

文章编号: 0253-2239(2007)05-0882-7

三种光电器件用于天体光度测量时的性能比较

马晓燠^{1,2} 饶长辉¹ 张学军¹

(¹ 中国科学院光电研究所, 成都 610029)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 从天体光度测量原理出发推导出光电倍增管、普通 CCD 和电子倍增 CCD 在天体光度测量中的信噪比公式, 从理论上比较了三种器件在天体光度测量中的性能, 并给出了实验结果。结果表明, 电子倍增 CCD 的性能最好; 在光辐射度较小的条件下, 读出噪声严重地影响了普通 CCD 的信噪比, 光电倍增管的性能较普通 CCD 的好; 而在光辐射度较大的条件下, 量子效率成为信噪比的决定因素, 普通 CCD 的性能较光电倍增管的好。最后从误差平方和与信噪比两个方面对理论推导进行了实验验证, 结果表明实验结果和理论计算吻合得很好。

关键词: 光学测量; 性能比较; 光度测量; 信噪比; 光电倍增管

中图分类号: O432.2 文献标识码: A

Performance Comparison of Photon-Multiplier-Tube-Based and CCD-Based Photoelectronic Devices

Ma Xiaoyu^{1,2} Rao Changhui¹ Zhang Xuejun¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610029)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: Based on the principle of measurement of celestial body's brightness, the signal-noise ratio (SNR) of photon-multiplier-tube (PMT), common charge-coupled-device (CCD) and electron-multiplying CCD (EMCCD) was deduced, the performance of these three devices had been compared in theory and experiment. The results showed that the performance of EMCCD was the best in all situations. When the radiation was fairly weak, the dominating factor which had an effect on detection ability was readout noise of CCD, so the performance of PMT was better than CCDs. If the radiation is fairly strong, the limits detection ability was quantum efficiency, then the performance of common CCD was better than PMT's. Finally, sum of squared error and signal-noise ratio (SNR) were experimentally validated, it showed that experimental value was consistent with theoretical value.

Key words: optical measurement; performance comparison; luminosity measurement; signal-noise ratio (SNR); photon-multiplier-tube (PMT)

1 引言

在天文观测中, 通常需要测量观测目标的亮度变化, 这对于光电测量系统, 需要安装光电探测器。由于大部分天体离地球很远, 其辐射的光能量只有很小部分能够被探测到, 因此必须使用灵敏度极高的光子探测系统才能探测到如此低水平的光子发射, 当前通常使用的器件有光电倍增管和电荷耦合器件 (CCD)。光电倍增管的工作原理是阴极在光照下发射光电子, 再通过逐级倍增使电子的数目大量增加, 最后被阳极收集形成阳极电流, 当计数时间分

辨力足够大时, 就可以记下每个光电子形成的脉冲, 从而得到阴极发射的光电子数目; CCD 的原理是利用半导体形成的势垒来储存由光子激发的电荷, 再把这些电荷转移到输出放大器上, 并把电荷信号转变为电压或电流信号, 从而得到光电子的数目。由于它们的工作原理不同, 其噪声的种类和分布也有区别, 因此研究它们应用于天体光度测量时各自的性能有重要的实际价值。

近年来, 由于半导体工业的迅速发展和制作工艺的不断成熟, CCD 的种类也越来越多, 电子倍增

作者简介: 马晓燠(1983—), 男, 四川人, 硕士研究生, 主要从事自适应光学系统中不同光电探测器的性能分析方面的研究。E-mail: maxiaoyu001@126.com

导师简介: 饶长辉(1971—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn

收稿日期: 2006-05-24; 收到修改稿日期: 2006-08-25

CCD 就是其中一例,通过片状放大器将光电子的数目增加后再读出,其等效读出噪声与普通的 CCD 相比减少了许多^[1],使其在天体光度测量中有着极大的优势。光电倍增管作为天体光度测量中的探测仪器已经比较成熟^[2~4]。本文从天体光度测量原理出发推导出光电倍增管、普通 CCD 和电子倍增 CCD 在天体光度测量中的信噪比,从理论上系统地比较了三种器件在天体光度测量中的性能优劣。

