基于 EMCCD 的光子计数成像方法与实验

张 磊[1,2],石 峰[2],邹 燕[3],张 龙[1,2],何伟基[1],程宏昌[2],顾国华[1],陈 钱[1]

(1. 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室 南京理工大学,江苏 南京 210094;
2. 微光夜视技术重点实验室,陕西 西安 710065; 3. 总装南京军代局,江苏 南京 210024)

摘 要:讨论了在复杂背景条件下采用 EMCCD 实现光子计数成像的处理策略,提出了一种双重阈值滤波方法并通过实验验证了其有效性。根据 EMCCD 的成像模型,将 EMCCD 的输出图像表示为光子事件、偏置噪声和伪光子噪声事件的集合。通过采集多幅 EMCCD 的输出图像,将光子事件检测问题转化为标准的二元假设检测问题。利用贝叶斯判决,可以得到光子事件检测的最佳检测法则,使光子事件的误判代价达到最小,从而检测出光子事件及其空间分布特征。通过实验对比可以发现:提出的方法明显优于普通的累加积分方法,适合生物微光检测等超低照度条件下的成像领域。

关键词:电子倍增 CCD; 光子计数成像; 双重阈值滤波; 微弱光检测

中图分类号:TN223 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2015)01-0384-07

Method and experiment of photon counting imaging based on EMCCD

Zhang Lei[1,2], Shi Feng[2], Zou Yan[3], Zhang Long[1,2], He Weiji[1], Cheng Hongchang[2], Gu Guohua[1], Chen Qian[1]

(1. Jiangsu Key Lab of SIIS, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;
2. Science and Technology on LLL Night Vision Lab, Xi'an 710065, China;
3. Nanjing Military Representation Bureau, Nanjing 210024, China)

Abstract: In this paper, a double-threshold filter strategy was proposed and experimentally tested to improve the accuracy of photon counting imaging with an electron multiplying charge-coupled device, by taking into account the addition bias noise and Pseudo-photon noise during photon counting mode. Photon counting event detection was achieved by using amplitude threshold and frequency threshold filter to eliminate the bias noise and Pseudo-photon noise. Based on Bayesian estimation on multi-imaging, an optimal detection rule was found with minimum error cost. Experiment indicates that double-threshold filter strategy improves the photon detection accuracy than usual integrate method, and is suitable for imaging in ultra-low-light conditions such as biological dim light detection.

Key words: electron multiplying charge-coupled device; photon counting imaging; double-threshold filter; low light level detection

---

收稿日期:2014-05-11; **修订日期**:2014-06-12

基金项目:微光夜视技术重点实验室开放基金(J110508,J20130501);国家自然科学基金(61101196,61271332)

作者简介:张磊(1983-),男,博士生,主要从事 EMCCD 成像与测试技术方面的研究。Email:stones@mail.njust.edu.cn

导师简介:陈钱(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事光电探测与图像处理方面的研究。Email:chenq@mail.njust.edu.cn

通讯作者:何伟基(1981-),男,讲师,博士,主要从事光电成像测试技术方面的研究。Email:njustheweiji@163.com

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

0 引　言

光子计数成像是建立在单光子灵敏的光学探测基础上的一种低噪声、全数字化成像技术,其基本原理是利用单光子灵敏的光学传感器捕获光子事件并获取其空间分布信息,在生物医学、对空观测等领域具有重要的应用价值[1]。

任何具备单光子灵敏度的光电探测器件都可用于光子计数成像,例如光电倍增管(PMT)、单光子雪崩二极管(SPAD)、微通道板(MCP)、雪崩光电二极管阵列等。其中,光电倍增管(PMT)、雪崩光电二极管(APD) 属于单元探测器, 需要光机扫描才能实现成像。微通道板(MCP)可将光电阴极的出射电子放大倍增,并通过与微通道板匹配的光学/电子传感器或阳极编码电路获取光子事件及空间分布信息, 但微通道板光电阴极存在量子效率过低的问题, 通常情况下低于 30%[1]。雪崩光电二极管阵列不受量子效率问题的困扰,但仍然需要解决像素均匀性、像素间串扰以及像元填充率过低等方面问题 [2]。电子倍增 CCD 是建立在现有 CCD 基础上的低照度成像器件。电子倍增 CCD 通过倍增寄存器直接放大信号电荷,使倍增后的信号电荷不受读出放大器的影响, 从而使入射的单光子事件实现有效响应, 其工作方式近似于雪崩光电二极管阵列, 区别在于雪崩光电二极管阵列的每个探测单元都有独立的电荷放大器,而电子倍增 CCD 所有的探测单元共享电荷放大器。因此,电子倍增 CCD 具备高量子效率且可以实现二维探测,在光子计数成像中有突出的优势。

