

采用步进系数校正基于 DMD 的 Hadamard 变换光谱数据

徐 君¹, 徐富红², 谢承旺³, 黄志东⁴, 刘遵雄¹, 黄德昌¹

- (1. 华东交通大学 信息工程学院, 江西 南昌 330013;
2. 华东交通大学 计划财务处, 江西 南昌 330013; 3. 华东交通大学 软件学院, 江西 南昌 330013;
4. 辽宁科技学院 机械工程学院, 辽宁 本溪 117004)

摘 要: 数字微镜器件(DMD)代替移动式机械模板作为空间光调制器是 Hadamard 变换光谱技术的最新发展方向。在实际的工程设计中, 投射到 DMD 上的色散光谱无法被所构造的 Hadamard 编码模板完美地按照 S 矩阵进行编码, 这一现象将会给光谱反演带来误差。文中提出了一种采用步进系数校正光谱图像的方法, 根据像素点在图像上空间位置的不同, 在其相应的 S 编码矩阵中引入一个步进系数进行校正, 实验结果表明通过该方法反演得到的光谱图像逼近目标的真实光谱。

关键词: 成像光谱仪; Hadamard 变换; DMD; S 矩阵

中图分类号: O435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3470-05

Correction of DMD-based Hadamard transform spectral data with stepping factors

Xu Jun¹, Xu Fuhong², Xie Chengwang³, Huang Zhidong⁴, Liu Zunxiong¹, Huang Dechang¹

- (1. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. Division of Planning and Finance, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
3. School of Software, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
4. Department of Mechanical Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, China)

Abstract: Digital micro mirror device(DMD) replacing the mobile mechanical template as the spatial light modulator is the new developmental direction of Hadamard transform spectroscopy. In the actual engineering design, the dispersed spectrum on Hadamard encoding mask cannot be encoded according to the S matrix perfectly, this phenomenon will bring errors to the spectral recovery. A method to correct the recovered spectral images with a series of stepping factors was proposed according to the different spatial positions of the pixels on the image. Different stepping factors were added to their corresponding encoding equations based on S-matrix. The experimental results show that the spectral images after correction are improved obviously.

Key words: spectral imager; Hadamard transform; DMD; S-matrix

收稿日期: 2013-04-21; 修订日期: 2013-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(61165004, 71361009); 江西省自然科学基金(20122BAB211040);
辽宁省教育厅科技项目(L2012452)

作者简介: 徐君(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光谱成像、高光谱遥感方面的研究。Email: xjsdcq@163.com

0 引言

Hadamard 变换光谱学是近三十年来发展起来的一种新型的光谱调制技术^[1]。与常规的色散光谱仪相比, Hadamard 变换成像光谱仪具有其独特的优势^[2], 因此特别适合用来检测和分析微弱光谱及图像。Hadamard 变换成像光谱技术以 Hadamard 编码模板代替常规色散型光谱仪的入射狭缝, 基于 Hadamard 矩阵对色散光谱进行编码调制, 在获得编码图像后进行 Hadamard 反变换即可获得目标景物的两维空间信息和一维光谱信息。Hadamard 变换成像光谱技术实质上是对光谱信息的优化编码与解码的问题, 然而空间光调制器的发展水平一直制约着 Hadamard 变换成像光谱仪发展。近几年来, 随着微光机电系统(MOMES)的发展, 国内外众多学者开始研究和论证利用数字微镜器件(DMD)设计 Hadamard 编码模板^[3-8], 这使得哈达玛变换成像光谱技术再度成为国际光谱学研究领域的前沿技术之一。

虽然采用 DMD 对光谱信息进行解码和编码在原理上新颖可行, 但是在实际的工程实践中, 却发现 DMD 编码模板并非严格地基于 S 矩阵对色散光谱进行编码, 基于 n 阶 S 矩阵行向量设计的编码模板会将色散光谱调制为 $n+1$ 段, 因此反演所得的光谱图像往往误差较大。参考文献[9]提出的针对反演后光谱图像的校正方法, 其需要假定图像上的每个光谱元在其波长范围内能量的分布是均匀的, 这在图像上一般很难找到满足这个条件的区域, 因而导致校正系数随在图像上选择的训练区域的不同而不同, 实际的效果并不理想, 而且整个计算过程也很复杂。文中根据图像上各像元的色散光谱在编码模板上均匀排布的空间关系, 采用步进递增的系数代入编码方程中的 S 矩阵, 从而对反演后的光谱数据进行校正, 最终使得校正后的光谱数据逼近目标景物的真实光谱。

