

基于小波变换的干涉图压缩算法*

胡煌华, 袁艳, 周宇, 张修宝

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘 要:在研究小波变换和分层树集合分割排序算法的基础上, 将小波图像压缩技术应用于干涉图的压缩. 根据小波分解系数矩阵中高频子图像上数据接近于零, 信息主要表现部分在低频子图像上, 以及干涉图数据中主要信息集中在零光程差附近的特征, 将干涉图一行数据拆开并按对角 Z 型排列存储为矩阵形式, 再进行小波压缩. 结果表明, 此改进能提高压缩性能.

关键词:小波变换; SPIHT 算法; 干涉图; 图像压缩

中图分类号: TP919. 81

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3307-5

0 引言

光谱成像仪是一种重要的遥感仪器, 在获得目标光谱信息的同时, 还能获得目标的空间信息, 在空间遥感、军事侦察、环境监察、资源勘测以及其它军工农业领域得到广泛的应用. 干涉型光谱成像仪作为光谱成像仪的重要一类, 在获得丰富信息的同时, 会产生巨大的数据量, 不利于存储和传输, 因此对原始干涉图数据进行压缩, 对于星载干涉光谱成像仪来说是必须的. 由于干涉光谱成像仪直接获得的是景物目标的干涉图, 必须经过变换才得到景物目标的波谱, 针对干涉图的数据压缩产生的信息丢失将会导致景物波谱产生偏差或失真. 因此对光谱成像仪获取的干涉图应该采取无损或者近无损压缩的方法^[1-2], 这样才能确保复原光谱, 对此, 国内不少单位已研究相应的数据压缩方法^[1-4]. 本文在调研总结多种干涉图压缩方法的基础上, 提出了基于小波变换和分层树集合分割排序算法 (Set Partitioning in Hierarchical Tress, SPIHT) 编码的压缩算法, 并结合小波算法的特征和干涉图的特征, 通过对干涉图数据压缩前存储方式的改进, 提高了该算法的压缩性能.

1 干涉图的特点

图 1 为干涉光谱成像仪数据获取的示意图. 景物目标上的一点发出的光束经干涉光谱成像仪中的干涉仪元件分光后, 被分解为满足相干条件的两束光, 在探测器处干涉叠加, 形成明暗相见的干涉条纹. 干涉条纹数据抽取出来形成干涉图, 目标的光谱

信息包含在干涉图中, 目标点的干涉图与光谱的关

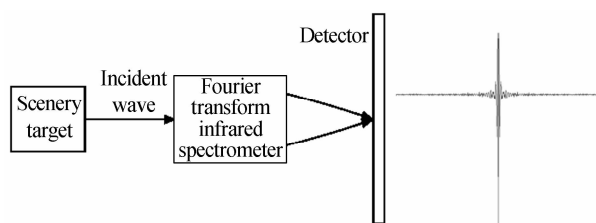


图 1 干涉光谱成像仪原理

Fig. 1 Interferometer scheme

系可以通过 Fourier 变换建立起来, 描述为: 如果干涉光谱成像仪的工作波段为 $\nu \in [\nu_{\min}, \nu_{\max}]$, ν 为波数, 与波长 λ 之间的关系是: $\nu = 1/\lambda$. 干涉光谱成像仪产生的光程差为 x , $x \in [-L, L]$, L 为最大光程差. 那么干涉数据和光谱数据之间的变换关系为

$$I(x) = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} [B(\nu) e^{i(2\pi\nu x)}] d\nu \quad (1)$$

$$B(\nu) = \int_{-L}^L [I(x) e^{-i(2\pi\nu x)}] dx \quad (2)$$

式中 $I(x)$ 是光程差为 x 处的干涉强度, $B(\nu)$ 是某一波长上的光谱辐亮度, 式中省去了一些不重要的常量.

2 小波分解原理与 SPIHT 编码算法

2.1 小波分解原理

小波算法压缩原理如图 2. 原始数据经过小波分解之后, 得到小波分解系数矩阵、标示矩阵和分解级数, 使用 SPIHT 编码算法对小波分解系数进行编解码之后, 再由解码之后的小波系数、之前的标示矩阵和分解级数来重构原始数据.

