

基于 DCT 域的高压缩图像去块效应算法

谢胜利, 石 敏

(华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510641)

摘要: 块离散余弦变换 (Block Discrete Cosine Transform) 的主要缺点是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. 为了尽量消除块效应并保护图像的边缘信息提出了一种基于 DCT 域的块效应消除算法. 该算法充分利用了人类视觉系统 (Human Visual System) 特性, 建立了块效应模型并给出一个简便的检测边缘标准, 对于平滑区, 对影响块效应的参数进行修正, 然后用线性函数块代替阶跃函数块去除块效应, 最后再对更新块和纹理区在 DCT 域中进行后滤波. 仿真结果验证了本文算法的有效性.

关键词: 块离散余弦变换; 方块效应; 人类视觉系统; 后滤波

中图分类号: TP911

文献标识码: A

Reduction of blocking artifacts for highly compressed images based on discrete cosine transform domain

XIE Sheng-li, SHI Min

(College of Electronic and Information, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China)

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. A blocking reduction algorithm in DCT domain is proposed to reduce blocking artifacts as many as possible, while preserving edge information. The characteristic of Human visual system (HVS) is extensively utilized in this paper. The model of blocking artifacts is built and a convenient edge detection measurement is introduced. For smooth regions, the step block is replaced with linear block and the parameter that affects blocking artifacts is modified. The DCT-domain post-filtering method is applied to the updated blocks and texture regions. The experiment results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: block discrete cosine transform (BDCT); blocking artifacts; human visual system (HVS); post-filtering

1 引言 (Introduction)

基于分块的离散余弦变换 (BDCT) 具有压缩效率高, 计算复杂度低, 易于实现等优点而被当前大多数的国际图像、视频压缩标准采用为核心的压缩算法, 例如 JPEG, MPEG, H. 261, H. 263 等. BDCT 是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由于粗糙量化使得相邻块的 DCT 系数取样落在不同的量化区间时就会在块边界上产生方块效应, 且比特率越低时方块效应越严重. 去块效应的方法很多, 它包括空间滤波法^[1], 基于小波表示法^[2], 基于马尔可夫随机场 (MRF) 的最大后验法^[3] 和基于凸集投影

(POCS) 的迭代恢复法^[4]. 本文提出的一种新的块效应去除算法是基于 DCT 变换域.

Zeng^[5] 首次提出方块效应可用阶梯函数来表示, 他对一些图像块的 DCT 系数应用零掩盖技术进行去除方块效应, 这种方法简单, 但是会导致高频信息丢失严重, 且会产生新的方块效应. Liu^[6] 提出一种在 DCT 域块效应盲测量方法, 把图像块边界分成 3 类, 对每类边界分别应用不同的 DCT 域滤波方法去除块效应, 但是这种算法处理后图像主观质量不是太好. Luo^[7] 应用相邻块之间 DCT 系数的相关性提出一种在平滑区采用二维 DCT 系数加权滤波, 边缘区用 Sigma 空间滤波器的快速去块效应算法非常

收稿日期: 2004-09-14; 收修改稿日期: 2005-04-18.

基金项目: 国家杰出青年自然科学基金资助项目 (60325310); 广东省自然科学基金团队研究资助项目 (04205783); 国家自然科学基金资助项目 (60505005); 广东省自然科学基金资助项目 (05103553); 科技部重大基础前期研究专项资助项目 (2005CCA04100).

简单,但是该算法没有对是否存在块效应进行判断.本文算法充分利用了人类视觉特性,建立了块效应模型并给出一个明确方便的检测边缘的标准,对于平滑区,用线性函数块代替阶跃函数块去除块效应,并对影响块效应的参数进行修正,最后再对更新块和纹理块进行 DCT 域的滤波.实验结果表明在去块效应能力和保护边缘信息上都比 Liu 和 Luo 的方法优越.

2 块效应模型(Model for blocking artifacts)

设 a, b 是两个 8×8 的存在方块效应的水平相邻块,均值分别为不相等的 u_a 和 u_b . 由块 a 的右边四列和块 b 的左边四列组成一个新的 8×8 块 c , 见图 1.