Olivier Daigle 等人测试了电子倍增 CCD 在光子计数模式下的光子探测效率[3-4]。Eric Lantz 等人和 A.G.Basden 等人分别讨论了 L3CCD 在光子计数模式下的信号处理策略[5-6]。此外,Simon Tulloch 评估了电子倍增 CCD 在天文观测方面的应用[7],Gerralt A. de Vree 建立了以电子倍增 CCD 为传感器的光子计数 GAMMA 辐射测量实验装置[8]。

文中讨论了在复杂背景条件下采用电子倍增 CCD 实现光子计数成像的处理策略,提出了一种二次阈值滤波方法。通过采集多幅电子倍增 CCD 的输出图像作为实验分析样本, 将光子事件检测问题转化为标准的二元假设检测问题。利用贝叶斯判决,可以得到光子事件检测的最佳检测方法, 使得光子事件的误判代价达到最小。

1 电子倍增 CCD 的成像模型

理想的电子倍增CCD 可被视为普通 CCD 和理想信号放大器的组合,即普通 CCD 的输出电荷信号经过零噪声放大得到的结果。

令电子倍增 CCD 的信号电荷倍增系数为 $\mathbf{G}$,推得子倍增 CCD 的输出电荷数为:

$$\mathbf{Q}_{ij}=\mathbf{G}\cdot\mathbf{T}\cdot\iiint_{x,y,z}\mathbf{B}(x_i,y_j,\lambda)\mathbf{S}_r(x_i,y_j)\mathbf{q}(\lambda)dxdyd\lambda \qquad (1)$$

式中:$\mathbf{Q}_{ij}$ 为电子倍增 CCD 输出,其中(i,j)为像素索引值;$\mathbf{T}$ 为积分时间;$\mathbf{B}(x_i,y_j,\lambda)$为电子倍增 CCD 中像素(i,j)所对应的场景区域(x_i,y_j)的瞬时光谱光照度;$\mathbf{q}(\lambda)$为单位光谱光照度产生的信号电荷数的比例;$\mathbf{S}_r(x_i,y_j)$为对应的空间响应率。考虑电子倍增CCD 成像过程中的额外噪声,可以将电子倍增 CCD 的成像模型表示为图 1 形式。

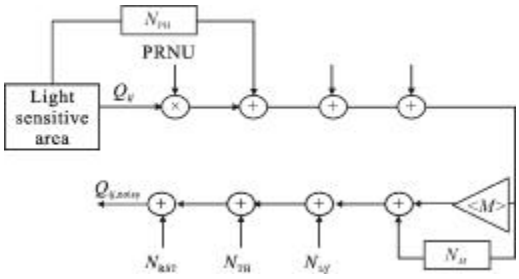


图 1 电子倍增 CCD 成像模型

Fig.1 Mode of EMCCD imaging principle

电子倍增 CCD 的输出图像可以表示为:

$$\mathbf{Q}_{ij,noisy}=(\mathbf{Q}_{ij}+\mathbf{Q}_{ij}\times\mathbf{I}_{ij,PRNU}+\mathbf{N}_{PH}(\mathbf{Q}_{ij})+\mathbf{N}_{DC}+\mathbf{N}_{CIC})\cdot\langle\mathbf{G}\rangle+\mathbf{N}_{M}(\mathbf{Q}_{ij}+\mathbf{Q}_{ij}\times\mathbf{I}_{ij,PRNU}+\mathbf{N}_{PH}(\mathbf{Q}_{ij})+\mathbf{N}_{DC}+\mathbf{N}_{CIC})+\mathbf{N}_{RD} \qquad (2)$$

