

# 自适应提升小波在干涉高光谱压缩中的应用

温佳<sup>1,2</sup>, 马彩文<sup>2</sup>, 赵军锁<sup>1</sup>, 王彩玲<sup>3</sup>

(1.中国科学院 软件研究所天基综合信息系统重点实验室, 100190 北京;

2.中国科学院 西安光学精密机械研究所, 710119 西安; 3.西安石油大学 计算机学院, 710065 西安)

**摘要:**为了更好地提高干涉高光谱图像的压缩性能,针对干涉成像光谱仪的成像原理,提出了一种自适应方向预测提升小波变换的方法,在帧序列方向的提升小波变换中,以自适应方向获得最佳预测值,并且改变传统三维提升小波的变换顺序,消除大部分干涉条纹冗余,大量实验证明本文方法得到的高频子带小波系数相对于传统方法在指定码率的情况下重构图像可以获得更高的信噪比,恢复的光谱曲线具有更小的均方误差。

**关键词:**干涉高光谱;LASIS;光谱压缩;提升小波变换

**中图分类号:** TP731

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2014)07-0112-06

## An adaptive wavelet transformation used on interference hyperspectral image compression

WEN Jia<sup>1,2</sup>, MA Caiwen<sup>2</sup>, ZHAO Junsuo<sup>1</sup>, WANG Cailing<sup>3</sup>

(1. Science and Technology on Integrated Information System Laboratory, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, 100190 Beijing, China; 2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 710119 Xi'an, China; 3. School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, 710065 Xi'an, China)

**Abstract:** To get better performance of interference hyperspectral image compression, according to the imaging principle of interference hyperspectral image, we propose an adaptive direction prediction wavelet transform for LWT (Lifting Wavelet Transformation), to get the best predicted values through adaptive direction in the LWT on the frame direction, and change the order of the traditional wavelet transform. The experiment results prove that the proposed method can get higher SNR at the same bpppb compared with the traditional method, and can get smaller MSE in the recovered spectral curve.

**Keywords:** interference hyperspectral image; LASIS; spectrum compression; lifting wavelet transformation

干涉高光谱技术在航空航天遥感领域中是一种很有实用价值的技术,通过这种技术可以获得观测目标的光谱信息与空间信息,因此在气象、军事、环境监测和地质等领域都有较广泛的应用。随着干涉高光谱仪在中国“嫦娥”探月卫星和近期环境探测卫星中的成功搭载,干涉高光谱的数据压缩成为近年来的研究焦点之一。

干涉高光谱图像数据是一种三维图像数据,其海量数据造成在数据存储和有限带宽信道上的

传输有一定程度的困难,所以针对其数据本身特点设计出适用于干涉高光谱数据的高效数据压缩方法十分必要。

近年来,越来越多的科学家针对干涉高光谱数据特性提出了有效的压缩算法,基于谱间 DPCM 和整数小波的超光谱图像无损压缩在 2008 年提出<sup>[1]</sup>,针对干涉高光谱图像帧间不稳定移位的改进变换算法在 2011 年提出<sup>[2]</sup>,针对干涉高光谱图像帧间相关的自适应光程差算法在 2011 年提出<sup>[3]</sup>。

本文在文献[2]基础上,考虑到每帧 LASIS 干涉高光谱数据均存在幅值较大的竖直干涉条纹,并且干涉条纹在每帧之间不存在移位,而除干

收稿日期: 2013-07-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41301382).

作者简介: 温佳(1983—),男,博士,研究员.

通信作者: 温佳, 448680289@qq.com; wenjia@iscas.ac.cn.

涉条纹之外的背景图像均存在方向性移位的特点,尝试在帧序列方向采用不同方向自适应得到最佳预测值,并且改变传统三维提升小波的变换顺序以消除干涉条纹所造成的冗余以达到更好的压缩效果和压缩性能。

