

文章编号 1004-924X(2013)08-2180-07

精确质量控制的遥感图像 JPEG2000 压缩方法

宋蓓蓓^{1*}, 孙文方²

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710100)

摘要:提出了一种精确控制图像压缩质量的遥感图像 JPEG2000 压缩方法。根据小波变换的完全重构和子带系数量化误差统计独立特性,建立了压缩图像峰值信噪比质量指标与小波系数编码量化误差的数学表达关系式。在传统 JPEG2000 率失真理论的基础上,建立以压缩图像质量为目标,最小化编码码率的模型,并给出了压缩图像质量控制的码流优化截取方法。对标准测试图像以及卫星遥感图像进行实验,并与传统 JPEG2000 方法进行比较。结果显示,该方法具有相同的编码架构和复杂度,能够精确控制压缩图像质量,控制精度小于 1%。对于序列多幅遥感图像,在相同平均码率条件下,提出的方法具有更高的整体压缩图像峰值信噪比。

关键词:遥感图像;图像压缩;图像质量;JPEG2000;小波变换

中图分类号:TP752 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132108.2180

JPEG2000 compression for remote sensing images with precise quality control

SONG Bei-bei^{1*}, SUN Wen-fang²

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

* Corresponding author, E-mail: bbsong@chd.edu.cn

Abstract: A remote sensing image JPEG2000 compression scheme with precise quality control was proposed. According to the perfect reconstruction of wavelet filter banks and the statistical independence of subband coefficient quantization error, a mathematical expression formula was established to describe the relation between the peak signal to noise ratio and the wavelet coefficient quantization error. Based on the traditional JPEG2000 rate distortion model, a distortion-based rate minimization model was constructed and optimization truncation coding stream to obtain a desired target image compression quality was given. An experiment on standard test images and satellite remote sensing image was performed and obtained results were compared with that of the conventional rate-based distortion minimization JPEG2000 encoding. Results indicate that the new method has the same coding structure and computing complexity, and it can accurately control the compression image quality with an average control precision less than 1%. In addition, this proposed method has higher global compression im-

收稿日期:2013-01-30;修订日期:2013-03-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60902075, No. 61271262);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. CHD2012JC067)

age peak signal to noise ratio at the same total coding rate for sequence remote sensing images.

Key words: remote sensing image; image compression; image quality; JPEG2000; wavelet transform

1 引 言

2001 年,国际标准化组织正式发布了新一代静止图像压缩标准 JPEG2000^[1-2]。由于其采用了小波变换^[3]、位平面编码等技术,使其具有出色的编码性能、兼容无损有损、渐进传输、感兴趣区域编码,以及码流随机访问等特点,被广泛应用于多媒体、遥感图像传输等领域^[4]。JPEG2000 标准制定了解码器能兼容的比特流准则和编解码框架,从而给具体的编解码设计留下了很大的研究空间。当前公开的 JPEG2000 软件^[5-7]、文献^[8-11]和应用^[12]均主要采用了基于目标码率的最小失真编码方案,通过优化设计率失真模型截取目标码流。

在相同码率条件下,不同的图像进行 JPEG2000 压缩将获得不同的压缩图像质量,一般纹理复杂图像的压缩图像质量低,而纹理简单图像的压缩图像质量高。用于遥感图像压缩传输时,图像使用者更关注压缩图像质量,但像城镇图像往往纹理复杂,使得压缩图像质量低,难以满足应用要求。近几年,基于质量控制的无损/近无损图像压缩标准 JPEG-LS 成为遥感图像压缩的研究热点^[13-14],但受量化参数为整数值的限制,难以任意控制压缩图像质量,且当压缩倍数大于 4 时,压缩图像质量将显著下降。

