

单元探测器的短波红外多通道成像技术

王亚南¹, 亓洪兴¹, 马彦鹏¹, 蔡能斌², 曾攀¹, 姜博¹, 舒嵘^{1*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;
2. 上海市现场物证重点实验室, 上海 200083)

摘要: 为了克服目前利用短波红外焦平面器件获取图像时难以消除器件自身的非均匀性、难以获得较高信噪比及成本昂贵的问题, 提出了利用单元探测器和 DMD(Digital Micro-mirror Device) 空间光调制器件, 基于 Hadamard 变换进行凝视光学画幅式成像的方法. 通过实验验证了该方法用于短波红外成像的可行性. 对实现低成本、高信噪比的短波红外成像具有借鉴意义.

关键词: 短波红外成像; 单元探测器; DMD 空间光调制器; 多通道探测; Hadamard 变换
中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Multi-channel imaging technology of shortwave infrared based on single element detector

WANG Ya-Nan¹, QI Hong-Xing¹, MA Yan-Peng¹, CAI Neng-Bin²,
ZENG Pan¹, JIANG Bo¹, SHU Rong^{1*}

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Criminal Scene Evidence, Shanghai 200083, China)

Abstract: Short-wavelength infrared(SWIR) focal plane array detector suffers from problems including intrinsic non-uniformity, low signal-to-noise ratio(SNR), and relatively high cost. To overcome these difficulties, a staring-mode frame imaging scheme was proposed based on Hadamard transform(HT), using single element detector and digital micro-mirror device(DMD) spatial light modulator. Experimental study has been carried out to verify the validity of this method in SWIR imaging. The results demonstrate that this scheme is a promising approach to achieving low cost, high SNR SWIR imaging.

Key words: shortwave infrared imaging, single element detector, DMD spacial light modulator, multi-channel detection, Hadamard transform

PACS: 07.07.Df

引言

短波红外(1~2.5 μm)相比于可见光,受大气散射作用不明显,相比中长波红外受水汽和 CO₂ 吸收效应小,具有很好的大气透射能力.利用短波红外相机即使在大气能见度很低的天气条件下也能获取清晰的图像,因此短波红外相机在诸如搜救、军事侦查等方面都具有重要的应用价值^[1].

目前凝视型短波红外成像大都是采用面阵探测

器,但由于存在以下限制^[2-3],短波红外成像难以实现广泛应用:1)由于生产工艺等条件的限制,短波红外面阵探测器像素分辨率普遍较低;2)即使是低分辨率的探测器造价也很昂贵,并且目前还没有成熟国产器件销售;3)面阵探测器的非均匀性问题很明显.利用空间光学调制技术在理论上可以实现利用单元探测器进行凝视光学画幅式成像,这实际上就是一种多通道成像技术.这种方法为短波红外成像提供了一条新的技术思路,在有效避免面阵探测

收稿日期:2013-04-15,修回日期:2013-05-09

基金项目:国家863计划(2011AA120102)

Foundation items: Supported by 863 Programme(2011AA120102)

作者简介(Biography):王亚南(1989-),女,河南商丘人,硕士研究生,主要从事航空遥感方面的研究. E-mail: wynsitp@sina.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: shurong@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2013-04-15, revised date: 2013-05-09

器像元不均匀性的同时可以提高探测信噪比,又能够大幅度地减少系统造价.本文通过理论和实验研究,基于数字微镜器件这种新型的空间光调制模板,利用 Hadamard 变换实现了单元探测器凝视成像,证明了这种技术思路的可行性.

1 多通道光学成像原理

1.1 多通道光学探测基本原理

多通道光学探测是相对于单通道光学探测而言的.

设有 n 个光学分量,其真实强度分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$,实际测得的强度分别为 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$.采用单通道测量的方法是一次只测量一个强度分量(用一个单元探测器一次测量每个强度分量,或用有空间分辨率的探测器的每个像元对应测量每个强度分量).显然,每次测量都会引入一个误差值,这个误差值就是探测器本身的噪声.

$$\eta_i = \varphi_i + e_i (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

$$E\{(\eta_i - \varphi_i)^2\} = E\{e_i^2\} = \sigma^2$$

多通道探测的方法是只利用一个单元探测器将 n 个强度分量以组合方式测量 n 次,每次测量相当于 n 个强度分量的一个线性组合,最终相当于得到一个线性方程组

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

令 $\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)^T$, $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)^T$, $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T$,则上式可写成矩阵方程: $\eta = W\Phi + E$.

