

文章编号: 1007-4219 (2005)02-0143-05

基于误差补偿预测树的多光谱 遥感图像无损压缩方法

吴 铮, 何明一, 冯 燕, 贾应彪

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 预测树方法是一种有效的无损多光谱图像压缩技术, 将自适应线性预测方法与传统预测树方法相结合, 提出了一种多光谱遥感图像的误差补偿预测树压缩方法。该方法利用多光谱图像谱间的局部统计冗余和结构冗余建立自适应预测器, 对传统预测树方法产生的误差进行补偿, 从而进一步减少了多光谱图像的数据量; 并且利用多光谱图像的局部平稳特性对算法进行了简化。实验结果表明, 该方法得到的压缩比与原始预测树方法相比有明显提高, 同时算法简化后可以使计算复杂度大幅度降低。

关键词: 多光谱遥感图像; 无损压缩; 预测树; 误差补偿

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

多光谱遥感图像的压缩技术是星载、机载遥感数据传输和存储中一个重要的问题, 其研究一直十分活跃。由于多光谱遥感图像常用来对地物的类别进行精细分析, 因此在很多情况下希望压缩时不损失信息, 即进行无损压缩。压缩技术是通过去除数据中的各种冗余达到压缩的目的。多光谱图像中存在着空间冗余和谱间冗余, 其中谱间冗余又包括了统计冗余和结构冗余。多光谱图像的空间冗余表现为, 在每一波段图像中, 相邻像素的灰度值存在着相关性; 其谱间统计冗余表现为, 各波段图像灰度值的分布存在着相关性; 其谱间结构冗余则体现为, 邻近波段图像间具有极强的结构相似性。预测树方法^[1]是一种有效的无损多光谱图像压缩技术, 该方法利用了谱间结构冗余和空间冗余, 但未能去除谱间统计冗余。另一方面, 线性预测方法^[2,3]可以较好地去除多光谱图像中的谱间统计冗余和空间冗余, 但不能去除谱间结构冗余。

本文将自适应线性预测方法与预测树方法相结合, 提出了多光谱图像的误差补偿预测树压缩方法。该方法利用多光谱图像谱间的局部统计冗余和结构

冗余建立自适应预测器, 对预测树方法产生的误差进行补偿, 从而可去除3种形式的冗余, 并提出了简化算法。实验结果表明, 误差补偿预测树方法的压缩效果与原始预测树方法相比有明显改善, 其计算复杂度在算法简化后也大幅度降低。

2 多光谱图像的误差补偿预测树压缩方法

2.1 预测树方法原理

由 Memon 等人提出的预测树方法是一种有效的多光谱遥感图像无损压缩技术^[1], 它的主旨思想是把图像看作加权图, 每个像素是图的一个顶点, 相邻像素的连线是图中的边, 边两端像素的灰度值之差是边的权值。在此图中可以找到一种生成树, 该生成树确定了图像的去相关方案, 也称为预测树。预测树的边表示了预测方式, 边的权值是预测误差, 只要存储了预测树就能准确恢复出原始图像。由于预测树中保存的是预测误差数据, 因此可以达到压缩的目的。

预测树的建立和像素的邻域定义方式有关, 图1所示的分别是四邻域^[1]和侧四邻域^[4]定义方式。

收稿日期: 2003-10-13; 修订日期: 2003-12-29

基金项目: 国防 973 计划项目、航空科学基金(编号: 01F53028)和陕西省自然科学基金项目(编号: 2000X18)资助。

作者简介: 吴 铮(1977—), 女, 西北工业大学电子信息学院信号与信息处理专业博士研究生, 主要研究方向为图像压缩、小波变换、遥感图像处理, 发表论文 2 篇。

