

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.12.005

干涉高光谱图像的主分-调制预测无损压缩

李 进^{1,2}, 金龙旭¹, 吕增明¹, 韩双丽¹, 武奕楠¹, 郝贤鹏¹, 张然峰¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要:提出一种基于主分-调制预测的高光谱图像无损压缩算法。将干涉高光谱图像分为空间方向和光程差方向,空间方向采用主分量预测算法来去除帧间冗余;光程差方向采用调制分量预测算法来去除谱间冗余。主分量预测采用两步预测算法,第一步采用四阶预测器得到预测参考值,第二步采用 8 级查找表搜索预测算法得到实际预测值,然后将参考预测值和实际预测值进行比较得出最后的预测值。调制分量预测采用线性预测得到调制预测帧。最后,根据主分预测帧和调制预测帧得到最终预测帧,从而得出残差帧,利用残差帧进行熵编码。实验结果表明,文中算法的平均压缩码率达到 3.05 bpp,与传统高光谱图像无损压缩算法比较,平均压缩码率提高了 0.14~2.94 bpp,有效地提高了干涉高光谱图像无损压缩码率。

关键词:干涉高光谱图像;无损压缩;主分量预测;调制分量预测;8 级查找表

中图分类号:TP391.4

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)12-028-08

Lossless compression of hyper-spectral interference image based on principal-modulated prediction

LI Jin^{1,2}, JIN Longxu¹, LÜ Zengming¹, HAN Shuangli¹,

WU Yinan¹, HAO Xianpeng¹, ZHANG Ranfeng¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A lossless compression algorithm of hyper-spectral interference image based on principal-modulated prediction is proposed. Hyper-spectral interference images are divided into the space direction and the optical path difference (OPD) direction. In the space direction, a principal component prediction algorithm is used to reduce the inter-frame redundancies. And a modulated component prediction is used to reduce the spectral redundancies in the OPD direction. A two-step prediction algorithm is proposed for the principal component prediction. In the first step of prediction, a four order predictor is used to obtain a prediction reference value. In the second step, an 8-level lookup tables' prediction algorithm is proposed and used to obtain the real-prediction. Then the final prediction is obtained through comparison between the real value and the reference prediction. A linearity prediction is used to obtain modulation prediction frame in the modulated component prediction. Finally, the final prediction frame is obtained through comparison between the principal component frame and the modulated component prediction frame. And the residual frame is obtained, which is encoded by an entropy coder. The experiments results show that the average compression ratio of proposed compression algorithm is reached to 3.05 bpp. Compared with

收稿日期:2013-07-05

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(20126016)

作者简介:李进(1984-),男,博士研究生,主要研究方向为星载 CCD 相机成像、压缩、存储技术,(E-mail)664910699@qq.com。

traditional approaches, the proposed method can improve the average compression ratio by 0.14~2.94 bpp. They effectively improve the lossless compression ratio for hyper-spectral image lossless compression.

Key words: hyper-spectral interference image; lossless compression; principal component prediction; modulated component prediction; 8-level lookup tables' prediction

基于推扫式傅里叶变换型成像原理的大孔径干涉光谱仪(LASIS)通过卫星推扫产生一系列干涉图像从而获得分辨率极高的信息,LASIS采集的图像数据十分庞大,现有星载存储器容量有限,卫星信道带宽受限,无法适应干涉高光谱遥感图像的海量数据。因此,必须要对干涉高光谱遥感图像进行压缩。干涉高光谱遥感图像包含了十分丰富的地物特征信息,具有广泛和长期的应用价值,有损压缩会对后续的应用造成无法估量的影响,因此干涉高光谱遥感图像压缩一般需要进行无损压缩。

目前,对高光谱遥感图像进行无损压缩的常用方法是基于预测、变化、矢量量化以及它们的组合或改进的图像压缩算法的图像压缩算法,如 Rice 预测^[1]、双向预测^[2]、LAIS-QLUT-OPT 预测^[3-4]、分类和陪集码^[5]等。这些压缩算法取得了较好的压缩效

果,但不适合干涉高光谱图像的压缩。对于干涉高光谱图像压缩,需要根据其成像原理和图像特点进行压缩。目前对干涉高光谱图像压缩大多采用基于小波变换的有损压缩算法如 AT-3DSPIHT^[6]、方向预测三维小波变换^[7]、分层数集合分割^[8],这些压缩对于干涉高光谱图像有损压缩取得了满意的效果。

文中从干涉高光谱图像无损压缩的角度进行深入的研究,在分析了干涉高光谱成像原理和光谱特点的基础上,提出了主分-调制预测干涉高光谱图像无损压缩算法。

1 干涉高光谱图像成像原理及光谱特点

大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS)是基于推扫式傅里叶变换型成像原理光谱仪,其成像光路原理如图 1 所示。

