

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

一种适合星上应用的遥感图像有损压缩算法

田宝凤^{1,2}, 徐抒岩¹, 孙荣春^{1,2}, 王 昕^{1,2}, 闫得杰¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种高质量的遥感图像有损压缩算法,在分析了遥感图像经 Daubechies 双正交小波基 D5/3 整数小波变换后各子带小波系数统计特性和能量分布的基础上,引入了人类视觉特性,用它来控制算法中的量化方案。根据能量的大小确定不同子带对于目标识别的重要程度,选择不同的量化阈值和量化步长进行量化,并对量化后的数据采用固定比特平面编码。仿真实验表明,该算法对于不同内容和纹理的图像,在一定的压缩比下,均获得了 PSNR(峰值信噪比) $> 30\text{dB}$ 的恢复图像,在不损失最低频信息的同时较好地保持了遥感图像中丰富的高频信息,实现了高质量的图像压缩,并且算法简便,快捷,所占用的存储容量小,易于硬件实现,适合于星上应用,减少了在遥感图像压缩中小目标的丢失。

关键词:有损压缩;遥感图像;人类视觉;整数小波变换

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A

A lossy compression algorithm of remote sensing image suited to space-borne application

TIAN Bao-feng^{1,2}, XU Shu-yan¹, SUN Rong-chun^{1,2}, WANG Xin^{1,2}, YAN De-jie¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A high quality lossy compression algorithm of remote sensing image was presented. Firstly, the remote sensing image is decomposed by D5/3 integer wavelet transform. Then on the basis of analyzing statistical characteristic and energy distribution of wavelet coefficients in each sub-band, the human vision properties is introduced to control the quantification scheme of the algorithm. The important degree for target recognition is determined according to energy in each sub-band, and the different quantification threshold values and the quantification steps are chosen in the quantification. Finally, quantified data are coded in fixed bit-plane. The simulation experiment shows that this algorithm acquires the restoration images of PSNR(Peak Signal Noise Ratio) $> 30\text{ dB}$ for all images of different contents and texture with certain CR, which keeps much high frequency information of the remote sensing image to realize the high quality image compression. Because of its simplicity, fastness, and small storage, the algorithm is easy to be realized in hardware and suitable for space-borne application.

Key words: lossy compression; remote sensing image; human vision; integer wavelet transform

1 引言

随着光学和卫星遥感技术的发展,成像设备的分辨率越来越高,从而导致空间遥感图像的数据量呈几何级数增加,致使对数据传输码速率的需求增加至每秒几百甚至几千兆比特。而目前最高的数据传输速率才有 300~600 Mbps,为了解决数据率和信道带宽之间的矛盾,必须在星上对海量的遥感数据进行压缩才能适应图像传输和存储的需求^[1]。目前,图像数据压缩方法主要分为两类:无损压缩和有损压缩。无损压缩利用数据的统计冗余进行压缩,可完全恢复原始数据而不引入任何失真,但无损压缩受遥感图像本身信息熵的制约,压缩比受限,通常为 1~2 左右^[2]。由于压缩比的限制,仅使用无损压缩方法已经不能解决海量遥感图像的存储和传输问题。有损压缩方法利用了人类视觉对图像中的某些频率成分不敏感的特性,允许压缩过程中损失一定的信息;虽然不能完全恢复原始数据,但是采用适当的方法可以使所损失的部分对理解原始图像的影响较小,进而得到较大的压缩比。

遥感图像的特点是所含信息量大,局部相关性较弱,纹理复杂丰富,高频能量较大,图像的熵值大,不利于压缩^[3];然而,为了适应星上压缩,算法要求必须简便,快捷,所占用的存储容量小,易于硬件实现^[4]。针对上述要求,本文在分析了遥感图像经整数小波变换后各子带小波系数统计特性以及各子带对目标识别的重要程度的基础上,提出了一种适合星上应用的遥感图像有损压缩算法,使之在较大的压缩比下,获得高质量的恢复图像。

2 整数小波变换

2.1 整数小波变换的实现

整数小波变换(又称为第二代小波变换),是在提升格式小波变换的基础上建立的^[5],它继承了第一代小波的多分辨率特性,变换后的系数是整数,能够实现图像的整数到整数的变换,并且整数小波变换避免了第一代小波变换借助快速傅里叶变换完成卷积操作的步骤,仅含有移位运算和加减运算,从而大大减少了运算复杂度。整数小

波变换是通过对每个提升环节中浮点数和整数的乘积进行取整操作来实现的,取整操作相当于对原来的算子系数作了很小的改动,但小波分解的特性仍然没有改变^[6]。下面对小波提升算法的基本原理和特点进行简要介绍。