文献^[15]将大幅图像分成独立条带,通过计算条带图像小波变换子带的最优均方误差(Mean

Square Error, MSE)来分配相应的量化步长,获得局部条带图像 MSE 质量控制,提高了大幅图像的综合“率-失真”性能。但该方法需要大量的缓存,且不适合实时压缩。文献^[16]利用人眼视觉系统模型,结合不同的人眼视觉感知掩模效果和基于独立量化误差的感知失真测度,实现了 JPEG2000 压缩视觉感知的失真控制,然而该方法获得的压缩图像的峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)值低于传统的 JPEG2000 压缩图像。为了解决上述问题,本文提出了一种基于压缩图像质量控制的 JPEG 2000 压缩方法。该方法根据设定的目标 PSNR 值,建立最小化编码码率的编码块“失真-率”模型,优化截取码流,精确控制压缩图像质量。

2 图像小波编码失真计算

对于图像二维小波变换,各小波子带系数量化编码产生的量化误差对重建图像的失真贡献是不同的。为了保证精确的压缩图像质量控制,必须考虑这一特性。首先以一维小波变换为例,一维原始信号 x 经过 M 级小波变换后,从高频到低频的小波子带系数记为 $y = \{y_m\}_{0 \leq m \leq M}$,其中, y_m 为第 m 个子带的小波系数。图 1 给出了小波变换分解和重构结构,其中, $\tilde{h}_0(n)$ 和 $\tilde{h}_1(n)$ 为分析低通滤波器和高通滤波器, $\tilde{g}_0(n)$ 和 $\tilde{g}_1(n)$ 为综合低通滤波器和高通滤波器。

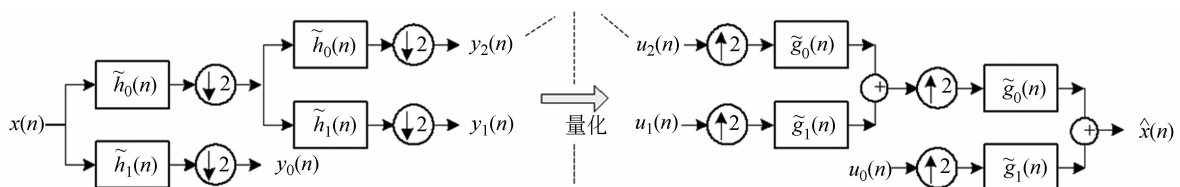


图 1 小波变换分解和重构结构滤波器组级联结构

Fig. 1 Cascade structure of filter banks for wavelet decomposition and reconstruction

根据多分辨率分析中滤波器与采样之间的等

效易位特性^[17],图 1 的结构可等价于图 2 所示。

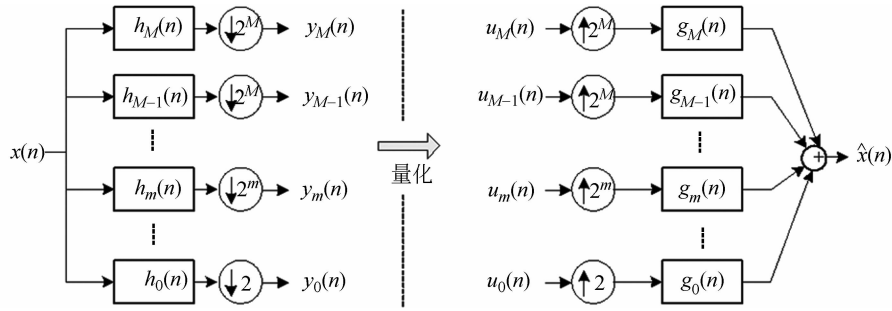


图 2 级联的小波变换分解和重构滤波器组等效结构

Fig. 2 Equivalent structure of filter banks for cascaded wavelet decomposition and reconstruction

等效分析滤波器 $h_m(n)$ ($0 \leq m \leq M$) 的 z 变换为:

$$H_m(z) = \begin{cases} \tilde{H}_1(z^{2^m}) \prod_{i=0}^{m-1} \tilde{H}_0(z^{2^i}), & 0 \leq m \leq M-1 \\ \prod_{i=0}^{M-1} \tilde{H}_0(z^{2^i}), & m = M \end{cases} \quad (1)$$

