数字微镜 Hadamard 变换光谱仪光谱反演矩阵标定及实验

徐 君[1],谢正茂[2]

(1. 西安航空学院 电子工程学院,陕西 西安 710077;
2. 中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119)

摘 要:国内外对 DMD 空间光调制的 Hadamard 变换成像光谱仪做了大量的理论研究和实验验证,但这项技术的研究还不够成熟,很多问题需要进一步的研究。在这种光谱仪中每个像素点色散光谱的编码矩阵互不相同。通过比较激光编码图像灰度值的变化并结合 S 矩阵元素的变化规律,提出了一种光谱反演矩阵的标定方法。以七阶左移循环 S 矩阵为例设计编码模板,通过两组成像实验对光谱反演结果进行了验证。在第一组实验中,将一束激光波长为 632.8 nm 激光导入光谱仪中,光谱仪的光谱响应范围为 550~680 nm,632.8 nm 在第五个波段范围 626~644 nm 之内理论上只有波段范围为 626~644 nm 的第五幅光谱图像是明亮的,其余的图像没有能量分布,实际的实验结果与理论上的分析相吻合。在第二组实验中,让光谱仪对一个彩色蝴蝶模型进行成像,在反演后得到的光谱图像上提取两个测试点的光谱曲线,与用辐射度计提取的光谱特性曲线进行对比分析,实验结果表明反演所得的光谱曲线与辐射度提取的光谱特性曲线基本一致。两组光谱反演的实验结果验证了所提出的光谱反演矩阵标定方法的有效性。

关键词:Hadamard 变换; 数字微镜器件; 光谱仪; 光谱反演
中图分类号:O435 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0717005

Spectral recovery matrices identification and experiment of Hadamard transform spectrometer based on DMD

Xu Jun[1], Xie Zhengmao[2]

(1. School of Electronic Engineering, Xi′an Aeronautical University, Xi′an 710077, China;
2. Xi′an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi′an 710119, China)

Abstract: A great deal of theoretical research and experimental verification has been done on the DMD spatial light modulated Hadamard transform spectrometer, but the research on this technology was still immature, many problems need to be further studied. The spatial distribution of the dispersion spectrum on the DMD was different because of the different spatial positions of the pixels on the image which resulted in the different encoding matrices of the dispersion spectrum of each pixel. An identification method of spectral recovery matrix was proposed by comparing the gray values of laser-coded images and combining with the changing rules of S-matrix elements. Taking the 7-order left-shift cyclic S-

收稿日期:2019-02-05; **修订日期**:2019-03-10
基金项目:国家自然科学基金(61763010);陕西省重点研发计划项目(2019GY-112);教育部人文社会科学研究青年基金(14YJCZH172);西安航空学院校立科研项目(2018KY0209,2018GJ1005)
作者简介:徐君(1979-),男,副教授,博士,主要从事光谱成像、遥感图像处理方面的研究。Email:3225393639@qq.com

matrix as an example, the results of spectral recovery were verified by two imaging experiments. In the first experiment, a laser beam of 632.8 nm was directed into the spectrometer, the spectral response range of the spectrometer was 550-680 nm, and 632.8 nm within the fifth band range from 626 nm to 644 nm. Theoretically, only the fifth spectral images with a bond range of 626-644 nm was bright, and the rest of the images have no energy distribution. The actual experimental results are in agreement with the theoretical analysis. In the second experiment, the spectrometer was used to image a color butterfly model. The spectral curves of two test points were extracted from the recovered spectral images, and compared with the spectral characteristic curves obtained by radiometer. The experimental results show that the spectral curves obtained from the recovered spectral images are basically the same as the spectral characteristics curves extracted by radiometer. Two groups of spectral recovery experimental results verify the effectiveness of the proposed identification method for spectral recovery matrix.

