

感兴趣区域提升幅度确定及编码*

邓家先

(海南大学信息科学与技术学院,海口 570228)

摘 要 基于小波变换的星载图像压缩中,感兴趣区域编码实现面临主要问题之一是如何确定小波域系数提升的幅度. 提出了一种比特平面熵估计值计算模型及计算算法,能够有效逼近比特平面编码实际输出码率,同时提出了系数提升幅度的算法,从而解决了基于比特平面提升的感兴趣区域编码中系数提升幅度确定问题,可以保证感兴趣区域重建质量要求的前提下,背景和总体重建质量更好. 该算法是根据图像内容和用户要求计算系数提升幅度,不需要进行人工干预,图像的复杂度不同,提升幅度也会不同. 该算法适合感兴趣区域确定如干涉高光谱图像这类图像的编码. 仿真结果表明,尽管不同图像具有不同的复杂度,本文算法都能够准确确定感兴趣区域系数的提升幅度,从而有效保证了总体编码效果更好.

关键词 图像处理;感兴趣区域编码;熵估计值;比特平面提升

中图分类号 TN919.81 **文献标识码** A

0 引言

感兴趣区域编码是现代静态图像编码技术十分重要的思想,为图像编码提供了更好的特性,一幅图像中重要性不同区域可以区别对待,分配不同的码率. 李云松博士在研究干涉多光谱图像编码技术时首先提出了“特殊区域编码”的思想^[1],其原理就是感兴趣区域编码;静态图像压缩新标准 JPEG2000 中正式提出了感兴趣区域编码概念^[2~4],后来许多学者对此进行了进一步研究^[5~8]. 在比特平面编码技术中,感兴趣区域编码的实现首先要在图像域定义一个区域-即感兴趣区域,然后根据小波域系数对感兴趣区域重建是否有贡献来确定提升哪些系数,即将图像域像素映射到小波域,最后根据事先确定的提升幅度对相应系数进行提升.

编码输出码率一定情况下,感兴趣区域系数的提升幅度越大,图像编码时分配的码率越多,感兴趣区域的重建质量越好,同时背景分配的码率必然相应减少,重建背景质量必然会下降. 因此在满足感兴趣区域编码要求的前提下,尽可能减小感兴趣区域系数的提升幅度对重建总体质量是有益的. 在不需要或者不能够进行人工干预情况下,感兴趣区域编码面临两个问题:感兴趣区域如何确定,系数提升幅度多大是合适的;在许多情况下,感兴趣区域可以是事先知道的,而对感兴趣区域的重建质量提出要求,如何根据这一要求设计出适合硬件实现算法是

十分重要的. 为此,提出了一种编码截至到某比特平面对应的熵估计值算法,然后根据熵估计值确定感兴趣区域系数提升幅度. 该算法能够有效确定感兴趣区域系数的提升幅度,从而保证重建图像的总体质量更好. 同时使用无链表 SPIHT (Set Partitioning In Hierarchical Trees,分层树集合分割排序)^[9]对本文算法进行了系统仿真,结果表明,尽管不同图像具有不同的复杂度,本文算法都能够准确确定感兴趣区域系数的提升幅度.

1 熵估计值

根据信息率失真率理论可知,对于给定的一幅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,任何一幅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,当失真一定情况下,实际输出码率不小于信息率. 尽管目前图像压缩算法还没有达到理论要求,但是信息率失真理论在指导图像编码方面具有重要的理论意义和实际意义. 对于给定图像和特定的编码算法,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.

根据信息率失真理论可知,信息率就是考虑编码引入误差后图像的熵,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,因此可以在变换域使用简单、合理的模型对熵进行估计,只要这种估计能够充分逼近特定的编码算法即可,定义通

*海南省自然科学基金(80551)和海南省教育厅(Hjlkj200602)资助项目
Tel:0898-66254530 Email:jxiandeng@126.com
收稿日期:2005-10-16

过这种简化模型计算出的熵为熵估计值。

基于小波变换的图像压缩如 EZW (Embedded Zero-tree Wavelet, 内嵌零树编码), SPIHT, EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation, 优化截取内嵌块编码) 等算法都具有很好的压缩效果和好的特性, 在工程中得到广泛应用. 小波分解结构有许多结构, 其中 Mallat 结构在图像压缩中广泛应用, 不失一般性, 采用该结构进行理论分析.

