

基于自适应分类曲线拟合的干涉多光谱图像压缩

王柯俨 李云松 吴成柯 宋娟

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要 分析了干涉多光谱图像数据的两个特性,并提出一种基于自适应分类曲线拟合的压缩算法。首先采用均方差准则自适应地将干涉多光谱图像分为强、弱两类干涉区域,并分别构造不同的拟合函数。对强干涉区域,选择典型曲线,并采用最小二乘原理对典型曲线进行拟合,而其余曲线则根据典型曲线进行匹配预测;对弱干涉区域,则分别对所有干涉光强曲线独立进行拟合。最后将所有误差数据进行熵编码。实验结果表明,与 JPEG2000 相比,该算法能够减少无损压缩输出码率约 0.2 bit/pixel,明显提高有损压缩的重建图像质量,降低光谱失真。

关键词 干涉成像光谱仪;干涉多光谱图像;图像压缩;分类;曲线拟合

中图分类号 TN919.81 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0078

Compression of Interference Multispectral Image Based on Adaptive Classification and Curve-Fitting

Wang Keyan Li Yunsong Wu Chengke Song Juan

(National Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract By analyzing two characteristics of an interference multispectral image data, a compression algorithm based on adaptive classification and curve-fitting is proposed. The image is partitioned adaptively into intensive interference region and weak interference region by the mean square deviation criterion. Different fitting functions are constructed for the two regions respectively. For the intensive interference region, some typical interference curves are selected to predict other curves, and they are fitted by least square method. For the weak interference region, the data of each interference curve are approximated independently. Finally all the approximating errors of two regions are entropy coded. The experimental results show that, compared with JPEG2000, the proposed algorithm not only decreases the average output bit-rate by about 0.2 bit/pixel for lossless compression, but also improves the reconstructed images and reduces the spectral distortion, especially at high bit-rate for lossy compression.

Key words interference spectrometer; interferential multispectral image; image compression; classification; curve-fitting

1 引 言

干涉型光谱仪是一种新型的遥感仪器,能够获得丰富的被测目标的空间和光谱信息,可定性定量地对被测目标进行物理分析和识别,在环境监测、资源勘测、航空航天遥感以及深空探测等领域具有广泛的应用价值^[1]。我国的“环境一号”、“嫦娥一号”卫星上都采用了这种成像光谱仪^[2]。但由于其产生

的干涉多光谱图像的数据量非常庞大,对数据传输及存储都造成极大的压力,因此必须对该类图像进行高效的压缩,在压缩过程中不仅要求在一定压缩比下恢复高质量图像,更要保证恢复的光谱信息失真尽可能小^[3]。

目前针对干涉多光谱图像的压缩技术大多直接应用连续色调图像的压缩算法。通常的连续色调图

收稿日期: 2008-09-22; 收到修改稿日期: 2008-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(60532060,60507012,60802076)和西安电子科技大学博士创新基金(创 05025)资助课题。

作者简介: 王柯俨(1980-),女,讲师,博士研究生,主要从事遥感及光谱图像的压缩编码技术等方面的研究。

E-mail: kywang@mail.xidian.edu.cn

导师简介: 吴成柯(1938-),男,教授,博士生导师,主要从事图像通信及图像处理等方面的研究。

E-mail: ckwu@xidian.edu.cn

像在水平和垂直方向都具有很强的相关性,无论采用预测还是变换的分析方法,都能够有效地去除数据之间的冗余。目前流行的基于自适应预测的编码技术^[4~6],如 JPEG-LS 标准及其改进算法,以及基于小波变换的图像压缩算法^[7~9],如 SPIHT 算法和 JPEG2000 标准等,都可以对连续色调图像进行高效地有损或无损压缩。然而干涉多光谱图像并不具备这样的数据特性,直接采用上述算法难以对干涉多光谱图像取得最佳的压缩效果。一些针对干涉多光谱图像的改进算法^[3,10~15]虽然在一定程度上提高了恢复图像质量,但由于算法本身还是建立在小波分解的基础上,因此难以克服小波变换对干涉多光谱图像数据分析时的不足。

本文在研究分析干涉多光谱图像数据特性的基础上,提出一种自适应分类曲线拟合的数据分析方法,结合内嵌比特平面编码方法,实现了对干涉多光谱图像的高效有损及无损压缩。

2 成像原理及图像数据特性分析

与传统色散型成像光谱仪所不同的是,干涉成像光谱仪将入射光线分解为具有一定光程差 (optical path difference, OPD) 的光线并进行叠加,使得在 CCD 探测器上得到的不再是目标的直接图像,而是目标的“干涉图像”,称为干涉多光谱图像。对干涉多光谱图像进行傅里叶变换可以得到目标点的光谱分布,从而获得一维光谱和一维空间信息。当干涉成像光谱仪推扫过目标像时,即可获得另一维空间信息^[1]。

