

哈达玛变换光谱仪混合像元解混方法研究

闫 鹏, 胡炳樑, 刘学斌, 孙 威, 李立波, 冯玉涛, 刘永征

中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119

摘 要 哈达玛变换光谱成像仪是一种采用多通道探测的数字变换光谱技术, 介绍了基于数字微镜阵列器件(DMD)的哈达玛变换光谱仪工作原理与仪器结构, 对成像传感器所获得的混合像元进行了分析研究, 理论推导出了混叠像元的解混方法, 仿真实验结果表明该方法简单有效, 对提高混合像元复原光谱精度超过10%。

关键词 哈达玛; 混合像元; 光谱成像仪; DMD

中图分类号: TH744.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)10-2870-04

引 言

光谱成像技术是新一代的光电探测技术, 已广泛应用于陆地海洋地理遥感, 大气、土壤和水体的遥感监测, 医疗光谱成像诊断, 军事目标侦查探测、检视等军事和民用领域, 具有很高的开发应用价值。

目前微小型光谱仪入射狭缝形式大多数采用单狭缝, 带来的缺点是光通量严重下降。因此, 大多数光栅光谱仪存在光通量与分辨率间接的矛盾^[1]。为了实现多狭缝阵列结构, 目前经常采用电驱动平移狭缝。该方法对模板工艺要求苛刻, 并且驱动结构复杂精度较差; 同时由于移动距离有限, 限制了狭缝的个数, 种种不利都限制了哈达玛光谱仪的发展^[2-4]。

因此, 为了能很好解决的光栅光谱仪上面提到的这些问题, 我们设计了基于数字微镜阵列(digital micromirror device, DMD)的哈达玛变换光谱仪, 它具有光通量大, 性噪比高, 狭缝宽度、哈达玛阶数实时可调等诸多优点^[5-7]。当然, 不可避免的它也有多狭缝所带来的光谱混叠等问题。本文针对混合像元的问题, 给出了一种便捷的哈达玛变换像元解混方法。

1 哈达玛变换原理

哈达玛变换理论来自于法国数学家 Jacques Hadamard, 从数学上讲, 哈达玛变换光谱实际上是统计学中的称量设计在光谱学中的应用^[8]。应用该理论的组合测量方法可以在不

增加测量次数的前提下有效提高测量的信噪比。对于一个由 n 个元素组成的模板, 每次测到的信号 y_j , 可以表示为

$$y_j = \sum_{i=1}^n S_{ij} X_i \quad (1)$$

式中 y_j 是用第 j 块模板调制产生的信号总和, X_i 是模板上第 i 个元素所产生的信号, S_{ij} 表示空间光调制器透光与不透光情况, 其中“1”透光“0”不透光, 实际上就是哈达玛循环 S 矩阵的第 j 行。

写成矩阵形式为

$$Y = S \cdot X \quad (2)$$

对上式求解得

$$X = S^{-1} \cdot Y \quad (3)$$

即可以还原出目标的光谱信息。

2 哈达玛变换光谱仪结构

哈达玛变换光谱仪由分光系统, 哈达玛编码器件 DMD, 合光系统以及数据采集系统构成^[8], 其工作原理如图 1 所示。

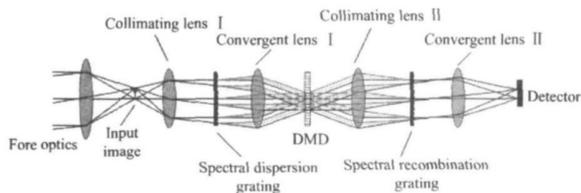


Fig 1 Principle chart of hadamard transform imaging spectrometer

收稿日期: 2011-01-26, 修订日期: 2011-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41005109)资助

作者简介: 闫 鹏, 1985年生, 中国科学院西安光学精密机械研究所研究实习员 e-mail: summer_hehe@163.com; hbl@opt.ac.cn

传统的哈达玛变换成像光谱仪多采用光栅狭缝,但是自 DMD 器件问世以来,由于其可实现哈达玛狭缝宽度与阶数(有限宽谱段范围内,阶数间接反映分辨率)实时可调,并且无运动部件稳定性高等使得它在光谱仪中获得了广泛的应用,本文采用 DMD 器件来实现哈达玛编码。