式中:$\mathbf{I}_{ij,PRNU}$ 为像素(i,j)的响应非均匀性;$\mathbf{N}_{PH}(\mathbf{Q}_{ij})$为散粒噪声;$\mathbf{N}_{DC}$ 为暗电流噪声;$\mathbf{N}_{CIC}$ 为伪电荷噪声;$\mathbf{N}_{M}(\mathbf{Q}_{ij}+\mathbf{Q}_{ij}\times\mathbf{I}_{ij,PRNU}+\mathbf{N}_{PH}(\mathbf{Q}_{ij})+\mathbf{N}_{DC}+\mathbf{N}_{CIC})$为倍增噪声;$\mathbf{N}_{RD}$ 为读出噪声。

根据噪声出现位置的不同,电子倍增 CCD 的噪声可以分为三个大类:(1) 倍增寄存器之前的噪声,主要是暗电流噪声和时钟感生电荷噪声;(2) 倍增寄存器产生的噪声, 主要是倍增噪声;(3) 倍增寄存器之后的噪声,主要是读出噪声,成像电子学噪声等。

光子计数成像方法的本质是通过一定的映射准

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

则从包含噪声的输出图像中确定光子事件的空间分布信息。映射准则本质上是一种建立在样本基础上的决策过程。其中,阈值滤波是最常见的一种映射准则,即采用的阈值构成了决策过程的检验法则,成像系统的先验知识(如背景图象)和电子倍增 CCD 的输出图像则构成了决策过程中的广义随机样本。

2 光子计数成像阈值滤波原理

根据电子倍增 CCD 成像过程及其噪声产生机制,电子倍增 CCD 在光子计数模式下的噪声可以归纳为偏置噪声和伪光子事件噪声。偏置噪声属于倍增后噪声, 而伪光子事件噪声属于倍增前噪声。因此,电子倍增 CCD 输出样本可以表示为信号样本与噪声样本的合集,得到:

$$\{P_{i,j}(0\leqslant x<M,0\leqslant y<N)\}\subseteq S\cup N_{bias}\cup N_{spru} \tag{3}$$

式中:样本空间 S 表示光子事件集合;样本空间 N_{bias} 表示偏置噪声集合; 样本空间 N_{spru} 表示伪光子事件噪声集合;$\{P_{i,j}(0\leqslant x<M,0\leqslant y<N)\}$表示电子倍增CCD的输出集合。

阈值滤波的目的是从电子倍增 CCD 的输出集合中筛选出光子事件样本点并避免引入误差, 其原理是根据光子事件集合、偏置噪声集合和伪光子事件噪声集合在表现形式和特征上的差异实现光子事件样本点的筛选。

2.1 幅度阈值滤除偏置噪声

首先考虑偏置噪声对光子事件检测的影响。偏置噪声属于倍增后噪声,其表现形式是偏置噪声 N_{bias} 样本点的幅度分布区域相对固定且幅值较小。

令电子倍增 CCD 成像系统的噪声常数为 n_{cnst},成像系统采用 AD 分辨位数为 N_{BIT},有效 AD 分辨位数为 N_{effBIT}。

噪声集合 N_{bias} 的概率分布特性可近似视为正态分布,如果考虑零输入补偿区间,则噪声集合 N_{bias} 期望值为:

$$E[N_{bias}]=n_{cnst}\cdot 2^{N}+N_{offset} \tag{4}$$

在应用中,需要考虑 AD 的无效分辨位数($N-N_{eff}$)的影响。因此,可将噪声集合 N_{bias} 的分布区间近似为:

$$[n_{cnst}\cdot 2^{N}+N_{offset}-2^{N-N_{eff}-1},n_{cnst}\cdot 2^{N}+N_{offset}+2^{N-N_{eff}-1}]$$

根据正态分布的“3σ”准则,噪声集合 N_{bias} 中99%以上的样本点分布在该区间。实验中采用的电子倍增 CCD 相机的 AD 分辨位数为 14 bit,有效 AD 分辨位数为 9 bit,噪声集合 N_{bias} 期望值为 505,得到实际电子倍增 CCD 成像过程中偏置形式噪声的集合 N_{bias} 样本点的主要分布区间可以确定为[489,521]。

