

文章编号: 1001-4322(2002)04-0557-06

# 像增强器的光生背景噪声对微光目标质心探测精度的影响及其抑制方法

沈 锋, 张学军, 姜文汉

(中国科学院 光电技术研究所, 成都 双流 610209)

**摘 要:** 像增强器作为微光探测器件, 在天文目标观测、空间目标捕获、跟踪和瞄准以及生物荧光光谱探测等方面发挥越来越大的作用。重点讨论了在微弱亮度的空间点目标探测应用中, 像增强器的光生背景噪声对目标质心探测的影响。实验和分析表明, 像增强器的光生背景噪声是由目标信号寄生而来的, 并且呈现散粒噪声特性, 无法采取屏蔽环境背景杂光、阈值去背景等方法来消除光生背景噪声, 对目标信号质心探测的影响很大。提出一种减小这种影响的质心计算方法, 实验证明是有效的。

**关键词:** 像增强器; 光生背景噪声; 质心探测

**中图分类号:** TN 247

**文献标识码:** A

像增强型 CCD (ICCD) 作为一个微光信号探测器, 在天文目标观测, 空间目标的捕获、跟踪和瞄准以及夜视应用领域等方面有广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。由于它的物理特性和制造缺陷, 像增强器既是一个微光信号转换和倍增器件, 同时也是一个噪声源。像增强器的噪声有许多, 光阴极的暗电流、MCP 的热噪声、增益起伏噪声、荧光屏的散粒噪声等<sup>[3]</sup>。图 1 是像增强器的信号倍增过程的原理图。在实际应用中, 我们还发现像增强器存在严重的光生污染, 即当入射有光信号, 并且像增强器的增益很高时, 在没有光信号的区域, 也存在着信号输出, 并且信号呈现散粒特征。由于光生背景噪声是由目标信号寄生而来的, 又呈现散粒噪声特性, 无法采取屏蔽环境背景杂光、阈值去背景等方法来消除光生背景噪声<sup>[4]</sup>。产生这种光生背景噪声信号的原因有: (1) 像增强器的输入输出窗口、光阴极面、微通道板的端面 (有限的开口比) 或者像管内其他的表面反射, 将光电子信号反射回光阴极面, 而产生噪声信号; (2) 高能电子轰击内部表面而产生的离子流; (3) 阳极、荧光屏或者其他结构上可能散射的光电子信号, 这些散射的光电子在输出面上表现为噪声信号; (4) 像管内其他缺陷造成的光学反馈信号也是光生背景噪声信号的原因之一。

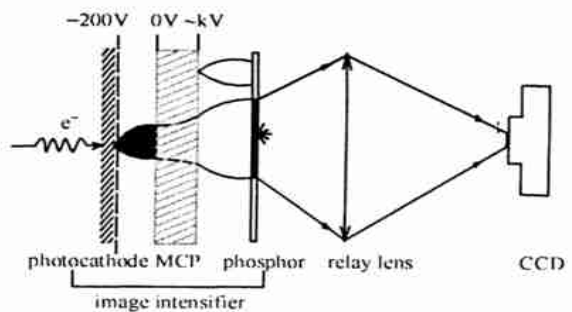


Fig 1 Signal multiplication process of image intensifier

图 1 像增强器的信号倍增过程

## 1 像增强器光生背景噪声 (signal induced background, SIB) 的测量及数据分析

我们对一个 ICCD 探测器, 通过采集不同条件下的图像, 分析 ICCD 探测器的光生背景噪声, 以及它对点目标质心探测的影响。采用的像增强器是日本滨松公司的像增强器 C2166 型, CCD 探测器为加拿大 Dalsa 公司的 CA-D1 0128T 高帧频 CCD (帧频为 419 frame/s), 并采用了 12 位的实时图像采集卡, 像增强器和 CCD 的耦合采用强力耦合物镜。

### 1.1 测量方法

根据光生背景噪声的定义, 采取这样的测量方法: 在 ICCD 前设置一个可变光阑, 调节可变光阑大小, 使得均匀光斑完整地照射到像增强器的阴极靶面上, 然后在紧贴阴极靶面的地方将光斑挡掉一半, 采用透反比为 8:2 的分光镜进行分光, 一部分进入 PMT 进行光子计数, 另一部分进入 ICCD 进行实验, 调节像增强器的高压, 采集图像数据进行分析。