2.1 成像原理

干涉成像光谱仪的等效光路模型如图 1 所示。

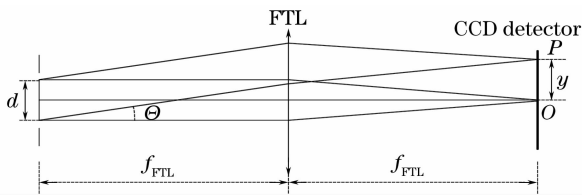


图 1 等效光路图

Fig. 1 Equivalent optical path

其中 d 为光束被分割后的剪切量, f_{FTL} 为傅里叶透镜的焦距, 探测器 O 点的光程差为零, 任意点 P 的光程差为

$$x = d \sin \theta = yd / f_{FTL}. \quad (1)$$

当光源具有一定的光谱分布, 即波数范围 $\Delta\nu = \nu_{\max} - \nu_{\min}$ 时, P 点的干涉光强可表示为

$$I(x) = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} B(\nu) \cos(2\pi\nu x) d\nu = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} B(\nu) \cos(2\pi\nu yd / f_{FTL}) d\nu, \quad (2)$$

其中 $B(\nu)$ 为入射光谱强度分布。

根据傅里叶变换光谱学的基本关系式, 光源的光谱分布可由干涉光强的傅里叶变换求得, 即

$$B(\nu) = \int_0^{\delta_m} I(x) \cos(2\pi\nu x) dx = \int_0^{\delta_m} I(x) \cos\left(\frac{2\pi\nu yd}{f_{FTL}}\right) dx, \quad (3)$$

其中 δ_m 表示最大光程差。

2.2 成像特性分析

图 2(a) 为某一干涉成像光谱仪在 CCD 探测器上所成的一幅干涉多光谱图像, 其列方向为光谱分辨率方向, 而行方向为空间分辨方向。我们把图中每一列曲线称之为干涉光强曲线, 它表示了同一地物点在不同光程差下干涉强度的变化, 如图 2(b) 所示。

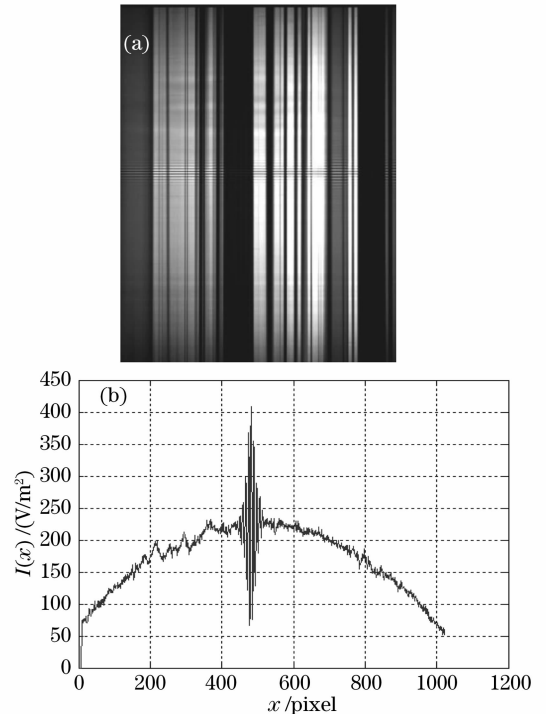


图 2 (a) 干涉多光谱图像; (b) 干涉光强曲线

Fig. 2 (a) Sample of interference multispectral image;

(b) curve of interferogram

干涉多光谱图像数据的一个显著特点就是, 干涉光强在光程差为零时达到最大值, 且在零光程差附近, 光强的调制度大, 数据震荡剧烈, 干涉条纹明

显,而随着光程差的增大,干涉强度逐渐降低,数据变化呈现一种较为缓慢的衰减趋势。

文献[12]经推导得到干涉光强 $I(x)$ 具有如下特性

$$I(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sin[(x-x_0)\tau_c/2]}{x-x_0} = \tau_c \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \text{Sa}\left[\frac{(x-x_0)\tau_c}{2}\right]. \quad (4)$$

