

基于 ROI 编码的干涉超光谱图像近无损压缩*

张 帆^{1,2} 李自田¹ 薛利军^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 71068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 针对干涉超光谱成像仪所成图像的特点, 提出了一种基于 ROI (Region of Interest, 感兴趣区域) 编码的干涉超光谱图像序列压缩方法. 利用帧内差值变换, 结合矩形 ROI 编码, 在提高遥感图像压缩比的同时, 使压缩后的重建图像质量达到近无损的技术要求. 实验结果表明, 这种压缩方法在干涉超光谱图像压缩中当相对光谱二次误差为 2.04% 时, 干涉图像的压缩比达到 9.66 : 1.

关键词 图像压缩; 干涉超光谱图像; ROI; 成像光谱技术

中图分类号 TN919.81 **文献标识码** A

0 引言

成像光谱技术是一项融光学、光谱学、电子技术、计算机技术及精密机械于一体的高新技术. 由于利用这项技术能获得被测目标的空间和光谱的丰富信息, 因此其在航空航天遥感、军事侦察、环境监测、资源勘探等方面都具有广阔的应用前景^[1,2].

目前的成像光谱仪主要有三种类型: 色散型、干涉型和计算层析型^[3]. 其中, 干涉成像光谱仪也称 Fourier 变换成像光谱仪^[1]. 干涉成像光谱仪与其它成像光谱仪一样, 在获得目标空间信息的同时, 还获得目标的光谱信息.

随着光谱遥感影像在时间、空间和光谱分辨率上的显著提高, 造成了待处理数据数量的激增, 这给数据的传输和存储带来了极大的困难, 限制了成像光谱技术的进一步应用与发展. 作为解决这一问题

的有效途径, 数据压缩技术的应用具有重要的意义和实用价值^[5,6]. 本文针对干涉超光谱成像仪产生的干涉图像, 提出了一种基于 ROI 编码的干涉光谱图像压缩方法.

1 干涉光谱成像仪的成像原理

干涉成像光谱仪获得的图像包含了二维的空间信息和一维的光谱信息, 与传统的色散型成像光谱仪不同, 干涉成像光谱仪首先将入射的一束光送入干涉仪, 将之分解为具有一定光程差的光线并进行干涉叠加, 由于在一行上各点的光程差不同, 从而在成像平面形成具有竖条状干涉条纹的干涉超光谱图像, 光谱信息就存在于干涉条纹之中. 干涉成像光谱仪通过推扫方式产生另一维空间信息.

干涉图像作为中间数据, 需要通过傅里叶变换数值计算得到复原光谱图, 如图 1. 这一关系可表述

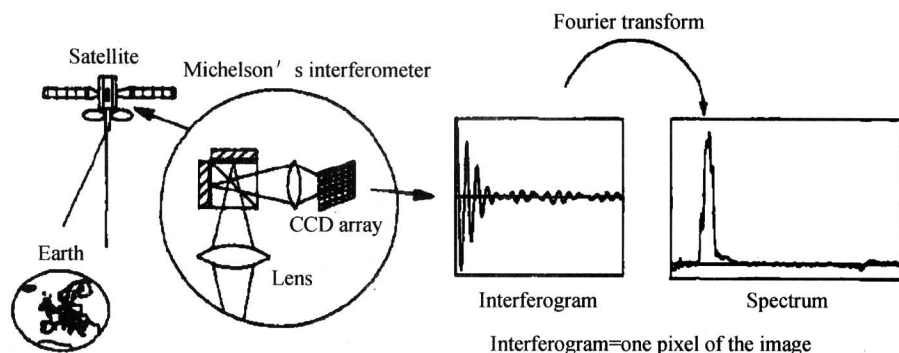


图 1 干涉图到光谱图变换
Fig. 1 Scheme of converting interferogram to spectrum

成如下形式(略去常量)

$$B(\nu) = \int_0^L I(x) \cos(2\pi\nu x) dx \quad (1)$$

式中, ν 为波数, x 为光程数, L 为最大光程差^[7].

2 干涉超光谱图像的特性

本文的研究对象是西安光机所研制的空间分辨率为 100 m, 光谱分辨率在波长 450~950 nm 间平均为 5 nm 的空间调制干涉超光谱成像仪产生的 512×256×12Bit 干涉超光谱图像.

干涉图像作为中间结果, 必须要经过傅里叶变

换以后才能得到用户可以直接使用的超光谱图像序列. 在空间遥感的应用场合, 光谱复原工作通常是在地面完成. 因此, 数据压缩面对的对象是干涉图像. 干涉图像不同于普通的图像数据. 干涉图像在压缩后, 如果丢失信息过多, 或是丢失了部分重要信息, 则无法复原出真实的光谱. 而与一般的静态图像相比, 由于光谱图像应用领域的特殊性, 对图像数据的压缩不能仅仅满足于视觉上的清晰, 还要求图像信息得到最大程度的保真, 这就产生了压缩效率和信息保真的矛盾. 如何在尽可能保存图像信息的前提下, 提高图像的压缩效率, 正是本文讨论的重点.

