

文章编号: 0253-2239(2008)08-1463-06

# 基于分布式信源编码的干涉多光谱图像压缩

李云松 孔繁镛 吴成柯 雷 杰

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要** 根据干涉多光谱图像的特点, 提出一种基于分布式信源编码的干涉多光谱图像压缩算法。干涉多光谱图像序列的相邻图像之间具有明显的平移特性, 编码端通过块匹配算法检测出相邻帧间的相对位移量, 联合块匹配算法估计的边信息帧进行比特平面码率估计, 采用基于率失真提升的感兴趣区域编码, 调整图像不同区域的率失真斜率来进行更合理的码率分配。实验结果表明, 该算法比传统算法更好地保护了多光谱图像的光谱信息, 在不同压缩比的情况下, 满足卫星干涉多光谱图像压缩系统要求, 易于硬件实现, 更适于星上环境的应用。

**关键词** 信息光学; 干涉多光谱图像压缩; 分布式信源编码; 率失真

**中图分类号** TN919.81 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082808.1463

## Interference Multi-Spectral Image Compression Based on Distributed Source Coding

Li Yunsong Kong Fanqiang Wu Chengke Lei Jie

(National Key Lab on ISN, Xidian University, Xian, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** According to the analyses of the interferential multispectral images, a new compression algorithm based on distributed source coding is proposed. There are apparent shift features between the image series, the relative shift between two images is detected by the match algorithm at the encoder. Our algorithm estimates the rate of each bitplane with the estimated side information frame. Then our algorithm adopts a regions of interest (ROI) coding algorithm, in which the rate-distortion lifting procedure is carried out to allocate coding rate in reason according to the difference significance of image regions. The experimental results show that the proposed algorithm achieves improved spectral performance over the conventional algorithms. With different compression ratios, the algorithm satisfies the requirements of interference multi-spectral image compression system, and efficiently reduces the cost of computation and memory usage.

**Key words** information optics; interference multi-spectral image compression; distributed source coding; rate distortion

### 1 引言

高分辨率成像光谱技术<sup>[1]</sup>是新一代的遥感技术, 不仅能够获得地面目标的空间特征, 而且能获得其对应的丰富光谱信息, 可定性定量地对被测对象进行物理分析和识别。从 20 世纪 80 年代开始, 干涉型光谱仪发展成为应用于航空航天环境下第一代具有空间分辨率的干涉型成像光谱仪。它除具有空间二维信息, 还具有一维光谱信息, 通常由几个到几百个频带组成, 该信息要求在压缩后的图像中完整恢复各像素点的光谱曲线。这极大地扩展了应用范围, 但也使采集数据体积十分庞大, 给储存与传输带来巨大的困难。如何在破坏恢复光谱数据前提

下, 有效地进行数据压缩是目前环境卫星多光谱技术中迫切需要解决的难点。

干涉多光谱图像序列压缩的方法<sup>[2~5]</sup>有很多, 包括基于三维小波变换的图像序列压缩算法<sup>[2]</sup>, 文献<sup>[3]</sup>提出的小波域匹配算法等。然而这些算法存在明显的缺点, 需要多幅图像才能实现图像序列压缩, 系统复杂度高, 编码时延大、内存需求大、难以实现图像实时传输。分布式信源编码 (Distributed source coding, DSC) 是近年来受到关注的一种新颖编码技术<sup>[6~13]</sup>, 具有编码简单, 解码较复杂, 并且能够实现较为高效的压缩, 抗误码特性好的特点。

本文在分析干涉多光谱成像光谱仪特点和应用

收稿日期: 2007-12-19; 收到修改稿日期: 2008-01-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60532060), 国家自然科学基金(60507012, 60672117)资助课题。

作者简介: 李云松(1974—), 男, 副教授, 主要从事图像传输与压缩等方面的研究。E-mail: ysl@mail.xidian.edu.cn

环境的基础上,结合分布式信源编码,提出了一种保护光谱区域的基于分布式信源编码的感兴趣区域(Regions of interest, ROI)编码方法。不仅改善了感兴趣区域编码算法的压缩效果,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,有效地保护了光谱信息而且得到很好的空间信息,算法复杂度低,易于硬件实现,为实现该类图像序列的实时编码与传输提供了可能。

