

文章编号: 0253-2239(2007)03-0430-7

基于加权率失真优化 SPIHT 算法的 干涉多光谱图像压缩*

马 静 吴成柯 陈 东 周有喜 王柯伊

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

摘要: 基于空间调制型成像光谱仪的成像特点,提出了一种适合于干涉多光谱图像的加权率失真优化多级树集合分裂(SPIHT)光谱压缩算法。该算法根据干涉多光谱图像在时域和频域的特点,推导出时域中随着光程差的增大,干涉图像对频域中光谱曲线的形状影响越大。因此,在光程差方向上,逐渐提升率失真函数的斜率,增大对图像的保护程度,不仅弥补了 SPIHT 算法在码率分配上的不足,而且有效地保护了频域中的光谱信息。实验结果表明,无论在时域还是频域,该算法与现有算法相比,性能有明显改进。

关键词: 信息光学;干涉多光谱图像压缩;SPIHT;率失真优化截取;空间调制型光谱仪

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A

Compression of Interference Spectral Image Based on Weighted Rate-Distortion Optimization for SPIHT

Ma Jing Wu Chengke Chen Dong Zhou Youxi Wang Keyan

(State Key Laboratory on Integrated Service Networks, Xidian University, Xian 710071)

Abstract: Based on the imaging characteristics of the spatially modulated imaging interferometer, the new compression method for interference spectral images, weighted rate-distortion optimization for set partitioning in hierarchical trees (SPIHT), is proposed. According to the image features in time and frequency domain, it is deduced by the proposed method that, with the increase of the optical path difference in time domain, the effect of interference spectral images on the spectral curve profile in frequency domain is increasing. In the optical path difference direction, the slope ratio of rate distortion is lifted increasingly, and the protection for images is enhanced, which not only makes up the deficiency of code rate distribution in SPIHT, but also protects the spectral information in frequency domain efficiently. The experimental results show that the proposed algorithm achieves improved performance over the conventional algorithm in time and frequency domain.

Key words: information optics; interference spectral image compression; set partitioning in hierarchical trees; rate-distortion optimized truncation; spatially modulated imaging interferometer

1 引 言

成像光谱仪作为空间遥感领域中最强有力的工具之一,越来越受到各国政府的重视。目前,成像光谱仪主要有三种类型:色散型、干涉型和计算机层析型。专家预测,干涉型成像光谱仪将成为下一代实用化成像光谱技术的代表^[1]。

20 世纪 90 年代发展起来的依靠探测器阵列扫

描的空间调制干涉成像光谱仪(Spatially modulated imaging interferometer, SMII)是干涉型成像光谱仪的一种,它以高通量、多通道和高光谱分辨率等优点具有十分重要的研究和应用价值。然而 SMII 在获得以上优点的同时,产生的数据量非常大,在探测幅宽为 20 km,地面分辨力为 20 m 的情况下,产生的数据速率就达到 1.4 Gbps。由于对探测范围和地面

* 国家自然科学基金(60532060,60507012)资助课题。

作者简介: 马 静(1982—),女,西安人,博士研究生,主要从事遥感图像的压缩编码技术研究。

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

导师简介: 吴成柯(1938—),男,安徽黄山人,教授,博士生导师,主要从事图像传输与压缩方面的研究。

E-mail: ckwu@xidian.edu.cn

收稿日期: 2006-04-21; 收到修改稿日期: 2006-06-06

分辨力的要求越来越高,而信道资源十分有限,因此无法满足 SMII 干涉多光谱图像实时传输的要求^[2]。所以研究 SMII 干涉多光谱图像高效压缩方法成为 SMII 能否获得广泛应用的关键。光谱压缩通常采用三种方法:矢量量化^[3]、预测编码^[4]和变换编码^[5]。然而这些算法并没有充分利用 SMII 在时域和频域以及光谱应用的特点。

SMII 干涉多光谱图像通常用于资源勘测、科学实验、环境监测、军事侦察等方面。在这些应用中主要对物质进行分类识别。因此本文利用光谱物质分类识别的特征和干涉多光谱图像在频域上的特点,提出了对不同光程差的像点采用加权的率失真优化截取多级树集合分裂(SPIHT)算法(Weighted rate-distortion optimization for SPIHT, WRDO-SPIHT)。这一算法不仅改善了 SPIHT 算法的压缩效果,而且使干涉多光谱图像中的光谱信息和空间信息在压缩时达到良好的平衡,这样不但得到很好的空间信息而且有效地保护了光谱信息。