小波提升算法一般包括三个步骤:分裂、预测和更新,如下面框图所示。

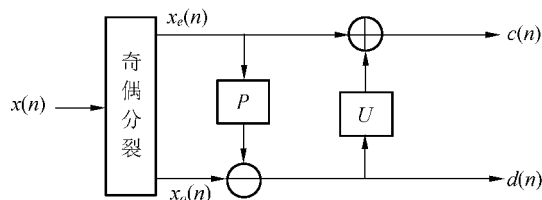


图 1 小波提升变换框图

Fig. 1 Block diagram of lifting scheme of wavelet transform

(1)分裂:把原数据 $x(n)$ 分裂成两个互不交叉的子集,且两者的相关性越强越好,一般都是将其分裂成奇数序列和偶数序列两部分:

$$x_e(n) = x(2n); x_o(n) = x(2n+1)$$

(2)预测:利用 $x_e(n)$ 预测 $x_o(n)$,可以得到预测误差 $d(n)$ 。在提升格式的理论中, P 表示预测算子, $d(n)$ 表示高频信息对应的小波系数。

$$d(n) = x_o(n) - P[x_e(n)]$$

(3)更新:利用 $d(n)$ 更新 $x_e(n)$,得到原始数据的一个近似 $c(n)$ 。其中, U 表示更新算子, $c(n)$ 表示低频信息对应的小波系数。

$$c(n) = x_e(n) - U[d(n)]$$

由上述过程可见:基于提升格式的小波变换主要是通过预测环节和更新环节来实现信号高低频的分离。并且基于提升格式的小波变换除了具有第一代小波变换多分辨率的特性和不依赖傅里叶变换的特点外,还具有原位计算的特点,即:在进行小波变换时,计算某个偶数位置的系数时,只依赖于若干相邻奇数位置的数据和该位置的原有数据,而不使用与之相邻的偶数位置的数据,因此所得结果可以直接覆盖原有数据而不影响后面的计算。原位计算的这一特点,大大减小了所占用的存储空间,不需要其他的辅助空间。

2.2 遥感图像各子带小波变换系数的统计特性

目前,在遥感图像压缩中通常选择两种小波基,即 Daubechies 双正交小波基 D9/7 和 D5/3,

考虑到实时性要求,本文采用 D5/3 小波基。对遥感图像进行压缩一般都采用 3~6 级小波分解,考虑到计算复杂度,本文选用 3 级小波分解,共有 10 个子带,其三级小波分解塔式结构图如图 2 所示。图中,LL3 代表最低频信息,是对原图像的逼近;HL_j 包含了更多垂直方向的高频信息;LH_j 包含了更多水平方向的高频信息;HH_j 代表的是对角方向高频信息。

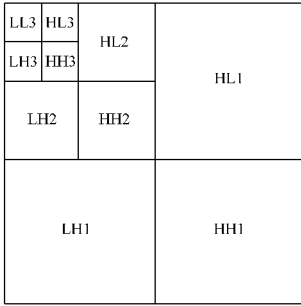


图 2 图像三级小波分解示意图

Fig. 2 Scheme of image three-level wavelet decomposition

影响压缩性能的决定性因素就是量化方案的选择,它决定了重构图像的质量。选取最佳量化方案的前提是了解各子带小波变换系数的统计特性,下面给出一幅遥感图像[上海浦东(截取 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 大小)]经三级小波分解后各子带系数分布的直方图。

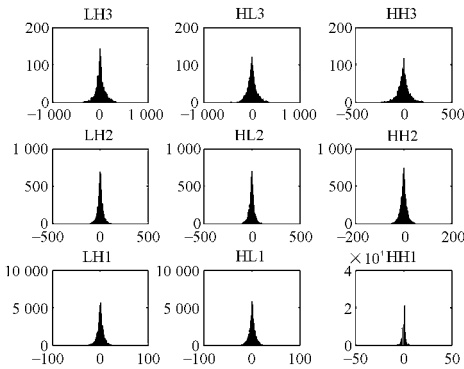


图 3 9 个高频子带直方图

Fig. 3 Histogram of nine high-frequency sub-bands

从上面直方图分布可以看出:9 个高频小波子带系数分布近似服从拉普拉斯分布,并且频带越高,小波系数值越小,其系数分布更集中。而最低频子带 LL3 和原始图像的直方图非常相似,它集中了大部分的能量。

