

一种有效的遥感图像无损压缩算法的实现

The Implement of A Effective Lossless Compression Algorithm for Remote Sensing Images

薄秋慧 龚育昌 岳丽华 冯朝阳 (中国科学技术大学计算机科学系 230027)

摘要:出于应用要求,常要对遥感图像进行无损压缩存储,但是由于遥感图像自身的特点,其能够达到的无损压缩效率一直较低。本文结合近 20 年发展起来的技术和算法——IWT、SPIHT,并针对 SPIHT 用于无损压缩不够理想的状况,提出了 SPIHT-INT-RSI 算法用于遥感图像无损压缩中。实验结果表明通过 SPIHT-INT-RSI 算法获得的无损压缩比高于通过 SPIHT、EBCOT 算法获得的无损压缩比,接近或超过 LOCO-I 算法获得的无损压缩比,并且保留了内嵌式编码和支持图像渐进传输的特点。

关键词:整数小波变换 SPIHT 无损压缩

1 引言

遥感是 20 世纪 60 年代兴起并迅速发展起来的一门综合性探测技术,它在城市规划、环境保护、地质勘探、农业和林业以及军事等领域得到了广泛的应用。随着传感器技术的发展,由其获得的遥感数据的空间和时间分辨率不断提高,图像尺寸可达 30000×30000 像素,相应的遥感数据量也就急剧增加,例如 Land Sat V 卫星携带的 TM 传感器获取的一景多谱图像的原始数据量超过 200M 字节,而文献[11]中提到,采用焦平面技术和推扫技术将使遥感器的数据量达到 4.28Gbps,这就给存储和传输带来了很大的压力,所以必须对遥感图像进行压缩。而由于遥感图像的自身特点和应用要求,常要求对遥感图像的压缩是无损的,以便在应用中能无失真的重构原图像。

遥感图像的特点是它的覆盖面积大,一幅图像往往覆盖地面几十平方公里,图像像素间的冗余很小。根据香农的信息论,对图像进行无损压缩得到的压缩比理论上是以图像的一阶熵为界限。遥感图像的一阶熵一般较高,因此不易取得显著的压缩效果。分析国内外研究人员的成果,对遥感图像进行无损压缩通常分为三个步骤:

- (1) 去相关;
- (2) 量化;
- (3) 对量化后的图像矩阵进行熵编码。近些年来

发展起来的小波变换用于图像去相关上有着不错的性能,而且又发展了整数小波变换(IWT),不需量化,直接可以用于图像的无损压缩中。1996 年, Said 和 Pearlman 在 EZW(Embedded zerotree wavelet)的基础上提出了层树集合分割的图像编码算法 SPIHT(Set Partition in Hierarchical Trees)。该算法采用基于空间方向树的集合分割策略代替 EZW 算法中的零树策略,使得集合的表示更为精简,从而提高了编码效率。SPIHT 应用于有损压缩中效果很好,但是用于图像无损压缩时,性能下降很快。本文就针对此不足,提出了一种结合 SPIHT 算法,并且能更有效地压缩小波变换后小幅值系数和重要系数低端数据位(文献[12]称为残差数据)的编码方法对遥感图像进行无损压缩,实验结果表明取得了较好的效果。

本文结构如下:在第二部分回顾 SPIHT 算法,同时介绍了一种用于整数的编码方法;第三部分在分析 SPIHT 算法的基础上提出上面两种方法的结合,本文称之为 SPIHT-INT-RSI(Set Partition in Hierarchical Trees and Integer coding for Remote Sensing Image)算法,把它用于遥感图像无损压缩中;第四部分给出了实验结果和结论。

2 SPIHT 算法回顾和整数编码方法

2.1 SPIHT 算法回顾

SPIHT 是 EZW 算法的改进。这种算法是对图像

小波分解后各子带系数所呈现出来的树状层级分解结构、尺度间明显的相似性而设计的。其基本思想是:把小波变换后的系数按照其幅度值由大到小排序,用位平面来表示排序后各系数的大小。这种算法的好处就是利用了小波多分辨率的固有特性,将编码的单位缩小到比特,和现有的其他编码方法相比,不但具有内嵌编码的特征,能够终止在需要的码率或图像质量处,也可实现渐进的图像传输,而且在性能上有很高的信噪比和极快的编解码速度。现简单回顾一下 SPIHT 算法(参数具体定义参看文献[2]):