(4)式是理想情况下干涉光强曲线的表达式,它表明干涉光强曲线的包络是一个 Sa 函数,主瓣宽度为 $4\pi/\tau_c$,中心频率为 x_0 。这些参数是由干涉成像光谱仪的仪器参数所决定。因此由同一光谱仪所产生的干涉多光谱图像的每条干涉光强曲线的包络是大致相同的。尽管随着不同波长的入射光强度的变化,干涉光强曲线的包络会有所改变,但整体来说,仍具有类似 Sa 函数的形状。干涉光强曲线的这种包络形状对我们选择适当的拟合函数提供了理论依据。

2.3 数据相关性分析

干涉多光谱图像不同于一般的遥感图像,有其自身特有的数据相关性。由 2.1 节的成像原理可知,干涉多光谱图像数据包含 2 维空间信息和 1 维光谱信息,因此理论上它具有 3 维的可压缩性,但是实际上干涉图像之间的相关性比较低且动态范围比较大^[4],因此只考虑一幅图像内部的相关性。根据 2.2 节可知,一幅干涉多光谱图像的行与行之间具有光谱相关性,而各列干涉光强曲线之间具有空间相关性。相关性的大小常用相关系数 ρ 来衡量,即

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5)$$

式中 x_i 和 y_i 分别表示待比较的数据, \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示 x_i 和 y_i 的均值。图 3 分别给出了图 2(a) 的干涉多光谱图像在光谱维和空间维的相关系数。由图 3 可见,干涉多光谱图像在光谱维的相关性很强且很稳定,而空间维相关性则较差且动态范围较大。但是,对同一幅干涉多光谱图像而言,不同区域内的空间维相关性却有很大差别,具体表现为,在零光程差附近,相邻像点的干涉光强曲线的相关性较强,而在光程差较大的其余区域,其相关性则较弱,如图 4 所示。这是干涉多光谱图像数据的另一个特性。

根据上述两个特性,提出一种自适应分类曲线拟合的数据分析方法,结合内嵌比特平面编码方法,实现了对干涉多光谱图像的有损及无损压缩。

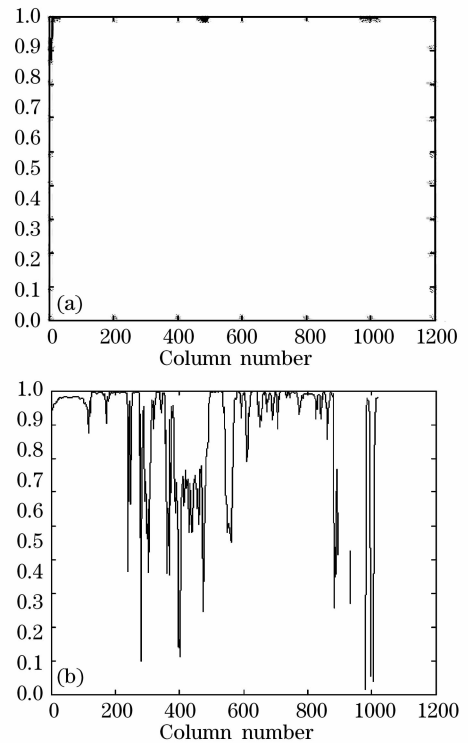


图 3 (a)光谱维相关系数;(b)空间维相关系数

Fig. 3 Correlation coefficients of Fig. 2(a) in (a) spectral dimension; (b) spatial dimension

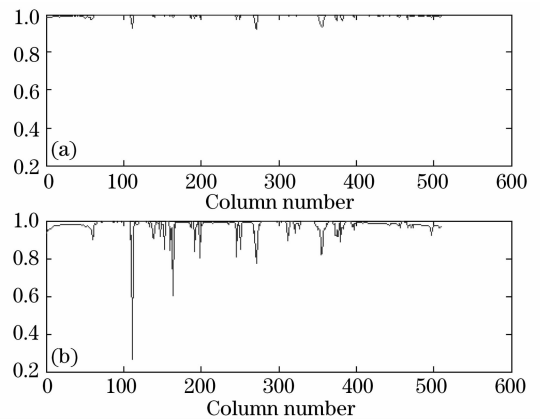


图 4 不同区域内的空间维相关系数。(a)零光程差附近区域;(b)其余区域

Fig. 4 Spatial correlation coefficients of different regions. (a) Region around the location of zero-OPD; (b) rest regions

3 干涉区域分类

为了有效地对数据进行描述,根据干涉光强曲线在不同光程差下的数据变化规律,将干涉多光谱图像划分为两类干涉区域分别处理:一类是在零光程差附近的干涉现象强烈的区域,称为强干涉区,记为 G_q ;另一类就是强干涉区之外的区域,称为弱干

