

一种新的基于曲线拟合的干涉光谱图像压缩算法

邓家先 黄艳

(海南大学信息科学技术学院 海口 570228)

摘要: 干涉光谱图像具有自身的特点, 相邻谱线之间的相关性较弱, 谱线数据也有自身的特征, 主干区域数据变化剧烈, 而其它区域的数据呈现单调变化的趋势。根据这些特点, 该文提出一种数据区域分类方法对光谱数据进行分类处理, 将一根谱线的数据分为主干涉区域与非干涉区域两类, 主干区域采用数据相似匹配进行描述, 而非干涉区域采用二次曲线拟合方法进行数据分析, 这种数据分析方法有利于提高该类图像编码效率。仿真结果表明, 该方法可以降低无损压缩输出码率达 0.2-0.4bpp, 并且可以提高有损压缩效率。

关键词: 图像处理; 图像压缩; 二次曲线拟合; 相似匹配; 无损压缩

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)05-1140-05

A Novel Coding Algorithm for Interference Hyper-Spectral Images Based on Classification and Curve-Fitting

Deng Jia-xian Huang Yan

(Information School, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Interference spectral images have their own features. The correlations between the spectral lines are weak. And the data in a spectral line have particularity, that is, the data vary abruptly in the main district and the rest data change monotonously. On the basis of analyzing the particularity, a novel method for data classification is proposed. The data of a spectral line are decomposed to two classes, called main-interference class and no main-interference class. And a similarity-based match method is presented for the data of main-interference class, while the data of no main-interference class is processed by another method called 2-order curve-fitting algorithm. The data of a spectral line can be approached appropriately in the ways discussed above, which avails for image compression. The experimental results show that the output rate decreases by 0.2-0.4bpp for lossless compression, and also can improve the loss compression efficiency.

Key words: Image processing; Image compression; 2-order curve-fitting; Similarity-based match; Lossless compression

1 引言

干涉超光谱图像是一种新型图像, 由于光谱数量多, 精度高, 能够获取分辨率极高的信息, 在军事和民用方面具有广阔的应用前景, 对于深空探测也具有重要意义。地面上的每个像素在谱段上采样得到一组数据, 即一根谱线, 那么一列像素就对应一副干涉图像, 反之, 一副干涉图像能够恢复地面一列像素的信息。为了有效传输和存储这类图像, 应当对图像进行压缩。目前我国的光谱图像压缩技术大多是将连续色调图像的压缩算法直接用于光谱图像压缩。

基于自适应预测的编码技术^[1-6], 特别是JPEG-LS及其改进算法仍然是连续色调图像的无损压缩的最好算法之一^[1,7], 能够取得好的压缩效率, 用于遥感、深空探测和医学等领域的图像压缩。而基于小波变换的图像压缩算法通过小波变换去除图像数据之间的相关性, 结合内嵌比特平面编码技

术实现高效图像压缩, 对连续色调图像的有损、无损压缩都能够取得好的压缩效果, 在同一算法可以实现图像有损、无损压缩的兼容, 具有代表性的算法是国际静态图像压缩标准JPEG2000^[8-11]。

基于小波变换图像压缩对连续色调图像压缩之所以能够取得好的压缩效果, 是因为这种图像在水平、垂直方向都具有很强的相关性, 小波变换后信号的能量主要集中到低频子带, 高频系数幅值一般很小。但是小波变换也存在一定的不足, 主要在于: 由于分辨率相对固定, 当数据出现类似于斜坡形式缓慢变化时, 小波变换会产生许多附加的幅值中等系数, 数据的急剧变化(如振荡)会在高频子带产生幅值很大的系数, 不利于图像压缩。

干涉超光谱图像数据主要特点是: 相邻谱线之间相关性较弱, 对应位置的数据幅值变化很大; 每根谱线的主干涉区域是干涉条纹, 数据振荡变化; 在主干区域之外, 数据变化出现衰减特征。这种特殊的数据特点对小波变换是不利的, 所以直接使用基于小波变换的图像压缩算法对其进行压缩, 难以取得最佳效果。在认真分析干涉图像特点的基础上,

2006-03-14 收到, 2006-10-26 改回

国家自然科学基金重点项目(60532060), 海南省教育厅科研基金(Hjkj200602)和海南省自然科学基金(80551) 资助课题

本文提出一种基于数据分类和曲线拟合的超光谱图像数据分析方法,结合内嵌比特平面压缩算法实现压缩,使得无损或有损压缩都取得了更好的效果。

2 二次曲线拟合

干涉超光谱的非干涉区域具有缓慢变化的特点,使用曲线对数据进行逼近可以得到数据变化的主要规律。为了讨论方便起见首先介绍二次曲线拟合算法。

令观测数据集为 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, 现采用二次曲线对数据进行拟合, 函数形式如下

$$f(x) = a + bx + cx^2 \quad (1)$$

为了逼近实际数据集 Y , 选择代价函数为

$$s(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (a + bx_i + cx_i^2 - y_i)^2 \quad (2)$$

