

doi:10.3788/gzxb20134211.1345

电子倍增 CCD 噪声因子模型及测试方法

张闻文, 钱月红, 陈钱, 顾国华

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 基于泊松分布模型推导了电子倍增电荷耦合器件的噪声因子, 定量描述了电子倍增电荷耦合器件倍增寄存器的输入输出特性以及在信号倍增过程中引入的额外噪声. 通过对采集的均匀照明目标的图像信息进行分析处理, 消除了读出噪声、固定图案噪声和本底值对测试结果的影响, 减小了测试误差, 提高了测试准确度, 且无需对芯片镀膜, 简化了测试工艺. 在理论研究基础上, 对 Andor 公司的 Luca 相机进行了实验测试. 结果表明: 当增益大于 100 时, 电子倍增电荷耦合器件的噪声因子为 1.414, 与传统的二项分布模型一致, 验证了本文提出的测试方法的可行性和可靠性.

关键词: 成像技术; CCD; 泊松分布; 噪声; 测试

中图分类号: TN223; P111.49

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)11-1345-5

Noise Factors Model of Electron Multiplying CCD and Test Methods

ZHANG Wen-wen, QIAN Yue-hong, CHEN Qian, GU Guo-hua

(School of Electronic Engineering & Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The noise factor of the electron multiplying CCD was derived based on Poisson distribution model whose theoretical limit was $\sqrt{2}$, the same as binomial model. The input and output characteristics of the electron multiplying register and the additional noise introduced by signal multiplication process were quantitatively described. Considering the defects of coating test, the image information of uniform illuminated was analyzed and processed. The influence of readout noise, fixed pattern noise and background values to test results was eliminated. This method reduced the test error and improved the precision. Meanwhile, the chip was uncoated and test process was simplified. Based on theoretical study, the experiments were carried out to test Andor Luca camera. The results show that when the gain is greater than 100, the electron multiplying CCD noise factor is 1.414, consistent with the theoretical values. This demonstrates that the proposed test is feasible and reliable.

Key words: Imaging techniques; CCD; Poisson distribution; Noise; Testing

0 引言

电子倍增 CCD 通过嵌入可控的倍增寄存器使信号电荷在转移过程中得到放大增强, 实现了全固态微光成像^[1-2]. 电子倍增 CCD 克服了传统微光成像器件功耗大、寿命短、成本高、光电转换效率低、空间分辨率差以及高增益下怕强光的缺点, 具有很高的量子效率、灵敏度和信噪比; 在高增益条件下有效

读出噪声小于一个电子, 消除了以往读出噪声对器件工作频率的限制, 在实时快速动态探测方面具有先天的优势, 其探测灵敏度可达到对真正单光子事件的检测^[3-5]. 电子倍增 CCD 的出现大大提高了微光成像器件的性能, 是微光成像领域的重大突破. 鉴于其优越的成像质量, 电子倍增 CCD 成像系统在军事侦察、天文观测、生物医学等领域具有巨大的发展潜力和广阔的应用前景^[6-12].

基金项目: 江苏省自然科学基金(No. BK20131354)、核高基国家重大专项(No. 2013ZX01015001)、装备预研项目(No. 40405030202)和“紫金之星”资助

第一作者: 张闻文(1981-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为光电成像探测与信号处理. Email: zhangwenwen1205@163.com

收稿日期: 2013-07-09; 录用日期: 2013-09-04

对于任何一个光电探测器,其信号都要经过光电转换—读出两个步骤.每个步骤都会不可避免的引入新的噪声、失真或者信号的衰减.引入倍增寄存器就是为了对传输过程中的信号进行放大,即光电转换—倍增—读出,使其超过后续步骤中探测器产生的噪声.但是,由于电子倍增过程具有随机性,会引入额外的噪声到整个系统中,该噪声称为过剩噪声,用噪声因子表示.目前关于噪声因子的理论均基于二项分布模型^[13-14],即在一个倍增级内,每个输入信号电子获得的能量最多只能激发出一个新电子.但这只是其中一种可能,如果输入信号电子获得的能量足够大,与硅晶格碰撞后将激发出多个新电子,产生的新电子总数服从泊松分布.关于噪声因子的测试则较少提及,文献[13]采用了对角线镀膜法完成了测试,该方法需要对电子倍增 CCD 芯片镀膜,加工工艺复杂.