Key words: Hadamard transform; DMD; spectrometer; spectral recovery

0 引 言

Hadamard 变换光谱成像技术是在传统的色散型光谱成像技术基础上发展而来的[1],它以Hadamard 编码模板代替常规色散型光谱仪中的入射狭缝，具有光能量利用率高、多通道同时成像、信噪比较高等优点。然而长期以来,空间编码模板的光调制性能不够理想,这成为制约 Hadamard 变换成像光谱技术发展和实用化的主要瓶颈。新型空间光调制器件数字微镜器件(DMD)的出现为 Hadamard 变换成像光谱技术的进一步发展提供了新的研究方向[2-5],DMD 具有转换反应速度快，结构小巧紧凑，无机械运动部件、光反射性能优良等诸多优点。以 DMD 作为编码模板的 Hadamard 变换成像光谱技术目前已经被国内外学者进行了大量的理论论证和实验分析[6-8]。然而光谱仪中焦平面图像传感器上直接采集到的图像是对色散光谱的编码图像，必须要对编码图像进行准确有效的反演才能得到目标景物的光谱图像。文中讨论了编码图像上每个像素点的光谱反演矩阵的标定方法，最后通过实验对光谱反演的效果进行了评价和分析。

1 基于 DMD 的哈达玛变换成像光谱仪

图 1 是基于DMD 设计的 Hadamard 变换成像光谱仪的结构原理图。前置镜组件将目标景物在一次像面上成像，经分光准直镜后形成平行光投射到分光光栅上，分光光栅分光后经会聚镜投射到 DMD 上,DMD 对色散光谱进行 Hadamard 编码调制,然后经会聚镜投射到合光光栅上，合光后再经合光准直镜成像到后置的图像传感器上。图像传感器采集编

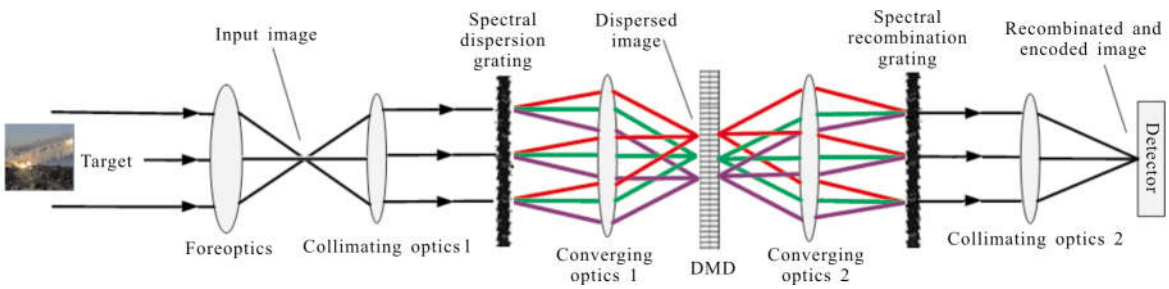

图 1 DMD 光调制 Hadamard 变换成像光谱仪系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of the DMD light-modulated Hadamard tansform imaging spectrometer

码图像，然后经光谱反演就可以得到目标景物的光谱图像[9]。

2 Hadamard 变换光谱反演的理论基础

如图 2 所示，以一个像素点为例，如果用 $Y=[y_1\ y_2\ y_3\ y_4\ y_5\ y_6\ y_7]$ 表示该像素点在编码图像上的灰度矢量，$X=[x_1\ x_2\ x_3\ x_4\ x_5\ x_6\ x_7]$表示该像素点的光谱矢量，基于左移循环 S 矩阵来设计编码模板，假设左移循环 S 矩阵是七阶的，那么其编码成像过程可用 $Y=S\cdot X$ 表示，写成矩阵形式可表示为：

$$[y_1\ y_2\ y_3\ y_4\ y_5\ y_6\ y_7]^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}1&1&1&0&1&0&0\\1&1&0&1&0&0&1\\1&0&1&0&0&1&1\\0&1&0&0&1&1&1\\1&0&0&1&1&1&0\\0&0&1&1&1&0&1\\0&1&1&1&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\\x_4\\x_5\\x_6\\x_7\end{bmatrix}\tag{1}$$

光谱反演的过程就是在焦平面探测器上已测得 $Y=[y_1\ y_2\ y_3\ y_4\ y_5\ y_6\ y_7]$的情况下，通过公式(1)计算得到 $X=[x_1\ x_2\ x_3\ x_4\ x_5\ x_6\ x_7]$。