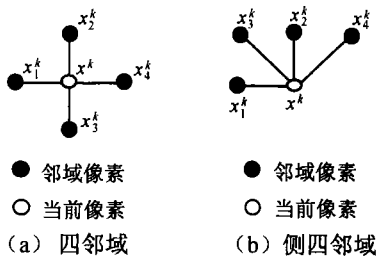


图 1 两种四邻域定义方法
Fig. 1 Two 4-neighborhood definition

在建立预测树时,每个像素应由与它灰度值最近的相邻像素预测得到。对于四邻域定义方式,由于每个像素是其四邻域像素的四邻域像素,若按上述

原则生成预测树,可能会形成环。为避免形成环,算法将非常复杂,同时某些像素不能由灰度值与之最接近的四邻域像素预测得到,从而误差增大。对于侧四邻域定义方式,每个像素不再是其侧四邻域像素的侧四邻域像素,因此保证了无环性,每个像素的灰度值都可通过与之最接近的侧四邻域像素预测得到。在生成预测树时,只要按照扫描顺序依次确定每个像素侧四邻域中与其灰度值最接近的像素,并将二者连线作为边,边与边相连即形成树。图 2 是对一组图像数据分别构造两类预测树的示例。由于两类预测树方法得到的压缩结果相当^[4],同时考虑到算法的复杂度及压缩效率,本文提出的误差补偿预测树方法采用了侧四邻域定义方式。

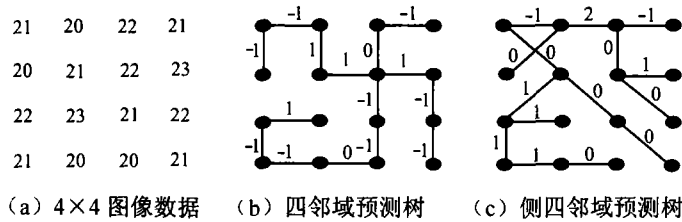


图 2 预测树示意图

Fig. 2 Example of prediction tree

预测树方法在重构图像时需要预测树的形状信息,由此将造成一定的开销,所以不适用于单幅图像。但多光谱图像是同一地域在不同光谱波段的成像,各波段图像的结构具有相似性,因此可以利用前一波段图像的预测树对当前波段图像进行预测,从而消除预测树带来的开销。此时除第一波段用传统的谱内预测方法进行压缩外,其余第 $k(k=2, \dots, K)$ 波段中的像素 x^k ,其谱内预测公式为

$$\hat{x}^k = x_{\bar{n}}^k \quad (1)$$

式中 \bar{n} 由前一波段图像的最优侧四邻域预测树确定,即满足 $|x^k - x_{\bar{n}}^{k-1}| = \min_{n=1, \dots, 4} |x^k - x_n^{k-1}|$, x_1^k 到 x_4^k 的定义如图 1(b) 所示。

2.2 误差补偿预测树方法

多光谱图像的谱间统计冗余可以通过线性预测方法去除。假定 x^k 是压缩过程中当前处理波段中的某一像素, x^{k-1} 是参考波段中相同位置上的像素,则使用的谱间预测器为

$$\hat{x}^k = \alpha x^{k-1} + \beta \quad (2)$$

通常情况下需要一个复杂的优化过程来寻找谱间预测器中所选用的参考波段,但是研究表明当多

光谱图像数据按照波长递增(或递减)的顺序依次排列时,参考波段可简单的选取为相邻的波段,并能得到接近最优的压缩结果^[3]。由于本文中的多光谱数据是按波长递减顺序依次排列的,因此参考波段选取为与当前波段相邻的前一波段。

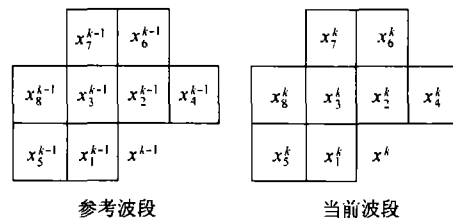


图 3 自适应预测器采用的邻域像素

Fig. 3 Neighboring pixels used in adaptive predictor

由于多光谱遥感图像一般不具备平稳特性,因此建立自适应的谱间预测器,即利用局部区域中的像素灰度值对预测器系数进行估计。第 k 波段中像素 x^k 的邻域像素构成的矢量为 $\mathbf{x}^k = [x_1^k \ x_2^k \ \dots \ x_8^k]$,其中 x_1^k 到 x_8^k 的定义如图 3 所示^[5],则自适应预测器系数可由 \mathbf{x}^{k-1} 和 \mathbf{x}^k 在最小均方误差意义下获得

$$\alpha = \frac{8 \sum_{i=1}^8 x_i^{k-1} x_i^k - \sum_{i=1}^8 x_i^{k-1} \sum_{i=1}^8 x_i^k}{8 \sum_{i=1}^8 (x_i^{k-1})^2 - \left(\sum_{i=1}^8 x_i^{k-1} \right)^2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^8 x_i^k - \alpha \sum_{i=1}^8 x_i^{k-1}}{8}$$

