

遥感图像准无损压缩技术的研究*

宣家斌 胡庆武

(武汉测绘科技大学信息工程学院,武汉市珞喻路129号,430079)

摘要 提出了一种基于图像恢复技术的遥感图像压缩技术,在提高遥感图像压缩比的同时,使压缩后的重建图像质量达到准无损的技术要求。对 SPOT、TM 图像的试验结果表明,该技术是可行的。

关键词 准无损压缩;图像恢复;逼真度;峰值信噪比;刀刃曲线;线扩散函数

分类号 P237.3;TP751

航空、航天遥感技术的发展十分迅速,国外已研制成小像幅面阵传输型相机,并正在按常规航空摄影的模式进行测图试验。在航天遥感中,新型传感器(微波遥感、成像光谱仪和高空间分辨率测图卫星等)的质量上了新的台阶。另一方面,3S集成技术正日趋成熟,数字摄影测量(软拷贝摄影测量)系统已经走向商品化,尤其是“国家信息高速公路”是21世纪必须面临的课题,所有这些新的发展态势,对属于空间地理信息的原始数据而言,客观上必将提出需要金字塔型的多层次、多时相的遥感数据。

由胶片回收型卫星走向数字传输型卫星,由模拟、解析摄影测量发展为数字摄影测量以及在GIS中为了建立属性数据、图形数据和图像数据一体化的数据库,首先面临如何处理海量遥感数据的实时传输以及图像数据库的建立等重要问题,这就使得遥感数据的压缩技术成为亟需解决的关键技术之一。

常规的编码技术虽然可以达到无失真压缩,但是压缩比只能在2倍左右,不能满足实际使用的要求。而80年代后期兴起的分形、小波压缩技术,虽然可以达到很大的压缩比,但它们是有损压缩的,且运算时间很长,同样不能满足实际使用的要求。

数据压缩技术涉及到3个互相制约的技术指标,即压缩图像的速度、图像的压缩比和图像的质量。对遥感图像而言,速度和图像的质量是至关重要的。作者认为,适用于遥感图像的是准无损压缩。所谓准无损就是在辐射畸变方面,原始图像与解压后的重建(恢复)图像之间,其同名像元的灰度标准差应小于图像的量化噪声;而在几何

畸变方面,点位的精度应在传感器成像系统的畸变差之内。这样既能满足一定的压缩比,又能确保不丢失宝贵的图像信息。

本文的准无损压缩技术分为两步:首先在比特分割和去相关的基础上减少原始图像的熵值,提高图像的压缩比,然后对解压后的重建图像增加一个图像恢复的技术处理过程,进一步恢复和提高重建图像的质量。采用本文提出的技术路线,图像压缩比可提高一倍,逼真度(FEDELITY)大于0.99,峰值信噪比(PSNR)大于42,达到准无损的压缩要求。

1 图像压缩

本文提出的图像压缩过程包括比特位压缩和图像去相关两部分,如图1所示。

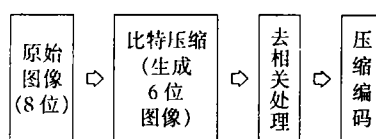


图1 图像压缩流程

Fig. 1 The Flow Chart of Image Compression

由数字图像的比特分割可知,在低位图像上,只包括少量的信息,大部分为量化噪声,因此可以暂时删除低2位图像,以降低原始图像的熵值,提高图像的压缩倍率。再经去相关处理,进一步降低原始图像的冗余度,从而再进一步提高图像的压缩倍率,见表1。这一压缩过程速度很快,非常适合图像的实时传输和影像数据库的建立。

收稿日期:1999-03-30. 宣家斌,男,61岁,教授,现从事数字遥感图像压缩和像质评定研究。

* 国家测绘局测绘科技发展基金及科学技术部关键技术研究资助项目,编号95016及96-B02-04-04。

1.1 图像压缩预处理

图像的熵值直接影响到对图像进行压缩时的压缩比, 如表 1 所示。若原始图像的熵值在 4~5bit 之间, 则其压缩倍率可达 5 倍以上; 若熵值在 5~6bit 之间, 压缩倍率为 3.5 倍以上。为了提高图像压缩的倍率, 获取较大的压缩比, 首先要降低待压缩图像的熵值。由数字图像的比特分割可知, 在低比特位图像上, 只包含少量的信息, 且大部分为量化噪声。压缩预处理时可以暂时删除低 2 位比特图像, 以降低原始图像的熵值。

