

采样时间对光子计数图像的影响

尹丽菊¹, 宋吉江¹, 陈钱², 盛翠霞¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049;

2. 南京理工大学近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘要: 夜暗环境下,为了弥补人眼在能量、光谱和分辨能力等方面的局限性,利用雪崩光电二极管作为探测元件构建了光子计数成像平台。借助该平台设置环境照度为 10^{-4} lx,采样时间分别取10 ms、2.6 ms和780 μ s,探测到了目标采样点的光子数,从而得到了三组反映目标特征的光子计数图像序列。根据对探测目标判断的程度,应用多帧累加处理方法,可以在保证成像平台具有较高帧频的条件下,选择合适的累加帧数以实现目标不同等级的探测。

关键词: 光电探测; 光子计数; 微光成像; 雪崩光电二极管

中图分类号: V271.4; TN29

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2013)11-0047-05

Impact of Sampling Time on Photon Counting Image

YIN Liju¹, SONG Jijiang, CHEN Qian², SHENG Cuixia¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to compensate for the human visual limitations in energy, spectrum and resolution under weak light environment, the avalanche photodiode (APD) was used to establish a photon counting imaging experimental platform. Under the condition that the set ambient light illumination was 10^{-4} lx, the sampling periods were respectively 10 ms, 2.6 ms and 780 μ s, three groups of the photon counting image sequences, which could demonstrate the target characteristics, were obtained. The technique of multi-frame accumulation was applied to the target detection according to the different detection requirements. The appropriate number of the frames can be selected to ensure higher frame frequency.

Key words: electro-optical detection; photon counting; low light level imaging; avalanche photodiode

0 引言

白天状态下景物照度在数千 lx 至 10^5 lx 之间,为人眼视觉提供了可以获得清晰景物图像的良好条件。但是在夜暗环境中仅存在少量的自然光,如月光、星光、大气辉光等,它们和太阳光比起来十分微弱,最大只有白天的百万分之一,所以称为微光,此时,人眼功能受到很大限制,无法满足观察需要。

为了在黑暗环境中不用照明也能看清周围景物,使人眼的接收能力得以扩展,人类在探索和研究光电效应的进程中产生和发展了微光成像技术。该技术

直接利用微弱的自然光照明,由微光成像器件将来自目标的人眼不能或不易看见的反射辐射光进行光电转换和增强,处理成有足够亮度和清晰度的人眼可见图像。从20世纪60年代以来,微光成像技术仍以真空光电器件像增强器作为主流方案。虽然真空微光成像技术比较成熟,但是该类器件性能老化快、易受电磁干扰等固有缺陷至今难以克服,特别是其颗粒噪声和固定图案噪声限制了真空器件的极限探测能力。在入射光的照度很低,以至于以离散的光子形式存在,同时,所观察目标的周围环境中还有大量的噪声和干扰的情况下,为了实现对目标的探测,利用具有高增益的光电探测手段增强入射光子,同时抑制目标周围环境噪声,测出单位时间内体现目标信息的光电子数,通过目标中光电子数的差异恢复出目标图像,该图像称为光子计数图像^[1]。为得到光子计数图像所应用的技术称为

收稿日期:2012-12-20

修回日期:2013-01-19

基金项目:山东理工大学博士基金(412009)

作者简介:尹丽菊(1972—),女,山东淄博人,博士,研究方向为光电成像技术。

光子计数成像技术^[2]。

鉴于光子计数成像技术的超高灵敏度在军事、高速通信、光谱学、荧光探测和生物医学等领域具有重要用途,很多国家都投入了大量人力和物力开展这方面的研究。其中,美国国防部和美国空军一直资助林肯实验室进行适用于弹道导弹防御的三维成像技术,其核心技术就是基于雪崩光电二极管(APD)阵列的三维激光成像雷达系统^[3]。国内针对 APD 在微光成像领域的应用研究很少,只有少量综述性论文^[4-5]。为此,开展基于 APD 的光子计数成像研究具有重要的现实意义和应用价值。

