

DMD 编码哈达玛变换高灵敏成像

张毅¹, 王勇¹, 岳江², 柏连发¹

- (1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;
2. 南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了增强探测器在微弱光信号条件下的成像质量, 提出了一种利用哈达玛变换(Hadamard Transform, HT)实现高灵敏探测的成像方法。基于探测器噪声独立于信号, 且每次测量噪声也相互独立的假设, 分析了在哈达玛编码成像与经典成像中, 噪声对图像信噪比的影响。推导出编码成像的信噪比提升与编码模板长度 n 有关, 约为经典成像信噪比的 $\sqrt{n}/2$ 倍。同时采用分区编码的方式, 减小了高分辨率图像的编码时间。实验结果表明, 与经典成像方式相比, 采用分区编码的哈达玛变换成像方法明显的提高了图像的信噪比, 同时可以在高分辨率图像条件下, 缩短编码时间。

关键词: 高灵敏成像; DMD; 哈达玛变换; 编码探测; 图像重建

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3819-06

High sensitivity imaging based on DMD coding Hadamard Transform

Zhang Yi¹, Wang Yong¹, Yue Jiang², Bai Lianfa¹

- (1. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to enhance the image quality of the detector under the condition of Low Level Light (LLL) signal, a method of high sensitivity imaging based on Digital Micromirror Device (DMD) coding Hadamard Transform was proposed. On the basis of the assumptions that the noise of the detector and the signal as well as the noise measured each time are both independent, the influence of the noise to the SNR was analyzed in both HT coding imaging and classical imaging. The result was deduced that the improvement of SNR was related to the length n of coding templates in coding imaging, and the value was $\sqrt{n}/2$ times of that in classic imaging. In order to reduce the encoding time of the image, the partitions coding method was applied. Results show that, compared with classical imaging modalities, the use of partitions coding Hadamard transform imaging significantly improves the signal to noise ratio of the image, while the coding time of high-resolution images is shortened.

Key words: high sensitivity imaging; DMD; Hadamard Transform; encoding detection; image reconstruction

收稿日期: 2015-04-10; 修订日期: 2015-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61231014)

作者简介: 张毅(1966-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光电探测与信号处理方面的研究。Email: zhy441@sina.com

通讯作者: 柏连发(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电探测与成像、光电信息(图像)处理、传输与显示等领域的科研与教学。

Email: mrblf@163.com

0 引言

微弱光信号成像极大地拓展了人眼的视觉范围,借助图像的转换和增强,更有效地利用可见光或不可见的电磁辐射,同时借助电视摄像、传输、存储以及图像处理等,克服了眼睛在时间、空间以及特征辨识上的局限。

哈达玛变换 (Hadamard Transform, HT) 光谱技术是模板调制光谱技术不断发展的产物。该技术方法具有高信噪比、单检测器多通道同时成像能力以及高通量等优点,特别适用于微弱光信号成像测量以及图像分析^[1]。近年来,随着编码模板的突破性发展,使得利用哈达玛变换多通道的探测成为微弱信号探测领域研究的热点^[2]。在经典光谱仪中为了获取较高的光谱分辨率,往往将入射狭缝设计得很窄,但是过窄的入射狭缝导致系统内部光通量不足,从而导致光谱信号信噪比较差。因此在经典光谱仪中光谱分辨率和信噪比往往是矛盾的。参考文献[3]中设计验证的“基于 MEMS 的高灵敏哈达玛成像光谱仪”成功地解决了光谱分辨率与信噪比的问题,入射狭缝不在制约光谱分辨率,从而实现了高分辨率、高信噪比的光谱成像。参考文献[4]中设计验证的“基于 DMD 的光谱分辨率自适应 HT 成像光谱仪”克服了哈达玛成像光谱仪光谱准确度和数据计算量之间的矛盾,使得光谱仪自身可以根据目标景物和观测要求的不同,自适应地调整光谱成像的光谱分辨率,在满足对目标分类识别要求的同时又提高了数据传输和处理的速度。在成像光谱探测领域,HT 所具有的多通道探测优势,得到了广泛而深入的研究,使得成像光谱仪能在更微弱的光信号条件下,成功获取了清晰完整的光谱信息。哈达玛理论在探测微弱光信号方面的优势同样适用于经典的二维成像,但还没有具体成熟的成像方法。因此文中探索和提出一种新的微弱光信号成像方法,以 HT 具有多通道探测的优势,利用数字微镜实现对空间像元高速编码调制,采集相应数量的编码图像,最后重建出原始图像。同时采用分区编码的方式实现高分辨率编码条件下,重建时间的最小化。利用这一成像方法有效地降低对探测器的要求,相对提高探测器灵敏度。