令小波分解得到的子带系数为 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. 假设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, 然后再对量化后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, 应当使用图 1(a) 模型, 由于空间相邻的系数存在相关性, 这种有记忆的信源要用马尔可夫随机场加以描述, 需要统计系数相邻符号之间的各阶联合概率分布和各阶条件概率分布, 比如要计算 $H_3(Y) = H(Y_3 | Y_1, Y_2)$, 就需要统计 $p(y_1, y_2, y_3)$ 和 $p(y_1 | y_2, y_3)$, 而且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, 从而指导实际应用就足够了, 下面讨论简化算法.

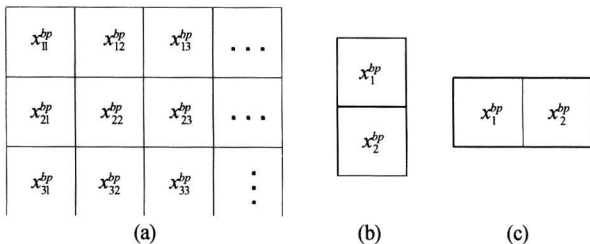


图 1 熵估计值计算使用的模型

Fig. 1 Models for entropy estimate calculation

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

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

式中 $p_y = \frac{n_y}{N_{HH}}$ 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

较弱, 垂直方向的相关性较强, 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 $[y_1, y_2]$, 可以计算对应模型的熵估计值.

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

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

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

$$H(Y_1, Y_2) = - \sum_{y_1, y_2} p(y_1, y_2) \log_2 p(y_1, y_2) \quad (5)$$

式中 $H(Y_1, Y_2)$ 为联合熵. 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) 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. 根据上述得到的熵估计值计算系数的平均熵估计值为

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

式中 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, 使用式(5)计算相应的熵估计值;
- 5) 使用式(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)。

2 基于熵估计值的感兴趣区域幅度提升

遥感图像编码时, 感兴趣区域编码的难点之一在于确定待提升系数的提升幅度大小, 如果提升幅度太大, 感兴趣区域重建质量变好了, 相应背景质量

必然会下降,从而影响总体编码质量.目前静态图像编码算法都采用基于小波变换的内嵌比特平面编码技术,如 EZW, SPIHT, EBCOT, EZBC (Embedded Zero Block Coding, 内嵌零块编码)等,比特平面编码的基本思想是按照比特平面从高到低顺序对变换后的系数进行排序,这种编码思想为确定感兴趣系数提升幅度提供了一种直观的实现方法.对于给定输出码率,适当提升感兴趣区域的系数使得最终码流包含所需要的信息,然后不断改变提升幅度,直到所需要的信息都包含在最终码流为止.这种重复变换提升系数的编码算法增加了系统编码时间,可以用于交互式编码,但不利于系统的硬件实现,所以研究适合硬件实现的算法十分重要.

根据信息率失真理论可知,有损图像压缩产生的平均码流长度就是该算法对应的输出码率,当然该码率不可能等于极限值.对于基于小波变换的图像压缩算法而言,可以通过信息论理论估计编码到某个比特平面时输出的码率,如果模型合适,输出码率的估计值应当与输出码率十分逼近,这样就为感兴趣区域中系数提升幅度的确定提供快速算法.

比特平面编码之前要对小波域的系数进行量化,将系数表示为原码从而便于编码.量化间隔不同,所得到原码数据的种类及概率分布也不相同.假设当输出码率 R_g 一定情况下,比特平面编码最终截取到比特平面 bp ,如果事先将待编码的系数进行标量量化,量化间隔为 $\Delta = 2^{bp-1}$,那么最终输出码流不会受到任何影响.如果感兴趣区域系数编码到比特平面 bp 能够满足要求,那么就不需要对小波系数进行提升;反之就要对系数进行提升.不失一般性,假设感兴趣区域的系数编码到 bp_1 正好能够满足用户要求.