(1) 初始化:输出 $n = \lceil \log_2(\max |C_{i,j}|) \rceil$, 将 LSP 设为空表,将 $(i,j) \in H$ 加入 LIP,只将有子孙的 $(i,j) \in H$ 作为 A 类型加入 LIS 中。

(2) 排序过程:

2.1 对集合 LIP 中的每个 (i,j) 做

2.1.1 计算 $S_n(i,j)$ 并输出 S_n ;

2.1.2 如果 $S_n=1$,将 (i,j) 移到 LSP 中,输出 $C_{i,j}$ 的符号位;

2.2 对集合 LIS 中的每个 (i,j) 做

2.2.1 如果是 A 类型的,则

(1) 计算 $S_n(D(i,j))$ 并输出;

(2) 如果 $S_n(D(i,j))=1$ 则

- 对每个 $(k,l) \in O(i,j)$,同时做;

- 计算 $S_n(k,l)$,输出相应的 S_n ;

- 如果 $S_n=1$,则将 (k,l) 加入 LSP 的末尾;并输出 $C_{k,l}$ 的符号位到相应的码流中;

- 如果 $S_n=0$,则将 (k,l) 加入 LIP 末尾;

- 如果 $L(i,j)$ 不是空集,则将 (i,j) 作为类型 B 的集合移到 LIS 的末尾并转到 b. 2.2 执行,否则将 (i,j) 从 LIS 中清除。

2.2.2 如果集合 (i,j) 是 B 类型的,则

(1) 计算 $S_n(L(i,j))$,输出相应的 S_n

(2) 如果 $S_n=1$ 则

- 将每个 $(k,l) \in O(i,j)$ 作为 A 类型加进 LIS 的末尾;

- 将 (i,j) 从 LIS 中删除。

(3) 精练过程:将 LSP 中的每个 (i,j) 输出 $|C_{i,j}|$ 的第 n 个最有意义的位到相应的码流中。

(4) 量化步长更新: $n=n-1$ 转到第 2 步执行。若 $n=0$,算法执行完毕。

对图像经 SPIHT 算法得到的二进制位流进行算术编码即得到图像压缩数据。SPIHT 解码方法跟编码方法的步骤一样,不同点只是把编码时的输出改为输入即可。

2.3 整数编码方法

借鉴 JPEG 标准中表示整数的方法,可以把一个整数分成三部分:幅值集合序号、符号位和幅值差,如表 1 所示。其中幅值集合序号是表示不同整数区间的序号,幅值差则是属于该区间的整数与该区间最小绝对值整数的差值。例如 -12 可以表示为 (7, -, 0), 5 可以表示为 (4, +, 1)。

表 1 整数表示方法

幅值集合序号	幅值间隔	表示符号位数	表示幅值差需要位数
0	[0]	0	0
1	[-1],[1]	1	0
2	[-2],[2]	1	0
3	[-3],[3]	1	0
4	[-5,-4],[4,5]	1	1
5	[-7,-6],[6,7]	1	1
6	[-11,-8],[8,11]	1	2
7	[-15,-12],[12,15]	1	2

那么,对于绝对值小于 16 的一个整数最多需要 6 位表示,最少需要 3 位表示。如果用“1”代表负,“0”代表正,则编码 -12 可以写成二进制串 11111100, 5 可以写成 10010101, 0 则为 000。把这些二进制流送入算术编码器,就得到了压缩码流。同时解码端根据幅值集合序号可以判断后续位数,进而恢复出原码。这种方法很适合带符号的较小的整数进行分解后送入算术编码器进行压缩,尤其是对幅值集合序号进行更好地处理后,能得到较好的压缩效率。

3 用于遥感图像无损压缩的 SPIHT-INT-RMI 算法

分析 SPIHT 算法可以看出,它利用了图像经过小波变换后,不同分辨率上的小波系数具有空间结构上的相似性。SPIHT 用于无损压缩时,首先输出的是最重要小波系数的高端位平面,其次输出的是最重要小波