## 1 干涉高光谱图像的数据特性

干涉高光谱图像数据具有与其他图像不同的特性.图1为LASIS干涉高光谱图像三维示意图.由于其特殊的推扫式成像原理,干涉高光谱图像具有明显的垂直干涉条纹存在。

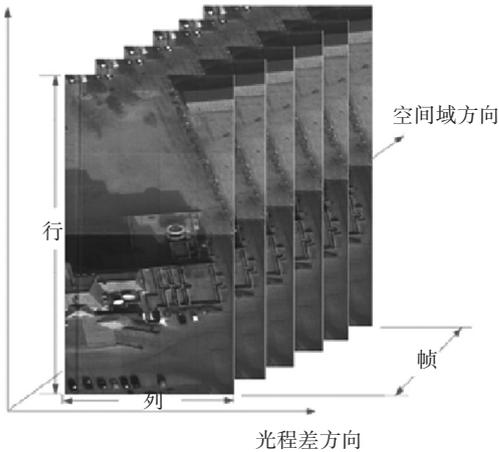


图1 LASIS干涉高光谱图像数据

由图1可以明显看出干涉高光谱与一般的普通图像存在明显差异,干涉高光谱图像具有如下特点:

1) 光的干涉是成像原理,干涉高光谱图像并非光的直接成像,而是干涉图像.图像内存在明显的垂直干涉条纹,这些垂直的干涉条纹随着光线调制程度的改变在不同位置呈现不同的强度。

2) 干涉高光谱图像是三维数据,具有多维方向的相关性.在联合调制干涉高光谱图像中,目标是一个整体的推扫平移过程,帧内图像具有空间信息,在图像帧间存在着平移现象(干涉条纹不存在)。

## 2 提升小波变换

Haar变换的提升版本是最简单的提升小波变换之一,称为S变换<sup>[4]</sup>。

S变换步骤如下:

$$\begin{cases} d[n] = x[2n+1] - x[2n], \\ s[n] = x[2n] + \lfloor d[n]/2 \rfloor. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x[n]$  为输入信号,  $s[n]$  为提升小波变换后的低频信号,  $d[n]$  为提升小波变换后的高频信号,  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整运算. 经过S提升后的低频信号与原始输入信号的动态范围相同,高频信号

将变得很小, Said等<sup>[5]</sup>之后又提出了S+P(S变换+Prediction), Zandi等<sup>[6]</sup>提出的TS变换是基于梯形结构的比S变换具有更高消失矩的整数小波变换. Sweldens等<sup>[7-11]</sup>在Donoho等<sup>[12]</sup>的基础上又提出了采用提升框架的第二代小波变换结构之后, Calderbank等<sup>[13]</sup>提出了基于提升格式的整数小波变换。

提升小波变换分为3个步骤:

- 1) lazy变换;
- 2) 预测(prediction);
- 3) 更新(update)。

第一步lazy变换是把数据分为偶数集合和奇数集合

$$\begin{cases} s_0[n] = x[2n], \\ d_0[n] = x[2n+1]. \end{cases} \quad (2)$$

第二步预测是用偶数集来预测奇数集,将产生的误差作为高频系数。

$$d_i[n] = d_{i-1}[n] - \lfloor \left( \sum_k p_i[k] s_{i-1}[n-k] \right) + \frac{1}{2} \rfloor. \quad (3)$$

第三步更新是用这些高频系数来更新偶数集合作为低通系数。

$$s_i[n] = s_{i-1}[n] + \lfloor \left( \sum_k u_i[k] d_i[n-k] \right) + \frac{1}{2} \rfloor. \quad (4)$$

式中:  $s_i[n]$  为第*i*层原始提升的低通分量,  $d_i[n]$  为第*i*层对偶提升的高通分量。

## 3 根据干涉高光谱特性改进的自适应方向角三维提升小波变换

由于干涉多光谱图像帧与帧之间有很强的方向性,并且三维LASIS图像序列帧与帧之间的平移量是不稳定的,实验数据表明一般相邻帧之间的平移在1~3列不等. LASIS通常搭载在飞行器上进行探测,运用大孔径静态干涉成像光谱仪面阵探测器依靠推扫获得二维的空间信息与一维的光谱信息,形成三维立体图像数据.在干涉高光谱图像中具有明显的垂直干涉条纹,且垂直干涉条纹的位置固定,不存在移位现象,垂直干涉条纹中含有光谱信息,并且干涉高光谱图像帧间具有明显平移,方向与探测器推扫方向基本一致,然而由于非匀速的推扫,平移方向存在抖动。

