	35.59	36.17
0.3	34.86	33.45	33.68	34.10	33.32	33.67	28.13	27.94	28.21	38.26	37.29	38.30
0.5	37.21	35.97	36.80	35.84	34.65	35.21	30.82	28.98	30.53	41.15	39.76	41.18

表 1 为测试图像在不同压缩比下 JPEG2000 算法压缩后的 PSNR 值,以及对这些压缩图像分别以 MAP 方法和本节算法作后处理后的 PSNR 值。在 0.1 和 0.2bpp 时,本节的 ERP 算法对不同图像的 PSNR 值均有不同程度的增加,而 MAP 算法也略有增加。这主要是由于在低码率时,重建图像的编码效应比较严重,去掉编码效应

对保真度的贡献要高于其它区域变平滑对保真度的损害。但在相对较高的码率时,图像只存在较少的振铃和模糊效应,因此,尽管 MAP 算法和 ERP 算法有效地去除了编码效应,但仍然不足以弥补算法对信号保真度的破坏,因此 PSNR 反而有所下降。从客观的质量保真度准则来看,本节算法 ERP 仍然显示出了很好的信号保真能力。

图2是 256×256 cameraman 图像在0.2bpp时结果。图(a)在摄像师以及相机周围有着十分明显的振铃效应和模糊,图(b)MAP算法去掉了大部分的效应,但同时也使图像过度平滑,图(c)则基本去除了所有效应,同时更多保留了原图上的细节信息,因此本文算法处理的图像视觉效果最好。



(a) JPEG2000 压缩结果

(a) Compressed image of JPEG 2000



(b) MAP 后处理结果

(b) Post-processed result by MAP



(c) ERP(本文算法)处理结果

(c) Post-processed result by ERP(our algorithm)

图2 Cameraman 图像在0.2bpp时编码及后处理结果

Fig 2 Compressed and post-processed image of Cameraman at 0.2 bpp

5 结 论

本文研究了低码率图像压缩去除编码效应并将其向理想图像恢复的问题,以正则化方法作为技术手段实现了该目标。该方法解决了两个关键问题,一是从复杂性和鲁棒性方面选择了具有边缘保持特性的 Welsh 正则化函数,并对其进行改进使之可自适应于图像细节粒度控制的变化;二是应用半二次正则化,将能量函数转换为凸函数,使其可达到全局最小,并且以交替最小化方式降低计算复杂度。实验结果显示在0.1~0.2bpp低码率下,该方法对压缩重建图像的PSNR值可提高0.1~0.3dB,但在相对较高的0.5bpp码率时PSNR值有所下降。因此,该方法可显著地改善低码率压缩图像的视觉质量和客观质量,可以应用至低码率图像压缩系统。

参考文献:

- [1] REEVES H C, KIM J S. Reduction of blocking effects in coding[J]. *Opt. Eng.*, 1984,23. :34-37.
- [2] KUO C J, HSIEH R J. Adaptive postprocessing for block encode images[J]. *IEEE Trans. Circuit. Sys. Video Technol.*, 1995,5(8):298-304.
- [3] 贾平,张葆,孙辉. 航空成像像移模糊恢复技术[J]. *光学精密工程*,2006, 14(4):697-703.
JIA P, ZHANG B, SUN H. Computer post-processing method for blocking-artifact in satellite decoded images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):697-703. (in Chinese)
- [4] SCOGNAMIGLIO G, RAMPONI G, RIZZI A. Enhancement of coded video sequences via an adaptive nonlinear post-processing[J]. *Signal Process. :Image Commun.*,2003,18:127-139.
- [5] MACQ B, MATTAVELLI M, CLASTER O V, *et al.*. Image visual quality restoration by cancellation of the unmasked noise[C]. *Proc. IEEE ICASSP*,1994,53-56.

- [6] NAKAJIMA Y, HORI H, KANO H T. A Pel adaptive reduction of coding artifacts for MPEG video signals[C]. *Proceedings of IEEE ICASSP*, 1994, 928-932.
- [7] O'ROURKE T P, STEVENSON R L. Improved image decompression for reduced transform coding artifacts[J]. *IEEE Trans. Circuit. Syst. Video Technol.*, 1995, 5(12):490-499.
- [8] ROBERTSON A, STEVENSON R L. Reduced-complexity iterative post-filtering of video[J]. *IEEE Trans. Circuit. Syst. Video Technol.*, 2001, 11(10):1121-1127.
- [9] YANG Y, GALATSANOS N, KATSAGGELOS A K. Regularized reconstruction to reduce blocking cosine transformed compressed images[J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 1993, 3(6):421-432.
- [10] ROSENHOLTZ R, ZAKHOR A. Iterative procedures for reduction of blocking effects in transform coding[J]. *IEEE Trans. Circuit Syst. Video Technol.*, 1992, 1(1):81-94.
- [11] YANG Y, GALATSANOS N, KATSAGGELOS A K. Projection-based spatially adaptive reconstruction of block-transform compressed images[J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 1995, 4(7):896-908.
- [12] FAN G L, CHAM W K. Model-based reconstruction for low bit-rate wavelet-compressed images[J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 2000, 10(1):120-132.
- [13] 邓家先. 基于重要系数提升的遥感图像压缩 [J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(5):910-916.
DENG J X. A remote sensing image coding algorithm based on significant coefficients lifting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 910-916. (in Chinese)
- [14] CHARNONNIER P, BLANC-FERAUD L. Deterministic edge-preserving regularization in computed imaging[J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 1997, 6(2):298-311.
- [15] BLACK M J, RANGARAJAN A. Unification of line process, outlier rejection, and robust statistics with application in early vision[J]. *Int. J. Comput. Vision.* 1996, 19(1):57-92.
- [16] GEMAN D, YANG C. Nonlinear image recovery with half-quadratic regularization and FFT's[J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 1995, 4(7):932-946.
- [17] 刘红, 翟林培, 高鹰, 等. 提升小波变换在图像压缩中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(增):202-205.
LIU H, ZHAI L P, GAO Y, *et al.*. Lifting wavelet transform and its application in image compression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.):202-205. (in Chinese)
- [18] 林玉池, 崔彦平, 黄银国. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(3):509-514.
LIN Y CH, CUI Y P, HUANG Y G. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):509-514. (in Chinese)

作者简介:谭毅华(1975—),男,湖南茶陵人,博士,副教授,主要研究方向为图像/视频处理、分析和编码。E-mail: yihua.tan@263.net