1 光子计数成像实验平台

1.1 光子计数成像原理

如图 1 所示,为了满足微光条件下光子计数成像和器件工作的需要,光子计数成像系统采用具有单光子探测能力的光电转换器件,以门控工作方式对目标光场在时间、空间上进行高精度采样,以此把有效时间分成一组离散的时间间隔,得到采样后的二维数字矩阵。该矩阵反映了采样点对应的光子计数值,再将多次采样的信息重组和计算^[6],得到目标的光子计数图像。

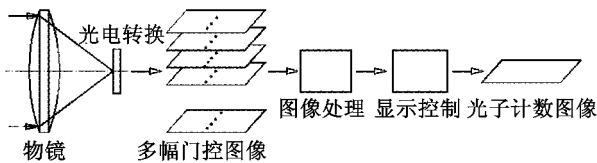


图 1 光子计数成像系统原理图

Fig. 1 Schematic of the photon counting imaging system

1.2 APD 的工作模式

在光子计数成像过程中,光电转换器件作为核心探测元件,必须具有单光子的探测能力。

当 APD 的偏置电压高于击穿电压时,APD 工作于盖革模式^[7]。如果有一个光子被吸收,进入耗尽层的光生载流子将被电场加速并达到饱和和漂移速度,当高速运动的光生载流子与晶格原子碰撞时,就有可能把原子最外层的价电子激发出来,产生电子-空穴对。新产生的电子-空穴对又在电场作用下加速,与晶格原子碰撞产生第三代电子-空穴对。如此继续下去,势垒区内载流子数目按照指数级数剧增,APD 的增益迅速增加并产生持续不断的雪崩电流。因此,工作在盖革模式下的 APD 具有很高的灵敏度,可以作为单光子探测元件。

1.3 光子计数成像实验平台

光子计数成像实验平台如图 2 所示。计算机作为参数输入设备与控制器配合完成二维导轨的运动和 APD 探测器工作状态的控制。

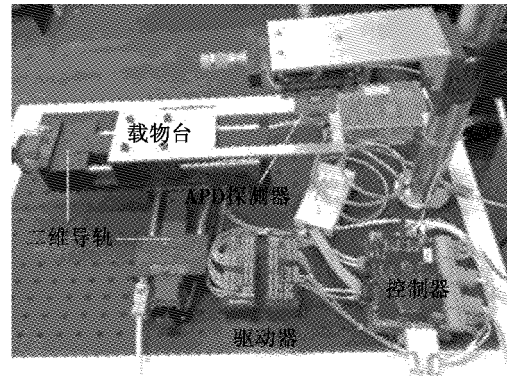


图 2 光子计数成像实验平台

Fig. 2 Photon counting imaging experimental platform based on APD

平台中采用的 APD 为 CMOS 工艺制造的具有薄倍增层结构的平面型 APD。因为载流子是在 APD 很薄的倍增层内完成电子倍增过程,所以倍增过程持续时间短、载流子运动距离近,很难受到磁场等因素的干扰。同时,雪崩效应产生的高增益使得 APD 不需要通过二次电子发射来完成光电子的倍增,因此,其工作电压低($V_{opt} < 35 \text{ V}$),功耗较小^[8]。

将光子计数成像实验平台置于暗箱内获得低照度测试环境。载物台上放置被测目标(一幅图像)。目标随着二维导轨的移动而被逐行逐列采样。目标反射的光信号经过掩模板,入射到 APD 探测器上。利用 APD 的碰撞电离效应使吸收的光子产生出增强的光电流。该电流经后续电路处理、读出后产生光子计数脉冲,最终由数据采集单元将光子计数脉冲进行采集和存储。光子流量与光子计数脉冲的个数成正比,目标反射的光强越大,得到的光子计数脉冲值也越大;反之亦然^[9];所以可以根据光子计数值作为微弱光环境下光子探测的依据。最后利用图像处理方法获得反映目标的光子计数图像。

2 多帧累加方法用于光子计数图像

所观察目标的环境照度太低,会导致目标能量小,噪声大,图像信噪比降低。对静态的图像序列,利用各帧信号的相关性和噪声的不相关性,采用序列图像多帧累加技术,可大大改善图像的信噪比,提高清晰度^[10]。