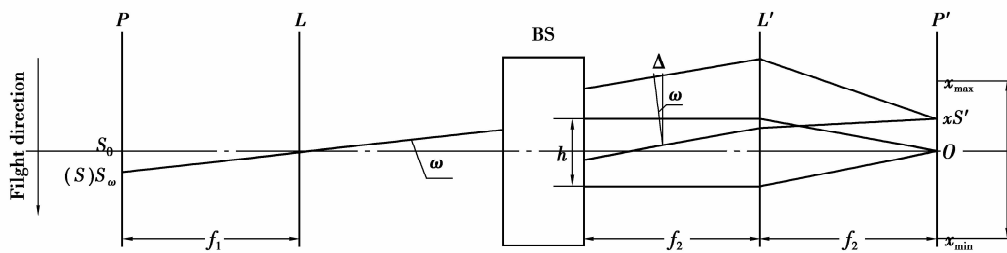


图 1 干涉高光谱图像成像原理

视场角为 0 和 θ 的 2 束光线入射到 LASIS 中,每一束光经 Sagnac 型横向剪切(BS)干涉仪,生成 2 束平行的相干光,当 2 束平行相干光汇聚到收集镜 L' 的后焦面 P' 上同一点时就存在光程差,进而发生干涉。干涉高光谱图像成像过程为:当某时刻一个物点 S 进入 LASIS 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 S' (x 点)也将沿横向从 CCD 探测器的一端(x_{\max} 点)移动中心(0 点)在移动到另一端(x_{\min} 点),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 S' 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。对干涉高光谱图像进行傅里叶变换可以得到目标点的光谱分布,进而获得一维光谱和一维空间信息。光谱仪推扫过目标像时所获得为另一维空间信息,可见干涉高光谱图像是 3 维图像信

息。设被剪切开的 2 束光之间的剪切量为 h ,傅立叶透镜的焦距为 f_2 ,由图 1 可以求得这 2 束光在像面 P' 上干涉的光程差为

$$\Delta(x) = h \sin \omega = \frac{h}{f_2} x. \quad (1)$$

当光源具有一定的光谱分布时,设波长的范围为 $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ 时,干涉光强为

$$I(x) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B(\lambda) \cos\left(\frac{2\pi\lambda h}{f_2} x\right) d\lambda, \quad (2)$$

其中, $B(\lambda)$ 为入射光谱强度分布,由傅里叶变换光谱学理论可求得

$$B(\lambda) = \int_0^{\lambda_{\max}} I(x) \cos\left(\frac{2\pi\lambda h}{f_2} x\right) dx, \quad (3)$$

式(2)可变换为

$$I(x) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B(\lambda) d\lambda - 2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B(\lambda) \sin^2\left(\frac{2\pi\lambda h}{f_2} x\right) d\lambda, \quad (4)$$

式中： $\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B(\lambda) d\lambda$ 是光波无干涉时的强度之和，称为 LASIS 数据的主分量。 $2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B(\lambda) \sin^2\left(\frac{2\pi\lambda h}{f_2} x\right) d\lambda$ 是由横向剪切仪的干涉调制所形成的，称为调制分量。主分量包括了空间信息，而调制分量主要包括了光谱信息，即 LASIS 数据是主分量和调制分量的合成。从图像上看(如图 2 所示)，是清晰的空间景物和干涉条纹的叠加，且图像右侧干涉条纹不明显，但左侧干涉条纹很明显，这是由于光干涉原理产生的，调制分量强度随着光程差增加干涉现象减弱，随着视场角增大而减弱。

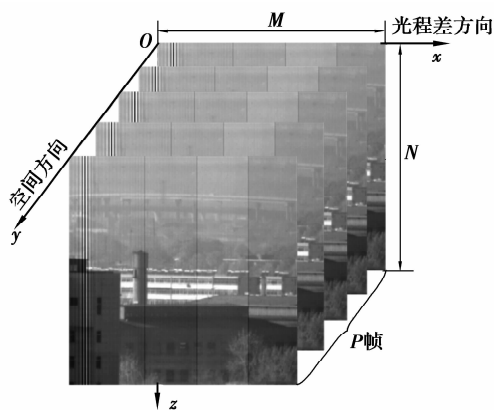


图 2 干涉高光谱图像特点

由上述干涉高光谱成像原理可知，LASIS 高光谱图像数据可以看成三维立体数据，将每 P 帧图像为一组数据进行压缩。每帧图像大小为 $M \times N$ ， M 表示每行中有 M 个不同的光程差， N 表示一帧中共有 N 行空间像素，可见高光谱三维图像数据中存在 2 个方向：一个方向为光程差方向，另一个方向为空间方向。从空间方向上看，高光谱图像可以被看为具有 P 帧数据，每帧有 $M \times N$ 个像素；从光程差方向上看，可以被看作具有 M 个光程差通道，每个通道有 $M \times P$ 个像素。LASIS 高光谱图像数据的主分量中的空间信息冗余大部分在空间方向，而调制分量中的光谱冗余大部分在光程差方向中。空间方向存在帧间的空间运动信息，光程差方向表示光谱信息。因此，根据这种特点提出一种主分-调制预测高光谱图像算法来消除空间冗余和光谱冗余。

