

文章编号: 0253-2239(2009)02-0490-06

# 基于哈特曼波前传感器的非制冷红外成像 光学读出系统

马晓燮<sup>1,2</sup> 樊志华<sup>1,2</sup> 饶长辉<sup>1</sup> 钱 见<sup>3</sup> 史海涛<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)  
<sup>3</sup> 中国科学技术大学中科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027)

**摘要** 提出了一种新的基于哈特曼波前传感器(SHWS)的光学读出系统。该系统利用 SHWS 探测焦平面阵列(FPA)单元在受热前后反射波前斜率的变化量重构被探测物体的红外辐射图像。在理论上详细讨论其成像性能后,实验获得了单元尺寸为  $60\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ , 阵列大小为  $34\ \text{pixel} \times 38\ \text{pixel}$  的高温物体红外图像,其噪声等效温度差(NETD)约为 3.8 K。优化系统参数设计,可以提高哈特曼波前传感器对到达角的测量精度进而获得更小的噪声等效温度差。

**关键词** 光学器件; 哈特曼波前传感器; 光学读出; 非制冷红外成像

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0490

## Application of Hartmann-Shack Sensor in Optical Readout System of Uncooled Infrared Imaging

Ma Xiaoyu<sup>1,2</sup> Fan Zhihua<sup>1,2</sup> Rao Changhui<sup>1</sup> Qian Jian<sup>3</sup> Shi Haitao<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610029, China)  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China  
<sup>3</sup> Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

**Abstract** An optical readout system based on Hartmann-Shack sensor is introduced. This system uses Shack-Hartmann wavefront sensor (SHWS) to detect the wavefront gradient variance of focal-plane array (FPA) cell before and after being heated and then reconstructs the IR image of object being detected. After vividly discussing its imaging capability theoretically, we obtain the infrared image of a high-temperature object with cell size  $60\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$  and array size  $34\ \text{pixel} \times 38\ \text{pixel}$  in experiment. Its noise equivalent temperature difference (NETD) is about 3.8 K. If system parameters are optimized, the measurement accuracy of SHWS for arriving angles can be improved and thus smaller NETD can be attained.

**Key words** optical device; Hartmann-Shack sensor; optical readout; uncooled infrared imaging

## 1 引 言

红外热成像仪工作时无须任何光源照明,能揭露伪装和发现存在的暂留图像,对高远目标同样能清晰显示,在国防、公安、科研等领域中有着广泛的用途。基于光学读出的双材料微悬臂梁阵列受热变

形红外成像技术是上世纪 90 年代后期出现的一种热型非制冷红外成像技术<sup>[1,2]</sup>。与传统的量子型和热型红外辐射探测器<sup>[3]</sup>相比,这种探测器件的开发和制作成本都较低。随着技术的发展,该技术有希望发展成为低成本高性能的红外成像器件。

收稿日期: 2008-06-13; 收到修改稿日期: 2008-08-12

基金项目: 中国科学院研究生科学与社会实践(创新研究类)资助课题。

作者简介: 马晓燮(1983—),男,硕士研究生,主要从事自适应光学系统中波前传感器方面的研究。

E-mail: maxiaoyu001@126.com

导师简介: 饶长辉(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn

光学读出是光—机械微悬臂结构的热型红外焦平面探测系统中一个重要环节。目前大多采用的是谱平面滤波的方式<sup>[4~7]</sup>，将微悬臂梁的角度变化转换为反射光强的变化，利用 CCD 各像素输出灰度值的改变量来复原被检测物体的红外辐射图像。在实际使用中，输出图像的质量在很大程度上依赖于刀口摆放的位置和刀口的质量，系统不容易组装和调试，试验的重复性和精确性受到很大的影响。本文提出了利用哈特曼波前传感器来检测微悬臂梁阵列形变的方法，将微悬臂梁的角度变化转换为光斑质心位置变化，利用光斑质心位置的改变量来复原被检测物体的红外辐射量。由于哈特曼传感器具有结构简单、精度高的特点，故该读出系统组装容易，并且能够高精度地复原物体的红外辐射图像。