本文采用传统5/3提升小波,在帧内的行方向和列方向直接采用传统5/3提升小波进行小波变换:

$$d_1[n] = d_0[n] - \lfloor \frac{1}{2}(s_0[n] + s_0[n+1]) + \frac{1}{2} \rfloor, \quad (5)$$

$$s_1[n] = s_0[n] - \lfloor \frac{1}{4}(d_1[n-1] + d_1[n]) + \frac{1}{2} \rfloor \quad (6)$$

为了提高运算速度,对于  $r \times c \times f$  的 LASIS 三维数据,在列方向的提升小波变换之前,先将图像拼接成  $[r, c \times f]$  的 2 维矩阵,拼接方式如图 2 所示.新生成的 2 维矩阵有  $c \times f$  列,每列含有  $r$  个像素值,将新生成的  $[r, c \times f]$  二维矩阵对应式(2)中的  $x$  变量,将行数  $r$  对应公式(2)的变量  $n$ ,之后按照式(2)生成  $s_0[n], d_0[n]$  的  $[\frac{r}{2}, c \times f]$  二维

矩阵如图 3 所示.将生成的  $s_0[n], d_0[n]$  按照式(5)、(6)进行一次一维垂直方向的提升小波变换,结果如图 4 所示,之后再把新生成的矩阵还原成原来的  $[r, c, f]$  的三维矩阵,即可完成对  $r \times c \times f$  的 LASIS 三维数据的列方向提升小波变换.水平方向提升小波变换按照与之类似流程完成.对于帧序列方向的提升小波变换,则把三维 LASIS 数据拼接成  $[f, r \times c]$  的 2 维矩阵,每  $k$  行的  $r \times c$  个像素值是原始三维矩阵的第  $k$  帧的帧内  $r \times c$  个像素按水平方向拼接而成,  $k = 1, 2 \dots f$ , 由于 LASIS 数据帧间的方向特性,拼接后的 2 维  $[f, r \times c]$  矩阵如图 5 所示.新生成的 2 维矩阵有  $r \times c$  列,每列含有  $f$  个像素值,按式(2)将新生成的  $[f, r \times c]$  二维矩阵对应式(2)中的  $x$  变量,将行数  $f$  对应式(2)的变量  $n$ ,之后按照公式(2)生成的  $s_0[n], d_0[n]$  为  $[\frac{f}{2}, r \times c]$  的二维矩阵如图 6 所示.将生成的  $s_0[n], d_0[n]$  按照式(5)、(6)进行一次一维垂直方向的提升小波变换,结果如图 7 所示.