1 基于 DMD 的 Hadamard 变换光谱仪

DMD是由大量的极小的反射微镜在有效面积不到 2 cm^2 的 CMOS 基片上集成而成的微光机电系统(MOMES)。原理样机中的 DMD 采用美国 TI 公司的 DLP (®) Discovery™.55XGA, 其微镜的偏转由程

序控制可向两侧产生 12° 和 -12° 的偏转, 从而改变光的反射方向, 达到灵活构造编码模板并对光路进行精细调制的目的。

图 1 是研制中的基于 DMD 的 Hadamard 变换成像光谱仪原理样机的系统组成原理图。前置光学系统将目标景物成像在一次像面上, 经准直镜 1 后整理为平行光投射到分光光栅(反射光栅 1)上, 分光光栅将一次像面上的图像分光, 不同谱段的图像经会聚镜 1 成像在 DMD 上, 通过 DMD 控制电路来控制 DMD 上的微镜进行“0”和“1”的状态切换, 构造所需的 Hadamard 编码模板对色散光谱进行编码调制, 编码后的光谱经准直镜 2 投射到合光光栅(反射光栅 2)上进行合光, 然后经会聚镜 2 成像在焦平面的探测器上。在探测器上采集到编码图像后经后续的数据处理电路系统进行 Hadamard 反变换后就可以获得目标景物的光谱图像^[8]。

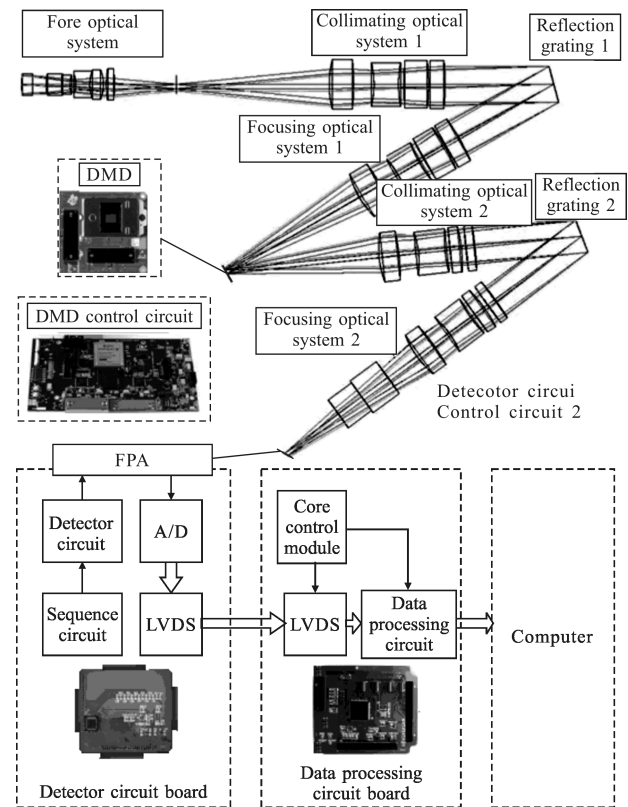


图 1 光谱仪的系统组成示意图

Fig.1 System schematic of Hadamard transform spectral imager based on DMD

2 实际的编码过程

假设光谱仪的光谱响应范围在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间,

这个波谱范围投射在 DMD 上的色散光谱长度为 l , 通过 DMD 控制电路控制 DMD 基于 7 阶左移循环 S 矩阵设计哈达玛编码模板, 根据基于 S 矩阵的 Hadamard 变换编码方程, 色散光谱长度 l 应该被编码模板在空间上等分编码为 7 段, 才有可能完成哈达玛编码。