数值逼近就是使得函数逼近引入的误差为最小。对代价函数中的参数求偏导数, 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial a} &= 2 \sum_{i=1}^n (a + bx_i + cx_i^2 - y_i) = 0 \\ \frac{\partial s}{\partial b} &= 2 \sum_{i=1}^n x_i (a + bx_i + cx_i^2 - y_i) = 0 \\ \frac{\partial s}{\partial c} &= 2 \sum_{i=1}^n x_i^2 (a + bx_i + cx_i^2 - y_i) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上述方程表示为矩阵形式为

$$\mathbf{D} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{其中 } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & d_1 & d_2 \\ d_1 & d_2 & d_3 \\ d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix}, \quad d_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad d_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad d_3 =$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^3, \quad d_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^4, \quad z_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad z_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i, \quad z_3 =$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i, \quad \text{方程的解可以表示为}$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \frac{1}{d_2 d_4 + 2d_1 d_2 d_3 - d_2^3 - d_1^2 d_4 - d_3^2} \cdot \begin{bmatrix} z_1 d_2 d_4 + z_2 d_2 d_3 + z_3 d_1 d_3 - z_3 d_2^2 - z_2 d_1 d_4 - z_1 d_3^2 \\ z_2 d_4 + d_1 d_2 z_3 + z_1 d_2 d_3 - d_2^2 z_2 - d_1 z_1 d_4 - z_3 d_3 \\ d_2 z_3 + d_1 z_1 d_3 + d_1 d_2 z_2 - z_1 d_2^2 - d_1^2 z_3 - d_3 z_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中矩阵 \mathbf{D} 中所有元素的值都是由坐标确定的, 可以事先计算其行列式的值, 从而减少数据运算量。

3 光谱区域的分类

干涉光谱图像的一根谱线在不同区域, 数据特点不同。主要表现为: 主干涉区域呈现出振荡特性, 而主干涉光谱区域之外的数据出现缓慢变化的特点, 但是变化的趋势不同。

图 1(a)为一组典型的超光谱图像数据, 图 1(b)为主干涉光谱区域, 呈现出明显的振荡特点; 而主振荡区域两边的数据出现缓慢变化的特点, 如图 1(c)所示。根据这一特点, 对该类数据应当分类进行处理, 而数据分类的关键首先应当将数据的主干涉光谱区域提取出来, 下面讨论一种基于均方差测度的主光谱区域确定算法。

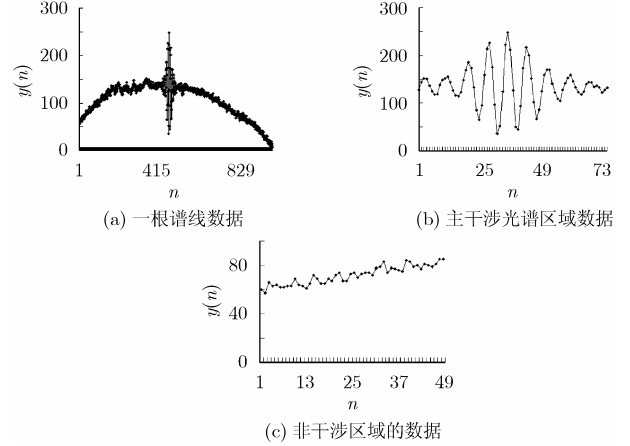


图 1 干涉光谱图像数据

将一组光谱曲线的数据分为相等的若干数据组, 每块数据长度相等, 对每组的数据分别进行二次曲线拟合, 以消除缓变成分对主干涉光谱区域确定的影响。令数据组为 N , 每组数据长度为 M 。每组数据经过二次曲线拟合后得到的差值数据表示为 $[e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{iM}]$, 其中 $i = 1, 2, \dots, N$ 为数据组编号。数据组 i 的差值数据对应的均方差为

