

文章编号 1004-924X(2006)05-0910-07

基于重要系数提升的遥感图像压缩

邓家先

(海南大学 信息学院, 海南 海口 570228)

摘要:提出了一种基于重要系数确定及系数提升幅度计算的遥感图像压缩方法。根据图像小波域系数的熵估计值确定正常编码情况下图像编码所截取到的比特平面,然后对重要的系数进行比特平面提升,这样系统编码时就能够保留更多的小目标信息。本算法与感兴趣区域编码方法不同,重要系数的定义及其提升幅度大小是根据图像内容和输出码率确定的,可以认为本算法是任意区域的感兴趣区域编码的扩展,但更为灵活。仿真结果表明,本算法可以有效保留遥感图像中小目标的信息,系统重建图像质量略有下降,克服了现有图像压缩算法一般以均方误差最小为准则,在低码率时会失去小目标信息细节的局限。

关键词:遥感图像;图像处理;图像压缩;重要系数;熵估计值;比特平面提升

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A

A remote-sensing image coding algorithm based on significant coefficients lifting

DENG Jia-xian

(Information College of Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: MSE (Minimum Mean Square Error) is widely used as the criteria in image coding algorithm for providing much detail and important information of small target. In order to remain more detail information, an algorithm was proposed for determining the significant coefficients and the lifting value. The final coding bit-plane can be estimated by the entropy estimation of the DWT coefficients, and also the significant coefficients can be defined and the lifting value can be determined. The difference between proposed algorithm and ROI (Region-of-Interest) is that the definition of significant coefficients and the lifting value can be obtained from the coding image and the given coding rate so that the algorithm can be regard as the generality of ROI coding algorithm, but more flexible. The experimental results show that the small targets in remote-sensing images can be saved validly, while the detail information in reconstructed image are lost a little.

Key words: remote sensing image; image processing; image compression; significant coefficient; entropy estimation; bit-plane scaling

收稿日期:2006-01-22;修订日期:2006-08-15.

基金项目:海南省自然科学基金(No. 80551);海南省教育厅项目(No. Hjkj200602)资助。

1 引言

内嵌比特平面图像编码技术为感兴趣区域编码提供了可能,而大多数的感兴趣区域编码都是基于小波域系数的比特平面提升^[1-4]。该算法首先要在图像域定义一个区域—称之为感兴趣区域,然后根据事先指定系数提升幅度对相应的系数进行提升。该算法的主要缺点在于:编码时需要对系数提升,而解码时需要对系数逆提升,增加了系统编码的复杂度;各个子带的系数采用相同的提升幅度完全没有必要,特别是低频子带提升与否对感兴趣区域质量的改善十分有限,而对重建图像背景质量影响较大,所以这种编码技术不够灵活。

以后许多学者对感兴趣区域编码进行了进一步研究,作者针对 EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation, 优化截取内嵌块编码)算法提出了率失真斜率提升的感兴趣区域编码^[5-6]算法,并且针对不同应用要求提出了相应的解决方案。这些算法避免了小波域系数的提升和逆提升,降低了编码系统的复杂度,但是仍然需要在图像域指定感兴趣区域,然后计算出该区域对应的系数,同时感兴趣区域编码是在率失真优化截取时实现的,只适合于 EBCOT 算法的实现。

上述两类感兴趣编码算法的共同点在于:先在图像域定义感兴趣区域,然后将相应区域映射到小波域,给这些系数分配更多码率。特别是感兴趣区域的定义往往都是主观的,这就需要进行交互式编码,限制了感兴趣区域编码技术的应用;对于不能够进行交互式编码情况,感兴趣区域的确切是复杂的问题,而且将一个区域所有对应系数都赋予同样的优先权也没有必要。遥感图像中小目标具有重要意义,是图像编码所特别关心的。小目标的主要特征表现为高频子带的系数,这些小目标在低频子带的系数无论是否优先编码对目标重建质量并没有太大影响,但低频子带系数的优先编码会影响其他像素的重建质量。为此,本文提出一种新的基于系数提升的图像压缩算法,称为重要系数编码。

2 系数提升幅度确定

重要系数编码与感兴趣区域编码一样,需要

确定提升哪些系数和系数提升幅度,如果提升幅度太大,重要系数质量变好了,相应其它系数质量必然会下降,从而影响总体编码质量。对于遥感图像而言,小目标固然重要,但背景也很重要。重要系数编码就是一种合理牺牲背景重建质量,更好地保留重要小目标信息的编码算法。

