

# 高分辨率遥感影像的实时压缩算法

李飞鹏<sup>1</sup> 杨志高<sup>1</sup> 秦前清<sup>1</sup> 李德仁<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 针对遥感影像的特点, 采用整数小波变换、最优比特平面编码和上下文相关熵编码, 实现高分辨率光学遥感影像的快速压缩。该算法支持多分辨率、多信噪比的嵌入式码流结构, 可实现从无损到有损任意码率或多种质量的图像编码。实验表明, 该算法简单高效, 可满足遥感影像远程传输中实时压缩的要求。

**关键词:** 实时压缩; 整数小波变换; 比特平面编码

**中图分类号:** TP751

高分辨率遥感影像的应用主要包括目视判读、地图制图、三维重建以及城市建设规划等方面。一般情况下, 重建影像的质量达到 40dB 以上时, 人眼很难分辨出图像的失真; 但是在进行图像比对的时候, 专业判读员常常借助一些图像处理工具将图像放得很大, 并对图像作增强处理。经过这些处理, 即便是微小的失真也很容易被发现。地图制图和三维重建则涉及影像的匹配和量测, 对重建影像的几何失真有较高的要求。有研究表明, 当影像压缩超过 10 倍时, 将对影像匹配的精度造成明显影响。归纳起来, 对高分辨率光学遥感影像质量的评判主要包含目视效果和几何失真两个方面, 这两方面都对影像的质量提出了苛刻的要求, 但是在数学上如何度量这些失真目前仍缺乏统一的标准。高分辨率光学遥感影像的压缩倍率不能太高, 必须视数据本身的统计特性和具体应用而定。

## 1 遥感影像的压缩算法

### 1.1 压缩原理

目前遥感影像的压缩算法, 包含去相关(相似)、量化和熵编码。首先将遥感影像当作确定性信号处理。确定性信号的相关性较强, 采用函数逼近等方法降低信号的相关性后, 变换系数可以看成随机信号, 再进一步采用统计学的方法来去除数据的冗余, 这是图像压缩的基本原理<sup>[1~4]</sup>。

本文叙述的压缩算法信号去相关采用了整数小波变换、率失真控制和量化集成与比特平面编码, 熵编码采用上下文相关算术编码, 支持多分辨率、多信噪比的嵌入式码流结构, 可实现从无损到有损任意码率或多种质量的图像压缩。

### 1.2 影像分块与拼接

遥感影像数据量大, 进行压缩时不可能一次将数据全部调入内存, 因此压缩之前先对大图像进行分块处理; 解压时再将单块图像拼接成大图像。分块图像的大小一般为 1 024 像素 $\times$ 1 204 像素。调入图像时, 为提高速度, 将处于同一行的多块图像(称为一条)一次调入内存, 将该条带数据分块, 调入压缩模块依次处理直到所有分块图像压缩完毕。

### 1.3 整数小波变换

小波变换是图像压缩的重要步骤, 其目的在于去除图像数据的空间相关。小波变换的本质是一系列构成正交基的尺度函数和小波函数对原始信号的逼近。Mallat 算法是最为常用的小波分解算法, 由于水平和垂直方向可分离, 该算法处理二维图像十分方便, 相当于分别对图像的行和列作一维小波变换。图 1 为小波分解的示意图。

二进小波变换<sup>[1]</sup>是将信号频谱按二倍频程分割, 形成多个高频数据带和一个低频数据带。对于二维图像信号来说,  $HH_j$ 、 $HL_j$  和  $LH_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$  为分解级数) 构成多分辨率的三个高频带系列, 低频带则是最后的  $LL$  频带。图像的每一级分解总是将上级低频数据划分为更精细的频带。

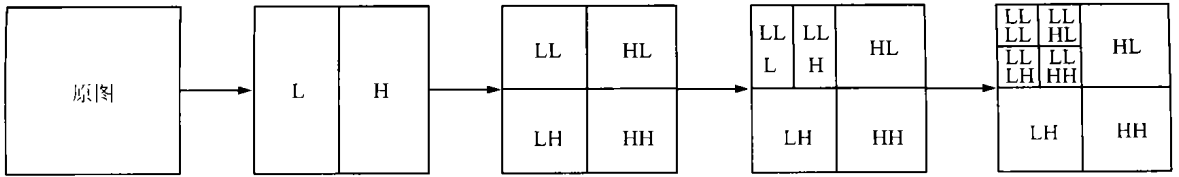


图1 图像小波分解示意图

Fig. 1 Image Decomposition with Wavelet Transformation

其中 $HL_j$ 频带是先将上级低频图像数据在水平方向低通滤波后(行方向),再经过垂直方向高通滤波(列方向)得到的,因此, $HL_j$ 频带中包含了更多垂直方向的高频信息。相应地,在 $LH_j$ 频带中则主要是原图像水平方向高频成分,而 $HH_j$ 频带是图像中对角方向高频信息的体现,尤其是以 $45^\circ$ 或 $135^\circ$ 方向的高频信息为主。

