

文章编号: 0253-2239(2010)04-1188-04

基于编码孔径的一维光谱压缩方法研究

宫兴致 程 梁 余飞鸿

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 在研究现有光谱压缩概念和方法的基础上, 提出一种新型的压缩方法。不同于各种基于软件算法的光谱压缩, 提出一种利用编码孔径的硬件实现方法。在光学系统中加入编码孔径对光谱进行光学压缩, 可以实现光谱数据的瞬时编码, 经编码孔径压缩的光谱可以通过与编码形式对应的解码算法重建。在此基础上研究了编码解码的具体形式。提出基于小波变换和缺陷矩阵理论的两种编码板形式, 以及基于小波逆变换和稀疏矩阵梯度投影的迭代算法的解码重建算法。用实物光谱进行模拟, 比较不同的编码形式的压缩比和保真度。提出存在采用低采样频率压缩编码还原具体光谱信息的可能性, 并总结了压缩编码的一般原则。

关键词 光谱学; 光谱压缩; 编码孔径; 计算光学; 小波变换

中图分类号 TP751 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103004.1188

Research of One-Dimensional Spectrum Compression Based on Coded Aperture

Gong Xingzhi Cheng Liang Yu Feihong

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract On the basis of studying the concept and solution of spectral compression, a kind of novel compression solution is proposed. Different from spectral compression via algorithm, our solution focuses on optical system. A coded aperture is utilized, and the coding process is snapshot, and decoding algorithm corresponding the coding form to reconstruct the spectrum is chosen. Two kinds of specific coded aperture are presented which are based on wavelet transform and deficiency matrix. Decoding reconstruction via inverse wavelet transform and gradient projection for sparse reconstruction iterative algorithm is presented. Then compressive ratio and fidelity of two kinds of coded aperture are demonstrated by comparison of the spectral simulating acquired via the real spectrometer. It is possible to reconstruct signal-specific information at the lowest sampling rate, and the general principle of coded aperture compression is summarized.

Key words spectroscopy; spectral compression; coded aperture; computing optics; wavelet transform

1 引 言

光谱作为一种非常理想的检验物质特性的参数广泛应用在科学的各个领域。物质的光谱的某些特征可以很好地反应出物质的很多物理化学性质。随着光谱仪器以及航天航空技术的发展, 成像光谱仪随之诞生并用来进行遥感观测。成像光谱仪可以探测二维物体的光谱, 所得到的数据是一个所谓的数据立方体, 其数据量远远大于普通的光谱或者二维图像。随着成像光谱仪的分辨率越来越高, 可探测的波长范围越来越宽, 每单位时间接收获得光谱立方体数据量大大增加, 超过了目前传输系统的最大

带宽。所以科学家开始考虑将数据立方体压缩存储以满足带宽要求。而压缩后的数据又需要可以很好的还原成原始数据。大部分的压缩工作主要集中在压缩数据立方体的光谱维, 也就是光谱压缩^[1]。

传统意义的光谱压缩, 主要是先获得数据, 然后进行压缩处理最后存储的过程。检验一个压缩系统的标准主要是依据光谱压缩的压缩比和保真度两个指标。除去成像光谱仪的硬件, 光谱压缩主要还是依靠各种算法的软件压缩。由于成像光谱仪和图像有着微妙的联系^[2,3], 所以很多图像的压缩算法被广泛应用到光谱压缩的领域, 比如小波变换压缩^[4]、

收稿日期: 2009-02-17; 收到修改稿日期: 2009-05-27

作者简介: 宫兴致(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光谱仪器方面的研究。E-mail: gongxingzhi@yahoo.com.cn

导师简介: 余飞鸿(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学仪器方面的研究。E-mail: feihong@zju.edu.cn(通信联系人)