本文基于泊松分布模型推导了电子倍增 CCD 噪声因子的极限理论值并与传统的二项分布模型结果进行比较.通过对采集的均匀照明目标的图像信息进行分析处理,完成了噪声因子的测试,测试结果与理论值一致,测试准确度高且无需镀膜,简化了测试工艺.

1 泊松分布模型

假设倍增寄存器具有理想的电荷转移效率,即输入信号电子无论发生倍增与否都能完全转移到倍增寄存器的输出端口,中间没有转移损失,且不考虑二次电子的碰撞电离.

定义噪声因子^[15-16]为

$$F^2 = \frac{\sigma_{\text{out}}^2}{G^2 \sigma_{\text{in}}^2} \quad (1)$$

式中, G 为电子倍增 CCD 的总增益, σ_{in}^2 为倍增寄存器输入信号的方差, σ_{out}^2 为倍增寄存器输出信号的方差.

首先考虑单一倍增级的情况,倍增级上输入电子数均值为 n ,单级倍增增益均值为 g ,则输出电子数均值为

$$m = gn \quad (2)$$

假设输入电子数的方差为 σ_m^2 ,输出电子数的方差为 σ_n^2 ,单级倍增增益的方差为 σ_g^2 ,则有^[17]

$$\frac{\sigma_m^2}{m^2} = \frac{\sigma_n^2}{n^2} + \frac{\sigma_g^2}{g^2} \quad (3)$$

一个输入电子发生碰撞电离后产生 x 个新电子的概率为

$$P(x) = \frac{(n\alpha)^x e^{-n\alpha}}{x!} \quad (4)$$

$$\alpha = g - 1 \quad (5)$$

式中, α 为碰撞电离率,即倍增概率.由泊松分布的特征可知,新电子的方差为

$$\sigma_x^2 = n\alpha \quad (6)$$

单级倍增增益的方差可写成

$$\sigma_g^2 = \frac{\sigma_x^2}{n^2} = \frac{\alpha}{n} \quad (7)$$

将式(2)、式(5)和式(7)代入式(3)得到

$$\sigma_m^2 = g^2 \sigma_n^2 + n^2 \sigma_g^2 = (1+\alpha)^2 \sigma_n + n\alpha \quad (8)$$

其次考虑 N 个倍增级的情况,假设输入信号受限于散粒噪声,服从泊松分布,倍增寄存器的输入信号的方差 $\sigma_{\text{in}}^2 = n$,则输出信号的方差 σ_{out}^2 可以用式(8)迭代得到.

当 $N=1$ 时,

$$\sigma_{\text{out}}^2 = \sigma_{\text{in}}^2 [(1+\alpha)^2 + (1+\alpha) - 1] \quad (9)$$

当 $N=2$ 时,

$$\sigma_{\text{out}}^2 = (1+\alpha) \sigma_{\text{in}}^2 [(1+\alpha)^3 + (1+\alpha)^2 - 1] \quad (10)$$

当 $N=3$ 时,

$$\sigma_{\text{out}}^2 = (1+\alpha)^2 \sigma_{\text{in}}^2 [(1+\alpha)^4 + (1+\alpha)^3 - 1] \quad (11)$$

对于任意的 N ,

$$\sigma_{\text{out}}^2 = (1+\alpha)^{N-1} \sigma_{\text{in}}^2 [(1+\alpha)^{N+1} + (1+\alpha)^N - 1] \quad (12)$$

$$G = g^N = (1+\alpha)^N \quad (13)$$

式(12)和式(13)代入定义式(1)得到

$$F^2 = \frac{(1+\alpha)^{2N} + (1+\alpha)^{2N-1} - (1+\alpha)^{N-1}}{(1+\alpha)^{2N}} = 1 + G^{-\frac{1}{N}} \left(1 - \frac{1}{G}\right) \quad (14)$$

当 $N=591$ 时,根据式(14)计算出 F^2 和电子倍增 CCD 总增益 G 的关系,如图 1. 当 $1 < G < 10$ 时,噪声因子随着增益的增加迅速上升;当 $10 \leq G < 100$ 时,噪声因子缓慢增加;当 $G \geq 100$ 时,曲线无限接近 2.