等效综合滤波器 $g_m(n)$ ($0 \leq m \leq M$) 的 z 变换为:

$$G_m(z) = \begin{cases} \tilde{G}_1(z^{2^m}) \prod_{i=0}^{m-1} \tilde{G}_0(z^{2^i}), & 0 \leq m \leq M-1 \\ \prod_{i=0}^{M-1} \tilde{G}_0(z^{2^i}), & m = M \end{cases} \quad (2)$$

一般信号压缩主要由量化过程和编码过程组成,而量化过程是造成信号失真的主要原因。记信号 $\mathbf{y} = \{y_m\}_{0 \leq m \leq M}$ 被量化后的系数为 $\mathbf{u} = \{u_m\}_{0 \leq m \leq M}$,那么产生的量化失真误差为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_m = \mathbf{y}_m - \mathbf{u}_m, 0 \leq m \leq M. \quad (3)$$

如果小波分析滤波器和综合滤波器以数学算子的形式分别表示为 \mathbf{H} 和 \mathbf{G} ,那么小波变换系数 $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x}$,重构信号 $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}\mathbf{u}$ 。对于完全重构滤波器组,有 $\mathbf{GH} = \mathbf{I}$,则重构误差为:

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}\mathbf{y} - \mathbf{G}\mathbf{u} = \mathbf{G}\boldsymbol{\varepsilon}. \quad (4)$$

一般认为量化误差是一个互相独立的零均值随机信号^[2,17],这里记仅由第 m 小波子带系数量化而造成的重构误差为 \mathbf{e}_m ,因此有 $\mathbf{e} = \sum_{m=0}^M \mathbf{e}_m$ 。计算 \mathbf{e} 的方差为:

$$\sigma_e^2 = E\left[\sum_{m=0}^M \mathbf{e}_m(k) \sum_{m=0}^M \mathbf{e}_m(k)\right] = \sum_{m=0}^M E[\mathbf{e}_m(k) \mathbf{e}_m(k)] =$$

$$\sum_{m=0}^M E\left[\sum_i g_m(i) \varepsilon_m(k-i) \sum_j g_m(j) \varepsilon_m(k-j)\right] = \sum_{m=0}^M \left(\sum_i \sum_j g_m(i) g_m(j) E[\varepsilon_m(k-i) \varepsilon_m(k-j)]\right) = \sum_{m=0}^M \left(\sum_i \sum_j g_m(i) g_m(j) \delta(i-j) \sigma_{\varepsilon_m}^2\right) = \sum_{m=0}^M \left(\sum_i g_m^2(i) \sigma_{\varepsilon_m}^2\right), \quad (5)$$

其中, $\sigma_{\varepsilon_m}^2$ 为 ε_m 的方差。令 $B_m = \sum_i g_m^2(i)$ ($0 \leq m \leq M$),有 $\sigma_e^2 = \sum_{m=0}^M B_m \sigma_{\varepsilon_m}^2$ 。对于行列可分的二维小波变换, B_m 可表示为:

$$B_m = \sum_i \sum_j g_{m,r}^2(i) g_{m,c}^2(j), (0 \leq m \leq M), \quad (6)$$

式中, $g_{m,r}$ 和 $g_{m,c}$ 分别为综合端第 m 个子带行方向和列方向的等效滤波器。如果以 PSNR 作为压缩图像质量评价指标,则

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{(2^q - 1)^2}{\sigma_e^2}, \quad (7)$$

式中, q 为图像像素位宽。由上式易知,为了控制压缩图像质量 PSNR 值,只需控制相应的 σ_e^2 或 $\sigma_{\varepsilon_m}^2$ 。

