

文章编号: 0253-2239(2010)02-0358-06

基于分层树集合分割的分布式干涉多光谱图像压缩

宋娟 李云松 吴成柯

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要 提出了基于分层树集合分割(SPIHT)的分布式干涉多光谱图像压缩算法,将 SPIHT 和分布式信源编码(DSC)有效结合,以同时去除图像序列帧内、帧间及小波系数子带间的强相关性。根据 DSC 的特点,提出了基于边信息的辅助重构方法,以减少量化误差,提高重构质量。为了进一步保护光谱信息,采用基于加权提升系数的感兴趣区域(ROI)方法,对包含大部分光谱能量的强干涉区域优先编码。辅助重构方法在 ROI 保护方面也具有明显的优势,在保护强干涉区域的同时,能减少弱干涉区域的信息损失。实验结果表明,和变换域的 DSC 相比,算法的峰值信噪比(PSNR)提高了大约 0.5 dB,拟合原始光谱曲线的性能较其它传统算法也有明显的提高。

关键词 图像处理;干涉多光谱图像压缩;分布式信源编码;分层树集合分割;辅助重构;感兴趣区域

中图分类号 TN919.81 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0358

Compression for Distributed Interferential Multispectral Image Based on Set Partitioning in Hierarchical Trees

Song Juan Li Yunsong Wu Chengke

(National Key Laboratory on ISN, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract A distributed compression method for interferential multispectral image based on set partitioning in hierarchical trees (SPIHT) is proposed, which combines SPIHT with the framework of distributed source coding (DSC) to exploit the strong correlation within and among frames as well as different scales in the same orientation. And an auxiliary reconstruction method based on side information is presented at the decoder to decrease quantization error. To protect the spectral information efficiently, ROI method based on weighted lifting coefficients is performed to priority encode the intensive interference area that contains most spectral energy. The auxiliary reconstruction method also takes an obvious advantage on ROI coding. The method not only protects intensive interference area but also reduces the loss of the weak interference area as much as possible. The experimental results show that the proposed algorithm obtains about 0.5 dB gains over DSC in transform domain and its ability to fit the original spectral curves is greatly improved compared with other traditional compression methods.

Key words image processing; interferential multispectral image compression; distributed source coding; set partitioning in hierarchical trees (SPIHT); auxiliary reconstruction; region of interesting (ROI)

1 引言

干涉光谱成像技术是 20 世纪 80 年代出现的集光学、精密机械和电子技术于一体的高新科技。由于它能够获得被测目标的空间和光谱的丰富信息,因而在航空航天遥感、军事侦察、环境检测和资源勘测等方面具有重要的应用价值。作为新一代干涉光

谱成像技术的代表,大孔径静态干涉光谱仪(large aperture static imaging spectrometer, LASIS)不需要精密的动镜驱动机制,其应用得到了学者的广泛关注和研究。LASIS 采集的图像数据体积十分庞大,给存储和传输带来了极大的困难。如何在破坏光谱数据的前提下,设计简单、快捷、占用存储空

收稿日期: 2009-02-10; 收到修改稿日期: 2009-05-14

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(60672117,60802076),111 基地项目(B08038)和西安电子科技大学基本科研业务费项目“低复杂度分布式的光谱图像压缩编码方法研究”资助课题。

作者简介: 宋娟(1984—),女,博士研究生,主要从事遥感图像压缩方面的研究。

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

导师简介: 吴成柯(1938—),男,教授,主要从事深空通信方面的研究。E-mail: ckwu@xidian.edu.cn

间小与易于硬件实现的高效压缩算法,是目前光谱技术中迫切需要解决的热点和难点。

干涉多光谱图像序列存在很强的帧内和帧间相关性,因此基于三维小波变换和编码的算法如 3DSPIHT^[1]等应运而生。这类算法虽然能够去除图像的帧内和帧间相关性,取得高效的压缩性能,但是需要同时对多幅图像进行变换和压缩,内存需求大,编码复杂度高,在星上实时压缩受到限制。另外,干涉多光谱图像序列的相邻图像之间具有明显的平移,而三维小波变换没有利用这一平移特性,仍然不能达到最优的去相关效果。许多学者在这方面进行了大量的研究工作以提高编码效率^[2~4]。如文献[2,3]中利用运动补偿提升滤波的方法去除帧间相关性,但是依然没有克服内存需求大,编码复杂度高的缺点。