收稿日期: 2001-11-29; 修订日期: 2002-01-28

基金项目: 国家 863 信息获取与处理技术领域资助课题

作者简介: 沈 锋 (1969-), 男, 硕士, 从事自适应光学技术以及微光波前探测技术的研究; 成都双流 350 信箱。

### 1.2 数据分析

如图 2(a), 可以很明显地看出, 当有光信号入射时, 在 ICCD 上没有光的区域内存在散粒信号。这时无光照和有光照区域内相同面积的信号总和分别为  $S_b$  和  $S_{p0}$ 。为了说明这是一种光生背景噪声, 我们紧接着在同样的条件下, 在可变光栏前用一遮挡物将光挡住, 针对室内的背景杂光以及像增强器阴极暗电流噪声进行了数据采集, 如图 2(b)。这时在探测器的同样面积内分别记录暗背景读数的总和, 分别为  $S_{tb}$  和  $S_{tp}$ 。从图 2(a) 和 (b) 的对比, 可以清楚地看出光生背景噪声的存在。定义光生背景噪声(SB)系数  $Z$  为

$$Z = (S_b - S_{tb}) / (S_p - S_{tp})$$

图 2(c) 为连续 500 帧的光生背景噪声系数  $Z$  值。

我们在不同的像增强器的输入高压情况下, 测量了像增强器的光生背景噪声系数和高压读数的关系, 如图 3 所示。光生背景噪声系数随着像增强器高压读数基本呈线性增长趋势。根据测量数据, 我们实验所用的 ICCD 在正常的增益范围内, 它的光生背景噪声系数在 5% ~ 8% 之间, 增益越大, 光生背景噪声系数就越大。

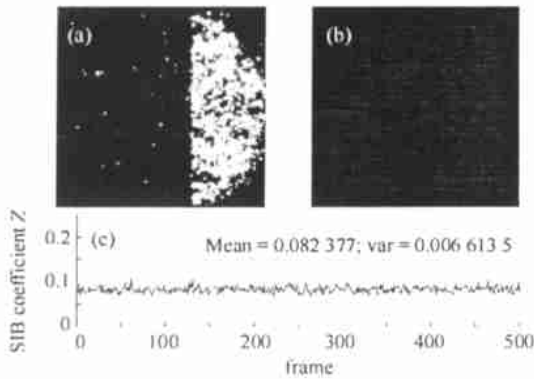


Fig 2 SB image of image intensifier

- (a) incidental light at half photocathode of ICCD, (b) background noise of ICCD,
- (c) the SB coefficient of continuous 500 frames

图 2 像增强器的光生背景噪声

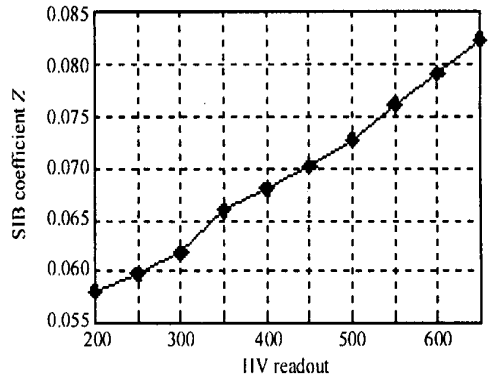


Fig 3 Linear relationship between SB and high voltage of image intensifier

图 3 光生背景噪声与像增强器施加高压的线性关系

由于这种光生背景噪声呈现散粒噪声特性, 它对图像质心探测的影响是非常大的。为说明此, 我们对有光照射 ICCD 时, 采集图像中无光区域内的  $16 \times 16$  像素图像数据和无光照射 ICCD 时暗背景图像数据中相同位置相同大小的图像数据分别计算了  $x, y$  方向的质心位置, 如图 4 所示, 其中的质心序列数据中的毛刺的数量也基本说明了光生背景噪声对质心位置的影响程度。