如图 2 所示, 色散光谱 a 表示刚好被 7 阶的 Hadamard 编码模板编码为 7 段, 即被 S 矩阵中的行向量“1101001”编码, 因此采用 Hadamard 反变换就可以准确反演得到它的 7 个光谱元。色散光谱 a 只是少数的特例, 实际上大多数像素点的色散光谱在 DMD 上都无法被编码为 7 个光谱元。如图 2 中所示的色散光谱 b , 由于它在图像上与色散光谱 a 位置不同, 因而被不均匀地编码为 8 个光谱元, 除第一个和第八个光谱元宽度较小外, 其他 6 个光谱元宽度相同。7 阶 S 矩阵对色散光谱 b 的编码为 8 段的过程显然不符合 Hadamard 变换, 如果仍然采用 S^{-1} 矩阵对编码后的图像进行哈达玛反变换来进行光谱反演, 无疑将会带来较大的误差。下面结合基于 7 阶 S 矩阵的编码方程对这两种情况分别进行讨论。

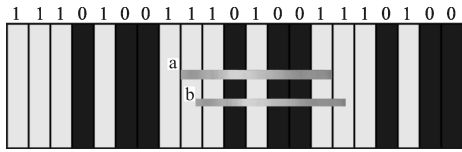


图 2 色散光谱在编码模板上的调制状况

Fig.2 Encoding status of dispersed spectrum on DMD

对于色散光谱 a , 被 7 阶 S 矩阵的行向量“1101001”编码, 其编码方程为:

$$y_1 = 1 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + 1 \cdot x_4 + 0 \cdot x_5 + 0 \cdot x_6 + 1 \cdot x_7 = x_1 + x_2 + x_4 + x_7 \quad (1)$$

基于 7 阶左移循环 S 矩阵的 7 个行向量连续编码 7 次, 可以得到下列方程:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} \quad (2)$$

而色散光谱 b 被“11010011”编码为 8 段, 如图 3 所示, 编码模板将色散光谱分割为 8 个实际的光谱元, 虚线分割的光谱元表示理想情况下应该被编码

的 7 个光谱元。

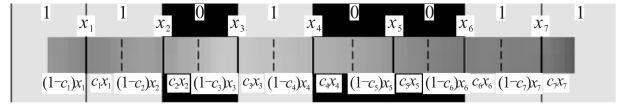


图 3 理想光谱元与实际被编码的光谱元之间的关系

Fig.3 Corresponding relation between real spectral elements and ideal spectral elements

此时编码调制过程可以用下式表示:

$$y_1' = (1-c_1)x_1 + [c_1x_1 + (1-c_2)x_2] + [0 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3] + [c_3 \cdot x_3 + (1-c_4) \cdot x_4] + [0 \cdot x_4 + 0 \cdot x_5] + [0 \cdot x_5 + 0 \cdot x_6] + [c_6 \cdot x_6 + (1-c_7) \cdot x_7] + c_7x_7 = x_1 + (1-c_2)x_2 + c_3 \cdot x_3 + (1-c_4)x_4 + 0 \cdot x_5 + c_6 \cdot x_6 + x_7 \quad (3)$$

用 7 阶左移循环 S 矩阵编码后可得:

$$\begin{bmatrix} y_1' \\ y_2' \\ y_3' \\ y_4' \\ y_5' \\ y_6' \\ y_7' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1-c_2 & c_3 & 1-c_4 & 0 & c_6 & 1 \\ 1-c_1 & c_2 & 1-c_3 & 0 & c_5 & 1 & 1 \\ c_1 & 1-c_2 & 0 & c_4 & 1 & 1 & 1-c_7 \\ 1-c_1 & 0 & c_3 & 1 & 1 & 1-c_6 & c_7 \\ 0 & c_2 & 1 & 1 & 1-c_5 & c_6 & 1-c_7 \\ c_1 & 1 & 1 & 1-c_4 & c_5 & 1-c_6 & 0 \\ 1 & 1 & 1-c_3 & c_4 & 1-c_5 & 0 & c_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: 系数 $c_i (i=0, 1, \dots, 7)$ 表示理想光谱元被 Hadamard 编码模板编码时的分割比, 色散光谱 a 刚好被编码为 7 个光谱元, 这只不过是系数 $c_i=0$ 的特例而已。