将整数映射成整数的可逆小波变换<sup>[5~7]</sup>在无损压缩中有重要的应用,计算过程用浮点数,但结果保证是整数,并且保留可逆性。把小波变换分解成所谓的提升步骤的第二代小波变换方法,能有效地将小波变换表达为整数到整数的可逆变换。

5/3小波分解正变换式为:

$$Y(2n+1) = X(2n+1) - \left\lfloor \frac{X(2n) + X(2n+2)}{2} \right\rfloor \quad (1)$$

$$Y(2n) = X(2n) + \left\lfloor \frac{Y(2n-1) + Y(2n+1) + 2}{4} \right\rfloor \quad (2)$$

式中, $X$ 为输入信号; $Y$ 为输出信号。小波逆变换的公式可以由上述公式方便推出。

### 1.4 最优比特分配

遥感影像压缩通常对压缩倍率有要求。图像经过几级小波分解后,形成多个子带。在总码率 $R_T$ 一定的情况下,怎样分配各子带的比特数 $R_i$ 是决定重建图像质量的关键。实际上,确定每个子带的量化步长 $q_i$ 也就确定了 $R_i$ 。采用均方差作为图像质量评判的准则,则上述优化问题可以用拉格朗日算子表示为:

$$J(\{q_i\}, \lambda) = \sum_i \Delta \sigma_{Q_i}^2(q_i) + \lambda (\sum_i a_i R_i(q_i) - R_T) \quad (3)$$

式中, $\sigma_{Q_i}^2(q_i)$ 和 $R_i(q_i)$ 分别是第 $i$ 子带的均方误差和比特率; $a_i = 1/2^{\lfloor i/3 \rfloor}$ 是第 $i$ 子带的加权系数; $\Delta$ 是可选的加权系数,可用于提升高频子带。统计小波系数的分布函数,求解上述方程,得到各小波子带的最优比特分配,然后各子带独立编码。

### 1.5 比特平面编码

小波系数在计算机中用二进制整数表示,如

图2所示。图2中, $S$ 为小波系数的符号位;0代表正数;1代表负数; $b_N - b_0$ 位表示小波系数的幅度。各小波系数的第 $p$ 比特位构成了一个位平面,称为第 $p$ 比特平面,小波系数的符号位构成的位平面称为符号平面。

比特平面编码<sup>[4,8]</sup>就是在给定的码率下对单个子带中所有比特的最优化选择。比特平面编码内包含了小波系数的量化过程。假设小波系数 $C_i$ 从最高位开始被编码到了第 $k$ 比特,第0到 $k-1$ 比特被舍弃,就相当于对小波系数 $C_i$ 进行了量化台阶为 $2^k$ 的量化。

		符号平面		第5比特平面						
		$S$	$b_N$	$b_5$	$b_4$	$b_3$	$b_2$	$b_1$	$b_0$	
小波系数	$C_0$	0	0	...	1	0	1	1	0	0
	$C_1$	0	1	...	0	1	1	0	1	0
	$C_2$	1	1	...	0	1	1	0	0	1
	$C_3$	0	0	...	1	0	0	0	1	1
	$C_4$	1	0	...	0	1	0	1	0	1

图2 小波系数的比特平面

Fig. 2 Bit Plane of Wavelet Coefficient

为使重建图像的误差最小,对小波系数按照从高平面到低平面的顺序进行扫描。任何时刻编码的比特总是当前的最重要,也就是说,在这个子带剩下的所有比特中丢掉该比特将对重建图像造成最大的损害。