3 JPEG2000 压缩图像质量控制

JPEG2000 中最重要的技术之一是压缩后率失真(Post Compression Rate Distortion Optimization, PCRDO)优化截断^[1-2],即编码器根据率失真斜率优化截取编码码流,使得每个编码块截取码流所恢复的解压缩图像的 PSNR 值在目标码率下是最佳的。依据 PCRDO 原理,笔者提出了一种 JPEG2000 压缩图像质量控制方法,根据压缩

后“失真-率”斜率,截取每个编码块的码流使得解压缩图像的 PSNR 达到目标值,从而截取码流总量最优。其原理如下:

依照上文记 σ_e^2 为恢复图像的失真,编码块 b_k 在码流截断点 n_k 的失真为 $\sigma_{e_{b_k}}^2$ 。由式(6)和式(7)可得

$$\sigma_e^2 = \sum_k B_k \sigma_{e_{b_k}}^2, \quad (8)$$

其中,如果编码块 b_k 属于第 m 个小波子带,则 B_k 等于由式(6)计算所得的 B_m 值。设 $R_{b_k}^{n_k}$ 为编码块 b_k 在码流截断点 n_k 处的码率,则总的图像压缩码率为:

$$R = \sum_k R_{b_k}^{n_k}, \quad (9)$$

当 D 为给定的失真,则需要求得一组截断点 n_k ,使得在满足 $\sigma_e^2 = D$ 的条件下 R 最小。可以通过 Lagrange 算法求解该条件极值问题:

$$L = R + \lambda(\sigma_e^2 - D) = \sum_k (R_{b_k}^{n_k} + \lambda B_k \sigma_{e_{b_k}}^2) - \lambda D, \quad (10)$$

其中,调整 λ 值到产生一组截断点使得上式在满足 $\sigma_e^2 = D$ 时最小。上式的极小值优化问题最终归结为单个编码块的极小值优化问题。为此,首先剔除一些奇异点,选出一些候选截取点,保证其率失真斜率 $\Delta R_{b_k}^{n_k} / (B_k \cdot \Delta \sigma_{e_{b_k}}^2)$ 严格单调递增。然后具体查找截断点算法如下:

令 $n_k = 0$

对于 $p = 1, 2, 3 \dots$

计算 $\Delta R_{b_k} = R_{b_k}^p - R_{b_k}^{p-1}$, 以及 $\Delta D_{b_k} = D_{b_k}^p -$

$$D_{b_k}^{p-1} = B_k (\sigma_{e_{b_k}}^{2p} - \sigma_{e_{b_k}}^{2(p-1)}) = B_k \cdot \Delta \sigma_{e_{b_k}}^2;$$

$$\text{若 } \frac{\Delta R_{b_k}}{B_k \cdot \Delta \sigma_{e_{b_k}}^2} < \lambda, \text{ 则 } n_k = p.$$

这样不断调整 λ , 直至找到最优的 λ_{opt} , 从而获得一组码流截断点 $\{n_k\}$, 对于所有编码块有

$$\frac{\Delta R_{b_k}^{n_k}}{B_k \cdot \Delta \sigma_{e_{b_k}}^2} < \lambda_{opt} \text{ 且 } \sum_k B_k \sigma_{e_{b_k}}^2 \approx \frac{(2^q - 1)^2}{10^{PSNR/10}}.$$

4 实验结果与分析

首先以 Lena、Barbara、Boat 和 Goldhill 4 幅典型测试图像(大小均为 512 pixel × 512 pixel, 每像素位宽为 8 bit)为例进行实验。压缩配置参数为:采用 9/7 双正交提升小波变换进行 3 级二维小波分解;独立编码块大小为 64 pixel × 64 pixel。分别以 PSNR 等于 30、40 和 50 dB 为压缩图像质量控制目标,采用提出方法对测试图像进行压缩,记录压缩时间并计算实际压缩图像质量(单位 dB)和压缩码率(单位 bpp),然后以该码率为传统 JPEG2000 压缩的码率控制目标,记录 JPEG2000 压缩时间并计算压缩图像质量,参数如下表 1 所示。结果显示,提出方法实际压缩图像质量与目标压缩图像质量 PSNR 的平均绝对误差值为 0.317 2 dB,质量控制精度平均值为 0.773 4%,具有很好的图像质量控制准确度。

