

光子计数成像技术及其应用*

曹根瑞 俞 信 胡新奇

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘 要 介绍光子计数实时图像采集实验系统, 其中的高亮度增益的光子成像头通过超强光力中透镜与高帧频电荷耦合器件(CCD)摄像机耦合; 分析和介绍了单光子成像模式下系统工作的受限条件和多光子工作模式下系统的主要综合性能指标——读出噪声的测定方法; 文中给出在自适应光学弱光波前传感中的应用、光子噪声分布规律以及光的波粒二象性实验验证等例子。

关键词 光子计数图像采集, 像增强器。

1 引 言

在诸如天文观测、自适应光学弱光波前传感器、拉曼效应和冷光发光等极弱光现象研究中, 通常已不可能把光学图像当作模拟量来处理, 而需要通过探测单个光子的成像位置并在图像采集卡中进行累积和数字化处理后才能获得物体的完整图像。其中最关键的基础技术就是光子探测及其坐标位置的确定。各国先后研究了几种不同类型的具有光子探测能力并能测定光子坐标的仪器。例如, 70年代英国首先研制成功了将四级级联磁聚焦像增强器通过光学系统与光导摄像管电视摄像机耦合而构成的早期的光子成像系统(IPCS)^[1], 80年代开发了采用微通道板像增强器的光子计数成像系统(MIC)^[2, 3]。日本滨松公司在80年代也研制了由三级微通道板像增强器作为光子计数成像头和四象限光子位敏传感器组成的光子计数图像采集系统(PIAS)^[4]。美国在80年代后期成功地发展了一种新型的多阳极微通道阵列(MAMA)式光子计数成像系统^[5, 6], 此系统具有功耗低、尺寸小、可靠性高等显著优点, 因此特别适用于空间技术研究。90年代初法国发展了一种利用高速数字处理器(DSP)实时探测光子坐标的光子计数成像系统^[7, 8]。

上述各类光子计数成像系统的共同点是都采用像增强器(II)作光电转换和放大, 但光子质心坐标的探测方法却各不相同, 分别采用了光导摄像管、电荷耦合器件(CCD)、四象限位敏传感器、多阳极阵列和专用数字信号处理器等。

考虑到工程上的可行性、经济性和灵活性, 以及像增强器和 CCD 技术均已高度发展这一重要因素, 作者采用像增强 CCD 技术建立了光子计数实时图像采集系统, 分别用于自适应光学弱光波前传感器^[9]、生物光学、光的波粒二象性以及光子噪声分布等研究。本文将具体介绍此系统的构成、性能分析和检测以及实际应用例子等。

* 国家 863 高技术发展计划资助课题。

收稿日期: 1994 年 11 月 18 日; 收到修改稿日期: 1995 年 3 月 3 日

2 系统装置

采用像增强 CCD 技术的光子计数实时图像采集系统原理框图如图 1 所示。其中带有制

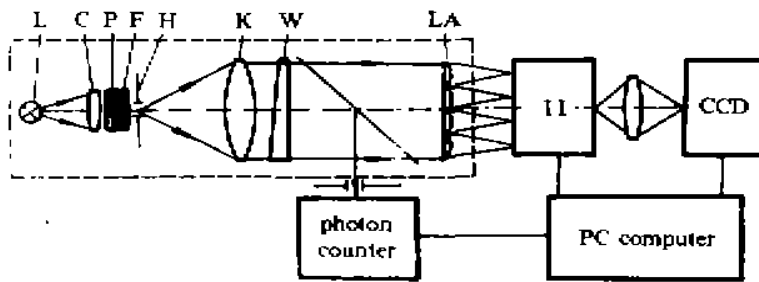


Fig. 1 Schematic diagram of the photon counting image acquisition set-up

L- white light source, C- condenser lens, P- polarizers, F- spectral corrective filter, H- pinhole, K- objective of collimator, W- optical wedge (for introducing wavefront tilt), LA- lenslet array