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M e_{ij}^2 \quad (6)$$

定义各数据组的平均均方差为

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \quad (7)$$

根据数据组的方差与平均均方差之间关系可以直接对数据进行分类, 从而找出主干涉干涉区域, 即设定一个判决门限 T , 将满足下列关系的数据组定义为主干涉区域:

$$\frac{\sigma_i^2}{\sigma^2} > T \quad (8)$$

在此情况下, 判决门限的选择十分重要。由于光谱数据的复杂性, 一副光谱图像中不同谱线的光谱数据差异很大, 而不同光谱图像数据之间的差别更大, 在不能够进行交互式处理情况下, 采用上述统一门限进行判决是不可靠的, 所以主干涉区域确定不能够采用上述简单形式, 需要对上述方法进行修正。

由于主干涉区域的数据振荡特性十分明显, 对应的数据组的均方差很大, 为了避免使用同一判决门限进行判决, 可以采用二次均方差判决方式解决上述问题。先对数据组进行一次分类, 均方差大于平均均方差的数据组分为 1 类, 否则分为 0 类, 即

$$a_i = \begin{cases} 1, & \sigma_i^2 > \sigma^2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

计算 1 类数据组的平均均方差为

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i \sigma_i^2 \quad (10)$$

令判决门限 $T = \sigma_a^2$, $\sigma_i^2 > T$ 的区域作为主光谱区域的候选区域, 即

$$b_i = \begin{cases} 1, & \sigma_i^2 > T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

如果 $b_i = 1$, 则该区域为候选区域。为了准确确定主光谱区域, 防止偶然因素对主光谱区域确定的影响, 利用光谱图像的谱线进行总体判决, 即首先确定一个比例系数 α , 只有当某一数据区域在不同谱线中被判为候选区域的次数 m 满足下列关系才能够将对应区域判决为主光谱区域。

$$m > \alpha n$$

其中 n 表示一副超光谱图像的谱线数量。

4 分段曲线拟合与相似匹配

在主光谱区域确定以后, 就可以对光谱图像进行相应处理。对于非主光谱区域可以使用二次曲线逼近的方法对每条谱线先进行分析, 然后再结合小波变换进行进一步分析, 二次曲线表示了谱线缓慢变化的分量, 去除了谱线之间的突变成分, 为小波变换提供了较为平稳的数据。

设非主光谱区域的谱线曲线 i 的第 j 组数据进行曲线拟合, 得到拟合系数 a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , 这些系数是浮点的, 可以对这些拟合系数进行量化得到 \hat{a}_{ij} , \hat{b}_{ij} , \hat{c}_{ij} 。根据量化系数得到谱线各数据段的数据估计值为

$$\hat{y}(x) = \hat{a}_{ij} + \hat{b}_{ij}x + \hat{c}_{ij}x^2 \quad (12)$$

然后得到误差数据

$$e(x) = y(x) - \hat{y}(x) \quad (13)$$

对所有谱线的所有缓慢变化的数据区域进行类似处理, 从而得到差值图像。为了重建图像数据, 对这些量化后的拟合系数进行熵编码, 作为码流的一部分打包在码流中, 处理过程如图 2 所示。解码器得到这些拟合系数就可以使用式(11), 并且结合差值图像解码的结果对数据进行重建。显然为了重建图像, 曲线拟合系数应当进行无损压缩。

主光谱区域的数据呈现明显的振荡特点, 不能采用二次曲线拟合方法对信号进行分析, 但是这些振荡曲线之间存在明显的相似性, 可以利用相似性对数据进行处理。常用相关系数描述数据相似程度, 常用的相关系数为

$$\rho = \frac{\sum_i x_i y_i}{\sqrt{\sum_i x_i^2} \sqrt{\sum_i y_i^2}} \quad (14)$$

其中 x_i , y_i 表示两者待比较数据。这种定义能够充分反映数据之间的相似程度, 但需要进行开方运算, 尽管现代硬件处理技术能够有效进行浮点乘法、除法运算, 而没有提供开方

运算的快速算法。为了便于硬件实现, 不使用上述常用定义的相关系数表示两组数据的相关程度, 采用下面定义来描述系数之间的相关程度。

定义 1 对于均值为 0 的向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 定义正均值、负均值分别为

$$\mu^+(\mathbf{X}) = \frac{1}{n^+} \sum_i x_i u(x_i)$$

$$\mu^-(\mathbf{X}) = \frac{1}{n^-} \sum_i x_i u(-x_i)$$

其中 n^+ 、 n^- 分别表示向量元素为非负, 负系数的数量, $u(x)$ 为阶跃函数。

定义 2 对于给定门限 T_x , T_y , 定义两个变量的 x , y 一致性指数为

$$a(x, y) = \begin{cases} 1, & x \geq T_x \text{ 且 } y \geq T_y \text{ 或者 } x \leq T_x \text{ 且 } y \leq T_y \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