分布式信源编码(DSC)是一种迥异于传统编码的新的编码技术,它以 Slepian-Wolf^[5]和 Wyner-Ziv^[6]定理作为理论依据。Slepian 和 Wolf 证明只要在解码端联合解码,对相关信源分别独立编码也能达到联合压缩的性能。Slepian-Wolf 编码将大量运算转移到解码端,降低了编码复杂度,成为视频、超光谱图像压缩等领域的研究热点。S. Pradhan 等^[7]提出了基于信道编码的分布式信源编码框架,A. Liveris 等^[8]证明采用低密度奇偶校验(LDPC)编码压缩信源可以逼近 Slepian-Wolf 下限。文献[9]提出了像素域的分布式干涉多光谱图像压缩算法,但因其直接工作在像素域,未能利用图像的空间相关性。文献[10]中提出了变换域的分布式干涉多光谱图像压缩方法,采用小波变换去除空间相关性,但未能利用同一方向不同尺度小波系数之间的强相关性。

本文将 SPIHT 算法和 DSC 有效结合,以同时去除图像序列的帧内、帧间及小波系数子带间的强相关性。为了进一步提高解码图像的质量,根据 DSC 的特点提出了结合边信息的辅助重构方法。根据干涉多光谱图像的数据特性,采用基于加权提升系数的感兴趣区域(ROD)方法,使包含大部分光谱能量的强干涉区域优先编码,有效的保护光谱信息。

2 LASIS 成像原理及光谱特性

LASIS(如图 1 所示)是通过在普通照相系统中加入横向剪切干涉仪构成的,因此在像面上得到的不再是目标的直接图像,而是目标的“干涉图像”。与通常意义上的空间调制性干涉成像光谱仪相比,

LASIS 成像系统没有入射狭缝,因而是“大孔径”的;与时间调制型干涉成像光谱仪不同,LASIS 成像系统中没有扫描运动部件,因而是“静态”的^[11]。

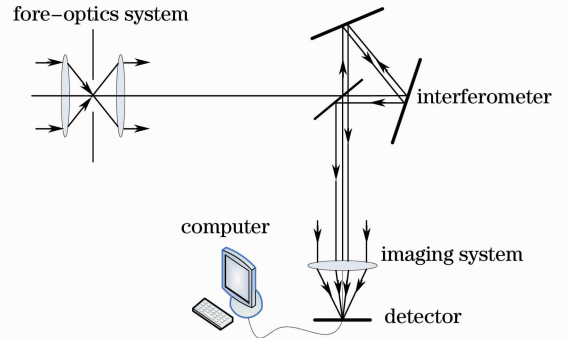


图 1 LASIS 成像系统

Fig. 1 LASIS imaging system

当一个物点 s 进入 LASIS 的视场后,随着飞行器的推扫, s 对干涉仪的视场角从正的最大值变为零再变到负的最大值,其几何像点也将沿横向从 CCD 的一端移动到中心再移动到另一端。由于不同的像点位置对应不同的光程差,因此记录几何像点在不同位置时探测器输出的干涉强度,将得到与物点 s 的光谱分布相对应的干涉图。若 s 为波长为 λ 的单色点光源,则输出干涉强度为

$$I_{\lambda}(x) = B(\lambda) \cos(2\pi\lambda x). \quad (1)$$

当光源具有一定的光谱分布时,得到的干涉图可表示为

$$I(x) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda) \cos(2\pi\lambda x) d\lambda, \quad (2)$$