2 主分-调制预测算法提出

2.1 算法总体方案

根据高光谱图像的主分量和调制分量的合成特点，提出一种主分-调制预测算法，算法框图如图 3 所示。

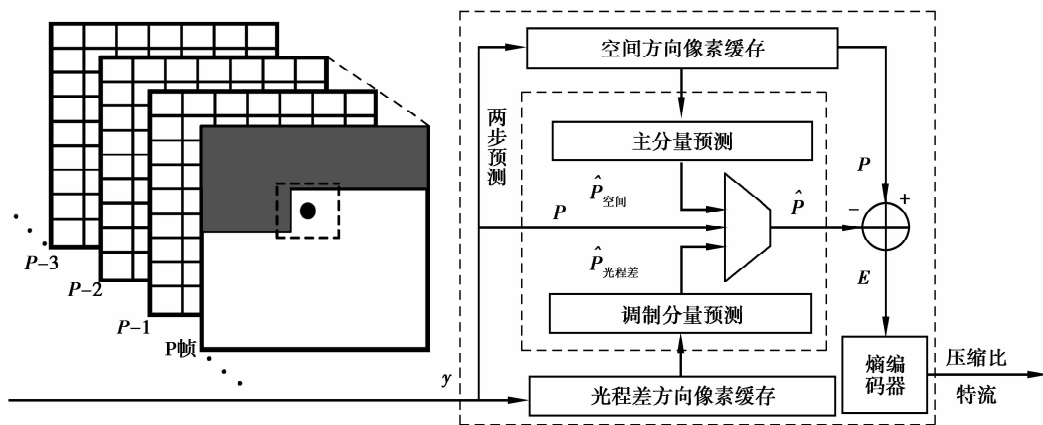


图 3 研究算法框图

压缩算法主要分为：空间方向主分量预测，光程差方向的调制分量预测以及熵编码模块 3 部分。

主分量预测得到空间方向预测帧 $\hat{P}_{\text{空间}}$ ，与当前帧 P 求得的残差帧，可以消除空间方向中的大部分空间冗余信息消除，调制分量预测得到光程差方向预测帧 $\hat{P}_{\text{光程差}}$ ，与当前帧 P 求得的残差帧，可以消除光程差方向中的光谱冗余信息消除。为了同时消除空间冗余和光谱冗余，将预测帧 $\hat{P}_{\text{空间}}$ 、 $\hat{P}_{\text{光程差}}$ 与当前帧 P 的各行各列像素进行比较，2 个预测帧中的各

行各列像素哪个与 P 帧中对应的像素接近为最后预测帧 \hat{P} 的像素。将当前帧 P 与预测帧 \hat{P} 相减得到预测残差帧 E ，最后将预测残差帧 E 采用自适应熵编码算法算法得到压缩后码流。

2.2 主分量预测算法

LASIS 数据帧间并没有光谱谱段的存在，主分量预测算法主要消除相邻帧中叠加的空间信息，提出一种两步预测算法，同时消除了帧间和帧内冗余。考虑到内存限制，将每 5 帧连续图像为一组进行帧

间预测。设 $f(x, y, z)$ 表示第 z 帧图像第 x 行 y 列像素, F_z 是第 z 帧图像像素矩阵

$$F_z = \begin{bmatrix} f(1,1,z) & f(1,2,z) & \cdots & f(1,M,z) \\ f(2,1,z) & f(2,2,z) & \cdots & f(2,M,z) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N,1,z) & f(N,2,z) & \cdots & f(N,M,z) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

预测帧图像像素矩阵 \hat{F}_k 中的像素 $\hat{f}(x, y, z)$ 由以前帧 $k-1, k-2, k-3, k-4$ 采用文中提出的两步预测算法求得。算法描述为:第 1 步预测采用四阶预测器:

$$\hat{f}_{\text{ref}} = \alpha(u - m_u) + \beta(v - m_v) + \lambda(w - m_w) + \gamma(x - m_x) + m_y, \quad (6)$$

其中, x, w, v, u 是与帧 z 的相同位置的帧 $z-1, z-2, z-3, z-4$ 的像素值。 m 为一随机变量的期望值。 $\alpha, \beta, \lambda, \gamma$ 是预测系数。预测系数 $\alpha, \beta, \lambda, \gamma$ 通过求解 Wiener-Hopf 方程可得。

$$\begin{bmatrix} \delta_u^2 & \delta_{uv} & \delta_{uw} & \delta_{uv} \\ \delta_{uv} & \delta_v^2 & \delta_{vw} & \delta_{vw} \\ \delta_{uw} & \delta_{vw} & \delta_w^2 & \delta_{wx} \\ \delta_{uv} & \delta_{vw} & \delta_{wx} & \delta_x^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \lambda \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{yu} \\ \delta_{yv} \\ \delta_{yw} \\ \delta_{yx} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

设 z 帧对应的图像为如图 4(a) 所示, $z-1$ 帧对应的图像如图 4(b) 所示。

	y_{20}	y_{18}	y_{17}	y_{19}	y_{21}
y_{16}	y_{13}	y_9	y_7	y_6	y_{10}
y_{15}	y_{12}	y_8	y_3	y_2	y_4
y_{14}	y_{11}	y_5	y_1	y	

(a) 谱段内

	w_{20}	w_{18}	w_{17}	w_{19}	w_{21}
w_{16}	w_{13}	w_9	w_7	w_6	w_{10}
w_{15}	w_{12}	w_8	w_3	w_2	w_4
w_{14}	w_{11}	w_5	w_1	w	