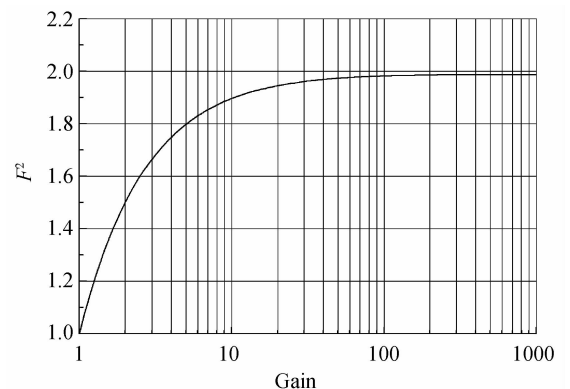


图 1 电子倍增 CCD 噪声因子与总增益关系

Fig. 1 Electron multiplying CCD noise factor and the total gain

无论采用二项分布模型还是泊松分布模型,当

总增益较大时,噪声因子的平方值均趋于 2,两者的结果是一致的.从统计学的角度来说,泊松分布是二项分布的极限分布.在倍增过程中这两种模型同时存在,仅凭其中一个模型不足以真实完整地描述倍增寄存器的工作特性.作为微光成像器件,电子倍增 CCD 通常工作在高增益条件下,噪声因子理论值可近似为常量 $\sqrt{2}$.

2 噪声因子测试方法研究

噪声因子测试的关键是 σ_{in} 和 σ_{out} 的计算.通常采集到的是电子倍增 CCD 最终输出的图像, σ_{in} 和 σ_{out} 是倍增寄存器输入和输出信号的均方差,属于中间量,无法直接获取.另外,在定义式中, σ_{in} 和 σ_{out} 均以电子(e^-)为单位;而电子倍增 CCD 输出的是 SIF (Standard Image Format) 格式的数字化图像,通常以 ADU (Analog Digital Unit) 为单位,需要进行单位换算.为了避免混淆,本文中凡是以 ADU 为单位的参量均在其后加 (ADU) 以示区别.因此,要从电子倍增 CCD 的输出图像中得到 σ_{in} 和 σ_{out} 需要解决两个问题:一是从输出图像中计算出 σ_{in} (ADU) 和 σ_{out} (ADU);二是将 σ_{in} (ADU) 和 σ_{out} (ADU) 换算成定义式中的 σ_{in} 和 σ_{out} ,需乘以转换增益.转换增益定义为一个数字单位 (ADU) 对应的光生电子数,单位为 e^-/ADU .

倍增寄存器的输入信号服从泊松分布,根据泊松分布的统计特性可知

$$\sigma_{in} = \sqrt{S_{in}} \quad (15)$$

式中 S_{in} 为倍增寄存器输入信号的均值.

由电子倍增 CCD 的工作原理可知,电子倍增 CCD 输出图像信号均值 S_{tot} (ADU) 为

$$S_{tot} \text{ (ADU)} = G S_{in} \text{ (ADU)} + S_B \text{ (ADU)} \quad (16)$$

则

$$S_{in} = \frac{K(S_{tot} \text{ (ADU)} - S_B \text{ (ADU)})}{G} \quad (17)$$

将式(17)代入式(15)得到

$$\sigma_{in} = \sqrt{\frac{K(S_{tot} \text{ (ADU)} - S_B \text{ (ADU)})}{G}} \quad (18)$$

式中 G 为增益, S_B (ADU) 为本底均值, K 为转换增益.

假设电子倍增 CCD 输出图像信号均方差为 σ_{tot} (ADU),读出噪声为 σ_r (DN),由器件结构可知,倍增寄存器输出信号的均方差 σ_{out} 为

$$\sigma_{out} = K \sqrt{\sigma_{tot}^2 \text{ (ADU)} - \sigma_r^2 \text{ (ADU)}} \quad (19)$$

将式(19)和(18)代入式(1),可得

$$F = \sqrt{\frac{K(\sigma_{tot}^2 \text{ (ADU)} - \sigma_r^2 \text{ (ADU)})}{G(S_{tot} \text{ (ADU)} - S_B \text{ (ADU)})}} \quad (20)$$

式(20)中,倍增增益和转换增益是已知的,只需测量电子倍增 CCD 的本底均值、读出噪声、输出信号的均方差和均值即可计算出噪声因子.测试步骤为:

1) 关闭光源、关闭电子倍增 CCD 的增益和镜头光圈,盖上镜头盖,连续采集多幅本底图像,计算每幅本底图像的均值和均方差,再将所有图像的均值和均方差分别相加后求平均,得到 S_B (ADU) 和 σ_r (ADU);

2) 调节光源照度和电子倍增 CCD 的镜头光圈,在增益最大时保证输出图像没有饱和,设置电子倍增 CCD 的增益,分别采集两幅数字图像 F_1 及 F_2 ;