## 2 基于分布式信源编码的干涉多光谱图像压缩算法

分布式信源编码在编码端,把各帧图像看成“独立信源”,各帧之间进行独立编码,编码方式类似于传统的帧内编码。在解码端,利用时域相邻帧的高度相关性,对已解码重建帧运动估计,通过时域内插计算边信息,最后边信息用于 Slepian-Wolf 解码和当前解码帧的重构。目前主要的算法有: Wyner-Ziv 视频编码<sup>[7]</sup>, 分级 Wyner-Ziv 视频编码<sup>[9]</sup> 和 PRISM 视频编码<sup>[8]</sup>。但是这些分布式信源编解码系统的码率控制机制是在解码端进行的,解码端通过反馈信道从编码器的缓冲区中申请附加的奇偶校

验码,并联合边信息进行 Slepian-Wolf 解码,虽然利用反馈信道(Feedback channel)能精确控制分布式信源编码的码率,但增加了额外的解码延时,并且在许多实际应用中,没有反馈信道。

考虑到分布式信源解码算法本身的特性,即解码端的码率控制是建立在帧间的统计相关性的基础上联合边信息进行 Slepian-Wolf 解码,提出了在编码端控制分布式信源编码的码率,有效地提高了编码效率<sup>[10-12]</sup>。然而这些改进算法并不是针对干涉多光谱图像这样一类既有空间信息又有光谱信息的图像。为此,提出一种针对干涉多光谱图像的分布式信源编码算法,算法总体框图如图 1 所示。

针对干涉多光谱图像具有帧间连续推扫平移和图像区域重要性不同的特点,系统进行相应的不同方式处理,在保护光谱信息的基础上,进行高效的压缩。首先采用块匹配,得到估计的边信息,然后编码端联合边信息估计各个比特平面的码率,并针对不同区域重要性的不同,采用感兴趣区域自适应失真码率分配算法来合理分配码率,最后编码比特平面按照分配的码率进行基于 Turbo 码的 Slepian-Wolf 编码。

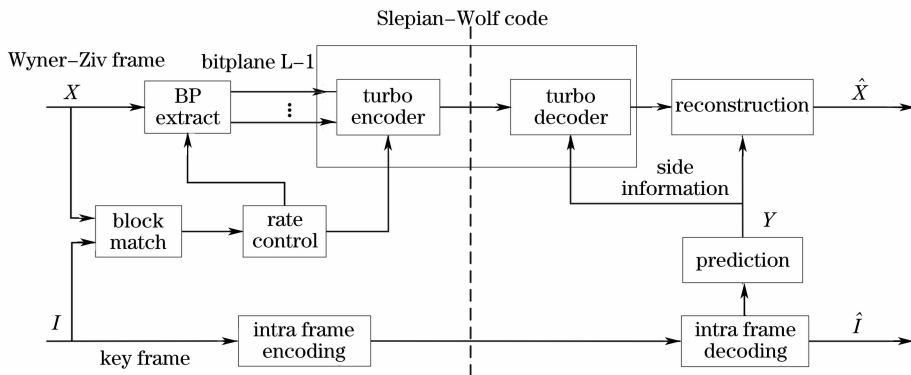


图 1 系统框架

Fig. 1 System structure

### 2.1 块匹配算法

干涉多光谱图像序列的相邻帧之间具有明显的推扫平移特性。如图 2 所示,帧间具有很强的相关性。因此对于相邻两幅图像  $X$  和  $I$ , 可根据简单的块匹配运动估计方法, 求出  $X$  帧的平移运动, 然后根据平移信息, 由关键帧  $I$  可以预测出边信息帧  $\hat{Y}$ 。采用模板匹配方法, 采取把模板  $T(m, n)$  叠放在图像  $S$  上平移, 模板  $T(m, n)$  覆盖下的子图记为  $S^{i,j}(m, n)$ ,  $i$  和  $j$  是子图左上角的像素点在图像  $S$  中的坐标, 模板  $T(m, n)$  和子图  $S^{i,j}(m, n)$  之间的相似性程度可以用下面的测度来衡量:

$$R(i, j) = \left[ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M S^{i,j}(m, n) T(m, n) \right] / \left\{ \sqrt{\sum_m \sum_n [S^{i,j}(m, n)]^2} \sqrt{\sum_m \sum_n [T(m, n)]^2} \right\}, \quad (1)$$

