

## 感兴趣系数图像压缩编码算法

邓家先 康耀红

(海南大学信息学院 海口 570228)

**摘要** 根据遥感图像编码的特殊性,提出了一种感兴趣系数编码算法。对于给定码率计算遥感图像小波域系数的熵估计值,从而大致确定正常编码情况下图像编码所截取到的比特平面,在此基础上给出了感兴趣系数确定方案及提升幅度的计算方法。该算法与感兴趣区域编码方法不同,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,而且不必对所有子带的系数进行提升。该算法是任意区域的感兴趣区域编码的扩展和补充,但更为灵活、有效。仿真结果表明该算法可以有效保留遥感图像中小目标的信息,但图像总体质量略有下降。

**关键词** 图像处理, 图像压缩, 感兴趣系数, 熵估计值, 比特平面提升

中图分类号:TN919.81

文献标识码:A

文章编号:1009-5896(2006)05-0844-04

## A Novel Image Coding Algorithm Based on Coefficients of Interest

Deng Jia-xian Kang Yao-hong

(Information School, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract** A novel image coding algorithm based on coefficients of interest is proposed in terms of the special needs of remote-sensing images. When coding rate is given, the entropy estimate is calculated from the coefficients of the given image, so that the last coding bit-plane can be derived when the image is coded normally. The difference of the algorithm from the one for region-of-interest algorithm lies in that the region and the scaled value need not be preappointed, and the most important is that all the coefficients in bands are not scaled up, while the coefficients of interest and the scaled value are deduced from the given image in the algorithm. This algorithm can be thought as the generalization from the region-of-interest algorithm, which is smarter and more valid than the region of interest coding algorithm. The simulation and the experimental results show that the small targets in the remote-sensing images can be saved validly while the whole image quality decreases a little.

**Key words** Image processing, Image compression, Coefficients of interest, Entropy estimate, Bit-plane scaling

### 1 引言

随着图像编码技术的发展,特别是基于离散小波变换的内嵌比特平面编码技术的发展,为感兴趣区域编码提供了可能。在研究干涉多光谱图像编码技术的过程中,李云松提出了“特殊区域编码”的思想<sup>[1]</sup>,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<sup>[2,3]</sup>。这些感兴趣区域编码算法都是基于小波域系数的比特平面提升<sup>[1-4]</sup>,例如基于离散小波变换的感兴趣区域编码,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该区域图像重建是否有贡献来确定对哪些系数进行提升,系数提升幅度事先指定,而且所有子带待提升系数的提升幅度相同;为了正确重建图像,图像解码时必须对提升后的系数进行逆提升。这种基于系数提升的感兴趣区域编码存在明显不足,主要表现为:系数的提升与逆提升增加了系统编码的复杂度;各个子带提升幅度相同使得感兴

趣区域编码技术显得不够灵活等等。

针对上述缺点,作者在研究新的静态图像压缩标准JPEG2000的核心算法优化截取内嵌块编码(Embedded Block Coding with Optimized Truncation, EBCOT)<sup>[2]</sup>的基础上提出了基于率失真斜率提升的感兴趣区域编码,并且针对不同应用要求提出了相应的解决方案<sup>[5,6]</sup>。这种算法不需要对小波域的系数进行提升和逆提升,从而避免了基于比特平面提升算法的诸多不足,降低了编码系统的复杂度。但是这种编码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。

无论是比特平面提升还是率失真斜率提升的感兴趣编码都是在图像域定义感兴趣区域,然后再将其映射到小波域系数,并对这些系数进行特殊处理,从而达到感兴趣区域编码的目的,其共同的特点是给感兴趣区域对应的各个子带系数增加了优先编码的可能。然而在许多情况下,感兴趣区域的定义并不容易实现,而且将所有系数都赋予优先权也没有必要。比如遥感图像中的小目标往往是图像编码所关心的,而这些小目标的主要特征体现在高频子带,如果按照上文所

述的感兴趣区域编码方法就需要将其对应的所有低频子带的系数同时优先编码, 而这些小目标在低频子带的系数无论是否赋予优先权对这些目标的重建并没有太大的影响, 但是给这些系数的优先编码会影响其他像素的重建图像质量。为此, 本文提出一种小波域系数的分类编码算法, 称为感兴趣系数编码算法。本文安排如下: 第2节讨论系数提升幅度确定, 根据熵估计值确定正常编码截止比特平面, 然后确定系数提升幅度; 第3节讨论一种感兴趣系数编码方法, 可以有效保留遥感图像中的小目标信息; 第4节为实验结果及结果分析; 第5节对本文算法进行总结, 给出相应结论。