定义 3 对于给定的门限 T_x , T_y , 定义两个序列 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 的一致性指数为

$$A(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \sum_{i=1}^n a(x_i, y_i)$$

其中 $a(x_i, y_i)$ 为系数对 x_i, y_i 的一致性指数。

定义 4 对于给定门限 T_x , T_y , 定义序列 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 相对序列 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的相对一致性指数为

$$\gamma(\mathbf{Y} | \mathbf{X}) = \frac{A(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}{|\mathbf{Y}|_T}$$

其中 $|\mathbf{Y}|_T$ 表示绝对值大于门限 T_y 的元素数量。根据定义可知 $0 \leq \gamma(\mathbf{Y} | \mathbf{X}) \leq 1$ 。

定义 5 对于给定门限 T_x , T_y , 如果序列 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 相对于序列 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的相对一致性指数满足条件 $\gamma(\mathbf{Y} | \mathbf{X}) \geq \gamma_0$ (γ_0 为小于 1 的正数), 则序列 \mathbf{Y} 相对于序列 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的条件相关系数为

$$\rho = \frac{\mu^+(\mathbf{Y}) - \mu^-(\mathbf{Y})}{\mu^+(\mathbf{X}) - \mu^-(\mathbf{X})}$$

其中 $\mu^+(\cdot), \mu^-(\cdot)$ 分别表示正负均值。

根据定义可以看出, $\gamma(\mathbf{Y} | \mathbf{X})$ 反映了两组数据之间的符号一致性程度, 该值越大, 说明两组数据一致性越好; 而条件相关系数反映了两组数据平均值之比。所以 $\gamma(\mathbf{Y} | \mathbf{X})$ 和 ρ 能够较好反映两组数据之间的分布特性。将它们应用于主区域系数的分析, 其中向量 \mathbf{X} 表示干涉主区域数据中具有代表意义典型数据组, 通过样本的训练可以从干涉主区域数据中找出这些数据组, 然后分别与当前处理的数据组进行比较, 即寻找出最佳的一致性指数, 然后计算出对应的条件相关系数, 就可以利用典型数据组和条件相关系数一起对当前处理数据进行估计。

不失一般性, 设典型数据组共有 n 种, 分别为 $(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n)$, 当前待处理数据为 \mathbf{Y} , 根据定义 4 分别计算出相应的相对一致性指数 $\gamma(\mathbf{Y} | \mathbf{X}_i)$, 令 m 表示相对一致

性指数最大对应的典型数据组的编号，对应的条件相关系数为 ρ_m ，那么可以利用该序列对当前处理数据进行估计，得到估计向量为

$$\hat{Y} = \rho_m X_m \quad (15)$$

产生的估计误差向量为

$$e = Y - \hat{Y} \quad (16)$$

将选定的序列编号与对应的条件相关系数形成输出数据，而对产生的误差进行编码。由于估计产生的误差较小，有利于进行数据压缩，所以可以有效提高编码效率。

综合上述讨论得出如图 2 所示的编码算法：

(1) 首先根据二次均方差判决找出干涉主光谱区域，将其其它区域作为非干涉主光谱区域；

(2) 对主光谱区域数据进行相似匹配，记录相关参数 m 和 ρ_m ，并由式(16)计算出估计误差；

(3) 对非主光谱区域采用二次曲线拟合，记录相关参数 \hat{a}_{ij} ， \hat{b}_{ij} ， \hat{c}_{ij} ，根据式(13)计算出估计误差；

(4) 估计误差数据之间还存在一定相关性，利用小波进一步去除相关性；

(5) 对小波变换后的数据进行熵编码，然后与相关参数一起输出形成码流。

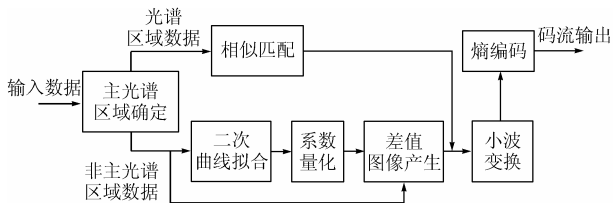


图 2 本文算法框图

5 实验结果与结论

使用多幅 12bit 的干涉图像对上述算法进行系统仿真，并利用 JPEG2000 对误差数据进行压缩。图 3 是小波变换与本文算法产生的部分系数概率分布曲线比较，可以看出本文算法产生的较小系数数量明显大于直接进行小波变换产生的小系数数量，这是因为曲线拟合能够很好描述了谱线变化规律，谱线的渐变规律被消除，同时不同谱线之间的数据也因此而相对平滑的结果。图 4 是对 Test5 分别采用 JPEG2000 和本文算法的重建图像的质量比较，可以看出在输出码率较大情况下，本算法重建质量提高了 2.5-4dB 左右，而在低码