3) 对数字图像 F_1 与 F_2 逐像素进行灰度相减,得到数字图像 F_3 , F_3 中不再包含固定图案噪声,计算数字图像 F_3 的均方差,该数值除以 $\sqrt{2}$ 就是 σ_{tot} (ADU);

4) 对数字图像 F_1 与 F_2 逐像素进行灰度相加后求平均,得到数字图像 F_4 ,计算数字图像 F_4 的均值即为 S_{tot} (ADU);

5) 将上述参量代入式(20)计算出该增益下的噪声因子;

6) 逐级增加增益,重复步骤 2)~ 5)。

3 实验研究

图 2 是电子倍增 CCD 噪声因子测试使用的实验平台,包括高稳定度可控标准光源、积分球、电子倍增 CCD 和计算机.其中高稳定度可控标准光源位于积分球的入口处,电子倍增 CCD 位于积分球的出口处,计算机通过 USB2.0 接口与电子倍增 CCD 连接.实验在暗箱中完成,为了避免杂散光的影响,暗箱用遮光布和黑丝绒布覆盖.

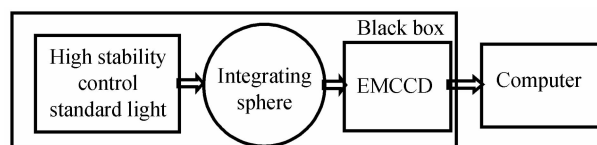


图 2 电子倍增 CCD 噪声因子测试装置

Fig. 2 Test device of electron multiplying CCD noise factor

高稳定度可控标准光源可以提供照度为 $0 \sim 10\,000$ lx,色温为 $2\,856$ K 的人射光.为了能够突出图像中的噪声信号,高稳定度可控标准光源需要提供高均匀性的人射光,本实验中通过在高稳定度可控标准光源出口处放置积分球实现,并且积分球的出入口均装有乳白磨砂玻璃.

根据上一节的测试方法,对 Andor 公司的 Luca 相机进行了测试.相机有效像素为 658×496 ,像素尺寸 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$,A/D 位数 14 bit,半导体制冷,工

作温度 -20°C , 转换增益 $K=1.786\text{ e}^{-}/\text{ADU}$.

按照测试步骤 1) 连续采集 10 幅本底图像, 每幅本底图像的均值和均方差, 本底值 S_B (ADU) 以及读出噪声 σ_r (ADU) 如表 1.

表 1 10 幅本底图像的信息

Table 1 Information of 10 bias areas images

Image number	Mean value	Mean squared errors	Background value S_B (ADU)	Readout noise σ_r (ADU)
1	506.77	7.47		
2	506.12	7.43		
3	506.40	7.47		
4	506.93	7.47		
5	506.10	7.44		
6	506.07	7.44	506.39	7.46
7	506.77	7.49		
8	506.70	7.49		
9	505.91	7.43		
10	506.15	7.42		

按照测试步骤 2)~4), 将 Luca 相机的增益设为 5, 得到输出图像的 S_{tot} (ADU) 和 σ_{tot} (ADU); 按照测试步骤 5) 计算出增益为 100 时的噪声因子; 按照测试步骤 6), 将 Luca 相机的增益依次设为 10、40、70、100、300、500、700 和 900, 得到不同增益下的噪声因子, 如表 2.

表 2 不同增益下的噪声因子

Table 2 Noise factors under different gains

Image number	Gain	S_{tot} (ADU)	σ_{tot}^2 (ADU)	F
1	5	575.50	20.22	1.351
2	10	639.88	38.71	1.389
3	40	1 063.76	156.90	1.403
4	70	1 532.38	283.15	1.412
5	100	2 020.33	411.75	1.414
6	300	5 098.87	1 241.94	1.414
7	500	7376.40	1 960.99	1.414
8	700	10 685.92	2 824.38	1.414
9	900	13 209.13	3 577.50	1.414

图 3 为实验数据与根据泊松分布模型仿真得到的

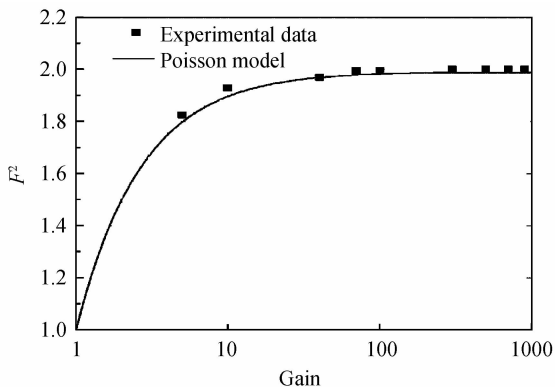


图 3 电子倍增 CCD 噪声因子测试数据

Fig. 3 Test data of electron multiplying CCD noise factor

的曲线. 从图中可以看出, 实验数据与曲线较吻合, 随着倍增增益的增加, 电子倍增 CCD 的噪声因子迅速增大, 平方值趋于 2, 与理论值一致.