数字微镜器件由大量的极小反射镜空间组合而成,工作时微镜的偏转由数字集成电路控制,可产生 +12° 和 -12° 两个方向的偏转,实现编码“1”和“0”的功能。DMD 可以被解释为一个空间光调制器。通过 DMD 各个微镜的状态,即可达到微细调制空间光的目的。

3 像元混合及解决混合

3.1 混合像元的产生

首先来看一下编码模板,以 7 阶编码为例,本文采用的哈达玛编码模板是按照 S 矩阵左移循环矩阵一维编码,首行“1 1 1 0 1 0 0”进行编码后的示意图如图 2 所示。

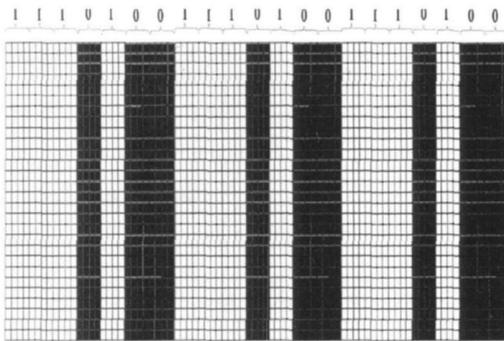


Fig 2 7-order Hadamard encoding mask

系统采用的 DMD 微镜单元尺寸为 10.8 μm × 10.8 μm,而探测器像元的尺寸为 6.7 μm × 6.7 μm。由于微镜单元的尺寸与探测器像元的尺寸不匹配,将导致部分像元出现光谱混和现象。也就是说图 2 中两个相邻通道,经过光路到达探测器像面时候,在某些列像元就形成了两相邻通道对这个像元值都有贡献的情况,这种情况的像元就是混合像元。

以编码像面上反映的“1”和“0”为例,边缘附近的微镜单元经过合光系统成像在探测器像元上时,该像元每一层面上的光谱信息不再是单一某谱段的“1”“0”通断,而是两个谱段光谱信息的混合如下图 3 所示,如果仍然按照正常像元的解码算法,显然会导致这部分像元解码反演出来的光谱图像上

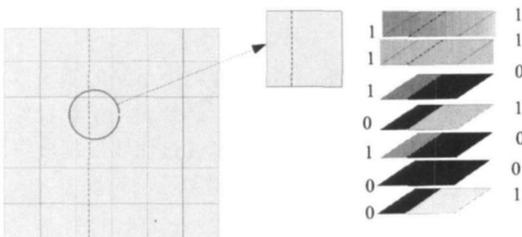


Fig 3 Encoding and imaging principle of a disorder encoding pixel

存在较大误差。而在对地遥感图像的应用中,每一个像元都蕴藏大量的重要信息,显然这种坏像元的存在降低了光谱图像的质量和对地物进行分析的准确性。

由图 3 可以知道,像面上的混合像元总是发生在编码狭缝与狭缝在传感器成像相遇时的边界。

3.2 解混合像元

由 3.1 节知道要解混合像元,首先需要知道图 3 箭头所指混合像元虚线两侧的面积比例,也就是需要知道混合像元左右两侧的编码通道各自对混合像元的贡献大小。

用辐照度均匀的单色光作为入射光,这样 DMD 编码模板仅是对光在空间维的选通,光路没有对不同谱段的光谱混合,探测器所成的像就是 DMD 依照哈达玛编码模板透光或不透光的一种间接反应。在混合像元位置,可取其中一幅通道“1”与通道“0”相邻所获得的黑白条纹,传感器获得的示意图像如图 4。

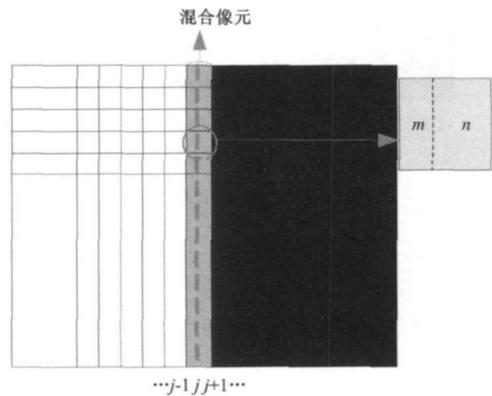


Fig 4 Mirror image on the mixed pixel sensor schematic

图 4 中很明显,对混合像元灰度值的贡献只有透光的这一侧,所以取相邻不混合处通道“1”灰度值平均设其结果为 a,再求取该列混合像元的灰度值取平均 b,那么就很容易知道了透光的通道“1”对混合像元的贡献,假设混合像元发生在第 j 列,并且假设图 4 混合处虚线左右两侧比例是 m:n,于是有