偏置形式噪声集合 N_{bias} 样本点的分布区间 $[N_{bias,min},N_{bias,max}]$在器件工作过程中保持不变,而光子事件信号样本点的点分布区间$[S_{min},S_{max}]$与增益期望密切相关, 则通过选择合适的增益期望使得噪声集合 N_{bias} 和光子事件信号集合的交集最小。

令输入光子数为 x,增益期望为$\overline{M}$,根据光子响应模型可推得光子事件信号集合 S 的样本点分布期望满足:

$$\overline{S}=\frac{x\cdot\overline{M}}{L_{EM}}+N_{offset} \tag{5}$$

由此可知,当增益期望$\overline{M}$足够大时,根据“3σ”准则, 噪声集合 N_{bias} 与光子事件信号集合 S 交集可以忽略不计。

因此, 幅度阈值可以选取为:$TH_{bias}>N_{bias,max}$,TH_{bias} 表示幅度阈值。利用幅度阈值 ,可从原始数据中滤除偏置形式的噪声 N_{bias}。得到:

$$P_{i,j}=0:1?P_{i,j}<TH_{bias} \tag{6}$$

如果输出图像中的像素 $P_{i,j}<TH_{bias}$, 则认为该像素为偏置噪声集合的样本点;反之,认为该像素可能是光子事件的样本点。

2.2 频率阈值滤除伪光子事件噪声

经过幅度阈值滤波的图像可以认为是由光子事件和伪光子事件噪声的集合。从光子场特性与噪声特性出发,两者在时间域的表现形式必定存在区别。假定光子场的辐射在一定时间内保持不变,则存在光子事件区域的有效值出现的频率必定远远大于非光子事件区域的有效值出现的频率。利用这种差异,可以实现伪光子事件噪声滤波,称之为频率阈值滤波。假设场景的光子辐射不变, 采集得到成像系统在相同场景和相同工作条件下的 K 幅输出图像。应用幅度阈值法对每幅图像进行预处理,得到的结果组成的数据立方记作 $I(i,j,k)\{0\leqslant i<M,0\leqslant j<N,0\leqslant k<K\}$,表示输出图像的空间位置,$k$ 表示 K 幅输出图像中的第 k 幅。

对于任意区域 A_{ij},可以通过对数据立方 $I(i,j,k)$ 进行重采样得到有效值出现的次数,有:

$$P_{ij}'=\sum_{k=0}^{K}I(i,j,k) \tag{7}$$

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

式中:P_{ij}'表示有效值在区域 A_{ij} 出现的次数。

令单幅输出图像中区域 A_{ij} 中出现伪光子事件噪声的期望为 λ_n,出现光子事件的期望为 λ_s。

如果区域 A_{ij} 包含光子事件,则可得:

$$E[P_{ij}']=\lambda_s+\lambda_n \tag{8}$$

如果区域 A_{ij} 只有伪光子事件噪声,则期望值为:

$$E[P_{ij}']=\lambda_n \tag{9}$$

因此,正是由于光子事件信号区域的期望值与伪光子事件噪声集合的期望值的差异使光子事件的检测成为了可能,可以将光子事件检测问题将转换为标准的二元假设检测问题。根据光子场特性和伪光子事件噪声集合特性可知,两者在时间域的概率分布都满足泊松分布。

假设:

$$H_0: P_{ij}=n_{ij} \tag{10}$$

$$H_1: P_{ij}=s_{ij}+n_{ij} \tag{11}$$

通过统计决策可以找到一种检测法则,对 H_0 和 H_1 的真伪进行判断,使得在任意区域 A_{ij},H_0 和 H_1 只有一个假设为真命题。利用贝叶斯判决,可以找到最佳的检测法则(频率阈值)TH_{spru},使得决策引入的平均代价达到极小。其中,TH_{spru} 表示伪光子事件的频率阈值。

3　实验结果

3.1　静态光子计数成像实验

实验装置的原理框图如下图 2 所示。采用标准的 2 856 K 钨灯作为光源,经过四片中性密度减光片后由积分球完成光斑的匀化。电子倍增 CCD 对积分球的另一个出口成像。