表 1 2 种方法压缩结果比较

Tab. 1 Comparison of compression results for two methods

图像	提出方法				传统 JPEG2000 方法			
	目标压缩图像质量/dB	实际压缩图像质量/dB	压缩码率/bpp	压缩时间/s	目标压缩码率/bpp	压缩图像质量/dB	实际压缩码率/bpp	压缩时间/s
Lena	30	30.058 2	0.108 1	0.408 1	0.108 1	30.057 0	0.108 1	0.395 4
	40	40.261 4	0.978 9	0.386 5	0.978 9	40.261 0	0.978 9	0.425 7
	50	49.460 2	2.919 1	0.420 5	2.919 2	49.461 5	2.919 2	0.402 6
Barbara	30	30.312 6	0.370 2	0.413 7	0.370 2	30.312 6	0.370 2	0.417 8
	40	40.219 2	1.459 1	0.404 5	1.459 1	40.219 1	1.459 1	0.413 5
	50	49.557 2	3.326 6	0.426 6	3.326 6	49.549 2	3.326 7	0.420 1
Boat	30	30.253 8	0.261 7	0.443 3	0.261 7	30.253 8	0.261 7	0.423 5
	40	40.322 9	1.708 6	0.392 4	1.708 6	40.322 9	1.708 6	0.417 0
	50	49.533 6	3.477 1	0.413 0	3.477 1	49.527 2	3.477 2	0.448 1
Goldhill	30	30.233 1	0.232 4	0.414 8	0.232 4	30.234 3	0.232 4	0.414 4
	40	40.245 0	1.726 0	0.412 6	1.726 0	40.245 0	1.726 0	0.393 8
	50	49.548 8	3.528 6	0.427 8	3.528 6	49.550 9	3.528 6	0.397 9

所提方法是以设定的压缩图像质量为目标,最优化截取每个独立编码块的码流以获得整幅图像的最短长度压缩码流,而传统 JPEG2000 方法是以设定的码流长度为目标,最优化截取每个独立编码块的码流以获得图像的最高重建质量。所提方法计算的“失真-率”曲线函数与传统 JPEG2000 方法计算的“率-失真”曲线函数互为反函数。根据反函数的导数定理“单调可导函数的导数等于直接函数导数的倒数”,实际上两种方法采用了相同的“率-失真”曲线和率失真斜率计算流程,在此基础上本文增加了该斜率值的导数计算。实验中,在相同码率条件下,提出方法与传统 JPEG2000 方法压缩图像质量 PSNR 的平均绝对误差值仅为 0.001 7 dB,从而验证了两种方法计算“率-失真”曲线和码流截取方法的本质相同。两种方法图像编码的时间平均值相差 0.018 2 s,其主要原因在于所提方法并没有改变传统 JPEG2000 方法的主体编码(Tier-1 编码部分)结构,仅在 Tier-2 编码部分中仅增加了斜率值的导数计算,以及修改了少量的判决条件,因此计算复杂度相当。