离散余弦变换压缩(DCT)^[5]和预测算法压缩^[6]等各种算法。这些算法都可以很好地压缩光谱数据,并且在压缩比和保真度方面取得了良好的平衡。

以上提及的各种光谱压缩系统都是软件算法实现的,即先利用光谱仪器获得光谱数据然后利用算法将数据压缩存储。这种方法的缺点是压缩比和保真度完全取决于算法,有可能当数据量过于庞大的时候在算法过程出现瓶颈。理想的压缩方法应该是光学或者硬件上的,可以完全瞬时对数据进行压缩,不取决于算法的速度。

2 编码孔径光谱压缩系统

如图 1 所示,编码孔径压缩光学系统由若干准直和成像镜头以及两个色散元件组成。首先光源经

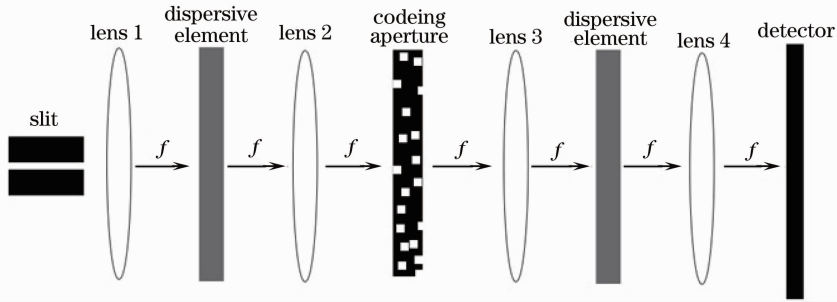


图 1 编码孔径光谱压缩光学系统示意图

Fig. 1 Illustration of coded aperture spectral compression system

图 2 可以更简洁地描述上述问题:狭缝色散后编码,然后逆色散重新形成狭缝,最后被探测器测量。由于编码板的最小的码元的尺度大概是几十个微米或者十几个微米,基本上无衍射效应,即使存在衍射效应也对最后的解码结果影响甚微。

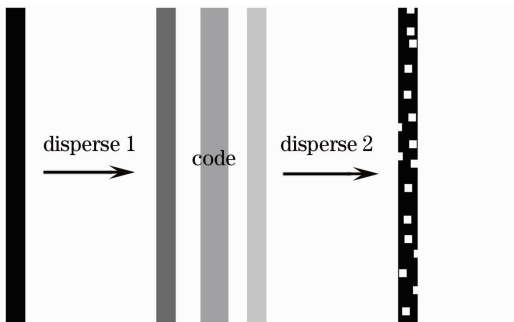


图 2 双色散编码示意图

Fig. 2 Illustration of two-disperser coding

用方程描述系统的特性为

$$I(x, y) = \iiint S_0(x, y, \lambda) D(x, y) H_1(x, y, \lambda) T(x, y) H_2(x, y, \lambda) dx dy d\lambda, \quad (1)$$

式中 $S_0(x, y, \lambda)$ 是最初的光源信息,首先经过狭缝

过准直后进入透镜 1,透镜 1 和透镜 2 形成一个 $4f$ 系统,在 $4f$ 系统的中间像面放入色散元件,经过透镜 2 的光到达编码板,相当于光源的单色像被成像到编码板上,然后进入另外一个完全相反的 $4f$ 系统,该部分完全抵消第一个 $4f$ 系统的作用,最后得到了带有编码信息的一维强度信号。由于色散系统不参与成像,可以将该系统简单理解为,首先利用第一个色散元件得到狭缝单色像,一维光谱被拉伸成二维,这样的伪二维光谱经过编码板进行编码;然后拉伸的伪二维光谱经历了一个逆色散过程又重新变成狭缝,编码板信息也在这个过程中被压缩进来,从而一维探测器探测到的一维强度信息不再均匀,而是混叠了光谱与编码孔径信息互相叠加的强度。