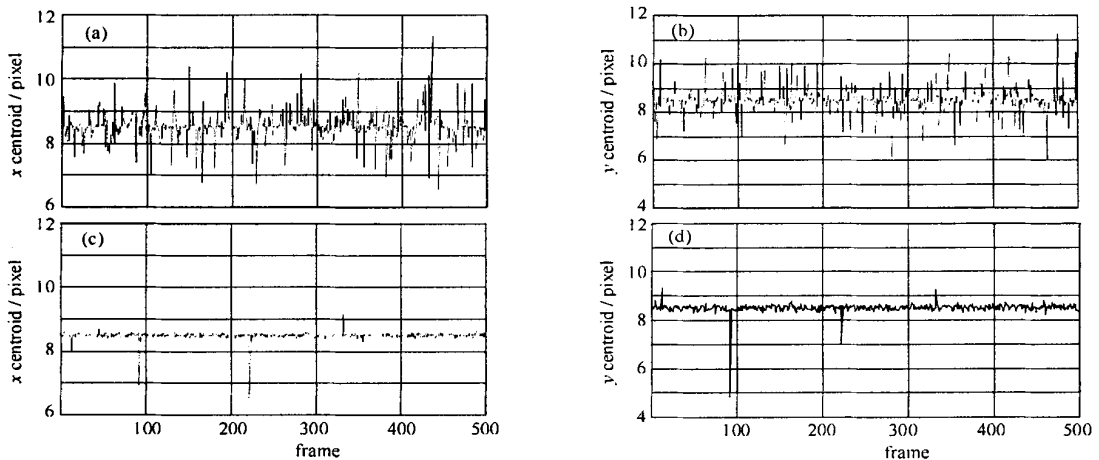


Fig 4 Centroid sequence of  $16 \times 16$  window image at no incidental light area (a), (b) is the  $x, y$  directional centroid sequence of SB while incidental light at ICCD; (c), (d) is the  $x, y$  directional centroid sequence of SB while no incidental light at ICCD

图 4 在无信号区域的  $16 \times 16$  子窗口内采样信号的质心序列

- (a), (b) 是光生背景噪声在  $x, y$  方向的质心序列; (c), (d) 是暗背景噪声在  $x, y$  方向的质心序列

图 5 是施加不同的像增强器高压时, 光生背景噪声质心方差和暗背景噪声质心方差的实验测量值。从图中可以看出, 光生背景噪声质心方差随着像增强器高压的增加而增大, 相反暗背景噪声质心方差基本不随像增强器高压的增加而增大。因此在对微光小目标光斑的质心误差探测时, 光生背景噪声的影响不容忽视。

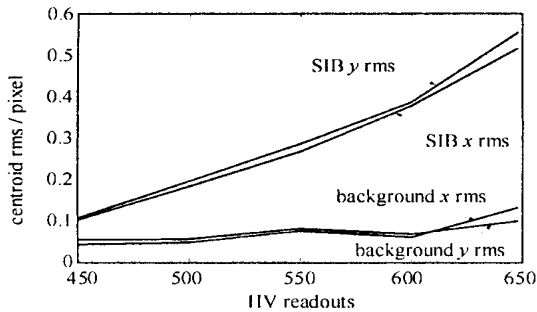


Fig 5 Centroid variances of SB and dark background at different applied high voltage on image intensifier

图 5 在施加不同的高压时, ICCD 的光生背景噪声质心方差和暗背景噪声质心方差随高压的关系

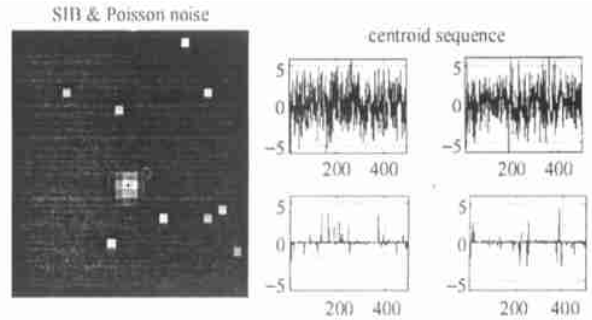


Fig 6 Simulation results of shot noise suppression method

图 6 光生背景噪声和抑制方法的仿真结果

## 2 光生背景噪声的抑制方法

这里我们提出一种抑制光生背景噪声的新方法, 运算量不大, 可以在工程应用中实现。基本思想是: 由于散粒噪声的空间尺度一般小于小目标图像(小目标图像在 ICCD 上空间尺度为 5~ 6 像素), 一般在 1~ 2 个像素, 利用这种特性, 我们采取将目标图像数据空间移位 1~ 2 个像素后, 与原图像进行相乘得到一个新的图像数据, 再用强度一阶矩方法来计算质心位置。即

$$I'_{i,j} = I_{i,j} \times I_{i+k,j+l} \quad , \quad x_c = \frac{\sum_{i,j} I'_{i,j} x_{i,j}}{\sum_{i,j} I'_{i,j}}$$