1 HT 成像信噪比分析

哈达玛编码理论源于统计学中的“称重设计”理论,文中提出的方法可视为称重设计理论在光电信号探测领域的推广,是一种广义的称重设计^[5]。此时,待称的“重量”是图像中各像元的光强度值,对它们的组合探测是通过编码模板来实现的。此时,探测器充当了“称重仪器”。系统的总体框图如图 1 所示。

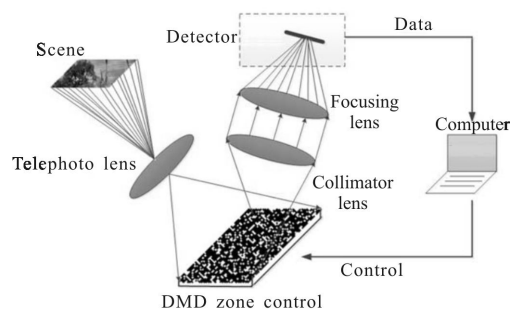


图 1 哈达玛变换成像原理图

Fig.1 Schematic of HT imaging

定义二维编码区域为 $f_0(x, y)$, x, y 为编码区域的空间坐标,则编码的像元数 $n=x \times y$ 。定义 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 为编码区域像元的真实灰度值, $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ 为探测器实际测量的灰度值,假定探测器已经校准过,且每次测量的误差为 e_i , 则 e_i 满足:(1) e_i 为独立于像元灰度值的随机变量,其数学期望值为零,即 $E\{e_i\}=0$;(2) e_i 具有方差 σ^2 ,且每次测量是相互独立的,即 $E\{e_i e_j\}=\sigma^2 \delta(i, j)$ 。常规的探测方法是探测器像元一次只测量一个像元的灰度值,测量结果定义为 η_i ,也就是真实灰度值 φ_i 的估计值,即:

$$\hat{\varphi}_i = \eta_i = \varphi_i + e_i (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

由公式(1)可知,测量误差就是所用探测器的误差。

哈达玛编码测量方式就是将 n 个像元灰度值以组合的方式测量 n 次,每次测量不同的 $(n+1)/2$ 个像元光强叠加的灰度值,则有线性方程组:

$$\begin{cases} \eta_1 = \omega_{11} \varphi_1 + \omega_{12} \varphi_2 + \dots + \omega_{1n} \varphi_n + e_1 \\ \eta_2 = \omega_{21} \varphi_1 + \omega_{22} \varphi_2 + \dots + \omega_{2n} \varphi_n + e_2 \\ \vdots \\ \eta_n = \omega_{n1} \varphi_1 + \omega_{n2} \varphi_2 + \dots + \omega_{nn} \varphi_n + e_n \end{cases} \quad (2)$$

式中:系数矩阵 $\omega_{ij}=W$ 为组合测量的方式,即组合测量矩阵。

令 $\eta=(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)^T, \Phi=(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)^T, E=(e_1, e_2, \dots, e_n)^T$, 则公式(2)可以写成矩阵方程:

$$\eta=W\Phi+E \quad (3)$$

式中:系数矩阵 W 决定了测量精度的高低,统计学领域的研究表明:由 0 和 1 组成的 S 矩阵构成实际测量的最佳组合,矩阵的 0 和 1 分别表示某次测量过程中像元灰度值是否被测量。当 W 为 S 矩阵,则均方误差 ε_i 为:

$$\varepsilon_i=\frac{4\sigma^2n}{(n+1)^2} \approx \frac{4}{n} \sigma^2(n \gg 1) \quad (4)$$