## 2 系数提升幅度确定

遥感图像编码时, 感兴趣系数编码的难点在于确定哪些系数需要提升、待提升系数提升幅度多大是比较合理的。如果提升幅度太大, 感兴趣系数质量变好了, 相应背景质量必然会下降, 从而影响总体编码质量。对于遥感图像而言, 小目标固然重要, 而背景也重要。感兴趣系数编码就是适当牺牲背景重建质量, 更好地保留重要小目标信息。

当前好的图像编码算法都是基于小波变换的内嵌比特平面编码技术, 如内嵌零树编码 (Embedded Zero-tree Wavelet, EZW), 分层树集合分割排序 (Set Partitioning In Hierarchical Trees, SPIHT), EBCOT, 内嵌零块编码 (Embedded Zero Block Coding, EZBC)等。比特平面编码就是按照比特平面顺序对系数进行排序, 这种编码思想为确定感兴趣系数提升幅度提供了一种基本思路。在码率一定情况下, 适当提升感兴趣系数使得最终码流包含这些系数的信息, 直观的思路就是不断改变提升幅度, 直到感兴趣系数所需要的信息包含在最终码流为止。这种重复提升系数的编码实现方法增加了系统编码时间, 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。

在图像压缩中, 小波变换的目的是为了去除像素之间的冗余, 即减少系数之间的相关性。不同小波变换得到的系数之间的相关性有所不同, 但都不会彻底去除相关性。为讨论问题方便起见, 不妨假设系数之间不相关。在此假设情况下, 可以根据信源编码理论计算小波域系数的熵值, 为了与实际熵区分开, 称之为熵估计值。由于系数之间相关性的存在, 熵估计值总是大于熵。

小波域系数用  $x_{i,j}$  表示, 其中  $(i,j)$  表示坐标, 设系数共有  $M$  种, 每种系数  $y$  ( $y=0,1,\dots,M-1$ ) 对应概率为  $p_y$ , 定义熵估计值  $H_e$  为

$$H_e = -\sum_{y=0}^{M-1} p_y \log_2 p_y \quad (1)$$

对一幅图像而言, 概率用概率估计值, 即相同系数出现的频数除以系数总数代替, 即

$$p_y = \frac{n_y}{N} \quad (2)$$

其中  $n_y$  表示系数  $y$  出现的次数,  $N$  表示图像像素点总数。

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。如上文所述, 内嵌比特平面编码是按照比特平面编码的顺序进行排序的, 产生的码流是按照比特平面的先后顺序截取。当给定码率  $R_g$  一定情况下, 比特平面编码最终截取到比特平面  $n$ , 如果事先将待编码的系数进行标量量化, 量化间隔为  $\Delta = 2^{n-1}$ , 那么对最终输出码流没有任何影响。如果感兴趣系数小于  $\Delta$ , 那么就应当将这些系数提升, 提升后系数大小至少大于  $2\Delta$ 。现在的问题是使用简单算法, 事先确定编码到底截取到那个比特平面, 即  $n$  的值。  $n$  的大小可以根据熵估计值初步确定, 不断改变量化间隔  $\Delta_i$ , 统计量化后系数的种类  $M$  和各类系数出现的频数, 根据式(2)计算概率估计值  $p_y$ , 然后根据式(1)计算相应的熵估计值  $H_e$ 。假设当小波分解级数足够大时, 比特平面编码输出码率应当与熵估计值十分接近, 就可以根据简单方法估计感兴趣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  $m$  为大于0的正整数, 计算对应的熵估计值  $H_e(m)$ , 改变  $m$  的取值直到满足不等式:

$$H_e(m-1) < R_g \leq H_e(m) \quad (3)$$

上述不等式成立时,  $n = m$ 。总结上文具体算法如下:

- (1) 令  $m = 0$ ;
- (2) 根据式(1), 式(2)计算  $H_e(m)$
- (3) 判断式(3)是否成立, 如果不成立, 则转(4), 否则转(5);
- (4) 令  $m = m + 1$ , 返回(2);
- (5) 令  $n = m$ ; 结束。

