

文章编号 1004-924X(2012)08-1831-07

基于盖格-雪崩光电二极管的光子计数成像

何伟基^{1*}, 司马博羽^{1,2}, 程耀进², 成伟², 陈钱¹

(1. 南京理工大学 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094;

2. 微光夜视技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要:考虑用传统的成像技术检测光生电荷信号时易受模数转换噪声干扰,本文提出了一种基于单光子灵敏雪崩光电二极管(GM-APD)的光子计数成像方法。该方法以单光子灵敏 GM-APD 作为探测单元,以全数字化方式实现微弱光学信号的有效检测。建立了 GM-APD 光子流响应模型,利用马尔科夫更新过程分析了光子探测盲区对 GM-APD 瞬态响应的影响,得到了 GM-APD 输出的数字脉冲频率与光子流密度之间的关联表达式。搭建了二维扫描成像实验验证装置,通过实验得到了不同密度光子流条件下的光子计数图像。采用标准化互信息量分析得到,在光子流密度为 3.0×10^4 count/s 的条件下,该实验装置仍然可以实现可视成像;当光子流密度达到 2.7×10^5 count/s 时,标准化互信息量大于 0.5;实现了在低光子流密度时采用光子计数方式对目标物体的有效成像。

关键词:单光子雪崩二极管;光子计数成像;马尔科夫更新;标准互信息量

中图分类号:TN312.7;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1831

Photon counting imaging based on GM-APD

HE Wei-ji^{1*}, SIMA Bo-yu^{1,2}, CHENG Yao-jin², CHEN Wei², CHEN Qian¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging and Intelligent Sensing,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Low
Light Level Night Vision, Xi'an 710065, China)

* Corresponding author, E-mail: njushewei@163.com

Abstract: As conventional imaging systems suffer from the excessive noise from Analog-digital Converters(ADCs) at low signal levels, this paper proposed an imaging method based on Geiger-mode single photon counting Avalanche photodiode(GM-APDs) to realize all-digital detection of weak optical signals. The photon response model for the GM-APDs was established, and the performance of GM-APDs with dead-time effects was analyzed by using Markov renewal process. Then, the relationship between the digital pulse frequency measured by GM-APD and the input photon rate was deduced. Furthermore, a 2D scan imaging system was also built to verify this method. In the experiment, the photon counting images with different input photon rates were obtained. By using standard mutual information to assess image quality, it is demonstrated that the experimental system can achieve visual

收稿日期:2012-04-18;修订日期:2012-05-21.

基金项目:微光夜视技术国防科技重点实验室开放基金资助项目(No. J110508);国家自然科学基金资助项目(No. 61101196)

imaging with an input photon rate of 3.0×10^4 count/s, and the value of standard mutual information is over 0.5 with 2.7×10^5 count/s. It concludes that this system can realize photon counting imaging at low signal levels efficiently.

Key words: Geiger-mode single photon counting Avalanchen Photodiode(GM-APD); photon counting imaging; Markov renewal; standard mutual information

1 引言

随着生物学、空间探测以及环境辐射检测技术的发展,极微弱光学成像的需求日益增加^[1]。在这些应用中,有效光学信号的光子流密度低,表现为离散的随机光子事件序列导致光生电荷信号强度十分微弱,由此对光学成像的探测灵敏度、信噪比等提出了极高要求^[2]。

为实现微弱光生电荷信号的有效检测,光电探测器件通常需要增加额外的光生电荷倍增过程,即在光生电荷信号到达电荷-电压转换器之前对光生电荷信号进行电荷级倍增,常用的光电探测器件包括:像增强器、电子倍增 CCD 以及光电倍增管^[3-4]。然而,受到倍增噪声、暗电流噪声等因素的影响,当微弱光信号强度下降至离散光子流时,上述器件的极限探测灵敏度、信噪比等技术参数还无法满足应用需求。

本文提出了一种基于盖格-雪崩光电二极管(GM-APD)的光子计数成像方法。该方法以单光子灵敏的 GM-APD 作为探测单元来实现对离散光子流的有效检测^[5]。同时,以 GM-APD 的输出数字脉冲信号的多寡来表征入射光学信号的强弱,避免了因高速模拟-数字电压转换过程引入的数字化采用噪声。