$$\frac{m}{m+n} = \frac{b}{a} \quad (4)$$

$$m+n=1 \quad (5)$$

上两式很容易就可以获得该列混合像元的混合比例。知道了混合像元的混合比例再去解码复色光照条件下的混合像元就很容易了。具体操作是假设混合像元在第 j 列,那么由哈达玛变换原理式(3)得到混合像元光谱值为

$$X = S_{j-1}^{-1} \frac{m}{m+n} Y_j + S_{j+1}^{-1} \frac{n}{m+n} Y_j \quad (6)$$

其中, S_{j-1}^{-1} 表示第 j-1 列不混合处像元的解码逆矩阵, S_{j+1}^{-1} 表示第 j+1 列不混合处像元的解码逆矩阵。

4 实验

首先,需要获得混合比例。

用辐照度较好的波长 594 nm 单色光作为入射光源,取 7

阶哈达玛变换编码后第二幅图像的第 $j = 48$ 列混合像元, 这是由于该幅图像该列在像面上直观地反映是“0”狭缝与“1”狭缝相遇, 只有“1”狭缝对混合像元有贡献, 计算较为容易。下图 5 是传感器获得 594 nm 单色光图像, 为了较好获得混合比例将该列像元求平均, 得 $b = 63.9$; 为了减少运算量求取 $j + 1$ 列像元平均值 $a = 156.8$ 。

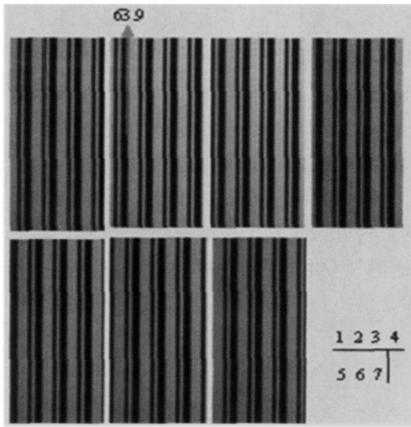


Fig 5 594 nm monochromatic 7-order Hadamard coded imaging

所以

$$\frac{n}{m+n} = \frac{b}{a} = \frac{63.9}{156.8} \approx 40.7\% \quad (7)$$

于是可知

$$m = 59.3\% \quad (8)$$

有了 m 与 n 的值, 就可以按照式(6)对实物成像的混合像元解码。如图 6 所示实验室复色光实物成像, 可取一个混合像元点行 $i = 320$, 列 $j = 48$ 解混合。

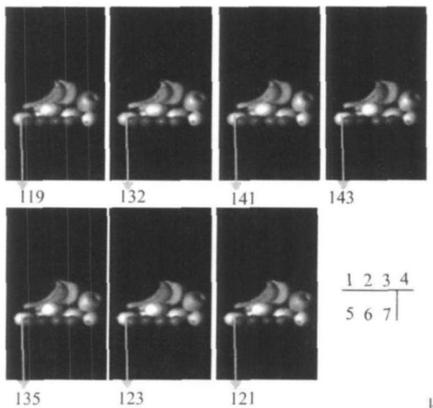


Fig 6 Fruit images acquired in the experiment

所求取的混合像元灰度值如图 6 所示, 套用式(1)即 $[y_1 y_2 y_3 y_4 y_5 y_6 y_7]^T = [119 132 141 135 123 121]^T$ (9)

又由于 $j - 1 = 47$ 列光谱相对定标获得解码逆矩阵以 $0 0 1 1 1 0 1$ 为首行的循环逆矩阵, $j + 1 = 49$ 列解码逆矩阵以 $0 1 1 1 0 1 0$ 为首行的循环逆矩阵, 因此套用式(6), 则有