现代图像编码算法大都是采用内嵌比特平面编码技术,如 EZW (Embedded Zero-tree Wavelet, 内嵌零树编码), SPIHT (Set Partitioning In Hierarchical Trees, 分层树集合分割排序), EBCOT, EZBC (Embedded Zero Block Coding, 内嵌零块编码)等,基本思想都是按照比特平面先后顺序对系数进行排序。根据比特平面编码的基本思想,重要系数编码可以这样实现:提升定义好的重要系数使得最终码流包含这些系数的信息,直到满意为止。这种重复提升系数的编码实现方法增加了系统编码的复杂度,因此有必要研究更为简单的算法。

图像压缩常使用变换编码^[7-8],通过变换可以将像素之间冗余转换为变换后系数之间的统计冗余,从而有利于使用熵编码实现数据压缩。当前使用的变换工具多为小波,无论采用哪种小波变换都不能够彻底去除像素之间的相关性,即小波变换产生的系数之间的相关性依然存在。为了定义重要系数,需要事先确定正常编码截至的比特平面,可以先对给定图像进行编码,但是这增加了系统复杂度。为了降低复杂度,提出了一种根据编码截至比特平面的估计算法。

根据信息率失真理论可知,一幅给定的图像存在信息率失真函数,在信息率(即码率—平均每个符号输出的码流的平均长度)一定情况下,图像编码算法所产生的实际失真不会小于信息率失真函数确定的失真理论值;反之,在失真一定的情况下,实际输出码率不小于信息率。实际信息率失真函数总是存在的,可以通过实际测试描述出来。对于特定的算法而言,在指导图像编码的过程中,没有必要事先知道给定图像的实际信息率失真函数,根据一定统计模型可以估计出该函数,只要两者的误差不影响指导图像编码的结果即可。

信息率实际就是重建图像的熵,对于给定压缩算法,熵的计算需要准确的数学模型和复杂的计算,在工程上难以实现。本文使用简单、合理的模型对图像编码的码率进行估计,只要这种估计

能够充分逼近特定的编码算法即可,定义这种简化模型计算出的熵为熵估计值。

小波变换有许多种分解结构,其中 Mallat 结构在图像压缩中广泛应用,不失一般性,本文采用该结构进行理论分析。令小波域子带系数为 x_{ij} ($i=0,1,\dots,N-1,j=0,1,\dots,M-1$),其中 M 表示图像高度, N 表示图像宽度。如果图像压缩时截至到比特平面 bp ,这就相当于用一个步长为 $\Delta=2^{bp}$ 的量化器对系数进行量化,然后对量化后的系数进行无失真编码。令 $x_{ij}^{bp}=x_{ij}/\Delta$,计算由系数 x_{ij}^{bp} 组成子带的熵估计值,可以使用图 1(a) 所示模型,这种统计要考虑水平、垂直、对角线方向系数之间的相关性,因此十分复杂。由于每个符号的取值范围很大,比如 $[-4096,4096]$,这种统计在工程上无法快速实现,考虑到小波变换能够有效去除相邻系数之间的冗余,只要计算出来的熵估计值能够与相应编码输出码率相适应,用于指导实际应用就足够了。下面讨论简化算法。

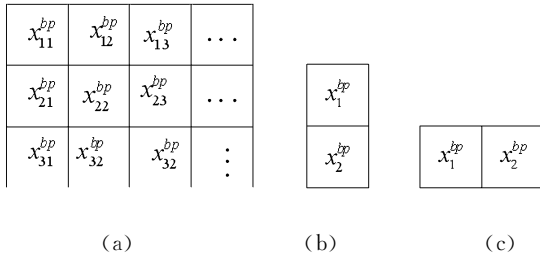


图 1 熵估计值计算使用的模型

Fig. 1 Models for entropy estimation

小波变换产生四种子带,每种子带中系数之间相关性与滤波器类型有关,对于 HH 子带而言,由于水平、垂直方向都采用高通滤波器进行滤波,因此系数之间的相关性很弱,可以定义该子带平均每个符号的熵估计值为

$$H_{HH} = - \sum_y p_y \log_2 p_y, \quad (1)$$

其中 $p_y = n_y / N_{HH}$ 为概率估计值, N_{HH} 、 n_y 分别表示 HH 子带系数总和以及符号 y 出现的频次;对于 HL 子带而言,由于水平方向使用高通滤波器、垂直方向使用低通滤波器,系数在水平方向的相关性较强,垂直方向的相关性很弱,应当使用扩展信源模型。信源概率统计采用图 1(b) 简化模型,即考虑垂直方向相邻系数之间的相关性,认为相邻列之间是相互独立的,在这种模型下,假设二阶扩展信源符号为 $[y_1, y_2]$,可以计算对应模型的