七十年代中期,Marshall、Comisarow、Sloaneand 和 Harwit 先后将统计学中的称重设计理论引入光学领域,初步形成了 Hadamard 变换技术的编码与解码理论^[6],由于是一种多通道测量的方法,采用 Hadamard 变换的方法可以获得更高的信噪比,以 4 阶的 Hadamard 变换为例来说明采用 H 矩阵编码和采用 S 矩阵充当编码模板时可以获得不同的信噪比^[4-5].

1.1.1 H 矩阵编码

H 矩阵只含有 1 和 -1 两个元素,对于每一个光强分量都可能进行两种状态的处理:1 代表使该分量透射进入探测器,-1 代表使该分量反射进入参考探测器.

如图 1 所示,要测量这 4 个光强分量,可以按图同时以全部光分量充满编码模板进行 4 次理想组合测量.

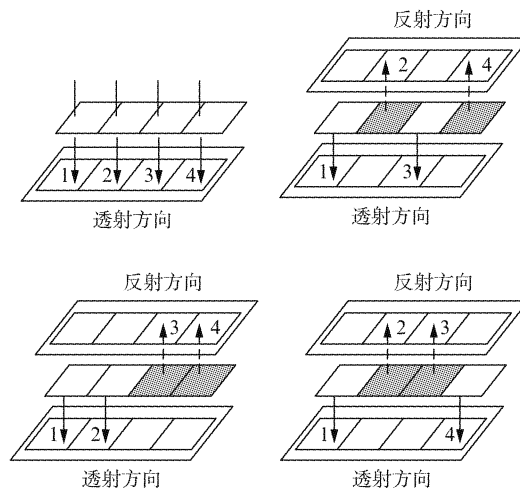


图 1 四阶 H 矩阵编码测量过程

Fig. 1 Fourth-order H-matrix encoding measurement process

四次测量的过程相当于产生四个线性方程,经理论分析可得:

$$E\{(\hat{\varphi}_i - \varphi_i)^2\} = \frac{1}{4}\sigma^2 (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

其中 $\hat{\varphi}_i$ 为 φ_i 的估值.

1.1.2 S 矩阵编码

S 矩阵只含有 1 和 0 两个元素,对于每一个光强分量都可能进行两种状态的处理:1 代表使该分量透射进入探测器,0 代表该分量被舍弃.如图 2 所示,要测量这 4 个光强分量,可以按图同时以全部光分量充满编码模板进行 4 次理想组合测量.

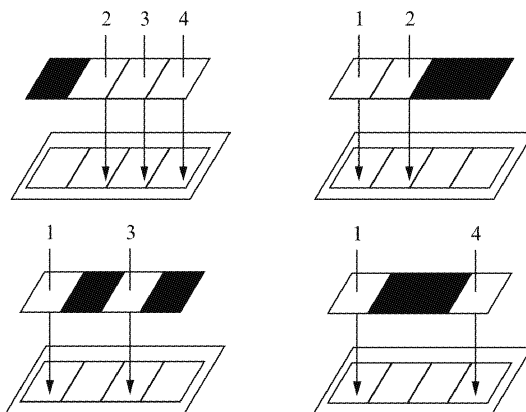


图 2 四阶 S 矩阵编码测量过程

Fig. 2 Fourth-order S-matrix coding measurement process

四次测量过程相当于产生四个线性方程,经理论分析可得:

$$\begin{cases} E\{(\hat{\varphi}_1 - \varphi_1)^2\} = \frac{4}{9}\sigma^2 \\ E\{(\hat{\varphi}_i - \varphi_i)^2\} = \frac{7}{9}\sigma^2 (i = 2, 3, 4) \end{cases}, (4)$$

其中 $\hat{\varphi}_i$ 为 φ_i 的估值.