## 2 原 理

双材料微悬梁结构是利用两层材料之间热膨胀系数不同，当吸收红外辐射导致温度发生变化时，两层材料之间的相互约束会使得双层结构发生弯曲变形。微梁的转角与温升成线性关系，通过光学读出方式检测热致转角，就可以得到温度的分布图象。

焦平面阵列(Focal-plane array, FPA)如图 1 所示<sup>[8]</sup>。反光吸热部分为几何平板结构，附着金属薄膜的表面可以反射可见光，背面可以吸收红外能量，当热隔离变形部分因温升发生变形时，反光吸热部分的转角单调地对应于入射红外线的能量大小。梁的多重回折可提高单元的热变形效率，而隔离梁和变形梁交替连接，使变形放大。

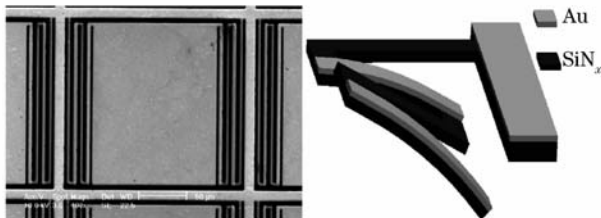


图 1 微悬臂梁结构和变形原理图

Fig. 1 Microcantilever structures and their deformation illustration

哈特曼波前传感器由于其结构简单、原理直白而在现代光学中有着非常广泛的用途<sup>[9]</sup>。它是由微透镜和光电传感器组成，是一种以波前斜率测量为基础的波前测量仪器。

哈特曼波前传感器的原理如图 2，被检测波面被分成若干个采样单元，这些采样单元分别被高质量透镜组会聚在分离的焦点上，然后用 CCD 等光电

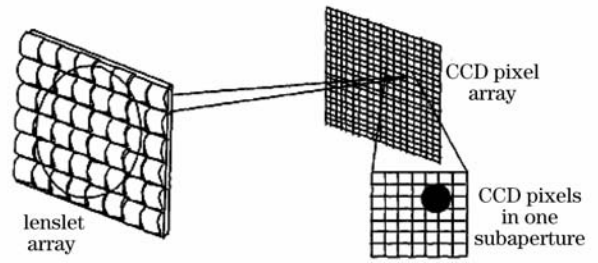


图 2 哈特曼波前传感器示意图

Fig. 2 Schematic configuration of Hartmann wavefront sensor

探测器件接收。每个子孔径范围内的波前倾斜将造成其光斑的横向位移，光斑的质心在  $x$  和  $y$  方向上的偏离程度反映了对应采样单元波面在两个方向上的平均倾斜。

$$\Delta x = f \cdot \frac{\partial W}{\partial x}, \quad \Delta y = f \cdot \frac{\partial W}{\partial y}, \quad (1)$$

式中  $f$  是微透镜阵列焦距， $\frac{\partial W}{\partial x}$  和  $\frac{\partial W}{\partial y}$  是子孔径波前斜率。

光学读出系统如图 3 所示，用一束准直的冷光源照射 FPA 后表面，其反射光通过匹配透镜后进入哈特曼波前探测器，利用探测得到的波前斜率改变量重构出 FPA 的热致转角。由于 FPA 的热致转角与温升成线性关系，所以可以根据检测得到的热致转角得到所探测物体温度的分布图象。

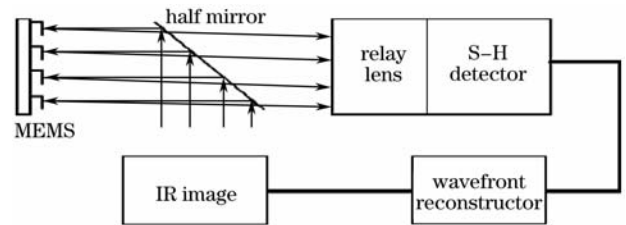


图 3 哈特曼波前探测器光力学红外成像读出系统示意图

Fig. 3 Sketch map of infrared optical readout system based on Hartmann wavefront sensor