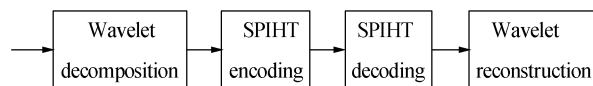


图 2 小波压缩原理图

Fig. 2 Structural graph of wavelet compression

小波分解是通过小波变换完成的. 由二维小波变换的塔式结构可知, 一维小波变换其实是将一维原始信号分别经过低通滤波和高通滤波以及二元下

* 国家自然科学基金(60532070)、国家重点基础研究发展计划(2009CB724005)和长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)资助

Tel: 010-82339421 Email: huhuanghua@hotmail.com

收稿日期: 2008-09-25

修回日期: 2008-10-20

抽样得到信号的低频部分 L 和 高频部分 H. 而根据 Mallat 算法, 二维小波变换可以用一系列的一维小波变换得到. 对一幅 m 行 n 列的图像, 二维小波变换的过程是先对图像的每一行做一维小波变换, 得到 L 和 H 两个部分; 然后对得到的 LH 图像的每一列做一维小波变换. 这样经过一级小波变换后的图像就可以分为 LL, HL, LH, HH 四个部分, 如图 3 (a) 为一级二维小波变换的塔式结构.

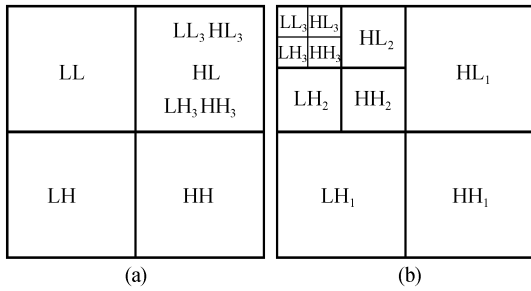


图 3 小波变换结构图

Fig. 3 Structural graph of wavelet transform

而二级、三级以至更高级的二维小波变换则是对上一级小波变换后图像的左上角部分 (LL 部分) 再进行一级二维小波变换, 是一个递归过程. 图 3 (b) 是三级二维小波变换的塔式结构图.

一个图像经过小波分解后, 可以得到一系列不同分辨率的子图像, 不同分辨率的子图像对应的频率也不同. 高分辨率 (即高频) 子图像上大部分点的数值都接近于 0, 分辨率越高, 这种现象越明显. 在 N 级二维小波分解中, 分解级别越高的子图像, 频率越低. 根据不同分辨率下小波变换系数的这种层次模型, 在对图像进行多级小波分解后, 保留低频系数不变, 然后选取一个全局阈值来处理各级高频系数; 或者不同级别的高频系数用不同的阈值处理. 绝对值低于阈值的高频系数置 0, 否则保留. 用保留的非零小波系数进行重构. 这样即可以达到压缩的目的.

2.2 SPIHT 编码算法

在小波变换系数中, 零树是一个比较有效的表示不重要系数的数据结构, 但是, 在小波系数中还存在这样的树结构. 它的树根是重要的, 除树根以外的其它结点是不重要的, 对这样的系数结构, 零树就不是一种很有效的表示方法. A. Said 和 W. A. Pearlman 根据 Shapiro 零树编码算法 (EZW) 的基本思想, 提出了一种新的且性能更优的实现方法, 即 SPIHT 的编码算法. 它采用了空间方向树、全体子孙集合 $D(i, j)$ 和非直系子孙集合 $L(i, j)$ 的概念以更有效地表示上述特征的系数结构, 并通过 LIP、LSP、LIS 三张链表跟踪小波系数集合的重要性测试和集合分割情况, 把小波图像按空间方向树的结构安排编码, 从而提高了编码效率.

SPIHT 算法能够生成一个嵌入位流 (Embedded Bit Stream), 使接收的位流在任意点中断时, 都可解压和重构图像, 具有良好的渐进传输特性. 此外, SPIHT 算法在不同的比特率下比 EZW 算法的峰值信噪比 (PSNR) 都有所提高, 且具有计算复杂度低、位速率容易控制的特点.

3 基于干涉图的小波压缩方法改进

对一幅大小为 $512 \times 512 \text{ pixel}^2$ 的干涉图像, 如图 4. 抽取空间某一点的干涉图, 即为干涉图像中的某一行, 大小为 1×512 , 理论上点干涉图为偶函数, 关于零光程差处对称. 因此, 只取曲线的右半部分 (大小为 1×256) 进行压缩处理 (如取左半部分, 前后倒置一下再处理也一样).