2 空间调制干涉成像光谱仪成像原理

2.1 光学成像原理及图像特征

SMII 的等效光路图如图 1 所示。 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

$$x = d \sin \theta = \frac{yd}{f_{FTL}},$$

当波数范围 $\Delta\nu = \nu_{\max} - \nu_{\min}$ 时,干涉光强表达式为

$$I(x) = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} B(\nu) \cos(2\pi\nu x) d\nu = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} B(\nu) \cos\left(\frac{2\pi\nu y d}{f_{FTL}}\right) d\nu, \quad (1)$$

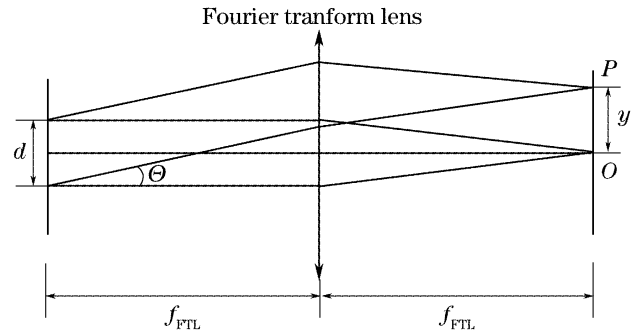
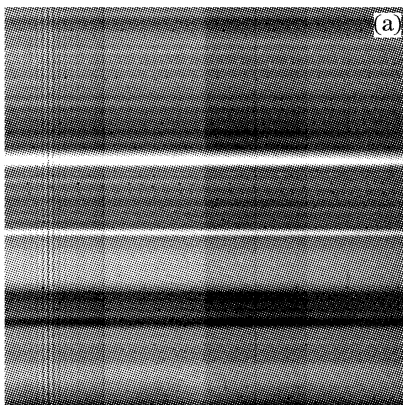


图 1 等效光路图

Fig. 1 Equivalent optical path

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

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

δ_m 表示最大光程差。

SMII 在 CCD 探测器上的成像图像是一行 m 个地物点 n 个不同光程差的成像,如图 2(a)所示。干涉图像中的一行数据是同一地物点不同光程差的成像,称为干涉光强曲线,如图 2(b)所示。这样,面阵探测器上的行方向为光谱分辨力方向,列方向为空间分辨方向,得到了一维的空间分辨力和一维的光谱信息,另一维的空间信息靠推扫描得到。

经推导可以得到,干涉光强曲线,即(1)式中的干涉光强 $I(x)$ 具有如下特性:

$$I(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sin[(x - x_0)\tau_c/2]}{x - x_0} = \tau_c \sqrt{\frac{2}{2\pi}} \text{Sa}\left[\frac{(x - x_0)\tau_c}{2}\right], \quad (3)$$

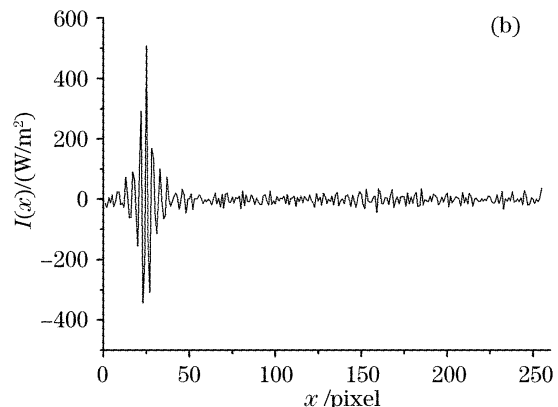


图 2 SMII 干涉图像。(a)干涉图像,(b)干涉光强曲线

Fig. 2 SMII interference image. (a) Interference image, (b) interference intensity curve

(3)式表示干涉光强曲线的包络是一个 Sa 函数^[6], 主瓣宽度为 $4\pi/\tau_c$, 中心频率为 x_0 。这些参量由 SMII 的仪器参量所决定。因此由同一光谱仪所产生的干涉图像的每行干涉光强曲线的包络是大致相同的。随着各波长的入射光强度的变化, 干涉光强曲线包络略有改变, 但整体来说, 干涉光强曲线具有类似 Sa 函数的形状。干涉光强曲线的这种由光谱仪决定的包络形状, 对压缩时选取不同光程差的权重有所帮助。