(b) 谱段间

图 4 图像内容

统计参数公式表示为

$$\delta_x^2 = E\{x^2\} - m_x^2 = \frac{1}{M^2} (M \sum_{i=1}^M x_i^2 - (\sum_{i=1}^M x_i)^2), \quad (8)$$

$$\delta_{wy} = E\{wy\} - m_w m_y = \frac{1}{M^2} (M \sum_{i=1}^M w_i y_i - \sum_{i=1}^M w_i \sum_{i=1}^M y_i). \quad (9)$$

这里 M 为图像大小尺寸, 同理, 其他系数可以被求得。

第 2 步预测是把第 1 步预测值 \hat{f}_{ref} 作为参考预测帧, 然后在当前帧 z 中搜索预测像素值与 \hat{f}_{ref} 最近的像素值作为最后的预测值 $\hat{f}(x, y, z)$ 。文中提出的搜索预测算法思想为: 假设 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ 分别为 $f(x, y, z-1), f(x, y, z-2), f(x, y, z-3), f(x, y,$

$z-4$) 的像素值。在前 4 帧中对应的图像中分别搜索像素值为 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ 的像素, 如果搜索到像素 $f(x_1^{(i)}, y_1^{(i)}, z-i), f(x_2^{(i)}, y_2^{(i)}, z-i) \cdots f(x_k^{(i)}, y_k^{(i)}, z-i)$, 其中, $i=1, 2, 3, 4, 1 \leq k \leq MN, M, N$ 分别为图像行数和列数; 这些搜索到的像素在当前帧 z 中的同位置像素为 $f(x_1^{(i)}, y_1^{(i)}, z), f(x_2^{(i)}, y_2^{(i)}, z) \cdots f(x_k^{(i)}, y_k^{(i)}, z)$, 然后将 $f(x_1^{(i)}, y_1^{(i)}, z), f(x_2^{(i)}, y_2^{(i)}, z) \cdots f(x_k^{(i)}, y_k^{(i)}, z)$ 的值与预测参考值 \hat{f}_{ref} 进行比较, 得出最终的预测值。如果未搜索到, 则将 \hat{f}_{ref} 与 $f(x, y, z-1), f(x, y, z-2), f(x, y, z-3), f(x, y, z-4)$ 的像素值进行比较, 哪个接近 $f(x, y, z)$ 的像素值, 哪个作为最终的预测值。

为了提高搜索速度, 文中提出一种多帧查找表 (LUT) 搜索算法进行搜索。采用 8 级查找表进行预测和更新来提高预测搜索速度, 算法具体描述为:

设 $f(x, y, z) (0 \leq f(x, y, z) \leq f_{\text{max}}, 0 \leq x \leq M, 0 \leq y \leq N, 1 \leq z \leq K)$, LUT 为 $T_i^{(z)}[?]$ ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$)。LUT 长度为 f_{max} , 由第 1 步预测器求得像素 $f(x, y, z)$ 的参考预测值为 $P'_{\text{ref}}, f(x, y, z)$ 预测值 $f'(x, y, z)$, 则 LUT 预测步骤为

$$f'(x, y, z) = f'_{\min\{\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7, \epsilon_8\}}(x, y, z), \quad (10)$$

式中:

$$\epsilon_1 = \operatorname{argmin}\{ |T_1^{(z)}[f(x, y, z-2)] - P'_{\text{ref}}| \}; \quad (11)$$

$$\epsilon_2 = \operatorname{argmin}\{ |T_2^{(z)}[f(x, y, z-2)] - P'_{\text{ref}}| \}; \quad (12)$$

$$\epsilon_3 = \operatorname{argmin}\{ |T_3^{(z)}[f(x, y, z-1)] - P'_{\text{ref}}| \}; \quad (13)$$

$$\epsilon_4 = \operatorname{argmin}\{ |T_4^{(z)}[f(x, y, z-1)] - P'_{\text{ref}}| \}; \quad (14)$$

$$\epsilon_5 = \operatorname{argmin}\{ |T_5^{(z)}[f(x, y, z+1)] - P'_{\text{ref}}| \}; \quad (15)$$

$$\epsilon_6 = \operatorname{argmin}\{ |T_6^{(z)}[f(x, y, z+1)] - P'_{\text{ref}}| \}; \quad (16)$$

$$\epsilon_7 = \operatorname{argmin}\{ |T_7^{(z)}[f(x, y, z+2)] - P'_{\text{ref}}| \}; \quad (17)$$

$$\epsilon_8 = \operatorname{argmin}\{ |T_8^{(z)}[f(x, y, z+2)] - P'_{\text{ref}}| \}. \quad (18)$$