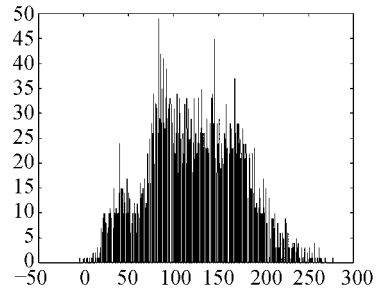


图 4 最低频 LL3 子带直方图

Fig. 4 Histogram of the lowest-frequency LL3-sub-band

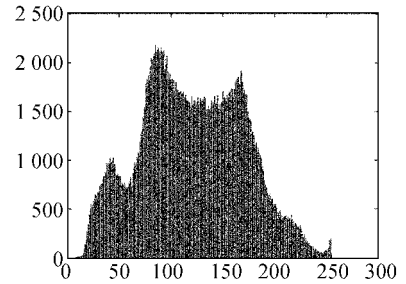


图 5 原始图像直方图

Fig. 5 Histogram of original image

2.3 各子带重要程度的确定

为了判断各子带对重构图像质量影响的重要程度,下面首先给出各子带能量分布表。

表 1 各子带能量分布

Tab. 1 Energy distribution of each sub-band

子带类型	能量($\times 10^6$)	能量分布(%)
LL3	4679.6	96.98
LH3	39.8070	0.83
HL3	41.3275	0.86
HH3	14.4298	0.29
LH2	18.2290	0.38
HL2	18.3053	0.38
HH2	4.2214	0.09
LH1	4.3807	0.09
HL1	4.2320	0.09
HH1	0.3178	0.01

从表 1 可以看出:最低频子带 LL3 聚集了 96.98% 的能量,这说明使用 D5/3 小波基经过三级整数小波变换后具有很好的能量聚集性;其它 9 个高频子带,在同一子带内,水平和垂直方向高频信息的能量均大于对角方向的能量;不同子带

内,从粗尺度到细尺度相同方向上的能量逐渐衰减。根据其能量分布情况,可以大致了解各个子带的重要程度,为了充分验证各子带对重构图像质量影响的重要程度,下面再通过分别去除各个高频子带,用其它子带来重构图像,比较 PSNR 的方法进行验证。

表 2 各子带对重构图像质量的影响

Tab. 2 Influence of each sub-band on reconstructed image quality

去掉的子带类型	PSNR(dB)
HH1	43.1844
HL1	34.8092
LH1	34.7094
HH2	36.3472
HL2	31.2154
LH2	31.1094
HH3	33.0652
HL3	28.7852
LH3	28.7753

从表 2 就可以明确得出:在同一子带内,对角子带比水平和垂直子带对重构图像质量的影响小;不同子带内,随着分解尺度的增加,相应方向上的子带对重构图像质量的影响越来越大;根据这一结论即明确各子带对重构图像质量影响的重要程度。

3 量化编码方案的确定

3.1 人类视觉特性

图像压缩编码之所以能够实现,是因为图像中包含很多冗余信息,主要有:空间冗余、统计冗余、结构冗余和视觉冗余等等。视觉冗余主要表现为对于视觉系统来说图像中人眼无法感知的或不易感知的信息。人类视觉具有如下特性:人眼对不同频率信息的敏感度不同,对于低频信息的敏感程度高于高频信息的敏感度,并且,人眼对水平和垂直方向比对角方向敏感^[7]。

3.2 算法量化编码方案的实现

根据小波分解后各子带系数统计特性和其对重构图像质量影响的重要程度来确定量化编码方案。对于不同的子带,选择不同的量化阈值和量化步长进行量化,这里量化步长的确定依据人类视觉特性,对重要的子带进行精细量化,因而选择

较小的量化步长,对相对不重要的子带进行粗量化,选择稍大的量化步长。具体的量化编码方法如下:

(1)LL3 子带量化编码:由于最低频 LL3 子带聚集了最多的能量,对恢复图像的质量影响最大,所以对 LL3 子带不进行量化而直接采用无失真 DPCM 编码。

(2)高频子带系数的量化:首先对 9 个高频子带分别提取出重要位置信息,形成映射表,对绝对值大于阈值的系数映射为 1,绝对值小于阈值的系数映射为 0。然后对每个子带根据其重要程度,选取不同的量化阈值和量化步长进行量化。其中,量化阈值的选择是根据各子带小波系数样本标准差的大小来确定的,均方差越大,相应的子带能量越大,小波子带越重要,应设置较小的阈值,反之亦然。

(3)编码:映射表是为了解码时找到与各系数相对应的位置信息,由于某些子带的映射表含有很多 0 值,所以对含 0 较多的子带的映射表采用游程编码。对于各个子带,对量化后的系数采用固定比特平面的方法进行编码。