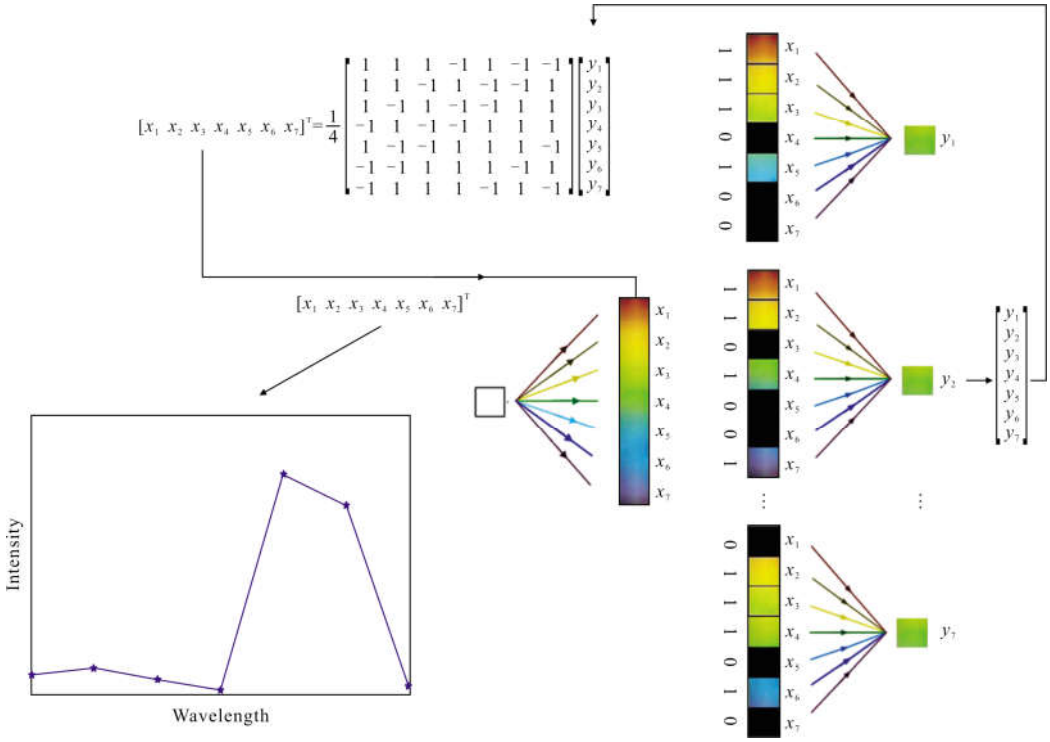

图 2 光谱反演原理图

Fig.2 Spectral recovery principle

3 光谱反演矩阵的标定方案设计与实现

由于每个像素点的色散光谱在 DMD 编码模板上的空间位置不同，编码图像上的每个像素点所采用的编码矩阵是不同的。准确标定每个像素点的光谱反演矩阵是光谱反演的前提。这里选用七阶的左移循环 S 矩阵设计和生成 DMD 编码模板。首先选择一束波长在光谱仪响应波段范围内的激光作为光源，将激光导入成像光谱成像中，并充满整个视场。理想情况下，将会在探测器上得到一幅如图 3 所示的编码图像。

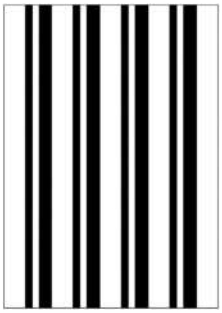

图 3 理想的激光入射时的编码图像

Fig.3 Ideal encoded image for laser incidence

假设入射激光的波长在七个光谱通道中的第一个光谱通道的波长范围内，光强设为 x。对于编码图像上的某一个像素点，七次编码成像过程可以用公式(2)来描述：

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \\ 0 \\ x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