从公式(4)中可得信噪比增益为 $\sqrt{n}/2$,即组合探测信噪比为常规探测方法信噪比的 $\sqrt{n}/2$ 倍。

2 基于 DMD 的编码模板实现

编码模板一直是限制哈达玛理论应用的主要原因,文中采用高速变换的数字微镜实现编码模板,如图 2 所示。当编码元素取值为 1 时,即对应测量矩阵中的 1,微镜翻转后与水平轴成 $+12^\circ$ 角,投影在该微镜上的光束被反射进入采集光路,由探测器获取图像信号,表示该成像光束被选择;当编码元素取值为 0 时,微镜翻转后与水平轴成 -12° 角,投影在该微镜上的光束被反射掉,表示该成像光束不被选择。由此可以实现像元灰度值是否被探测^[6]。

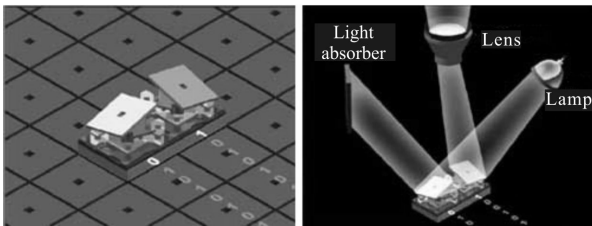


图 2 数字微镜原理图
Fig.2 Schematic of DMD

DMD 分区编码的目的是增大编码图像分辨率的同时减小图像重建时间。哈达玛变换(HT)实现对空间像元的编码调制,首先将一维哈达玛变换模板 l 折叠成二维编码区域 $f_0(x, y)$,编码区域的大小决定了采集区域的大小,DMD 像元尺寸是一定的,因此编码区域的大小制约着编码图像的分辨率。以 1 023 的编码长度为例,那么它折叠形成的二维矩阵为 32×32 ,多出来的一位像元以编码 0 代替,实际上就是不编码,那么这样的分辨率往往是不足以满足实

际使用要求的。采用更大的编码模板,编码图像的分辨率会提高,但是需要采集更多的编码图像,成像时间则变长。虽然 DMD 可实现极高速的帧率,实现编码模板的高速转换,实际使用中往往是不满足高速要求的,因为要考虑探测器的积分时间,尤其是对微弱光信号的探测,尤其要注意编码模板变换帧率问题。

为了解决上述问题,文中设计了一种分区控制方案,验证了设计的可行性,并对成像质量进行了对比。分区控制的过程如图 3 所示。首先根据使用场景分辨率要求,选择合适长度的编码长度,按照编码的长度设定合适的长宽比,将一维编码折叠成二维矩阵编码。HT 编码长度 l 一般为素数,需要添加一位编码,使其可以实现二维矩阵。添加的编码在图像重建时,利用相邻像素值求平均代替,其结果不影响整体图像质量。利用设定好的二维矩阵,首尾交替编码,就可以实现高分辨率的图像编码。

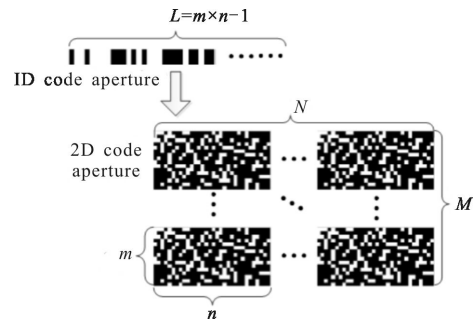


图 3 数字微镜分区编码
Fig.3 Code aperture of DMD

由图 3 可知折叠后的二维编码模板分辨率为:

$$\Phi=[M \times m, N \times n] \quad (5)$$

式中: (m, n) 为单个模板的分辨率。文中待编码图像的分辨率为 256×256 , 即有 65 536 个像元需要探测。如果采用单一的模板实现编码探测,由前文的论述可知,哈达玛编码长度应为 65 535。这样长度的编码模板将耗费相当长的编码采集时间,由哈达玛解码理论可知,在解码的过程中需要对 65 535 阶的矩阵进行逆运算,这对硬件提出了极高的要求。同时在一定的噪声强度下,假设当采用 K 长度的编码可以实现高质量的图像重建,那么使用超过 K 长度的编码是没有意义的,也是不合理的。从上述的角度出发,文中对待编码图像进行了分区处理,分区结果如表 1 所示。不同的分区数量对应不同的编码模板分辨率,