2.2 光谱特性分析

SMII 干涉多光谱图像通常用于军事侦察、科学实验、环境监测、资源勘测等方面。在这些应用中主要是要对物质进行分类识别。所以在压缩时不应以干涉图像在时域的视觉效果的好坏作为压缩的唯一基准, 还应考虑压缩是否适合频域中由干涉图像复原出的光谱图像、是否适合于各种应用中的物质识别分析。光谱分析人员在进行物质分类识别时重视的是光谱曲线的形状^[7,8], 从光谱曲线的波动趋势以及曲线的吸收峰等因素判断物质的存在及含量。这就为我们的压缩提供思路: 在压缩中应重点保护频域中光谱曲线的曲线轮廓形状。曲线的形状可由曲线的一阶导数、二阶导数、梯度及曲率等因素决定, 其中一阶导数的计算复杂度低, 运算速度快, 并且一阶导数也是计算其他因素的基础, 所以我们选取一阶导数作为评价光谱曲线形状的重要参量。

令 $F(\omega)$ 表示原始干涉图像中某一地物点各光程差的成像 $f(x)$ 的傅里叶变换, 即干涉光强曲线的傅里叶变换, $f'(x)$ 表示干涉图像经压缩后中该地物点各光程差的成像, $F'(\omega)$ 表示其傅里叶变换。

傅里叶变换(FT)存在如下关系:

$$-jxf(x) \stackrel{\text{FT}}{\underset{\text{IFT}}{=}} \frac{dF(\omega)}{d\omega},$$

那么经压缩后频域光谱曲线一阶导数对时域的影响为

$$-jx[f(x) - f'(x)] \stackrel{\text{FT}}{\underset{\text{IFT}}{=}} \frac{dF(\omega)}{d\omega} - \frac{dF'(\omega)}{d\omega},$$

由帕赛瓦尔定理得

$$W = \int_{-\infty}^{+\infty} \{x[f(x) - f'(x)]\}^2 dx = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{dF(\omega)}{d\omega} - \frac{dF'(\omega)}{d\omega} \right|^2 d\omega,$$

其中令频域中一阶导数的均方误差为

$$e = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{dF(\omega)}{d\omega} - \frac{dF'(\omega)}{d\omega} \right|^2 d\omega,$$

则有

$$e = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \{x[f(x) - f'(x)]\}^2 dx = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 [f(x) - f'(x)]^2 dx.$$

上式相当于以 $|x|$ 为权重, $|f(x) - f'(x)|$ 为变量的加权平方和。若令 e 为常量, 则可以知道 $|x|$ 大时, 对 $|f(x) - f'(x)|$ 的作用的权重大, $|x|$ 小时 $|f(x) - f'(x)|$ 的权重小。也就是说 $|x|$ 大的区域 $|f(x) - f'(x)|$ 对 e 的贡献要大。所以在光程差小的地方, 压缩后的误差可以大一些, 而在光程差大的地方, 误差必须要小。因此, 由频域中光谱曲线的一阶导数决定, 在时域对干涉图像压缩时, 随着光程差的增大, 图像的重要性越强, 受保护的程大。

3 加权的率失真优化截取 SPIHT 压缩

A. Said 和 W. A. Pearlman^[9] 根据 Shapiro 零树编码的基本思想, 提出了基于分层树集合分割排序(Set Partitioning in Hierarchical Trees, SPIHT)的编码算法。SPIHT 算法是一种非常实用有效的高性能图像压缩编码算法, 其显著特点是极低的计算复杂度和高质量的恢复图像, 并且合理利用了小波分解后的多分辨力特性, 获得了优良的编码性能。SPIHT 是以均方误差最小(MSE)的标准设计的, 然而它并没有有效地利用均方误差最小这一标准。SPIHT 在编码时只认为大的小波系数重要, 应首先编码, 这样在码率很低的情况下, 小波系数低的系数往往不能够编码, 但对于干涉多光谱图像来说, 小波域系数的高低并不能说明其重要性。而且 SPIHT 是随机截取码流, 这样在码流分配和图像失真之间并没有达到最优。