观察上面的式子，对于等式右边的列向量 ，如果将其中的元素将$[x\ x\ x\ 0\ x\ 0\ 0]^{T}$置换为“1”，0 继续保持为“0”，那么得到新的列向量$[1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0]^{T}$，这与等式左边矩阵的第一列相同。如果将公式(2)中的 S 矩阵循环左移一位，那么形成一个新的 S 矩阵，重复上面的操作，所得到的 0~1 值列向量将与 S 矩阵的第二列相同。因此可以验证并总结，如果选用激光的波长在光谱仪的第 m 个光谱通道的波长范围内，经过左移循环 S 矩阵编码后，将编码方程右边的列向量中的 x 被置换为“1”后得到的列向量总是与 S 矩阵的第 m 个列向量相同。

图 4 是实际的实验装置图，实验中采用的激光波长为 632.8 nm，光谱仪的光谱响应范围为550~680 nm，因此七个光谱通道的波长范围分别为：550~568 nm，569~587 nm，588~606 nm，607~625 nm，626~644 nm，644~662 nm，662~680 nm。 激光的波长 632.8 nm 在 626~644 nm 范围内，属于第五个光谱通道，故 m=5。图 5 是将激光导入光谱仪中后，DMD 基于左移循环 S 矩阵编码七次在探测器上采集到的七幅编码图像。

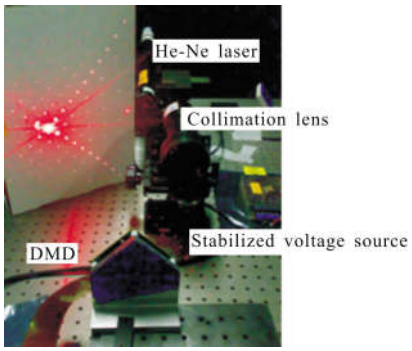

图 4 实验装置图

Fig.4 Experimental device diagram

图 5 激光编码图像及光谱反演矩阵标定示意图

Fig.5 Laser encoded images and the spectral recovery matrices identification diagram

图像中明亮条纹代表有激光照射，暗条纹表示没有激光照射。如图 5 所示，对于被标记的像素点P，在七幅编码图像上依次提取七个灰度值，组成一个列向量$[160\ 2\ 4\ 159\ 158\ 162\ 3]^{T}$，其中较大的灰度值表示有激光照射，接近零的灰度值表示没有激光照射到，仅仅是受到少许噪声的影响而已。将灰度值较大的元素用“1”置换，将灰度值接近零的元素用“0”置换后，得到一个新的列向量$[1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0]^{T}$。根据以上分析，此向量应该为该像素点编码时所采用的七阶左移循环 S 矩阵的第五个列向量。因此，根据七阶左移循环 矩阵中的元素排列规律，就可以确定 DMD 光谱编码时采用的 S 矩阵是七个循环矩阵的中的哪一个。在此例中，S 矩阵确定为：

$$S=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

图像上所有像素点的编码矩阵 S 都可以依此方法标定出来。当对目标景物进行成像时，对每个像素点，用所标定的 S 矩阵的逆矩阵 S^{-1} 矩阵对图像传感器上获得的编码图像进行 Hadamard 反变换就可以得到被探测对象的光谱图像。

4 成像实验

图 6 是光谱仪的结构剖面图。将波长为632.8 nm 激光导入光谱仪中，将编码图像和反演后的光谱图像示于图 7 中，由于光谱仪的光谱响应范围为 550~

680 nm，而所采用的激光的波长为 632.8 nm，在 626~644 nm 范围内，属于第五个光谱通道，所以理论上反演后的光谱图像应该只有第五幅光谱图像是明亮的。从图 7 中可以看出恰恰只有第五幅图像是明亮的，实验结果与理论上的分析是一致的。