那么对应的编码模板长度也不同。

表 1 分区编码

Tab.1 Zonal coding

Partition	16	32	64	128	256	512
Template resolution	64×64	64×32	32×32	16×32	16×16	8×16
Encoding length	4 095	2 047	1 023	511	255	127

采用单一模板的成像, 编码图像由成像透镜汇聚成一点投影在探测器上, 由哈达玛理论知识可得, 一维模板长度为 l , 则信噪比可提高 $\sqrt{T}/2$ 倍。采用多模板成像时, 探测器获取的图像不能为单点, 应该是每一个单一模板对应一个点, 否则将无法重建图像。图 3 中 $\Phi=[M \times m, N \times n]$, 应该获取 $\Theta=[M, N]$ 个点, 这时候也就是编码模板的低分辨率表示, 这时候信噪比 SNR 提高依然是 $\sqrt{T}/2$ 。

3 仿真分析

DMD 分区控制成像过程如图 4 所示, 由此建立图像复原模型。利用探测器获取 l (一维编码模板的长度) 幅编码图像, 取出每幅图像中对应的像素 $y_1(i, j), y_2(i, j), y_3(i, j), \dots, y_l(i, j)$ 。令:

$$y(i, j)=[y_1(i, j), y_2(i, j), \dots, y_l(i, j)] \quad (6)$$

HT 矩阵为 Ψ_{pl} , 求逆可得:

$$x(i, j)=\Psi^{-1} \times y^T \quad (7)$$

$x(i, j)$ 为图 3 中单一模板所对应的编码区域, 以此类推可以恢复原图像。由此可见文中方法是利用增加采样时间和重构端的计算复杂度来实现高灵敏成像。

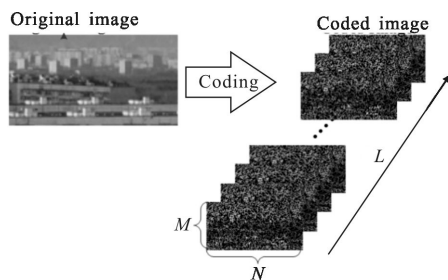


图 4 编码成像

Fig.4 Coding image

8 bit) 对文中提出的方法进行了性能测试。实验中在充分考虑实际情况下, 采用文中提出的方法设计编码模板, 可以模拟实际成像系统的硬件采样过程。

由于文中提出的方法主要是针对微弱光信号条件下的探测, 那么在这样的条件下对信号影响最大的噪声来源就是热噪声, 热噪声存在于任何导体和半导体中, 它来自于电阻的内部自由电子或电荷载流子的不规则热运动^[9]。噪声电压均方值取决于材料的温度。它们是服从于高斯正态分布的高斯过程, 其功率谱密度在整个频率范围内都是均匀分布的。类比白光是各种频率光的合成, 所以常把热噪声称为高斯噪声或者白噪声。这是弱光条件下探测器的主要噪声, 由于还有其他的一些噪声, 这里将由探测器引起的噪声统称为探测器噪声。

实验模拟了经典成像方式, 即利用二维面阵探测器直接成像, 也是最普遍的成像方式。仿真实验结果如图 5(b) 所示, 从图中可知经典的成像方式不能有效地降低高斯噪声对图像信号的影响, 在相同的噪声强度下, 图像信号基本淹没在探测器噪声里, 场景细节难以分辨。



(a) 原图像

(b) 噪声图

(a) Original image

(b) Noise image

图 5 编码图像

Fig.5 Coding image

而采用文中提出的成像方法, 在相同的噪声强度条件下能有效地减少探测器噪声对图像信号的影响, 极大的增强了图像信噪比^[6-7]。利用表 1 中的分区模式对进行图像编码探测仿真实验, 结果如图 6 所示。

从图中可以看出: 编码长度越长, 图像的信噪比越高, 重建出的图像质量与原图(图 5(a))越接近。对该次实验的图像, 编码模板长度为 2 047 时, 已经基本恢复出原图效果, 因此大于 2 047 的编码将没有意