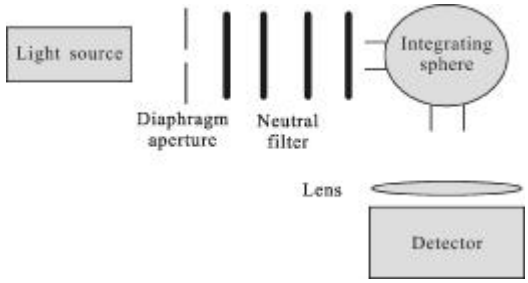


图 2　光子计数成像的实验原理框图

Fig.2 Block diagram of experimental of photon counting imaging

电子倍增 CCD 的积分时间设置为 0.04 s,增益通过软件设置为 255 (厂家公开的测试结果表明,此时的实际增益接近 1 000)。实验过程中,采用连续采集的方式,采集 200 幅相同状态下电子倍增 CCD 的输出图像作为实验分析样本。

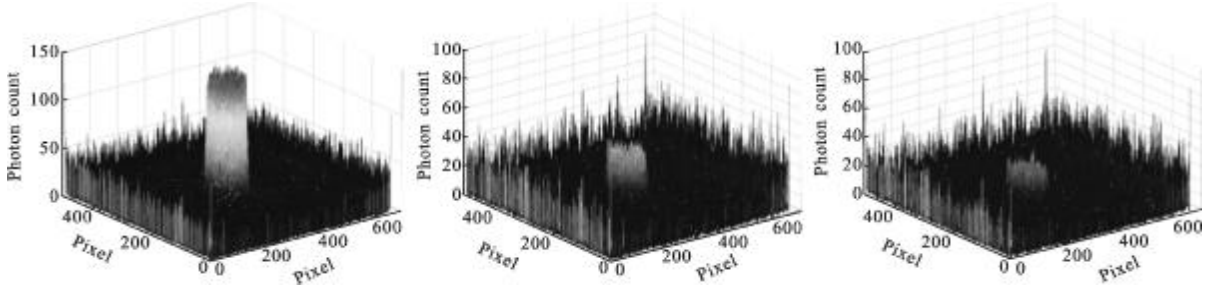
通过不同的中性密度滤光片的组合,得到不同的光照度状态。在 5.0E-4 Lux、5.0E-5 Lux、1.0E-5 Lux 三种光照度状态下,分别采集 200 幅图像,得到的实验结果如图 3 所示。

实验结果中,图 3(a),(e),(i)是电子倍增 CCD 输出的单幅图像;图 3(b),(f),(j)是经过幅度阈值滤波并累加的图像;图 3(c),(g),(k)是采用频率滤波后的