其中  $R(i, j)$  的范围是  $[0, 1]$ , 并且当  $S^{i,j}(m, n)$  和  $T$  完全匹配时,  $R(i, j) = 1$ , 即在匹配点  $R(i, j)$  达到最大值。

对当前帧和关键帧进行匹配, 得到最佳匹配位置  $(i, j)$ , 根据位移量对模板图像进行周期移位, 得到的图像作为估计的边信息图像  $\hat{Y}$ 。

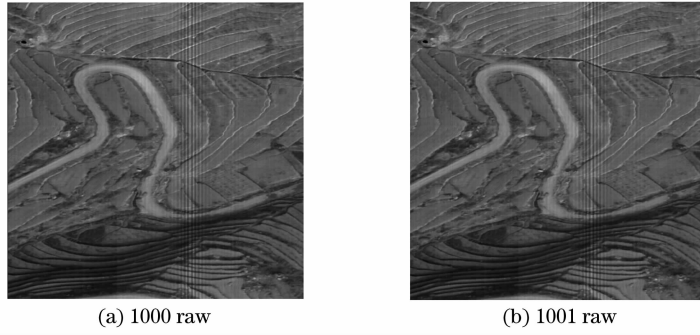


图 2 相邻两帧干涉多光谱图像

Fig. 2 Two successive frames of the interferential multispectral image

## 2.2 基于率失真优化截取的码率分配算法

假设  $\{(X_i, Y_i)\}_{i=1}^{\infty}$  是两个统计相关的独立同分布随机序列, 对信号进行独立编码联合解码。如果利用传统的熵编码和解码方法, 可以得出:  $R_X \geq H(X), R_Y \geq H(Y)$ ,  $H(X)$  和  $H(Y)$  分别是指  $X$  和  $Y$  的熵。如果满足在编码长序列信号的时候, 可以有一个用于对  $X, Y$  进行恢复的残差概率, 并且这个数值较小但通常不为 0, 这样使用联合解码就可以获得一个较好的效果。该情形下, 根据 Slepian-Wolf 理论可以得出

$$R_X + R_Y \geq H(X, Y), \quad (2)$$

$$R_X \geq H(X|Y), \quad R_Y \geq H(Y|X), \quad (3)$$

可以看出, 对于给定边信息  $Y$ , 就可以预测出预分配的码率  $H(X|Y)$ :

$$H(X|Y) = H(X^{(0)}, \dots, X^{(L-1)} | Y) = \sum_{b=0}^{L-2} H(X^{(b)} | Y, X^{(b+1)}, \dots, X^{(L-1)}) + H(X^{(L-1)} | Y), \quad (4)$$

式中  $b$  为比特平面层,  $b = 0, \dots, L-1, L-1$  为最高比特平面层, 则  $X^{(b)}$  表示  $X$  的第  $b$  个比特平面值。对 (4) 式进行简化得

$$H(X|Y) = H(X^{(0)}, \dots, X^{(L-1)} | Y) \leq \sum_{b=0}^{L-1} H(X^{(b)} | Y) \leq \sum_{b=0}^{L-1} H(X^{(b)} | Y^{(b)}). \quad (5)$$