3 步进系数的校正方法

图 4 是使用原理样机光谱仪拍摄所得一堆水果的全色图像及通过 Hadamard 反变换反演所得的 7 幅

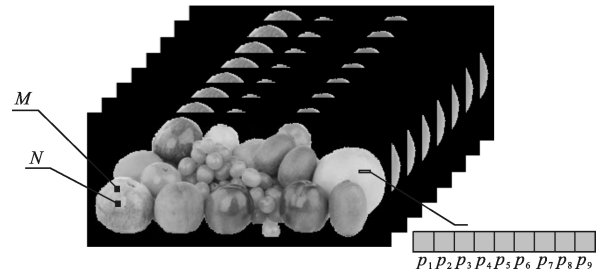


图 4 水果的编码图像及全色图

Fig.4 Panchromatic image and seven encoded images of a pile of fruit

光谱图像。由于我们的光谱仪的光谱响应范围是 660~800 nm, 因此 7 个光谱元的波谱范围分别为: 660~680 nm, 680~700 nm, 700~720 nm, 720~740 nm,

740~760 nm, 760~780 nm, 780~800 nm。用辐射度计提取橙子的光谱曲线后,在上述的 7 个波谱范围内分别求其辐射能量的积分,得到 7 个离散的值,用折线把它们连接起来作为参考标准,以便与反演所得的光谱图像上相应像素点的光谱特性曲线进行对比,如图 5 所示。

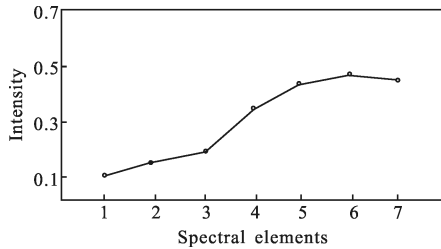


图 5 辐射度计提取的光谱曲线

Fig.5 Curve of spectral reflectance extracted by radiometer

如图 4 所示,由于 $p_1\sim p_9$ 这 9 个像素点在同一水果体上面,因此应有相同的光谱特性。抽取 $p_1\sim p_9$ 这 9 个像素点的 7 阶光谱曲线,经过与图 5 中用辐射度计提取的光谱曲线相对比,发现在 p_1 和 p_9 的光谱曲线与图 5 中的光谱曲线很接近,而像素点 $p_2\sim p_8$ 的光谱曲线与图 5 中的光谱曲线相比差异较大,这说明 p_1 和 p_9 两点可以认为被 7 阶 S 矩阵编码为 7 段,编码过程符合哈达玛变换,而 $p_2\sim p_8$ 则被编码为 8 段,因而反演后所得的光谱曲线与参考光谱曲线有很大差别。

由图 6 可知,Hadamard 编码模板对 $p_1\sim p_9$ 这 9 个像素点色散光谱的分割比例各不相同,因此对应于每个像素点的系数 c_i 也就各不相同,由于编码模板对图像上所有像素点色散光谱的编码过程在空间上

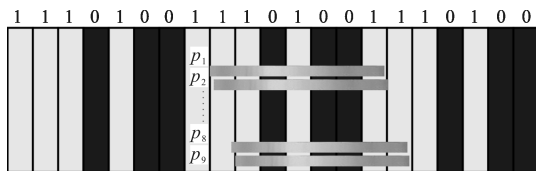


图 6 DMD 上沿横向均匀排布的色散光谱

Fig.6 Even-distributed dispersed spectrum in the horizontal direction on DMD

是循环变化的,在一个循环区间内有 9 个像素点 $p_1\sim p_9$,它们将区间编码分为 8 段,而这 9 个像素点的色散光谱在 DMD 编码模板上沿横向等距离均匀排布,因此这里设定比例系数 c_i 是按步长=0.125 步进变化的,即从 p_1 到 p_9 比例系数分别为 $c_1=0, c_2=0.125, c_3=$

$0.250, c_4=0.375, c_5=0.500, c_6=0.625, c_7=0.750, c_8=0.875, c_9=0$ 。

因此对于 $p_1\sim p_9$,将 $c_1\sim c_9$ 和在编码图像上采集到的 $[y_1' y_2' y_3' y_4' y_5' y_6' y_7']^T$ 代入公式(4),就可以反演得到各像素点的光谱矢量 $[x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7]^T$ 。

经过对比,采用公式(4)反演所得的 $p_2\sim p_8$ 的光谱曲线与 p_1 和 p_9 高度吻合,光谱矢量之间的光谱角均小于 0.3° 。

由于图像上所有像素点色散光谱的编码过程在空间上是循环变化的,因此可以用 $c_1=0, c_2=0.125, c_3=0.250, c_4=0.375, c_5=0.500, c_6=0.625, c_7=0.750, c_8=0.875$ 代入公式(4)对图像上所有的像素点进行光谱反演。