考虑到图像信号的局部平稳性,可认为在局部区域内预测器系数 α 和 β 是恒定的,于是对 x^k 和其侧四邻域像素有

$$x^k - x_n^k \approx \hat{x}^k - \hat{x}_n^k = \alpha x^{k-1} + \beta - (\alpha x_n^{k-1} + \beta) \quad (4)$$

$$= \alpha (x^{k-1} - x_n^{k-1}) \quad n = 1, \dots, 4$$

结合预测树公式(1),对当前像素 x^k 可建立预测器

$$\hat{x}^k = x_n^k + \alpha (x^{k-1} - x_n^{k-1}) \quad (5)$$

式中 \bar{n} 的确定方法与公式(1)中相同。

公式(5)意味着,当用预测树方法确定的预测值 x_n^k 对当前像素 x^k 进行预测时,其预测误差可以通过修正量 $\alpha(x^{k-1} - x_n^{k-1})$ 进行补偿,这一修正量是依据多光谱图像的谱间统计冗余特性得到的。这就是误差补偿预测树方法的基本思想,该方法同时利用了多光谱图像的谱间统计冗余、谱间结构冗余和空间冗余。

2.3 误差补偿预测树方法的简化

误差补偿预测树方法与原始预测树方法相比,虽然进一步去除了多光谱图像的谱间统计冗余,但是计算复杂度也大幅度增加。在该方法中除第一波段图像和其余各波段图像边界上的像素外,其它每个像素在计算系数 α 时都要进行 37 次加/减法、20 次乘法和 1 次除法,计算量很大,因此需要对算法进行简化。

从(4)式至(5)式的推导中可以看出,误差补偿方法的基本前提是在局部区域内预测器系数 α 和 β 是恒定的。在稳定的局部区域中,这一前提自然得到满足,因此只需计算出某一个像素的预测器系数,其余像素的预测器系数都可以用该值替代,从而降低算法的计算复杂度。在单幅灰度图像的自适应预测压缩算法中,一种用于判定当前像素是否处于局部稳定区域的方法是^[6]:如果其邻域像素预测误差绝对值的平均值小于某一阈值,则认为该像素处于局部稳定区域,先前所用的预测器也适用于当前像素。本文算法将这一方法引入多光谱图像压缩中,同时为了计算方便起见,将判别式定义为

$$e_{\text{sum}} = \sum_{n=1}^4 |x_n^k - \hat{x}^k| = \sum_{n=1}^4 |e_n| < T \quad (6)$$

其中 T 为事先设定的阈值, $e_1 \sim e_4$ 是侧四邻域像素的预测误差,已在编码过程中计算得到,因此式(6)的计算量仅为 3 次加法、4 次绝对值运算和一次判断。当判别式成立,即侧四邻域像素预测误差绝对值的和小于事先设定的阈值时,则认为当前像素处于平稳区域,可沿用先前计算得到的预测器系数。

2.4 具体算法

基于以上讨论,我们提出了多光谱图像的误差补偿预测树无损压缩算法。算法对第一波段图像采用传统的谱内预测方法进行压缩,使用的预测器为

$$\hat{x}^k = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 x_n^k \quad (7)$$

然后各波段图像依次利用误差补偿预测树方法进行压缩。具体算法如下:

1. 利用公式(7)对第一波段图像进行压缩。并建立第一波段图像的最优侧四邻域预测树。

2. $k = 2$ 。

3. 利用误差补偿预测树方法对第 k 波段图像进行压缩。具体步骤是按照逐行扫描方式对第 k 波段图像中的各像素执行:

- 若像素位于图像的边界上,即位于图像的头两行、头两列和最后一列中,由于其不具有图 3 所示的所有 8 个邻近像素,不能根据公式(3)计算出预测系数 α ,所以利用公式(1)对其进行预测。此时相当于公式(5)中的系数 α 取为 0,因此该像素对应的 α 值为 0。

- 若像素不在图像的边界上,则对公式(6)进行判定:

- 若判别式成立,则根据公式(5)对像素进行预测,系数 α 取为公式中用到的邻域像素 x_n^k 所对应的 α 值。

- 若判别式不成立,则根据公式(5)对像素进行预测,系数 α 由公式(2)计算得到。

4. 如果 $k < K$ (K 为多光谱图像的总波段数),则建立第 k 波段图像的最优侧四邻域预测树, $k = k + 1$, 转到 3; 否则所有波段图像已压缩完毕, 编码结束。