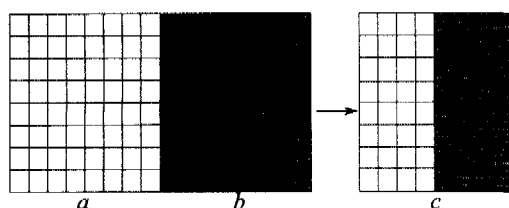


图1 由水平相邻块组成新块的示意图

Fig. 1 Illustration of the new block by adjacent blocks

块 a 和块 b 之间的水平块效应可以用一个阶跃函数的模型来表示,在这里我们定义如下所示的阶跃函数块 s :

$$s(i, j) = \begin{cases} -1/8, & i = 0, \dots, 7; j = 0, \dots, 3, \\ 1/8, & i = 0, \dots, 7; j = 4, \dots, 7. \end{cases} \quad (1)$$

因此,块 c 的模型就可以表示成为:

$$c(i, j) = \beta s(i, j) + \mu + r(i, j), i, j = 0, \dots, 7. \quad (2)$$

其中 μ 是块 c 亮度的均值,反映的是块局部背景亮度, r 是剩余块,反映的是块局部的活动性, $|\beta|$ 是阶梯函数的幅值,在 μ 和 r 不变的时候, $|\beta|$ 越大,块效应越明显. 设块 a, b, c, s, r 二维 DCT 变换分别为 A, B, C, S, R . 因为 s 函数均值为 0, 在垂直方向是常量, 水平方向是反对称的. 所以除了 $S(0, 1), S(0, 3), S(0, 5), S(0, 7)$ 不为 0 外, 其余的值都为 0. 对式(2)左右两端做 DCT 变换, 上式中的参数可以确定为:

$$\mu = C(0, 0)/8, \quad (3)$$

$$\beta = \sum_{j=0}^7 S(0, j) C(0, j) = \quad (4)$$

$$S(0, 1) C(0, 1) + S(0, 3) C(0, 3) + S(0, 5) C(0, 5) + S(0, 7) C(0, 7), \quad (5)$$

$$R = C, R(0, 0) = 0,$$

$$R(0, i) = R(0, i) - \beta \cdot S(0, i), i = 0, \dots, 7. \quad (6)$$

3 基于 HVS 的块效应可见度函数(HVS-based visible function of blocking artifacts)

在去除块效应时应该充分考虑人类视觉系统的特性. 在前人的研究中发现局部空间活动性和亮度对方块效应具有掩盖性. 在纹理丰富区域, 方块效应可见度比较小; 在局部背景亮度大的区域, 方块效应可见度也比较小. 由图 1 可知块 a 与块 b 相邻的边界包含在块 c 的中间, 以块 c 作为块边界的局部区域. 局部空间的活动性对方块效应有掩盖作用, 且方块效应呈现在垂直和水平两个方向. 局部区域的背景在这两个方向的活动性越大对方块效应的掩盖就越强, 为此我们定义了水平和垂直方向的活动性函数, 见式(7). 其中 A_h, A_v 分别代表块 c 在水平和垂直方向的活动性, $R(u, v)$ 是块 c 模型中反应局部活动性的剩余块在 DCT 域中的值.

$$\begin{cases} A_h = \sum_{u=1}^7 u \sum_{v=0}^7 |R(u, v)|, \\ A_v = \sum_{v=1}^7 v \sum_{u=0}^7 |R(u, v)|. \end{cases} \quad (7)$$