本文建立了 GM-APD 的光子流响应模型^[6],通过空间分辨率实验和强度分辨实验对该方法进行了验证和测试并给出了具体实验结果。

2 GM-APD 光子流响应模型

GM-APD 是一类工作于盖革模式采用特殊设计的雪崩光电二极管,工作于击穿电压以上,实现单光子灵敏探测。其响应过程的特殊之处在于 GM-APD 内部的雪崩效应一旦开启,将无法自动终止。在雪崩持续阶段,GM-APD 将失去光子响应能力,从而出现光子探测盲区,须采用淬灭电路

来终止雪崩倍增并恢复探测能力^[5]。GM-APD 光子探测盲区的存在,使得 GM-APD 光子流响应呈现非线性模式,GM-APD 输出的数字脉冲频率与光子流密度有所差异。因此,需要通过建立 GM-APD 光子流响应模型来分析 GM-APD 输出的数字脉冲频率与光子流密度之间的关联。

考虑 GM-APD 存在光子探测盲区,GM-APD 光子流响应过程可以认为是 GM-APD 在开放状态与封闭状态间的转移。开始时,GM-APD 处于开放状态,当探测到一个光子时,探测器转入封闭状态,进入光子探测盲区。应用淬灭电路终止光子探测盲区,可使得 GM-APD 由封闭状态重新转入开放状态。由此分析可知,GM-APD 光子流响应过程属于典型的马尔可夫更新过程。通过构造马尔可夫核,可以建立 GM-APD 光子流响应模型,得到 GM-APD 输出。

在极微弱光条件下,光子事件数通常认为服从泊松分布,即在一段时间内探测到 k 个光子数的概率为:

$$P(k, T) = \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^k}{k!},$$

式中: λ 表示单位时间内探测到的平均光子数。单位时间内,GM-APD 光子流响应的概率分布等价于 GM-APD 在开放与封闭状态间转换的次数的概率分布。

将 GM-APD 的光子探测盲区,即处于封闭状态的时间记为 t_0 。令 $t_0=0, t_1, t_2 \dots$ 表示探测器器状态转移的时间序列,定义:

$$X_n = \begin{cases} 1 & \text{第 } n \text{ 次转移到封闭状态} \\ 0 & \text{第 } n \text{ 次转移到开放状态} \end{cases},$$

$\{(X_n, t_n) | n \geq 0\}$ 则构成马尔可夫更新过程。

假设 $P(X_0=1)=1$,即开始时探测器总是处于开放状态。则从开放状态转移到封闭状态所用的时间服从如下分布:

$$\varphi(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

与之相对应,GM-APD 从封闭状态转移到开放状态的时间分布为:

$$\psi(t) = \begin{cases} 0 & t < t_d \\ 1 & t \geq t_d \end{cases}$$

得到它对应的马尔可夫核:

$$[Q_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & \varphi(t) \\ \psi(t) & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $Q_{ij}(t)$ 的定义为:

$$Q_{ij}(t) = P(X_{n+1} = j, t_{n+1} - t_n \leq t | x_n = i)$$

表示在第 n 次状态转移转移到 i 状态的条件下,第 $n+1$ 次状态转移转移至 j 状态所用时间的概率分布。

在此基础上引入记号:

$$Q_{ij}^{(n)}(t) = P(X_n = j, t_n \leq t | X(0) = i), \quad (2)$$

式(2)表示系统处于 i 状态的条件下,第 n 次状态转移至 j 状态所费时间的概率分布。对于 GM-APD 而言, $Q_{01}^{(n)}$ 表示 GM-APD 第 n 次由开放状态转移至封闭状态所用时间的概率分布。