近年来人们对 SPIHT 算法在该方面作出了一定改进^[10,11], 但并不是针对干涉多光谱图像这一类既有空间信息又有光谱信息的图像。为此, 我们提出一种针对干涉多光谱图像的 SPIHT 改进算法, 算法总体框图如图 3 所示。该算法是在 SPIHT 对所有子树编完码后, 根据 2.2 节的结论即随着光程差增大, 干涉多光谱图像越需要保护, 从而利用加权的率失真原理对码流进行截取, 使其在码流分配和光谱失真中达成最优的。

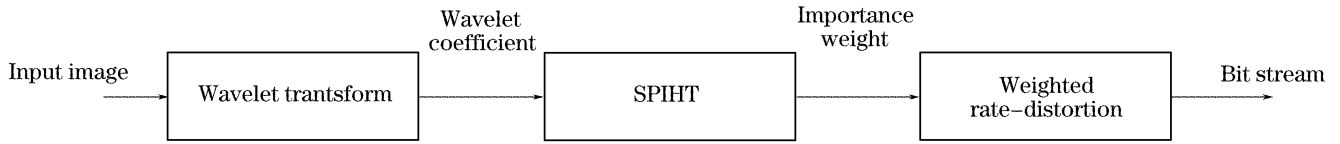


图 3 算法总框图

Fig. 3 Block diagram of the algorithm map

3.1 零树结构

对小波系数建立零树时,考虑到对码流要进行加权的率失真优化截取,所以我们建立的零树的结构不同于 Pearlman^[9]所提出零树的结构。我们要将同一像点的所有小波系数建立在一棵零树上。这样码流截取时按零树为单位进行优化截取。

干涉图像经过小波变换按其频带从低到高形成一个树状结构,树根是最低频子带的结点,它有三个孩子分别位于三个次低频子带的相应位置,其余子带(最高频子带除外)的结点都有 2×2 个孩子位于高一级子带的相应位置。这样图 4 所示的三级小波分解就形成了深度为 4 的零树。如此建立零树的优点是可将图像上同一像点分布在不同小波子带中的系数建立在同一棵树上,这样有利于实现对不同光程差上的像点运用加权的率失真原理对码流进行截取。

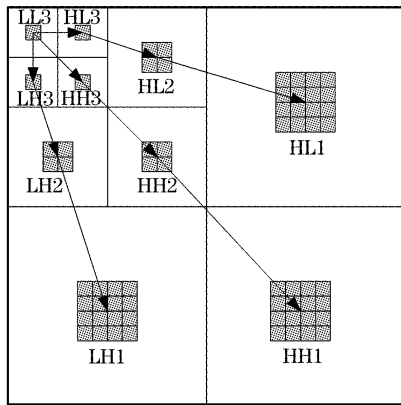


图 4 零树结构

Fig. 4 Zero-tree structure

3.2 加权的率失真优化截取

若原始图像中一个结点的坐标为 (x, y) ,则小波变换后,在最低频子带中位置为 $(\lfloor x/2^m \rfloor, \lfloor y/2^m \rfloor)$ 这说明小波变换后最低频子带中结点关于光程差的相对位置不变。由 2.2 节中的分析得到随着光程差增大,干涉图像中的误差对傅里叶变换后的光谱曲线的性状的影响越大,因此随着光程差增大,结点的重要性将逐渐增大。提高结点的重要性可采用感兴趣区域编码^[12,13]方法,但由于干涉图像的重要结点并不是聚集在某一特定的区域内,而是按光程方向逐

渐增大,因此采用具有权重的率失真提升的方法使光谱曲线的失真与码字分配达到合理分配。具有权重的率失真提升方法是根据率失真优化截取理论,按照时域中各光程差对频域的贡献,对率失真曲线的斜率采用不同权重的提升,并且失真测度也是以光程差为权重的函数。

图像的比特率和失真程度的相关性表现为:图像存在唯一的一条优化比特率和失真曲线。在给定的比特率下,可以根据图像已知的最优失真值-比特数 $(R-D)$ 曲线找到其相应的失真。最优截断方法就是找到一个点,在该点处做最优 $R-D$ 曲线的切线,计算出切线的斜率。通过得到的斜率,在每棵零树对应的 $R-D$ 曲线上找到相应得位置进行截断,这样就实现了对整个图像的最优截断。其数学模型表达为

$$F(\lambda) = D(\lambda) + \lambda[R(\lambda) - R_{\max}], \quad (4)$$

当图像由 n 棵零树组成时,

$$D(\lambda) = \sum_{i=1}^n D_i(\lambda), \quad R(\lambda) = \sum_{i=1}^n R_i(\lambda).$$