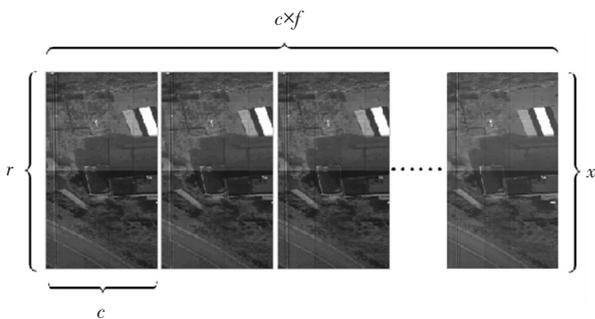


图 2 垂直方向提升小波变换 LASIS 数据拼接示意

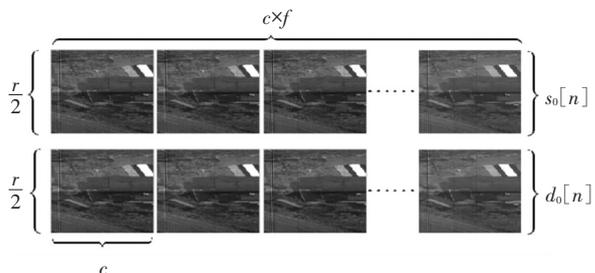


图 3 垂直方向提升小波变换中  $s_0[n]$  和  $d_0[n]$  示意

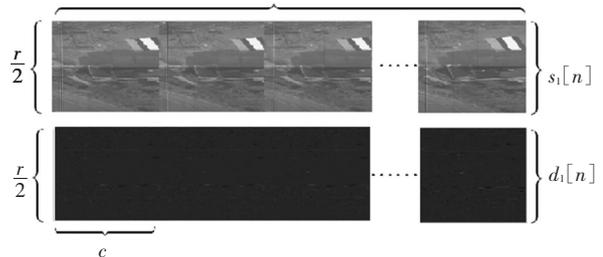


图 4 垂直提升小波变换后 LASIS 数据示意

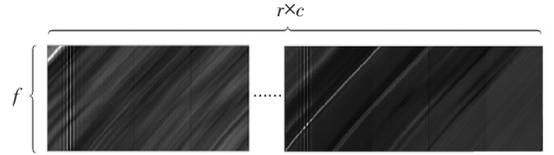


图 5 帧间提升小波变换 LASIS 数据拼接示意

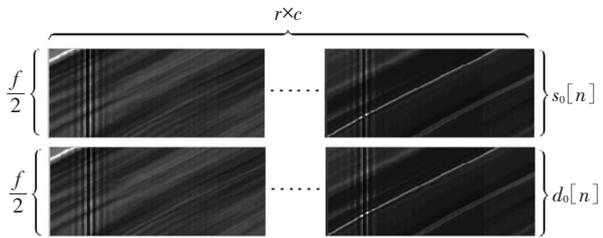


图 6 帧间方向提升小波变换中  $s_0[n]$  和  $d_0[n]$  示意

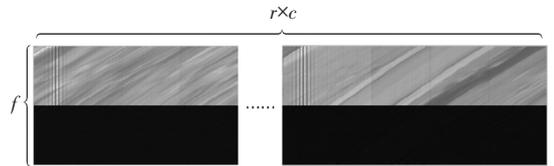


图 7 帧间提升小波变换后 LASIS 数据示意

之后再把新生成的矩阵还原成原来的  $[r, c, f]$  的三维矩阵,即可完成对  $r \times c \times f$  的 LASIS 三维数据的帧序列方向提升小波变换.

由于干涉高光谱图像的成像原理所导致其自身的特殊性质,对于帧序列方向,由于干涉高光谱图像数据在帧间存在 1~3 的移位,这在图 5 中可以明显看到,况且在进行完一级提升小波变换之后,再做下一级提升小波变换时,帧间的移位会有加倍的变化,这一点在图 5、7 的对比中也可以明显看到.

直接对上述矩阵在垂直方向做提升小波变换在第二步的预测步骤并不能得到很好的结果,所得的高频系数会偏大.本文针对 LASIS 三维数据的帧序列方向专门提出一种自适应预测方向角的提升小波变换以适应 LASIS 帧间特有的方向性特点.

在预测步骤采用 5/3 的提升小波变换  $d_1[n] = d_0[n] - \lfloor \frac{1}{2}(s_0[n] + s_0[n+1]) + \frac{1}{2} \rfloor, d_0[n]$  实际上是夹在  $s_0[n], s_0[n+1]$  中间的层,由于帧间 1~3 移位的存在,体现在  $d_0[n], s_0[n], s_0[n+1]$

1] 上为:  $s_0[n]$  为了与  $d_0[n]$  在垂直方向对应, 应向左移动 1 ~ 3 位,  $s_0[n + 1]$  为了与  $d_0[n]$  在垂直方向对应, 应向右移动 1 ~ 3 位。

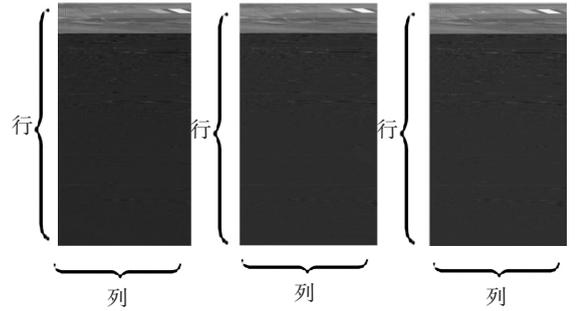
$s_0[n]$  和  $s_0[n + 1]$  与  $d_0[n]$  最佳匹配的移位各有 4 种可能, 其两两组合共有 16 种可能性存在, 这样进行预测步骤会得到 16 种可能的  $d_{i_i}[n]$ ,  $i = 1, 2, \dots, 16$ , 将  $d_{i_i}[n]$  的每一行的  $r \times c$  个像素值的绝对值相加, 会得到 16 个  $[f/2, 1]$  的列, 将其转置成行并用一个  $[16, f/2]$  的二维矩阵  $d_{i\_sum}$  存储,  $d_{i\_sum}$  有  $f/2$  列, 每一列含有 16 种可能的值, 保存每列最小值的索引值,  $f/2$  列会产生  $f/2$  个  $index$  索引值,  $index(k) \in [1, 16], k = 1, 2, \dots, f/2$ . 如此可以快速的得到每帧的上一帧和下一帧对应的移位最佳组合, 新生成的  $d_1[n]$  的每  $k$  行为  $d_{i_{index(k)}}$  的第  $k$  行,  $k = 1, 2, \dots, f/2$ . 在信道传输数据时, 索引值需要与编码后的码字一起传输。