用 $S(t, n)$ 表示 GM-APD 探测到 k 个光子事件所费时间的概率分布,得到:

$$S(t, k) = \text{prob}(S_k \leq t), \quad (3)$$

即:

$$S(t, k) = Q_{01}^{(2k-1)}(t). \quad (4)$$

同时,令 $f(k, t)$ 表示在时间 t 内,GM-APD 探测到 k 个光子的概率,则:

$$f(k, t) = S(t, k) - S(t, k+1), \quad (5)$$

根据 $Q_{ij}(t)$ 的定义,可以得到 $Q_{01}^{(n+1)}(t)$ 和 $Q_{01}^{(n)}(t)$ 有如下的卷积关系:

$$Q_{01}^{(n+1)}(t) = \int_0^t Q_{01}(t-u) dQ_{01}^{(n)}(u), \quad (6)$$

令: $R_{01}^{(n)}(s) = \int_0^\infty e^{-sx} Q_{01}^{(n)} dx$

表示 $Q_{01}^{(n)}(x)$ 的拉普拉斯变换。对式(6)两端取拉氏变换可得:

$$R_{01}^{(n+1)}(s) = sR_{01}(s)R_{01}^{(n)}(s). \quad (7)$$

考虑 GM-APD 开始时始终处于开放状态,即 $P(X_0 = 1) = 1$,可递推得到:

$$R_{01}^{(2n-1)}(s) = s^{2n-2} R_{01}^n(s) R_{01}^{(n-1)}(s), \quad (8)$$

$$R_{01}^{(2n)}(s) = s^{2n-1} R_{01}^n(s) R_{01}^{(n)}(s). \quad (9)$$

用 $W(s, n)$ 表示 $S(t, k)$ 对 t 的拉氏变换则:

$$W(s, k) = R_{01}^{(2k-1)}(s) = s^{2k-2} R_{01}^k(s) R_{01}^{(k-1)}(s). \quad (10)$$

令 $F(k, s)$ 表示 $f(k, t)$ 关于 t 的拉氏变换,由式(5)得:

$$F(k, s) = W(s, k) - W(s, k+1). \quad (11)$$

根据拉氏变换的定义,由式(1)可得:

$$\begin{cases} R_{01}(s) = \frac{\lambda}{s(s+\lambda)} \\ R_{10}(s) = \frac{1}{s} e^{-\lambda t_d} \end{cases}, \quad (12)$$

代入式(11),可得:

$$F(k, s) = \frac{\lambda^k}{s(s+\lambda)^k} e^{-(k-1)t_d s} - \frac{\lambda^{k+1}}{s(s+\lambda)^{k+1}} e^{-kt_d s}. \quad (13)$$

对式(13)进行拉普拉斯逆变换并化简后得到:

$$f(k, t) = \lambda^k \int_0^{t-(k-1)t_d} \frac{\tau^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda\tau} d\tau - \lambda^{k+1} \int_0^{t-kt_d} \frac{\tau^k}{k!} e^{-\lambda\tau} d\tau. \quad (14)$$

令 $\lambda = \int f(k, t) dk$ 表示 GM-APD 输出数字脉冲频率的期望值。借助于式(14)可知 GM-APD 的数字脉冲输出频率的概率分布与光子流密度、光子探测盲区的关系。

定义修正系数为光子流密度期望值与 GM-APD 输出数字脉冲频率期望值之比,结合式(14)可以通过计算对 GM-APD 输出数字脉冲频率期望值进行修正,从而得到光子密度流的期望值。

图 1 表示在光子探测盲区为 60 ns 时,光子流密度期望值与 GM-APD 输出数字脉冲频率期望值的修正系数。

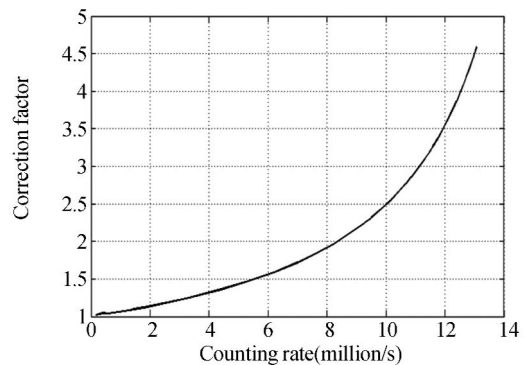


图 1 修正系数的理论计算值

Fig. 1 Theoretical correction factor

很明显,受光子探测盲区的影响,GM-APD 的数字脉冲输出频率的期望值小于光子流密度期望值。GM-APD 的数字脉冲输出频率正比于光子流密度,但与光子探测盲区呈反比,即:在光子探测盲区一定时,光子流密度越大,GM-APD 的数字脉冲输出频率越高;在光子流密度一定时,光