$D(\lambda)$ 表示整个图像的失真值。 $R(\lambda)$ 表示整个图像所占用的比特数。 $D_i(\lambda), R_i(\lambda)$ 分别表示第 i 棵树的失真值和比特数。(4) 式可理解为拉格朗日乘数法的表示式,其约束条件为 $\sum_{i=1}^n R_i(\lambda) \leq R_{\max}$ 。

对于上述最小化问题,可归结为单棵零树的最小化问题。即对于树 T_i 找到最优截取点 n_i 。 T_i 的候选截取点的斜率为 $S_i^n = \Delta D_i^n / \Delta R_i^n$ 。

假设在光程方向,斜率提升函数为 $\gamma(x)$,其中 x 为光程,对所有候选截取点的斜率进行提升,提升后的斜率 $S_i^n[\gamma(x)]$ 为

$$S_i^n[\gamma(x)] = \gamma(x) \cdot S_i^n = \gamma(x) \cdot \Delta D_i^n / \Delta R_i^n,$$

则斜率估计值 $\hat{S}_i^n(\rho)$ 为

$$\hat{S}_i^n(\rho) = \alpha \cdot \{ \log_2(\Delta_i^n) - \log_2(\Delta R_i^n) + \log_2[\gamma(x)] \} + \beta = \hat{S}_i^n + \rho,$$

其中 $\rho = \alpha \cdot \log_2[\gamma(x)]$ 为斜率估计值增量,即斜率提升 $\gamma(x)$ 倍,对应斜率估计值增加 ρ 。因为光程差增大,干涉图像像素对频域贡献大,取斜率提升函数 $\gamma(x) = px, p > 0$ 。则 ρ 变为

$$\rho = \alpha \log_2(x) + \varphi,$$

其中 $\varphi = a \log_2 p$ 为斜率自适应步长。

假设候选截取点的斜率估计值的最大值为 \hat{S}_{\max} , 最小值为 \hat{S}_{\min} , ρ 的取值范围为 $[0, (\hat{S}_{\max} - \hat{S}_{\min})]$, φ 的增长应使 ρ 不能超过其范围。

在光程方向上提升斜率时, 图像的失真函数也应符合图像的特点。我们根据干涉图像中各部分对傅里叶变换后的光谱的贡献程度, 选取具有权重的均方误差作为失真函数。由 2.1 节的结论知道, 干涉图像中的每一行曲线具有类似 Sa 函数的形状, 曲线包络为 $I(x) = \tau_c \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \text{Sa}\left[\frac{(x-x_0)\tau_c}{2}\right]$ 。Sa 函数可看作是正弦函数受 $y = \pm 1/x$ 挤压而形成的, 因此 $I(x)$ 的幅度下降趋势是 $y = |2/(x-x_0)\tau_c|$ 。将 $y = |2/(x-x_0)\tau_c|$ 关于 $x = \delta_m$ (δ_m 为最大光程差) 的对称函数作为权重, 即 $\omega(x) = 2/(2\delta_m + x - x_0)\tau_c$ 。因此各零树 T_i 的失真为

$$D = \sum_{m,n} \omega(x) D_i^2[m,n] = \sum_{m,n} \omega(x) \{c_i[m,n] - c'_i[m,n]\}^2,$$

其中 $c_i[m,n]$ 为压缩前小波系数, $c'_i[m,n]$ 为压缩后小波系数。

4 实验与分析

测试图像序列为环境卫星所搭载的 SMII 产生的干涉图像。图像大小: $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 一个像素由 12 bits 表示。

对干涉多光谱图像分别采用加权率失真优化截取算法 (WRDO-SPIHT), 等权重率失真优化截取算法 (RDO-SPIHT) 及 SPIHT 算法对图 2(a) 进行压缩, 压缩结果如图 5 所示。