LUT 的更新步骤为

$$T_2^{(z)}[f(x, y, z-2)] = T_1^{(z)}[f(x, y, z-2)], \quad (19)$$

$$T_4^{(z)}[f(x, y, z-1)] = T_3^{(z)}[f(x, y, z-1)], \quad (20)$$

$$T_6^{(z)}[f(x, y, z + 1)] = T_5^{(z)}[f(x, y, z + 1)], \quad (21)$$

$$T_8^{(z)}[f(x, y, z + 2)] = T_7^{(z)}[f(x, y, z + 2)], \quad (22)$$

$$T_1^{(z)}[f(x, y, z - 2)] = f(x, y, z), \quad (23)$$

$$T_3^{(z)}[f(x, y, z - 1)] = f(x, y, z), \quad (24)$$

$$T_5^{(z)}[f(x, y, z + 1)] = f(x, y, z), \quad (25)$$

$$T_7^{(z)}[f(x, y, z + 2)] = f(x, y, z). \quad (26)$$

最后将 P'_{ret} , $T_1^{(z)}[f(x, y, z - 2)]$, $T_2^{(z)}[f(x, y, z - 2)]$, $T_3^{(z)}[f(x, y, z - 1)]$, $T_4^{(z)}[f(x, y, z - 1)]$, $T_5^{(z)}[f(x, y, z + 1)]$, $T_6^{(z)}[f(x, y, z + 1)]$, $T_7^{(z)}[f(x, y, z + 2)]$, $T_8^{(z)}[f(x, y, z + 2)]$ 进行比较得出最终的预测值。图 5 和图 6 进一步说明文中提出的基于 8 级查找表的搜索预测算法的预测和更新步骤。