在讨论确定提升幅度算法时,先确定正常编码(即没有提升感兴趣区域的系数)到底截取到那个比特平面,即 bp 的值. bp 的大小可以根据熵估计值初步确定,不断改变量化间隔 Δ_i ,统计量化后系数的种类和各类系数出现的频数,根据上文讨论的方法计算相应的熵估计值 H_{bp} .当小波分解级数足够大且前文假设合理时,编码输出码率应当与熵估计值十分接近,就可以用简单方法估计感兴趣区域的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,既 bp 的值.取量化间隔 $\Delta_{bp} = 2^{bp}$,其中 bp 为大于 0 的正整数,计算对应的熵估计值 H_{bp} ,改变 bp 直到满足不等式

$$H_{bp+1} < R_g \leq H_{bp} \quad (7)$$

上述不等式成立时,提升后的感兴趣区域系数应当大于等于 2^{bp} .如果感兴趣区域要求的 bp_{roi} 大于等

于 bp ,那么所有的系数都不需要提升就可以满足用户要求;否则计算感兴趣区域对应的熵估计值 H_{roi} ,那么分配给背景的码率为

$$R_{bg} = R_g - H_{roi} \quad (8)$$

使用该码率,根据上文方法计算背景编码所截至的比特平面 bp_{bg} ,那么感兴趣区域系数的提升幅度为 $\omega^{bp_{bg} - bp_{roi}}$.综合上文,得到具体算法如下:

1)令 $bp = bp_{roi}$; 2)根据上文算法计算总体图像截至到比特平面所对应的熵估计值; 3) $bp = bp + 1$,比特平面数是否足够,如果是,则(4);否则返回(2); 4)根据式(7)确定正常编码应当截至的比特平面,并判断是否需要提升感兴趣区域的系数,· 如果不需要,则结束;· 否则(5); 5)根据事先确定的感兴趣区域编码的截至比特平面计算感兴趣区域对应的熵估计值,根据式(8)计算背景分配的码率; 6)根据背景码率,确定其编码截至的比特平面,并且确定比特平面提升幅度.

3 干涉多光谱图像压缩

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 A. Said 和 W. A. Pearlman 根据 Shapiro 零树编码的基本思想提出的;为了便于硬件实现,李云松博士和陈军博士等对该算法进行改进,提出了无链表 SPIHT 编码算法^[9].本文以该算法为基础研究基于感兴趣区域编码的干涉多光谱图像压缩,干涉多光谱的光谱信息集中在固定区域内^[10,11].假设对光谱区域的重建质量,也就是编码引入的误差小于给定值 D_{max} .假设均方误差测度是加性的^[7],那么整个感兴趣区域引入的误差 D 可以表示为

$$D_{roi} = \sum_i D_{roi}(i) \quad (9)$$

式中 $D_{roi}(i)$ 感兴趣区域像素映射到各子带的系数编码引入的误差.现在就是要找到满足下列条件的最大比特平面,即

$$\arg[\max(bp), D_{roi} < D_{max}] \quad (10)$$

这一问题很容易实现,自最小比特平面开始计算编码截至到该比特平面时,各个子带感兴趣区域对应的系数引入的编码误差,将这些误差累加起来得到子带的编码误差 $D_{roi}(i)$,根据式(9)计算出总体误差,然后判断是否满足式(10)的要求,从而既可以确定感兴趣区域的系数编码应当截至的比特平面 bp_{roi} .

综合上述的讨论,归纳如下:

1)首先根据给定的感兴趣区域的重建误差要求,找到感兴趣区域编码的截至比特平面 bp_{roi} ,并且计算出对应的熵估计值 H_{roi} ; 2)计算感兴趣区域系

数提升幅度;3)对提升后的系数进行编码.

4 试验结果

对本文算法进行系统仿真,在此基础上使用干涉多光谱图像 S_1, S_2, S_3, S_4 等图像测试了不同截止比特平面实际编码产生码率与熵估计值,表 1 为测试结果,可以看出熵估计值与实际编码产生码率十分接近,将熵估计值作为正常编码截止比特平面输出码率的估计值是比较合适的.当然由于小波域同一子带系数之间存在相关性而且不同子带系数之间又存在相似性,而熵估计值计算没有考虑这些因素的影响,所以熵估计值总是与实际编码输出码率略有差异,但是两者之间的差异很小,当然对比特平面幅度提升幅度的确定影响很小.