一幅有噪声的图像 $g(x, y, t)$ 可认为是由原始图像 $f(x, y, t)$ 和噪声 $n(x, y, t)$ 叠加而成,即

$$g(x, y, t) = f(x, y, t) + n(x, y, t) \quad (1)$$

光子计数图像的多帧累加就是将不同时刻两帧或多帧图像对应像素点的光子计数值相加后得到的图像。 m 帧图像进行累加,得到图像 $a(x, y, t)$ 。

$$a(x, y, t) = \sum_{i=1}^m g_i(x, y, t) \quad (2)$$

由于物体受激辐射是具有量子性的过程,所以在稳定受激条件下,每瞬间辐射的光子流密度具有量子性的随机涨落。辐射光子流密度的平均值是确定的,因此,产生的辐射强度是围绕一个确定的平均值而起伏。假定含有噪声图像中原始图像任一像素点在一段时间内的平均光子数为 \bar{b} ,推广到 m 帧图像中该像素点的原始图像信号的光子数 S 为

$$S = \sum_{i=1}^m \bar{b}_i = m\bar{b} \quad (3)$$

微弱光环境下,偏离平均值的随机起伏构成了辐射的噪声。根据概率论中描述随机变量的理论可知,到达探测器的光子流符合泊松分布,量子数涨落值即量子噪声可以用方差 $D = \bar{b}$ 表示。每一个空间位置 (x, y) 的噪声 $n(x, y, t)$ 在时间序列上是不相关的,所以不同时刻得到的噪声之间的协方差为零。

图像噪声用标准差 \sqrt{D} 表示,得到经过累加处理后的图像噪声为 $\sqrt{m\bar{b}}$,累加处理前的图像信噪比和处理后的分别为 $R_{S,N1}$ 和 $R_{S,N2}$ 。

$$R_{S,N1} = \frac{\bar{b}}{\sqrt{\bar{b}}} = \sqrt{\bar{b}} \quad (4)$$

$$R_{S,N2} = \frac{m\bar{b}}{\sqrt{m\bar{b}}} = \sqrt{m} \cdot \sqrt{\bar{b}} \quad (5)$$

由上式看出,对 m 帧光子计数图像序列取累加后,可使信噪比提高 \sqrt{m} 倍,能够有效地抑制噪声。当参与累加处理的图像帧数增加时,信噪比将进一步增加。

3 采样时间对光子计数图像的影响^[11]

将图 3a 作为目标置于实验平台的载物台上,统计其灰度直方图 3b 得到:灰度等级为 226 级,灰度最小值为 4,灰度最大值为 233。该图像较细腻,可以较好地表现出人物面貌特征。

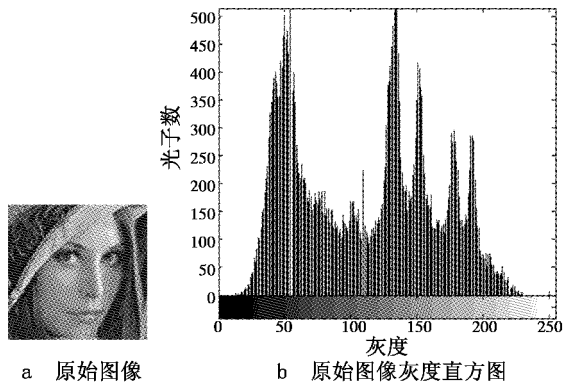


图 3 原始图像及其灰度直方图
Fig. 3 Original image and its histogram

调整暗箱内照度为 10^{-4} lx,启动图 2 实验平台,设置采样时间为 10 ms,将原始图像在空间离散为 1640 个点,横向 41 行,纵向 40 行。在相同条件下重复 4 次实验,得到 4 帧图像序列如图 4a 所示。分析得知:图中每帧图像的光子数为 22000 个左右,如第 1 帧为 22436 个,第 2 帧为 22720 个。由图 5a 直方图可知第 1 帧光子计数图像包含 38 个灰度级,图像模糊并且噪声较大。