## 3 系统性能分析

### 3.1 系统灵敏度

单个 FPA 单元光学读出光路如图 4 所示。图中  $L_1, L_2$  是匹配透镜，其作用是将单个微悬臂梁的反射光与哈特曼波前传感器的一个子孔径相对应； $L_3$  是哈特曼波前传感器与该 FPA 单元相对应的子孔径透镜。其中  $L_1$  的焦距是  $f_1$ ， $L_2$  的焦距是  $f_2$ ， $L_3$  的焦距是  $f_3$ 。 $f_1, f_2$  由微悬臂梁的长度  $L_{leg}$  和微透镜的口径  $d$  决定：

$$f_2/f_1 = d/L_{leg} = M, \quad (2)$$

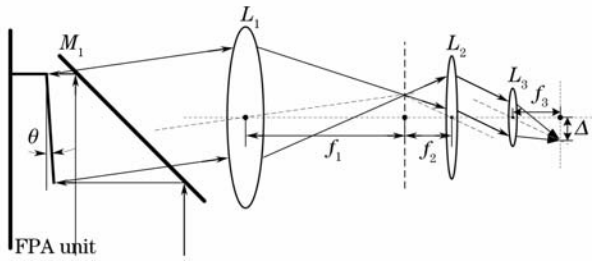


图 4 单个 FPA 单元光学读出光路图

Fig. 4 Optical system for FPA unit readout system

式中  $M$  表示缩束比。所以当 FPA 单元上微悬臂梁发生  $\theta$  ( $\theta$  非常微小) 的形变时, 在  $L_3$  的后焦面上光斑移动的距离为

$$\Delta = \frac{2\theta}{M} \cdot f_3, \quad (3)$$

进而得到哈特曼传感器的灵敏度:

$$W = \frac{\partial \Delta}{\partial \theta} = \frac{2f_3}{M}, \quad (4)$$

FPA 的灵敏度  $R^{[10,12,13]}$  表示被探测物体的温升  $\Delta T$  所引起的热致转角  $\Delta\theta$ , 它与微悬臂梁的热转换效率  $H$  和微悬臂梁的热机械响应  $S_T$  有关:

$$R = \frac{\partial \theta}{\partial T} = H \cdot S_T. \quad (5)$$

系统的灵敏度  $\kappa$  由 FPA 的灵敏度  $R = \frac{\partial \theta}{\partial T}$  和哈

特曼波前传感器的灵敏度  $W = \frac{\partial \Delta}{\partial \theta}$  决定。

$$\kappa = \partial \Delta / \partial T = W \cdot R = 2f_3 R / M. \quad (6)$$

图 5 是该系统的灵敏度曲线 ( $f_3 = 4 \text{ mm}$ )。由 (6) 式和图 5 可得, 当 FPA 的灵敏度  $R$  一定时, 在满足系统需求的情况下, 适当减小缩束比  $M$  和增加微透镜焦距  $f_3$  可以提高整个系统的灵敏度。

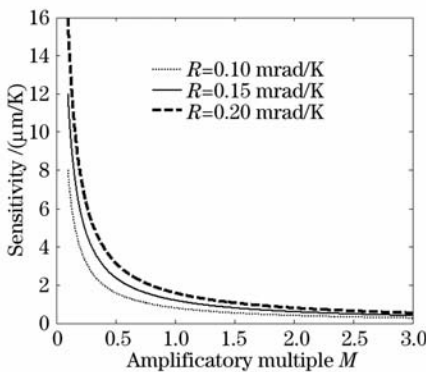
图 5 系统灵敏度与缩束比  $M$  和 FPA 灵敏度的关系曲线

Fig. 5 System sensitivity versus beam-contraction ratio for different FPA sensitivities

### 3.2 噪声等效温度差

由于光学读出系统的噪声的影响, 重构得到的

物体红外辐射图像并不准确, 由噪声引起的温度起伏量  $\Delta T_{\min}$  定义为噪声等效温度差 (NETD), 它表示了系统的分辨率<sup>[11~13]</sup>。