表 1 熵估计值与实际编码输出码率的比较

图像名称	Bp 的值									
	1		2		3		4		5	
	熵估计值	输出码率	熵估计值	输出码率	熵估计值	输出码率	熵估计值	输出码率	熵估计值	输出码率
S_1	4.15	4.22	3.02	3.04	1.90	1.90	1.05	1.00	0.45	0.433
S_2	4.09	4.15	2.97	2.98	1.89	1.85	1.03	0.97	0.44	0.42
S_3	3.10	3.09	2.05	1.99	1.20	1.12	0.63	0.56	0.26	0.24
S_4	4.34	4.37	3.28	3.24	2.30	2.22	1.38	1.38	0.65	0.63

表 2 为给定码率分别为 1 时,使用基于无链表 SPIHT 的比特平面提升算法的重建图像质量 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio, 峰值信噪比)测试结果,表 3 为本文算法重建图像质量的测试结果(假设感兴趣区域重建质量不大于 36 dB).从表 2 的结果可以看出,由于图像的复杂度,如果采用相同的提升幅度,在满足感兴趣区域质量要求的前提下,很难保证各图像重建质量最好.4 幅图像中, S_3 的复杂度最低,即使不提升感兴趣区域系数也能够保证感兴趣区域重建质量要求,但是另 3 幅图像的感兴趣区域重建质量远远小于要求;如果 4 幅图像都提升一个比特平面,前 3 幅图像能够满足要求,但是

S_1 的背景和总体质量都下降了 1 dB 左右,而且 S_4 的感兴趣区域质量还不能够满足要求;如果为了满足 S_4 的要求,感兴趣区域的系数应当提升两个比特,而前 3 幅图像的背景和总体质量都下降了 2 dB 左右.而从表 3 可以看见出,本文算法能够准确判断比特平面提升的幅度,对于不同复杂度的图像,在保证感兴趣区域重建质量要求前提下,总体图像质量更好.

表 2 使用无链表 SPIHT 进行 ROI 编码结果(码率为 1.0)

图像名称	提升因子	ROI 的 PSNR/dB	背景的 PSNR/dB	总体 PSNR/dB
S_1	1	32.79	31.20	32.03
	2	36.12	30.52	31.54
	4	40.23	29.28	30.16
	8	43.32	28.02	28.54
S_2	1	32.42	31.36	32.26
	2	36.36	31.01	31.31
	4	40.01	30.05	31.05
	8	43.80	28.15	29.69
S_3	1	38.07	37.12	37.80
	2	41.15	36.05	37.81
	4	44.90	34.78	36.06
	8	48.13	32.65	34.17
S_4	1	30.24	28.65	29.54
	2	33.52	28.34	29.14
	4	38.65	27.22	29.13
	8	41.58	27.12	28.89

表 3 实验结果(码率=1.0)

图像名称	ROI 的 PSNR/dB	背景的 PSNR/dB	总体 PSNR/dB
S_1	36.12	30.52	31.54
S_2	36.36	31.01	31.31
S_3	38.07	37.12	38.80
S_4	38.65	27.22	29.13

图 2 为 S_1, S_2, S_3, S_4 原始图像,图 3 为码率为 1.0,干涉光谱重建质量不小于 36 dB 条件下,相应的重建图像.