$H(X^{(b)} | Y^{(b)})$  的值可由  $P(X^{(b)} | Y^{(b)})$  计算得到, 其中  $q = 0$  或  $1$ , 其公式为

$$P(X^{(b)} = q | Y^{(b)} = q) = \sum_{\forall Y} P(X^{(b)} = q | Y = y, Y^{(b)} = q) \cdot P(Y = y | Y^{(b)} = q), \quad (6)$$

$$P(X^{(b)} \neq q | Y^{(b)} = q) = \sum_{\forall Y} P(X^{(b)} \neq q | Y = y, Y^{(b)} = q) \cdot P(Y = y | Y^{(b)} = q), \quad (7)$$

式中  $P[Y = y | Y^{(b)} = q]$  的值为 0 或 1, 取决于  $Y^{(b)}$  是否等于  $q$ 。假设在恢复图像中产生的失真为  $D = E[d(X, \hat{X})]$ , 则  $X^{(b)}$  的失真为

$$\Delta D^{(b)} = E\{d(X^{(b)} X^{(b-1)} \dots X^{(0)} - X^{(b-1)} X^{(b-2)} \dots X^{(0)})\}. \quad (8)$$

假定图像  $I$  由一组不重叠区域  $\{X_0, X_1, \dots, X_N\}$  构成, 那么对于区域  $X_i$ , 编码截至到比特平面  $n_i$ , 则

码率为  $R_i^{n_i} = \sum_{b=0}^{L-1} \Delta R_i^b = \sum_{b=0}^{L-1} H(X_i^{(b)} | Y_i^{(b)})$ , 其失真

为  $D_i^{n_i} = \sum_{b=0}^{n_i} \Delta D^{(b)}$ , 那么整幅图像的码率和失真为

$$R = \sum_i R_i^{n_i} \text{ 和 } D = \sum_i D_i^{n_i}.$$

在限定码率为  $R_{\max}$  的情况下, 求得各区域的优化截取平面  $n_i$ , 使得失真度  $D$  最小。解决这种条件极值问题可以通过 Lagrange 算法。因此问题等价于使下式最小化:

$$\sum_i (R_i^{n_i} + \lambda D_i^{n_i}). \quad (9)$$

对于上述最小化问题, 可归结为单个区域的最小化问题。即对于  $X_i$  找到截取平面  $n_i$ , 使得  $(R_i^{n_i} + \lambda D_i^{n_i})$  最小。一旦这些信息预先计算出来, 则对于给定  $\lambda$  的优化的任务是简单地让  $n_i$  等于  $N_i$  (候选截取平面集合) 中的最大  $k$  值, 使得  $S_i^k > \lambda^{-1}$ 。然后, 每个区域  $X_i$  的各个编码平面按照相应的码率进入 Turbo 编码器进行编码即可。

## 2.3 基于感兴趣区域的分布式信源编码

为了有效地保护光谱特性, 光谱图像序列压缩时, 要求恢复图像序列中包含光谱信息的那部分图

像具有较高的峰值信噪比(如大于 45 dB),一般的图像压缩方法在大于 8 倍压缩下很难做到。率失真优化截取码率分配算法是根据候选截取点的率失真斜率进行截取分配的,如果调整感兴趣区域的率失真斜率<sup>[4]</sup>即可改变感兴趣区域的码率分配。因此,提出一种新的自适应码率分配的感兴趣区域编码方法,在保证给定光谱质量的同时,使图像的质量更高。

设斜率提升因子为  $\gamma$ ,如果对 ROI 所属区域的候选截取平面的斜率进行提升,提升后的斜率  $S_i^n(\gamma)$  为

$$S_i^n(\gamma) = \gamma \cdot S_i^n = \frac{\gamma \cdot \Delta D_i^n}{\Delta R_i^n}, \quad (10)$$

则斜率估计值  $\hat{S}_i^n(\rho)$  为

$$\hat{S}_i^n(\rho) = \alpha \cdot [\text{lb}(\Delta D_i^n) - \text{lb}(\Delta R_i^n) + \text{lb}(\gamma)] + \beta = \hat{S}_i^n + \rho, \quad (11)$$