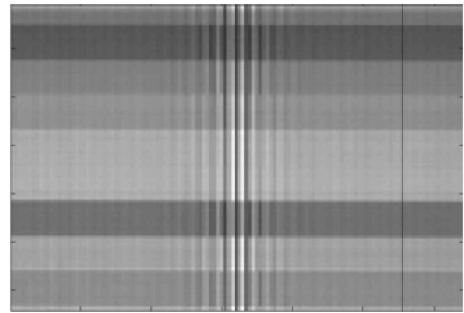


图 4 干涉图

Fig. 4 Interferogram

分析图 5 可知, 由于目标点波谱的低频信息即主要信息集中在点干涉图的零光程差附近, 即干涉强度起伏剧烈的部分, 光谱高频部分集中在点干涉图光程差较大的区域, 干涉强度变化平缓, 在零值附近振荡. 而由二维小波变换可知, 小波分解系数矩阵的主要表现部分是在低频部分, 高频部分的数据都很小, 接近零值. 根据小波分解系数矩阵的这个特征, 以及在运用小波方法压缩数据时点干涉图的分布特征, 提出先改变存储方式再对干涉图进行压缩, 如图 6(a), 直接将一行 256 个的数据由左至右, 从上到下存储为一个 16×16 的矩阵, 称为直接存储,

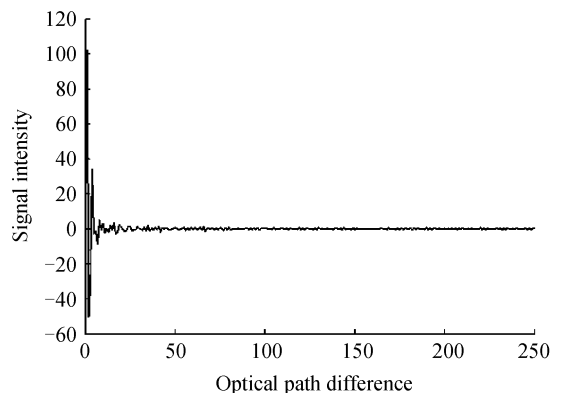


图 5 干涉光谱成像仪的点干涉图

Fig. 5 Interferogram of fourier transform spectrometer

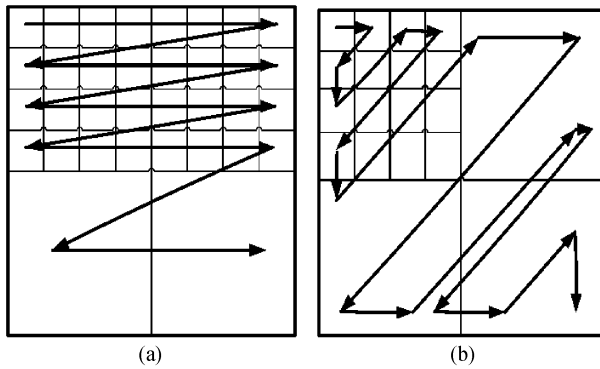


图6 干涉图数据读取和存储方式

Fig. 6 Reading and storage modes of interferogram data

这是将点干涉图存储为矩阵的一般方式;图6(b)即为改进之后的存储方式,将一行256个数据由左上角开始,按对角Z型排列存储为 16×16 的矩阵,称为间接存储.在小波压缩算法中,小波变换的目的是将一幅图像的信息集中到低频区域中(数据矩阵的左上区域),并主要以低频区域数据为主进行重构.采取间接存储方式,则将点干涉图的大部分信息在小波变换之前就集中到了左上角,那么小波变换之后,低频部分所包含的信息量应该更丰富,从理论上分析,改进存储方式之后更利于小波算法的压缩.仿真试验中,比较了两种存储方式压缩之后的压缩效果度量参量,并进行了分析.