比较式(1)、(3)、(4)明显可以看出多通道探测的方法具有更小的误差. 实际上当采用的编码矩阵不同时,多通道探测方法相对于单通道探测的方法具有以下信噪比优势^[7]:

(1) 采用由 +1 和 -1 组成的 H 矩阵作为编码矩阵时,相对于单通道测量的信噪比优势为:

$$\frac{SNR_{Multiple}}{SNR_{Single}} = \frac{2N\sqrt{N}}{N+1} \xrightarrow{N \gg 1} 2\sqrt{N}; (5)$$

(2) 采用由 0 和 1 组成的 S 矩阵时,相对于单通道测量的信噪比优势为:

$$\frac{SNR_{Multiple}}{SNR_{Single}} = \frac{N+1}{2\sqrt{N}} \xrightarrow{N \gg 1} \frac{\sqrt{N}}{2}, (6)$$

其中 N 为调制矩阵的阶数, $SNR_{Multiple}$ 为多通道探测的信噪比, SNR_{Single} 为单通道探测的信噪比,当使用的调制矩阵的阶数越大时信噪比优势也会更加明显.

1.2 多通道成像原理

当采用传统方法获取图像时,实际物体的像经过光学系统后会清晰的映射在具有空间分辨率的探测器上,再由探测器获取空间光强分布的信息,由于探测器上每个元都对应获取一个强度信息,所以传统成像方法是一种单通道测量的方法. 每个像元在在测量与其相对应的光强时都会引入一个其本身固有的误差值,并且这个误差对于整个探测器而言并不是均匀的.

当采用多通道的探测方法时,需要把具有空间分辨率的探测器置换为一个空间光调制器,每次选择某些像元的光强透过模板进入单元探测器,即在像面上进行调制,单元探测器每次都会获得一个部分像元的光强信息的叠加值,最后利用软件根据调制信息和探测器测量值解算出最终的图像信息,即图像是被“计算”出来的,而不是直接获取的. 多通道图像获取的原理如图 3 所示.

2 成像技术研究

2.1 空间调制器选择^[8]

作为整个系统的核心部件,光调制器的编码准

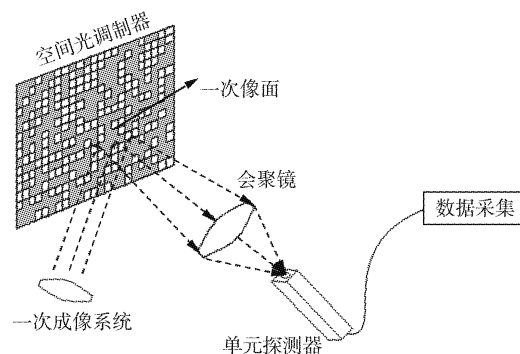


图 3 多通道成像原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a multi-channel imaging

确度会直接影响最终数据反演的结果,所以空间光调制器的选用尤为重要,本文选用 TI 公司的 DMD 器件作为系统的光调制器.

DMD(Digital Micromirror Device),即数字微镜器件,它是由成千上万个倾斜的显微的、铝合金镜片组合,当微镜处于不同的翻转状态时就会将入射光向不同方向反射:向 +12° 方向反射或者向 -12° 方向反射.

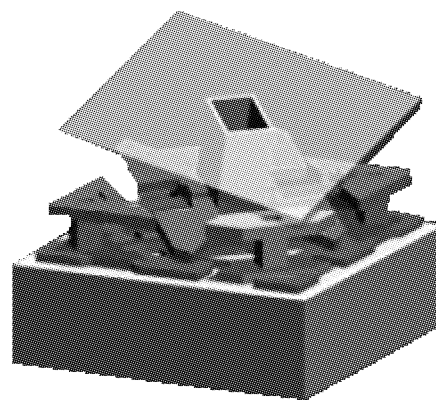


图 4 数字微镜器件微观结构图

Fig. 4 Microscopic structure of a digital micromirror

由于 DMD 器件具有以下优点,使其成为本系统核心部件—空间光调制器的最佳选择: 1) 良好的开关特性,可以准确编码; 2) 器件的窗口可以透射短波红外光; 3) 每片微镜的尺寸为 13.6 μm,与短波红外波长差距明显,用于短波红外的探测时衍射效应不显著; 4) 目前 DMD 器件的调制帧频最大可以达到 1 000 Hz,完成编码所用时间较短,可以有效减少外界光变化对系统产生的影响.