2 光度测量原理

用光度计测量不同星等的恒星的亮度时,发现星等和亮度的关系:

$$m = a + b \lg E, \quad (1)$$

其中 E 为天体的光出射度,单位为 lx(勒克斯), m 为天体的星等数。1 等星要比 6 等星亮 100 倍,因此星等被量化为

$$m = -2.512 \lg E, \quad (2)$$

在使用光电倍增管和 CCD 时,测量光子的平均到达数 n_s (单位个/秒)比直接测量天体的光出射度 E 方便,而天体的星等数与 n_s 的关系为^[5]

$$\lg n_s = -0.4m + 2 \lg D + \lg \Delta\lambda + \lg \xi_\alpha + \lg \xi_\beta + 2.9, \quad (3)$$

其中, D 为望远镜口径,单位为厘米; $\Delta\lambda$ 为探测器的探测波长范围,单位为 11^{-10} m; ξ_α 为大气透射率; ξ_β 为望远镜透射率。因此可以根据测量到的光子平均到达数来得到该天体的视星等数,而不用测量该天体的光出射度 E 。

3 噪声分析

系统的光路如图 1,在透镜前加装视场光阑,在焦平面处放置光电转换器(光电倍增管、普通 CCD 或电子倍增 CCD),通过光电转换后输出光电子数。

由于恒星离地球都较远,所以可认为到达镜面的光为平行光,而恒星为点状目标。理论上,平行光经过光学系统后成像在光电转换器的光敏面上应该是一个理想的光学系统衍射斑。但实际情况是光学系统的分辨力不可能等同于衍射斑的大小,大气也不是静止不动的,对目标星号有一定的扰动,仪器跟

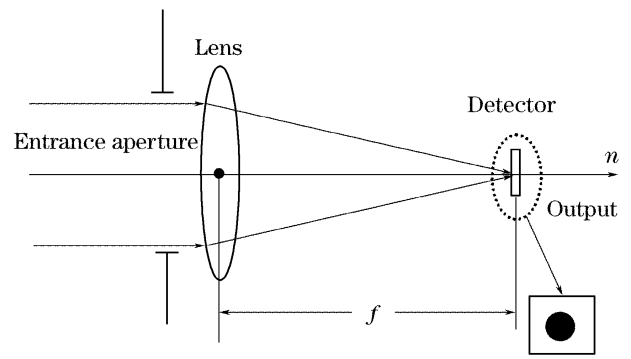


图 1 系统光路

Fig. 1 Optics of system

踪不平稳也会造成像点弥散。假设最后光斑处的角弥散为 δ ,光斑直径 d 大小为

$$d = f \cdot \delta, \quad (4)$$

光斑所占像素点数 K 与光斑直径 d 的关系为

$$K = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot b^2}, \quad (5)$$

其中 b 为单个像素的边长。

在低照度时光电倍增管的噪声主要有光子噪声、背景噪声和暗电流噪声;普通 CCD 和电子倍增 CCD 的噪声主要有光子噪声、背景噪声、暗电流噪声和读出噪声,并且可认为各个噪声之间不相关。其中光子噪声、背景噪声和暗电流噪声都是泊松分布,而读出噪声是高斯分布^[6~8]。

在进行天体目标光度测量时,需要剔除环境背景的影响,可通过将目标偏离出探测视场单纯采集背景信号,再进行背景去除,即

$$n_s = n - n_b, \quad (6)$$

其中 n 为总信号, n_b 为平均背景光子到达数,单位为 1/s(光子/秒)。

光电倍增管和 CCD(包括普通 CCD 和电子倍增 CCD)的各种噪声方差的表达式由表 1 给出,其中 k_{CCD} 为 CCD 的填充因子, t 为曝光时间,单位为 1/s, η_{PMT} 为光电倍增管光阴极的平均量子效率, η_{CCD} 为 CCD 的平均量子效率, n_{PMTdark} 为光电倍增管平均暗电子发射率,单位为个/秒, n_{CCDdark} 为 CCD 平均暗电子发射率,单位为 $e^- / (s \cdot \text{pixel})$, n_r 为 CCD 的读出噪声。由于各噪声之间是不相关的,光电倍增管和 CCD 的噪声方差分别为各噪声的方差之和。光电倍增管和 CCD 的信噪比公式为

$$R_{\text{PMT}} = \frac{N_s}{\sigma_{\text{PMT}}} = \frac{n_s \cdot \eta_{\text{PMT}} \cdot t}{\sqrt{\eta_{\text{PMT}} \cdot t (n_s + n_b + n_{\text{PMTdark}} / \eta_{\text{PMT}})}}, \quad (7)$$

$$R_{\text{CCD}} = \frac{N_s}{\sigma_{\text{CCD}}} = \frac{n_s \cdot t \cdot k_{\text{CCD}} \cdot \eta_{\text{CCD}}}{\sqrt{\eta_{\text{CCD}} \cdot t \cdot k_{\text{CCD}} \cdot (n_s + n_b) + K \cdot (n_{\text{CCDdark}} \cdot t + n_r^2)}}, \quad (8)$$