对于水平方向的块效应垂直方向的活动性对其掩盖性是主要的, 这样水平方向块效应的总活动性 A_{total}^h 为式(8), 其中 $\alpha = 0.8$, 同样可以定义垂直方向块效应的总活动性 A_{total}^v 为式(9):

$$A_{\text{total}}^h = A_v + \alpha A_h, \quad (8)$$

$$A_{\text{total}}^v = A_h + \alpha A_v. \quad (9)$$

由此 Coudoux^[8] 定义了空间频率活动性对水平方向块效应的掩盖函数 M_h , 见式(10):

$$M_h = (1 + A_{\text{total}}^h)^{-1}. \quad (10)$$

研究发现块效应的边界所处的局部背景亮度对方块效应有掩盖效应, 亮度越大方块效应可见度越低. Karunasekra^[9] 定义了一个亮度掩盖函数 M_l 如式(11), 其中 b_0, r 是常数, 分别为 150 和 2. b 是局部图像亮度, 即 c 块亮度的均值

$$M_l = \left(1 + \left(\frac{b}{b_0}\right)^r\right)^{-1}. \quad (11)$$

由前面所述知道空间频率活动性对水平方向块效应的掩盖函数 M_h 越小, 方块效应可见度越低; 亮度掩盖函数 M_l 越小, 方块效应可见度也越低, 在背景亮度和局部活动性不变的时候, $|\beta|$ 越大, 块效应越明显. 据此本文定义水平方向块效应可见度函数 η_h , 见式(12), 同理也可以定义垂直方向的块效应

可见度函数 η_v .

$$\eta_h = |\beta| \cdot M_h \cdot M_l = \frac{|\beta|}{(1 + A_{\text{total}}^h) + (1 + (\frac{b}{b_0})^r)} \quad (12)$$

4 块效应去除算法 (Reduction of blocking artifacts)

由于方块效应出现在水平和垂直两个方向,在去块效应上两者没有本质区别,本文提出的水平方向去块效应算法对垂直方向也适用. 当块 c 的 η_h 小于某个给定的阈值 T 时,称该块的水平方向块效应不可见,无需要对它进行去块效应处理. 当块 c 的 η_h 大于等于阈值 T 时,对块 c 进行边缘检测,检测边缘的原因是防止把边缘当成了块效应进行处理,为了避免细小的边缘被忽略,以致在后面的处理中变模糊,本文引入了一种新的检测边缘的方法.

当转换块 c 满足下列条件

- 1) $|c(i, j) - c(i, j+1)| \leq$
 $|c(i, 4) - c(i, 5)|,$
 $i = 0, 1, \dots, 7, j = 0, 1, \dots, 6,$
- 2) $|c(i, 4) - c(i, 5)| \leq 2QP, i = 0, 1, \dots, 7.$

可以认为转换块 c 中不存在边缘. 条件 1) 保证了转换块内部像素间的差值不会超过 a 和 b 块边界像素间的差值,而条件 2) 防止了边缘刚好出现在 a 和 b 块边界上. 其中 QP 是量化参数,一般取 $QP = 16^{[10]}$. 图 2 是比特率为 0.216bpp 存在块效应的 lena 图作边缘检测后的结果.



图 2 比特率为 0.216bpp 的 lena 图边缘检测结果

Fig. 2 Result of edge detection in lena JPEG-coded at 0.216

4.1 平滑块的块效应消除 (Reduction of blocking artifacts for smooth region)

为了消除平滑块的块效应,我们用图 3 所示的线性函数代替阶跃函数,从而用线性函数块 l 代替阶跃函数块 s 去除块效应.

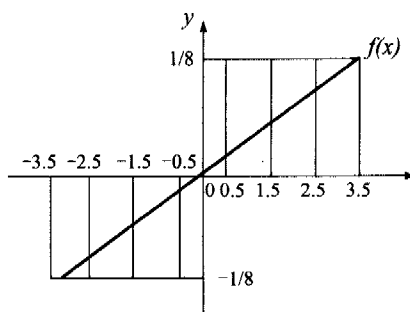


图 3 线性函数块代替阶跃函数块

Fig. 3 The step function block is replaced with linear function block

$$d = [f(-3.5), f(-2.5), f(-1.5), f(-0.5), f(0.5), f(1.5), f(2.5), f(3.5)], \quad (13)$$

$$l = [d^T, d^T, d^T, d^T, d^T, d^T, d^T, d^T]^T. \quad (14)$$

因为 β 的值影响着块效应的大小,从式(5)可以看出 β 的值和 $C(0,1), C(0,3), C(0,5)$ 和 $C(0,7)$ 有关. 如果直接使用线性函数代替阶梯函数,实质上也是改变了这几个系数的值,但是这只利用了转换块 c 的信息,忽略了块 a 左半部分和块 b 右半部分的信息,从而引起了新的块效应. 在这里,我们利用了块 a 和块 b 左右部分的信息,去改变 $C(0,1), C(0,3), C(0,5)$ 和 $C(0,7)$ 的值,从而改变 β 的值. 最后再用线性函数代替阶跃函数去除块效应.