式中  $\rho = \alpha \cdot \text{lb}(\gamma)$  为斜率估计值增量,即斜率提升  $\gamma$  倍,对应斜率估计值增加  $\rho$ 。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  $\hat{S}_{\min}$ , $\rho$  的取值范围为  $[0, (\hat{S}_{\max} - \hat{S}_{\min})]$ 。

假设矩形光谱区域图像域所对应的坐标为  $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2)\}$ ,对应区域为  $X_{\text{ROI}}$ 。在基于率失真斜率优化截取的码率分配模块中,根据恢复图像序列 ROI 的峰值信噪比最低要求,即对于给定的 ROI 允许最大失真  $D_{\text{ROI}}^{\max}$ ,自适应地提升率失真斜率,优先分配码率。具体方法如下:

$$\begin{cases} \hat{S}_{\text{ROI}}^n = \hat{S}_{\text{ROI}}^n + \rho, & D_{\text{ROI}}^n \geq D_{\text{ROI}}^{\max} \\ \hat{S}_{\text{ROI}}^n = \hat{S}_{\text{ROI}}^n, & D_{\text{ROI}}^n < D_{\text{ROI}}^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

当  $D_{\text{ROI}}^{\max} = 0$  时,对应最大比特平面提升,即实现 ROI 的无损压缩。当  $\rho = \hat{S}_{\max} - \hat{S}_{\min}$  时,  $\hat{S}_{\text{ROI}}^n \geq \hat{S}_{\max}$ ,此时 ROI 对应的候选截取平面则大于等于背景的截取平面,这等价于实现 ROI 的码率优先分配。由于调整率失真斜率可以自适应调 ROI 与背景图像的码率分配,使得提升的取值范围更加灵活,在满足 ROI 指标要求的前提下,系统的整体性能更好。

综合上述,ROI 自适应码率分配的分布式信源编码实现算法如下:

1) Wyner-Ziv 帧与关键帧进行块匹配运动估计方法,得到预测的边信息帧  $\hat{Y}$ 。

2) 根据图像的光谱区域,将 Wyner-Ziv 帧和边信息帧  $\hat{Y}$  划分为感兴趣区域与若干背景区域, Wyner-Ziv 帧的各个区域分别计算  $\Delta D_i^n$ 、 $\Delta R_i^n$  和  $\hat{S}_i^n$ 。

3) 根据恢复图像序列 ROI 的峰值信噪比最低要求,由(12)式提升 ROI 的率失真斜率  $S_{\text{ROI}}^n$ 。

4) 率失真优化截取算法根据输出的率失真斜

率进行截取各个区域的编码平面,并输出各个区域的分配码率。

5) 各个区域的编码比特平面按照分配的码率进行基于 Turbo 码的 Slepian-Wolf 编码,并完成码流组织和打包,输出最终码流。

### 3 实验与分析

测试图像序列:512 帧  $512 \times 512$  大孔径静态干涉多光谱图像,如图 2 所示;码率:0.25~1 bpp;恢复谱段:46;感兴趣区域对角坐标:  $[(256, 0), (384, 512)]$ 。

为了验证本文方案的性能,在相同条件下做三组实验:1) 三维等级权集合分裂算法(3D-SPIHT)编码方法,时域做 3 级分解,空间做 3 级分解,16 幅图像组成一个 GOP;2) JPEG2000 率失真斜率提升 ROI 编码算法,简称 RD-Lift 算法<sup>[4]</sup>;3) 本文算法。表 1 中给出了一组干涉多光谱图像用不同算法在不同压缩时的平均峰值信噪比。

可以看出,在不同压缩下,3D-SPIHT 的整图平均 PSNR 是最高的,但是由于没有针对感兴趣区域进行保护,因此其 ROI 区域的平均 PSNR 都比本文算法和 RD-Lift 算法要低很多。相比较 RD-Lift 算法,本文提出的算法利用干涉多光谱图像序列的平移特性进行基于率失真优化截取码率分配的分布式信源编码,有效降低地低了编码冗余,并且能根据感兴趣区域失真要求进行自适应码率分配,从而在保护光谱信息的基础上得到很好的空间信息。图 3 为三种方法在不同压缩率下平均 PSNR 的比较,图 4 为测试图像序列中在 0.5 bpp 压缩下单帧恢复图。可以看出,在有效保护光谱信息的同时,本文算法比 RD-Lift 算法能更好的保护背景质量,因此编码效果更好。

