

噪声对光子计数成像质量的影响

朱宇峰, 向世明

(西安应用光学研究所 第二研究室 微光夜视技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 随着微光像增强技术和弱光成像器件的发展,光子计数成像技术也得到了快速发展并已在军事、天文学、物理学、化学和生物学等领域里得到了广泛应用。主要介绍了光子计数成像的工作原理、特点及应用,探讨了噪声对光子计数成像质量的影响。

关键词: 光子计数成像;像增强器;噪声

中图分类号: TN223

文献标志码: A

Effect of noise on photon-counting imaging quality

ZHU Yu-feng, XIANG Shi-ming

(Key Laboratory of Low-light-level Technology of COSTIND,
Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The photon-counting imaging technique, which can detect and intensify the faint signal under the low-light-level condition, has been widely used in the military, astronomy, physics, chemical, biology etc. fields with the development of LLL image intensification technology and weaklight imaging elements. Introduced The working principle, characteristic and application of the photon-counting imaging are introduced. The effect of the noise on the photon-counting imaging quality is discussed.

Key words: photon-counting imaging; image intensifier; noise

引言

伴随着国防建设和科学研究的需要,微弱光探测技术越来越受到人们的重视。利用微光像增强技术可以实现照度很低时的观察和分析。第一代和第二代微光仪器的最低工作照度可达到星光级(10^{-3} lx)水平;采用GaAs光阴极的第三代微光仪器,可在阴云密布的夜空下(10^{-4} lx)工作;一代、二代和三代微光管的等效背景照度为($2 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-7}$)lx,相当于夜空天光的二等星照度。对于更低照度情况下的应用,如天文观察、弱光波前传感器、拉曼效应和冷光发光等极弱光现象的研究,这些夜视仪器就满足不了需要。军事上也极需要探测微弱光,例如导弹预警(或告警)和卫星侦察。在这些探测中,已不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积累和处理后才能获得完整的图像。这些需求促成了图像光子计数成像技术的诞生和发展。

各国先后研究了几种类型的具有光子探测能力的仪器。例如,20世纪70年代英国首先研制成功了将四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成的早期光子成像系统^[1]。20世纪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^[2-3]。日本滨松公司在20世纪80年代将三级微通道板(MCP)像增强器作为光子计数图像采集系统^[4]。美国在20世纪80年代后期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],20世纪90年代初期法国发展了一种利用高速数字处理器实时探测光子计

数成像系统^[7]。

1 光子计数成像工作原理

根据光强度与光电探测器时间-空间特性的不同关系,光电探测可分为 2 种探测模式:模拟探测模式(测量的光强是多个光子叠加的能量)和单光子计数模式(输出信号是被计数的某个光子)。如果光电探测器有较好的时间-空间特性,用光子计数统计可实现微弱光探测。常规的弱光成像器件没有单光子计数模式,所以探测不到极微弱光信号。

入射到光电探测器上的光束是由大量光子组成的光子流。很多光子叠加在一起探测到的光强称为模拟方式。当入射光功率逐渐减弱时,光电子脉冲的叠加逐渐减弱,探测器的输出直流电平逐渐下降,光电子脉冲愈来愈分离。当入射光功率减小到一定程度以下时,光电探测器上的光电子脉冲呈现出不连续的随机分布。继续减弱信号,直至单光子探测,这种方式称为计数方式。若能在探测单个光子的同时确定其空间位置,即进行二维光子计数探测,这便是光子计数成像的基础。

图 1 显示了一个带两级微通道板像增强器的工作原理。微通道板的通道有电子倍增功能,当光学图像聚焦在像增强器的光阴极时,光子就激发出光电子。光电子图像被聚到微通道板表面,在两级微通道板内,光电子图保持位置信息不变,信号幅度被放大后,撞击到荧光屏上。经过这些过程,单个光子亦能在像增强器上产生大约 10^8 个光子的输出。单个光子产生的高密度光斑,能容易被后继成像器件探测到,这样就实现了单光子成像。