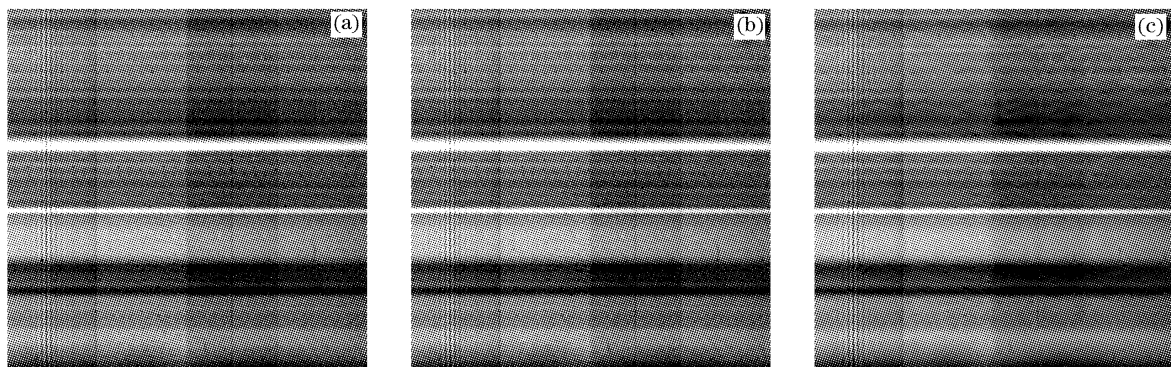


图 5 压缩结果。(a) WRDO-SPIHT, (b) RDO-SPIHT, (c) SPIHT

Fig. 5 Compression results. (a) WRDO-SPIHT, (b) RDO-SPIHT, (c) SPIHT

图 6 为三种压缩方法在不同压缩率下峰值信噪比的比较。从图 6 中可以看出 WRDO-SPIHT 和 RDO-SPIHT 算法的峰值信噪比 (PSNR) 比 SPIHT 算法提高 0.4~1 dB, 在甚低比特率例如 0.2 bpp 时, 经过率失真优化截取后, 压缩性能明显提高, 达到 1 dB 左右。然而, 虽然 WRDO-SPIHT 算法的峰值信噪比

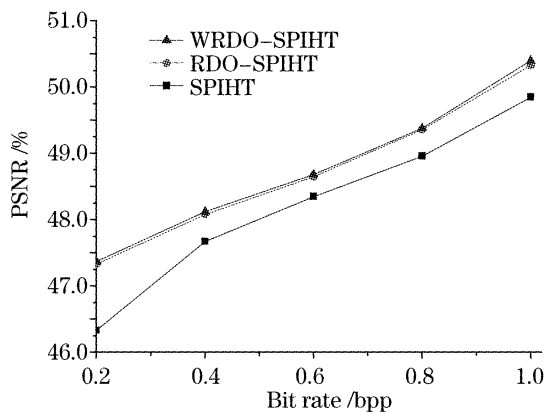


图 6 峰值信噪比比较

Fig. 6 PSNR performance comparison

相对 SPIHT 算法有所提高, 但与 RDO-SPIHT 算法的峰值信噪比相比没有明显提高。这样看来 WRDO-SPIHT 算法在时域中与 RDO-SPIHT 相比, 虽然有所改进但优势并不明显。

从三种算法恢复的图像中任意取出一行恢复的光谱曲线如图 7 所示。可以看出 WRDO-SPIHT 算法很好地保持了光谱曲线的曲线轮廓形状和吸收峰的位置和形状。为了全面衡量算法在频域的性能, 我们将从光谱曲线的相对二次误差 (RQE)^[14]、光谱斜率误差等方面对算法进行评价。

光谱曲线的相对二次误差反应了压缩前后光谱数值的差异, 图 8 中显示了图 3 中 0~150 行经傅里叶变换后的恢复光谱曲线的相对二次误差。文献 [14] 中指出压缩算法的相对二次误差小于 4% 时, 才能适用于光谱的压缩。从图 8 中可以看出, SPIHT 算法的相对二次误差并不能全部满足小于 4% 的要求, 而 RDO-SPIHT 和 WRDO-SPIHT 算法满足该要