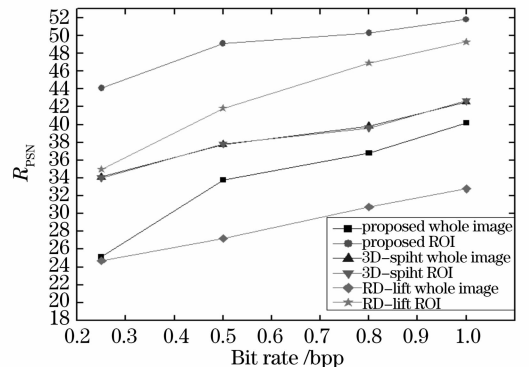


图 3 PSNR 比较

Fig. 3 Comparison of peak signal-to-noise ratio

表 1 不同算法压缩结果比较

Table 1 Comparison of different methods for image series

Rate /bpp	Average PSNR /dB					
	RD-Lift method		3D-SPIHT		Proposed algorithm	
	Whole image	ROI	Whole image	ROI	Whole image	ROI
0.25	24.71	34.98	34.11	34.03	25.10	44.08
0.5	25.82	42.98	37.77	37.84	33.79	47.51
0.8	30.77	46.58	39.82	39.64	36.82	50.30
1.0	35.17	46.93	42.55	42.67	40.17	51.83

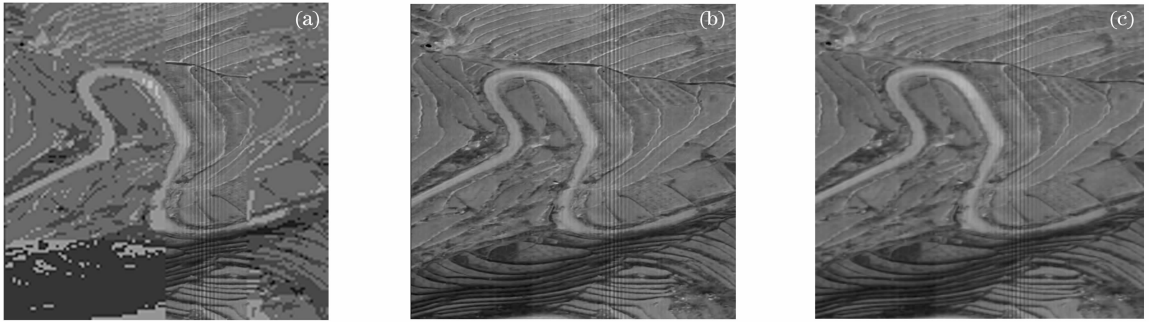


图 4 压缩结果。(a) RD-Lift, (b) 3D-SPIHT, (c) 本文算法

Fig. 4 Compression results. (a) RD-Lift, (b) 3D-SPIHT, (c) proposed algorithm

感兴趣区域的提升保护是以降低背景质量为代价的,在率失真优化算法的前提下,同样也出现整图的质量下降,这是否会破坏图像中的光谱信息呢?从恢复光谱的实验结果表明,在码率为 1 bpp 压缩下,恢复的图像利用光谱图像恢复算法生成 46 幅单色光谱图,随机取一个像素点,描绘的 46 谱段光谱

曲线如图 5 所示。可以看出,本文的算法在拟合原始光谱曲线的能力上有明显提高。为更好地检验压缩前后光谱信息的损失情况,引入光谱曲线相似度  $S_s$  (spectral similarity)<sup>[13]</sup> 参量作为指标来评价压缩前后光谱曲线的变化,其定义为