为了在低照度环境下提高目标的成像质量,先将获得的光子计数数据进行多帧累加和归一化处理,再将光子计数图像显示出来,如图 4b 所示的多帧累加图像。

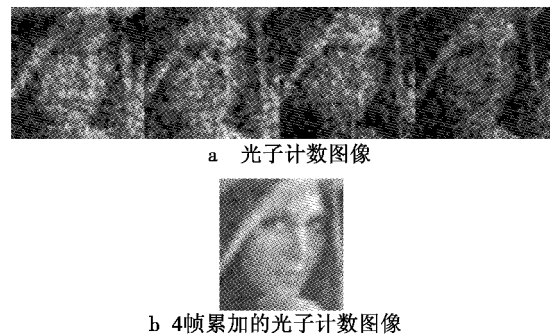


图 4 光子计数图像及其累加图像 ($t = 10$ ms)
Fig. 4 Photon counting image and the accumulation image ($t = 10$ ms)

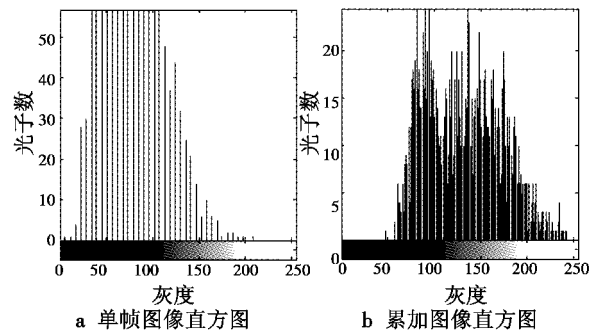
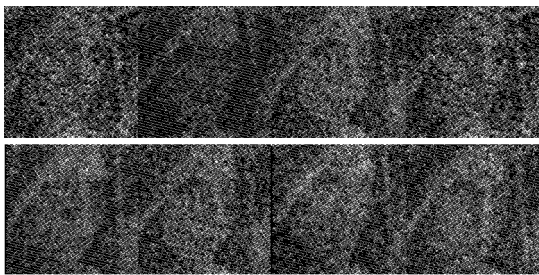


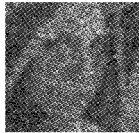
图 5 单帧与累加光子计数图像直方图 ($t = 10$ ms)
Fig. 5 Single frame photon counting image histogram and the accumulation image histogram ($t = 10$ ms)

由图 5b 统计得到累加的光子计数图像包含 156 个灰度等级,较累加前多出 118 个等级;且累加后的图像噪声明显降低,所以累加获得的图像灰度层次较丰富,图像较细腻,可以较好地反映原始图像中的信息。

为了提高帧频,设置采样时间为 2.6 ms,采样点为 4422 个,每帧获得 67×66 的二维数字矩阵。在 10^{-4} lx 条件下重复 8 次实验,得到 8 帧图像序列如图 6a 所示。分析图 6a 中的图像,每帧图像的光子数为 17000 个左右。由图 7a 直方图可知第一帧光子计数图像包含 18 个灰度级。



a 光子计数图像



b 4帧累加的光子计数图像



c 8帧累加的光子计数图像

图 6 光子计数图像及其累加图像($t = 2.6 \text{ ms}$)

Fig. 6 Photon counting image and the accumulation image($t = 2.6 \text{ ms}$)

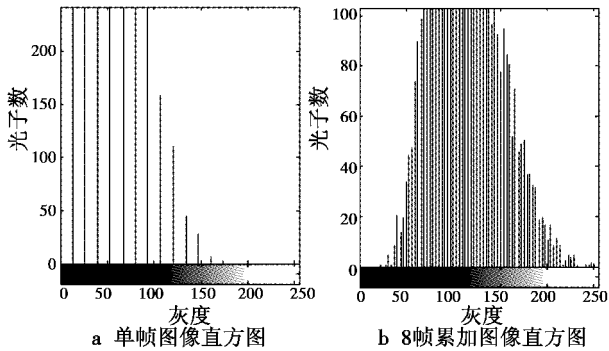
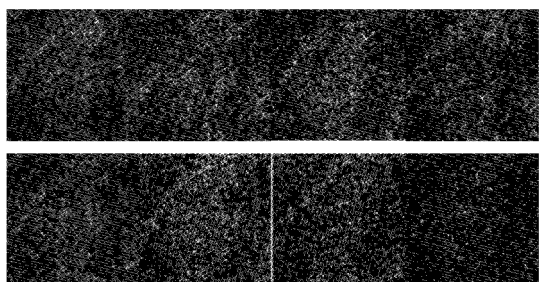