变成了一维的光谱信息;其中狭缝的传输特性可表示为 $D(x, y) = \delta(x)$;然后经过第一个色散元件,其色散方程 H_1 表示为

$$H_1(x, y, \lambda) = \delta(y - y') \delta\{x - [x' + \alpha(\lambda - \lambda_c)]\}. \quad (2)$$

其中 H_1 为经过二维编码板前的系统方程, α 为线性色散率, x, y 分别为色散和非色散方向, λ_c 表示中心波长。再经过一个二维编码板,其传输特性表达为 $T(x, y)$,最后经过第二个色散系统,其色散方程 H_2 有如下表达式:

$$H_2(x, y, \lambda) = \delta(y - y') \delta\{x + [x' - \alpha(\lambda - \lambda_c)]\}. \quad (3)$$

H_2 为经过二维编码板后的系统方程,同(2)式类似,可以看出两个色散系统是相反的过程。

从以上分析中得出,编码板是整个系统的核心,如果没有编码板,就没可能还原压缩光谱信息;并且该系统是将一个二维的编码与光谱内积,然后在某一维叠加测量。所以编码板的选择对于压缩比和保真度起着非常重要的作用。只有合适的编码才可以重建算法恢复出实际的光谱数据。

3 编码解码算法

3.1 小波变换编解码算法

考虑到大部分光谱研究只是对一些特征谱线或者走势感兴趣,并且自然界的光谱不是完全独立的,所以存在冗余数据。这样就给压缩带来了可能。由于编码板的制作工艺限制,最简单的莫过于 0,1 状态,即通光和不通光。所以考虑哈尔小波变换^[7]。

一个连续的光谱可以利用离散的小波系数还原,不同层的小波系数不是独立的,并且低层小波细节系数不为零的可能性一般来说是比较小的。小波压缩算法正是利用了这种思想:通过各层之间的联系计算小波系数。如果知道某一层(level) n 的详细系数和 $n-1$ 层的总能量,那么可以大概判断它的上 $n-1$ 层的系数。比如可以认为低层的所有能量都集中在父层比较大的相应系数上,或者可以按照父层的比例来对下一层的能量进行分配,还可以将两种分配混合起来交替使用。

对于一个连续的信号,只需要测量出该信号某一较高层的详细系数,以及较低层的能量总和,就可以利用以上的规律计算出具体的系数,从而将信号还原,同时达到了光谱压缩的目的。如图 3 所示,前 32 列测量了每 8 个光谱通道的总和也就是平均值,这 32 个平均能量可以认为是第 4 层的小波系数,同理剩下的编码分别测量了第 3 系数的 2 次加和,第 2 系数的 4 次加和以及第 1 系数的 8 次加和。具体的计算公式如下:

$$A_{J+1}[n] = \frac{A_J[2n-1] + A_J[2n]}{\sqrt{2}}, \quad (4)$$

$$D_{J+1}[n] = \frac{A_J[2n-1] - A_J[2n]}{\sqrt{2}}, \quad (5)$$

式中 A 代表平均值, D 代表具体细节,下标 J 代表层数。

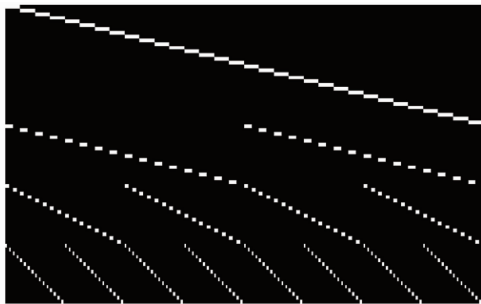


图 3 小波编码板示意图

Fig. 3 Illustration of wavelet coding mask

针对下图的编码形式,具体的解码可以按照如下步骤:

(1) 直接读出 A_3 的所有系数;

(2) 根据(4)式,(5)式计算出 A_4 和 D_4 ;

(3) 根据 A_2 的总和计算出 D_3 的总和,根据 D_4 推测出 D_3 的每一个具体的系数;