式中:  $I_{i,j}$  为原始图像中第  $i, j$  个像素的强度;  $k, l$  为  $x, y$  方向移位的像素数。

表 1 方法 1 和方法 2 处理计算的仿真光斑质心位置与真值位置的偏差以及方差

Table 1 Variances and deviations in pixel of simulated spot image's centroid from its real centroid, by means of method No 1 and No 2

	deviations from true value		rms value of centroid	
	x-dir	y-dir	x-dir	y-dir
method No. 1	0.021	-0.021	0.425	0.466
method No. 2	0.185	0.148	2.144	2.052

我们仿真研究了这种算法的特性, 产生了一个光斑图像, 并加入了模拟光生背景噪声的散粒噪声和信号光本身的 Poisson 随机噪声, 仿真计算了处理后的图像质心(以下简称方法 1)和处理前的图像质心(以下简称方法 2), 图 6 是仿真结果。图 6 的仿真条件是: 光斑高斯宽度为 1 个像素, 光斑峰值强度为 150ADU, 图像大小为  $32 \times 32$  像素, 计算了 500 帧图像的质心序列。仿真计算结果如表 1 所示, 方法 1 对光斑质心计算的优点由此可见。

我们将这种方法运用到 ICCD 哈特曼波前传感器中, 实际采集了许多帧光斑阵列的图像, 图 7 给出了微光 Hartmann-shack 波前传感器的采集图像数据以及单个子孔径的图像数据, 每一子孔径的图像数据窗口大小为  $16 \times 16$  个像素, 子孔径光斑的空间尺度约为 6 个像素。采用方法 1 和方法 2 计算了子孔径光斑图像数据的质心位置。图 8 是在不同的阈值、不同的像增强器高压情况下, 方法 1 和方法 2 计算得到的子孔径质心的平均位置以及方差。室内暗背景和 CCD 暗噪声为 60~ 70ADU, 光斑峰值接近饱和, 约为 4 095ADU。由

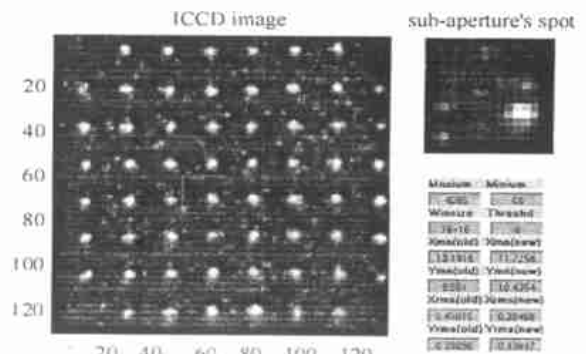


Fig 7 Spot-array image of Hartmann-Shack wavefront sensor (ICCD) at low-level-light and its corresponding sub-aperture's spot image

图 7 ICCD 型 Hartmann-Shack 波前传感器的子孔径光斑图像

于不知道光斑的真实位置,可以这样估计它,就是采取足够的阈值,计算得到的渐近值作为其真实位置。由图 8 的(b)和(c),光斑的真实位置接近为 12.5 pixel,从图 7 的子孔径光斑图像也可以看出光斑的真实位置大约是这个值。由图 8 的(a, b, c)可知,即使采取了阈值,由于光生背景噪声的存在,方法 2 计算得到的光斑质心在像增强器施加高压比较大时,一般不能达到其真实位置,两者的偏差比较大,而且质心位置的起伏方差也比较大,而方法 1 却可以消除光生背景噪声的影响,得到较好的光斑真实位置的估计值和较小的起伏方差,可见方法 1 的优点是很明显的。

图 8(a)和(d)是未取阈值的处理结果,质心平均位置的偏差很大,但随像增强器增益的增加而有所减小,方法 2 得到的质心位置起伏方差会随着像增强器的高压读数的减小而减小,而方法 1 得到的方差将趋于一个固定值,这是由于图 8(d)中,计算数据未取阈值,当像增强器增益很小时,得到的图像数据基本是室内暗背景和 CCD 的暗噪声,光斑信号被淹没在这些噪声中,而暗背景噪声的方差由于起伏很小,导致计算得到的光斑质心方差也很小,此时已无法体现光斑的质心位置,而是噪声的质心位置,对于 16 × 16 像素的窗口,背景噪声的质心位置为 8.5 个像素,如图 8(a)。