求。并且 WRDO-SPIHT 算法的相对二次误差比 SPIHT 算法减小 3 倍左右,比RDO-SPIHT算法减小

1.8 倍左右。

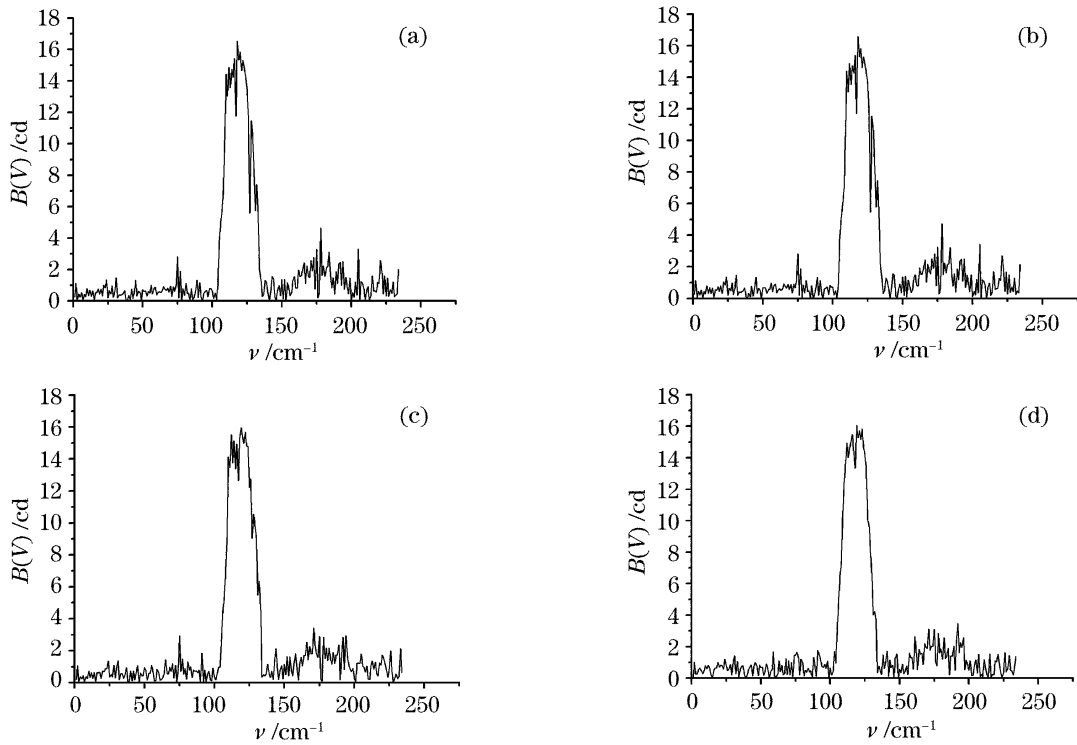


图 7 重建光谱曲线。(a) 原始光谱曲线, (b) WRDO-SPIHT, (c) RDO-SPIHT, (d) SPIHT

Fig. 7 Reconstructed spectral curves. (a) Original spectral curve, (b) WRDO-SPIHT, (c) RDO-SPIHT, (d) SPIHT