由信息论可知, 数字图像可被压缩的原因是像素间有相关性, 含有信息冗余^[8]. 对于一帧干涉图像, 行方向是地元的干涉条纹, 由干涉的性质可知, 干涉条纹是关于零光程差对称分布的明暗相间的条纹, 也就是说, 关于零光程差对称的像素, 相关性极强. 另外, 随着与零光程差的偏离, 干涉条纹的明暗变化越来越弱, 相邻像素的相关性也越来越强. 图 2 为干涉图像中一行干涉条纹的光强度分布.

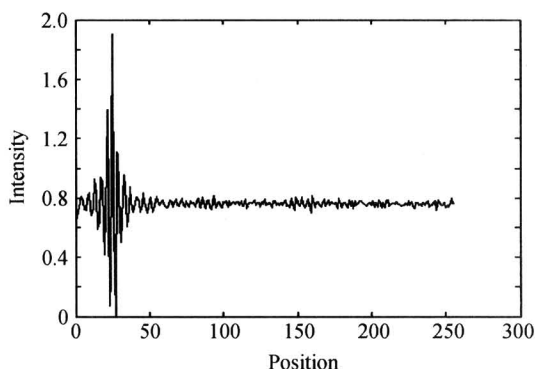


图 2 干涉条纹的相关性
Fig. 2 The relativity of interferogram

干涉图像的列方向表示的是一个光谱频率上的空间信息, 由于相邻地元的相似性, 列方向具有空间相关性. 因此可以通过去除相关性达到数据压缩的目的.

另外, 对于一帧干涉图像来说, 图像中每个点对光谱复原的贡献并不是同样大的. 在零光程差附近的采样点, 因为其携带的信息丰富, 幅值较大, 并且要用来做相位修正, 因此贡献较大; 而光程差较大的部分属于高频信息, 在经过一次滤波后, 其幅值很小, 也就是说, 这一部分采样点对光谱复原的贡献较小. 因此, 可以在尽可能保存图像重要光谱信息的同时, 适当损失其他部分的准确度. 这样, 可以实现干涉图像的近无损压缩, 大大提高压缩效率. 对于分析的干涉图像来说, 零光程差位于图像的第 25 列, 包含重要光谱信息的区域为 $\{[0, 0], [511, 48]\}$.

3 干涉超光谱图像压缩方法

本文针对干涉图像的特点, 提出帧内差值变换方法, 结合 ROI(感兴趣区域)技术和有效的像素补偿策略, 实现干涉图像的近无损压缩方法. 下面进行详细的介绍.

3.1 帧内差值变换方法

由前面的介绍知道, 关于零光程差(第 25 列)对称的像素相关性极强, 在理想状态下, 是完全对称的. 可是由于噪声的存在以及采样点的偏差, 这种对称不是很严格. 但是, 令对称列相减(第 24 列减去 26 列, 第 23 列减去 27 列...), 可以看到, 图像第 1 列至 24 列的样本值基本趋于 0. 效果图如图 3.

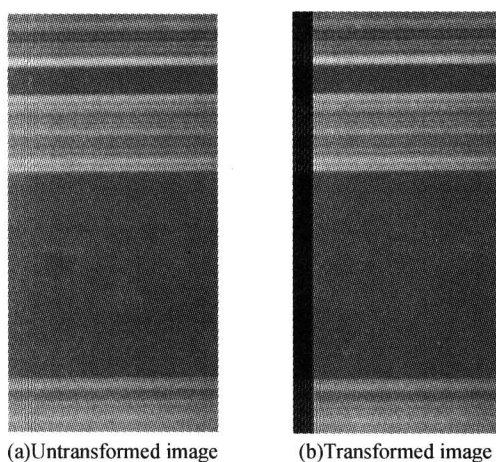


图 3 帧内差值变换
Fig. 3 Difference transform for the interferogram image

通过采用这种方法, 可以将压缩比提高 10%~20%.

帧内差值变换后, 进行整数小波变换, 以进一步的去除干涉图像的帧内相关性.

3.2 ROI 编码

选择包含重要光谱信息的区域为 ROI 区域, 即干涉图像的第 1 列到第 49 列, 其他区域为背景区域, 即图像中的第 50 列到第 256 列. 保留 ROI 区域的 12 位准确度, 对背景区域进行量化处理. 为了尽可能的解决压缩效率和信息保真的矛盾, 需要考虑重构压缩图像的时候, 对背景区域像素的复原策略. 由图 2 可以看出, 对于一行干涉条纹, 背景区域的像素值起伏很小, 基本关于背景区域的行均值对称, 因此, 用行均值来代替像素值, 可以获得较好的效果.