冷系统的双微通道板像增强器具有增益可调($10^3 \sim 10^7$)功能,既可以在多光子模拟成像模式下工作,又可在单光子计数成像模式下工作。像增强器荧光屏上的图像通过一个中继透镜组耦合到高帧频(840 frame/sec)CCD 上。为了使用方便与灵活,中继透镜组由两个无限共轭的物镜构成,其中前物镜采用 F 0.75 超强光力物镜,以提高光耦合效率。用 486-PC 计算机进行系统控制和图像数据处理。图中虚线框内所示为一弱光目标发生器(其亮度和光谱构成可以调节和修正)和作哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)

波前传感器用的阵列透镜。它们可以被替换成其它研究对象。图中下部所示的光子计数器则用于标定进入光子计数成像系统中的光子速率。

3 系统性能分析与检测

3.1 系统的标定

像增强器既可在多光子成像模式下工作,也可在单光子成像模式下工作,所以必须分别分析和检测其工作性能。为了准确知道实际进入光子计数成像系统的光子速率,可事先分别用微照度计和光子计数器作标定。

由于光子计数器探测到的光电子通量不仅与光通量有关,而且在很大程度上取决于光源的光谱功率分布、所含光学系统的光谱透射比以及光电器件的光谱灵敏度,因此必须确定光通量与光子通量及光电子通量之间的关系。通过光学系统进入光子计数器的总光通量 Φ 及其对应的光子通量 R_{ph} 分别为:

$$\Phi = 683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C P_L(\lambda) T(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (\text{lm}) \quad (1)$$

$$R_{ph} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C P_L(\lambda) T(\lambda) N_w(\lambda) d\lambda \quad (\text{photon/s}) \quad (2)$$

式中 $P_L(\lambda)$ 为光源的相对光谱功率分布, C 为 $P_L(\lambda)$ 的系数, $T(\lambda)$ 为光学系统的光谱透射比, $V(\lambda)$ 为光谱光视效率, $N_w(\lambda) = 5.034 \times 10^{18} \lambda$ (光子/J, λ 以 μm 为单位)^[10]。因为光源的绝对光谱功率分布很难准确测定,所以(1)式和(2)式所示的光通量 Φ 和光子通量 R_{ph} 的绝对值也就很难直接计算,但是光源的相对光谱功率分布 $P_L(\lambda)$ 、光学系统的光谱透射比 $T(\lambda)$ 可以事先准确测定,所以它们的比值可按下式算出:

$$K_{ph} = \frac{R_{ph}}{\Phi} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C P_L(\lambda) T(\lambda) N_w(\lambda) d\lambda \left/ \left[683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C P_L(\lambda) T(\lambda) V(\lambda) d\lambda \right] \right. \quad (\text{photon/lm}) \quad (3)$$

因为总光通量 Φ 可利用微照度计直接测定，所以总光子通量 R_p 也就可以求得。考虑到光电子通量不仅与进入光子计数器的光子通量有关，还与光电探测器的光谱量子效率 $\eta(\lambda)$ 或光谱灵敏度 $S(\lambda)$ 有关，所以光电子通量的计算公式需改写为：

$$R_e = \Phi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C P_L(\lambda) T(\lambda) N_w(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda \left/ \left[683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C P_L(\lambda) T(\lambda) V(\lambda) d\lambda \right] \right.$$

$$= 0.907 \times 10^{13} EA \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_L(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) d\lambda \left/ \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_L(\lambda) T(\lambda) V(\lambda) d\lambda \right] \right. \quad (\text{photoelectron/s}) \quad (4)$$

式中 $\Phi = EA$ 为进入光子计数器的光通量， E 为由微照度计测出的照度值(流明)， A 为光子计数器的通光面积 (mm^2)， $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为 (400~760) nm， $\lambda_3 \sim \lambda_4$ 取决于光子计数中光电倍增管的光谱响应范围。利用(3)式和(4)式可以分别计算出与不同光通量 Φ 或照度 E 的测量值相对应的光子通量 R_p 和光电子通量 R_e 。同时也可以利用光子计数器直接测量光电子通量 R_e 并与计算值相比较。实验表明两者颇为一致^[11]。图 2 所示为用微照度计测得的照度值 E 与由光子计数器测得的对应光电子通量 R_e 的关系曲线。由图看出， E 与 R_e 之间有着良好的线性关系，因此可以确信利用光子计数器标定的进入光子计数器成像系统的光子通量值，并可进一步据此评定系统的工作性能。