在 Matlab 环境下选用标准灰度图像(256×256,

义。采用客观评价图像质量的峰值信噪比(PSNR)评价方法,判别图像复原的质量好坏^[8]。不同编码长度重建出的图像峰值信噪比如表 2 所示。从表中可以看出:编码长度越长图像的信噪比越高,重建出的图像越接近原图像。同时可以看出 2 047 编码和 4 095 编码的 PSNR 已经非常接近,即采用 2 047 的编码就可以重建出原图,大于 2 047 的编码已经没有实际意义,从图 6 中也可以直观地看出这一点。

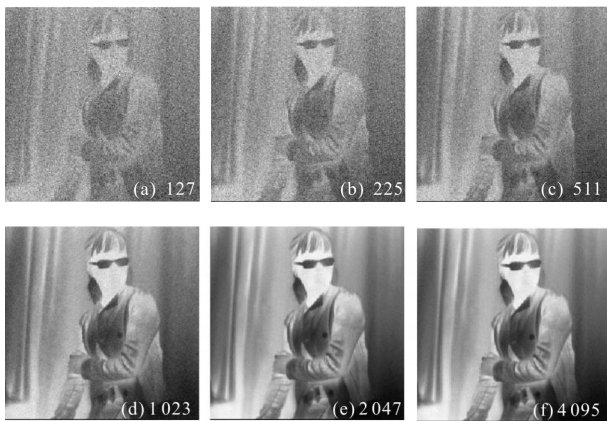


图 6 分区仿真实验图

Fig 6 Partition simulation image

表 2 不同编码长度下的 PSNR

Tab.2 PSNR under different length codings

Encoding length	127	255	511	1 023	2 047	4 095
PSNR	8.85	11.56	14.65	18.78	23.13	23.28

实验中不同编码条件下,重建出图像的时间如表 3 所示。从表中可以看出:编码长度越长,重建出图像的时间越久,分区减少一倍,时间将会增加 3 倍左右。文中编码的图像分辨率为 256×256,如果采用单一的编码模板,从表 3 中可以推知:重建时间的时间将为 32 分区编码时间 67.92 s 的 243 倍,这使得编码成像的效率极大降低。而采用分区编码的方法,将图像分为 32 块,重建的时间为 67.92 s,相对于单一模板编码,成像时间大大减少。由前文中的信噪比分析可知:32 分区也就是 2047 编码,已经可以完整地重建出原图,因此文中提出的分区方法能实现高信噪比的图像重建,同时在较高编码分辨率的条件下,实现了图像重建时间的最小化。

表 3 不同编码长度下的图像重建时间

Tab.3 Image reconstruction time under different length coding

Partition	512	256	128	64	32	16
Reconstruction time/s	0.63	1.92	5.83	19.9	67.92	234.57

图 7 给出了 3 种典型微弱光信号辐射条件下,场景的仿真结果。其中,(a)为原图像,(b)为经典成像,(c)为 127 编码,(d)为 2047 编码图组第一行为红外场景图片。目前红外探测器已经发展到第三代凝视系统,其主要探测器噪声来源是探测器热噪声以及行列噪声,其中行列噪声强度取 0.4 倍的热噪声。加入相同强度的噪声,经典的成像方式图像峰值信噪比很差,仅 12.48 dB,不能分辨图像的细节纹理。采用文中提出的探测方法,其中 127 模板的仿真结果相较于经典成像方式,图像质量有所改善,当再用 2 047 编码时,复原图像已经接近与原图,峰值信噪比达到 35.59 dB。图组的第二行选择的是微光的场景图像,由结果可知,采用 2 047 编码模板时,场景图像已经实现很好的复原。在核医学影响领域,更微弱的辐射信号,意味着更小的附加伤害。因此采用文中的方法,可以实现更微弱辐射信号条件下的成像,其中 2 047 模板条件下已经很好地复原了图像的细节,满足医学图像的苛刻使用要求。