4 压缩效果度量

对于干涉图压缩效果的度量,目前为止还没有统一的标准.对于原始干涉图数据和压缩后的干涉图数据,本文用压缩比和峰值信噪比来度量压缩效果.假设原始干涉图大小为 $M \times N$,一般用12bit量化,如果压缩后干涉图变为 $M' \times N'$,其熵编码的平均码长为 L_v ,以及其它的一些附加数据为 C ,那么干涉图压缩比为

$$\text{ComRate} = \frac{M \times N \times 16}{M' \times N' \times L_v + C} \quad (3)$$

峰值信噪比^[5](PSNR)计算公式为

$$\text{PSNR} = 10 \log \frac{MN \times A^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x(i, j) - y(i, j)]^2} \quad (4)$$

式中 A 为峰值. x 为原始图像, y 为压缩后重建的图像.

此外对于压缩前后的原始光谱和复原光谱,使用光谱相对均方误差RQE来度量.用式(5)来计算相对均方误差RQE

$$\text{RQE} = \frac{\sqrt{\int_0^{0.5} [|\hat{S}(\tilde{f}) - S(\tilde{f})|^2] d\tilde{f}}}{\int_0^{0.5} [S(\tilde{f})] d\tilde{f}} \quad (5)$$

式中: $\hat{S}(\tilde{f})$ 为原始光谱; $S(\tilde{f})$ 为经压缩后重建的光

谱, $\tilde{f} = 1/\lambda f_c$ 为归一化频率($0 < \tilde{f} < 0.5$), λ 为波长(单位 μm), f_c 为采样频率.

5 实验仿真结果

5.1 压缩仿真流程

实验采取的实验数据是从光谱数据库中所下载的典型地物的原始光谱曲线,根据实际应用背景,只截取每种地物原始数据的一部分.截取的是波长在400 nm至1 000 nm,相应的波数在 $10\,000\text{ cm}^{-1}$ 至 $25\,000\text{ cm}^{-1}$ 之间的数据.

对原始数据采样,获得需要的光谱曲线 $B(v)$,利用Fourier变换得出所需要的干涉曲线 $I(x)$,再利用小波算法对干涉曲线进行压缩、解压缩,之后使用Fourier逆变换得出光谱曲线 $B'(v)$,比较压缩前后的干涉曲线和光谱曲线,最后总结压缩效果.流程如图7.

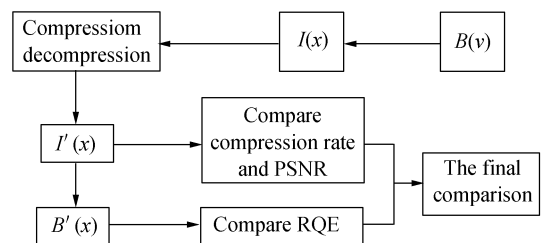


图7 压缩流程

Fig. 7 Compression flowchart

5.2 压缩效果分析

1) 小波压缩效果

从数学逼近论的观点看,压缩的本质是用尽可能少的小波基函数加权求和项来最大限度地逼近原信号,因而在压缩时选择小波基是非常重要的^[6],在这里选择的是著名的(9-7)双正交小波滤波器,即“bior4.4”.此外,编码过程中,编码级数越大,解码恢复的数据误差越小,但是压缩比也就越小.如图8为编码级数CodeDim=7时,采用直接存储方式,小波算法对典型地物低钛玄武岩进行压缩前后的效果图.图8(a)为压缩前的干涉曲线,图8(b)为压缩后的干涉曲线;图8(c)中细实线为压缩前的光谱曲线,粗虚线为压缩后恢复的光谱曲线.

此时,压缩比ComRate为2.3981,峰值信噪比PSNR为199.2,相对均方误差RQE为0.31%,从图8中直观看,此时压缩效果很好.

2) 改变存储方式,分析压缩效果

表1给出了不同编码级数时采取直接存储方式,小波算法对低钛玄武岩进行压缩时各个度量参量的值.表2给出了不同编码级数时采取间接存储方式,小波算法对低钛玄武岩进行压缩时各个度量参量的值.