1.2 图像去相关

图像各像元所包含的灰度信息由于其位置间的邻接性和地物类别的同一性, 在像元 4 邻域或 8 邻域间具有较大的相关性。从提高压缩倍率出发, 对这些邻域像元进行去相关处理, 以进一步降低冗余度。

1.3 霍夫曼压缩编码

为了保证准无损的技术要求, 在最后的压缩编码时采取无损压缩的霍夫曼编码。

表 1 图像熵值统计和压缩倍率

Tab. 1 The Entropy of Image and Ratio of Compression

图像名	原始图像熵值	压缩至高 6 位图像后的熵值	8 位图像压缩倍率	6 位图像压缩倍率	去相关处理后的压缩倍率
T ₁	4.09	2.16	2.56	5.07	5.91
T ₂	5.02	3.05	1.97	3.61	4.08
T ₃	5.55	3.58	1.78	3.08	3.58
T ₄	6.33	4.41	1.55	2.47	2.94
T ₅	5.73	3.79	1.75	2.99	3.46
PYA	5.45	3.48	1.90	3.38	4.01
PYB	5.70	3.74	2.37	4.57	5.64
SP ₁	4.16	2.32	2.38	4.65	5.60
SP ₂	4.63	2.75	2.19	4.25	5.60
SP ₃	4.96	3.02	2.26	4.40	5.08
NSP ₁	4.20	2.26	2.63	5.13	6.29
NSP ₂	4.85	2.90	2.31	4.48	5.39
NSP ₃	5.38	3.42	2.03	3.72	4.35

2 图像恢复

采用本文提出的压缩方法, 在提高压缩比的同时, 由于删除了低 2 位图像, 解压(重建)后图像的质量必然有所下降, 为了提高重建图像的质量, 必须对被删除的低 2 位图像进行恢复处理。

2.1 图像恢复技术的设计

众所周知, 遥感图像在成像过程中受到许多外界因素的干扰和影响(如像移、传感器平台的震动、大气蒙雾等), 从而使遥感图像的质量有所衰

退, 但是这一图像的降质过程是随机的, 无法用一个数学模型表达。大多数学者在研究图像恢复技术时都采用简化的方式, 如将二维点扩散函数简化为一维线扩散函数进行处理, 将成像系统看作是一个空间不变线性系统, 其线扩散函数呈高斯对称分布等等。本文提出的比特位压缩可以看作是一个经过高频滤波的降质图像, 因此, 本文提出的图像恢复技术原理基于以下 3 点。

1) 成像系统为一空间不变线性系统, 其线扩散函数 $A(x)$ 呈高斯对称分布, 则:

$$A(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

2) 按 1) 的假定, 成像系统的线扩散函数 $A(x)$ 的图形如图 2 所示。则根据卷积成像原理, 任意像元的灰度值为:

$$g_i = (\alpha'_2 \alpha'_1 \alpha_1 1 \alpha_2) \begin{pmatrix} f_{i-2} \\ f_{i-1} \\ f_i \\ f_{i+1} \\ f_{i+2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, $f_{i-2}, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, f_{i+2}$ 为原始景物的亮度(灰度)值; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha'_1, \alpha'_2$ 为线扩散函数在邻接像元的数值, 相当于卷积成像的权重。

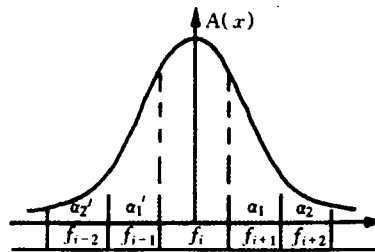


图 2 成像系统的线扩散函数图

Fig. 2 The Figure of the Line Spread Function of Imaging System

考虑到 $A(x)$ 为偶函数, 在逆滤波处理中, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha'_1, \alpha'_2$ 需取负值^[1], 即

$$\alpha_1 = \alpha'_1 = -A(\pm 1) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \alpha'_2 = -A(\pm 2) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{2}{\sigma^2}} \quad (4)$$