2.2 调制矩阵的获取和选择^[8]

当利用基于 Hadamard 变换的多通道探测的方

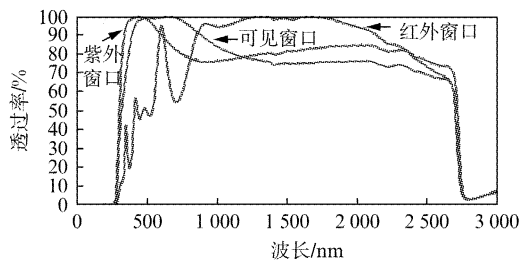


图5 数字微镜器件玻璃窗口透过率
Fig. 5 Glass window transmittance of digital micromirror device

式获取图像信息时,使用的调制矩阵是一个三维调制矩阵,即整个调制矩阵进行“折叠”得到随时间变化的一帧一帧的调制信息:如果一幅图像含有 n 个像素的信息,那么每帧调制信息一定要有 n 个元素与这 n 个像素相对应,并且在空间分布上也一一对应,这样,每帧调制信息都可以看做是一个二维的矩阵,而每帧的二维调制信息又是由原始的调制矩阵的一行经重新排列而获得的.如果需要解算 n 个像素的强度信息,实际上需要 $n \times n$ 阶调制矩阵.三维调制矩阵的获取方法如图6所示.

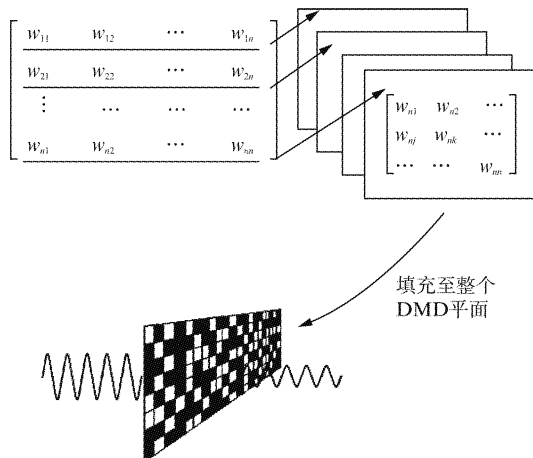


图6 三维矩阵获取方法示意图
Fig. 6 Method of three-dimensional matrix acquisition

由本文 1.1 中的讨论可知,采用 Hadamard 变换反演图像信息可以选用由元素 1 和 -1 组成的 H 矩阵作为调制矩阵,也可以选用由元素 1 和 0 组成的 S 矩阵作为调制矩阵.选择不同的调制矩阵进行编码会获得不同的信噪比,同时对装置的结构和数据采集的要求也不相同.当选用 H 矩阵时,虽然能够获得更高的信噪比,但因为两个方向的光强信息(向 $+12^\circ$ 方向反射的光和向 -12° 方向反射的光)都需要记录,就必须增加参考探测器一路,会使装置

结构和数据处理变的更加复杂.当采用 S 矩阵作为调制矩阵时,因为只需要记录一个方向的光强信息($+12^\circ$ 方向被记录, -12° 方向被舍弃),虽然没有使用 H 矩阵作为调制矩阵时的信噪比高,但考虑到采用 S 矩阵可以降低系统复杂程度,提高数据获取的准确度,本文采用 S 矩阵作为调制矩阵.

3 实验研究

3.1 实验室光学平台实验

3.1.1 实验装置

实验室成像实验是在光源亮度恒定条件下进行的,实验装置由光学部分和电子学部分两大部分组成.光学部分主要包括 DMD 空间光调制器、探测器和透镜.电子学部分主要包括 DMD 控制电路、数据采集模块和计算软件.光学部分装置的结构如图7所示.