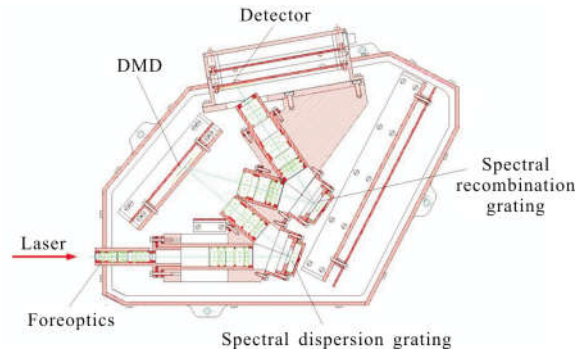

图 6 光谱仪结构剖面图

Fig.6 Layout of Hadamard transform spectrometer

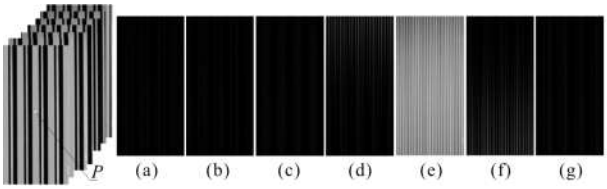

图 7 激光编码图像及反演后的光谱图像

Fig.7 Laser encoded images and spectral recovery images

在实物成像实验中，成像目标是一个彩色蝴蝶模型。用钨灯照射目标景物以增加亮度，光谱仪采集到的编码图像及反演所得光谱图像如图 8 所示。图 8(a)~(g)是经过反演后所得的七幅光谱图像。

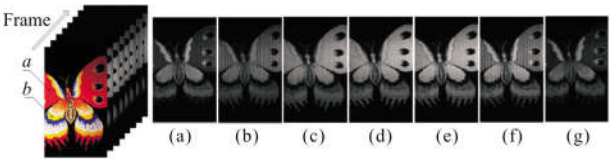

图 8 蝴蝶模型的编码图像及反演后的光谱图像

Fig.8 Encoded images and recovered spectral images of a butterfly model

在图像上选择两个测试点 a、b，通过上文提出的方法标定它们的光谱反演矩阵，然后经光谱反演得到它们的光谱特性曲线，分别示于图 9 中。可以看出，a 点的光谱峰值在第六个光谱通道(644~662 nm)内，这正是红色光的波长；b 点的光谱峰值在第三个光谱通道(588~606 nm)内，这恰好是黄光的波长。而在目标景物的全色图像中，a 点和 b 点的颜色恰好分别是红色和黄色。

光谱仪的七个光谱通道分别为：550~568 nm，569~587 nm，588~606 nm，607~625 nm，626~644 nm，644~662 nm，662~680 nm。为了便于与光谱仪光谱反演所得到的光谱曲线进行对比分析，先用辐射度计提取得到 a、b 两个测试点的光滑的光谱曲线，然后分别对七个光谱通道波长范围内的光谱能量进行积分求和，得到七个离散的值，用虚线段把它们连接起来作为参考标准，如图 9(a)和图 9(b)中的虚线所示。

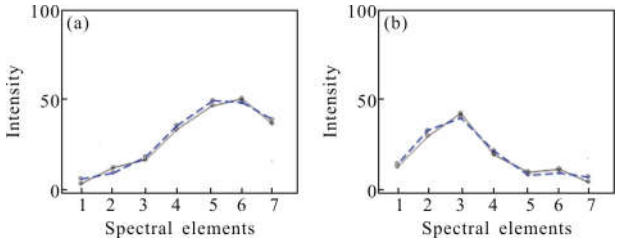

图 9 a、b 两点的光谱反演曲线及辐射度计提取曲线对比

Fig.9 Comparison between the recovered spectral curves of a, b two sample points and their curves extracted by a radiometer

图 9(a)和图 9(b)中的实线是光谱仪光谱反演所得的光谱特性曲线。分别计算图 9(a)中和图 9(b)中的参考光谱矢量与反演所得的光谱矢量之间的光谱角。β_a 表示图 9(a)中 a 点的参考光谱矢量与反演后光谱矢量之间的夹角，β_b 表示图 9(b)中 b 点的参考光谱矢量与反演后光谱矢量之间的夹角，计算后得到：β_a=0.6°，β_b=0.5°。经过比较，参考光谱矢量与光谱反演后所得光谱矢量基本吻合。图 10(a)是反演所