### 1.6 算术编码

小波变换后影像的相关性被极大地降低,算术编码用于比特平面编码中每一比特的编码,其基本思想是用 $[0, 1]$ 上一个小的子区间来表示整个输入数据序列。

研究表明,小波变换后系数之间仍存在一定的相关,根据这一特点,采用上下文相关熵编码器比一般的熵编码器效果更好。MQ算法是专门用于二进制数据压缩的算术编码算法,该算法能够在编码过程中快速跟踪信源统计特性的变化,不用乘除等复杂运算,具有较快的编码速度和较高的压缩效率。图3为MQ算术编码器的框图。图3中, $I_C$ 是邻近像素的信息,用于对比特 $B$ 进行估计。编码器根据估计出的条件概率 $P(B | I_C)$ 对

比特  $B$  进行编码。



图 3 MQ 算术编码器框图

Fig. 3 Frame of MQ Arithmetic Coding

## 2 实验结果与对比

实验选取了 5 幅黑白影像(如图 4), 分别来自 SPOT5、IKONOS、TM、资源卫星和航片, 包含城市、草地等不同目标。每一幅影像选取 512 像

素  $\times$  512 像素大小的图像块。对比软件选用了 JPEG2000 国际标准的仿真系统 Kakadu, 该软件采用 EBCOT<sup>[8]</sup> 算法, 是目前国际上水平最高的图像压缩软件。由于遥感影像压缩的研究目前刚刚起步, 可供选用的软件只有 Erdas 公司的 M\$ID 和 ERMap 公司的 ECW2.3 等为数不多的几种。为方便速度对比, 本文选用了相对较近推出的 ECW2.3, 该软件也采用了小波变换。

### 1) 压缩质量

选择多个倍率压缩图像块, 计算重建图像峰值信噪比 PSNR, 并与 Kakadu 的整数小波压缩对比。实验结果如表 1、表 2 所示, 有损压缩率失真曲线如图 4 所示。图中, CR 为压缩比。

表 1 无损压缩倍率对比

Tab. 1 Lossless Compression Contrast Between IZP

	SPOT5	IKONOS	TM	资源卫星	航片
IZP	1.874 7	1.395 1	1.840 2	2.418 5	2.024 6
KDU	1.872 751	1.382 653	1.842 231	2.434 178	2.016 787

表 2 有损压缩峰值信噪比/dB

Tab. 2 PSNR of Loss Compression/dB

CR	TM		SPOT5		资源卫星		IKONOS		航片	
	IZP	KDU	IZP	KDU	IZP	KDU	IZP	KDU	IZP	KDU
2	54.68	53.02	57.18	56.49	+Inf	+Inf	45.24	45.12	+Inf	+Inf
3	46.22	45.7	46.26	46.08	52.9	50.72	38.86	38.77	47.74	48.02
4	43.73	43.64	43.11	43.25	48.03	48.29	35.79	35.72	45.54	44.97
6	40.38	40.52	38.98	39.03	45.87	45.43	32.62	32.52	42.62	42.26
8	38.54	38.86	36.64	36.64	44.75	44.44	30.82	31.1	40.59	40.5
10	37.46	37.43	35.07	35.18	43.26	42.67	29.23	29.24	38.2	37.88
12	36.39	36.48	33.82	33.96	42.68	42.67	29.23	29.24	38.2	37.88
16	35.01	35.09	32.29	32.23	41.74	41.78	28.4	28.4	36.61	36.57
20	33.85	34.07	31.12	31.15	40.73	40.85	27.34	27.65	35.31	35.28

注: IZP 代表 ImagZip; KDU 代表 Kakadu。

### 2) 压缩速度

压缩速度对比如图 5 所示, 图像大小为 314MB(RGB); 测试平台为 P IV 1.7G、256MB 内存, Win2K。

### 3) 结果分析

从以上可以看出, IZP 与 KDU 的无损和有损压缩性能均十分接近。作为通用图像压缩的国际标准, KDU 在中低码率压缩上表现出较优的性能; 而 IZP 则在适合于遥感图像压缩的高码率压缩上表现出一定的优势。这种性能的差异主要是由于应用的目标不同, 所取得码率分配的权值也不相同。4 倍压缩时重建误差基本上为均匀分布的随机误差; 8 倍压缩时重建误差中出现少量轮廓; 倍率更高时误差进一步增大, 对遥感影像的目视判读、定位、量测等应用产生明显影响。另一方面, 由于采用了第二代整数小波变换, 本算法的压