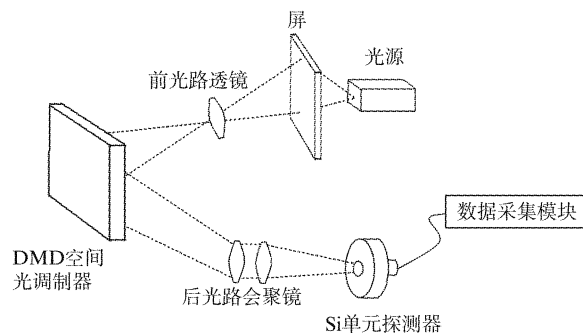


图7 室内实验装置结构示意图
Fig. 7 Device structure for indoor experiment

电子学部分的功能是控制调制信息发送、获取探测器信息以及图像反演,工作过程为:计算机向 DMD 控制电路发送调制信息,DMD 控制电路接收到调制信息之后控制 DMD 器件上的微镜进行翻转;一帧调制信息发送完毕后,微镜锁定一段时间,同时由 DMD 控制电路发送一个触发信号触发数据采集系统进行数据采集;数据采集系统开始工作,将由放大电路放大后的探测器数据转换为数字信号后,作为反演运算的原始数据送入计算机进行处理;最后由软件利用调制矩阵和探测器获取的原始数据反演出图像:探测器获取的原始数据就相当于式(2)中的左端项,调制矩阵相当于式(2)中各个线性方程的系数,软件计算图像的过程实际上就是求算 Φ_i 的过程.

实验室成像实验在光学平台上完成,图8是装置的实物图.

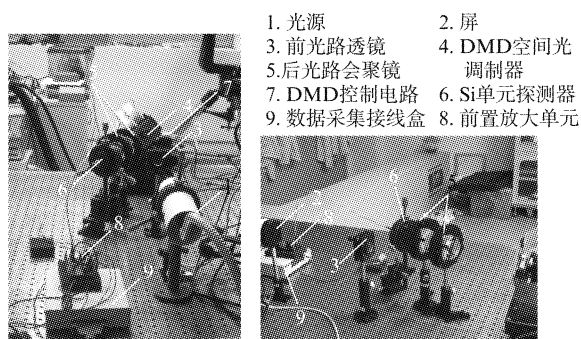


图8 室内实验实验装置实物图

Fig. 8 Photos of indoor experimental device

3.1.2 实验结果

为了方便讨论,定义系统分辨率为“系统可以分辨的清晰的呈现在 DMD 平面上的像的最小尺寸”. 实验过程中,为了减少运算量,实际上是将若干片微镜合并成一个元进行使用,这样,在 DMD 平面上物体的像清晰时,系统的分辨率是直接受微镜的合并情况影响的,也就是间接受到调制矩阵阶数的影响,因为调制矩阵的阶数增多相当于合并的像元数减少,即分辨率提高.

系统分辨率 R 与微镜元合并数 $n \times n$ 满足下表所列关系.

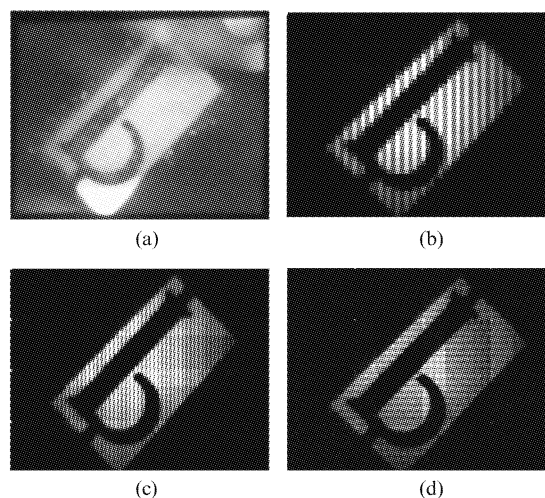
表1 分辨率 R 与微镜元合并数关系Table 1 Relationship of the resolution R and combination of $n \times n$ micromirrors