子探测盲区越大,GM-APD 的数字脉冲输出频率越低。式(14)也表明,减小 GM-APD 的光子探测盲区有助于提高 GM-APD 的光子探测效率。

3 实验装置

成像装置的原理和实物如图 2、3 所示。实验选用单像素 GM-APD 作为探测器,采用二维载物台作为扫描机构进行二维成像扫描。GM-APD 输出的数字脉冲信号直接输入到数字脉冲计数器。

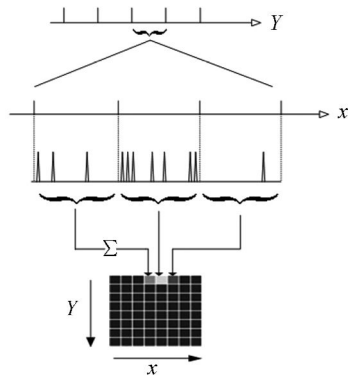


图 2 成像装置的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of imaging system

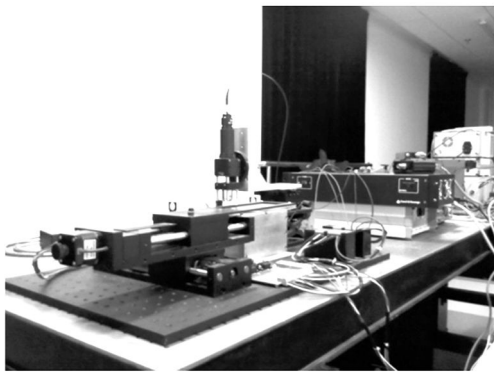


图 3 成像装置实物图

Fig. 3 Physical map of imaging system

该实验装置采用输出波长为 632 nm 的 LED 阵列作为待测目标的背景光源。LED 单元并联到同一个恒流源并在 LED 阵列输出端口放置毛玻璃实现光源匀化。LED 阵列输出的光子流通过多衰减片使得衰减至离散光子流状态。

GM-APD 选择 PE 公司生产的具有 FC/PC 接口的单光子计数模块 (SPCM)。成像光学系统采用共轭形式的双透镜结构将光子耦合到芯径为

62.5 μm 的多模光纤并传输至单光子计数模块 (SPCM)。

选择 NI 公司的 PXI-6602 作为数字脉冲计数器以及控制器并采用 LABVIEW 语言实现编程控制。设定待测目标的区域为 $W \times L$ 并将待测目标划分为 $N \times M$ 子区域,即标记为 $N \times M$ 个位置。利用可编程控制器产生水平像素时钟、行同步信号以及场同步信号来控制二维 (X 和 Y) 可动载物台的移动,使得单像素 GM-APD 可以采集得到待测目标不同区域的光子辐射密度。水平像素时钟使得二维可动载物台沿 X 方向移动,每个水平像素时钟使得载物台移动的距离为 W/N 。同样,每个行同步信号使得二维可动载物台沿 Y 方向移动,每个行同步信号使得载物台移动的距离为 L/M 。待测目标每移动一步,数字脉冲计数器采集固定时间周期 t 内 GM-APD 输出脉冲信号的个数并记录下当前的位置信息。

4 实验结果

4.1 分辨率测试实验

选取标准的图像分辨率卡进行成像分辨率测试,并采用透射式成像方式。实验结果如图 4 所示,测试实验参数设置如下:扫描区域大小为 24 mm \times 20 mm,待测目标区域分割为 600 \times 500,每个像素点的积分时间为 1 ms。