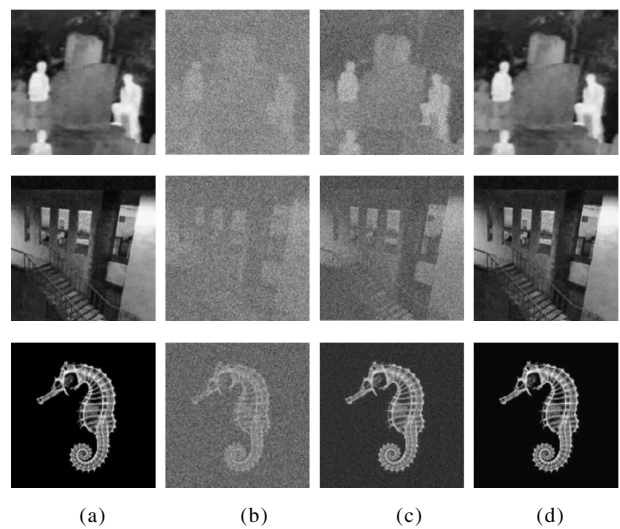


图 7 仿真结果

Fig.7 Simulation result

由表 4 可知,采用文中提出的编码探测方法能

有效地恢复场景图像,编码模板越长,图像复原的效果越好。但由 HT 原理可知,越长的编码模板,图像复原的时间就相对越长,因此在实际使用的时候,要注意编码模板的选择,以达到最合理的成像时间。

表 4 不同噪声条件下,图像的峰值信噪比

Tab.4 PSNR of image under different noise conditions

	Classical imaging	127 encoding	2 047 encoding
Scene 1	12.48	22.39	35.59
Scene 2	9.12	18.71	31.78
Scene 3	6.41	15.27	28.11

4 结 论

针对现有微弱光信号的探测方式对探测器性能要求高,成像质量不能很好地满足实际使用要求的问题,提出了一种利用哈达玛理论实现多通道测量的成像方法。以哈达玛理论为基础,采用编码矩阵的方式探测,获取相应编码数量的信号值,最后利用 HT 逆矩阵复原了场景图像。以红外场景图像为例,最高峰值信噪比相对于经典成像方式,提高了 23.11 dB,能清晰地重建出原图像。同时采用了分区编码的方式,实现了较高编码分辨率图像重建时间的最小化。由仿真实验结果可知:文中提出的方法可以实现微弱光信号高信噪比成像探测。

参考文献:

- [1] Harwit M, Sloane N J A. Hadamard Transform Optics [M]. New York: Academic Press Inc, 1979.
- [2] Zhang Wenkai, Zhang Zhihai, Gao Lingxiao. Study of using complementary S matrix to enhance SNR in Hadamard spectrometer[J]. *Optik*, 2014, 125(3): 1124-1127.
- [3] Wuttig A, Riesenber R. Sensitive Hadamard Transform imaging spectrometer with a simple MEMS [C]//SPIE, 2003, 4881: 167-178.
- [4] Xu Jun, Liu Zhiwei, Jiang Nan, et al. Hadamard Transform spectral imager of adaptive spectral resolution based on DMD [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33 (7): 2006-2009. (in Chinese)
徐君, 刘志伟, 姜楠, 等. 基于 DMD 的光谱分辨率自适应 Hadamard 变换成像光谱仪 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(7): 2006-2009.
- [5] Song Xianhua, Wang Shen, Abd El-Latif Ahmed A, et al. Dynamic watermarking scheme for quantum images based on Hadamard transform [J]. *Multimedia Systems*, 2014, 20(4): 379-388.
- [6] Yue Jiang, Han Jing, Zhang Yi, et al. Denoising analysis of Hadamard transform spectrometry [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3744-3747.
- [7] Zhang Wenkai, Zhang Zhihai, Gao Lingxiao. Study of using complementary S matrix to enhance SNR in Hadamard spectrometer[J]. *Optik*, 2014, 125(3): 1124-1127.
- [8] Yang Jiacheng, Hou Chunping, Sheng Lili, et al. Objective stereoscopic image quality evaluation method based on the PSNR [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41 (12): 1448-1452. (in Chinese)
杨嘉琛, 侯春萍, 沈丽丽, 等. 基于 PSNR 立体图像质量客观评价方法[J]. *天津大学学报*, 2008, 41(12): 1448-1452.
- [9] Chen Huaizhang, Wang Yanjie, Sun Honghai, et al. High dynamic range imaging detection based on DMD and image sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (12): 45-48.