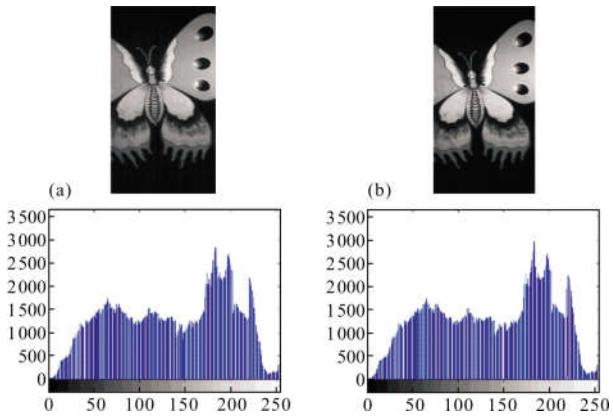

图 10 叠加图像与未编码的蝴蝶原图及其灰度直方图

Fig.10 Superimposed image and uncoded butterfly original image and their histograms

得的七幅光谱图像重新叠加在一起得到的图像及其灰度直方图，图 10(b)则是模板微镜全置为“1”时，直接采集到未编码的图像及其灰度直方图。通过比较可以发现两幅图像的纹理细节及其灰度直方图基本相同。这也说明了所提出的光谱反演矩阵的标定方法是准确有效的。

5 结 论

Hadamard 变换成像光谱仪中编码图像上每个像素点的编码矩阵是不同的。准确标定每个像素点上所采用的编码矩阵，才能对整幅图像进行准确的光谱反演。文中提出了一种简单有效的光谱反演矩阵的标定方法，通过激光图像和实物成像实验对光谱反演的效果进行了验证和分析，实验结果表明光谱反演结果与目标景物的光谱特性一致。在实验中也观察到反演所得光谱图像上有周期性的细小条纹,初步分析其原因:(1) DMD 器件的安装总会存在一定误差，位置可能会有一定的微小倾斜;(2)DMD 本身每个微镜单元之间存在 1 μm 的间隙,间隙处的光无法被反射到探测器上,造成部分能量的损失。因此分析周期性条纹的成因，并找到合适的算法修正反演后的光谱图像,使其达到工程化应用的要求,是未来需要进一步研究的方向。

参考文献:

[1] Sun X, Hu B L, Li L B, 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.

[2] Quan X, Liu H, Lu Z, et al. Correction and analysis of noise in Hadamard transform spectrometer with digital micro-mirror device and double sub-gratings [J]. ***Optics Communications***, 2016, 359: 95-101.

[3] 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.

[4] Xu Jun, Hu Bingliang, Feng Dazheng, et al. Research on the interlaced encoding pixels in Hadamard transform spectral imager based on DMD[J]. ***Spectroscopy & Spectral Analysis***, 2012, 32(1): 278-282.(in Chinese)

[5] Xu Jun, Xu Fuhong, Xie Chengwang, et al. Correction of DMD-based Hadamard transform spectral data with stepping factors [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(12): 3470-3474.(in Chinese)

[6] Wang X D, Liu H, Lu Z W, et al. Design of a spectrum-folded Hadamard transform spectrometer in near-infrared band[J]. ***Optics Communications***, 2014, 333: 80-83.

[7] Xu J L, Liu H, Lin C B, et al. SNR analysis and Hadamard mask modification of DMD Hadamard transform near-infrared spectrometer[J]. ***Optics Communications***, 2017, 383: 250-254.

[8] Chen Y, Zhang P, Wang Z, et al. Denoising algorithm for mechanical vibration signal using quantum Hadamard transformation[J]. ***Measurement***, 2015, 66: 168-175.

[9] Xu J, Zhu Z, Liu C, et al. The processing method of spectral data in Hadamard transforms spectral imager based on DMD [J]. ***Optics Communications***, 2014, 325: 122-128.

[10] Xu J, Hu B, Feng D, et al. Analysis and study of the interlaced encoding pixels in Hadamard transform spectral imager based on DMD [J]. ***Optics & Lasers in Engineering***, 2012, 50(3): 458-464.

[11] Xu J, Hu B, Feng D. The correction of recovered spectral Images in a Hadamard transform spectral imager based on a digital micro-mirror device [J]. ***Applied Spectroscopy***, 2012, 66(9): 1044-1052.

[12] Zhang Zhihai, Gao Lingxiao, Zhang Wenkai. Research and experiment for spectral energy theory of digital micro-mirror spectrometer [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43 (8): 2532-2537.(in Chinese)