正常编码情况下, 编码最终截取到的比特平面根据熵估计值进行初步确定。

## 3 感兴趣系数编码

上文讨论了当码率一定情况下, 根据熵估计值确定正常编码截取到的比特平面  $n$ 。感兴趣系数提升后, 最终输出码流截取的比特平面不会小于  $n$ 。如果感兴趣系数产生的码流较小, 编码截取的比特平面数不会发生变化; 如果提升后的感兴趣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。为了保证感兴趣系数得到编码, 感兴趣系数提升后的幅值不应当小于  $n$ , 如果为了保证这些系数得到编码而大幅度提升系数, 必然会导致背景重建质量的下降, 而重建图像的总质量也会随之下降。假设感兴趣系数最小幅值  $x_{\min}$  满足  $x_{\min} \geq 2^n$ , 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  $[2^n, 2^{n+1})$  的感兴趣

系数也要进行提升, 如果不对这些系数进行提升, 编码器输出码流可能不包含这些系数的信息。

下面讨论如何确定感兴趣系数以及实现具体算法。小波变换采用了多分辨率分析方法对信号进行分析, 可以得到不同分辨率信号的局部特性。对于图像分解而言, 多分辨率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小波域系数的比特平面的顺序进行编码, 所以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可能是更重要的, 如图1所示。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感兴趣系数选择的理论依据。

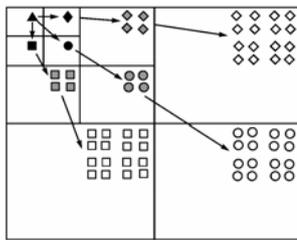


图1 子带系数之间的相似性

Fig.1 Similarity between coefficients of 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3个子带的系数上, 根据零树结构的特点可以确定感兴趣系数。对于给定码率确定的正常编码比特平面的门限 $n$ , 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:

$$T_1 \leq x_{i,j} \leq 2^n \quad (3)$$

其中 $x_{i,j}$ 为最高频子带的系数, 在实际工程中, 考虑到背景的重要性, 为了避免感兴趣系数编码对总体重建图像的影响太大而造成背景质量的严重下降,  $T_1$ 取值为 $T_1 = \max\{2, 2^{n-2}\}$ 。

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 $z_{i,j}$ , 先 $z_{i,j}$ 的重要性如下:

$$S_z(i,j) = \begin{cases} 1, & T_1 \leq z_{ij} \leq 2^n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

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

$$S_x(i,j) = \begin{cases} 1, & T_1 \leq x_{ij} \leq 2^n \text{ 且 } S_z(i,j) = 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

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

感兴趣系数提升后, 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感兴趣系数, 系统解码应当恢复这些系数值, 这就要求编码器有效保留感兴趣系数位置信息, 可以设定一个感兴趣系数模板记录该信息, 并且对模板记录信息进行编码, 然后将编码结果打包到最终码流中; 解码器解码出这些信息后就可以对感兴趣系数进行逆提升, 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; 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算法<sup>[7]</sup>。本文以该算法为基础实现感兴趣系数编码技术, 为了实现感兴趣系数编码算法, 需要对该算法进行改进, 将感兴趣系数的模板信息编码在码流中。具体方法是对于3个高频子带而言, 如果系数是首次重要, 先输出“1”表示系数已经重要, 然后输出相应符号和感兴趣系数重要信息, 系统解码时恢复这些信息, 并在小波逆变换之前对感兴趣系数进行逆提升, 恢复原系数值。

综合上文, 感兴趣系数编码算法的具体步骤如下:

- (1) 对图像进行小波变换, 计算熵估计值;
- (2) 确定高频子带的感兴趣系数, 并且建立相应模板;
- (3) 对感兴趣系数进行提升, 并采用改进无链表 SPIHT 算法进行编码。

## 4 试验结果

对本文算法进行系统仿真, 使用 Field, Gkraw, Bridge, Band1 等遥感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, 所以熵估计值总是略微大于实际编码码率, 但是两者之间的差别很小, 对比特平面的判断影响很小。而且当某个比特平面的熵估计值接近给定码率时, 可以考虑对熵估计值进行修正, 保证判断的正确性。

表2为给定码率分别为1和0.5时, 无链表SPIHT算法与本文算法的重建图像质量比较, 本算法总体质量略有下降, 但是下降幅度很小, 说明本算法对重建图像总体客观质量的影响很小。图2为给定码率1时, 遥感图像 Gkraw, Bridge 重建局部图像比较, 从图可以看出本算法的小目标信息更为丰富。