图 7 单帧与累加光子计数图像直方图($t = 2.6 \text{ ms}$)

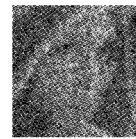
Fig. 7 Single frame photon counting image histogram and the accumulation image histogram($t = 2.6 \text{ ms}$)

根据图 7 可以看出,当 $t = 2.6 \text{ ms}$ 时得到每帧图像的光子计数值为 $t = 10 \text{ ms}$ 时的 77%, 整体图像较暗, 图像层次较少, 只能模糊看出原始图像轮廓。经 4 帧累加处理后, 图像灰度由 18 级提高为 36 级, 图像质量得到一定程度的改进。若进一步提高图像清晰度, 增加累加图像帧数为 8 帧, 灰度等级上升至 73 级, 图像质量有了较大提高。

如果设置采样时间为 $780 \mu\text{s}$, 采样点仍为 4422 个。在 10^{-4} lx 条件下重复 8 次实验, 得到 8 帧图像序列如图 8a 所示。统计得到每帧图像的光子数约为 4980 个。



a 光子计数图像



b 8帧累加的光子计数图像

图 8 光子计数图像及其累加图像($t = 780 \mu\text{s}$)

Fig. 8 Photon counting image and the accumulation image($t = 780 \mu\text{s}$)

图 9 为单帧与累加光子计数图像直方图。

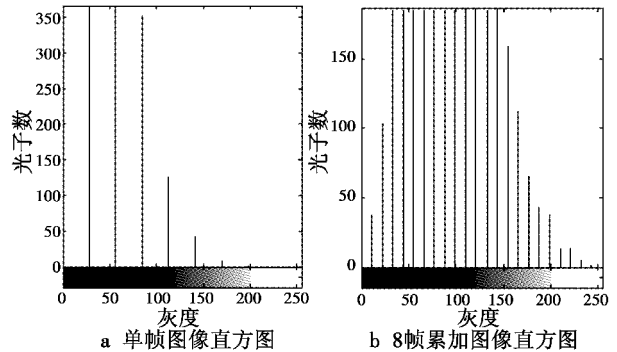


图 9 单帧与累加光子计数图像直方图($t = 780 \mu\text{s}$)

Fig. 9 Single frame photon counting image histogram and the accumulation image histogram($t = 780 \mu\text{s}$)

由图 8 和图 9 分析可知, 如果降低采样时间, 得到每帧图像的光子数分别占采样时间 10 ms 、 2.6 ms 时所得光子数的 22.6% 和 29%, 仅根据 1 帧光子计数图像几乎识别不出原始图像信息。每帧光子计数图像仅包含 9 个灰度等级。通过 8 帧累加使灰度等级提高到 24 个, 可以分辨出目标, 只是细节还较为模糊。

4 结论

在 10^{-4} lx 微光照度下, 利用搭建的光子计数成像平台进行目标探测研究得到: 采样时间对光子计数图像输出影响较大, 采样时间越长相同照度下输出的光子数越多, 图像质量越好。若采样时间为 10 ms , 只需要 4 帧累加就可以得到质量良好的成像输出。为了提高帧频缩短采样时间至 2.6 ms , 4 帧累加输出可以达到较好的识别效果; 如果 8 帧累加则可以达到辨认图像细节的目的。进一步降低采样时间为 $780 \mu\text{s}$, 8 帧累加后的结果仍然可以对目标进行识别。所以, 根据对目标判断的程度不同, 可以选择合适的采样时间或累加帧数实现目标发现、目标识别和目标辨认 3 个不同等级的探测, 同时保证较高的帧频。若仅仅为了发现目标, 可以设定较短的采样时间或较少的累加帧数; 若为了确认所识别目标的具体细节, 就要采取延长采样时间或增加累加帧数等措施。