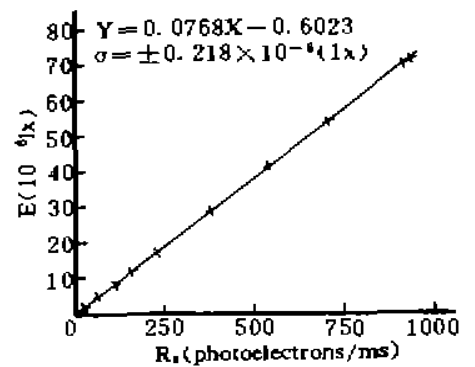


Fig. 2 The relationship between the illuminance E measured by microphotometer and its corresponding photoelectron flux R_e measured by photon counter. The illuminated area is ϕ 5 mm and the sample time is 1 ms

3.2 系统工作的受限条件

当要求光子计数成像系统在单光子成像模式下工作时，由于系统的时间分辨率和空间分辨率都是有限的，因此允许进入系统的最大光子速率将受到一定限制。

3.2.1 从时间域考虑

根据光子散粒噪声在时间上服从泊松分布规律可导出像增强器光阴极在 Δt 时间内发射 n 个光电子的概率密度为：

$$P(n, \Delta t) = \frac{(R_e \Delta t)^n \exp(-R_e \Delta t)}{n!} = \frac{U^n \exp(-U)}{n!} \quad (5)$$

式中 R_e 为平均光电子通量(opto-electron/s)； Δt 为采样时间。在本系统中像增强器荧光屏的余辉时间 ≤ 0.1 ms，CCD 摄像机的帧频为 840 frame/s，因此取 Δt 为 1.2。 $U = R_e \Delta t$ 为在 Δt 采样时间内采得的平均光电子数，或称为计数强度。由(5)式可求出系统在 Δt 时间内保证只发生一个光子事件和不发生光子事件的总概率，即系统保证工作在单光子计数状态的概率为：

$$P = P(0, \Delta t) + P(1, \Delta t) = \exp(-U) + U \exp(-U) = (1 + U) \exp(-U) \quad (6)$$

由(6)式可求出不同计数强度下的单光子事件概率值。例如当 $U = 0.2$ ，对应的概率值为 0.98。如以此值为确定单光子事件的标准，则采样速率为 840 frame/s 情况下为保证系统处在单光子计数成像工作模式所允许的系统任意点处的最大平均光电子通量为： $R_{e, \max} = U/\Delta t = 0.2/0.0012 = 167$ (optoelectron/s 或 CPS)。

3.2.2 从空间域考虑

系统中单光子事件在像增强器荧光屏上产生的光斑直径约为 0.06 mm，所以从空间意义上看，当出现单光子事件的概率为 0.98 时，所对应的单位面积内每秒钟计得的单光子事件数应约为 $N_{max} = \frac{R_{s,max}}{S} = \frac{167}{0.03^2 \pi} = 5.9 \times 10^4$ (cps/mm²)。

这也就是为保证系统处在单光子计数成像工作模式而对进入系统的单位面积内的最大平均光电子通量的限定值。至于允许的最小值 N_{min} 则取决于系统的暗噪声，实验测定此值为 0.3 (cps/mm²)。

不同计数强度下本系统实测的光子事件的概率密度分布如图 3 所示。图中各曲线为与各组测量值对应的泊松理论分布曲线。由图可看出，光子噪声的泊松分布规律在本系统中得到了很好的验证。

至于系统在多光子成像模式下的工作性能，主要取决于系统的读出噪声。图 4 所示为本系统读出噪声 σ ，与对应增益 G 的实测结果。当系统的增益 G 和像增强器的致冷温度变化时，其读出噪声将随之而变^[12, 13]。

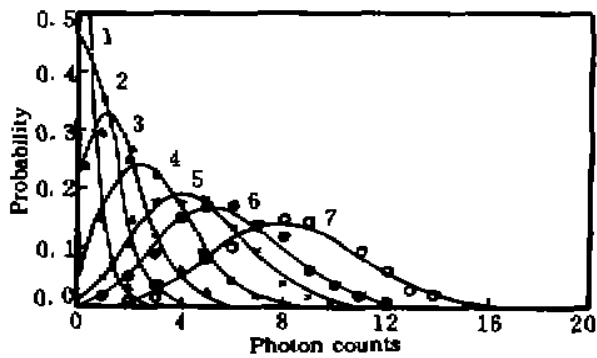


Fig. 3 Experimental results of Poisson distribution of photon noise for different mean photons