式中 λ_1, λ_2 分别表示光源所包含的最小和最大波长, x 为光程差。根据傅里叶变换光谱学基本原理,光源的光谱分布可由干涉图的傅里叶变换来求得,即

$$B(\lambda) = \int_0^{\delta_m} I(x) \cos(2\pi\lambda x) dx, \quad (3)$$

式中 δ_m 表示最大光程差。

由(2),(3)式经过进一步推导,干涉光强 $I(x)$ 还可以表示为

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

(4)式表示干涉光强的包络是一个 Sa 函数,主瓣宽度为 $4\pi/\tau_c$,中心频率为 x_0 。这些参数由 LASIS 仪器参数决定。

图 2 是由 LASIS 获得的一组干涉图像序列中的连续两幅干涉图像,图像序列由 CCD 阵列推扫获得,相邻图像之间存在明显的平移和光程差的不同,因此具有很强的帧间相关性。在图像内部,干涉光

强越大,所含光谱信息就越多,对恢复光谱分布的影响也就越大。干涉光强的包络是一个 Sa 函数,在光程差为零的地方,干涉条纹明显,干涉光强最大,随着光程差的增大,干涉光强迅速衰减。所以应重点保护干涉光强较大的像素点,以便从恢复图像中尽可能完整地恢复出各物点的光谱曲线。

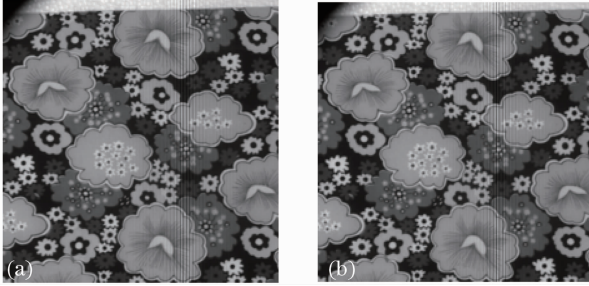


图 2 连续两帧干涉多光谱图像

Fig. 2 Two consecutive interferential multispectral image frames

3 压缩算法

干涉多光谱图像序列存在很强的帧内和帧间相关性,可以通过 Slepian-Wolf 编码器去除帧间相关性;通过小波变换去除图像像素之间的空间相关性之后,小波系数同一方向不同尺度之间仍然存在很强的相关性,即对于给定的阈值,如果低频子带的系

数不重要,处于同一方向相应位置的高频系数往往也不重要。SPIHT^[12]正是利用这一强相关性实现了图像的高效压缩。如何将 SPIHT 和 Slepian-Wolf 编码有效结合,以同时去除帧内、帧间及子带间的强相关性是本文研究的重点。

SPIHT 根据系数及其集合的重要性,即重要性信息 b_{sig} ,对系数排序,再按重要性输出系数的幅值细化位 b_r 及相应的符号位 b_s 。 b_{sig} 反映了系数的排序信息, b_r 和 b_s 则反映了重要系数在当前比特平面的重要性和该系数的符号。但是 SPIHT 输出的信息和图像内容有关,是变长的,若将 SPIHT 输出的信息直接送入 Slepian-Wolf 编码器,则边信息和原信息之间并不是一一对应的。相反,如果对边信息的系数采用和原信息完全相同的排序,则可以得到和原信息位置相对应的幅值细化位和符号位。虽然这样对边信息帧的系数做了“错误”的排序,却可以得到“正确”的边信息,就可以将 SPIHT 的输出结果送入 Slepian-Wolf 编码以同时去除帧间相关性和子带间的强相关性。

本文算法框图如图 3 所示。图像序列被分为两类:一类是 K 帧,采用传统的 SPIHT 帧内编解码,用来生成解码端的边信息帧 \tilde{W} ;另一类是位于 K 帧之间的 W 帧,采用单独编码联合解码以达到高效的压缩。下面主要阐述 W 帧的压缩算法。