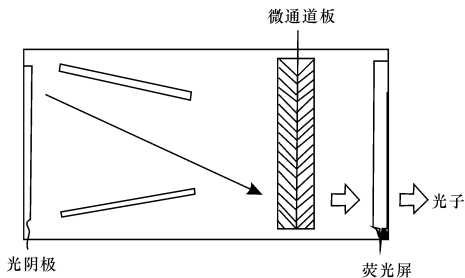


图 1 光子计数成像工作原理

Fig. 1 Operating principle of photon-counting imaging

2 光子计数成像特点

光子计数成像的主要特色是高光子数增益 ($10^6 \sim 10^7$)、宽动态范围 (10^6)、高输出亮度 (\geq

400 cd/m^2)、快响应速度 ($\leq 1 \text{ ms}$)、单光电子脉冲高度分布、小畸变和高空间分辨率。

采用光子计数成像技术可使灵敏度提高 3 个以上数量级。例如光电倍增管(PMT)直流工作,灵敏域为 10^{-14} W ($10^4 \sim 10^5$ 光子/s);锁相放大灵敏域为 10^{-16} W ($10^2 \sim 10^3$ 光子/s);光子计数灵敏域为 10^{-19} W ($100 \sim 101$ 光子/s)。同样,把微光像增强器耦合到高帧频 CCD 上,工作在光子计数模式下,可将微光摄像管的最低工作照度由 10^{-4} lx 降低到 10^{-8} lx 。这样就可以探测到数百千米外的目标传来的极微弱图像。

3 单光子脉冲工作模式条件

像增强器可以以多光子成像和单光子成像 2 种模式工作。单光子计数模式应具备以下条件: 1) 输入光信号如此之弱,以致于可把它们看成是一个一个可计数的光子事件; 2) 用于光子计数模式工作的像增强器必须是特制的,须采取各种降低噪声的措施(如阴极制冷、屏蔽、电子清刷和老练、消除器件内杂散光等),要求其暗计数速率很低 ($\leq 10^2$ 数/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$); 3) 像增强器输出必须呈单光子 PHD 特性,即高斯单光子分布(见图 2),才能有利于后续光子计数的电子学处理。

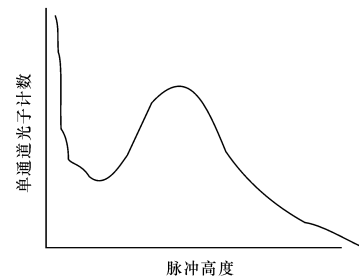


图 2 单光子脉冲高度分布

Fig. 2 Height distribution of single-photon pulse

4 MCP 像增强器噪声的抑制

4.1 提高器件探测效率

1) 采用 GaAs 光阴极,提高第一光敏面的量子探测效率,延伸响应长波限,改善其与星光光谱的匹配系数,提供高输入信噪比;

2) 通过增大 MCP 输入开口面积比,蒸镀高二次发射系数 MgO 膜,优化 MCP 斜切角和输入电子能量等措施,提高 MCP 对入射光电子数的利用。

3) 在不恶化信噪比特性情况下,优化 MCP 单

丝长径比,提高电子增益和输出电流,进而扩大了MCP的动态范围。

4) 采用高效、短余辉荧光屏,提高电光转换效率和响应速度,以适应末端高帧速CCD所需的高输入亮度和短弛豫要求。

4.2 抑制噪声的措施

1) 制冷。把器件整体制冷,可大大降低光电阴极和MCP中的热噪声。

2) 屏蔽。把器件放置于铅盒中,可屏蔽掉实验室水泥墙壁中放射性元素 ^{40}K 对MCP引起的辐射噪声。

3) 选择无放射性的MCP材料。MCP体材料及微光管其他元件和材料应不含 ^{40}K 和 ^{87}Rb 等放射性元素,这样可以抑制辐射噪声。

4) 对MCP/荧光屏组件进行彻底的电子清刷和老练。在 10^{-7}Pa 下,对MCP/荧光屏组件进行电子清刷,可较彻底地消除MCP内壁的残余气体,防止正离子产生,使器件提前度过增益不稳定时期。

5) MCP输入面镀制防离子反馈膜。常用 Al_2O_3 或 SiO_2 防离子反馈膜,以阻挡MCP电子倍增过程中产生的正离子反馈回光阴极,从而消除高能区离子闪烁噪声。

6) 弯曲MCP。防离子反馈膜的副作用是损失了部分入射电子能量,降低了MCP对光电子的收集效率。故可采取无 Al_2O_3 膜弯曲通道的MCP,减少离子动量,从而减小离子反馈至光阴极的概率。