此外, 从实验平台的整个工作过程中可以看到, 通

过对目标探测,平台输出的是反映目标明暗变化的不同的光子计数脉冲个数。由此可见,光子计数成像实验平台的输出信号类型为数字信号,它为实现信号的全数字化高速传输、存储和处理创造了条件。

参考文献

- [1] BROWN R G W, JONES R. Characterization of silicon avalanche photodiodes for photon correlation measurement 2: Active quenching [J]. *Applied Optics*, 1987, 26 (12): 2383-2389.
- [2] KARVE G, ZHENG X G, ZHANG X F, et al. Geiger mode operation of an In_{0.53}Ga_{0.47}As-In_{0.52}Al_{0.48}As avalanche photodiode [J]. *Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39 (10): 1281-1286.
- [3] ALBOTA M A, HEINRICHS R M, KOCHER D G, et al. Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser [J]. *Applied Optics*, 2002, 41 (36): 7671-7678.
- [4] 龚威. G-APD 阵列一种具有单光子灵敏度的三维成像探测器[J]. *激光技术*, 2007, 31 (5): 452-455.
- [5] 吴青林, 刘云, 陈巍, 等. 单光子探测技术[J]. *物理学进展*, 2010, 30 (3): 296-306.
- [6] WILLIAM G L, JAMES F C, FRANK L A, et al. Development and characterization of CMOS avalanche photodiode arrays[C]//SPIE, 2005, 5726: 122-131.
- [7] WILLIAM G L, CHRISTOPHER S, FRANK L A, et al. Single photon detection using Geiger mode CMOS avalanche photodiodes[C]//SPIE, 2005, 6013: 73-81.
- [8] SHAO Junhu, HUANG Tao, WANG Xiaobo, et al. Measurement of the photon emission characteristic of silicon avalanche photodiode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34 (3): 354-356.
- [9] 戚康男, 秦克诚, 程路. 统计光学导论[M]. 天津: 南开大学, 1987.
- [10] 陈钱, 张保民, 顾国华. 红外图像序列动态帧间滤波技术[J]. *南京理工大学学报*, 2003, 27 (5): 653-656.
- [11] 尹丽菊. 基于 GM-APD 的光子计数成像技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [4] POPOV A V, CRIGORIE T L, BOTEZ R M, et al. Modeling and testing of a morphing wing in open-loop architecture[J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47 (3): 917-923.
- [5] SEIGLER T M, NEAL D A, INMAN D J. Dynamic modeling of large-scale morphing aircraft [R]. AIAA-2006-1893, 2006.
- [6] SEIGLER T M, NEAL D A, BAE J S, et al. Modeling and Flight Control of Large-Scale Morphing Aircraft[J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44 (4): 1077-1087.
- [7] ABOULRAHIM M, LIND R. Control and Simulation of a multi-role morphing micro air vehicle [R]. AIAA-2005-6481, 2005.
- [8] GANDHI N, JHA A, MONACO J, et al. Intelligent control of a morphing aircraft [R]. AIAA 2007-1716, 2007.
- [9] FLANAGAN J S, STRUZENBERG R C, MYERS R B, et al. Development and flight testing of a morphing aircraft, the NextGen MFX-1 [R]. AIAA-2007-1707, 2007.
- [10] IVANCO T, SCOTT R, LOVE M, et al. Validation of the Lockheed Martin morphing concept with wind tunnel testing [R]. AIAA-2007-2235, 2007.
- [11] 郭淑娟. 可变形飞行器的飞行协调控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [12] RUBAGOTTI M, ESTRADA A, CASTANOS F, et al. Integral sliding mode control for nonlinear systems with matched and unmatched perturbations [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56 (11): 2699-2704.
- [13] 吴敏, 何勇. 鲁棒控制理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.

欢迎关注新浪微博 @电光与控制