则有:

$$g_i = \alpha_1(f_{i-1} + f_{i+1}) + f_i + \alpha_2(f_{i-2} + f_{i+2}) \quad (5)$$

3) 假定物函数 f_i 与像函数 g_i 之间存在以下线性关系, 即

$$f_i = k_i \cdot g_i \quad (6)$$

及 $k_{i\pm 2}/k_i = g_{i\pm 2}/g_i \quad (7)$

$$k_{i\pm 1}/k_i = g_{i\pm 1}/g_i \quad (8)$$

将式(6)~(8)代入式(5),可得:

$$k_i = g_i \cdot$$

$$\left[\alpha_2 \cdot \left(\frac{g_{i-2}^2}{g_i} + \frac{g_{i+2}^2}{g_i} \right) + \alpha_1 \cdot \left(\frac{g_{i-1}^2}{g_i} + \frac{g_{i+1}^2}{g_i} \right) + g_i \right]^{-1} \quad (9)$$

2.2 线扩散函数的求取

图像恢复技术的关键就是求出线扩散函数 $A(x)$ 的 2 个特征值 α_1, α_2 , 代入式(9)后得到变换系数 k_i , 然后逐个像元进行变换, 生成恢复图像, 再从恢复图像中提取低 2 位图像。其技术框图如图 3 所示。

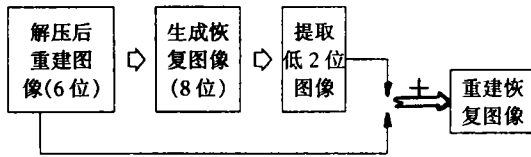


图 3 图像恢复处理过程

Fig.3 The Process of Image Restoration

由式(1)、(3)、(4)知, 求解 α_1, α_2 的关键在于求出 σ , 具体过程如下^[1]:

1) 分别按行和列在图像中寻找直边地物, 根据近似的刀刃曲线采样值, 提出用如下的数字模型来模拟刀刃曲线:

$$H(x) = A \cos Bx + C \quad (10)$$

式中, x 表示像元坐标; $H(x)$ 表示该像元的灰度值。

如要解出上式中 A, B, C 三个参数, 则至少需要 3 对 $(H(x), x)$ 数据。如何从图像中提取出这 3 对或更多对的数据是求取刀刃曲线方法的关键。刀刃特征反映在数字影像中就是一组灰度值递增或递减的连续像元。因此, 可以利用这一特点, 在整幅图像中按一定规律提取出一些特征边缘上的值, 把这些值综合起来, 作为式(10)的初值, 拟合出刀刃曲线。该方法的特点就是不需要在图像上选取明显的刀刃, 而是按照一定的方法, 对图像中与刀刃曲线排列规律相同的连续像元进行统计, 并将其拟合到某一特定的函数关系式上, 以此求出刀刃曲线。

就图像恢复而言, 用该方法计算出的刀刃曲线是近似的, 但根据提取的原理, 其在图像恢复中具有自适应性。

2) 近似的线扩散函数的求解。

由于按亮度分布的刀刃曲线 $H(x)$ 各点的斜

率即为该点的线扩散函数值, 对刀刃曲线有:

$$A(x) = \partial H / \partial x \quad (11)$$

逐点求导可得线扩散函数。本文提出的恢复处理是基于成像系统为一空间不变线性系统, 且线扩散函数呈高斯分布。

由式(1)、(11)可知:

$$H(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (12)$$

$$\text{则 } H(\sigma) = 0.16 \quad (13)$$

$$H(-\sigma) = 0.84 \quad (14)$$

如图 4 所示。

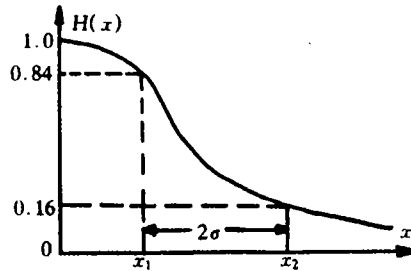


图 4 按亮度分布的刀刃曲线

Fig.4 Edge Curve of Brightness Distribution

3) 由式(11)、(13)、(14)得:

$$\sigma = \frac{1}{2} \left| \cos^{-1} \left(\frac{C - 0.16}{A} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{C - 0.84}{A} \right) \right| \quad (15)$$