$n \times n$ 元微镜合并	分辨率 R
16×16	$(13.68 \mu\text{m} \cdot 16) \times (13.68 \mu\text{m} \cdot 16) = 218.88 \mu\text{m} \times 218.88 \mu\text{m}$
8×8	$(13.68 \mu\text{m} \cdot 8) \times (13.68 \mu\text{m} \cdot 8) = 109.44 \mu\text{m} \times 109.44 \mu\text{m}$
4×4	$(13.68 \mu\text{m} \cdot 4) \times (13.68 \mu\text{m} \cdot 4) = 54.72 \mu\text{m} \times 54.72 \mu\text{m}$

光学平台上的成像实验共进行了三组,分别是分辨率为 $218.88 \mu\text{m} \times 218.88 \mu\text{m}$ 、 $109.44 \mu\text{m} \times 109.44 \mu\text{m}$ 和 $54.72 \mu\text{m} \times 54.72 \mu\text{m}$ 时的实验. 图9的(b)、(c)、(d)分别是分辨率为 $218.88 \mu\text{m} \times 218.88 \mu\text{m}$ 、 $109.44 \mu\text{m} \times 109.44 \mu\text{m}$ 和 $54.72 \mu\text{m} \times 54.72 \mu\text{m}$ 时的实验结果,(a)是图8中的屏上的花纹呈现在 DMD 平面上的像.

从实验结果可以看出,随着分辨率的升高,软件反演出的图像更加清晰,能够分辨的细节特征也更加明显. 由于计算量过于庞大,图像的计算是一个区域一个区域分别进行计算之后拼接获取的,所谓拼接获取图像就是将图像划分成多个区域,按照顺序分别向各个区域发送调制信息、解算该部分的图像,再将各个部分的图像拼接形成一幅完整图像.

本文还在实验室对近距离景物成像的基础上通

图9 室内实验结果 a)实物图 b) $218.88 \mu\text{m} \times 218.88 \mu\text{m}$ 分辨率实验结果 c) $109.44 \mu\text{m} \times 109.44 \mu\text{m}$ 分辨率实验结果 d) $54.72 \mu\text{m} \times 54.72 \mu\text{m}$ 分辨率实验结果Fig. 9 Lab experimental results. a) Original image. b) $R = 218.88 \mu\text{m} \times 218.88 \mu\text{m}$ result. c) $R = 109.44 \mu\text{m} \times 109.44 \mu\text{m}$ result. d) $R = 54.72 \mu\text{m} \times 54.72 \mu\text{m}$ result

过实验验证了其应用于光源变化时远距离对外成像的可行性.

3.2 室外成像实验

3.2.1 实验装置

室外成像实验装置中的电子学部分和实验室实验中所采用的电子学部分完全相同,但由于对外成像的需要,光学部分进行了改进,该实验的实验装置的光学部分的结构如图10所示.

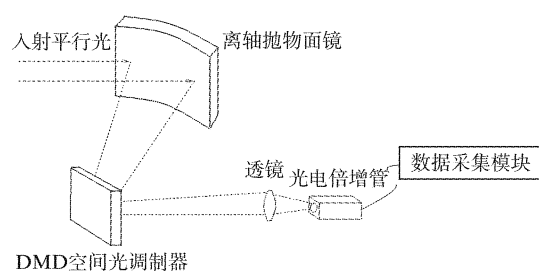


图10 远距离对外实验实验装置结构示意图

Fig. 10 Structure diagram of the outdoor remote experimental device

3.2.2 实验结果及分析

对远距离物体的成像进行了多次实验,获取了远距离景物的灰度图像,并通过在探测器前端放置滤光片的方法获取了 650 nm 、 540 nm 和 470 nm 波段的单色图像,最终利用三个波段的单色图像信息合成了景物的真彩色图像.

为了更好的分辨景物的细节特征,对外成像实

验中使用的系统分辨率都为 $54.72 \mu\text{m} \times 54.72 \mu\text{m}$. 由于运算量和系统结构的限制, 目前 $54.72 \mu\text{m} \times 54.72 \mu\text{m}$ 也是系统所能达到的最高分辨率. 图 11 是远距离对外成像中使用的实验装置.