哈特曼波前探测器探测的光斑质心位置坐标由下式决定:

$$X_c = \frac{\sum_{ij} X_i S_{ij}}{\sum_{ij} S_{ij}}, \quad Y_c = \frac{\sum_{ij} Y_i S_{ij}}{\sum_{ij} S_{ij}}, \quad (7)$$

式中  $X_c$  和  $Y_c$  是质心坐标;  $X_i$  和  $Y_i$  是每个像素位置;  $S_{ij} = P_{ij} + N_{ij}$  表示每个像素读出信号的两部分: 真实光信号  $P_{ij}$  和噪声信号  $N_{ij}$ 。

影响哈特曼传感器分辨率的主要有离散采样噪声、读出噪声和光子起伏噪声<sup>[14~16]</sup>。当质心探测的均方根误差为  $\sigma_{rc}$ , 单个像素边长为  $a$  时, 系统的 NETD 为

$$D_{\text{NET}} = \frac{\sigma_{rc} a}{\kappa}, \quad (8)$$

式中  $\kappa$  由 (6) 式决定。

图 6 是当  $M=2.17$ ,  $a=83 \mu\text{m}$ ,  $f_3=4 \text{ mm}$  时不同 FPA 的灵敏度系统的噪声等效温度差, 从图上可以看出, 当质心探测的均方根误差为 0.02 个像素时, 系统的噪声等效温度差为 2.2 K。

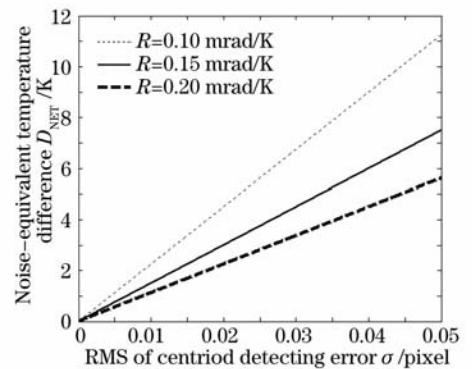


图 6 噪声等效温度差与质心探测均方根误差和 FPA 灵敏度的关系

Fig. 6 Noise equivalent temperature difference versus RMS of centroid detecting error for different FPA sensitivities

### 3.3 动态范围

由哈特曼波前传感器工作的原理可知, 每个子孔径的光斑只能在 CCD 靶面上的一定区域内移动, 否则就可能会引起本子孔径和相邻子孔径的光斑质心测量不准确 (如图 7)。

当每个子孔径中包含有  $N \times N$  个像素, 像素尺寸为  $a$ , 光斑直径为  $d_f$  时, 单个子孔径能够测量的光斑移动距离为

$$\Delta_{\max} = a \cdot N - d_f, \quad (9)$$

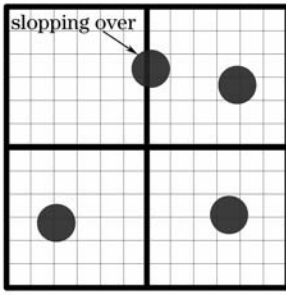


图 7 光斑超出动态范围示意图

Fig. 7 Schematic configuration of light spot's dynamic range beyond limitation

其温度测量动态范围为  $\left[0, \frac{\Delta_{\max}}{\kappa}\right]$  或  $\left[-\frac{\Delta_{\max}}{2\kappa}, +\frac{\Delta_{\max}}{2\kappa}\right]$ 。

当  $M=2.17, f_3=4 \text{ mm}, a=83 \mu\text{m}$  时, 该光学读出系统的动态范围示意图如图 8。由图 8 可以看出, 当子孔径像素阵列为  $4 \times 4$  时, 其动态范围已经超过 500 K。