将式(15)解得的 σ 代入式(3)、(4)得到 α_1, α_2 , 由于 α_1, α_2 均为负值, 故式(9)求出的 k_i 值总是大于或等于 1, 这就有可能补偿在图像压缩时所删除的低 2 位图像。为了证明恢复图像对压缩时删除的低 2 位图像的补偿, 对原始图像与恢复图像中低 2 位图像进行特征值统计(原始图像/恢复图像), 见表 2。

由表 2 可见, 两者统计特性数据基本一致, 这说明本文提出的恢复处理方法是正确的。

3 试验和图像质量评价

根据以上原理, 作者设计了遥感图像的准无损压缩系统, 该系统主要包括图像压缩、图像重建、图像恢复和图像质量评定 4 个部分, 见图 5。

采用本系统对 5 幅 TM 图像和 8 幅 SPOT 图像进行分幅试验。本文试验所用的图像列于表 3。试验证明, 压缩比(表 1)和恢复图像的质量(表 4)都有较大提高。

在数字图像通信中, 对解压图像的质量评定

都采用2个评价指标,即逼真度(FEDELITY)和峰值信噪比(PSNR),其计算公式为:

$$FEDELITY = \frac{\sum_{j=1}^n g_j * g'_j}{\sum_{j=1}^n g_j * g_j} \quad (16)$$

$$PSNR = 10\lg\left(\frac{255}{\delta}\right)^2 = 48 - 20\lg\delta \quad (17)$$

式中, g_j 为原始图像像元的灰度; g'_j 为解压后重建图像像元的灰度; n 为图像的像元数;

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (g_j - g'_j)^2}$$

表2 原始图像与恢复图像低2位图像统计值
Tab.2 The Statistics Data of Low 2-bit Image

图像名	最大值	最小值	均值	熵	方差
T ₁	3/3	0/0	1.50/1.53	2.00/1.97	1.14/1.10
T ₂	3/3	0/0	1.45/1.53	2.00/2.00	1.12/1.10
T ₃	3/3	0/0	1.46/1.40	2.00/1.99	1.12/1.14
T ₄	3/3	0/0	1.52/1.38	2.00/1.99	1.14/1.13
T ₅	3/3	0/0	1.47/1.20	1.98/1.92	1.08/1.16
PYA	3/3	0/0	1.47/1.46	2.00/1.99	1.12/1.11
PYB	3/3	0/0	1.48/1.45	2.00/1.99	1.12/1.10
SP ₁	3/3	0/0	1.42/1.54	1.99/1.97	1.16/1.10
SP ₂	3/3	0/0	1.46/1.50	2.00/1.99	1.13/1.06
SP ₃	3/3	0/0	1.48/1.53	2.00/1.99	1.10/1.08
NSP ₁	3/3	0/0	1.51/1.38	1.97/2.00	1.12/1.11
NSP ₂	3/3	0/0	1.51/1.49	2.00/1.97	1.12/1.07
NSP ₃	3/3	0/0	1.51/1.45	2.00/1.99	1.13/1.10

逼真度表示解压图像相对原始图像几何失真的程度,而峰值信噪比表示解压图像相对原始图像灰度的偏离程度。显然,无失真图像的逼真度为1.0,峰值信噪比为无穷大($\delta = 0$)。若 $\delta = 1.0$,峰值信噪比为48;若 $\delta = 2.0$,峰值信噪比为42。本文的准无损质量要求正是基于上述标准提出的。恢复图像的质量列于表4。

表4 重建图像与恢复图像质量比较

Tab.4 The Comparison Between Reconstructed Images and Restored Images

图像名	重建图像	恢复图像
	FEDELITY/PSNR	FEDELITY/PSNR
T ₁	0.953 3/42.55	0.999 2/46.11
T ₂	0.956 2/41.83	0.998 4/44.52
T ₃	0.974 4/40.93	0.998 7/42.87
T ₄	0.979 0/39.41	0.998 3/40.77
T ₅	0.957 8/41.34	0.997 6/43.56
PYA	0.973 3/41.73	0.998 4/43.57
PYB	0.982 4/42.30	0.999 9/45.35
SP ₁	0.967 7/42.27	0.998 7/44.87
SP ₂	0.960 5/41.89	0.999 4/44.38
SP ₃	0.954 6/42.16	0.999 4/45.03
NSP ₁	0.967 4/42.25	0.996 9/45.93
NSP ₂	0.968 8/42.29	0.998 2/45.53
NSP ₃	0.958 7/41.71	0.998 1/44.38