$$\bar{C}(0, i) = 0.5(0, i) + 0.25(A(0, i) + B(0, i)), \quad i = 1, 3, 5, 7, \quad (15)$$

$$\beta_1 = \sum_{j=0}^7 L(0, j) \cdot \bar{C}(0, j) = L(0, 1)\bar{C}(0, 1) + L(0, 3)\bar{C}(0, 3) + L(0, 5)\bar{C}(0, 5) + L(0, 7)\bar{C}(0, 7). \quad (16)$$

其中 L 为 l 的二维 DCT 变换. 因为 β_1 中包括了容易引起块效应值的改变,所以 c 仍取原值不变,否则会产生新的块效应. 在 DCT 域里块 c 值的更新如式(17)所示.

$$\begin{cases} \hat{c}(0, j) = C(0, j) + \beta_1(L(0, j) - S(0, j)), \\ \hat{c}(i, j) = C(i, j), i > 0, j = 0, \dots, 7. \end{cases} \quad (17)$$

4.2 后滤波 (Post-filtering)

为了对处理后的平滑块可能出现的块效应和纹理区的块效应进行消除,我们使用了 DCT 域的后滤波方法^[11].

5 实验结果 (Experimental results)

5.1 主观质量评价 (Subjective quality evaluation)

为了从主观视觉质量上对本文提出的算法性能进行评价,对 512×512 的 Lena 采用 JPEG 编码,其

编码比特率为 0.183bpp. 在实验中, 块效应可见度函数的阈值 T 取 0.02. 图 4 是各种处理方法的对比结果, 其中(a)是原图, (b)是有严重块效应的 JPEG 解码图像; (c)是用零掩盖方法处理后的重建图像; (d)是用 Liu 方法处理后的重建图像; (e)是用 Luo 方法处理后的重建图像; (f)是本文算法处理后的

重建图像. 从视觉可以看出经零掩盖技术处理后的重建图像仍然有比较明显的块效应, 并且图像比较模糊, 边缘信息丢失较严重. 从图像上看 (d) (e) 和本文算法处理后的图像效果好一些, 但是 (d) (e) 图像均模糊一些, 本文处理后的图像在高频部分比 (d) (e) 要清晰.