表 1 光电倍增管和 CCD 的噪声方差

Table 1 The noise's variance of PMT and CCD

Sorts of noise	Noise's variance	
	PMT	CCD
Photon noise σ_p^2	$n_s \cdot t \cdot \eta_{\text{PMT}}$	$n_s \cdot t \cdot k_{\text{CCD}} \cdot \eta_{\text{CCD}}$
Background noise σ_b^2	$n_b \cdot t \cdot \eta_{\text{PMT}}$	$n_b \cdot k_{\text{CCD}} \cdot \eta_{\text{CCD}} \cdot t$
Dark current noise σ_{dark}^2	$n_{\text{PMTdark}} \cdot t$	$K \cdot n_{\text{CCDdark}} \cdot t$
Readout noise σ_r^2		$K \cdot n_r^2$

必须指出的是,当光电倍增管工作在光子计数状态下时,由于光子计数器的时间分辨力有限,当光子到达数目过多时,会产生光子堆积而引起计数丢失,所以具有最大光子计数率; CCD 由于势垒深度的关系,当曝光过度或光照过强时,光电子就会溢出势垒而造成信号丢失。所以光电倍增管和 CCD 的信噪比公式只有在非饱和情况下才有效。

4 综合性能比较

列出典型参量进行计算,分别找出光电倍增管、普通 CCD 和电子倍增 CCD 限制探测能力的因素,同时对提出的噪声公式的验证。

光学系统参量:

通光口径 D : 106 cm;

允许透射波长范围 $\Delta\lambda$: 3×10^{-7} m (0.4 ~ 0.7 μm);

大气透射率: 0.5;

望远镜透射率: 0.5;

背景光: 19 星等/弧秒²(晴朗无月夜)

光电倍增管参量:

光阴极的平均量子效率 η_{PMT} : 0.07 (0.4 ~ 0.7 μm);

平均暗电子发射率 n_{PMTdark} : 300 /s;

CCD 参量:

平均量子效率 η_{CCD} : 0.9 (0.4 ~ 0.7 μm);

平均暗电子发射率 n_{CCDdark} : $1 e^- / (\text{s} \cdot \text{pixel})$

填充因子 k_{CCD} : 1

光斑所占像素点数 K : 900 (30 × 30)

读出噪声 n_r : 普通 CCD 为 $45 e^- / \text{pixel}$, 电子倍增 CCD 为 $1 e^- / \text{pixel}$ 。

4.1 探测极限星等能力

光电系统的探测能力可以用信噪比来评定,在目前的图像信号处理水平,要在要求信号的检测率为 95%,虚警率为 10^{-5} 的前提下,信噪比至少应为 6。因此我们取信噪比为 6 时能探测的星等为极限

星等。图 2 是不同积分时间下光电倍增管、普通 CCD 和电子倍增 CCD 的探测极限星等能力。

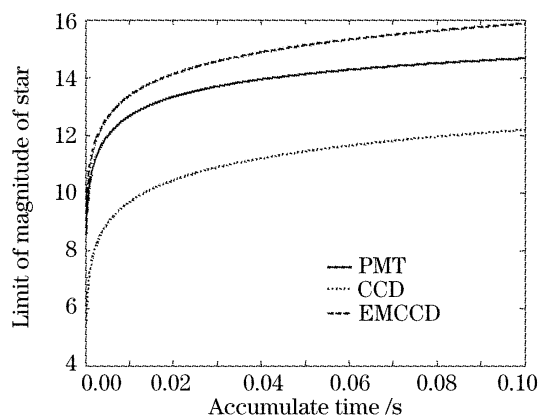


图 2 积分时间-极限星等探测能力曲线

Fig. 2 Accumulated time-limit of magnitude of star

由图 2 可以发现,随着时间的增加,光电倍增管、普通 CCD 和电子倍增 CCD 的探测极限星等能力都在增加,其中电子倍增 CCD 的增加速度最快,普通 CCD 次之。在积分时间不大于 0.1s 的前提下,电子倍增 CCD 的极限星等探测能力最强,光电倍增管次之,而普通 CCD 最弱。其主要原因是因在弱光条件下,光子噪声和读出噪声占主导地位,电子倍增 CCD 的量子效率比光电倍增管高,读出噪声小,所以能够探测到的极限星等数比光电倍增管大;普通 CCD 的量子效率虽然比光电倍增管高,但读出噪声太大,所以能够探测到的极限星等数比光电倍增管小。