涉区,记为 G_r 。下面讨论一种基于均方差测度的干涉区域分类方法,该方法可以自适应地对干涉区域进行分类。

由于干涉光强曲线数据具有缓变成分,如图 2(b)所示,因此在分类前首先对其进行一阶差分预处理,以消除缓变成分对干涉区域分类造成的影响。设一条干涉光强曲线数据为 x_k ,对 x_k 进行如下差分处理得 y_k

$$y_k = \begin{cases} 0, & k = 0 \\ x_k - x_{k-1}, & k \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

然后将 y_k 分为长度相等的 N 组,每组数据长度为 L 。设第 i 组数据表示为 $[y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iL}]$,其中 $i = 1, 2, \dots, N$,则该组数据的均值 \bar{y}_i 和均方差 σ_i^2 分别为

$$\bar{y}_i = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L y_{ij}, \quad \sigma_i^2 = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L (y_{ij} - \bar{y}_i)^2. \quad (6)$$

定义所有 N 组数据的平均均方差为

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

那么根据各组数据的均方差 σ_i^2 和平均均方差 $\bar{\sigma}^2$ 的比例关系就可以直接对数据进行分类,即设定一个判决门限 T ,将满足 $\sigma_i^2 / \bar{\sigma}^2 > T$ 的数据组划分为强干涉区域,则其余数据组划分为弱干涉区域。在这种情况下,判决门限的选择至关重要。然而不同干涉光强曲线数据之间的差异以及不同干涉多光谱图像数据之间的差异都很大,所以采用统一的判决门限进行分类并不可靠。为了解决这一问题,提出二次均方差判决方法进行自适应分类。

首先对 N 组数据进行预分类,分类规则如下

$$a_i = \begin{cases} 1, & \sigma_i^2 > \bar{\sigma}^2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

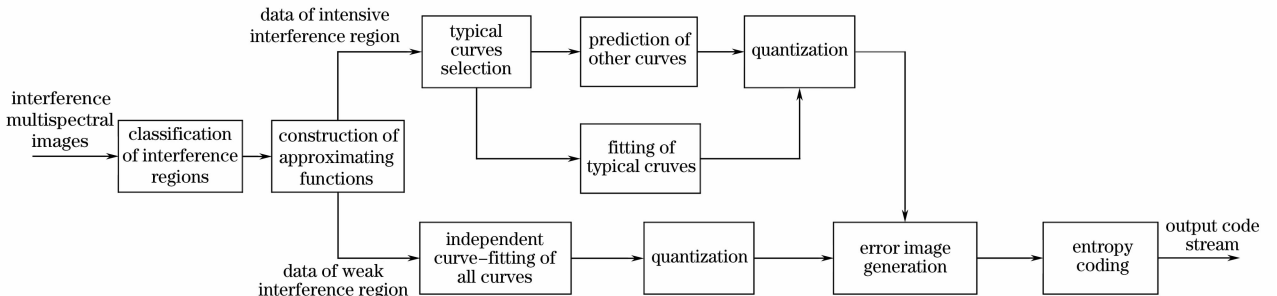


图 5 压缩算法框图

Fig. 5 Sketch of the proposed compression approach

4.1 构造拟合函数

由 2.2 节可知,理想的干涉光强曲线包络具有 Sa 函数的形状,因此可以采用 Sa 函数作为拟合函

即均方差大于平均均方差的数据组分为 1 类,否则为 0 类。然后计算第 1 类数据组的平均均方差为

$$\bar{\sigma}_1^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N a_i} \sum_{i=1}^N a_i \sigma_i^2. \quad (9)$$

令判决门限 $T = \frac{1}{2} (\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}^2)$,将 $\sigma_i^2 > T$ 的区域作为强干涉区域的候选区域,即有

$$b_i = \begin{cases} 1, & \sigma_i^2 > T \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

若 $b_i = 1$,则该区域为强干涉区域的候选区域。为准确确定强、弱干涉区域的位置,防止偶然因素造成的判断不准确,我们利用整幅干涉多光谱图像内的所有干涉光强曲线进行总体判决,即统计某一数据区域在不同干涉光强曲线中被判为强干涉区域候选区域的次数 m ,只有当满足 $m > \alpha n$ 时,该区域才被判决为强干涉区域,其中 n 表示一幅干涉多光谱图像的干涉光强曲线的个数, α 为判决比例系数。