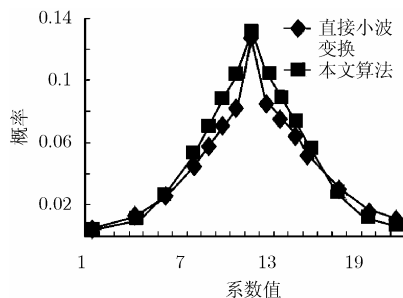


图 3 系数分布的比较

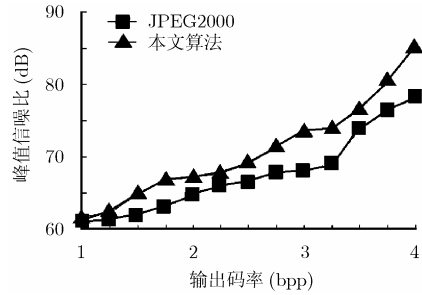


图 4 重建图像质量比较

率时，也提高了 0.6-3dB。

表 1 为本文算法与使用 JPEG2000 进行无损压缩输出码率比较，从表中可以看出本算法输出的码率(即描述每个像素所需的平均数据长度)明显减小，7 幅图像的码率相对减少了 0.2-0.4bpp。

表 1 本文算法与 JPEG2000, JPEG-LS 输出码率比较(单位: bpp-bit/像素)

图像	JPEG2000	JPEG-LS	本文算法
Test1	4.02	4.05	3.80
Test2	4.21	4.18	3.99
Test3	3.89	3.91	3.59
Test4	4.43	4.42	4.03
Test5	4.41	4.43	4.08
Test6	4.48	4.47	4.14
Test7	4.46	4.45	4.16

综上所述可以得出结论：由于本文算法对干涉超光谱的谱线进行分类处理，对主光谱区域的数据采用相似匹配方法进行估计，而对非主光谱区域采用二次曲线拟合的方法进行数据估计，然后对估计误差进行小波变换和熵编码，有效提高了该类图像无损压缩效率，同时提高了近无损和有损图像时重建图像的质量。曲线拟合和相似匹配都是谱线单独进行的，有利于硬件实现的并行处理；同时避免了相似匹配中的开方运算，有利于系统的硬件实现。

参考文献

- [1] 吴小华, 李自田, 张帆. 干涉超光谱图像分析与近无损压缩 CPLD 实现. 光子学报, 2005, 34(9): 1346-1351.
- [2] ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG1 FCD 14495 public draft, July 16, 1997; <http://www.jpeg.org/public/jpeglinks.htm>.
- [3] Wu Xiaojun. An algorithmic study in lossless image compression. Proceedings of the 1996 Data Compression Conference, Snowbird, Utah, April 1996: 150-159.
- [4] Golomb S W. Run-length encodings. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1966, 12(3): 399-401.
- [5] Weinberger M J, Seroussi G, and Sapiro G. LOCO-I: A low complexity, context-based, lossless image compression algorithm. Proceedings Data Compression Conference, Snowbird, Utah, April 1996:140-149.
- [6] Ranganathan N. A lossless image compression algorithm

- using variable block size segmentation. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995, 4(10): 1396-1406.
- [7] Rane S D and Sapiro G. Evaluation of JPEG-LS, the new lossless and controlled-lossy still image compression standard for compression of high-resolution elevation data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(10): 2298-2306.
- [8] Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(7): 1151-1170.
- [9] Taubman D, Ordentlich E, Weinberger M, and Seroussi G. Embedded block coding in JPEG 2000. *Signal Processing - Image Communication*, 2002, 17(1): 49-72.
- [10] Christopoulos C, Askelöf J, and Larsson M. Efficient methods for encoding regions of interest in the upcoming JPEG2000 still image coding standard. *IEEE Signal Processing Letters*, 2000, 7(9): 247-249.
- [11] Adams M D and Ward R. Wavelet transforms in the JPEG-2000 standard. in Proc. of IEEE Pacific Rim Conference, Victoria, BC, Canada, Aug. 2001: 160-163.
- 邓家先: 男, 1964 年生, 博士, 教授, 研究方向为图像压缩、自适应信号处理.
- 黄 艳: 女, 1960 年生, 副教授, 研究方向为信号处理.