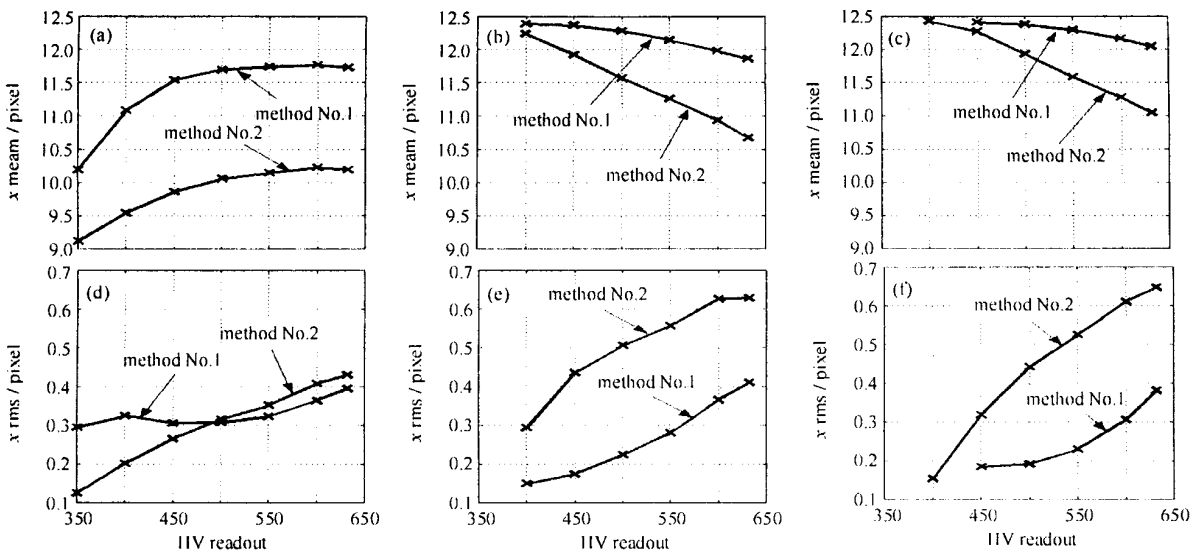


Fig 8 While different applied high voltage of image intensifier and different threshold, the average centroids and variance of spot image by means of method No. 1 and method No. 2. (a) (b) (c) are spot image average centroids; (d) (e) (f) are their variance.

(a) (d), (b) (e) and (c) (f) are due to no threshold, 150 ADU threshold, 250 ADU threshold on initial image respectively

图 8 像增强器施加不同的高压时,对采样的图像数据取不同的阈值((a) (d), (b) (e)和(c) (f)分别采用 0, 150ADU 和 250ADU),方法 1 和方法 2 计算得到的子孔径光斑质心位置((a), (b), (c))和方差((d), (e), (f))

### 3 ICCD 微光波前传感器对标准像差板的测量

利用现有的微光 ICCD 型 Hartmann-Shack 波前传感器,进行标准像差板的测量实验。首先用 Zygo 干涉仪对标准像差板进行测量,波面面型的峰谷值为 6.023 波长,均方根值为 1.4365 波长,此像差板的像差主要是离焦和像散。将此像差板放入光路中,在微光下(入射光子计数对每帧每子孔径是 102),调节像增强器的高压(高压读数为 562),采集了 1 000 帧数据,减除室内背景杂光和 CCD 读出背景(峰值约为 90ADU)进行计算。

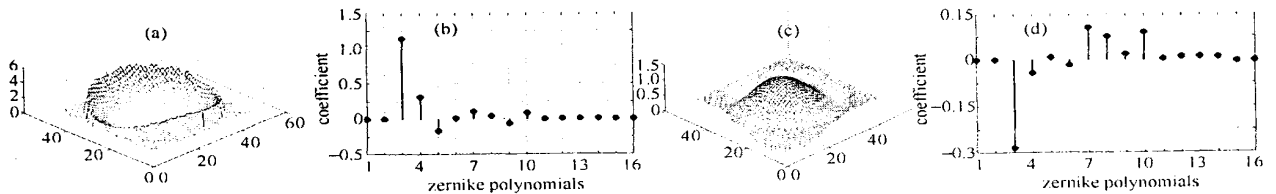


Fig 9 Measurement data of the aberrant plate tested with ICCD by means of method No. 2 (a) the 3D figuration;