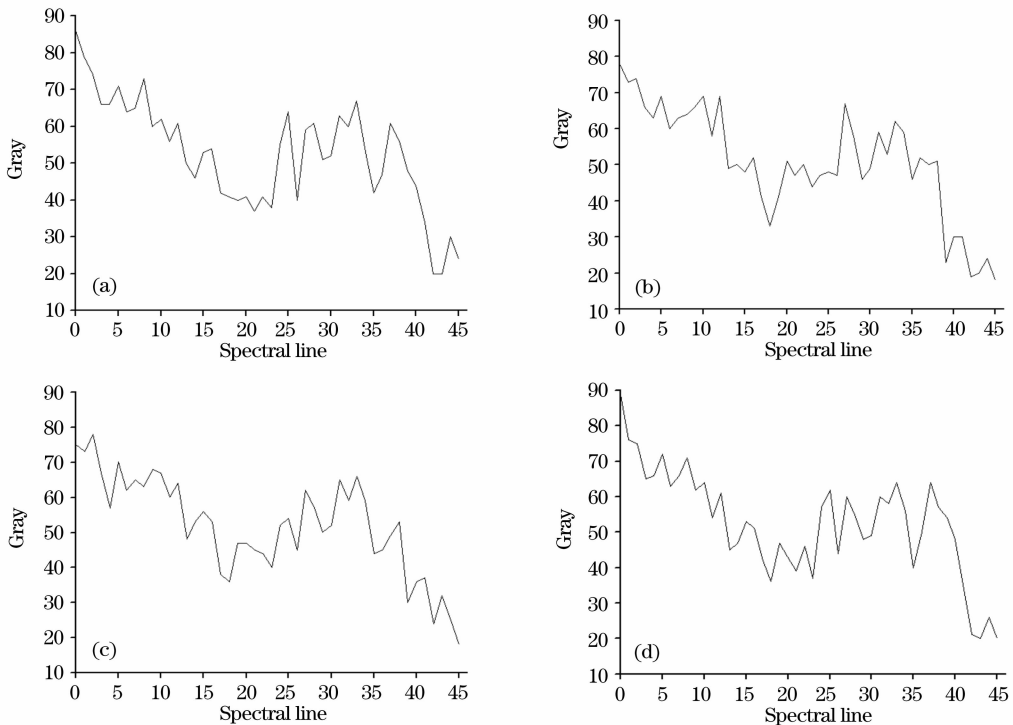


图 5 单点重建光谱曲线。(a)原始光谱曲线,(b) 3D-SPIHT, (c) RD-Lift, (d) 本文算法

Fig. 5 Reconstructed spectrum curves. (a) Original, (b) 3D-SPIHT, (c) RD-Lift, (d) proposed algorithm

$$S_s = \sqrt{\text{RMSE}_{x,y}^2 + (1 - \text{Corr}_{x,y}^2)^2}, \quad (13)$$

其中

$$\text{RMSE}_{x,y}^2 = \frac{1}{n_\lambda} \sum_{\lambda} [f(x,y,\lambda) - \mathcal{F}(x,y,\lambda)]^2,$$

$$\text{Corr}_{x,y} = \frac{\sum_{\lambda} [I(x,y,\lambda) - \tilde{T}(x,y,\lambda)]^2}{(n_\lambda - 1)\delta(x,y,\cdot)\overline{\delta}(x,y,\cdot)},$$

$$I(x,y,\lambda) = f(x,y,\lambda) - \mu(x,y,\cdot),$$

$\mu(x,y,\cdot)$  和  $\delta(x,y,\cdot)$  为单点像素光谱的均值和方差。以光谱曲线相似度参考: 3D-SPIHT:  $S_s = 7.432$ ; RD-Lift 算法:  $S_s = 6.197$ ; 本文算法:  $S_s = 3.365$ 。相似度值越小, 说明光谱曲线越相似, 可以看出, 本文算法在光谱分析上性能远远好于 3D-SPIHT, 比 RD-Lift 算法也高出不少。