由表4可见,图像质量有了大幅度提高。这一试验结果充分说明,本文提出的准无损压缩技术是正确的。图6(a)为原始图像T₄,图6(b)为T₄压缩重建后的恢复图像。

4 结论

本文提出了基于图像恢复技术的遥感图像压缩技术,解压图像经过恢复处理后,逼真度都超过0.99,峰值信噪比分别提高2.35(T)、2.44(PY)、2.65(SP)和3.19(NSP)。除T₄图像外(熵值为6.33),峰值信噪比都超过42。可见,在提高遥感图像压缩比的同时,使压缩后的重建图像质量达到了准无损的技术要求。试验同时说明,本文提出的图像压缩技术非常适合于遥感图像。这一技术不但可用于数字摄影测量系统和影像数据库的建立,而且也深入研究遥感图像的实时传输提供了新的技术途径。

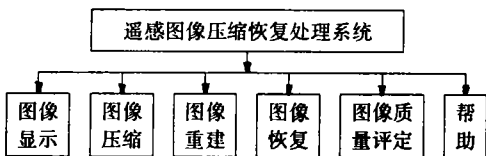


图5 准无损压缩系统

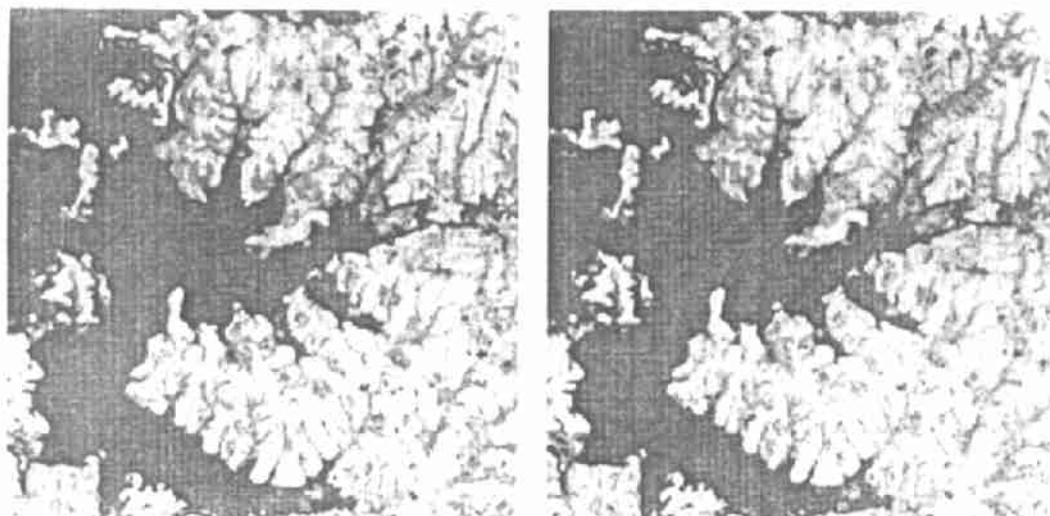
Fig.5 The Quasi-lossless Compression System

表3 试验所用的图像

Tab.3 Test Images

影像名	传感器	试验波段数	地区	影像大小/像元
T	美国陆地卫星	5*	武汉市郊区	512×512
PYA	SPOT卫星	1	北京城区	6 000×6 000
PYB	SPOT卫星	1	北京郊区	5 000×5 000
SP	SPOT卫星	3	武汉市(1986)	500×500
NSP	SPOT卫星	3	武汉市(1995)	1 024×1 024