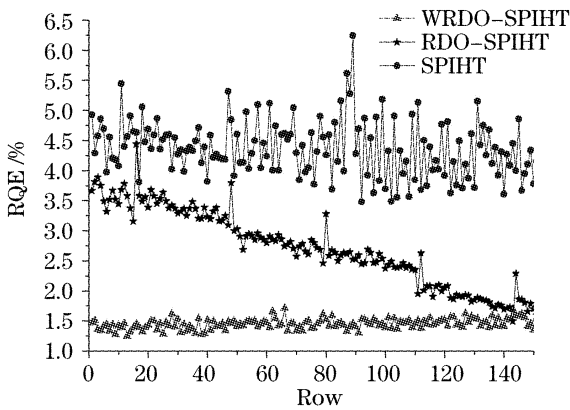


图 8 相对二次误差

Fig. 8 Relative quadric error

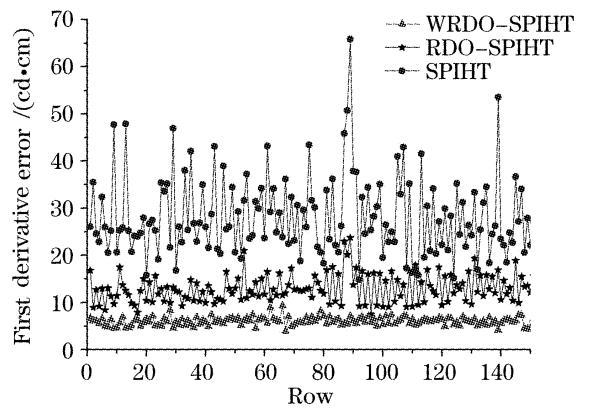


图 9 一阶导数误差

Fig. 9 First-order derivative error

我们以光谱曲线一阶导数的误差作为衡量标准光谱的曲线轮廓和吸收峰形状的参量。三种算法的一阶导数误差如图 9 所示。从图中可以看出 WRDO-SPIHT 明显改进了光谱曲线的一阶导数的误差,WRDO-SPIHT 一阶导数的平均误差为 6.03,而 RDO-SPIHT 的一阶导数平均误差为 12.99, SPIHT 的一阶导数平均误差为 28.24。WRDO-SPIHT 的一阶导数误差相对 RDO-SPIHT 改进了 2 倍左右,相对 SPIHT 改进了 4.6 倍左右。由此可见,WRDO-SPIHT 很好地保护了光谱曲线的轮廓及吸收峰形状,降低了时域压缩时产生的损失对频域中光谱的判别分类的影响,使光谱压缩与光谱分

辨达成很好的平衡。

5 结 论

基于空间调制干涉成像光谱仪的成像原理及其特点,本文提出根据干涉光谱图像的主要用途,即对光谱中物质的分类识别,提出采用加权的率失真优化截取 SPIHT 算法。该算法不仅弥补了 SPIHT 算法中码率分配的缺点,利用率失真原理使码率分配达到最优,而且随着光程差的增大,逐渐提升率失真函数斜率,提高对干涉多光谱图像的保护,这样有效地保护了频域光谱曲线的形状,有利于通过光谱

进行物质的识别。本算法使图像的压缩在时域和频域之间达成良好的平衡,与 RDO-SPIHT 算法及 SPIHT 算法比较,在时域得到较好的峰值信噪比,同时在频域中减小了光谱的相对二次误差,并且光谱曲线的形状保护良好,有利于对光谱物质识别。该算法在空间调制干涉成像光谱仪应用系统中具有实用价值。

参 考 文 献

- 1 Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 18~22 (in Chinese)
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
- 2 Zhou Youxi, Li Yunsong, Wu Chengke. Environment satellite multispectral images compression algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 336~340 (in Chinese)
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
- 3 Giacinto Gelli, Giovanni Poggi. Compression of multispectral images by spectral classification and transform coding [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, **8**(4): 476~489
- 4 Yan Jingwen, Shen Guiming, Hu Xiaoyi. An improved biblock zero tree coding for hyperspectral data compression [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 834~838 (in Chinese)
闫敬文,沈贵明,胡晓毅等. 改进的对块零树编码方法对超光谱数据压缩[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 834~838
- 5 Li Yunsong, Wu Chengke, Chen Jun *et al.*. Multi-spectral image compression based on rate distortion slope lifting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 691~695 (in Chinese)
李云松,吴成柯,陈军等. 基于小波的干涉多光谱卫星图像压缩方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 691~695
- 6 Chen Shengtan, Guo Baolong, Li Xuewu *et al.*. *Signal and System* [M]. Xi'an: Xidian University Press House, 2001. 99~100 (in Chinese)
陈生谭,郭宝龙,李学武等. *信号与系统*[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001. 99~100
- 7 Gary Shaw, Dimitris Manolakis. Signal processing for hyperspectral image exploitation [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, **1**: 12~16
- 8 Wang Hengli. Research on hyperspectral imaging algorithm for targets detection [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2004, **19**(2): 20~23 (in Chinese)
王恒立. 超光谱图像目标检测算法研究[J]. *光电技术应用*, 2004, **19**(2): 20~23
- 9 A. Said, W. A. Pearlman. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarching trees [J]. *IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology*, 1996, **6**(3): 243~249
- 10 Shaorong Chang, Lawrence Carin. A modified SPIHT algorithm for image coding with a joint MSE and classification distortion measure [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(3): 713~725
- 11 Byong-ki Lee, Yo-Sung Ho. Rate-distortion optimized zero-tree image coding using wavelet transforms [C]. Zagreb, Croatia. EC-VIP-MC 2003, 4th EURASIP Conference. 381~384
- 12 Xiao Jiang, Zhou Youxi, Wu Chengke *et al.*. The image compression technology of the large aperture static imaging interference spectrometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1494~1498 (in Chinese)
肖江,周有喜,吴成柯等. 大孔径静态干涉光谱仪图像压缩技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1494~1498
- 13 Jiang Xiao, Chengke Wu. Interference multispectral image compression using a new JPEG2000 region-of-interest coding method [J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(4): 838~842
- 14 Corinne Mailhes, Paul Vermande, Francis Castanie. Spectral image compression [J]. *J. Optics* (Paris), 1990, **21**(3): 121~132