(b) the coefficients of Zernike polynomials; (c) the error wavefront figuration and (d) the error coefficients of Zernike polynomials

图 9 用方法 2 测量计算得到的像差板波面。(a) 三维图像; (b) Zernike 多项式系数; (c) 波面误差图像; (d) 误差的 Zernike 多项式系数

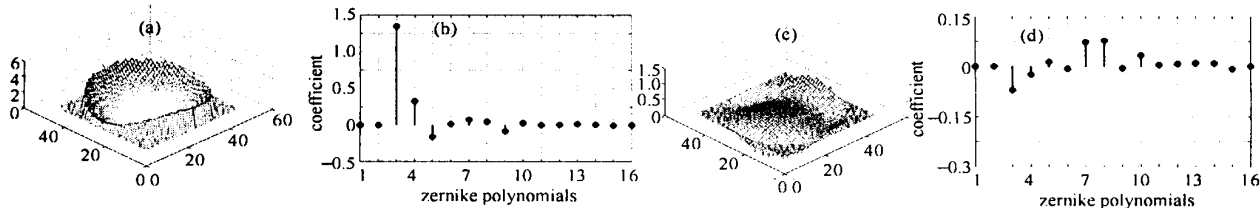


Fig. 10 Measurement data of the aberrant plate tested with ICCD by means of method No. 1. (a) the 3D figuration;

(b) the coefficients of Zernike polynomials; (c) the error wavefront figuration and (d) the error coefficients of Zernike polynomials

图 10 用方法 1 测量计算得到的像差板波面。(a) 三维图像; (b) Zernike 多项式系数; (c) 波面误差图像; (d) 误差的 Zernike 多项式系数

我们运用方法 1 和方法 2 对采集得到的图像数据进行像差复原, 得到 1000 个复原波面, 图 9 和图 10 分别是平均波面与像差板标准波面的残差的三维图以及 Zernike 系数的残差。利用方法 1 复原得到的波面的残余离焦量为- 0.075 波长, 而方法 2 得到的残余离焦量为- 0.3 波长, 两种方法对像散复原的残余量则差别不大。图 11 和图 12 分别是测量波面与标准波面的误差波面的每一帧的 rms 值和 PV 值序列以及它们的直方图分布, 表 2 是它们的测量值。从表 2 可以清楚地看出, 方法 1 与方法 2 相比, 测量复原的波面更接近真实波面, 而且相对真实波面的每一帧误差波面的起伏量也小。

表 2 测试像差板的波面误差的平均 rms 值和峰谷值

Table 2 Average rms value and peak-valley value in wavelength of tested error wavefront of aberrant plate

	rms value of error measurements		PV value of error measurements	
	expectation	variance	expectation	variance
by method No. 1	0.22	0.061	1.4	0.36
by method No. 2	0.425	0.084	2.3	0.47

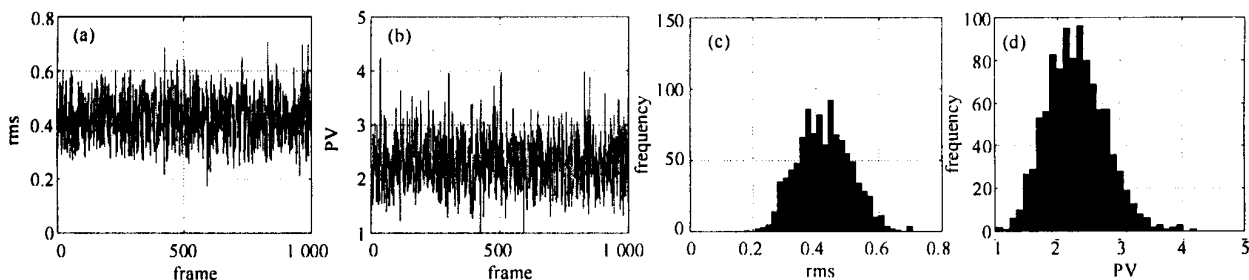


Fig. 11 Error wavefront tested by ZYGO of continuous 1000 frames by means of method No. 2