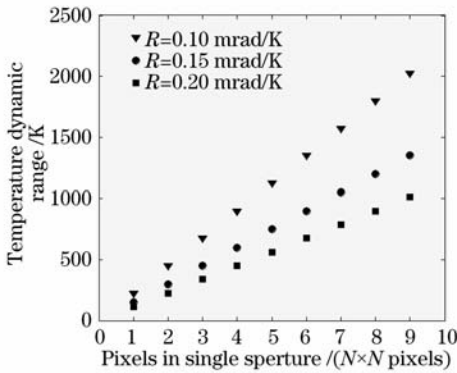


图 8 动态范围与单个子孔径像素数的关系

Fig. 8 Relationship between dynamic range and pixels in single aperture

## 4 实验结果及分析

### 4.1 实验装置

试验装置如图 9 所示, 系统中各器件的参数列于表 1。

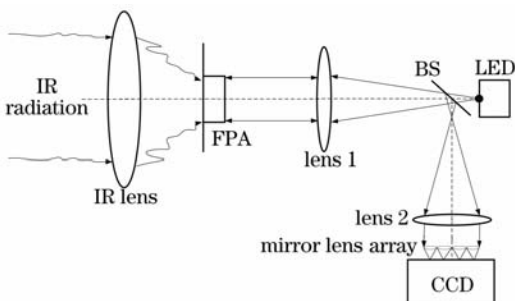


图 9 试验装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of experimental setup

表 1 试验装置示意图中各器件的参数

Table 1 Parameters of devices in Fig. 9

Device	Parameter	Note
FPA	Pixel size: $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ Array size: $120 \times 120$	*
Lens 1	Focal length: 90 mm	
Micro-lens array	Aperture size: $130 \mu\text{m} \times 130 \mu\text{m}$ Array size: $34 \times 38$	
Lens 2	Focal length: 195 mm	* *

\* Limited by the sub-aperture numbers of SHWS, only  $34 \times 38$  arrays of micro-cantilevers are chosen in our experiment.

$$* * f_2 = \frac{130 \mu\text{m}}{60 \mu\text{m}} \cdot f_1 = \frac{130 \mu\text{m}}{60 \mu\text{m}} \times 90 \text{ mm} = 195 \text{ mm}.$$

### 4.2 试验步骤

1) 在红外透镜前不加高温物体, 采集图片  $A_1$  作为 FPA 未发生形变时的波前光斑阵列;

2) 加上温度为  $T_m$  的高温物体, 焦平面阵列的吸热时间相同为  $t$ , 采集图像  $B_k$ ;

3) 重复步骤 1 和步骤 2, 完成  $m$  次采集。

### 4.3 数据处理

受哈特曼传感器子孔径数的限制, 本次试验只选取了 FPA 中  $34 \times 38$  区域成像。利用(7)式计算 FPA 未发生形变时的在第  $i$  行  $j$  列处光斑质心  $(x_{0ij}, y_{0ij})$  和发生形变后在第  $i$  行  $j$  列处光斑质心  $(x_{kij}, y_{kij})$ , 由于微悬臂梁的旋转方向可能与哈特曼传感器的坐标轴并不重合, 光斑质心的位移量为

$$\Delta_{kij} = \sqrt{(x_{kij} - x_{0ij})^2 + (y_{kij} - y_{0ij})^2}. \quad (10)$$

将系统参数代入(6)式计算出系统的灵敏度为 61.2 K/pixel, 所以 FPA 第  $i$  行  $j$  列对应物体处的温度与环境的温度差的绝对值为

$$\Delta T_{kij} = 61.2 \Delta_{kij} \text{ (K)}. \quad (11)$$

图 10, 图 11 是对一十字孔用热辐射 ( $451.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 照明后的红外成像。

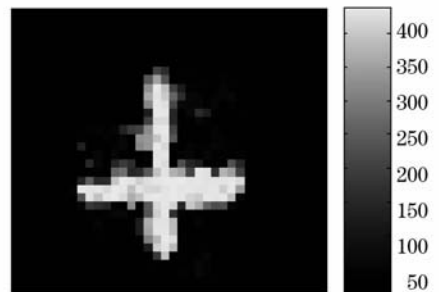


图 10 受红外照明的十字孔图像

Fig. 10 IR images of '+' shape aperture

连续采集 100 次数据, 分别取出 A, B, C 点处微悬臂梁的偏转角度  $\alpha_i$  和复原得到的温度差  $\Delta T_i$ 。其中, A 像素点代表微悬臂梁被红外辐射完全照明后复