系数的次高端位平面和次重要小波系数的高端位平面,以次类推,直到按重要性大小输出所有的小波系数的位平面。由于图像矩阵进行整数小波变换后,小波系数幅值较多集中在数值 0 附近,即小幅值系数较多。而 SPIHT 对重要系数(大幅值系数)的输出非常有效,但是对小系数的输出效率很差[4]。同时, SPIHT 虽然能编码到图像小波系数的位平面,但它是以增加重要系数位置信息为代价的,越往非重要系数方向编码,重要系数位置信息增加越快,这表明空间相关性也越差,空间方向树结构用于小幅值系数编码不够有效。这样 SPIHT 用于有损压缩效果不错,而用于无损压缩则性能下降非常快。如果利用 SPIHT 输出重要小波系数的高端位平面,而把重要小波系数的低端数据和非重要小波系数这部分残差数据采用更适合小整数值的编码方法编码,会进一步减少编码输出。

当 SPIHT 输出 $n \geq 4$ 的重要系数位平面后,残差数据的绝对值大小为 $[0, 15]$ 之间。用 2.2 节提到的整数编码方案,可以进一步增加残差数据冗余度。如表 1 所示,残差数据的幅值集合序号 ≤ 7 ,把相邻的两个残差数据的幅值集合序号合并,形成两位十进制的整数,而不是 BCD 码。这样,如果残差数据为 512×512 的矩阵,则它的幅值序号表示最多需要 512×256 字节。之所以用两位十进制数值表示幅值序号集合而不用 BCD 码表示,是因为十进制的表示范围更小,在区间 $[0, 77]$ 之间,而用 BCD 码表示范围则在 $[0, 119]$ 。把它们送入算术编码器,可以得到更好的压缩结果。对于符号位和幅值差值,则按二进制位流输出。

SPIHT-INT-RSI 算法遇到的另一个问题是: SPIHT 支持嵌入式编码和以渐进分辨率方式传输图像,因此算法可以采用同 SPIHT 一样的子带扫描顺序输出残差数据。由于 SPIHT 算法运行过程中记录了重要小波系数集 LSP,对残差数据编码时可以对进入 LSP 中的系数不再输出其符号位,只输出没有进入 LSP 的小波系数符号位。SPIHT-INT-RSI 算法编码过程具体描述如下:

(1) 对图像矩阵进行 5 级整数 $5/3$ 小波变换,得到小波变换矩阵 *waveletmatrix*;

(2) 对小波变换矩阵 *waveletmatrix* 运行 SPIHT 算法,选择 $n \geq 4$ 。对 SPIHT 输出的重要系数、重要系数的符号位和重要系数的高端位平面信息进行算术编码。同时获得残差小波系数矩阵 *residualwaveletmatrix*。

(3) 对于残差小波系数矩阵 *residualwaveletmatrix* 按照图 1 所示的扫描方式用 2.2 节介绍的方法进行编码,对已进入 LSP 中的系数不再输出符号位,并把得到的码流进行算术编码。

(4) 合并(2)和(3)中的结果,增加必要的控制信息,得到图像的压缩码流。

根据以上的编码算法,不难得到解码算法。

4 仿真实验和结果

图 1、图 2、图 3 是用于实验的遥感图像,分别是哥本哈根地区、华盛顿地区和北京地区的遥感图像,大小都为 $512 \times 512 \times 8$ 。运行 SPIHT-INT-RSI 算法后的压缩结果显示在表 1 中。表 1 中还标明了用 EBCOT、

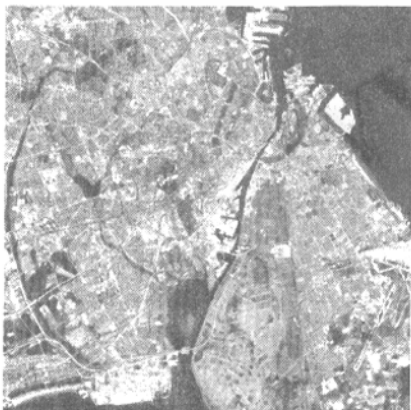


图 1 哥本哈根遥感图像



图 2 华盛顿遥感图像

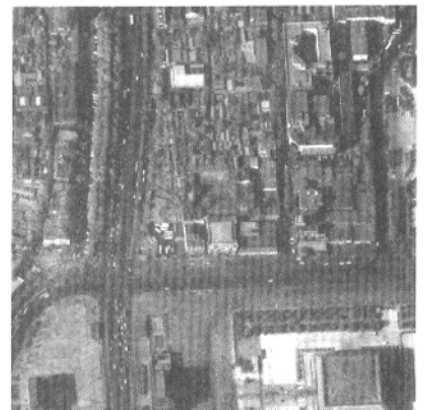


图 3 北京遥感图像

SPIHT、LOCO-I 算法对图像进行无损压缩后获得的压缩比,单位均为 B/Pixel。其中 EBCOT 和 LOCO-I 是利用了互联网上它们的作者提供的程序,可以下载。实验结果在表 2 中。