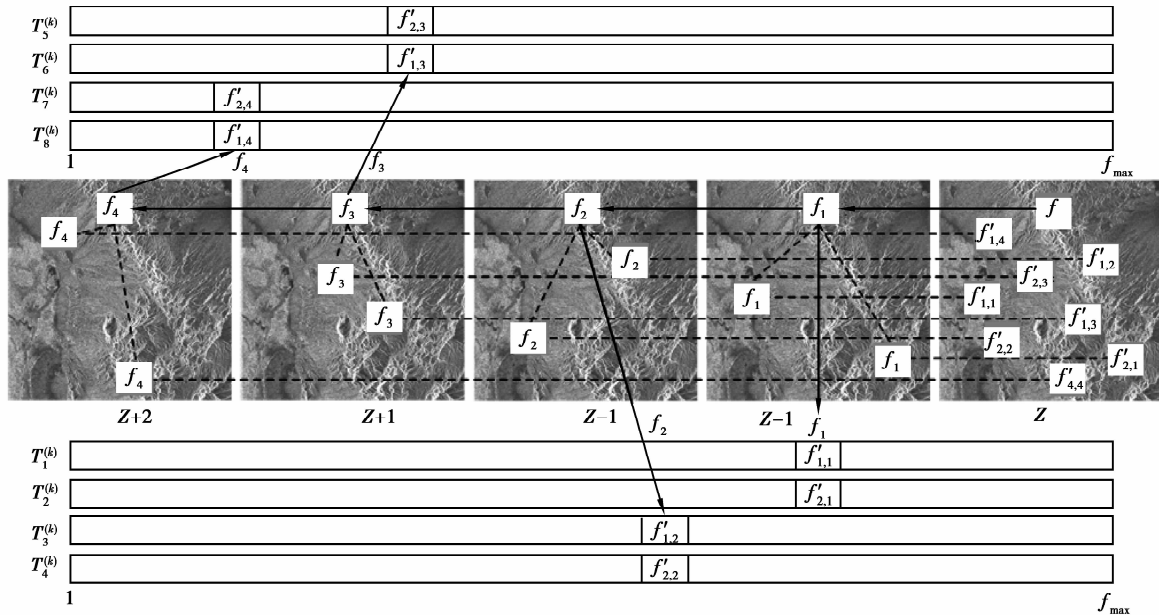


图 5 LUT 预测步骤

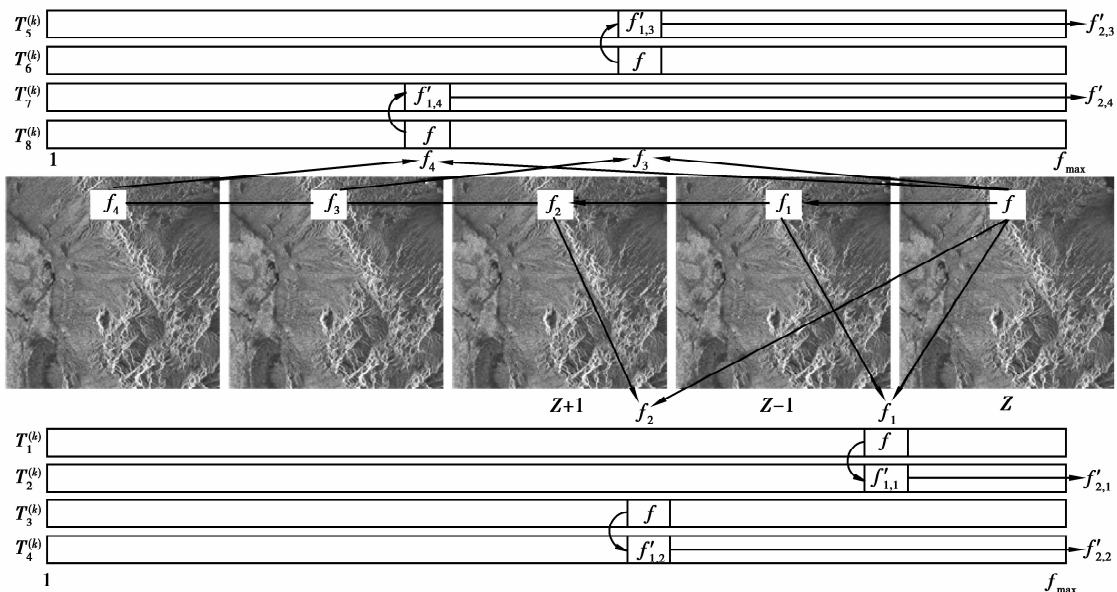


图 6 LUT 更新步骤

2.3 调制分量预测算法

将相同光程差的像素作为 1 个通道的数据,对不同通道间像素进行预测,提出一种线性预测算法。设 H_n 是光程差方向上的第 k 帧图像, $\mathbf{H}_k = [f_{1,k,1}, \dots, f_{N,k,1}, f_{1,k,2}, \dots, f_{N,k,P}]^T$ 。算法描述为:第 k 个通道的预测值由它前面 K_p 个光程差通道的预测加权值 $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K]^T$ 的估计值来表示,则

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{H}_{k,K}\boldsymbol{\beta} + \hat{\mathbf{H}}_k, \quad (27)$$

其中,

$$\mathbf{H}_{k,K} = [\mathbf{H}_{k-K}, \dots, \mathbf{H}_{k-1}];$$

$$K = \begin{cases} K_p & \text{if } k > K_p, \\ k-1 & \text{if } 1 < k < K_p. \end{cases} \quad (28)$$

为了残差 $\hat{\mathbf{H}}_k$ 最小,则要求权值 $\boldsymbol{\beta}$ 为

$$\boldsymbol{\beta} = \arg \min_{\boldsymbol{\beta} \in \mathbf{R}^N} \|\mathbf{H}_k - \mathbf{H}_{k,K}\boldsymbol{\beta}\|^2, \quad (29)$$

取 $\|\mathbf{H}_k - \mathbf{H}_{k,K}\boldsymbol{\beta}\|^2$ 关于 $\boldsymbol{\beta}$ 的一阶偏导数,使其为 0,可以得到线性方程

$$-\mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_k + \mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_{k,K} \boldsymbol{\beta} = 0, \quad (30)$$

从而可以得到

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_{k,K})^{-1} \mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_k, \quad (31)$$

为了避免奇异矩阵求逆不存在的问题,以矩阵伪逆代替矩阵求逆,可以得到预测系数

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_{k,K})^\dagger \mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_k. \quad (32)$$

为了加快预测速度,对式(32)进行优化,当 $k > K_p$,即目标预测帧位于第 K_p 帧以后,对于式(32)文中 $\mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_{k,K}$ 的计算可看作一个迭代过程,即第 $k+1$ 目标预测帧的计算可利用第 k 帧的结果。在 k 帧预测时

$$\mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} Q_{k,k} & Q_{k,k+1} & \cdots & Q_{k,k+K-1} \\ Q_{k+1,k} & Q_{k+1,k+1} & \cdots & Q_{k+1,k+K-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{k+K-1,k} & Q_{k+K-1,k+1} & \cdots & Q_{k+K-1,k+K-1} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

将第 $k+1$ 帧预测表示为

$$\mathbf{H}_{k+1,K}^T Y_{k+1,K} = \begin{bmatrix} R_{k+1} & B_{k+1} \\ B_{k+1}^T & a_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (34)$$

这里 $\mathbf{R}_{k+1} = \begin{bmatrix} Q_{k+1,k+1} & \cdots & Q_{k+1,k+K-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{k+K-1,k+1} & \cdots & Q_{k+K-1,k+K-1} \end{bmatrix}$ 可直接

采用矩阵(33)的右下部分,仅需计算 $\mathbf{B}_{k+1} = [Q_{k+K,k+1}, \dots, Q_{k+K,k+K-1}]^T$ 和标量 $a_{k+1} = Q_{k+K,k+K}$ 。对于式(32)中 $\mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_k$ 的计算可表示为 $\mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_k = [b, B_{k+1}^T]^T$,而 \mathbf{B}_{k+1} 可直接从第 k 帧获得。当 $1 < k \leq K_p$,即目标预测帧位于第 N_p 帧前,它的预测只能使用位于它之前的帧来预测它。对于每个目标帧预测

时,不需要每次都计算 $\mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_{k,K}$,而仅需要为这 K_p 帧的预测存储 1 个 $K_p \times K_p$ 大小的矩阵。设矩阵

$$\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{H}_{K_p, \dots, K_p}^T \mathbf{H}_{K_p, \dots, K_p}, \quad (35)$$

已经完成计算并被存储,预测系数计算式(32)中的 $\mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_{k,K}$ 仅需从矩阵 $\boldsymbol{\Psi}$ 中选取从第 1 列到第 K 列,第 1 行到第 K 行的元素即可。对于预测系数式(32)中 $\mathbf{H}_{k,K}^T \mathbf{H}_k$ 的计算,仅需选取矩阵 $\boldsymbol{\Psi}$ 中第 k 列的元素。