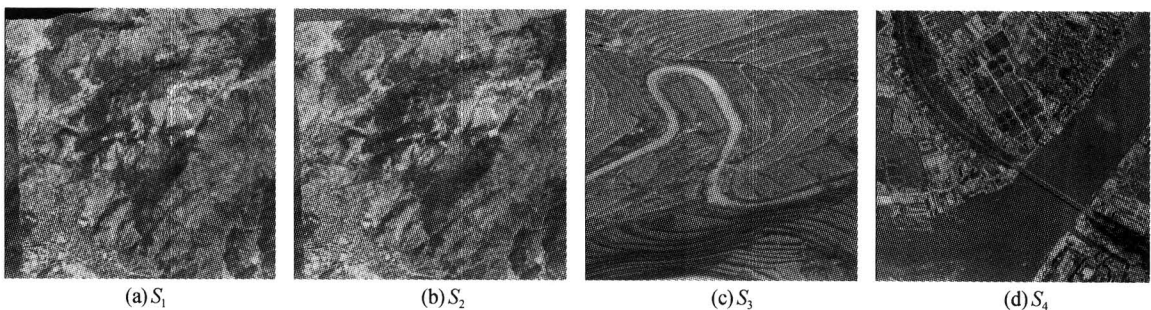


图 2 原始图像
Fig. 2 Original images

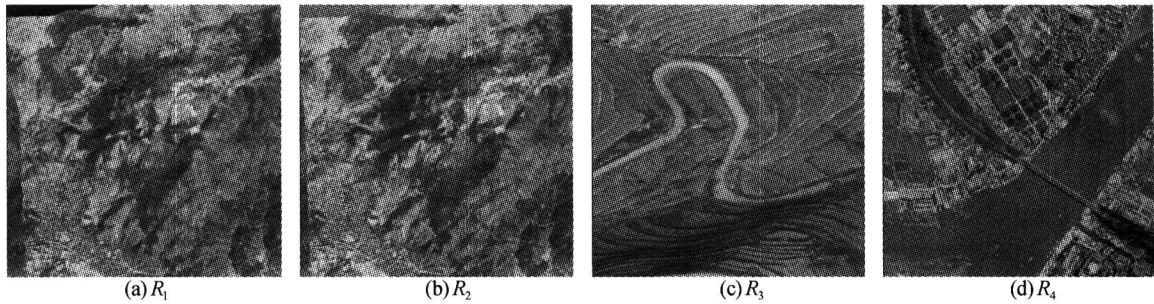


图3 重建图像

Fig. 3 Reconstructed images

5 结论

根据小波域不同子带系数的特点,提出了不同子带熵估计值计算的简化模型和相应的计算方法.在此基础上,根据比特平面的熵估计值判断是否进行感兴趣区域系数的提升,如果需要提升,则确定比特平面提升的幅度,然后对系数进行提升和编码;否则直接进行正常编码.实验结果表明,尽管不同图像具有不同复杂度,本文算法能够有效确定感兴趣区域系数提升幅度,在满足感兴趣区域重建质量的要求下,重建图像的总体质量更好.

参考文献

- 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.光学学报,2000,**26**(6):691~695
Li Y S, Wu C K, Chen J, et al. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):691~695
- Christopoulos C, Askelöf J, Larsson Ms. Efficient methods for encoding regions of interest in the upcoming JPEG2000 still image coding standard. *IEEE Signal Processing Letters*, 2000, **7**(9): 247~249
- Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT. *IEEE Trans on Image Processing*, 2000, **9**(7):1158~1170
- JPEG2000 Verification Model 8.0(Technical description) Christopoulos C, MediaLab, Ericsson Research, Sweden July 31, 2000
- 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.西安电子科技大学学报,2002,**29**(3):343~346
Chen J, Wu C K, Li Y S. *Journal Xidian University*, 2002, **22**(3):343~346
- 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.光学学报,2004,**24**(3):299~303
Deng J X, Wu C K, Chen J. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):299~303
- 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.系统工程与电子技术,2003,**25**(12):1532~1535
Deng J X, Wu C K, Chen J, et al. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, **25**(12): 1532~1535
- 肖江,邓家先,吴成柯,等.一种支持干涉多光谱图像 ROI 的压缩编码方法.光子学报,2003,**32**(4):481~484
Xiao J, Deng J X, Wu C K, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4):481~484
- Chen Jun, Li Yunsong, Wu Chengke. A listless minimum zerotree coding algorithm for wavelet image compression. *Chinese Journal of Electronics*, 2001, **10**(2):200~203
- 杜培军,方涛,唐宏,等.高光谱遥感信息中的特征提取与应用研究.光子学报,2005,**34**(2): 293~296
Du P J, Fang T, Tang H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 293~296
- 吴小华,李自田,张帆.干涉超光谱图像分析与近无损压缩 CPLD 实现.光子学报,2005,**34**(9):1346~1351
Wu X H, Li Z T, Zhang F. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9):1346~1351

Decision of ROI Scaling Value and ROI Coding

Deng Jiaxian

Information Science and Technology School, Hainan University, Hainan 570228

Received date: 2005-10-16

Abstract In the on-board image coding algorithm, one of the main problems in ROI (Region-of-interest) coding is to decide the scaling value. A novel algorithm for calculating entropy estimate is presented which can approximate to the actual output rate produced by bit-plane coding. Then an algorithm for deciding the scaling value of ROI is proposed by which the scaling value of ROI can be decided correctly. The scaling value is calculated according to the image being coded and the requirement, which does not need inference, with different image complexity different lifted value. So the algorithm in the paper is suitable for those images such as multi-spectral images in which the ROI position is known and their complexity different. The simulation results show that in spite of different complexity the algorithm can decide the lifted value precisely so that the whole reconstructed image quality is better.

Keywords Image processing; Region-of-interest (ROI) coding; Entropy estimate; Bit-plane scaling



Deng Jiaxian was born in Hubei, China, on September 16, 1964. He received the Ph. D. degree in 2004 in School of Information Engineering at Xidian University. He joined the Information Science and Technology School at Hainan University. His research interests are in the compression and processing of remote sensing images and in adaptive signal processing. He is currently a professor of the Information Science and Technology School at Hainan University.