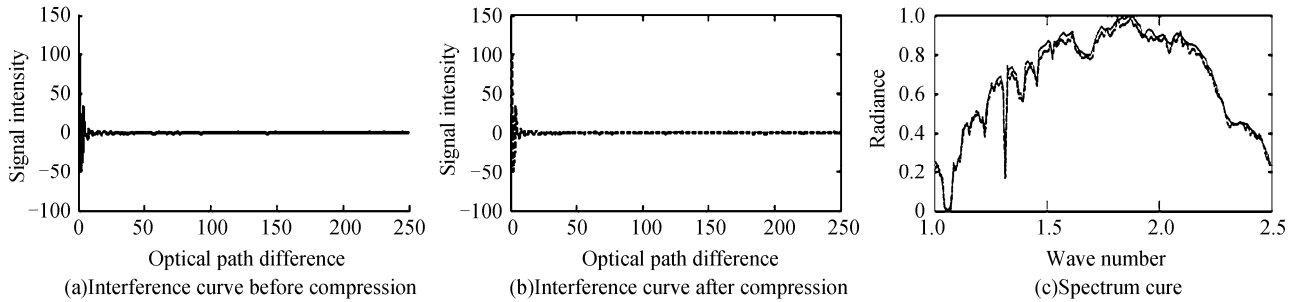


图 8 压缩前后的干涉曲线和光谱曲线

Fig. 8 Interference curve and spectrum curve before and after compression

表 1 直接存储方式的度量参量值

CodeDim	ComRate	RQE/(%)	PSNR
5	4.031 5	1.1	171.7
6	3.078 2	0.76	184.7
7	2.398 1	0.31	199.2
8	1.990 9	0.14	213.7
9	1.687 9	0.083	229.2
10	1.463 0	0.072	243.9
11	1.296 0	0.069	257.4
12	1.164 5	0.068	273.1

表 2 间接存储方式的度量参量值

CodeDim	ComRate	RQE/(%)	PSNR
5	5.667 9	1.6	157.9
6	4.173 9	1.2	168.9
7	3.122 0	0.58	182.9
8	2.392 5	0.27	197.4
9	1.929 6	0.14	212.3
10	1.631 4	0.098	226.2
11	1.428 3	0.082	234.4
12	1.270 5	0.082	238.1

比较表 1 和表 2 知,采用间接存储方式时,小波压缩算法的压缩比有较明显的提高,此时峰值信噪比会有所下降,相对均方误差会有所增加。

图 9(a)~(c) 依次是压缩比、相对均方误差和

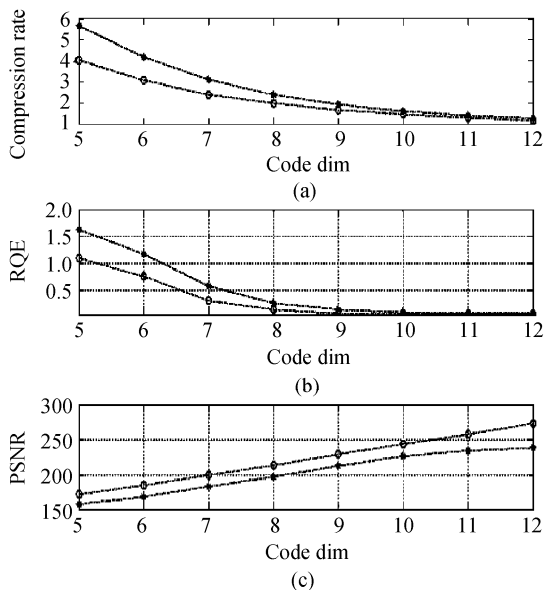


图 9 参数的比较

Fig. 9 Parameter comparison

峰值信噪比随编码级数的改变,菱形点划线为采用间接存储时三个度量参量随编码级数的变化曲线,圆圈点划线为采用直接存储时三个度量参量随编码级数的变化曲线。

图 10 给出了小波算法对典型地物高钛玄武岩的干涉图进行压缩,采取直接存储和间接存储时,各个度量参量随编码级数的变化曲线.在图 10 中可以看出,在 RQE 和 PSNR 基本相等的情况下,压缩比有所提高。