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} 0011101 \\ 0111010 \\ 1110100 \\ 1101001 \\ 1010011 \\ 0100111 \\ 1001110 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \end{bmatrix} + n \begin{bmatrix} 0111010 \\ 1110100 \\ 1101001 \\ 1010011 \\ 0100111 \\ 1001110 \\ 0011101 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(9)中的值与式(7)和(8)获得的 m 和 n 值带入上式(10), 就可以获得物质在各个谱段上展开的光谱值, 再经过辐射度定标修正、归一化处理并将相应各个谱段描述一条曲线, 就获得该物质光谱曲线。

求解式(10)就将混合像元解码得到

$$x_1 = 41.30; x_2 = 38.56; x_3 = 32.56; x_4 = 26.76; \\ x_5 = 24.92; x_6 = 28.83; x_7 = 35.57$$

本文提出的这种解码方法方便快捷, 比直接进行光谱复原精度有较高的提高。所谓不解混合是指把混合像元当正常像元解码。仍然以上面的混合解码点为例, 即行 $i = 320$, 列 $j = 48$, 如果进行混合像元解码, 那么该点解码矩阵要么以 $0 1 1 1 0 1 0$, 要么以 $0 1 1 1 0 1 0$ 为首行的逆矩阵。下表给出了该解混合与把混合像元当一个不混合像元解码后误差分析表。

Table 1 Mixed pixel unmixing mixed with puzzling errors

各个谱段	本文混合像元解码	用第 $j - 1$ 列解码矩阵复原光谱		用第 $j + 1$ 列解码矩阵复原光谱	
		解码后相对光谱强度值	与本文方法相对误差%	解码后相对光谱强度值	与本文方法相对误差%
x_1	41.3	41.50	0.5	41.00	0.7
x_2	38.56	41.00	6.3	35.00	9.2
x_3	32.56	20.76	36.2	29.00	10.9
x_4	26.76	29.00	8.4	23.50	12.2
x_5	24.92	23.50	5.7	27.00	8.3
x_6	28.83	27.00	6.3	31.50	9.3
x_7	35.57	31.50	11.4	41.50	16.7

从表 1 可以算出平均误差提高约 10%, 因此混合像元点不解混合对该点的真实光谱表达非常不利。

5 结论

阐述了哈达玛变换原理, 给出了课题组研制的基于数字显微镜阵列哈达玛变换多谱段光谱模型, 详细论述了混合像元的形成以及一种便捷的解混合的方法, 通过比较发现该解混合方法可以有效的提高混合像元处光谱复原的精度。

References

- [1] Shao Xiujuan, Hu Binliang, Yan Peng. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 963.
- [2] Banerjee K S. *Weighing Designs for Chemistry, Medicine, Economics, Operations Research, Statistics*, New York: Marcel Dekke, 1975.
- [3] Vujkovic Cvijin P, Goldstein N, Fox M J, et al. *Proc. SPIE*, 2006, 6206: 62060X.
- [4] Love S P. *SPIE*, 2009, 7210: 721007.
- [5] Treado P J, Morris M D. *Appl. Spectrosc.*, 1990, 44(1): 1.
- [6] Texas Instruments "DLP Discovery XGA2* 2LVDS DMD Type* Customer Datasheet", 2005.
- [7] Goldstein N, Vujkovic Cvijin P, Fox M J, et al. *Proc. SPIE*, 2009, 7210: 721008.
- [8] Martin Harwit, Neil J. A. Sloane. *Hadamard Transform Optics*. New York: Academic Press, 1979.

Hadamard Transform Spectrometer Mixed Pixels' Unmixing Method

YAN Peng, HU Bing-liang, LIU Xue-bin, SUN Wei, LI Li-bo, FENG Yu-tao, LIU Yong-zheng

Laboratory of Spectral Imaging Technique, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China

Abstract Hadamard transform imaging spectrometer is a multi-channel digital transform spectrometer detection technology, this paper based on digital micromirror array device (DMD) of the Hadamard transform spectrometer working principle and instrument structure, obtained by the imaging sensor mixed pixel were analyzed, theory derived the solution of pixel aliasing hybrid method, simulation results show that the method is simple and effective to improve the accuracy of mixed pixel spectrum more than 10% recovery.

Keywords Hadamad transform; Mixed pixel; Imaging spectrometer; DMD

(Received Jan. 26, 2011; accepted Apr. 20, 2011)