4 结论

本文对电子倍增 CCD 的噪声因子理论模型及测试方法进行了研究. 基于泊松分布模型推导出电子倍增 CCD 噪声因子理论值为 $\sqrt{2}$, 定量描述了电子倍增 CCD 倍增寄存器的输入输出特性以及在信号倍增过程中引入的额外噪声. 利用电子倍增 CCD 对高均匀照明的目标成像, 将采集到的数据进行图像处理, 消除了读出噪声、固定图案噪声和本底值对测试结果的影响, 减小了测试误差, 提高了测试准确度, 且无需对电子倍增 CCD 镀膜, 简化了测试工艺. 在理论研究的基础上, 对 Andor 公司的 Luca 相机进行了测试, 测试结果与理论值一致, 验证了本文提出的测试方法的可行性和可靠性.

参考文献

- [1] DENVIR D J, CONROY E. Electron multiplying CCDs[C]. SPIE, 2003, **4877**: 55-68.
- [2] JERRAM P, POOL P, BELL R, *et al.* The LLLCCD: Low light imaging without the need for an intensifier[C]. SPIE, 2001, **4306**: 178-186.
- [3] DUNHAM M E, DONAGHUE D W, SCHEMPP W V, *et al.* Performance factors for intensified CCD system[C]. SPIE, 1992, **1655**: 66-73.
- [4] HYNCEK J. Impactron-a new solid state image intensifier[J]. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 2001, **48**(10): 2238-2241.
- [5] DENVIR D J, CONROY E. Electron multiplying CCD technology: the new ICCD[C]. SPIE, 2003, **4796**: 164-174.
- [6] DENVIR D J, COATES C G. Electron multiplying CCD technology: application to ultrasensitive detection of biomolecules[C]. SPIE, 2002, **4626**: 502-512.
- [7] POOL P J, MORRIS D G, BURT D J. Application of electron multiplying CCD technology in space instrumentation[C]. SPIE, 2005, **5902**: 1-6.
- [8] MACKAY C, BASDEN A, BRIDGELAND M. Astronomical imaging with L3CCDs: detector performance and high-speed controller design[C]. SPIE, 2004, **5499**: 203-209.
- [9] SMITH D R, WALTON D M, HOLLAND A D, *et al.* EMCCDs for space applications[C]. SPIE, 2004, **6276**: 985-991.
- [10] 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.
- [11] COATES C G, DENVIRA D J, MCHALE N G, *et al.* Ultra sensitivity, speed and resolution: optimizing low-light microscopy with the back-illuminated electron multiplying CCD[C]. SPIE, 2003, **5139**: 56-66.
- [12] SMITH D R, INGLEY R, HOLLAND A D. Proton irradiation of EMCCDs[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2006, **53**(2): 205-210.
- [13] ROBBINS M S, HADWEN B J. The noise performance of electron multiplying charge coupled devices [J]. *IEEE*

- Transactions on Electron Devices*, 2003, **50**(5): 1227-1232.
- [14] ZHANG Wen-wen, CHEN Qian. Noise characteristics of electron multiplying charge coupled devices [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 756-760.
张闻文,陈钱. 电子倍增 CCD 噪声特性研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(4): 756-760.
- [15] HYNCEK J, NISHIWAKI T. Excess noise and other important characteristics of low light level imaging using charge multiplying CCDs[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, **50**(1): 239-245.
- [16] PLAKHOTNIK T, CHENNU A, ZVYAGIN A V. Statistics of single-electron signals in electron multiplying charge coupled devices[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2006, **53**(4): 618-622.
- [17] LI Gang, ZHOU Yan-ping. Study on noise in CCD output signal and its processing circuit[J]. *Electronics Quality*, 2007, (4): 25-29.
李刚,周彦平. CCD 图像传感器件的输出噪声及其处理电路研究[J]. 电子质量, 2007, (4): 25-29.