为了衡量全部光谱的恢复效果, 从恢复的光谱图像中取连续 100 个像素点, 比较不同编码算法对应的光谱曲线相似度曲线, 如图 6 所示。其中码率为 1 bpp 时, 3D-SPIHT 的 100 个点平均光谱曲线相似度为 7.401, RD-Lift 算法的 100 个点平均光谱曲线相似度为 5.991, 而本文算法只有 3.401。整体的实验数据也表明, 本文算法在恢复光谱曲线具有更好的效果, 从而更有效地保护光谱信息。

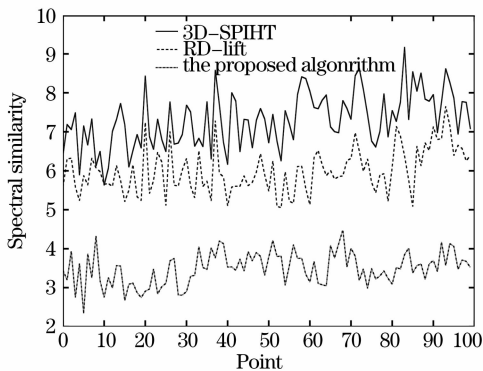


图 6 100 个像素点的光谱相似度曲线

Fig. 6 Spectral similarity curve of 100 successive point

## 4 结 论

针对基于三维小波变换和编码的干涉多光谱图像序列压缩算法系统复杂度高, 编码时延大, 内存需求大, 而单幅图像独立编码又不能充分利用帧间相关性来提高编码效率, 提出一种分布式信源编码的干涉多光谱图像压缩方法。针对干涉多光谱图像具有帧间连续推扫平移特性, 本文算法将分布式信源编码方法引入编码算法, 从而有效提高了系统的编码效率和降低了编码端的复杂度, 避免了基于三维小波编码算法对系统大存储量要求和编码时延大的

缺陷, 且重建图像序列质量得到显著增强, 压缩效果更好。同时本文算法在编码端通过块匹配算法估计关键帧, 并联合关键帧估计各个比特平面的码率, 从而减少了系统编解码的反馈延时。系统针对于干涉多光谱图像不同区域重要性的不同, 采用感兴趣区域自适应失真码率分配算法来合理分配码率, 有效保护光谱信息的同时得到很好的空间信息。本文算法复杂度低, 作为实现方案, 具有广泛的应用价值。

## 参 考 文 献

- Dong Ying, Xiangli Bin, Zhao Baochang. Analysis of interferometer system in a large aperture static imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 330~334
- 董 琰, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪的干涉系统分析[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 330~334
- Jing Huang, Rihong Zhu, Jianxin Li *et al.*. Hyperspectral image compression using three-dimensional significance tree splitting [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 393~396
- 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
- 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): 1495~1498
- 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
- Ma Jing, Wu Chengke, Chen Dong *et al.*. Compression of interference spectral 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]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 430~436
- 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
- Wyner A, Ziv J. The rate-distortion function for source coding with side information at the decoder [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1976, **IT-22**(1): 1~10
- Girod B, Aaron A, Rane S *et al.*. Distributed video coding[J]. *Proc. IEEE*, 2005, **93**(1): 71~83
- Puri R, Majumdar A, Ramchandran K. PRISM: A video coding paradigm with motion estimation at the decoder [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2007, **16**(10): 2436~2448
- Cheng S, Xiong Z. Successive refine for the Wyner-Ziv problem and layered code design[J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2005, **53**(8): 3269~3281
- Xu Q, Xiong Z. Layered Wyner-Ziv video coding [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2006, **15**(12): 3791~3803
- Morbee M, Prades-Nebot J, Pizurica A *et al.*. Rate allocation algorithm for pixel-domain distributed video coding without feedback channel [C]. in *Proc. IEEE Conf. on ICASSP*, Honolulu, HI, 2007
- Westerlaken, Ronald P, Borchert *et al.*. Analyzing symbol and bit plane-based LDPC in distributed video coding [C]. in *Proc. IEEE Conf. on Image Processing*, San Antonio, TX, USA, 2007
- Christophe E, Leger D, Mailhes C. Quality criteria benchmark for hyperspectral imagery [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(9): 2103~2114