表 2 测试图像的无损压缩比(单位:bits/pixel)

测试图名称	EBCOT ^[9] 无损	SPIHT 无损	LOCO-I ^[8] 无损	SPIHT-INT -RSI
Washington	7.122	7.149	6.935	6.470
Copenhagen	6.808	6.847	6.451	6.314
Beijing	6.003	6.001	5.812	5.840

从表 2 中可以看出,SPIHT-INT-RSI 算法获得的结果明显好于 SPIHT 算法和 EBCOT 算法,与 LOCO-I 算法接近,有些还略好。在实验中还发现,一阶熵越高的图像所获得的压缩性能较其他算法提高的越快。实验结果再次表明了如果能够更合理地编码残差数据,可以获得更高的压缩比。

到目前为止,没有绝对好的图像压缩方法,不同的方法适合于不同的图像。JPEG-2000 标准具有非常丰富的功能,但是它的核心算法 EBCOT 的无损压缩性能不如 LOCO-I,而 LOCO-I 又不支持图像渐进传输和内嵌式编码。本文提出的 SPIHT-INT-RSI 算法兼顾了 SPIHT 的优势,更加合理地编码了残差数据,取得了较好的压缩性能,同时该算法也能应用到有损压缩中。

参考文献

- 1 J. m. Shapiro. Embedded image coding using zero trees of wavelet coefficients [J]. IEEE Trans. SP, 12 1993. 41:3445-3462.
- 2 A. Said and W. A. Pearlman. A new fast and efficient image code based on set partitioning in hierarchical tree [J]. IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, 11 1996, 6:243-250.
- 3 Yangxiaofan, Huangxiangsheng, Hezhongshi. ASur-

vey of Image Compression Techniques Based on Discrete Wavelet Transform. Computer Science, 2002, 29. [杨小帆、黄向生、何中市等,离散小波变换图象技术综述 [J],计算机科学,2002, 29]。

- 4 Amir Said, William A. Pearlman. An Image Multiresolution Representation for Lossless and Lossy Compression [J]. IEEE, Trans. Image Processing, 9 1996, 5.
- 5 Dongshidu, Yangxiaofan, Liuguojin. A Context Model of Wavelet Coefficients for Image Compression. Journal of Chongqing University. 4 2003, 26(4). [董世都、杨小帆、刘国金,用于图像压缩的小波系数的上下文模型 [J],重庆大学学报,4 2003, 26(4)]。
- 6 Marcelo J. Weinberger, Gadiel Seroussi, Guillermo Sapiro. The LOCO-I Lossless Image Compression Algorithm: Principles and Standardization into JPEG-LS [J]. IEEE Trans Commun, 1997, 45(4):437-444.
- 7 ISO/IEC FCD15444-1, JPEG 2000 Part I Final Committee Draft Version 1.0 [S].
- 8 Ismaeil R. Ismaeil. LOCO-I (JPEG-LS) 演示程序 (ver1.1) [EB/OL]. <http://www.hpl.hp.com/loco>, 8 1997. University of British Columbia.
- 9 JasPer Software. EBCOT (JPEG 2000) 演示程序 (ver 1.700.0) [EB/OL]. <http://www.ece.uvic.ca/~mdadams>, 9 2003.
- 10 吴乐南等译,数据压缩原理与应用(第二版),北京电子工业出版社,2003。
- 11 Giacinto Gelli, Giovanni Poggi, Compression of Multispectral Images by Spectral Classification and Transform Coding. IEEE TRANS, IMAGE PROCESSING, vol. 8, No. 4, 1999.
- 12 A. Abu-Hajar, R. Sankar, Wavelet Based Lossless Image Compression Using Partial SPIHT and Bit Plane Based Arithmetic Coder. ICASSP 2002, Vol. 4, 3497-3500, Orlando, Florida, 2002.