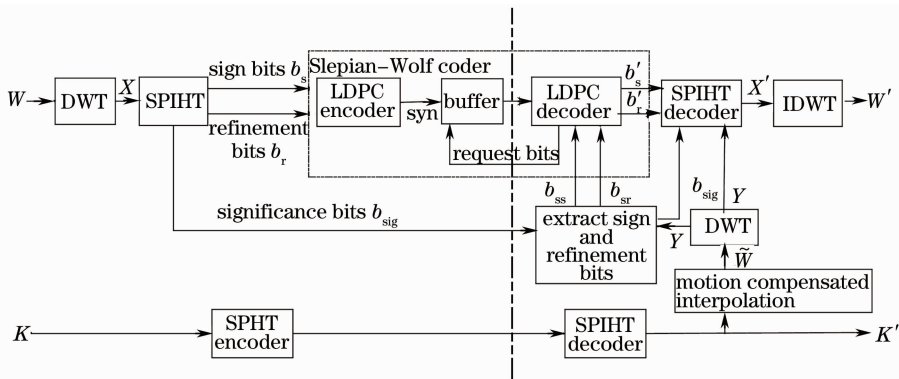


图 3 本文算法框图

Fig. 3 Block diagram of the proposed algorithm

编码时,首先对 W 做小波变换,得到小波系数 X ,并利用 SPIHT 算法对 X 排序。将 SPIHT 输出的重要性信息 b_{sig} 直接传到解码端,而仅仅将幅值细化位 b_s 和符号位 b_r 送入基于 LDPC 码的 Slepian-Wolf 编码器得到相应的校验比特 syn 存入缓存 $buffer$ 。SPIHT 采用逐次逼近量化,从系数的最高比特平面开始编码,该比特平面编码结束后,阈值减半,转至下一层比特平面,直到达到预定的质量为止。

解码时,首先由相邻 K 帧通过双向运动补偿插值得到边信息帧 \tilde{W} ,对 \tilde{W} 采用与编码端相同的小波变换得到小波系数 Y 。对于给定的比特平面,根据接收到的 X (注意不是 Y) 的重要性信息 b_{sig} 对 Y 排序,以得到 Y 的符号位 b_{ss} 和幅值细化位 b_{sr} 作为 X 中 b_s 和 b_r 的边信息。根据收到的校验比特 syn 和边信息 b_{ss} , b_{sr} ,进行 LDPC 解码以恢复 W 帧的符号位 b'_s 和幅值细化位 b'_r ,若不能以可靠的概率恢复 b'_s 或 b'_r ,则通

过反馈信道请求更多的校验比特重新解码,直至以可以接受的误码率恢复 b'_s 和 b'_r 。由恢复的 b'_s, b'_r 和接收到的 W 帧的重要性信息 b_{sig} 一起,就可以重构 W 帧的小波系数 X' 。

3.1 基于边信息的辅助重构方法

SPIHT 采用的是逐次逼近量化,所以在解码过程中,根据每个比特平面对应的阈值和系数在该比特平面的重要性,采用中点重建的方法重构系数。随着阈值减半,系数重构值逐步更新。但是单纯依靠中点重构方法无法达到最优的重构质量,尤其在低码率下。为此,根据 DSC 的特点,本文提出基于边信息的辅助重构方法,在逐次中点重构之后,在解码端进一步利用边信息重构系数,得到更好的重构质量。

假设最后编码的比特平面对应的阈值为 T_{th} ,则系数的量化步长 Δ_s 等于 T_{th} 。设系数 d_a 对应的边信息值为 s ,中点重构值为 d'_a ,则 d_a 所处的量化区间为 $(d'_a - T_{\text{th}}/2, d'_a + T_{\text{th}}/2)$ 。根据 d'_a 和 s 的关系,分三种情况重构系数 d_a :

- 1) 若 $s \in (d'_a - T_{\text{th}}/2, d'_a + T_{\text{th}}/2)$,则以边信息 s 作为重构值;
- 2) 若 $s \notin (d'_a - T_{\text{th}}/2, d'_a + T_{\text{th}}/2)$,则仍沿用中点重建,即以 d'_a 作为重构值;
- 3) 若该系数还没有被扫描到,即 $d'_a = 0$,则直接用边信息 s 填充。