LASIS 干涉高光谱三维数据由于竖直干涉条纹的存在并且有较大的幅值, 如果为了提高运算速度把提升小波的预测步骤中的  $d_0[n]$ 、 $s_0[n]$  作为整体进行运算, 会影响到帧间的方向性, 因为尽管大部分背景像素存在整体的方向性移位, 但是竖直的干涉条纹不存在移位并且具有较大的幅值. 因此, 在这里不采用传统的对称三维小波变换, 先对 LASIS 数据进行 3 级的一维垂直方向的提升小波变换, 可以基本上消除掉 LASIS 数据中特有的竖直干涉条纹所带来的影响, 图 8 所示为

对 16 帧 LASIS 数据进行 3 级竖直方向提升小波变换后的 3 帧小波系数示意图。

由图 8 可见, 在低频分量依然存在不移位的干涉条纹, 而高频分量的干涉条纹冗余已基本消除, 由于本文采用拼接后整体进行运算, 如果直接对 3 级垂直方向提升小波变换后的系数进行帧序列方向预测, 并不能得到最佳的移位索引. 因此本文对含有干涉条纹冗余的低频分量和干涉条纹冗余已基本被消除的高频分量分别进行 3 级自适应帧序列方向的提升小波变换, 这样会分别得到存在干涉条纹影响的最佳移位索引和不存在干涉条纹影响的最佳移位索引, 最后再将所得的结果进行 3 级水平方向的提升小波变换。

本文提出自适应预测提升小波变换算法的流程图如图 9 所示。



(a) 第 1 帧系数示意 (b) 第 8 帧系数示意 (c) 第 16 帧系数示意  
图 8 三级垂直方向提升小波变换后小波系数示意图

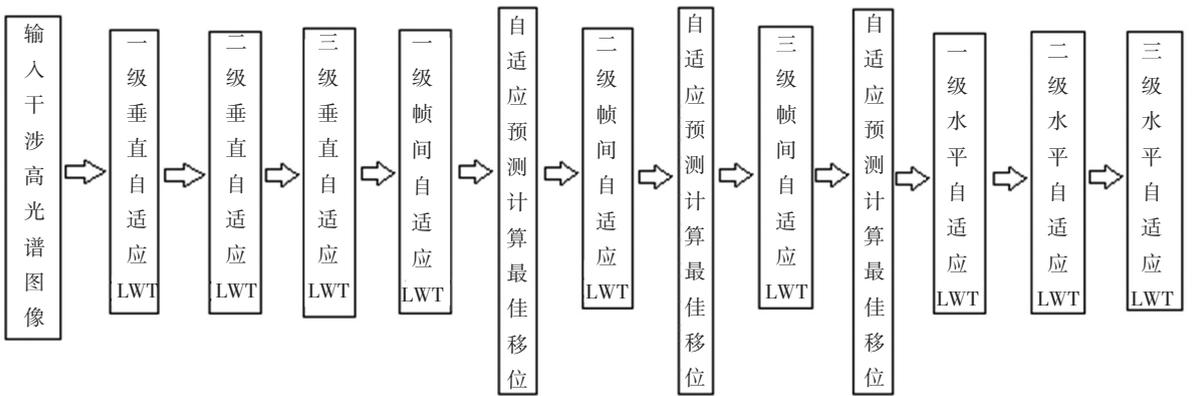


图 9 本文提出算法的流程图

### 4 实验结果

对两组  $512 \times 288 \times 16$  的 12 bvit LASIS 三维数据在  $bpppb$  (比特/像素/波段) = 0.1 ~ 0.3 进行实验, 结果如表 1~2 所示。