图 11 远距离对外成像实验装置实物图
Fig. 11 Photo of experimental device for long-range outdoor imaging experiments

图 12 是远距离景物的灰度图像. 从实验结果中可以看出, 由软件反演的远处景物图像非常清晰, 并且可以清晰分辨出窗户和空调等景物的细节特征. 由于微镜的是按对角线翻转的, 所以在实际安装 DMD 时, 是使微镜对角线垂直于水平面进行安装, 这样会造成图像会有一些角度的旋转. 图形中的条带状的不规则图案并不是外界干扰, 实际上是由于引线的接触不良造成 DMD 上的某几列微镜不能正常翻转而导致少部分编码信息不能正确被 DMD 显示造成的编码错误引起的.

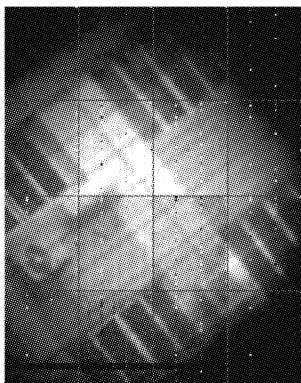


图 12 远距离景物灰度图像
Fig. 12 Gray image of the distant scene

图 13 是相同景物的三个谱段的单色光图像以及合成后的彩色图像. (d) 图是利用 650 nm 波段、540 nm 波段、470 nm 波段的单色图像经软件合成的彩色图像.

4 结论

利用 DMD 和可见光单元探测器, 分别开展了室内近距离成像和室外远距离成像研究, 试验结果证明了利用单元探测器和空间光学调制技术可以实

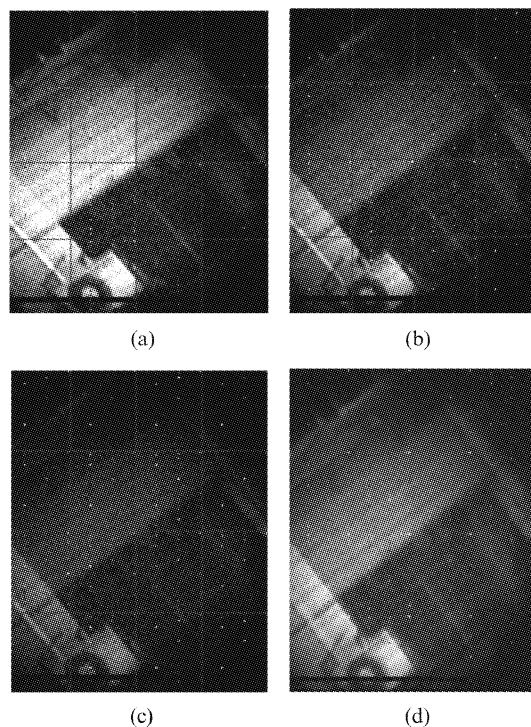


图 13 远距离景物单波段图像及彩色合成图像
a) 650 nm 波段图像(滤光片带宽 9.5 nm) b) 540 nm 波段图像(滤光片带宽 9.5 nm) c) 470 nm 波段图像(滤光片带宽 9.5 nm) d) 软件合成彩色图像

Fig. 13 Single-band image at a) 650 nm (bandwidth of 9.5 nm), b) 540 nm (bandwidth 9.5 nm), c) 470 nm (bandwidth of 9.5 nm), and d) color composite image

现凝视成像. 考虑到 DMD 器件对短波红外光谱的适应性, 只要把可见光探测器换成短波红外探测器就可以实现短波红外谱段的凝视成像, 这在技术上是完全可行的, 并且将此方法应用于短波红外成像时, 仅需将现有探测器更换为短波红外器件, 但由于有些红外器件在工作时的需要制冷等特殊要求, 在实际应用于短波红外探测时, 装置的机械结构和光学部分还应做出相应调整和改进.