采用本方法不仅可以系数的量化误差控制在量化区间内,而且可以充分利用原信息与边信息之间的强相关性,进一步减少量化误差,提高重构质量。

3.2 基于分布式信源编码的光谱信息保护

根据干涉强度,干涉多光谱图像可以分为强干涉区域和弱干涉区域。如(4)式所示,干涉强度的包络是一个 Sa 函数,主瓣集中了光谱的大部分能量,将主瓣对应的空间位置设为强干涉区域,其余区域为弱干涉区域。通常采用将强干涉区域设为 ROI 的方法,使其优先编码以保护强干涉区域的光谱信息。文献[13]采用提升强干涉区域小波系数的方法使其优先编码,但增加了待编码的比特平面数,造成冗余;文献[14]根据光程差提升强干涉区域每棵空间生成树的率失真斜率,提高了编码效率,但它需要存储每棵树的码流长度,同样增加了码流冗余。这两种算法还有一个共同的缺点,即以牺牲弱干涉区域的质量为代价来保护强干涉区域的光谱信息。针对这个问题,结合本文提出的辅助重构方法,提出基于分布式信源编码的光谱信息保护方法。考虑到失

真斜率提升是以单棵树为处理单位的,每棵树输出的码流长度较短,低密度奇偶校验(LDPC)码难以达到高效的编码效率,采用了基于系数提升的 ROI 方法保护光谱信息。

对于强干涉区域,根据光程差的相对大小提升相应位置的小波系数,设提升因子 $w(x)$ 为

$$w(x) = \max \left[p \left| \frac{I(x)}{I_0(x)} \right|, 1 \right] = \max \left\{ p \left| \text{Sa} \left[\frac{(x-x_0)\tau_c}{2} \right] \right|, 1 \right\}, \quad (5)$$

式中 x 为光程差, $I_0(x)$ 为零光程差处的干涉光强。在解码端,为了和 X 相对应,对边信息帧 \tilde{W} 的小波系数 Y 也做同样的加权提升。

虽然在保护强干涉区域时,采用了与文献[13]相似的 ROI 算法,在编码时对强干涉区域优先编码,牺牲了弱干涉区域的信息,但是在解码时,采用前面提出的辅助重构方法,利用边信息进行系数的联合重构,这样不但增强了强干涉区域的重构质量,更重要的是降低了弱干涉区域的量化误差,减少了弱干涉区域的信息损失,对弱干涉区域起到了一定的补偿保护作用。

4 实验与分析

分别从整体压缩性能、ROI 压缩性能和光谱曲线恢复性能三个方面对本文算法(SPIHT-DSC)进行了验证。测试图像序列为如图 2 所示的一组 LASIS 干涉多光谱图像序列,分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel} \times 8 \text{ bit}$ 。Slepian-Wolf 编解码系统采用码率可调的规则 LDPC 码^[15],检验结点度为 3,码长为 8520。

图 4 比较了 SPIHT-DSC, 3DSPIHT^[1], 变换域 DSC^[10], SPIHT^[12] 4 种压缩算法在不同比特率下的峰值信噪比(PSNR)。其中 3DSPIHT 帧间帧内分别做 3 级小波变换,图像组为 16; SPIHT-DSC 做 3 级小波变换,图像组为 2; 变换域 DSC 和 SPIHT-DSC 的区别仅在于将小波系数直接送入 LDPC 编码。调整 K 帧和 W 帧之间的码率使得 K 帧和 W 帧的重建质量相近。从图中结果可以看出,本文算法和 SPIHT 相比,PSNR 提高了 3~4 dB; 和变换域 DSC 相比,由于本文算法有效的利用了小波系数子带间的强相关性,PSNR 大约提高了 0.5 dB; 虽然和 3DSPIHT 相比,仍然有差距,比 3DSPIHT 低 1~2 个 dB,但是本文算法对每帧图像单独编码,克服了 3DSPIHT 存储量大和编码复杂度高的缺点。