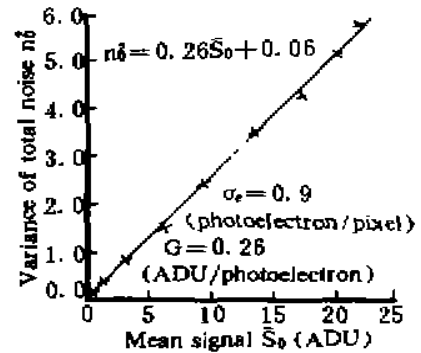


Fig. 4 Experimental results of read out noise σ and gain G of system operated in multiphoton imaging mode. (ADU-A/D converter unit)

4 实验结果

图 5 所示为本系统用于弱光哈特曼-夏克波前传感器时，分别在多光子和单光子模式下工作时测得的波前畸变探测误差与每个子孔径内接收到的光电子数的关系曲线。由图可看出，单光子工作模式下的波前探测精度明显高于多光子工作模式，这是因为在单光子工作模式下系统的读出噪声 σ ，将趋近于零，系统在非常接近于光子噪声受限的理想状态下工作。

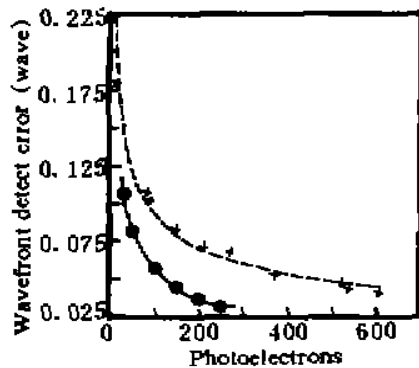


Fig. 5 Experimental results of wavefront sensing errors versus the photon counts per subaperture, when the system is operated at multiphoton (dashed line) or single photon (solid line) imaging mode respectively

本系统在光子计数弱光水平下的杨氏干涉实验结果如图 6 和图 7 所示，当系统仅采集一帧图像时在监视器上只能看到几个随机出现的代表到达干涉场的光子的亮点，随着积累图像帧数的增加，干涉花样显得越来越清晰，光的波粒二象性得到了形象生动的验证。

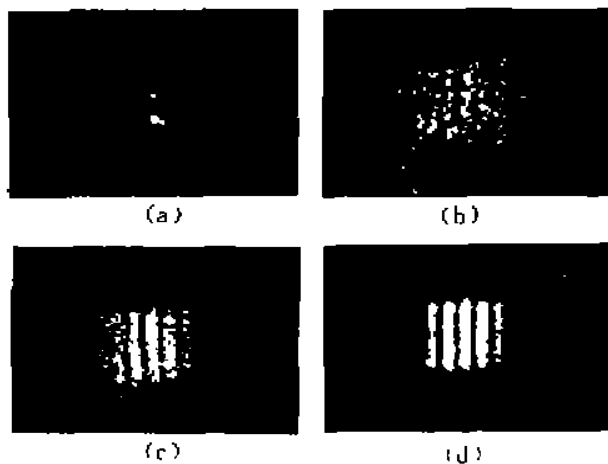


Fig. 6 Interference patterns summarized with different number of frames, (a) one frame, (b) 50 frames, (c) 500 frames, (d) 10000 frames

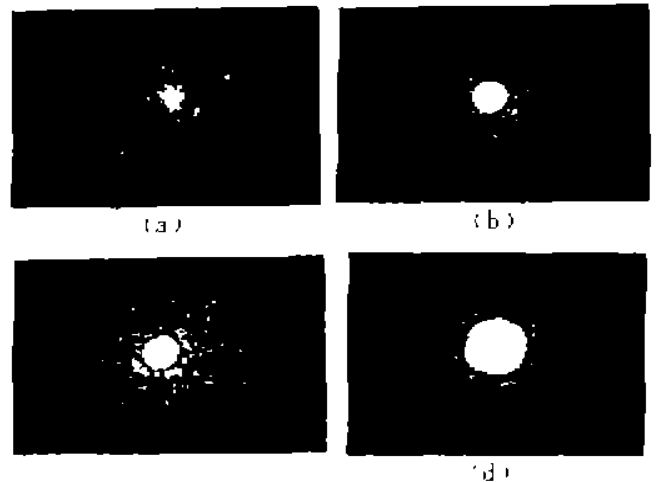


Fig. 7 Diffraction patterns summarized with different number of frames, (a) 50 frames, (b) 500 frames, (c) 5000 frames, (d) 50000 frames