(a) 原始图像一
(a) Raw image one

(e) 原始图像二
(e) Raw image two

(i) 原始输入图像三
(i) Raw image three

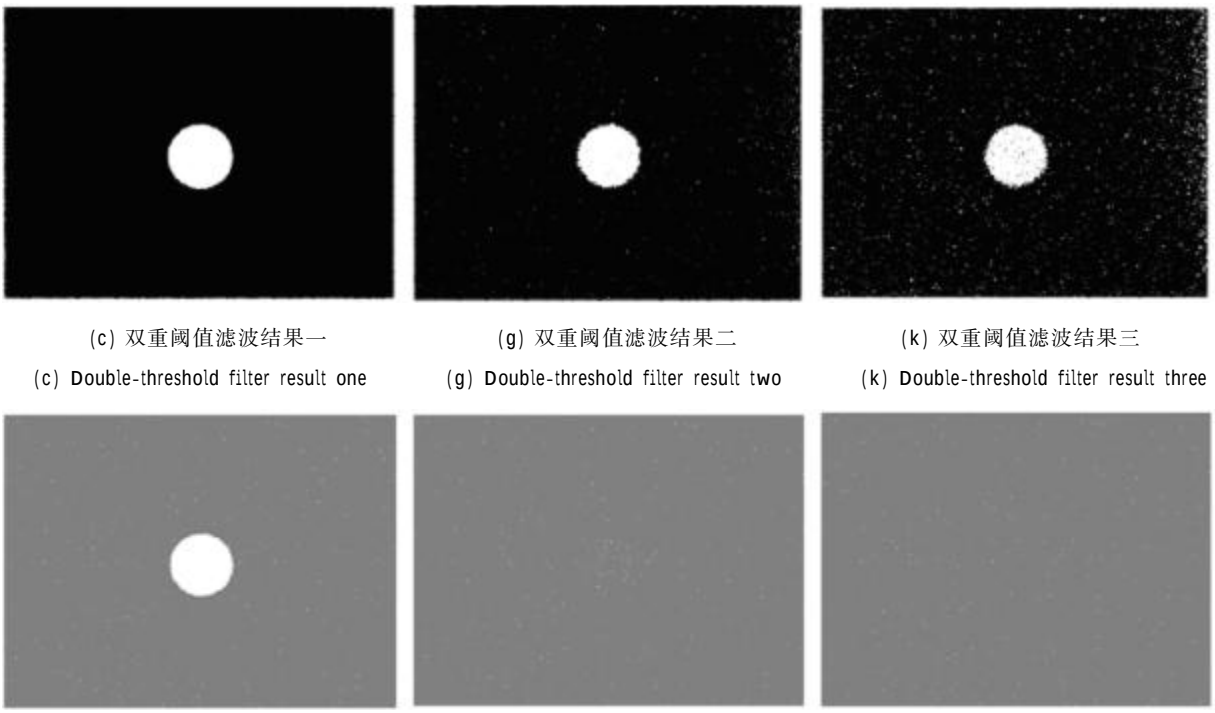


(b) 光子累加图像一
(b) Cumulative photon image one

(f) 光子累计图像二
(f) Cumulative photon image two

(j) 光子累计图像三
(j) Cumulative photon image three

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com



(c) 双重阈值滤波结果一 (g) 双重阈值滤波结果二 (k) 双重阈值滤波结果三

(c) Double-threshold filter result one (g) Double-threshold filter result two (k) Double-threshold filter result three

(d) 200 幅图像累加结果一 (h) 200 幅图像累加结果二 (l) 200 幅图像累加结果三

(d) Cumulative results of 200 raw images one (h) Cumulative results of 200 raw images two (l) Cumulative results of 200 raw images three

图 3 光子计数成像实验结果一

Fig.3 Photon counting imaging experimental result one

图像;图 3(d),(h),(l)是将 200 幅图像累加并进行直方图均衡得到的结果。

采用信息熵对图 3 的实验结果进行评价，得到结果如表1 所示。

表 1 光子计数成像实验结果一的信息熵评价

Tab.1 Standard mutual information of photon counting imaging experimental result one

	Experimental result 1	Experimental result 2	Experimental result 3
Double-threshold	0.209 1	0.231 3	0.318 0
Integrate method	0.229 6	0.025 6	0.023 6

三组实验数据的主客观评价结果表明:同时采用幅度阈值滤波和频率阈值滤波的效果明显优于普通的图像处理算法。第一组实验数据中,双重阈值法的输出结果与普通图像处理算法的结果具有相近的效率。然而,第二、三组实验数据说明在较低照度条件下阈值滤波方法的效果明显优于普通图像处理算法。

3.2 复杂背景下的光子计数成像实验

自然环境中突出的特征是成像物体处于开放环境。而在自然环境下,成像器件在成像过程中受到自然杂散光和背景噪声的影响。为了验证光子计数在开放环境下的成像性能，实验过程中利用一个大型暗箱来模拟自然条件下的开放环境，而在暗箱内壁四周的粗糙白布，使得输入的漫反射光源在进入暗箱后与暗箱内壁的白布发生多次漫反射，在暗箱内形成一个均匀的光照环境。电子倍增 CCD 的工作参数设置与 3.1 的实验一致。实验过程中,采用连续采集的方式,采集 200 幅相同状态下电子倍增 CCD 的输出图像作为实验分析样本。