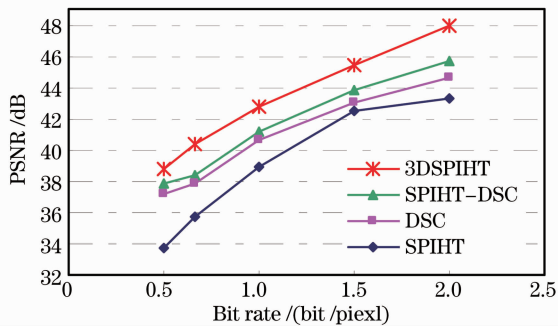


图 4 整体 PSNR 性能比较

Fig. 4 Comparison of the whole PSNR of the proposed algorithm with other compression algorithms

表 1 比较了文献[13]中的 SPIHT-ROI 和本文算法的 ROI 在 8 倍压缩下的压缩性能。(5)式中的 p 取 4。由表中可以看出,基于 SPIHT-ROI 的 ROI 区域性能的提高是以牺牲背景区域的性能为代价的。ROI 区域的 PSNR 提高了将近 3 dB,但是背景区域的 PSNR 下降了大约 2 dB。而本文的 ROI 算法在增强 ROI 区域重构质量的同时,利用边信息重构减少了背景区域的量化误差,从而减少了背景区域信息的损失。本文算法在提高了 ROI 区域的 PSNR 大约 3 dB 的同时,背景区域的 PSNR 仅仅下降了约 0.5 dB。

表 1 ROI 性能比较

Table 1 Comparison of the performance on ROI

	SPIHT	SPIHT-ROI	SPIHT-DSC	SPIHT-DSC-ROI
ROI /dB	37.55	40.7	40.62	43.46
Background /dB	38.45	36.22	41.44	40.92
Whole /dB	38.28	36.75	41.29	41.17

对干涉多光谱图像进行压缩不仅要得到优良的构像质量,更重要的是恢复出效果良好的光谱图。用(3)式的傅里叶变换恢复 46 个谱段的光谱图。下面比较本文算法和其他算法在 8 倍压缩下的干涉多光谱图像恢复光谱图的光谱曲线以及和原始光谱曲线的均方误差(MSE)。图 5 为随机抽取的一个像素点的 46 个谱段的光谱曲线图,比较各种压缩算法复原的光谱曲线可以看出,本文算法(SPIHT-DSC-ROI)在拟合原始光谱曲线的能力上有明显的提高。连续抽取 100 个像素点,计算恢复出的光谱曲线与原始光谱曲线的均方误差,结果如图 6 所示。本文算法的 MSE 最小,大约 51.82;3DSPIHT 方法 MSE 为 82.65;而 SPIHT-ROI 方法 MSE 则高达 137.76。实验结果表明本文算法的恢复光谱曲线的