4 算法实验结果

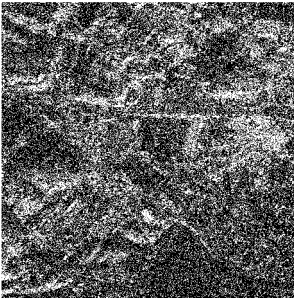
本文实验是在操作系统 Windows2000,编程语言为 MATLAB7.0 实验环境下进行的。采用 D5/3 小波基,对遥感图像进行三级整数小波分解后,按照如上所述的量化编码方案进行压缩编码。图 6 中(a)(b)(c)给出了 3 幅不同内容和纹理的遥感图像,(d)给出了遥感图像(c)上海浦东在 CR=7.8804 时的恢复图像。表 3 给出了 3 幅遥感图像在一定的量化阈值和量化步长下的压缩比和峰值信噪比。

表 3 压缩比和峰值信噪比

Tab. 3 Compression ratio and PSNR

图像	CR	PSNR(dB)
日本地区	8.509 7	31.726 5
香港海港	18.748 7	34.409 8
上海浦东	7.880 4	30.813 9

根据表 3 和图 6 可以看出,对于不同内容和纹理的 3 幅遥感图像,在压缩比大于 7 以上时,恢复图像的 PSNR 均大于 30dB;(b)香港海港由于其具有大面积的海域使得纹理比较平坦,因此在



(a)日本地区
(a)Japan region



(d)CR=7.8804 时(c)的恢复图像
(d) Restoration of image (c) when CR=7.8804



(b)香港海港
(b)Hongkong seaport



(c)上海浦东
(c)Shanghai Pudong

图 6 4 幅遥感图像

Fig. 6 four remote sensing images

压缩比大于 18 时, PSNR 还能达到 34 dB 以上; 比较(c)和(d)中的两幅图像, 人眼在视觉上很难区分出它们的差异, 小目标几乎没有丢失。

5 结 论

针对遥感图像有损压缩中容易造成小目标(小目标指的是一些高频细节, 如: 细小的纹理、边缘等信息)丢失这一难点, 本文提出的算法着重考虑了各子带对于恢复图像质量影响的重要程度, 并根据其重要程度采用不同的量化阈值和量化步长进行量化编码。该算法在一定的压缩比下, 从客观上评价获得了较高的峰值信噪比, 主观上评价恢复图像具有较好的视觉效果, 同时该算法具有结构简单, 所需存储容量小, 易于快速实现等优点, 是一种有效的适合于星上应用的有损压缩算法。在压缩算法的各个环节中, 量化阈值的选择是一个关键问题, 它直接影响了压缩比和重构图像的质量, 本文算法选用的是一种以均方差为基准的自适应阈值, 关于自适应阈值的选用方法是一个值得继续探讨的问题。

参考文献:

- [1] 林三虎, 李秋菊, 邓鸿威, 等. 微型高速图像压缩系统[J]. 遥测遥控, 2002, 23(5): 19-24.
LIN S H, LI Q J, DENG H W, *et al.* High speed real time image compression system[J]. *Journal of Telemetry, Tracking, and Command*, 2002, 23(5): 19-24. (in Chinese)
- [2] 曾湧, 严荣华. 遥感图像受控失真压缩技术研究[J]. 中国空间科学技术, 2005, 25(1): 23-27.
ZENG Y, YAN R H. Research of remote image lossy compression in control[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2005, 25(1): 23-27. (in Chinese)
- [3] 赵洁红, 孙文军, 孟忠, 等. CCD 遥感图像的小波分解特性及编码压缩[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(2): 205-210.

ZHAO J H, SUN W J, MENG ZH, *et al.* Wavelet transform characteristics and compression coding of CCD remote sensing images[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(2): 205-210. (in Chinese)

[4] 李峰, 黄普明, 张伟. 大压缩比嵌入式遥感图像压缩[J]. *宇航学报*, 2002, 23(4): 15-19.

LI F, HUANG P M, ZHANG W. Remote sensing images via embedded coding in high compression rate[J]. *Journal of Astronautics*, 2002, 23(4): 15-19. (in Chinese)

[5] CHRYSAFIS C, ORTEGA A. Line based, reduced memory, wavelet image compression[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(3): 378-389.

[6] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 100-117.

SUN Y K. *Wavelet analysis and application*[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 100-117. (in Chinese)

[7] 吴宝明, 侯文生, 彭承琳. 基于小波变换统计特性的图像压缩算法的研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2002, 19(3): 514-517.

WU B M, HOU W SH, PENG CH L. The Study of image compression method based on wavelet statistical characteristic[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2002, 19(3): 514-517. (in Chinese)

作者简介: 田宝凤(1978—), 女, 辽宁锦州人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学工程专业在读博士研究生, 主要研究方向为数字图像的压缩编码。E-mail: ljfengsha@163.com