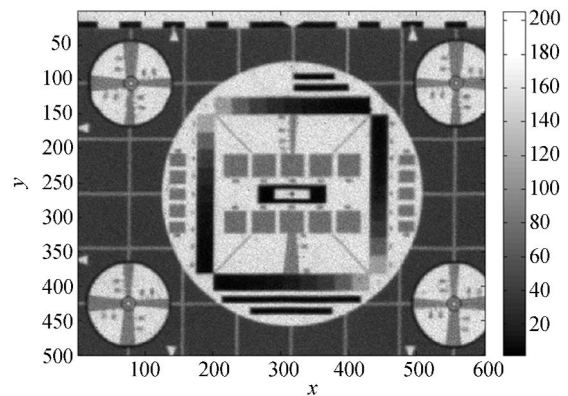


图 4 标准分辨率测试靶的成像实验结果

Fig. 4 Experimental result of standard resolution test target

图 4 实验中,GM-APD 在 1 ms 时间内输出数字脉冲的最大值约为 200。结合 GM-APD 光子流响应模型可知,此时光子流密度约为 $2.0 \text{E} +$

5CPS,光辐射功率密度约为皮瓦量级。

4.2 强度分辨率测试实验

实验选取了标准的灰度渐变测试卡进行强度分辨的测试,实验采用透射式成像方式。实验结果如图 5 所示,测试实验参数如下:扫描区域大小为 24 mm×20 mm,待测目标区域分割为 240×200,每个像素点的积分时间为 1 ms。改变背景

光源的驱动电流强度,得到不同光子流密度条件下的图像,如图 5(a~h)所示。从左至右(上下两组)实验中,背景光源的驱动电流分别为:5、10、15、20、25、30、35 以及 40 mA。图像的有效像素数为 240×200,如图中 X 轴和 y 轴坐标所示;图像中的灰度值正比于光子流密度,光子流密度越大,灰度值越高。

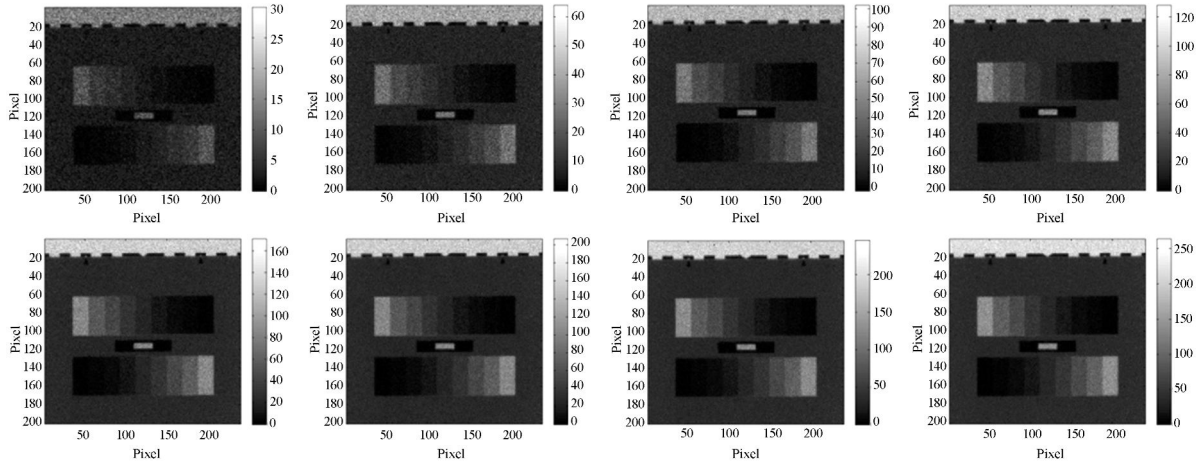


图 5 不同强度的背景光源下得到的实验图像

Fig. 5 Photon counting image with different intensities of background light

如图 5 所示,从左至右(上下两组)实验中,GM-APD 在单位时间内输出数字脉冲的最大值约为: 3.0×10^4 , 7.0×10^4 , 1.0×10^5 , 1.3×10^5 , 1.7×10^5 , 2.1×10^5 , 2.4×10^5 和 2.7×10^5 count/s。

利用 GM-APD 光子流响应模型对图 5 实验的计数结果分析可知,在图 5 所示的光子流密度条件下,GM-APD 光子探测盲区对 GM-APD 计数结果的影响几乎可以忽略。在此条件下,可以认为 GM-APD 的计数频率等同于待测目标辐射光子流密度。