References

- [1] SHEN Yuan-Ting, NI Guo-Qiang, XU Da-Qi, *et al.* Study on gas exploration by hyperion hyperspectral remote sensing data[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (沈渊婷, 倪国强, 徐大琦, 等. 利用 Hyperion 短波红外高光谱数据勘探天然气的研究. *红外与毫米波学报*), 2008, 27(3): 210-213.
- [2] ZHANG Ming-Tao, ZHU Lei, LIU Yin-Nian, *et al.* Design and application on temperature controlling system of 320×256 element short wave infrared focal plane array[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张明涛, 朱磊, 刘银年, 等. 320×256 短波红外焦平面温控系统设计与应用. *红外与毫米波学报*), 2009, 28(3): 173-175.
- [3] LV Yan-Qiu, XU Yun-Huan, HAN Bing, *et al.* Study on 128×1 element linear InGaAs short wavelenth infrared focal (下转第 532 页)

- cover mapping using a Markov random field based approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **96**: 302 - 314.
- [10] Li X, Du Y, Ling F. Spatially adaptive smoothing parameter selection for Markov random field based sub-pixel mapping of remotely sensed images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, **33**(24): 7886 - 7901.
- [11] Wang L, Wang Q. Subpixel mapping using Markov random field with multiple spectral constraints from subpixel shifted remote sensing images [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, **10**(3): 598 - 602.
- [12] Nigussie D, Zurita-Milla R, Clevers J G P W. Possibilities and limitations of artificial neural networks for subpixel mapping of land cover [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, **32**(22): 7203 - 7226.
- [13] Zhang L, Wu K, Zhang Y, et al. A new sub-pixel mapping algorithm based on a BP neural network with an observation model [J]. *Neurocomputing*, 2008, **71**: 2046 - 2054.
- [14] Xu X, Zhong Y, Zhang L, Li P. A sub-pixel mapping algorithm based on BP neural network with spatial autocorrelation function for remote sensing imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (许雄, 钟燕飞, 张良培, 李平湘. 基于空间自相关 BP 神经网络的遥感影像亚像元定位. *测绘学报*) 2011, **40**(3): 307 - 311.
- [15] Boucher A, Kyriakidis P C. Super-resolution land cover mapping with indicator geostatistics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **104**(3): 264 - 282.
- [16] Wang Q, Shi W, Wang L. Allocating classes for soft-then-hard subpixel mapping algorithms in units of class [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(5): 2940 - 2959.
- [17] Ling F, Du Y. Super-resolution land-cover mapping using multiple sub-pixel shifted remotely sensed images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **31**(19): 5023 - 5040.
- [18] Xu X, Zhong Y, Zhang L, et al. Sub-pixel mapping based on a MAP model with multiple shifted hyperspectral imagery [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, **6**(2): 580 - 593.
- [19] Wang Q, Shi W, Atkinson P M. Sub-pixel mapping of remote sensing images based on radial basis function interpolation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, **92**: 1 - 15.
- [20] Wang Q, Shi W, Zhang H. Class allocation for soft-then-hard subpixel mapping algorithms with adaptive visiting order of classes [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, **11**(9): 1494 - 1498.

(上接 520 页)

- plane array [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吕衍秋, 徐运华, 寒冰, 等. 128 × 1 线列 InGaAs 短波红外焦平面的研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5): 333 - 337.
- [4] YE Hu-Nian, YE Mei, YANG Li-Xin. *Hadamard Transform Optical Imaging* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology press (叶虎年, 叶梅, 杨新立. *阿达玛变换光学成像*. 武汉: 华中科技大学出版社) 2012: 14 - 90.
- [5] M. HARWIT, Neil J. A. SLOANE. *Hadamard Transform Optics* [M]. New York: Academic Press, 1979: 1 - 104.
- [6] MEI Er-Wen, GU Wen-Fang, ZENG Xiao-Bin, et al. Research of Hadamard transform microscopic fluorescence imaging technology [J]. *J. Science in China* (梅二文, 顾文芳, 曾晓斌, 等. Hadamard 变换显微荧光成像技术的研究. *中国科学*), 1995, **25**(1): 7 - 8.
- [7] QI Hong-Xing, CHEN Mu-Wang. Study on Hadamard transform Near-Infrared Imaging Spectrometer [J]. *J. Infrared Technology* (亓洪兴, 陈木旺. 短波红外 Hadamard 变换高光谱成像技术研究. *红外技术*), 2005, **27**(6): 463 - 468.
- [8] DMD 0.7XGA 12°DDR DMD DiscoveryTM [R]. America. Texas Instrument corporation. 2005.