4 分类曲线拟合

确定了强、弱干涉区域的位置后,就可以对干涉多光谱图像进行分类处理。针对两类干涉区域内的图像数据特性,分别构造不同的拟合函数,并采用不同的拟合方式进行曲线拟合。对强干涉区域,首先选择典型曲线,并采用最小二乘方法对其进行数据拟合,而其余干涉光强曲线则根据典型曲线进行匹配预测;对弱干涉区域,则分别对所有干涉光强曲线独立进行拟合。最后将所有误差数据进行熵编码,并与相关参数一起输出形成码流。压缩算法的系统框图如图 5 所示。

数。但是在实际应用中,由于光学成像系统带来的相面不均匀性,导致其包络会出现类似斜坡的缓慢变化,如图 2(b)所示。这一缓慢变化趋势对应干涉

光强曲线中的低频缓变分量。针对这一特点,在构造拟合函数时不能采用单一的函数形式,而应根据数据在不同区域的变化趋势,分别构造不同形式的拟合函数。

在零光程差附近,也就是在强干涉区域内,干涉光强曲线数据呈现明显的震荡特点,其包络主要表现为类似 Sa 函数的形式,但由于光学成像系统带来的不均匀性的影响,导致数据包络中含有低频分量,为了更好地进行曲线拟合,需要对数据进行预处理,以去除包络中的低频分量。考虑到强干涉区域的范围比较小,低频分量可以近似为直流分量,所以采用电平移位的方法,对每条干涉光强曲线的强干涉区域数据进行去直流预处理,即

$$y'_i = y_i - \bar{y}, \quad (11)$$

式中 y_i 表示强干涉区域数据, \bar{y} 为 y_i 的均值,它表示了干涉光强曲线的直流分量, y'_i 为电平移位后的强干涉区域数据。通过上述预处理,去除了曲线之间的突变成分,为后续量化编码提供较为平稳的数据。对 y'_i 进行分析可知,其包络接近于余弦函数调制的 Sa 函数形式,因此构造

$$f_1(x) = a_1 \cos(b_1 x) \frac{\sin(c_1 x)}{x} + d_1, \quad (12)$$

作为强干涉区域曲线数据的拟合函数,其中 a_1 , b_1 , c_1 , d_1 分别为拟合系数。

对弱干涉区域而言,其受成像系统的影响则比较显著,数据特性与强干涉区域截然不同,表现为数据波动幅度不大,但幅值随光程差的增加而呈现类似斜坡形式的缓慢衰减,其包络则近似为二次曲线的形式,故对弱干涉区域曲线数据采用二次曲线作为其拟合函数,即

$$f_2(x) = a_2 x^2 + b_2 x + c_2, \quad (13)$$

式中 a_2 , b_2 , c_2 分别为拟合系数。

4.2 曲线拟合

根据 4.1 节构造的拟合函数,分别对强、弱干涉区域数据进行曲线拟合。由 2.3 节可知,在强干涉区域内干涉多光谱图像的空间维相关性较强,而在弱干涉区域内则较差。根据这一特性,在曲线拟合时应该对强、弱干涉区域数据分别采用不同的拟合方式。

4.2.1 弱干涉区域曲线数据拟合

首先讨论弱干涉区域数据的拟合方式。由于弱干涉区域内数据的空间维相关性较差,故而忽略其空间维的相关性,采用(13)式的拟合函数,对所有干涉光强曲线独立地进行二次曲线拟合。在拟合过程

中,如果每次拟合的数据过多,则拟合效果相对较差,不能充分去除局部数据之间的相关性;而如果每次拟合的数据太少,则拟合的次数就比较多,尽管拟合的效果会很好,但是会产生较多的拟合系数,不利于后续压缩。因此,合理选择曲线拟合的数据组的大小是分段二次曲线拟合取到良好压缩效果的关键。

设弱干涉区域的第 i 条干涉光强曲线的第 j 组数据 y_{ij} 进行二次曲线拟合后,得到浮点形式的拟合系数 $a_{2,ij}$, $b_{2,ij}$, $c_{2,ij}$, 对这些系数进行量化后得到 $\hat{a}_{2,ij}$, $\hat{b}_{2,ij}$, $\hat{c}_{2,ij}$ 。根据量化系数可以得到干涉光强曲线的相应数据段的估计值

$$\hat{y}_{ij} = \hat{a}_{2,ij} x^2 + \hat{b}_{2,ij} x + \hat{c}_{2,ij}, \quad (14)$$