* TM共有7个波段,由于1,2波段图像相关性太强,第6波段空间分辨率不同,故删去2,6两个波段,实际使用5个波段,依次编号为T₁、T₂、T₃、T₄、T₅。



(a) 原始图像

(b) 恢复图像

图6 实验结果

Fig.6 Result of Testing

参 考 文 献

- 1 周松涛, 宜家斌. 基于景物灰度分布特征的影像恢复技术. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(3): 230~234
- 2 宜家斌. 航空与航天摄影技术. 北京: 测绘出版社, 1992
- 3 宜家斌. 传输型卫星遥感图像的数据压缩和像质评定. 见: 卫星遥感图像的数据传输与压缩技术专题研讨会论文集, 1996
- 4 费晓光, 王 雷. 航天遥感图像压缩技术的最新发展. 中国图形图像学报, 1997(10): 1~5
- 5 吴乐南. 数据压缩的原理与应用. 北京: 电子工业出版社, 1994
- 6 朱秀昌, 胡 栋. 数字图像通信. 北京: 人民邮电出版社, 1995
- 7 刘政凯, 瞿建雄. 数字图像恢复与重建. 合肥: 中国科技大学出版社, 1989
- 8 罗申菲尔特 A, 卡克 A C. 数字图像处理. 余英林译. 北京: 人民邮电出版社, 1982

The Technique of Guasi-lossless Compression of Remote Sensing Image

Xuan Jiabin Hu Qingxue

(School of Information Engineering, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract With the rapid development of aerial and space remote sensing technique, the digital camera has been explored, and mapping experiments with this kind of digital images are processing as the regular mode of aerophotogrammetry. On the other hand, the technique of integration of 3S (GPS, RS and GIS) and digital photogrammetric system have been put in actual use as a mature technique. Meanwhile, the information superhighway will be the new key technique in the coming 21 century. All these developments mean that for the spatial geographical data require multi-level remote sensing image data. In RS, GIS and DPS(digital photogrammetric system), one of key techniques is how to deal with the real time transmitting of huge remote sensing data and how to build image data base. So the investigation technique of compression of remote sensing data is a

(下转第 299 页)

Analysis of Spectral Characteristics Among Different Sensors by Use of Simulated RS Images

Ye Zetian Gu Xingfa Liu Xianlin Wang Zhimin

(Chinese Academy of Surveying & Mapping, 16 North Taiping Road, Beijing, China, 100039)

Abstract This research, by use of RS image-simulating method, simulated apparent reflectance images at sensor level and ground-reflectance images of SPOT-HRV, CBERS-CCD, Landsat-TM and NOAA14-AVHRR's corresponding bands. These images were used to analyze sensor's differences caused by spectral sensitivity and atmospheric impacts. The differences were analyzed on normalized difference vegetation index(NDVI). The results showed, the differences of sensors' spectral characteristics cause changes of their NDVI and reflectance. When multiple sensors' data are applied to digital analysis, the error should be taken into account. Atmospheric effect makes NDVI smaller, and atmospheric correction has the tendency of increasing NDVI values. The reflectance and their NDVI of different sensors can be used to analyze the differences among sensor's features. The spectral analysis method based on RS simulated images can provide a new way to design the spectral characteristics of new sensors.

Key words simulated RS image; sensor spectral characteristic; vegetation index analysis

.....
(上接第 294 页)

very urgent task. Normal data encoding technique comes to loss-less compression, while the compression ratio only ranges about 2 and can't be satisfied with actual requirement. The new developing compression techniques, such as wavelet compression and fractal compression will reach a high compression ratio, but they belong to degraded compression and need much more CPU time. So for the time being, these methods have not much actual use in the field of the remote sensing.

In this paper, the technique of quasi-lossless compression based on the image restoration is presented. The technique of compression described here will include three steps, namely, bit compression, removing correlation and image restoration based on the theory of modulation transfer function(MTF). The quasi-lossless compression comes to high speed and the quality of reconstructed image under restoration reached the quasi-lossless level with higher compression ratio. The test of TM and SPOT remote sensing images show that the average compression ratio is about 4~5, the fidelity reaches 0.99 and peak value signal-noise ratio(PSNR) is over 42. All of the results confirm that the technique is reasonable and applicable.

Key words quasi-lossless compression; image restoration; fidelity; peak value signal-noise ratio; edge curve; line spread function