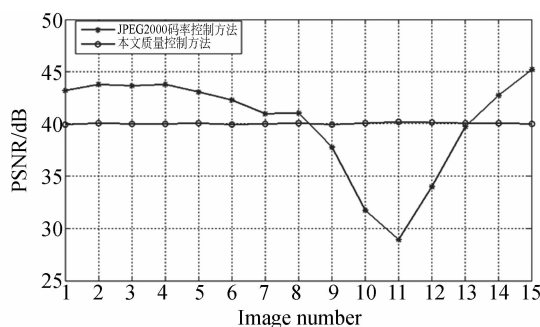
图 3 是一幅待测试的遥感图像(来自日本

ALOS 卫星 PRISM 相机的遥感图像,2.5 m 地面分辨率),大小为 512 pixel(高度) \times 7 680 pixel(宽度),每像素位宽为 8 bit,从左到右包含了山林、农庄、河流、城镇等典型地表目标。将该图像分割成 15 个 512 pixel \times 512 pixel 的图像块,依次采用提出的方法分别进行独立压缩,目标压缩图像质量 PSNR 值为 40 dB。图 4(a)的“圈-实线”是提出方法的图像质量控制曲线,15 个图像块压缩图像 PSNR 平均值为 40.036 dB,标准偏差为 0.070 8 dB,质量控制精度为 0.16%,平均压缩码率为 1.013 bpp。以 1.013 bpp 作为传统 JPEG2000 方法对 15 个图像块的目标压缩码率,15 个图像块的压缩图像质量 PSNR 曲线见图 4(a)的“星-实线”,纹理简单的山林、农庄图像获得了较高的压缩质量,而纹理复杂的城镇图像获得了较低的压缩质量,这与应用的要求相矛盾。在图 4(a)的实验中,对 512 pixel \times 7 680 pixel 的整幅图像(15 个图像块压缩重建图像按照分割顺序拼接而成),所提方法获得的压缩图像的 PSNR 值为 40.035 5 dB,传统 JPEG2000 方法获得的压缩图像的 PSNR 值为 36.808 1 dB,而此时 2 种方法压缩码率均为 1.013 bpp。



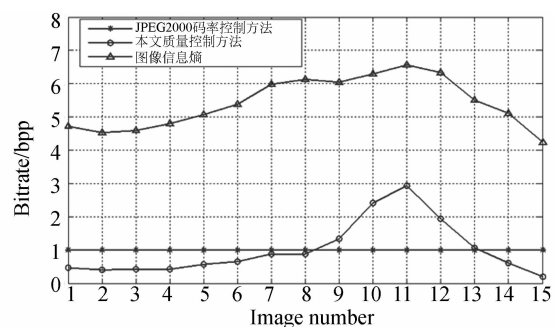
图 3 待测试的遥感图像(来自日本 ALOS 卫星)

Fig. 3 Remote sensing image to be tested (from Japan ALOS satellite)



(a) 压缩图像质量对比曲线

(a) Comparison curves of quality for two compression images



(b) 压缩码率对比曲线

(b) Comparison curves of compression bit rates

图 4 2 种方法压缩图像质量、压缩码率曲线比较

Fig. 4 Comparison of compression image quality and compression bit rates for two methods

图 4(b)是图 4(a)实验所用两种方法对 15 个图像块的压缩码率曲线对比,同时还给出了 15 个图像块的信息熵曲线。图像熵是图像复杂程度的估计,熵值越高的图像,亮度的细节和变化越多,越难以被压缩。例如第 11 个图像块的城镇区域图像,在相同压缩图像质量下,其压缩码率远远高于其他区域图像。所提方法针对纹理简单的山林、农庄区域图像分配了较低的码率,而对于纹理复杂的城镇区域图像分配了较高的码率,从而保证每个图像块具有相近的压缩图像质量。本文获得的压缩码率曲线与图像信息熵曲线的相关系数为 0.852 2,相关性较高,因此本文实质上是提供了一种依据图像复杂性的自适应压缩码率控制方法。

参考文献:

- [1] TAUBMAN D. High-performance scalable image compression with EBCOT [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(7):1158-1170.
- [2] TAUBMAN D, MARCELLIN M. *JPEG2000 Image Compression Fundamentals, Standards and Practice* [M]. USA: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [3] 孟伟,金龙旭,韩双丽. 二维提升小波的 VLSI 结构设计及 FPGA 验证[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(3): 404-408.
MENG W, JIN L X, HAN SH L. Design of VLSI architecture of 2D lifting wavelet and FPGA verification [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 404-408. (in Chinese)
- [4] 杜列波,肖学敏,罗武胜,等. 星载遥感图像 JPEG 2000 压缩算法的去量化[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3):690-694.
DU L B, XIAO X M, LUO W SH, *et al.*. Quantification removing for satellite on-board remote image JPEG2000 compression algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):690-694. (in Chinese)
- [5] TAUBMAN D. Kakadu Software[EB/OL]. (2001-09-25) [2012-07-23]. <http://www.kakadusoft.com/>.
- [6] MICHAEL D A. JasPer Software[EB/OL]. (1999-05-20) [2006-12-07]. <http://www.ece.uvic.ca/~frodo/jasper/>.
- [7] Communications and Remote Sensing Lab(UCL), OpenJPEG Home Page [EB/OL]. (2004-05-03) [2012-11-19]. <http://www.openjpeg.org/>.
- [8] 杜伟娜,孙军,倪强. 基于 JPEG2000 的高效率控制算法[J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(1):16-19.
DU W N, SUN J, NI Q. An efficient rate control scheme for JPEG2000 [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2006, 40(1): 16-19. (in Chinese)
- [9] 庄怀宇. 内嵌图像编码中高效码率控制技术研究 [D]. 西安:西安电子科技大学博士学位论文, 2006.
ZHUANG H Y. *Researches on high efficiency rate control for embed image coding* [D]. Xi'an: Xidian University, 2006. (in Chinese)
- [10] FRANCESC A L, JOAN S S. JPEG2000 quality scalability without quality layers [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2008, 18(7):923-936.
- [11] FRANCESC A L, JOAN S S, JOAN B R. Enhanced JPEG2000 quality scalability through block-wise layer truncation [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, 2010:1-11.
- [12] 陶宏江,韩双丽,张宇,等. 基于 ADV212 的远程图像采集系统设计[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(1): 105-109.
TAO H J, HAN SH L, ZHANG Y, *et al.*. Design of remote image collection system based on ADV212 [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1): 105-109. (in Chinese)
- [13] 汤毅,辛勤,李纲,等. 基于内容的高光谱图像无损压缩[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3):668-674.
TANG Y, XIN Q, LI G, *et al.*. Lossless compression of hyperspectral images based on contents

5 结 论

本文通过建立图像小波变换域系数的量化失真与图像空间域 PSNR 值的数学表达关系式以及以压缩图像质量为条件的“失真-率”模型,提出了在不改变传统 JPEG2000 基本框架和主要流程的基础上精确控制压缩图像 PSNR 值的方法,控制精度平均值小于 1%,且未增加计算复杂性。对大幅遥感图像的序列分割块图像压缩,所提方法获得压缩图像的全局 PSNR 值优于在相同平均码率条件下的传统 JPEG2000 方法。对于遥感图像压缩而言,该方法具有很好的实际应用价值。

- [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):668-674. (in Chinese)
- [14] 刘春香, 郭永飞, 李宁, 等. 星上多通道遥感图像的实时合成压缩[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(2): 445-453.
LIU CH X, GUO Y F, LI N, *et al.*. Composition and compression of satellite multi-channel remote sensing images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 445-453. (in Chinese)
- [15] PARISOT C, ANTONINI M, BARLAUD M. Stripe-based MSE control in image coding [C]. 2002 *International Conference on Image Processing*, Piscataway, NJ, USA, 2002, 2:649-652.
- [16] LIU Z, KARAM L J, WATSON A B. JPEG2000 encoding with perceptual distortion control [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(7):1763-1778.
- [17] MALLAT S. *A Wavelet Tour of Signal Processing* [M]. 3rd Edition. San Diego: Academic Press, 2008.

作者简介:



宋蓓蓓(1980—),女,山东潍坊人,博士,2005年、2008年于西安电子科技大学分别获得硕士、博士学位,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: bbsong@chd.edu.cn



孙文方(1979—),男,湖北武汉人,博士,高级工程师,2002年、2006年和2008年于西安电子科技大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事星载遥感数据处理与传输方面的研究。E-mail: swfile@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)