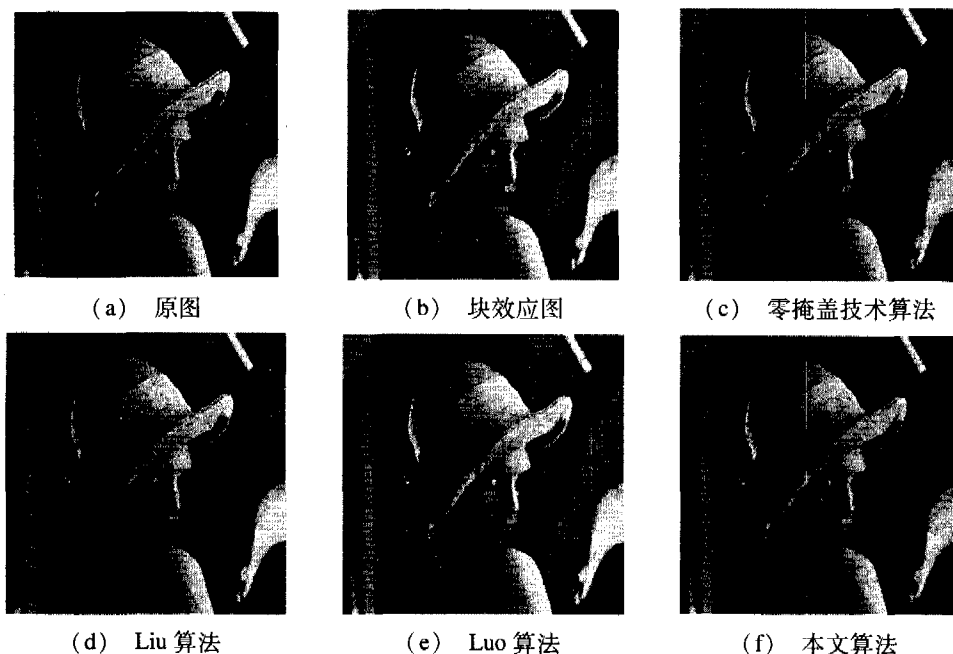


图 4 各种算法对 0.183bpp, JPEG 编码下的 Peppers 后处理图

Fig. 4 The different post-processing images for lena JPEG-coded at 0.183bpp

5.2 客观质量评价 (Objective quality evaluation)

为了在客观上测量和评估本文算法去除方块效应的性能, 我们用峰值信噪比 (PSNR) 来表示图像处理后的质量. Lena 和 Peppers 在不同编码比特率下应用不同 DCT 域后处理方法的 PSNR 见表 1. 从表中可以看出, 在低比特率时, 本文算法处理后图像的 PSNR 比前面 3 种方法都大. 通过主观质量和客观质量评价可以看出本文的算法能够很好的去除方块效应, 同时又能有效的保护图像的边缘信息.

表 1 不同比特率下各种算法的 PSNR

Table 1 Different PSNR at different bit rate with different algorithms

图像	比特率 /bpp	零掩盖法 /dB	Liu 算法 /dB	Luo 算法 /dB	本文算法 /dB
Lena	0.167	28.9774	29.3625	29.3544	29.5143
	0.183	30.1689	30.5002	30.5014	30.7424
	0.217	30.2573	30.2362	30.3071	30.4867
Peppers	0.155	28.6510	29.1075	29.1298	29.2956
	0.207	30.1421	30.5928	30.6578	30.7423
	0.253	31.0517	31.5889	31.6236	31.6635

6 结束语 (Conclusions)

本文利用了人类视觉系统的特性, 建立了块效应模型并给出一个明确方便的检测边缘的标准, 对于平滑区, 对影响块效应的参数进行修正并用线性函数块代替阶跃函数块去除块效应, 最后再对更新块和纹理块进行 DCT 域的滤波. 实验结果证明该算法在去除方块效应和保护边缘信息上都有优越的性能.

参考文献 (References):

- [1] JANSKE T, HAAVISTO P, DEFEE I. Post-filtering methods for reducing blocking effects from coded images [J]. *IEEE Trans on Consumer Electronics*, 1994, 40(3): 521-526.
- [2] XIONG Z, ORCHARD M T, ZHANG Y Q. A deblocking algorithm for JPEG compressed images using overcomplete wavelet representations [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 1999, 7(2): 692-695.
- [3] ROURKE T P, STEVENSON R L. Improved image decompression for reduced transform coding artifacts [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 1995, 5(6): 490-499.

(下转第 147 页)

构物理参数不确定的 SGCMG 系统, 本文设计了自适应操纵律。该操纵律在对物理参数在线估计的基础上, 可根据航天器姿态控制给出的角动量(或力矩)指令, 直接计算出每个框架系统所需的控制力矩, 算法简单、易行。和机械臂领域的相关研究相比, 由于本文的操纵律没有算法奇异, 从而解决了系统控制误差不能收敛至零的问题。和鲁棒操纵律相比, 本文的操纵律参数容易整定, 且对物理参数的不确定性具有更强的适应性。然而, 本文的研究还是比较初步的, 还有一些具体问题有待研究, 如考虑奇异回避的鲁棒操纵律、操纵律的物理仿真实验等等。

参考文献(References):