如图 5 所示,背景光源光子流密度提高,GM-APD 单位时间内输出的数字脉冲个数递增,提高了 GM-APD 输出信号的信噪比。因此,光子流密度越大,实验图像可区分的强度级数越多。

4.3 成像效果评价

针对图 5 所示的实验结果,采用标准化互信息量对成像效果进行评价^[8]。

首先对实验得到的图像进行归一化处理,得到:

$$I'(i, j) = I(i, j) \times 255 / I_{\max}, \quad (15)$$

式(15)中, I_{\max} 表示实验图像中 GM-APD 的计数最大值; $I(i, j)$ 表示图像中像素的计数值; $I'(i, j)$ 表示归一化后的图像。

由于待测目标为已知,利用计算机生成一幅理想的标准图像 $S(i, j)$ 。以该标准图像作为参考图像,通过计算标准图像与归一化后图像 $I'(i, j)$ 的二维熵得到标准化互信息。构造元素 r_{ij} 表示在 I' 中灰度值为 i 并且 S 中灰度级为 j 的像素对,统计像素对出现的次数,有:

$$r_{ij} = - \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \delta(I'(x, y) - j) \delta(S(x, y) - i). \quad (16)$$

定义像素对出现的概率为:

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{M \times N}, \quad (17)$$

定义二维熵的表达式如下:

$$H(I', S) = - \sum_{i=0}^{\max(I') \max(S)} \sum_{j=0}^{\max(I') \max(S)} (1 + c_0 \cdot \frac{|j-i|}{i}) P_{ij} \ln P_{ij} \quad (c_0 \geq 0), \quad (18)$$

其中: $\frac{|j-i|}{i}$ 作为罚因子。 i 是标准图像的灰度级,有 $i = \{0, 1 \dots \max(I')\}$; j 是实验图像的灰度

级,有 $j = \{0, 1, \dots, \max(S)\}$; c_0 是常数,作为罚因子的权重。当实验图像的灰度离散程度和灰度值变化程度需同时被考虑时, $c_0 > 0$ 。当灰度值变化程度与灰度离散程度对二维熵的大小影响对等时,取 $c_0 = 1$ 。

借助于二维信息熵,实验图像的标准化互信息的计算如下:

$$\rho = \frac{I(X+Y)+C}{H(X)+C} \cdot \frac{1}{\rho_0}, \quad (19)$$

其中:由于标准化互信息引入了罚因子,所以标准化互信息可能出现负值,但是实际中标准化互信息表征了保真度,即 $0 \leq \rho \leq 1$,为了使之具有可计算性,本文引入修正因子 $C=1$ 。式中,

$$I(X, Y) = H(X) + H(X|Y) = H(X) - H(X, Y)/H(Y)$$

$$H(X) = - \sum_x^n P_X(X) \ln(P_X(X)),$$

且 $(P_X(X) = \frac{N_X}{M * N})$ 表示实验图像的熵。 $\rho_0 =$

$\frac{I(S, S)+C}{H(S)+C}$, 表示经过参数修正的标准图像的标准化互信息。

对图 5 给出的实验结果,分别计算其标准化互信息,结果如图 6 所示。

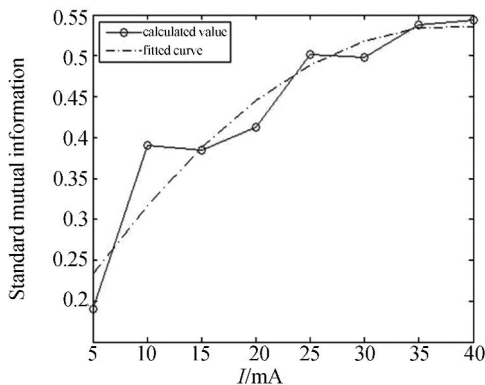


图 6 不同背景光强度下的标准化互信息值

Fig. 6 Standard mutual information with different intensities of background light

参考文献:

- [1] SRIKANTH R N, MAJEED M H, BAHRAM J. Information theoretic approach for assessing image fidelity in photon-counting arrays[J]. *Optical Express*, 2010, 18(3):2449-2463.
- [2] FABRIZIO G, SIMONE T, ALBERTO T, et al. Two-dimensional SPAD imaging camera for photon counting[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(5):759-774.
- [3] ZDENEK P, KLAUS S. Photon arrival timing with sub-camera exposure time resolution in wide-field time-resolved photon counting imaging[J]. *Optical Express*, 2010, 18(24):24888-24902.
- [4] GERRALT A V, ALBERT H W, MOODY L, et al.