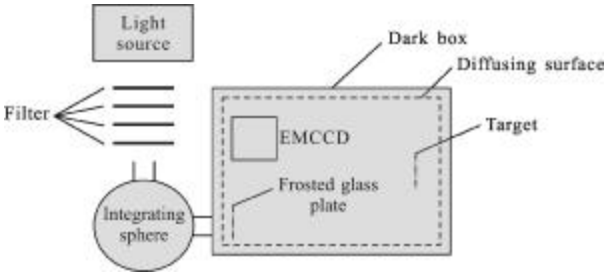


图 4 光子计数成像的实验原理框图

Fig.4 Block diagram of experimental of photon counting imaging

实验中,通过不同的中性密度滤光片组合,可以

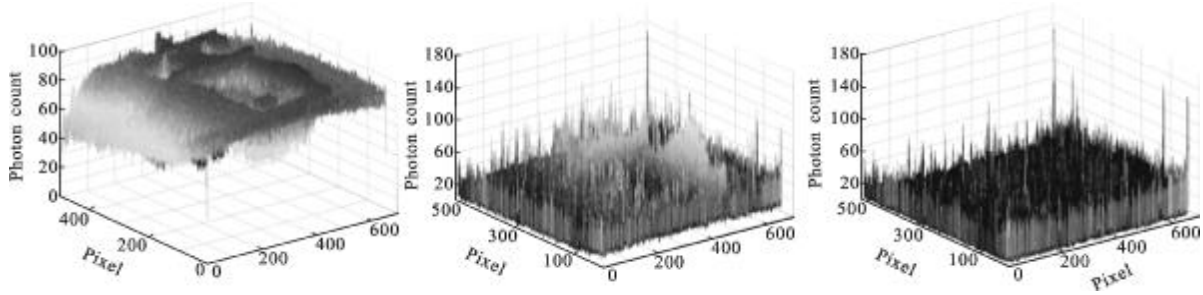
PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

得到不同的光照度状态。在 5.0E-4 Lux、5.0E-5 Lux、1.0E-5 Lux 三种光照度状态下，分别采集 200 幅图像,得到的实验结果如图 5 所示。

实验结果中,图 5(a),(e),(i)是电子倍增 CCD 输

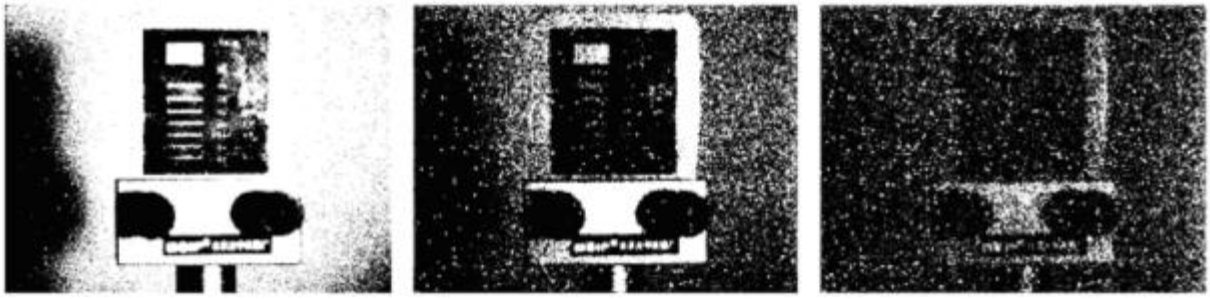
(a) 原始图像一　(e) 原始图像二　(i) 原始输入图像三

(a) Raw image one　(e) Raw image two　(i) Raw image three



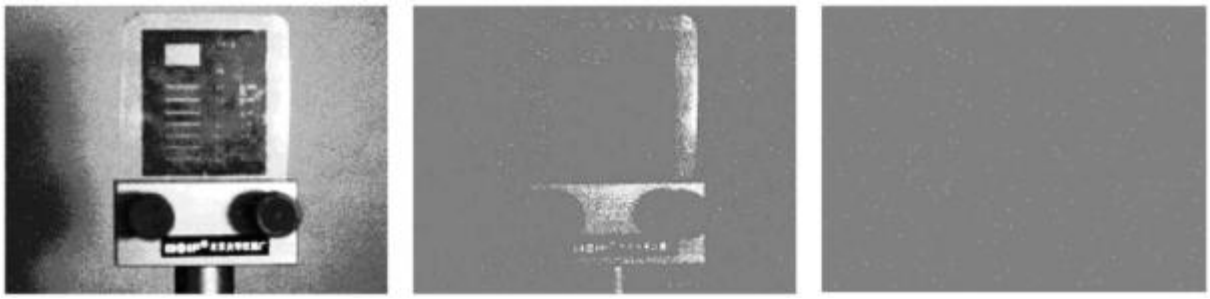
(b) 光子累加图像一　(f) 光子累计图像二　(j) 光子累计图像三

(b) Cumulative photon image one　(f) Cumulative photon image two　(j) Cumulative photon image three