算法在对预测误差图像进行熵编码时,采用自适应算术编码方法^[7]。解码算法是上述算法的逆过程,此处不再赘述。

3 实验结果

本文使用的实验数据是由中国科学院上海技术物理所提供的 64 波段多光谱数据,空间分辨率为 10m,谱间分辨率为 10nm,图像大小为 512×2040 。为了检验本文算法对不同成像内容、不同波段范围

以及不同谱间分辨率下多光谱图像的压缩能力,从原始数据中截取了 3 组图像,分别记为 Sub0、Sub1 和 Sub2,大小均为 256×256 。其中前两组图像都是由原始 64 波段中的相邻 16 个波段图像组成,波段范围在表 1 中注明,第 3 组图像是对光谱维进行 4:1 抽样后得到的 16 波段图像。图 4 是这 3 组数据中的代表图像。

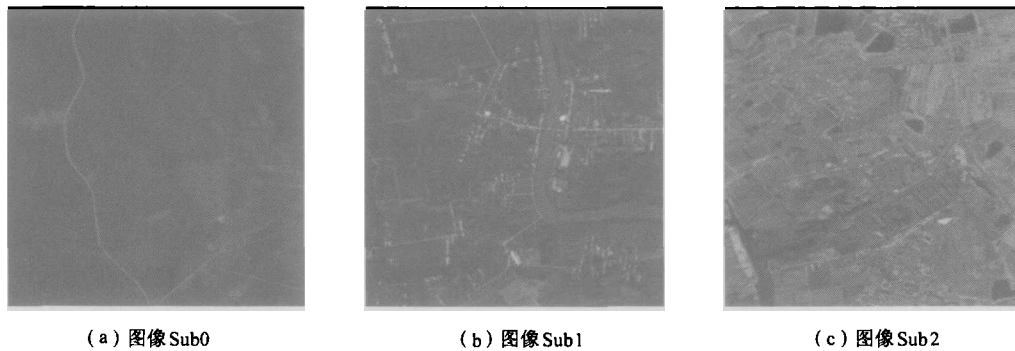


图 4 实验数据

Fig.4 Experimental data

图 5 中分别绘出了第一组图像 Sub0 中各波段图像的原始熵、使用侧四邻域预测树方法后各波段误差图像的熵以及使用误差补偿预测树方法后各波段误差图像的熵。由图 5 可以看出,与预测树方法相比,误差补偿预测树方法可得到更好的去相关效果,从而进一步提高了压缩比。

表 1 列出了对 3 组图像分别用侧四邻域预测树方法和误差补偿预测树方法进行压缩后获得的压缩比。由表 1 可以看出,误差补偿预测树方法对于各组图像的压缩结果均明显优于侧四邻域预测树方法。在图 5 和表 1 中,误差补偿预测树方法未采用简化算法,即相当于 $T=0$ 。表 2 中给出了当阈值 T 取不同值时,简化算法得到的压缩结果。从表 2 中可以看出,采用简化算法后,对于大部分像素都不再需要计算预测器系数。当阈值较小时,简化算法对各组图像获得的压缩比与未简化前算法持平;随着阈值的增大,不必重新计算预测

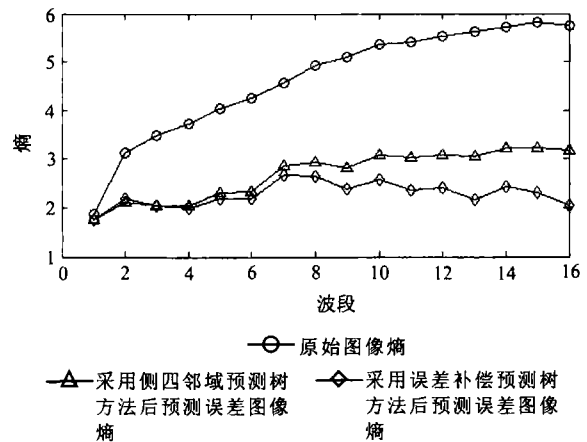


图 5 原始图像熵和预测误差图像熵

Fig.5 Entropies of the original images and the error ones

器系数的像素个数大幅增加,同时压缩比也逐渐降低。

表 1 3 组图像分别利用侧四邻域预测树方法和误差补偿预测树方法压缩后得到的压缩比

Table 1 Compression ratios obtained by the original prediction tree algorithm and the error compensated one