(a) rms value, (b) peak-valley value, (c), (d) the histogram of rms and peak-valley value respectively

图 11 用方法 2 测量计算得到的 1000 帧误差波面的 rms 值(a)和峰谷值(b), (c) (d) 分别是它们的直方图统计

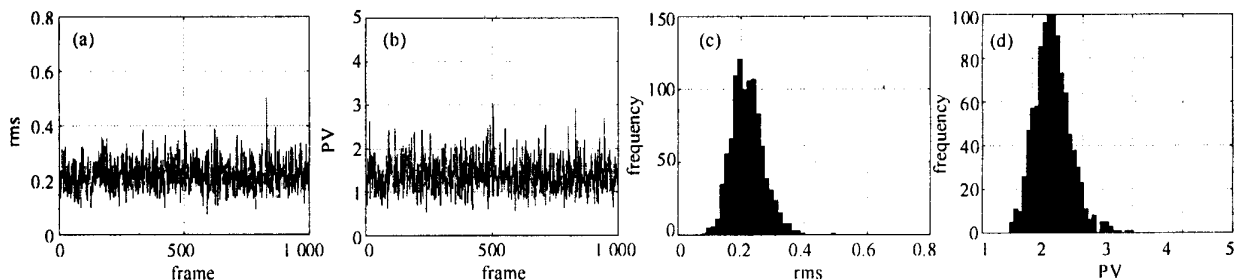


Fig. 12 Error wavefront tested by ZYGO of continuous 1000 frames by means of method No. 1

(a) rms value, (b) peak-valley value, (c), (d) the histogram of rms and peak-valley value respectively

图 12 用方法 1 测量计算得到的 1000 帧误差波面的 rms 值(a)和峰谷值(b), (c) (d) 分别是它们的直方图统计

### 4 结 论

本文分析了像增强器的光生背景噪声, 定义了光生背景噪声的系数, 用于定量分析像增强器的光生背景噪声大小。大量的实验结果分析表明, 像增强器的光生背景噪声呈现散粒噪声的特性, 它是由有效光信号寄生而

来的, 因此即使环境再好, 也无法避免这样的散粒信号, 而由于它呈现散粒噪声的特性, 因此很难采用阈值的方法将它去除。仿真和实验数据表明, 这种散粒噪声对小目标质心探测的影响非常大。本文提出了一种新的方法, 计算量比较小, 既可以保证质心探测和校正的实时性, 又可以大大减小这种散粒噪声的影响, 通过对实验数据的分析, 证明这种方法对减小微光小目标光斑质心误差探测是非常有效的。

### 参考文献:

- [1] Jiang W H, Li H G, Huang S F, et al. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm [A]. Proc of SPIE[C]. 1990, **1271**: 82—93
- [2] Li H G, Jiang W H. Application of H-S wavefront sensor for quality diagnosis of Optical system and light beam [A]. ICO-16 Satellite conference on active and adaptive optics[C]. ESO Proc, 1993, **48**: 369—376
- [3] Zou Y S. Electro-vacuum imaging device and its theoretical analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1989. 71—86
- [4] Shen F, Jiang W H. Thresholding method for improving accuracy of Hartmann wavefront sensor[J]. *Opto-Electronic Eng*, 1997, **6**(3): 1—8
- [5] Jiang W H, Xian H, Shen F. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor[A]. Proc of SPIE[C]. San Diego: 1997, **3126**: 534—544

## Effects of signal induced background (SIB) of image intensifier on centroid measurement of low-level-light target and the method of SIB noise suppression

SHEN Feng, ZHANG Xue-jun, JIANG Wen-han

(Institute of Optics & Electronics, the Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 350, Chengdu Shuangliu 610209, China)

**Abstract** The effects of signal-induced background (SIB) of image intensifier on low-level-light target detection are analyzed. The results show that SIB is a signal dependent noise, and presents shot-noise characteristics. It can't be eliminated by background removal using environment shielding or the threshold means. The SIB is harmful to centroid detecting of low-level-light target. A new method of centroid calculation is given to reduce SIB influence effectively.

**Key words:** image intensifier; signal-induced background; centroid detection