(4) 根据 A_3, D_3 计算 A_2 ,以此类推计算出 A_0 ,即为每一个光谱通道的具体数值。

3.2 缺陷矩阵的编解码算法

不同于小波编码,缺陷矩阵的编码的主要思想是通过稀疏矩阵的数学解法使缺陷方程的解尽可能逼近真实值。首先考虑一下缺陷矩阵,一个线性方程:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{B}.$$

如果 \mathbf{A} 是不满秩的,那么解向量 \mathbf{x} 不是唯一确定的。可以考虑该问题的带有噪声的等价方程^[8]:

$$\mathbf{x} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} [\|\mathbf{B} - \mathbf{Ax}\|_2^2 + \tau \|\mathbf{x}\|_1], \quad (6)$$

式中 $\tau(\mathbf{x})$ 是噪声补偿项。该反问题的解法,随着计算机的发展,近十几年有了很大的发展,出现很多这种缺陷矩阵的反问题解法。由于实际信号都不是独立的,所以通过各种缺陷矩阵反问题解法计算出的结果可以在很大程度上和真实值相符。

当光谱经过编码后,逆色散在探测器上得到强度信息。色散中间的二维编码孔径可以认为是前面所述的不满秩的缺陷方程,因为编码孔径最终在一维叠加,如果孔径的两个方向长度不一样,那么探测器上所得到的信息需要经过以上所描述的解码过程。

以 \mathbf{S} 矩阵为例^[9],由于 \mathbf{S} 矩阵是列向量均是线性无关的,即满秩。如果将一个 \mathbf{S} 矩阵直接编码成孔径,那么二维编码孔径的两个方向长度一样(如图 4 所示),且满秩,那么有解向量可以唯一确定,探测器的强度信息可以通过简单的线性方程求解。如果减少一维的编码孔径的长度,那么所得的结果就不能利用简单的线性方法求解,需要借助于求解(6)式的方程来获得。图 4 是一个维数为 31 的 \mathbf{S} 矩阵,如

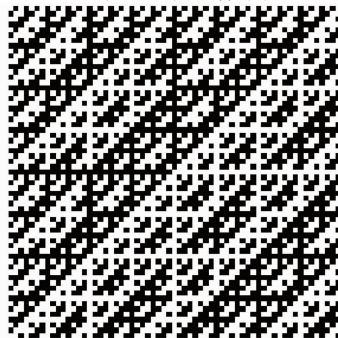


图 4 \mathbf{S} 矩阵编码板示意图

Fig. 4 Illustration of \mathbf{S} -matrix coding mask

果将其中的一维切短,那么就是缺陷矩阵的编码孔径。

4 模拟结果

下面针对所提到的两种编码方法进行模拟。用作模拟的光谱是从实际的地物光谱数据中截取的一部分,由于不同的编码方式,波长的截取会有略微的不同,但整体趋势保持一致。

4.1 小波逆变换解码结果

编码采用的是4层小波编码,利用3.1的步骤进行解码。其中虚拟探测器的个数是20,即数据压缩比为31.25%,压缩光谱的和实际光谱的误差为6.69。原始数据经过简单的降噪处理后,得到的结果如图5所示。可以看出,由于压缩比较大,重建结果没有非常好地描述原始光谱,但是可以看出整体趋势的走向是正确的,如果适当提高编码的细节数,就很容易得到更好的结果。