熵估计值。

$$H_{HL}^1 = - \sum_{y=0} p_y \log_2 p_y, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H_{HL}^2(Y_2 | Y_1) &= - \sum_{y_1, y_2} p(y_1, y_2) \log_2 p(y_2 | y_1) = \\ &= - \sum_{y_1, y_2} p(y_1, y_2) \log_2 \frac{p(y_1, y_2)}{p(y_1)} = \\ &= H(Y_1, Y_2) - H_{HL}^1, \end{aligned} \quad (3)$$

于是得到 HL 子带的熵估计值如下

$$H_{HL} = (H_{HL}^1 + H_{HL}^2(Y_2 | Y_1)) / 2 = H(Y_1, Y_2) / 2, \quad (4)$$

其中 $H(Y_1, Y_2)$ 为二阶扩展信源符号的相互熵, $H(Y_1, Y_2) = - \sum_{y_1, y_2} p(y_1, y_2) \log_2 p(y_1, y_2)$, (5)

而对于 LH 子带而言,熵估计值的计算与 HL 子带的计算方法相同,只是采用图 1(c) 所示的模型,即只是考虑水平方向相邻系数之间的相关性;而对于 LL 子带而言,当小波分解级数为三级以上时,系数数量已经很小,对总体熵估计值的计算影响不大,可以直接使用 HH 子带的计算方法。

如果变换使用的是正交小波,子带系数之间是相互独立的,而对于双正交小波而言,尽管子带系数之间不是正交的,但是系数之间的相关性非常弱,对熵估计值计算的影响很小,完全可以不考虑。熵估计值表示了各个子带符号的平均信息量,对于图像编码而言,就是子带系数编码输出码率的估计值,由于每个子带系数数量不同,可以使用下列公式作为整副图像编码输出的码率估计值,称之为平均熵估计值

$$H_{bp} = \frac{m_{LL}}{M} H_{LL} + \frac{m_{HL}}{M} H_{HL} + \frac{m_{LH}}{M} H_{LH} + \frac{m_{HH}}{M} H_{HH}, \quad (6)$$

其中 H_{bp} 为系数截至到第 bp 比特平面所对应的熵估计值,而 M 是图像总像素数量, m_{LL} 、 m_{HL} 、 m_{LH} 、 m_{HH} 分别表示各种子带的系数总和,显然满足下列关系 $M = m_{LL} + m_{HL} + m_{LH} + m_{HH}$ 。

综合上文,得到熵估计值的算法如下:

(1) 按照 Mallat 结构对给定图像进行小波变换;

(2) 令 $\Delta=1$,即 $bp=0$,对小波变换后的系数进行量化;

(3) 对 LL 、 HH 子带采用公式(1)计算相应的熵估计值;

(4) 对 HL 、 LH 子带采用相应的统计模型,

使用公式(5)计算相应的熵估计值;

(5)使用公式(6)计算出每个符号平均熵估计值,判断计算是否结束:

是,则结束;否,令 $\Delta = 2\Delta$, 并且返回(3)。

下面讨论确定编码截取的比特平面,即 n 的值。 n 的大小可以根据估计熵初步确定,不断改变量化间隔 Δ , 统计量化后系数的种类和各类系数出现的频数,根据公式(2)计算概率估计值 p_y , 然后根据上述公式(6)计算相应的估计熵。采用上述算法计算的估计熵与比特平面编码输出码率十分接近,因此可以根据这种简单方法估计重要系数不提升情况下比特平面编码最终截取到哪个比特平面,即 n 的值。取量化间隔 $\Delta_m = 2^m$, 其中 m 为不小于 0 整数,计算对应的估计熵 $H_e(m)$, 改变 m 的取值直到满足不等式

$$H_e(m-1) < R_g \leq H_e(m), \quad (7)$$

对于图像编码而言,比特平面的熵估计值就是编码截至到该比特平面时输出码流估计值,所以如果满足上述不等式,正常编码截至的比特平面就为 m , 即 $n=m$ 。总结上文具体算法如下:

- (1) 令 $m=0$;
- (2) 计算 $H_e(m)$;
- (3) 判断公式(7)是否成立
 - 如果不成立,则转到(4);
 - 否则转到(5);
- (4) 令 $m=m+1$, 返回(2);
- (5) 令 $n=m$; 返回。

正常编码情况下,编码截取的比特平面可以根据上述算法确定。

3 重要系数编码

上文讨论了码率情况下,根据估计熵确定正常编码截取到的比特平面 n 。重要系数提升后,最终输出码流截取的比特平面不会小于 n 。如果重要系数产生的码流较小,编码截取的比特平面不会发生变化;如果提升后的重要系数编码产生的码流足够大,则编码器会截止在 n 以上的比特平面。为了保证重要系数得到编码,重要系数提升后的幅值不应当小于 n 。为了保证这些系数的信息都输出到码流中,就需要大幅度提升这些重要系数,这样势必影响背景重建质量和图像的总体质量,而且也没有必要。实际上,只需要将重

要系数中幅度值相对较大的系数进行编码即可,这样对总体重建质量的影响较小,同时保留了重要的目标信息。假设所选取的重要系数最小幅值 x_{\min} , 满足 $x_{\min} \geq 2^{n_1}$, 其中 $n_1 \leq n$, 那么可以将系数提升幅度定义为 $\alpha = 2^{n-n_1+1}$, 这就要求幅值介于 $[2^n, 2^{n+1}]$ 的重要系数也要进行提升。

下面讨论如何确定重要系数以及实现具体算法。遥感图像编码不可能采用交互式编码,感兴趣区域编码需要指定感兴趣区域,所以这类系统也不适合使用这类算法。而且由于遥感图像存在许多具有重要信息的小目标,受分辨率的限制,讨论遥感图像编码小目标的处理算法很有意义。

小波变换采用了多分辨率分析方法对信号进行分析,从而得到不同分辨率信号的小局部特性。对于图像分解而言,多分辨率的分析是在二维空间上进行的。遥感图像包含的信息十分复杂,如杂乱的树林、草地、城市中的建筑物等,这类信息往往并不是十分有用,而这些图像在小波域中高频子带系数的数值往往较大;而平坦区域中的小目标对应高频子带的系数往往较小。比特平面编码是按照比特平面顺序编码,数值越大越容易得到编码,而小的系数的信息往往会丢失。根据小波理论可知,子带系数之间存在相似性,即如果当前子带某个系数是重要的,那么其更高级子带对应的几个系数更可能也是重要的, SPIHT 算法就是根据这一思想定义一种数据结构,称为“零树”,来实现高效图像压缩。对应子带系数之间的相似性可以作为重要系数选择的理论依据。

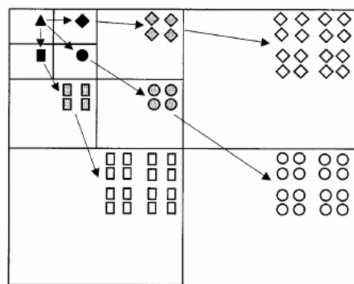


图 2 子带系数之间的相似性

Fig. 2 Similarity between coefficients in different bands

对于遥感图像而言,小目标的特征信息主要反映在小波变换后最高频率的三个子带的系数上,可以根据零树结构确定重要系数,对于正常编

码比特平面截至门限 n , 先设定一个门限 T_1 , 如果最高频子带系数 $x_{i,j}$ 满足下列不等式的系数作为初选系数

$$T_1 \leq x_{i,j} \leq 2^n, \quad (8)$$

其中 $x_{i,j}$ 为最高频子带的系数。

根据 SPIHT 算法的集合分割, 将系数 $x_{i,j}$ 上一级子带对应系数记作 $z_{i,j}$, $z_{i,j}$ 的重要性如下:

$$S_z(i, j) = \begin{cases} 1 & T_1 \leq z_{ij} \leq 2^n \\ 0 & \text{其他} \end{cases}, \quad (9)$$