对于经过整数小波变换的背景区域小波系数, 其量化策略如下: 量化器采用经改进的均匀量化器, 量化区间选取为定长, 即根据量化准确度, 将背景区域的小波系数右移一定的长度, 并以此作为量化值

进行下一步的编码. 量化过程如式(2).

$$q_b(u, v) = \text{sign}(a_b(u, v)) \left[\frac{|a_b(u, v)|}{\Delta_b} \right] \quad (2)$$

式中, Δ_b 是子带 b 的量化步长, $\text{sign}(a_b(u, v))$ 表示背景区域小波系数 $a_b(u, v)$ 的符号, $|a_b(u, v)|$ 为该系数的模值.

解码过程进行反量化时, 对熵编码得到的背景区域的小波量化系数按照式(3)进行修正

$$R_{q_b(u, v)} = \begin{cases} [(\bar{q}_b(u, v) + r)\Delta_b], & \bar{q}_b(u, v) > 0 \\ [(\bar{q}_b(u, v) - r)\Delta_b], & \bar{q}_b(u, v) < 0 \\ 0, & \bar{q}_b(u, v) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\bar{q}_b(u, v)$ 为算术熵编码后得到的小波量化系数, $R_{q_b(u, v)}$ 为反量化后的小波系数. r 一般取值为 $1/2^{[9]}$.

为了获得更好的复原效果, 在小波变换之前要构造量化表, 量化表的内容是原始图像中背景区域像素的行均值. 量化表随压缩码流传输, 在解码端, 小波逆变换之后, 对重构图像背景区域像素按照式(4)进行修正.

$$R_{f(x, y)} = \begin{cases} f(x, y), & f(x, y) \neq 0 \\ \text{mean}(u), & f(x, y) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\text{mean}(u)$ 表示量化表记录的背景区域中第 u 行的行均值.

量化表的大小为 512×2 字节, 它的传输对于压缩效率的影响很小. 在追求高压缩比的应用场合, 量化表的构造能够尽可能的保留干涉图像的光谱信息, 保证压缩重构图像的质量.

3.3 熵编码

干涉图像压缩方法的熵编码采用 EBCOT 算法 (Embedded Block Coding with Optimized Truncation 基于优化截断的嵌入式码块编码). 该算法不仅提供了高的图像压缩性能, 而且生成的压缩码流可以同时质量 (即 SNR 信噪比) 上和分辨率上具有可分级性, 不需解码可随机获得所需的压缩码流数据.

4 失真度量

干涉图像序列中包含空间信息和光谱信息, 本

文介绍的压缩方法, 针对的是图像序列中的光谱信息冗余而进行的数据压缩, 并没有对空间信息进行压缩处理, 因此压缩后干涉图像序列的空间信息是无损的. 所以只需要考虑光谱信息的失真度量问题.

通常最终用户关心的是压缩前后复原光谱的差异, 虽然度量方法很多, 但是到目前为止, 仍然没有统一的度量标准. 在此采用相对光谱二次误差 (Relative spectral Quadratic Error, RQE)^[10] 来度量压缩后复原光谱相对于压缩前复原光谱的失真程度. 对于压缩前后干涉图间的差异, 并不是最终用户关心的重点.

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

式中 $S(\tilde{f})$ 为原始光谱, $\hat{S}(\tilde{f})$ 为经压缩后重建的光谱; $\tilde{f} = \frac{1}{\lambda f_e}$ 为归一化频率 ($0 < \tilde{f} < 0.5$), λ 为波长 (单位 μm), f_e 为采样频率.

经过分析, 干涉图像中的噪音主要是光子噪音, 在可见光和近红外范围, 其 RQE 的置信区间为 $2\% \sim 4\%$. 因此, 光子噪音的方差可以作为进行压缩时允许失真的参照.

5 压缩仿真结果

仿真中所采用的干涉图像皆来自于空间调制干涉超光谱成像仪获得的实际数据, 包括细节丰富的地面推扫图以及接近于真实应用的机载航拍图.

在无损压缩的情况下, 压缩比达到 $2.45 : 1$ (不采用帧内差值变换方法的压缩比为 $2.17 : 1$).

在近无损的情况下, 为了分析压缩对光谱复原的影响, 分别抽取原图像和压缩重构图像中对应的一行干涉条纹, 进行傅里叶变换, 并计算相对光谱二次误差.