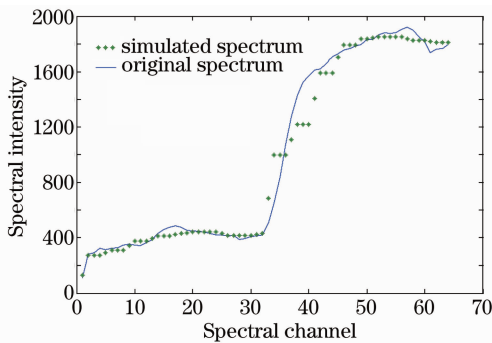


图5 小波解码结果

Fig. 5 Result of wavelet decoding

4.2 缺陷矩阵解码结果

编码版采用的是维数为63的S矩阵,解码算法利用了还原稀疏矩阵的梯度投影算法,对于该算法的具体原理和参数设置不是本文所要讨论的内容。其中在虚拟探测器获得的数据个数是50,即数据压缩比为79%,压缩光谱的和实际光谱的误差为6.07%。通过反复实验,设置相应的参数以及选择合适的降噪方法,最终得到的模拟结果如图6所示。由于压缩比很小,重建曲线和原始光谱非常好的拟合,可以认为两个光谱所描述的对象是一致的。

5 结论

通过两种解码的效果可以看出,还原质量和压缩比之间还是存在着紧密的联系。由于两种编码都只是简单的数学模型,没有考虑到具体光谱的特性,都存在一些不合理性,比如小波编码的信息没有完

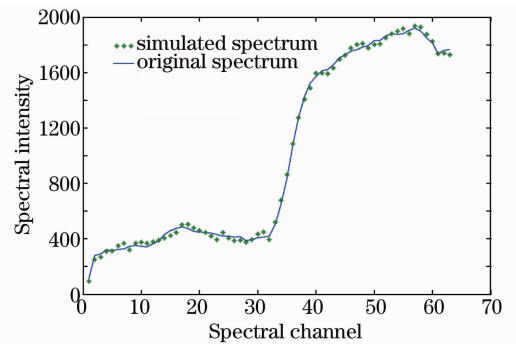


图6 缺陷矩阵解码结果

Fig. 6 Result of defective matrix decoding

全的利用,只是利用了一些加和,缺陷矩阵编码可以改进成多进制增加透射率和信噪比,并尽可能的利用原来光谱的自然特性。目前的编码板只适合较平滑连续的光谱,对于有较大震动的光谱以及各种现状谱的适应性不是特别好,不过可以通过增加编码维数减小编码元的大小来得到误差更小的压缩结果。

参 考 文 献

- Lü Qunbo, Yuan Yan, Xiangli Bin. Fourier transform imaging spectral data compression [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 573~576
吕群波,袁艳,相里斌. 傅里叶变换成像光谱数据压缩[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 573~576
- Deng Jiaxian, Li Taijun. Interference hyper-spectral images compression based on classification and curve-fitting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 45~51
邓家先,李太君. 基于分类和曲线拟合的干涉超光谱图像压缩[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 45~51
- Wang Keyan, Li Yunsong, Wu Chengke *et al.*. Compression of interference multispectral image based on adaptive classification and curve-fitting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 78~85
王柯俨,李云松,吴成柯等. 基于自适应分类曲线拟合的干涉多光谱图像压缩[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 78~85
- Li Yunsong, Wu Chengke, 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压缩方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 691~695
- Li Huili, Wang Guoyou. Fast DCT compression method of remote sensing images with adaptive layered quantization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(3): 276~279
李会丽,汪国有. 遥感图像自适应分层量化的快速DCT压缩法[J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(3): 276~279
- Sun Lei, Luo Jianshu, Gu Defeng. Hyperspectral image compression algorithm based on prediction between bands and rate pre-allocation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(4): 752~757
孙蕾,罗建书,谷德峰. 基于谱间预测和码流预分配的高光谱图像压缩算法[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(4): 752~757
- A. Jensen, A. I. Cour-Harbo. *Ripples in Mathematics: The Discrete Wavelet Transform* [M]. Springer-Verlag, 2001
- M. A. T. Figueiredo, R. D. Nowak, S. J. Wright. Gradient projection for sparse reconstruction: application to compressed sensing and other inverse problems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, 2007, **1**(1): 586~597
- J. Decker Jr. *Hadamard Transformation Optics* [M]. Academic Press, 1979