如图 6 所示,随着背景光源光子流密度提高,所得图像的标准化互信息值亦随之增加,表明实验所得图像相对于标准的信息保真度增加。另外,造成计算所得的信息保真度小于 1 的原因可能是标准图像构造忽略了光子散粒噪声,而采用 GM-APD 的光子计数成像方式并不能克服光子散粒噪声的影响,所以影响了信息保真度。

5 结 论

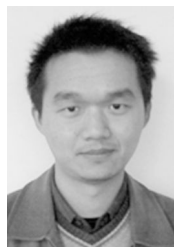
本文详细描述了一种以 GM-APD 为探测器的光子计数成像方法、实验装置以及其实验结果。建立了 GM-APD 光子流响应模型,利用马尔科夫更新过程分析了光子探测盲区对其瞬态响应的影响。同时,给出了实验装置的原理、搭建方法以及实验结果。

从实验结果可以看出,基于 GM-APD 的光子计数成像方法具有全数字化特点,由于无需采用模拟-数字转换器件,可以完全忽略常规成像方法中存在的模拟-数字转换噪声,即降低了系统成本,也为增加成像信噪比提供了直接帮助。同时,借助于 GM-APD 具有的单光子灵敏特性,该方法还具备高灵敏度探测的优点。实验结果表明,在光子流密度约为 $3.0E+4$ CPS (光功率大致相当于皮瓦量级)的条件下,该方法仍然可以实现可视成像。

初步研究结果表明了基于 GM-APD 的光子计数成像方法具备低噪声、宽动态范围等优点,适合于生命科学、高能物理等方面的应用。

- al.. Photon-counting gamma camera based on an electron-multiplying CCD[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, 52(3):580-588.
- [5] 何玲平, 尼启良, 李敏, 等. 楔条形阳极光子计数探测器成像性能检测[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11):2699-2704.
- HE L P, NI Q L, LI M, *et al.*. Image performance of photon-counting imaging detector with wedge-and-strip anode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2699-2704. (in Chinese)
- [6] PHILIP G, LEE J H A, KIM B I J, *et al.*. On the dead time problem of a GM counter [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, 67:1094-1098.
- [7] PHILIP G, STEVEN J, TERRY N. Dead-time effects on Geiger-mode APD performance [J]. *SPIE*, 2007, 6550:65500I.
- [8] SRIKANTH R N, MAJEED M H, BAHRAM J. Information theoretic approach for assessing image fidelity in photon-counting arrays [J]. *Optics Express*, 2010, 18(3):449-2457.

作者简介:



何伟基(1981—),男,广东韶关人,博士,讲师,主要从事微光成像器件机理及应用方面的研究。E-mail: njsthe-wei@163.com



成伟(1977—),男,陕西西安人,硕士,工程师,2006年于西安电子科技大学获硕士学位,现为西安微光器件研究中心工程师,从事半导体材料生长、测试方面研究。E-mail: szray@21cn.com



司马博羽(1987—),男,江苏南京人,硕士研究生,2010年于南京理工大学获学士学位,现为南京理工大学电光学院研究生,主要从事微光成像器件机理及应用方面的研究工作。E-mail: njstx-iaosi@yeah.net



程耀进(1974—),男,陕西蒲城人,博士,工程师,2010年于西北工业大学获博士学位,现为西安微光器件研究中心工程师,主要从事微光像增强器管体结构和分辨力技术研究。E-mail: yaojin_cheng@sina.com



陈钱(1964—),男,江苏无锡人,教授,博士生导师,“长江学者奖励计划”特聘教授,主要从事光电探测与光电成像技术等研究工作。E-mail: chenq@mail.njust.edu.cn