然后根据 $S_z(i, j)$ 和 $x_{i,j}$ 定义感兴趣系数, 令

$$S_x(i, j) = \begin{cases} 1 & T_1 \leq x_{ij} \leq 2^n \text{ 且 } S_z(i, j) = 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}, \quad (10)$$

如果 $S_x(i, j) = 1$, 则系数 $z_{i,j}$ 为重要系数, 这些系数需要进行提升, 而其他系数的幅度保持不变。称 $S_x(i, j)$ 为系数重要信息。

重要系数提升后, 就可以利用比特平面编码技术进行编码, 由于编码之前提升了重要系数, 系统解码应当恢复这些系数值, 这就要求编码器有效保留重要系数位置信息, 可以设定一个重要系数模板记录该信息并且将其编码到最终码流中; 解码器解码出这些信息后就可以对重要系数进行逆提升, 恢复这些系数值。SPIHT 算法具有复杂度低、压缩效率高、编码速度快等特点, 适合系统的硬件实现, 在遥感图像编码系统中得到使用。SPIHT 是 Said 和 Pearlman 根据 Shapiro 零树编码的基本思想提出的。本文以该算法为基础实现重要系数编码技术, 为了实现重要系数编码算法, 需要对该算法进行改进, 将重要系数的模板信息编码在码流中。具体方法是对于三个高频子带而言, 如果系数是首次重要, 输出相应符号信息后输出是否为重要系数的信息, 系统解码时根据该信息可以恢复相应信息, 并在小波逆变换之前对重要系数进行逆提升, 恢复原来的信息。

综合上文, 重要系数编码算法的具体步骤如下:

- (1) 对图像进行小波变换, 计算估计熵;
- (2) 确定高频子带的重要系数, 建立相应系数提升模板;
- (3) 对确定的系数按照计算出的提升幅度进

行系数提升, 并采用 SPIHT 算法进行编码。

4 试验结果

利用无链表 SPIHT^[9] 对本文算法进行系统仿真, 并与原算法进行比较, 仿真使用 Field, Gkraw, Bridge, Band1 等遥感图像进行性能测试, 包括比特平面实际编码产生码率与估计熵的比较, 表 1 为测试结果, 可以看出估计熵与实际编码产生码率十分接近, 将估计熵作为正常编码截止比特平面是比较合适的, 对系数提升幅度的确定几乎没有影响。

表 2 为给定码率分别为 1 和 0.5 时, SPIHT 算法与本文算法重建图像质量的比较, 尽管本算法得到的总体质量有所下降, 但是下降幅度极小, 并没有本质差别。图 3 为给定码率 1 时, 遥感图像 Gkraw, Bridge 重建图像中局部区域的主观质量比较, 可以看出本算法的小目标信息更为丰富, 主观质量更好。

表 1 估计熵与实际编码码率的比较(截止比特平面一定)
Tab. 2 Comparson between entropy estimation and output rate
(单位: bpp)

图像	比特平面							
	1		2		3		4	
	熵估	编码	熵估	编码	熵估	编码	熵估	编码
	计值	码率	计值	码率	计值	码率	计值	码率
Field	4.05	3.99	2.83	2.82	1.86	1.80	0.98	0.96
Gkraw	3.55	3.58	2.45	2.40	1.60	1.58	0.92	0.90
Bridge	4.58	4.54	3.47	3.42	2.44	2.41	1.44	1.41
Band1	3.10	3.08	1.90	1.88	0.95	0.91	0.48	0.45

表 2 SPIHT 算法与本算法重建质量比较(单位: dB)
Tab. 2 Comparison of reconstructed image quality between SPIHT and proposed algorithm in the paper

图像	码率为 1		码率为 0.5	
	SPIHT 算法	本文方法	SPIHT 算法	本文方法
Field	33.01	32.72	29.60	29.45
Gkraw	33.96	33.63	30.52	30.42
Bridge	29.70	29.45	25.98	25.72
Band1	32.55	32.50	30.45	30.28



(a) 原始子图像
(a) Original image



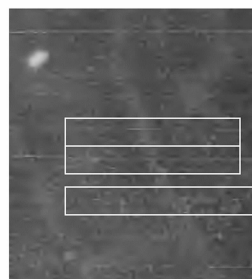
(b) 无链表 SPIHT 算法
(b) Result of listless SPIHT