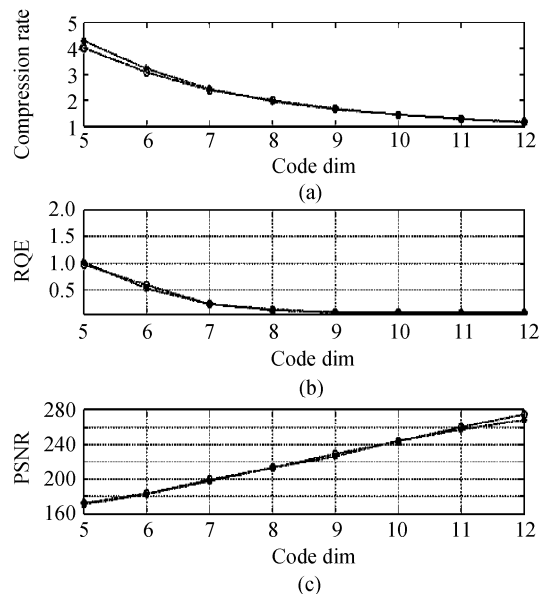


图 10 参数的比较

Fig. 10 Parameter comparison

通过本文的仿真试验的结果,并对其他典型地物的干涉图仿真比较可知,在 RQE 和 PSNR 都满足条件范围内,对于压缩而言最重要的度量参量压缩比有了一定的提高.可见,改进存储方式能让小波压缩算法性能有所提高。

6 结论

本文总结了干涉图的一般特征以及小波压缩算法用于干涉图的步骤.目前国内使用小波算法对干涉图像的压缩都是对整幅图像进行的.文章中对使用小波压缩算法压缩点干涉图提出了一点改进.该

改进是结合小波压缩算法中小波分解系数的特征和干涉图的特征提出的,通过对典型地物的比较和仿真试验,发现改变存储方式对提高小波压缩算法的压缩比具有一定的作用.采取间接存储方式小波压缩算法的压缩效果比直接存储方式的压缩效果要好.

参考文献

- [1] LÜ Qun-bo, XIANG-LI Bin. Interference spectral image compression based on classification algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 681-684.
吕群波, 相里斌. 基于光谱分类的干涉光谱图像压缩[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 681-684.
- [2] WU Xiao-hua, LI Zi-tian, ZHANG Fan. Analysis and near-lossless compression based on CPLD of interference hyperspectral image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1346-1348.
吴小华, 李自田, 张帆. 干涉超光谱图像分析与近无损压缩 CPLD 实现[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1346-1348.
- [3] LI Yun-song, WU Cheng-ke, CHEN Jun, *et al.* Spectral satellite image compression based on wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 691-695.
李云松, 吴成柯, 陈军, 等. 基于小波的干涉多光谱卫星图像的压缩方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 691-695.
- [4] WU Dong-mei, WANG Jun, ZHANG Hai-ning. Research of hyper-spectral image lossless compressing technology based on DPCM between spectra and IWT[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 156-159.
吴冬梅, 王军, 张海宁. 基于谱间 DPCM 和整数小波变换的超光谱图像无损压缩[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1): 156-159.
- [5] ZHANG Xu-dong, LU Guo-dong, FENG Jian. Fundamentals of image coding and wavelet compression principles, algorithms and standards[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 57.
张旭东, 陆国栋, 冯健. 图像编码基础和小波压缩技术—原理、算法与标准[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 57.
- [6] LI Hui-hui, GUO Lei, LIU Hang. Evaluation of multisensor image fusion using different wavelet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1263-1267.
李晖晖, 郭雷, 刘航. 基于不同类型小波变换的 SAR 和可见光图像融合研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(8): 1263-1267.

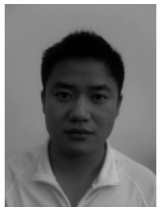
Interferogram Compression Based on Wavelet Transform

HU Huang-hua, YUAN Yan, ZHOU Yu, ZHANG Xiu-bao

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the research of wavelet transform and SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees algorithm), wavelet image compression technology is introduced to compress interferogram. In addition, in the wavelet decomposition coefficient matrix, high-frequency image data are close to zero, the information is mainly manifested in the part of the low-frequency image, and the mainly information storage is close to zero optical path difference in the interferogram. A row of interferogram data is disconnected and the data are stored with Z-storage array to the matrix form, which is compressed with wavelet algorithm. The research results show that the improvement can raise compression performance.

Key words: Wavelet transform; SPIHT algorithm; Interferogram; Image compression



HU Huang-hua was born in 1983 and graduated from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2005. Now he is studying for his M. S. degree at the same university, and his research interests focus on interferogram compression algorithm.