表 1 不同  $bpppb$  下 LASIS 数据 1 的信噪比 dB

$bpppb$	传统方法	2011 年提出的自适应小波方法	本文改进方法
0.1	22.037 8	25.503 4	25.808 6
0.2	26.719 0	27.342 6	28.308 4
0.3	27.317 8	29.867 1	30.089 6

表 2 不同 bpppb 下 LASIS 数据 2 的信噪比 dB

bpppb	传统方法	2011 年提出的自适应小波方法	本文改进方法
0.1	21.631 4	22.229 3	22.541 0
0.2	25.521 3	26.211 4	26.875 5
0.3	26.917 3	27.699 9	29.644 6

由表 1、2 可知,使用本文提出的变换方法相对于传统提升小波变换方法,在经过 3DSPECK 编码后,在给定编码比特数目即压缩比一定的情况下重构图像可以获得更高的信噪比。图 10、11 显示了 1 组 512×288×16 的 LASIS 干涉高光谱图像数据经过本文提出改进的变换方法与传统三维对称提升小波变换和 2011 年提出的自适应小波变换<sup>[2]</sup>后经过 3DSPECK 编码后重构结果的比较。将 3 种方法得到的 LASIS 重构干涉高光谱数据帧通过后期处理得到 LSMIS (Large Spatially Modulated Interference Spectral Image) 干涉图后,还原光谱曲线如图 12 所示,还原光谱曲线与原始光谱曲线的均方误差如表 3 所示。