表 1 熵估计值与实际编码码率的比较(截止比特平面一定)(单位: bpp)

Table 1 Comparison between the entropy estimate and actual output rate (given final bitplane ) (unit: bpp)

图像	比特平面									
	1		2		3		4		5	
	熵估计值	编码码率								
Field	4.11	3.97	2.88	2.84	1.83	1.76	0.98	0.94	0.53	0.41
Gkraw	3.78	3.53	2.48	2.36	1.60	1.53	0.92	0.89	0.54	0.41
Bridge	4.66	4.52	3.57	3.41	2.44	2.31	1.44	1.35	0.72	0.67
Band1	3.13	3.08	1.88	1.85	0.95	0.91	0.48	0.43	0.25	0.20

表 2 无链表 SPIHT 算法与本文算法重建质量比较(单位为分贝)

Table 2 Reconstructed quality comparison between listless SPIHT and algorithm of the paper (unit: dB)

图像	码率为 1		码率为 0.5	
	无链表 SPIHT 算法	本文方法	无链表 SPIHT 算法	本文方法
Field	32.99	32.61	29.67	29.40
Gkraw	33.98	33.56	30.32	30.52
Bridge	29.64	29.38	25.94	25.72
Band1	32.64	32.42	30.45	30.28

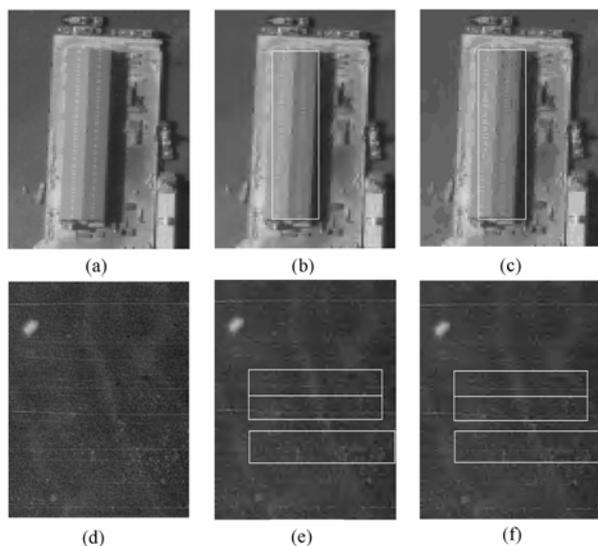


图 2 无链表 SPIHT 算法与本文算法重建图像比较

(a) 原始子图像 (b) 无链表 SPIHT 算法 (c) 本文算法  
(d) 原始子图像 (e) 无链表 SPIHT 算法 (f) 本文算法

Fig.2 Reconstructed quality comparison between listless SPIHT and algorithm of the paper (a) Original image (b) Result of listless SPIHT

(c) Result of algorithm of the paper  
(d)Original image (e) Result of listless SPIHT  
(f) Result of algorithm of the paper

## 5 结束语

根据遥感图像编码的特点, 提出了一种感兴趣系数编码算法, 该算法可以视为感兴趣区域编码的扩展, 但更为灵活、

有效, 避免了感兴趣区域编码算法的不足。为了确定感兴趣系数及其提升幅度, 根据小波域系数相关性较弱的特点, 提出了一种熵估计值的计算方法。根据这种简单算法可以快速估计给定码率下, 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, 讨论了一种感兴趣系数的确定方法, 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, 且不用提升所有子带的系数, 感兴趣系数的确定及系数提升幅度都是自动完成。最后以无链表 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, 而图像总体质量略有下降。

## 参考文献

- [1] 李云松, 吴成柯, 陈 军, *et al.*. 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.
- [2] Christopoulos C, Askelöf J, Larsson M. Efficient methods for encoding regions of interest in the upcoming JPEG2000 still image coding standard. *IEEE Signal Processing Letters*, 2000, 7(9): 247-249.
- [3] JPEG2000 Verification Model 8.0 (Technical description). Charilaos Christopoulos, 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. 西安电子科技大学学报, 2002, 29(3): 343-346.
- [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. 光学学报, 2004, 24(3): 299-303.
- [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. 系统工程与电子技术, 2003, 25(12): 1532-1535.
- [7] 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.

邓家先: 男, 1964年生, 博士, 教授, 研究方向为图像压缩、自适应信号处理。

康耀红: 男, 1963年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息检索、神经网络、图像压缩等。