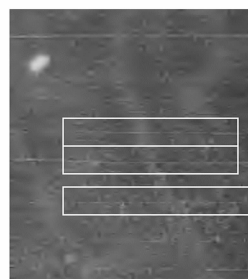
(c) 本文方法
(c) Result of algorithm of the paper



(d) 原始子图像
(d) Original image



(e) 无链表 SPIHT 算法
(e) Result of listless SPIHT



(f) 本文方法
(f) Result of algorithm of the paper

图 3 无链表 SPIHT 算法与本文算法重建图像比较
Fig. 3 Reconstructed quality comparison between listless SPIHT and proposed algorithm in the paper

5 结 论

根据遥感图像编码的特点,提出了一种重要系数编码算法,该算法可以视为感兴趣区域编码算法的扩展,但更为灵活、有效,避免了感兴趣区域编码算法的不足。为了确定重要系数及其提升幅度,根据小波域系数相关性较弱的特点,提出了一种估计熵的计算方法,熵估计值与实际编码输出码率之间差距在 0.1 bpp,所以可以根据熵估计值快速确定图像正常编码截至的比特平面,为系数比特平面提升提供了依据。在此基础上,提出了一种重要系数的确定方法,以保留更多遥感图像中的小目标信息。

本算法不需要在图像域指定感兴趣区域,系数提升幅度也不用提前指定,且提升所有子带的系数,重要系数的确定及系数提升幅度都是自动完成。最后以 SPIHT 为基础对本算法进行系统仿真,结果表明本算法可以有效保留遥感图像中

小目标的信息(如图 3 所示),而重建图像总体质量下降只是 0.05~0.3dB,所以本算法适合对遥感图像进行编码。

参考文献:

- [1] 李云松,吴成柯,陈军,等. 基于小波的干涉多光谱卫星图像压缩方法[J]. 光学学报, 2000,26(6):691-695.
LI Y S, WU C K, CHEN J, *et al.* Spectral satellite image compression based on wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(6):691-695. (in Chinese)
- [2] CHRISTOPOULOS C, ASKELÖF J, LARSSON M. Efficient methods for encoding regions of interest in the upcoming JPEG2000 still image coding standard[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2000,7(9):247-249.
- [3] CHRISTOPOULOS C. *JPEG2000 verification model 8.0 (Technical description)*[M]. MediaLab, Ericsson Research, Sweden, July 31, 2000.
- [4] 陈军,吴成柯,李云松. 基于零树结构的感兴趣区图像内嵌编码算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2002,29(3):343-346.
CHEN J, WU C K, LI Y S. Embedded coding of images with regions of interest based on zerotree[J]. *Journal of Xi'an University*, 2002,22(3):343-346. (in Chinese)
- [5] 邓家先,吴成柯,陈军. 基于率失真斜率提升的干涉多光谱图像压缩[J]. 光学学报, 2004,24(3):299-303.
DENG J X, WU C K, CHEN J. Multi-spectral image compression based on rate 2D distortion slope lifting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(3):299-303. (in Chinese)
- [6] 邓家先,吴成柯,陈军,等. 二次率失真优化截取的感兴趣区域编码[J]. 系统工程与电子技术, 2003,25(12):1532-1535.
DENG J X, WU C K, CHEN J, *et al.* Region-of-interest coding based on twice optimized truncations of rate-distortion slopes[J]. *Systems Engineering And Electronics*, 2003,25(12):1532-1535. (in Chinese)
- [7] 王丽荣,申铨国,王延杰. 基于提升方法的整数小波在 DSP 上的实现[J]. 光学精密工程, 2004,12(2):185-189.
WANG L R, SHEN X G, WANG Y J. Implementation of integer wavelet transform based on lifting scheme on DSP[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004,12(2):185-189. (in Chinese)
- [8] 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(Supp):201-205.
LIU H, ZHAI L P, GAO Y, *et al.* Lifting wavelet transform and its application in image compression[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005,13(Supp):201-205. (in Chinese)
- [9] CHEN J, LI Y S, WU C K. A listless minimum zerotree coding algorithm for wavelet image compression[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2001,10(2):200-203.

作者简介:邓家先(1964—),男,博士,教授,研究方向为图像压缩和自适应信号处理。E-mail:jxiandeng@126.com