进而得到误差数据

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}. \quad (15)$$

按照上述方法对所有干涉光强曲线的各个数据组进行类似处理,从而可以得到弱干涉区域的误差图像。

4.2.2 强干涉区域曲线数据拟合

对于强干涉区域而言,干涉光强曲线数据的空间相关性比较强,表现为相邻干涉光强曲线存在明显的相似性,因此可以充分利用这种相似性对数据进行去相关处理。其基本思想是,首先根据相关系数的大小,在强干涉区域中挑选典型干涉光强曲线,这些曲线表示了强干涉区域内具有代表意义的典型数据。然后依次将其他干涉光强曲线分别与所有典型曲线进行比较,选择相关性最强的典型曲线来对当前干涉光强曲线进行线性预测。而所有典型曲线则采用(12)式的拟合函数分别进行曲线拟合。

挑选典型干涉光强曲线的方法如下:

1) 选定第 0 条干涉光强曲线作为典型曲线的候选曲线;

2) 根据(4)式依次计算相邻干涉光强曲线的相关系数 ρ_i , $i = 1, 2, \dots, n-1$, n 为干涉光强曲线的总个数;

3) 如果相关系数 $\rho_i < T_\rho$, 则将第 i 条干涉光强曲线作为典型曲线的候选曲线;这里 T_ρ 是一个经验门限值;

4) 计算典型曲线的候选曲线的相关系数矩阵 $\rho^{(c)}$, 剔除其中与其他候选曲线具有较强相关性的候选曲线,以保证典型曲线之间相关性较低。

通过上述步骤,就可以从强干涉区域内选出典型曲线。通过调整门限,控制典型曲线的数目在 4 个左右,此时上述方法的计算复杂度可以接受。

不失一般性,假设典型曲线共有 t 条,分别记作 (X_1, X_2, \dots, X_t) ,设当前处理的其他干涉光强曲线数据为 Y 。定义与 Y 具有最大相关系数的典型曲线为最佳匹配曲线,记为 X_m ,这里 $1 \leq m \leq t$,表示最佳匹配曲线的序号。根据最佳匹配曲线 X_m 对当前干涉光强曲线 Y 进行线性预测,得到 Y 的估计值为

$$\hat{Y} = p_m X_m, \quad (16)$$

其中 p_m 为预测系数,则相应的预测误差为

$$e = Y - \hat{Y}. \quad (17)$$

最后对典型曲线独立进行拟合。类似地,可以得到第 i 条典型曲线 X_i 的估计值为

$$\hat{X}_i = a_{1,i} \cos(\hat{b}_{1,i} x) \frac{\sin(\hat{c}_{1,i} x)}{x} + \hat{d}_{1,i}, \quad (18)$$

式中 $a_{1,i}, \hat{b}_{1,i}, \hat{c}_{1,i}, \hat{d}_{1,i}$ 分别为量化后的拟合系数,从而得到拟合误差数据为

$$e_i = X_i - \hat{X}_i. \quad (19)$$

4.3 熵编码及码流组织

对强、弱干涉区域产生的所有误差数据进行熵编码。由于拟合或预测产生的误差较小,有利于进行数据压缩,所以可以有效提高编码效率。需要注意的是,由于在强干涉区域数据的处理过程中,采用典型曲线来预测其余干涉光强曲线,因此为了避免重建时的误差扩散,需要对典型曲线的拟合误差单独进行无损压缩。而其余误差数据则采用比特平面编码技术进行熵编码,直接采用优化截取内嵌块编码(Embedded block coding with optimized truncation, EBCOT)算法^[8],该算法是 JPEG2000 压缩标准的核心算法^[9],具有良好的压缩性能。

另外,在解码端重建图像时,解码器将根据量化后的拟合系数结合差值图像的解码结果对数据进行重建,因此在编码端必须将相关参数,比如所有的量化后的拟合系数、各典型曲线的直流均值及其在整幅图中的位置、其他干涉光强曲线的最佳匹配曲线的序号 m 以及预测系数 p_m 等进行无损压缩并作为码流头输出。

5 实验结果

采用我国自行研制的某干涉成像光谱仪所拍摄连续 80 幅干涉多光谱图像对上述算法进行系统仿真,图像分辨率大小为 $512 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,每像素深度为 12 bit。分别比较本文算法和 JPEG2000 在无损和有损压缩时的性能。其中 JPEG2000 采用 3 级 $5/3$ 小波分解。

的系数分布直方图,从图中可以看出,本文算法产生的小幅值的系数,特别是幅值为 0 左右的系数的数据量明显大于直接进行小波变换而产生的小波系数的数量,这是因为小波变换对干涉光强曲线数据的分析具有一定的局限性,即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中等幅值的系数;而数据的急剧变化,比如震荡,则会在高频子带内产生幅值很大的系数,不利于图像压缩。另外,干涉多光谱图像的空间相关性较弱,尤其是在弱干涉区域内,相邻干涉光强曲线数据之间的突变也会产生许多幅值较大的系数。而本文提出的曲线拟合的方法则能够很好地描述干涉光强曲线数据的变化规律,不同于干涉光强曲线之间的数据也相对平滑,因此本文算法比小波变换具有更好的去相关能力。