缩速度比采用浮点小波压缩算法的速度有很大提高, 在相同测试条件下, IZP 的速度约为比较软件的 1.5 倍。

## 3 结 论

高分辨率光学遥感影像的压缩具有很好的应用前景, 在找到合适的图像质量评价准则之前, 影像压缩的倍率不宜太高(不超过 8)。本文介绍的基于整数小波变换的高分辨率光学遥感影像压缩算法, 可以实现遥感影像从无损到有损任意码率的快速压缩。同 JPEG2000 算法相比, 该算法运算简单而重建图像质量相当。以该算法为基础设计的遥感影像压缩软件和国际同类软件相比, 前者速度更快, 能够在 30s 内完成 100MB 遥感影像的高保真压缩或解压, 可用于高分辨率遥感影像

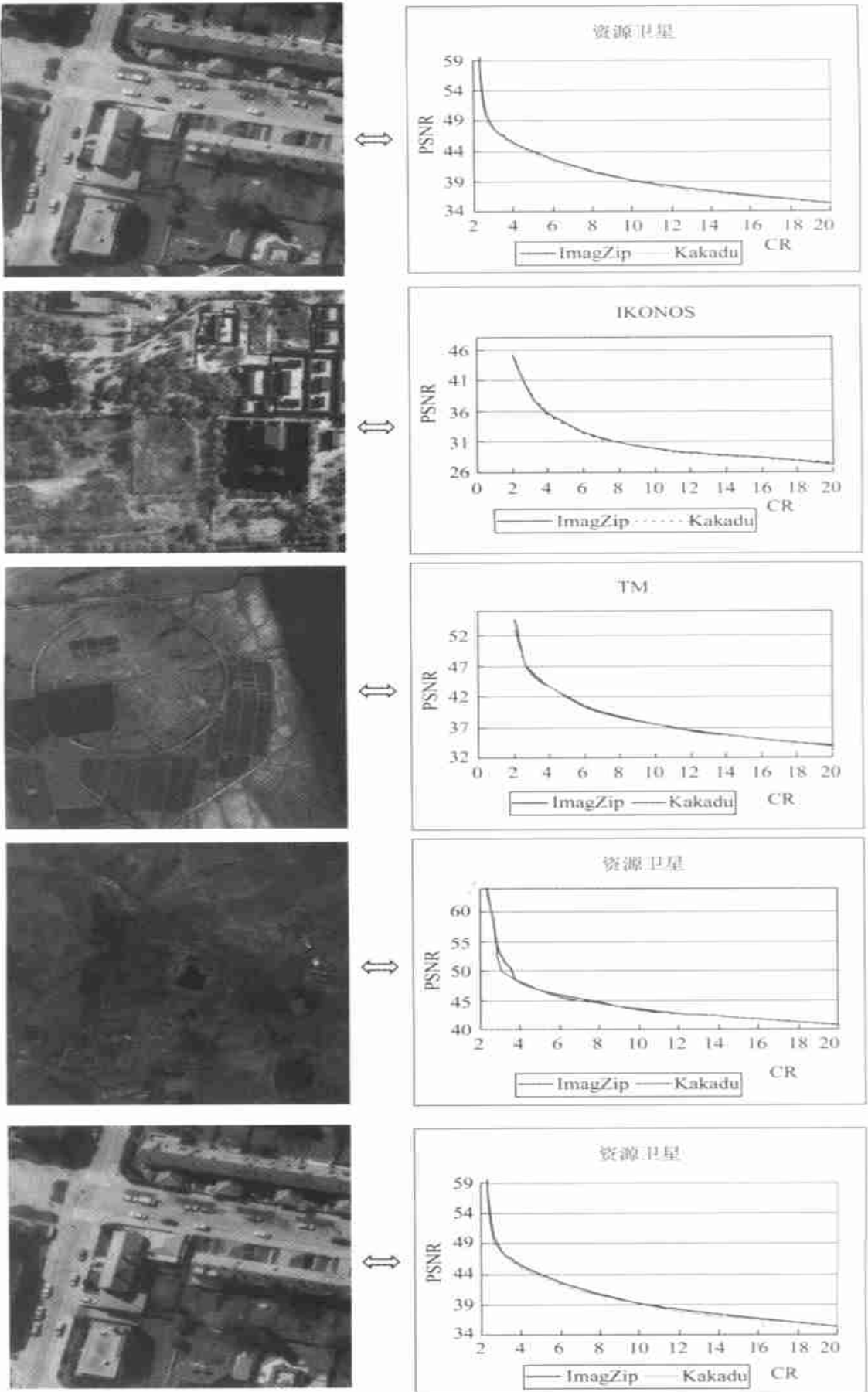


图 4 原始图像及其有损压缩率失真曲线

Fig. 4 Original Image and Its Ratio Distortion Curve of Loss Compression

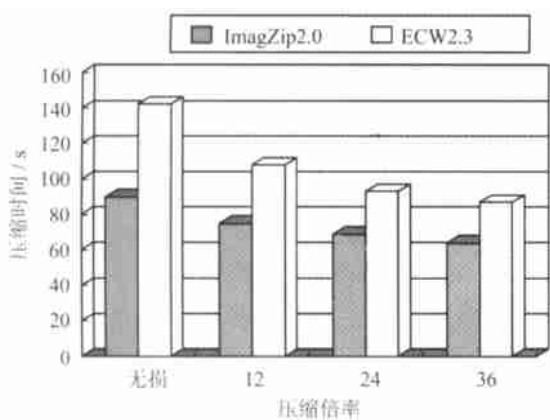


图 5 压缩速度对比

Fig. 5 Contrast of Compression Speed

远程传输的实时压缩和解压。

### 参 考 文 献

- 1 Antonini M, Barlaud M, Mathieu P. Image Coding Using the Wavelet Transform. IEEE Trans. Image Processing, 1992 (1)
- 2 JPEG 2000 Part I: Final Draft International Standard (ISO/IEC FDIS 15444-1). ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1855, 2000
- 3 Marcellin M W, Gomish M, Bilgin A, et al. An Overview of JPEG 2000. IEEE Data Compression Conf., Snowbird, UT, 2000
- 4 Said W A, Pearlman. An Image Multiresolution Representation for Lossless and Lossy Compression. IEEE Trans. Image Processing, 1996(5): 1 303 ~ 1 310
- 5 Adams M, Kossentini F. Reversible Integer-to-Integer Wavelet Transforms for Image Compression: Performance Evaluation and Analysis. IEEE Trans. Image Processing, 2000(9): 1 010 ~ 1 024
- 6 Calderbank A R, Daubechies I, Sweldens W, et al. Lossless Image Compression Using Integer-to-Integer Wavelet Transforms. IEEE Int. Conf. Image Processing, Santa Barbara, 1997
- 7 Sweldens Q. The Lifting Scheme: Construction of Second Generation Wavelets. SIAM J. Math. Anal., 1997, 29(2): 511 ~ 546
- 8 Taubman D. High Performance Scalable Image Compression with EBCOT. IEEE Trans. Image Processing, 2000 (9): 1 158 ~ 1 170