7) 改进器件设计和工艺,消除尖端放电源。为消除光阴极、MCP和荧光屏上各自的尖端放电点,应合理设计器件结构,改进工艺,尽量减少碱金属,尤其是Cs原子对光阴极部位的污染,适当增加近贴成像距离以适当降低场强。

8) 器件内杂散光之消除。荧光屏镀黑铝、增大MCP斜切角、弯曲MCP、“人”字形或“之”字形多块MCP级等均有利于器件内部杂散光的消除,达到改善图像对比度。

5 光子计数成像的应用

5.1 CCD型光子计数成像系统

随着CCD技术的发展,已研制出读出噪声很小的低噪声、高量子效率、高帧频的面阵CCD,所以CCD直接用于极微弱光的实时探测在很多领域都得到了应用。

陈天明等人采用超微弱图像的统计处理方法,在他们自行研制的光子计数CCD成像系统上获得

了植物(绿豆芽)、动物(昆明鼠)和人手的光子图像^[8]。朱延宾、郭周义等人也利用光子计数CCD成像系统,研究了光子计数分布与生物光子辐射特性的联系^[9]。北京理工大学的王苏生,利用显微光子计数成像系统进行生物医学方面的研究^[10]。邱耀华用光子计数成像系统对中等亮度和较暗的天文目标进行观测,获得了大量数据和图像^[11]。北京理工大学的曹根瑞等人用CCD型光子技术成像系统作为波前传感器进行了大量实验研究,分析了该传感器的性能。他们还利用CCD光子计数成像系统验证了光子噪声分布规律以及波粒二像性。Chet B. Opal等人采用电子轰击型CCD光子计数成像技术进行紫外图像探测。

5.2 MaMa型光子技术成像系统

目前MaMa型光子技术成像系统也已经进入应用阶段。MaMa探测系统除了实验室研究外,主要用于空间大气观测和空间望远成像摄谱仪。例如,美国二代MaMa(256×1024像素)和三代MaMa(224×960像素)探测器已在实验室和地基望远镜中使用;美国三代MaMa(360×1024像素)探测器,工作在远紫外波段,用在欧洲空间站上用于空间大气观测和空间望远成像摄谱仪。

6 结束语

近30年来,光子计数成像技术已成为微弱光探测的有力工具。除上述应用外,光子计数成像系统还可应用于医疗诊断、材料分析和喇曼光谱分析等领域。此外,光子计数成像技术在导弹预警(或告警)和卫星侦察等领域也有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] BOKSENBERG A., BURGESS D E. Image photon counting system for optical astronomy [J]. Adv. Electron and Electron Physics, 1972, 33B: 835-849.
- [2] FORDHAM J L A. Astronomical performance of a micro-channel plate intensified photon counting detector [J]. Mon. Not. R. Astr. Soc., 1989, 237: 513-521.
- [3] AIRCY R w. DQE enhancement of MCP intensifiers for astronomy results of the MIC II Programme [J]. SPIE, 1990, 1235: 338-346.
- [4] TSUCHIYA Y. Photon counting image acquisition system and its applications [M]. J. Imaging Technol., 1985, 11: 215-220.
- [5] TIMOTHY J G, MORGAN J S. MaMa detector

system; a status report [J]. SPIE, 1989, 1158: 104-107.

- [6] KASLE D B, MORGAN J S. High resolution decoding of multi-anode microchannel array detector [J]. SPIE, 1991, 1594: 52-58.
- [7] SEBAY J, LELIEVRE G. Wavefront sensing and deconvolution of turbulence-degraded photon-counting images [J]. SPIE, 1993, 1982: 368-372.

- [8] 陈天明, 俞信, 王苏生. 超微弱生物发光图象的统计处理方法 [J]. 光学学报, 1996, 16(8): 1152-1156.
- [9] 朱延彬, 郭周义. 光子计数分布与生物光子辐射特性 [J]. 光学学报, 1999, 20(1): 46-50.
- [10] 王苏生. 显微光子计数成像系统 [M]. 光学学报, 1999, 20(8): 30-34.
- [11] 邱耀辉, 刘忠, 卢汝为. 时间分幅型二维光子计数斑点像探测系统 [J]. 光学学报, 2000, 20(1): 22-26.