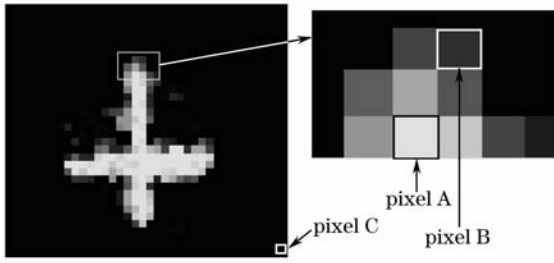


图 11 在红外图像上取得的 A、B、C 像素点示意图

Fig. 11 Figure of pixel A, B, C sampled from IR image

原得到的温度差; B 像素点代表微悬臂梁被红外辐射部分照明后复原得到的温度差; C 像素点代表微悬臂梁没有受到红外辐射时复原得到的温度差。测量得到的热辐射源的温度为 451.3 °C, 室温为 16.2 °C, 所以 A 处的理论值为 435.1 K; 由于不知道 B 处受到红外辐射的强度, 所以 B 处的理论值未知; 而 C 处的起伏代表室温的起伏和系统噪声的影响。

图 12 为 A、B、C 三处在 100 次测量中, 复原得到的温度差起伏的示意图。其起伏是由噪声引起的, 其平均值  $A_{v_{\Delta T}}$  和方差  $\sigma_{\Delta T}^2$  为

$$A_{v_{\Delta T}} = \frac{1}{100} \sum_{k=1}^{100} \Delta T_k, \quad (12)$$

$$\sigma_{\Delta T}^2 = \frac{1}{100} \sum_{k=1}^{100} (\Delta T_k - A_{v_{\Delta T}})^2. \quad (13)$$

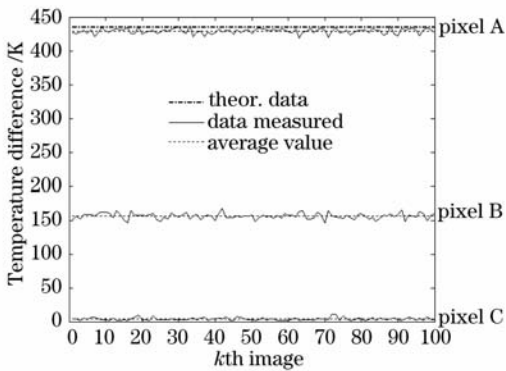


图 12 温度差起伏的示意图

Fig. 12 Temperature difference fluctuation

计算得到 A、B、C 三处的均值和方差如表 2。其中, A 处均值与理论值相差 5.9 K, 主要是因为利用波前斜率复原温度时, 取 FPA 上微悬臂梁的响应度为 0.2 mrad/K, 但实际 A 处的微悬臂梁的响应度略低于取值 (约 0.197 mrad/K, 所以该系统还可以用于微悬臂梁响应度的标定)。当室温变化缓慢时, 可以认为在 C 处的理论值是 0, 但是由于室温起伏和系统噪声的影响, C 处的平均值与理论值有 2.86 K 的差距。测量得到的均方根值在 A、B、C 三处可以认为是系统的等效噪声温度。因为室温的变化较慢, 而

热辐射源受到由于自身的稳定性和空气流动等干扰, 在 FPA 上会有起伏, 所以 A 处和 B 处的 NETD 略高于 C 处的 NETD, 系统的 NETD 可以取其平均值 3.8 K。

表 2 对 A、B、C 三处采样计算的结果

Table 2 Computation results of sample pixel A, B, C

	Average value /K	Theoretical value /K	Variance /K <sup>2</sup>	RMS (NETD) /K
Pixel A	429.2	435.1	14.43	3.79
Pixel B	156.2	null	18.19	4.26
Pixel C	2.86	0	12.32	3.51