图4为干涉图的复原光谱, (a) 压缩比达到 $2.71 : 1$ 时, 其相对光谱二次误差 (RQE) 为 0.15% . (b) 压缩比达到 $3.76 : 1$ 时, 其相对光谱二次误差 (RQE) 为 0.64% . (c) 极端情况下, 将背景区域完全

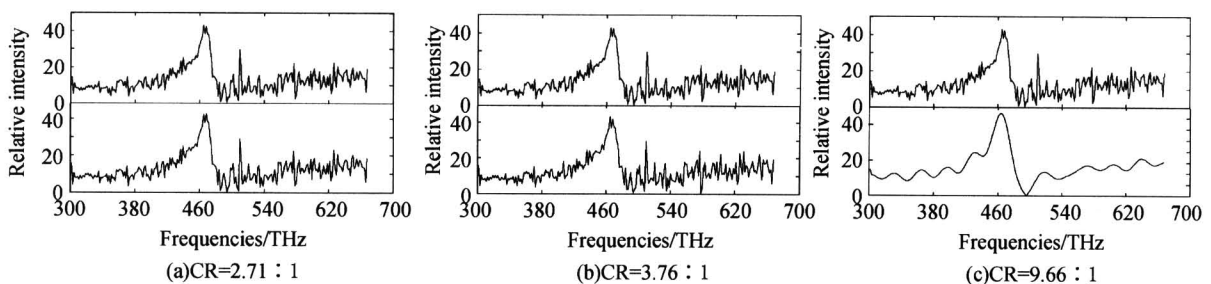


图4 干涉图的复原光谱

Fig. 4 Recovering spectra of the interferogram

丢弃,干涉图像的压缩比达到 9.66 : 1,相对光谱二次误差(RQE)为 2.04%.

6 结论

通过对干涉超光谱成像仪所产生的干涉图像特点的分析,本文提出了一种新的干涉超光谱图像压缩方案,新方案利用帧内差值变换,结合 ROI 编码技术,在保存干涉图像中光谱信息的前提下,尽量提高压缩效率. 由压缩结果可以看出,在背景区域完全损失的情况下,光谱复原的失真度依然可以接受. 而压缩效率得到了很大的提高. 该方案在干涉超光谱图像压缩领域具有实用价值.

参考文献

- 1 相里斌,计忠瑛,黄曼,等. 空间调制干涉光谱成像仪定标技术研究. 光子学报,2004,33(7):850~853
Xiangli B, Ji Z Y, Huang M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7):850~853
- 2 杜培军,方涛,唐宏,等. 高光谱遥感信息中的特征提取与应用研究. 光子学报,2005,34(2):293~296
Du P J, Fang T, Tang H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2):293~296
- 3 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. 光学学报,2001,21(3):330~334
Dong Y, Xiangli B, Zhao B C. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(3):330~334
- 4 Inoue T, Itoh K, Ichioka Y. Fourier transform spectral imaging near the image plane. *Optics Letters*, 1991, 16(12):934~936
- 5 周有喜,肖江,吴成柯,等. 遥感干涉超光谱图像压缩编码. 光子学报,2005,34(4):594~597
Zhou Y X, Xiao J, Wu C K, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(4):594~597
- 6 穆宝忠,叶子,余飞鸿. 数码彩扩机色域匹配模型研究. 光子学报,2005,34(3):448~451
Mu B Z, Ye Z, Yu F H. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(3):448~451
- 7 吕群波,相里斌. 基于光谱分类的干涉光谱图像压缩. 光子学报,2004,33(6):681~684
Lü Q B, Xiangli B. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(6):681~684
- 8 王汇源. 数字图像通信原理与技术. 北京:国防工业出版社,2000
Wang H Y. *Communication principle and technology of digital images*. Beijing: National defence industry press, 2000
- 9 ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG1 N1646R, JPEG2000 Image Coding System. Mar. 16, 2000
- 10 Mailhes C, Vermande P, Castanie F. Spectral image compression. *J Optics(Paris)*, 1990, 21(3):121~132

A Method of Near-lossless Compression for the Interferogram Hyperspectral Images Based on Rectangle ROI Coding

Zhang Fan^{1,2}, Li Zitian¹, Xue Lijun^{1,2}

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-05-27

Abstract A new compression method of interferogram hyperspectral images based on ROI (Region of Interest) coding is proposed, which is based on the analyses of the characteristics of hyperspectral imaging spectrometry. This method that uses the symmetry of the interfering stripes, processes the intra-frame compression and integrates the rectangle ROI coding improves compression ratio of remote sensing images and reaches the requirements of near-lossless compression. Experimental results showed that when relative spectral quadratic error was 2.04% the compression ratio reached 9.66 : 1.

Keywords Image compression; Interferogram hyperspectral images; ROI; Spatially modulated imaging interferometry



Zhang Fan was born in 1973 in Shannxi Province and gained the B. E. degree from Xi'an Jiaotong University in 1996. Now she is studying for her M. S. degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. She is interested in processing of digital images.