3 实验与结果

3.1 压缩算法实验结果

为了验证提出的压缩算法可行性,测试图像选用 LASIS 高光谱图像序列,图像格式为 256 pixel \times 288 pixel, 12 bit/pixel,即每帧高光谱图像含 256 行,每行有 288 个不同光程差的像素,每个像素深度为 12 bit。整个算法在计算机上用 Matlab R2008a 仿真。图 7(a)~(b)分别为干涉高光谱原始图像,主分量预测后得到残差帧,调制分量预测后得到残差帧以及重构图像。

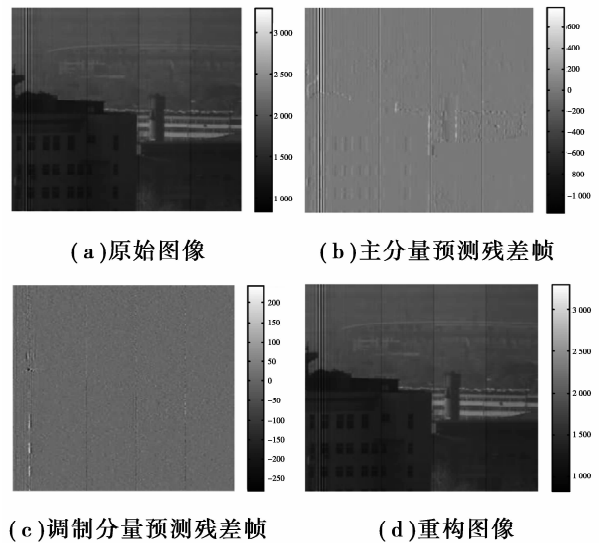


图 7 干涉高光谱图像压缩

由图 7(a)和 7(d)可知,原始图像和重构图像没有任何区别,这是由于压缩为无损压缩,原始图像和重构图像的每个像素值理论上应该都完全一样。对图 7 的原始图像和重构图像采用均方误差公式进行比较,均方误差公式 MSE 为

$$\text{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f(x,y) - g(x,y))^2}{MN}}, \quad (36)$$

其中: $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 分别为原始图像和重构图

像, M 和 N 为图像大小。使用式(36)对图 7 的原始图像和重构图像进行计算,求得 2 幅图像的 MSE 均为 0,理论与实际相符合。可见,压缩算法是可行的。另外,由图 7(b)和(c)知,经主分量预测后空间方向的大部分空间冗余被消除了,像素深度由 12 bit 减少到 0~8 bit,大部分像素值位于 6 bit。经调制分量预测后,光程方向的大部分光谱冗余被消除了,像素动态范围减少到 0~5 bit,大部分像素位于 3 bit。对图 7(b)和(c)采用图像熵公式进行比较,预测残差图像熵公式为

$$E = \sum_{i \in I} p_i \times \log(p_i), \quad (37)$$

其中, p_i 为像素值 i 出现的概率。由式(37)对图 7(b)和(c)进行计算得到,图(b)的熵为 10.874 1,图(c)的熵为 4.597 6。可见,经过主分量预测和调制分量预测后空间冗余和光谱冗余被大部分消除了,大大提高了无损压缩比。

3.2 压缩算法性能实验结果

选用抖动程度不同的 12 组,每组 5 帧 LASIS 高光谱图像序列进行测试,平均压缩码率测试结果如表 1 所示。

表 1 压缩测试结果 bits/pixel

图像名	主分量预测	调制分量预测
LASIS-1	4.09	3.02
LASIS-2	4.14	3.13
LASIS-3	3.60	2.96
LASIS-4	4.21	3.29
LASIS-5	4.35	3.36
LASIS-6	4.29	3.24
LASIS-7	3.16	2.82
LASIS-8	4.11	3.12
LASIS-9	3.23	2.99
LASIS-10	3.19	2.94
LASIS-11	3.79	3.04
LASIS-12	3.08	2.76
平均压缩码率	3.77	3.05

由表 1 知干涉高光谱图像压缩算法经主分量调制预测后平均压缩码率为 3.77 bits/pixel,当经主分量预测,再经调制分量预测后平均压缩码率为 3.05,提高了 0.72 bits/pixel。

文中提出的主分-调制预测干涉高光谱图像压缩算法与传统高光谱图像压缩算法平均压缩码率比

较结果如表 2 所示。

表 2 压缩性能比较结果 bits/pixel

方法	平均压缩码率	方法	平均压缩码率
双向预测 ^[2]	5.24	最佳递归双向 ^[11]	4.47
LASIS-LUT ^[4]	4.89	IP3-BSP ^[12]	3.92
聚类 ^[9]	5.96	TSP-W2 ^[13]	3.95
s-DSC-inf ^[10]	3.22	多波段预测 ^[14]	3.19

由表 1 和表 2 知,文中提出的压缩算法具有最好的压缩性能,比现有压缩算法平均压缩码率提高了 0.14~2.94 bpp。新压缩算法平均压缩码率小于 4 bpp,满足项目设计指标。另外,目前 LASIS 图像压缩算法大多采用有损压缩,如文献[6]采用 3D-DWT+3D-SPIHT 算法,压缩码率为 1 bpp。文献[8]采用分布式信源编码方法,压缩码率为 0.5 bpp。文献[15]采用小波域匹配去除帧间冗余,采用码率预分配控制码率,压缩码率为 1 bpp。这些方法仅满足有损压缩的应用,不能适合无损应用。可见,文中提出的压缩算法突破了传统 LASIS 压缩方法应用层面,为干涉高光谱图像无损压缩提供了一种很好的解决方法。