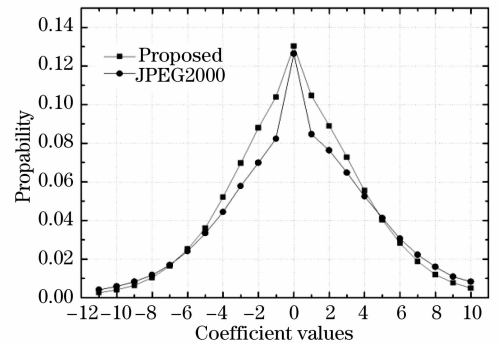


图 6 系数分布直方图

Fig. 6 Histogram of coefficients

无损压缩的输出比特率结果如图 7 所示。与 JPEG2000 相比,本文算法明显降低了无损压缩的输出比特率,平均减少量为 0.2 bit/pixel 左右。可见本文算法明显提高对干涉多光谱图像的无损压缩性能。

图 8 给出了在有损压缩时分别采用本文算法与 JPEG2000 得到的重建图像的质量,即峰值信噪比 PSNR。从图中可以看出,本算法的性能在任何比特率下均优于 JPEG2000,尤其在在高比特率情况下。

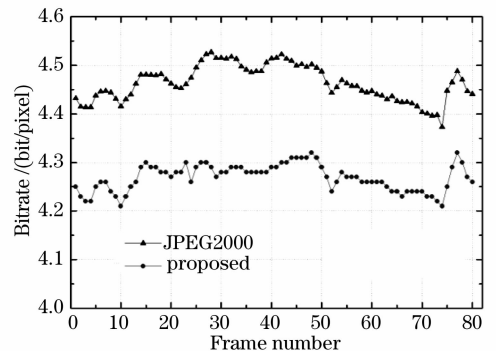


图 7 无损压缩输出码率比较

Fig. 7 Comparison of output bitrate for lossless compression

在码率为 4 bit/pixel, 对应 3 倍压缩时, 本算法的平均 PSNR 比 JPEG2000 提高了 4 dB 以上。

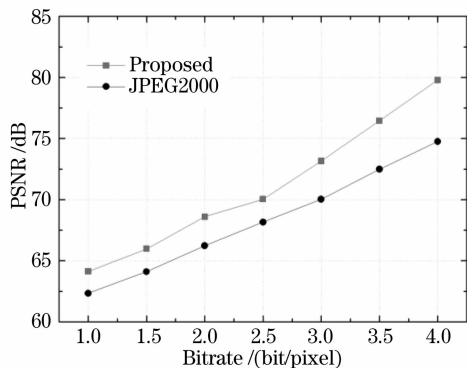


图 8 重建图像的平均峰值信噪比比

Fig. 8 Comparison of average PSNR between JPEG2000 and the proposed method

对于干涉多光谱图像压缩而言, 不仅要考虑图像域的重建质量, 更要考虑傅里叶域的光谱失真。因此下面我们从光谱恢复的角度, 采用光谱曲线的相对二次误差 (RQE)^[16] 来比较两种算法的性能。相对二次误差反映了压缩前后光谱数值的差异, 其计算公式如下

$$n_{RQE} = \frac{\sqrt{\int_0^{0.5} |S^*(\tilde{f}) - S(\tilde{f})|^2 d\tilde{f}}}{\int_0^{0.5} S(\tilde{f}) d\tilde{f}}, \quad (20)$$

式中 $S(\tilde{f})$ 和 $S^*(\tilde{f})$ 分别表示原始光谱以及压缩后恢复光谱, \tilde{f} 为归一化频率 ($0 < \tilde{f} < 0.5$)。图 9 显示了图 2(a) 所对应的干涉多光谱图像在 4 bit/pixel 下采用两种算法得到的压缩恢复图像经过傅里叶变换后的恢复光谱曲线的相对二次误差。其中 JPEG2000 的 RQE 均值是 0.44%, 本算法是 0.24%, 本算法的 RQE 比 JPEG2000 减少了近 1