5 结 论

1) 近一、二十年发展起来的光子计数成像技术是研究弱光现象的有力工具,在自适应光学弱光波前传感、拉曼效应、生物光学、空间光学等弱光研究领域有着广泛的应用前景。

2) 本文介绍的以像增强器和 CCD 技术为基础的光子计数实时图像采集系统具有使用灵活方便、通用性强的显著特点,而且随着像增强器和 CCD 技术的不断发展,本系统可以从中不断受益。

参 考 文 献

- [1] A. Bokserberg, D. E. Burgess, Image photon counting system for optical astronomy. *Adv. Electron and Electron Phys.*, V33 B, Academic Press Inc., New York, 1972: 835~849
- [2] J. L. A. Fordham, D. A. Bone, P. D. Read *et al.*, Astronomical performance of a micro-channel plate intensified photon counting detector. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 1989, 237: 513~521
- [3] R. W. Aircy, T. J. Norton, B. L. Morgan *et al.*, DQE enhancement of MCP intensifiers for astronomy results of the MIC I programme. *Proc. SPIE*, 1990, 1235: 338~346
- [4] Yutaka TSuchiya, Eiji Inuzuka, Takehiro Kurono *et al.*, Photon counting image acquisition system and its applications. *J. Imaging Technol.* 1985, 11(5): 215~220
- [5] J. G. Timothy, J. S. Morgan, D. C. Slater *et al.*, MAMA detector systems; A status report. *Proc. SPIE*, 1989, 1158: 104~117
- [6] D. B. Kastle, J. S. Morgan, High resolution decoding of multi-anode microchannel array detector. *Proc. SPIE*, 1991, 1549: 52~58
- [7] J. Sebay, G. Lelievre, Wavefront sensing and deconvolution of turbulence-degraded photon-counting images. *Proc. SPIE*, 1993, 1982: 368~372
- [8] F. Fidouch, A. Blazit, G. Lelievre, Real-time photo centroid detection for photon counting and wavefront sensing camera. *Proc. SPIE*, 1993, 1982: 288~292
- [9] Genrui Cao, Xin Yu, Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object. *Opt. Engng*, 1994, 33(7): 2331~2335
- [10] 铃木守, 楼井健二郎, 菊地启介等, 电子技术综合研究所报告(日本), 第 715 号, 1970

- [11] 曹根瑞, 俞 信, 顾若炜等, 光子噪声受限的波前传感器的实验研究. 北京理工大学学报, 50 周年校庆专辑, 1990, 10(2): 28~36
- [12] S. Marcus, R. Nelson, R. Lynds, Preliminary evaluation of a fairchild CCD-211 and a new camera system. *Proc. SPIE*, 1979, 172: 207~231
- [13] Genrui Cao, Xin Yu, Study on the Hartmann-Shack wavefront sensor. *Proc. SPIE*, 1992, 1752: 112~119

Photon Counting Image Acquisition Technique and Its Applications

Cao Genrui Yu Xin Hu Xinqi

(*Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*)

(Received 18 November 1994; revised 3 March 1995)

Abstract An experimental set-up of photon counting real-time image acquisition system is introduced. Wherein a photon image head (an image intensifier with high radiant emittance gain) is coupled with a high frame rate CCD camera by a super powerful relay lens. The restrictions on luminous emittance of object are analysed for single photon imaging mode. The methods of determining readout noise —— the major comprehensive specification of system for multiphoton imaging mode is introduced. The application examples of system in adaptive optics wavefront sensor operated with a faint object, and in experimental study on the photon noise distribution, the optical wave-particle duality are presented.

Key words photon counting image acquisition, image intensifier.