(c) 双重阈值滤波结果一　(g) 双重阈值滤波结果二　(k) 双重阈值滤波结果三

(c) Double-threshold filter result one　(g) Double-threshold filter result two　(k) Double-threshold filter result three



(d) 200 幅图像累加结果一　(h) 200 幅图像累加结果二　(l) 200 幅图像累加结果三

(d) Cumulative results of 200 raw images one　(h) Cumulative results of 200 raw images two　(l) Cumulative results of 200 raw images three

图 5 光子计数成像实验结果二

Fig.5 Photon counting imaging experimental result two

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

出的单幅图像;图 5(b),(f),(j)是经过幅度阈值滤波并累加的图像;图 5(c),(g),(k)是采用频率滤波后的图像;图 5(d),(h),(l)是将 200 幅图像累加并进行直方图均衡得到的结果。

表 2 光子计数成像实验结果二的信息熵评价

Tab.2 Standard mutual information of photon counting imaging experimental result two

	Experimental result 1	Experimental result 2	Experimental result 3
Double-threshold	0.209 1	0.231 3	0.318 0
Integrate method	0.229 6	0.025 6	0.023 6

复杂背景下的光子计数成像实验表明，双重阈值滤波方法的效果明显优于普通图像处理算法得到的结果。采用双重阈值滤波的方法,试验中三组数据都可以有效地还原实际物体。采用普通的图像处理算法，只有第一组实验数据可以比较完整地还原实际的物体，第二组实验数据只能部分地还原实际物体,第三组实验数据完全不能还原实际物体。因此可以得出:在低照度复杂背景条件下,采用双重阈值滤波法具有较好的成像效果。

4 结 论

文中根据电子倍增 CCD 的成像模型,将电子倍增 CCD 的输出图像表示为光子事件、偏置噪声和伪光子事件噪声的集合，采用幅度阈值滤波和频率阈值滤波对多幅输出图像进行处理，从而检测出复杂背景条件下的光子事件及其空间分布特征。通过实验对比可以发现：文中提出的方法明显优于普通的累加积分方法，适用于生物微弱光检测等超低照度条件下的成像领域。

文中采用的双重阈值滤波方法近似于数字化的信息表达方式,而传统的累积方法与模拟法类似。当光照强度没有足够低时，双重阈值滤波方法的局限性使得图像在进行滤波时细节有所损失。

此外，文中提出的方法以牺牲成像效率换取成像精度,以扩大样本容量获取优化检测法则的策略。结合文中的实验可知，尽管双重阈值原理大大地提高了电子倍增 CCD 的极限探测灵敏度,但所需的数据容量仍然过大。因此,尽可能地减少检测法则对数据容量的依赖是下一步研究的重点。

参考文献:

[1] Zhang Xinghua, Zhao Baosheng, Miao Zhenhua, et al. Study of ultraviolet single photon imaging system[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(7): 4238-4243. (in Chinese)

[2] Fabrizio Guerrieri, Simone Tisa, Alberto Tosi, et al. Two-dimensional SPAD imaging camera for photon counting[J]. IEEE Photonics Journal, 2010, l2(5): 759-774.

[3] Olivier Daigle, Jean-Luc Gach, Christian Guillaume, et al. L3CCD results in pure photon-counting mode [C]//SPIE, 2014, 5499: 219.

[4] Olivier Daigle, Claude Carignan, Sébastien Blais-Ouellette. Faint flux performance of an EMCCD [C]//SPIE, 2006, 6276: 62761F.

[5] Tulloch Simon M. Photon counting and fast photometry with L3 CCDs[C]//SPIE, 2004, 5492: 604.

[6] Eric Lantz, Jean-Luc Blanchet, Luca Furfaro, et al. Multi-imaging and Bayesian estimation for photon counting with EMCCDs [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008(4): 2262-2270.

[7] Basden A G, Haniff C A, Mackay C D. Photon counting strategies with low light level CCDs [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2003, 345(3): 985-991.

[8] de Vree G A, Westra A H, Moody I, et al. Photon-counting gamma camera based on an electron-multiplying CCD [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, 52 (3): 580-588.

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com