- 9 Chrysafis C, Ortega A. Line-based, Reduced Memory, Wavelet Image Compression. IEEE Trans. Image Processing, 2000(9): 378 ~ 389
- 10 Shapiro J M. Embedded Imaging Coding Using Zerotrees of Wavelet Coefficients. IEEE Trans. Signal Processing, 1993 (41): 3 445 ~ 3 462

第一作者简介: 李飞鹏, 讲师, 博士生。现主要从事海量数据压缩研究。

E-mail: fpli75@yahoo.com

## Real-Time Compression of High-Resolution Remote Sensing Image

LI Feipeng<sup>1</sup> YANG Zhigao<sup>1</sup> QIN Qianqing<sup>1</sup> LI Deren<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** A reversible compression scheme for high-resolution remote sensing image is introduced. The method involves four steps. First, the whole image is divided into small blocks. Second, an integer wavelet transform is used to obtain a set of biorthogonal subclasses of images, and the image block is decomposed into a six-level pyramidal representation with Mallat algorithm. Third, an optimal bit-allocation process is applied to computer the appropriate bit-rate for each subband. Finally, the wavelet subbands are encoded with a Bit-Plane Coding. It can be used to compress image at arbitrary bit rate. In the experiment, the authors select one aerial photo and four satellite images, from SPOT5, IKONOS, Landsat, China Earth Resource satellites, respectively, to test the performance of the algorithm. The experiment shows that the algorithm is as efficient as JPEG 2000, despite its simplicity.

**Key words:** real-time compress; integer wavelet transform; bit-plane coding

**About the first author:** LI Feipeng, Ph. D candidate, majors in massive data compress.

E-mail: fpli75@yahoo.com

(责任编辑: 涓涓)