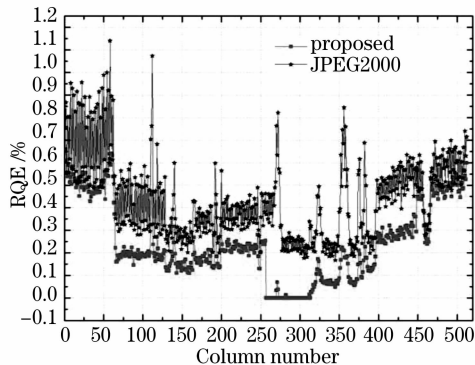


图 9 恢复光谱相对二次误差比较

Fig. 9 RQE comparison between JPEG2000 and our algorithm

倍, 可以看出本算法很好的保护了光谱信息, 在恢复光谱上具有更好的分辨率效果, 更适合于干涉多光谱图像的压缩。

6 结 论

针对小波变换在对干涉多光谱图像数据分析上的缺陷与不足, 提出一种自适应分类曲线拟合的压缩方法。首先自适应地将干涉多光谱图像分为强、弱两类干涉区域, 其次根据两类区域内数据的分布特性和相关性特性, 采用不同的拟合函数和拟合方式分别进行处理, 最后对所有的量化后的误差数据进行熵编码。本算法兼容无损和有损压缩, 并且有效地提高了压缩效率, 与传统的基于小波变换的压缩方法, 如 JPEG2000 相比, 其无损压缩的输出比特率平均减少了 0.2 bit/pixel, 而有损压缩重建图像的 PSNR 明显提高, 且光谱失真 RQE 显著降低。

参 考 文 献

- Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 18~22
相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. *光学学报*, 1998, **18**(1): 18~22
- Xiangli Bin, Yuan Yan. Some aspects of the data processing of the single sided interferogram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1869~1874
相里斌, 袁 艳. 单边干涉图的数据处理方法研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1869~1874
- Zhou Youxi, Li Yunsong, Wu Chengke. Environment satellite multispectral images compression algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 336~340
周有喜, 李云松, 吴成柯. 环境卫星多光谱图像压缩算法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 336~340
- Wu Xiaohua, Li Zitian, Zhang Fan. Analysis and near-lossless compression based on CPLD of interference hyperspectral image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1346~1351
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[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1346~1351
- Xiaolin Wu. An algorithmic study on lossless image compression [C]. *Proc. of Data Compression Conference*, Utah, April 1996. 150~159
- Shantanu D. Rane, Guillermo Sapiro. Evaluation of JPEG-LS, the new lossless and controlled-lossy still image compression standard, for compression of high-resolution elevation data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(10): 2298~2306
- A. Said, W. A. Pearlman. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees[J]. *IEEE Trans. on Circuits and System for Video Technology*, 1996, **6**(3): 243~249
- D. Taubman. High performance scalable image compression with EBCOT[J]. *IEEE Trans. on Image Proc.*, 2000, **9**(7): 1158~1170
- Boliek M. JPEG 2000 part I final draft international standard (corrected and formatted). ISO/IEC J TC1/SC29 WG1, 2000, September 25

- 10 Jiang Xiao, Chengke Wu. Interference multispectral image compression using a new JPEG2000 region-of-interest coding method[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(4): 838~842
- 11 Deng Jiaxian, Wu Chengke, Chen Jun. Multi-spectral image compression based on rate-distortion slope lifting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 299~303
邓家先, 吴成柯, 陈 军. 基于率失真斜率提升的干涉多光谱图像压缩[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 299~303
- 12 Ma Jing, Wu Chengke, Chen Dong *et al.*. Compression of interference multispectral image based on weighted rate-distortion optimization for SPIHT[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 430~436
马 静, 吴成柯, 陈 东等. 基于加权率失真优化 SPIHT 算法的干涉多光谱图像压缩[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 430~436
- 13 Keyan Wang, Chengke Wu, Fanqiang Kong *et al.*. Improved partial SPIHT with classified weighted rate-distortion optimization for interferential multispectral image compression [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5): 327~330
- 14 Li Yunsong, Kong Fanqiang, Wu Chengke *et al.*. Interference multi-spectral image compression based on distributed source coding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1463~1468
李云松, 孔繁锵, 吴成柯等. 基于分布式信源编码的干涉多光谱图像压缩[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1463~1468
- 15 Li Yunsong, Ma Jing, Wu Chengke. Three-dimensional orientation prediction-based wavelet transform for interference multi-spectral images compression[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2281~2287
李云松, 马 静, 吴成柯. 基于方向角预测三维小波变换的干涉多光谱图像压缩[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2281~2287
- 16 Corinne Mailhes, Paul Vermande, Francis Castanie. Spectral image compression[J]. *J. Optics*, 1990, **12**(3): 121~132