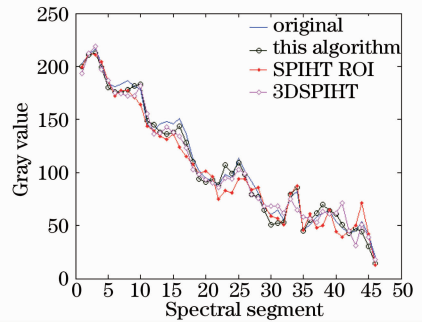


图 5 单点重建光谱曲线

Fig. 5 Reconstructed spectrum curves of a single point

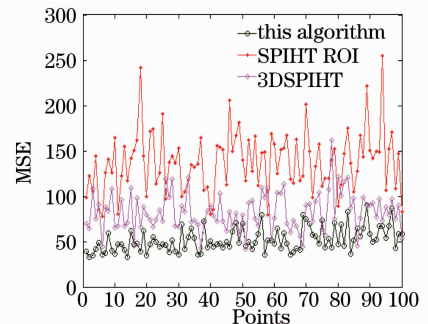


图 6 连续 100 个像素点的 MSE 曲线

Fig. 6 MSE curves of 100 successive pixel points
能力明显优于其他算法。

5 结 论

针对现有变换域 DSC 算法未能考虑小波系数子带之间相关性,提出了基于 SPIHT 的分布式干涉多光谱图像压缩算法,通过将 SPIHT 算法和 DSC 有效结合,同时去除了帧内、帧间及小波系数子带之间的强相关性,进一步提高了 DSC 的压缩性能。另外,根据 DSC 的特点,提出了基于边信息的辅助重构方法,减少了量化误差,提高了重构质量。该方法在基于 ROI 的光谱信息保护中也表现出明显的优势,在提高强干涉区域重构质量的同时,减少了弱干涉区域信息的损失,同时保护了光谱信息和空间信息。算法对每幅图像独立编码,具有编码复杂度低,存储量小的优点,在重构质量和拟合原始光谱曲线方面的性能也明显优于其他干涉多光谱图像压缩算法。

参 考 文 献

- 1 P. L. Dragotti, G. Poggi, R. P. Ragozini. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm [J]. *IEEE T. Geosci. Remote.*, 2000, **38**(1): 416~428
- 2 Ma Jing, Wu Chengke, Li Yunsong. Compression of the interferential multispectral image based on motion compensation and region of interest coding[J]. *J. Xi'an Jiaotong University*,

- 2006, **40**(4): 450~453
- 马 静, 吴成柯, 李云松. 基于运动估计和感兴趣区域的干涉多光谱图像压缩算法[J]. 西安交通大学学报, 2006, **40**(4): 450~453
- 3 Kong Fanqiang, Wu Chengke, Wang Keyan *et al.*. Compression of the interferential multi-spectral image based on motion compensation and rate pre-allocation algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1163~1166
- 孔繁锵, 吴成柯, 王柯俨等. 基于运动补偿和码率预分配的干涉多光谱图像压缩算法[J]. 光子学报, 2007, **36**(6): 1163~1166
- 4 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): 1494~1498
- 5 D. Slepian, J. Wolf. Noiseless coding of correlated information sources [J]. *IEEE T. Inform. Theory*, 1973, **19**(4): 471~480
- 6 A. Wyner, J. Ziv. The rate-distortion function for source coding with side information at the decoder [J]. *IEEE T. Inform. Theory*, 1976, **22**(1): 1~10
- 7 S. Pradhan, K. Ramchandran. Distributed source coding using syndromes (DISCUS): design and construction [J]. *J. Inform. Theory*, 2003, **49**(3): 626~643
- 8 A. Liveris, Z. Xiong, C. Georghiadis. Compression of binary sources with side information at the decoder using LDPC codes [J]. *IEEE Commun. Lett.*, 2002, **6**(10): 440~442
- 9 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
- 10 Juan Song, Yunsong Li, Chengke Wu *et al.*. Compression of the interferential multispectral image based on distributed source coding[C]. *SPIE*, 2008, **7084**: 7084G
- 11 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 瑛, 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
- 12 A. Said, W. A. Pearlman. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. *IEEE T. Circ. Syst. Vid.*, 1996, **6**(3): 243~249
- 13 Li Yunsong, Wu Chengke, Chen Jun *et al.*. Spectral satellite image compression based on wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 692~695
- 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): 692~695
- 14 Kong Fanqiang, Li Yunsong, Wu Chengke *et al.*. The image compression algorithm of the large aperture static imaging interference spectrometry [J]. *J. Astronautics*, 2007, **28**(6): 1694~1697
- 孔繁锵, 李云松, 吴成柯等. 大孔径静态干涉多光谱图像压缩算法[J]. 宇航学报, 2007, **28**(6): 1694~1697
- 15 M. Sartipi, F. Fekri. Distributed source coding using short to moderate length rate-compatible LDPC codes: the entire Slepian-Wolf rate region [J]. *IEEE T. Commun.*, 2008, **56**(3): 400~411