4 结 论

提出了主分量预测和调制分量预测的干涉高光谱图像无损压缩算法。首先将干涉高光谱图像分为空间方向和光程差方向,空间方向采用主分量预测算法,光程差方向采用调制分量预测算法,通过这 2 种预测将空间冗余和光谱冗余减少到了最小。主分量预测采用两步预测算法,第 1 步采用四阶预测器得到预测参考值,第 2 步采用 8 级查找表的搜索预测算法得到实际预测值,最后比较参考预测值与实际预测得出最终的预测值。光程差方向采用线性预测算法得出调制预测帧,最后将残差帧进行熵编码。结果表明,新压缩算法具有良好压缩性能,平均压缩码率达到 3.05 bpp,比现有压缩算法平均压缩码率提高了 0.14~2.94 bpp。为干涉高光谱图像无损压缩提供了一种很好的解决方案。

参考文献:

- [1] 陈永红,史泽林,赵怀慈,等. 空谱联合预测高光谱图像无损压缩 rice 算法[J]. 仪器仪表学报,2010,31(1): 105-110.

- CHEN Yonghong, SHI Zelin, ZHAO Huaici, et al. Spatial-spectral associated prediction-based rice algorithm for hyperspectral image lossless compression [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1):105-110.
- [2] 常进,陶午沙,粘永建,等. 基于双向预测的高光谱图像无损压缩[J]. 电光与控制, 2010, 17(10):65-68.
CHANG Jin, TAO Wusha, NIAN Yongjian, et al. Lossless compression for hyperspectral images based on bi-direction prediction [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(10):65-68.
- [3] Mielikainen J, Toivanen P. Lossless compression of hyperspectral images using a quantized index to lookup tables[J]. IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing letters, 2008, 5(3):474-478.
- [4] Huang B, Sriraja Y. Lossless compression of hyperspectral imagery via lookup tables with predictor selection[J]. SPIE Proceedings, 2006, 6365: 63650L-1-63650L-8.
- [5] 宋娟,吴成柯,张静,等. 基于分类和陪集码的高光谱图像无损压缩[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1):231-234.
SONG Juan, WU Chengke, ZHANG Jing, et al. Lossless compression of hyperspectral images based on classification and coset coding[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(1):231-234.
- [6] 马冬梅,马彩文,罗翠华. 一种大孔径静态干涉成像光谱仪高光谱图像的 AT-3DSPIHT 压缩算法[J]. 光学学报, 2010, 30(2):378-381.
MA Dongmei, MA Caiwen, LUO Cuihua. A compression algorithm of AT-3DSPIHT for LASIS's hyperspectral image [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2):378-381.
- [7] 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):2282-2287.
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):2282-2287.
- [8] 宋娟,李云松,吴成柯. 基于分层树集合分割的分布式干涉多光谱图像压缩[J]. 光学学报, 2010, 30(2):358-363.
SONG Juan, LI Yunsong, WU Chengke. Compression for distributed interferential multispectral image based on set partitioning in hierarchical trees[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2):358-363.
- [9] 粘永健,苏令华,孙蕾,等. 基于聚类的高光谱图像无损压缩[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6):1271-1274.
NIAN Yongjian, SU Linghua, SUN Lei, et al. Lossless coding for hyperspectral images based on spectral cluster [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(6):1271-1274.
- [10] 宋娟,李云松,吴成柯,等. 基于 L_{∞} 最小搜索和陪集码的高光谱无损及近无损压缩[J]. 电子学报, 2011, 39(7):1551-1555.
SONG Juan, LI Yunsong, WU Chengke, et al. Lossless and near-lossless compression of hyperspectral images based on search for L_{∞} minimum and coset coding[J]. Acta electronic sinica, 2011, 39(7):1551-1555.
- [11] 孙蕾,谷德峰,罗建书. 最佳递归双向预测的高光谱图像无损压缩[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11):2864-2870.
SUN Lei, GU Defeng, LUO Jianshu. Hyperspectral image lossless compression based on optimal recursive bidirectional prediction [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11):2864-2870.
- [12] Lin C C, Hwang Y T. An efficient lossless compression scheme for hyperspectral image using two-stage prediction [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(3):558-562.
- [13] Kiely A B, Klimesh M A. Exploiting calibration-induced artifacts in lossless compression of hyperspectral imagery [J]. IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8):2672-2678.
- [14] 孙蕾,罗建书. 基于多波段谱间预测的高光谱图像无损压缩算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(12):2876-2879.
SUN Lei, LUO Jianshu. Hyperspectral image lossless compression algorithm based on multi-band prediction [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(12):2876-2879.
- [15] 雷杰,周有喜,吴成柯,等. 一种新的高效干涉多光谱图像压缩算法[J]. 光子学报, 2009, 38(6):1534-1538.
LEI Jie, ZHOU Youxi, WU Chengke, et al. A new image compression algorithm of the interferential multispectral images[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6):1534-1538.