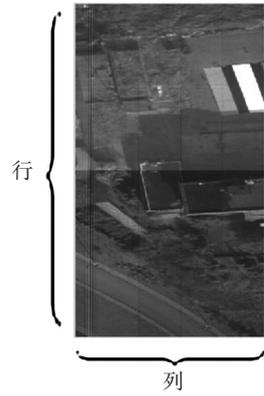


图 10 LASIS 原始数据

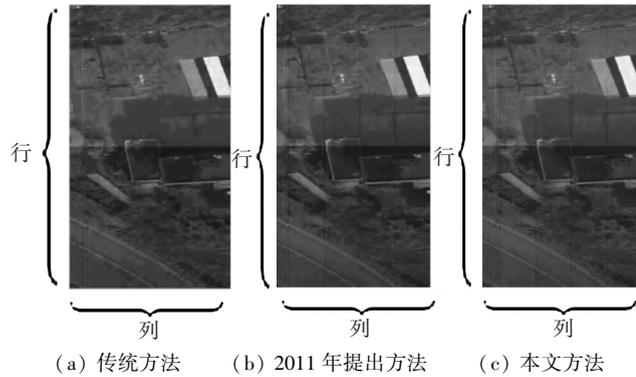


图 11 比特率为 0.3 时 3 种不同方法的恢复图像

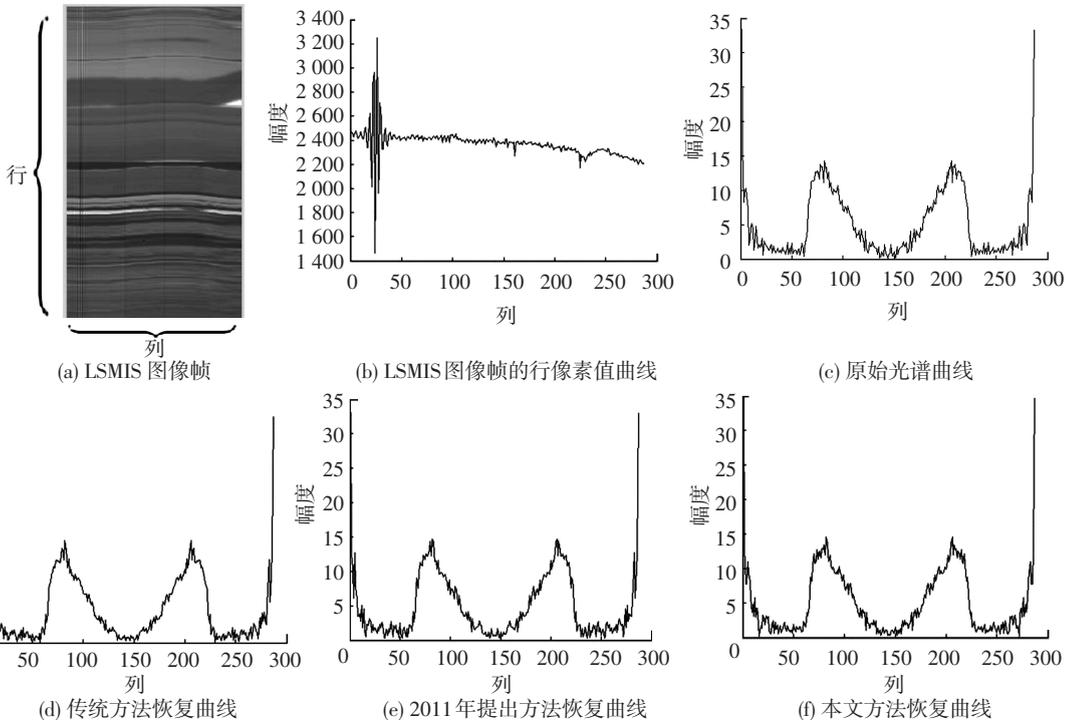


图 12 3 种不同方法的恢复光谱曲线

表 3 不同方法下还原光谱曲线的均方误差

方法	与原光谱曲线 1 的均方误差	与原光谱曲线 2 的均方误差
传统方法	0.842 3	0.925 5
2011 年提出方法	0.685 7	0.734 1
本文改进方法	0.649 3	0.684 2

### 5 结 语

从本文实验结果可以明显看出如果仍然运用传统小波变换顺序进行帧序列方向的自适应方向角预测,对高频小波系数间方差减小并不明显,因为干涉条纹的存在影响了整体自适应方向预测的结果,通过本文方法消除垂直方向冗余并且对含

有干涉条纹冗余的低频子带和不含干涉条纹冗余的高频子带分别进行自适应方向预测后,高频子带的小波系数间方差得到了大幅度改善.将提出的小波变换方法与传统方法产生的小波系数在指定码率下进行 3DSPECK 编码,大量实验数据表明本文提出的改进方法的重构图像可以获得更高的信噪比,且后期处理得到的光谱曲线相对于原始光谱曲线具有更小的均方误差.

## 参考文献

- [1] 吴冬梅,王军,张海宁. 基于谱间 DPCM 和整数小波的超光谱图像无损压缩[J]. 光子学报, 2008, 37(1): 156-159.
- [2] WEN J, MA C W, SHUI P L. A 3D non-linear orientation prediction wavelet transform for interference hyperspectral images compression[J]. Optics Communications, 2011, 284(7): 1770-1777.
- [3] WEN J, MA C W, SHUI P L. An adaptive OPD and dislocation prediction used characteristic of interference pattern for interference hyperspectral image compression [J]. Optics Communications, 2011, 284(20): 4903-4909.
- [4] BLUME H, FAND A. Reversible and irreversible image data compression using the S-transform and Lempel-Ziv coding [C]//Proceedings of SPIE Conference on Medical Imaging. Newport Beach: CA, 1989, 1091: 2.
- [5] SAID A, PEARLMAN W A. An image multiresolution representation for lossless and lossy compression [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(9): 1303-1310.
- [6] ZANDI A, ALLEN J, SCHWARTZ J E. Compression with reversible embedded wavelets [C]//Proceedings of IEEE Data Compression Conference. Snowbird: DCC, 1995: 212
- [7] SWELDENS W. The lifting scheme: a new philosophy in biorthogonal wavelet constructions [C]//Proceedings of SPIE Conference on Wavelet Applications in Signal and Image Processing. San Diego: CA, 1995, 2569: 68.
- [8] SWELDENS W, SHROEDER P. Building your own wavelets at home [R]. Columbia: University of South Carolina, 1995.
- [9] SWELDENS W. The lifting scheme: a custom-design construction of biorthogonal wavelets [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1996, 3(2): 186-200.
- [10] SWELDENS W. The lifting scheme: construction of second generation wavelets [J]. SLAM Journal of Mathematical Analysis, 1997, 29(2): 511-546.
- [11] DAUBECHIES I, SWELDENS W. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 1998, 4(3): 247-269.
- [12] DONOHO D L. Interpolating wavelet transform [M]. PaloAltoCounty: Department of Statistics, Stanford University, 1992.
- [13] CALDERBANK A R, DAUBECHIES I, SWELDENS W. Wavelet transforms that map integers to integers [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1998, 31(5): 332-369.

(编辑 苗秀芝)