## 5 结 论

详细分析了基于哈特曼波前传感器的红外成像仪的原理, 推导了其温度灵敏度、噪声等效温度差和动态范围公式; 在搭建实验系统中获得了单元尺寸为 60 μm × 60 μm, 阵列大小为 34 pixel × 38 pixel 的红外图像。对试验结果分析表明, 基于哈特曼波前传感器的红外成像仪能够响应物体的红外辐射并成像, 其 NETD 为 3.8 K。受微透镜阵列的限制, 系统的成像像素数还很少, 等效噪声温度偏高。需要增加微透镜阵列的数目以增加成像像素数目; 在保证光源亮度的条件下, 对缩束比和微透镜的焦距进行优化设计, 可以提高哈特曼波前传感器对到达角的测量精度进而获得更小的等效噪声温度。

## 参 考 文 献

- 1 Timothy White, Charles Marshall, Neal Butler. Uncooled infrared sensor with digital focal plane array for medical applications[J]. *IEEE*, 1996. 2081~2082
- 2 Oden P. I., Datskos P. G., Thundat T. *et al.*. Uncooled thermal imaging using a piezoresistive microcantilever[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(21): 3277~3279
- 3 Rogalski A. Infrared detectors: status and trends[J]. *Progress in Quant. Electron.*, 2003, **27**: 59~210
- 4 Yang Zhao, Jongeun Choi, Roberto Horowitz *et al.*. Characterization and performance of optomechanical uncooled infrared imaging system[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4820**: 164~174
- 5 Howard G B. Application of airborne thermal infrared imaging for the detection of unexploded ordnance[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4360**: 149~160
- 6 Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian. Nonuniformity-correction algorithm for infrared focal plane arrays based on wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1617~1620
- 7 秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾. 小波变换的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1617~1620
- 8 Zhao Y. Optomechanical uncooled infrared imaging system[D]. Dissertation of U C, Berkeley, 2002
- 9 Duan Zhihui, Zhang Qingchuan, Wu Xiaoping *et al.*. Uncooled optically readable bimaterial micro-cantilever infrared imaging

- device[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20**(12): 2130
- 9 Jiang Wenhan, Xian Hao, Yang Zeping *et al.*. Application of Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 1998, **15**(2): 228~235  
姜文汉, 鲜浩, 杨泽平等. 哈特曼波前传感器的应用[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2): 228~235
- 10 Zheyang Guo, Qingchuan Zhang, Fengliang Dong *et al.*. Performance analysis of microcantilever arrays for optical readout uncooled infrared imaging[J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, **137**: 13~19
- 11 Dong F, Zhang Q, Chen D *et al.*. An uncooled optically readable infrared imaging detector[J]. *Sens. Actuators A*, 2007, **133**: 236~242
- 12 Miao Zhengyu, Zhang Qingchuan, Chen Dapeng *et al.*. An optical readout method for microcantilever array sensing and its sensitivity analysis[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(6): 594~596
- 13 Y. Zhao, M. Mao, R. Horowitz *et al.*. Optomechanical uncooled infrared imaging system; design, microfabrication, and performance[J]. *MEMS*, 2002, **11**(2): 136~146
- 14 Cao Genrui, Yu Xin. Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object[J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(7): 2331~2335
- 15 Hu Xinqi, Yu Xin, Zhao Dazun. Influence of scene structure and noise on precision of correlating Hartmann-Shack wavefront sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1414~1418  
胡新奇, 俞信, 赵达尊. 目标图像结构和噪声对相关哈特曼-夏克波前传感精度的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1414~1418
- 16 Li Jun, Chen Haiqing, Ren Wenxin *et al.*. Improvement of the robustness of Hartmann wavefront sensor by using Zernike moment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1033~1037  
李俊, 陈海清, 任温馨等. Zernike 矩提高哈特曼波前传感器的鲁棒性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1033~1037