在这幅图像的其他水果体上取两个测试点 M 和 N ,对应它们的校正比例系数分别为 $c_M=0.250$ 和 $c_N=0.625$ 。图 7(a)是直接根据公式(2)对这两个像素点进行 Hadamard 反变换后得到的光谱曲线,这两个像素点属于同一物质,应具有相同的光谱特征,但是反演后的光谱曲线却差异明显,这说明光谱反演并不准确。

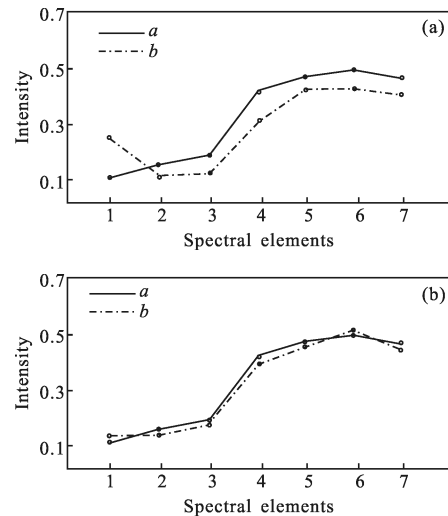


图 7 校正前后两像素点的光谱曲线对比图

Fig.7 Comparison of spectrograms before and after correction

图 7(b)是这两个像素点根据公式(4)进行光谱反演后所得的光谱曲线,可以看出此时这两个像素点的光谱曲线趋于吻合,这说明了文中所提出的方法是合理和有效的。

4 结 论

基于 DMD 的哈达玛编码模板并不能保证所有

像素点的色散光谱都能按照 S 矩阵进行编码。参考文献[9]提出的校正方法需要假定图像上校正系数的训练区域内每个像元的光谱元在其波长范围内能量分布是均匀的,然而在图像上很难找到满足这个条件的训练区域,因此得到的校正系数会因选择的训练区域的不同而有所变化,这显然会给修正结果带来一定误差。文中根据各像元的色散光谱在 DMD 编码模板上横向均匀排布且编码过程在空间上循环变化的规律,提出对图像上空间位置不同的像元采用递增的步进系数对光谱图像进行校正。实验结果表明,在校正后光谱图像上提取的光谱曲线逼近目标的真实光谱。

参考文献:

- [1] Harwit M, Sloane N J A. Hadamard Transform Optics[M]. New York: Academic New York, 1979.
- [2] Treado P J, Morris M D. Multichannel Hadamard transform Raman microscopy[J]. *Appl Spectrosc*, 1990, 44(1): 1-4.
- [3] Xu Jun, Hu Bingliang, Feng Dazheng, et al. Decoding method for the spectral mixing pixels in Hadamard transform spectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1527-1531. (in Chinese)
徐君, 胡炳樑, 冯大政, 等. 哈达玛变换成像光谱仪中光谱混合像素点的解码方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1527-1531.
- [4] Hanf M, Hahn R, Dötzel W, et al. A dynamically driven micro mirror array as the encoding mask in a Hadamard transform spectrometer (HTS)[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 123: 476-482.
- [5] Guo Y J, Wen Z Y, Zhang Z H, et al. Research of the Hadamard multiplex advantages using a programmable micro-mirror in a near-infrared spectrometer [J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 483: 417-421.
- [6] Sun X, Hu B, Li L, et al. An engineering prototype of Hadamard transform spectral imager based on digital micro-mirror device [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1): 210-217.
- [7] Xiang D, Arnold M A. Solid-state digital micro-mirror array spectrometer for Hadamard transform measurements of glucose and lactate in aqueous solutions [J]. *Applied Spectroscopy*, 2011, 65(10): 1170-1180.
- [8] Wang W, Wen Z Y, Zhang Z H, et al. Realization of hadamard transform encoding mask using programmable digital micro-mirror device [J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 483: 497-502.
- [9] Xu Jun, Xie Chengwang, Liu Haiwen, et al. The improved design of encoding mask and the correcting method for recovered spectral images in hadamard transform spectral imager based on DMD [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(5): 1419-1423. (in Chinese)
徐君, 谢承旺, 刘海文, 等. 基于 DMD 的 Hadamard 编码模板改进设计与光谱数据修正方法研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(5): 1419-1423.