	Sub0(1—16 波段)	Sub1(11—26 波段)	Sub2(64 波段 4:1 抽样)
侧四邻域预测树	2.61	2.08	2.26
误差补偿预测树	3.38	2.68	2.68

表2 三组图像分别利用误差补偿预测树简化算法压缩后得到的压缩效果

Table 2 Compression ratios obtained by the simplified algorithm

阈值 T	Sub0(1—16 波段)		Sub1(11—26 波段)		Sub2(64 波段 4: 1 抽样)	
	压缩比	不必重新计算系数的像素所占的比例/%	压缩比	不必重新计算系数的像素所占的比例/%	压缩比	不必重新计算系数的像素所占的比例/%
8	3.38	95.3	2.68	80.6	2.68	78.2
12	3.36	99.1	2.67	91.1	2.68	90.6
16	3.31	99.6	2.63	95.3	2.66	94.0

4 结 论

本文结合预测树和自适应线性预测两类压缩方法,提出了一种多光谱图像的误差补偿预测树压缩方案,即利用多光谱图像谱间的局部统计冗余性对预测树方法产生的误差进行补偿,从而同时去除了谱间的结构冗余、统计冗余,以及空间的冗余。同时考虑到计算自适应预测器系数所带来的计算复杂度,利用图像的局部平稳特性对算法进行了简化。

从实验结果中可以看出,对于不同谱间分辨率下的多光谱图像,误差补偿预测树方法获得的压缩比与传统预测树方法相比都有明显的提高,且算法在简化后解决了计算复杂度大的问题。实验结果表明了该算法用于多光谱图像无损压缩的有效性。

参 考 文 献 (References)

[1] Memon N D, Sayood K, Magliveras S. Lossless Compression of

Multispectral Image Data [J]. *IEEE Trans. on Geosci. & Remote Sensing*, 1994, 32(2): 282—289.

[2] Wang J, Zhang K, Tang S. Spectral and Spatial Decorrelation of Landsat-TM Data for Lossless Compression [J]. *IEEE Trans. on Geosci. & Remote Sensing*, 1995, 33(5): 1277—1285.

[3] Rao A, Bhargava S. Multispectral Data Compression Using Bidirectional Interband Prediction [J]. *IEEE Trans. on Geosci. & Remote Sensing*, 1996, 34(2): 385—397.

[4] Zhang R, Yan Q, Liu Z K. A Prediction Tree-based Lossless Compression Technique of Multispectral Image Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(3): 171—175. [张荣, 阎青, 刘政凯. 一种基于预测树的多光谱遥感图像无损压缩方法 [J]. *遥感学报*, 1998, 2(3): 171—175.]

[5] Wu X, Memon N. Context-based Lossless Interband Compression—Extending CALIC [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(6): 994—1001.

[6] Li X, Orchard M T. Edge-directed Prediction for Lossless Compression of Natural Images [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2001, 10(6): 813—817.

[7] Witten I H, Neal R M, Cleary J G. Arithmetic Coding for Data Compression [J]. *Commun. ACM.*, 1987, 30(6): 520—540.

Lossless Compression of Multispectral Imagery by Error Compensated Prediction Tree

WU Zheng, HE Ming-yi, FENG Yan, JIA Ying-biao

(School of Electronics & Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A novel error compensated prediction tree method used for lossless compression of multispectral imagery is proposed in this paper. This method combines prediction tree and adaptive linear prediction techniques, so the spatial redundancy, spectral statistical redundancy and spectral structural redundancy in multispectral imagery are all exploited. For each pixel of the imagery, the prediction tree based on interband structural similarity is used to remove the spatial redundancy and a prediction error is created. Then this error is compensated by an interband linear adaptive predictor, which is constructed according to the spectral statistical redundancy. Our method removes the spectral structural and statistic redundancies as well as the spatial redundancy, so the better compression results can be obtained. The construction of adaptive predictor for each pixel will introduce prohibitive computational complexity to the algorithm. Therefore a modified algorithm based on local stability of imagery is also designed to reduce the computational complexity. The experimental results from practical multispectral images have shown that our method is better than the original prediction tree one.

Key words: multispectral imagery; lossless compression; prediction tree; error compensation