- [1] 吴忠, 吴宏鑫. 单框架控制力矩陀螺系统操纵律研究综述[J]. 宇航学报, 2000, 21(4): 140-145.
(WU Zhong, WU Hongxin. Survey on steering laws for single gimbal control moment gyroscope systems[J]. *J of Astronautics*, 2000, 21(4): 140-145.)
- [2] 吴忠, 丑武胜. 考虑框架伺服特性时 SGCMG 系统操纵律设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(6): 489-492.
(WU Zhong, CHOU Wusheng. Steering law design for SGCMGs taking gimbal servo characteristics into account[J]. *J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(6): 489-492.)
- [3] 吴忠. 参数不确定 SGCMG 系统的鲁棒操纵律设计[J]. 宇航学报, 2004, 25(1): 93-97.
(WU Zhong. Robust steering law design for single gimbal control moment gyroscopes with parameter uncertainty[J]. *J of Astronautics*, 2004, 25(1): 93-97.)
- [4] NOVAKOVIC Z R, ZLAJPAH L. Robust tracking control for robots using the sliding mode: A task-space approach[C] // *Proceedings of IFAC Symposium on Robot Control. Karlsruhe, Germany: [s. l.]*, 1988, 201-206.
- [5] NOVAKOVIC Z R. Lyapunov-like methodology for robot tracking control synthesis[J]. *Int J of Control*, 1990, 51(3): 567-583.
- [6] FENG G. An adaptive control algorithm for robot manipulators in task space[J]. *Int J of Robotics and Automation*, 1996, 11(2): 49-55.
- [7] FENG G. A new adaptive control algorithm for robot manipulators in task space[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1995, 11(3): 457-462.
- [8] 吴忠, 吴宏鑫. SGCMG 系统非奇异路径规划[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(1): 21-26.
(WU Zhong, WU Hongxin. Nonsingular path planning in single gimbal control moment gyroscope systems[J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(1): 21-26.)
- [9] 吴忠, 吴宏鑫, 李勇. SGCMG 系统框架角轨迹跟踪自适应补偿控制[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(2): 210-216.
(WU Zhong, WU Hongxin, LI Yong. Adaptive compensation control of trajectory tracking in gimbal angle space for single gimbal control moment gyroscope systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(2): 210-216.)

作者简介:

吴忠 (1970—), 男, 1998 年于中国空间技术研究院北京控制工程研究所控制理论与控制工程专业获工学博士学位, 之后曾在铁道部科学研究院作博士后研究, 现为北京航空航天大学副教授, 目前主要从事航天控制技术、现代伺服控制技术等方面的研究, E-mail: wuzhong@buaa.edu.cn.

(上接第 142 页)

- [4] 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(1): 91-95.
- [5] ZENG B. Reduction of blocking effect in DCT-coded images using zero-masking techniques[J]. *Signal Processing*, 1999, 79(2): 205-211.
- [6] LIU S Z, BOVIK A C. Efficient DCT-domain blind measurement and reduction of blocking artifacts[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 2002, 12(12): 1139-1149.
- [7] LUO Y, WARD R K. Removing the blocking artifacts of block-based DCT compressed images[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2003, 12(7): 838-842.
- [8] COUDOUX F X, GZALET M, CORLAY P. Reduction of blocking effect in DCT-coded images based on a visual perception criterion[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 1998, 11(3): 179-186.
- [9] KARUNASEKER S A, KINGSBURY N G. A distortion measure for blocking artifacts in image based on human visual sensitivity[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1995, 4(6): 713-724.
- [10] GAO W F, MERMER C, KIM Y. A de-blocking algorithm and a blockiness metric for highly compressed images[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 2002, 12(12): 1150-1159.
- [11] CHEN T, WU H R, QIU B. Adaptive postfiltering of transform coefficients for the reduction of blocking artifacts[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(5): 594-602.

作者简介:

谢胜利 (1958—), 男, 华南理工大学电子与信息学院教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为非线性系统学习控制理论、自适应信号处理、盲信号分离和图像处理等, E-mail: sunny_scut@163.com;

石敏 (1977—), 女, 华南理工大学电子与信息学院博士生, 主要研究方向为图像处理与图像无线传输。