4.2 相同星等的信噪比

在实际应用中,我们不但关心探测极限星等能力,还会注意在不同星等时的信噪比,以便在探测不同星等时选取更优良的器件。图 3 是三种器件分别在积分时间为 0.01 s, 0.05 s 和 0.1 s 时的信噪比曲线。可以发现,电子倍增 CCD 的信噪比总高于光电倍增管和普通 CCD;但光电倍增管和普通 CCD 的信噪比曲线在某一星等处有交叉,如果定义该星等数为等效星等数 M ,则在积分时间一定的条件下,当需要探测的星等数大于 M 时,普通 CCD 的信噪比小于光电倍增管,此时使用光电倍增管较普通 CCD 好;当需要探测的星等数小于 M 时,普通 CCD 的信噪比大于光电倍增管,此时使用普通 CCD 较光电倍增管好。而 M 随着积分时间的不同而不同,总的说来,积分时间越长, M 值越大,如图 4 所示。在实际选择普通 CCD 和光电倍增管的过程中,可以先根据积分时间决定 M ,再根据 M 选择不同的器件。

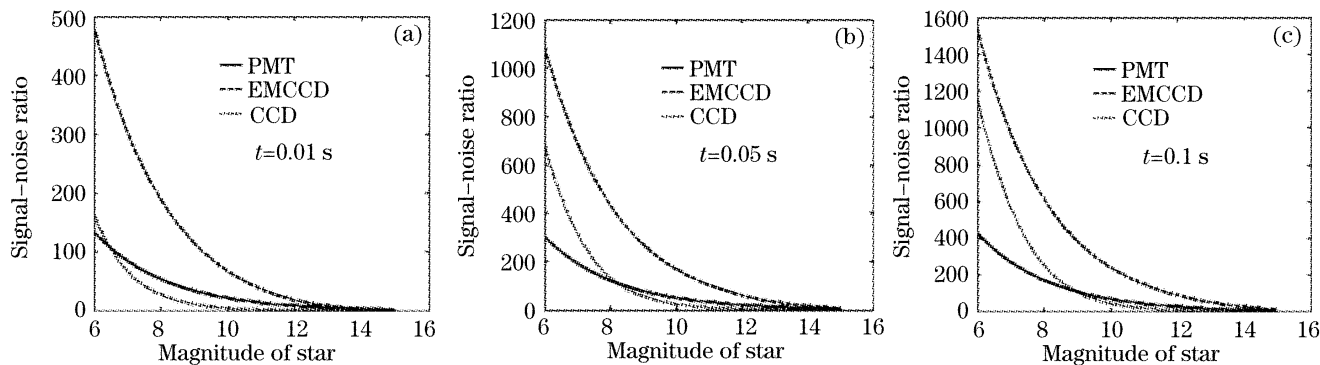


图 3 三种器件在探测相同星等时的信噪比

Fig. 3 The signal-noise ratio of three devices when detecting the same magnitude of star

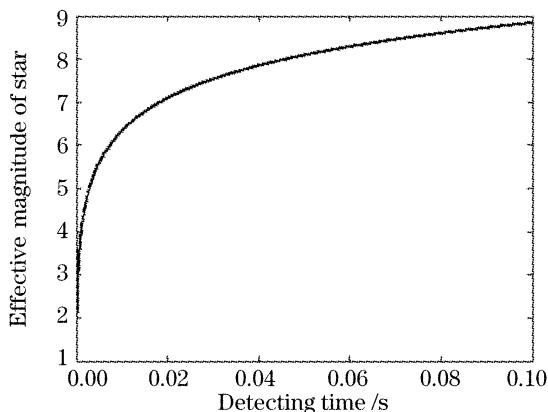


图 4 普通 CCD 与光电倍增管在积分时间相同时的等效星等

Fig. 4 The effective magnitude of star of CCD and PMT when integral time is the same

4.3 优缺点

通过对三种器件的噪声和性能的比较分析,可以总结此三种探测器件在天体光度测量中的优缺点。

光电倍增管的优点:没有读出噪声;信噪比不随光斑直径的增加而增加;探测极限星等能力较普通 CCD 好;当被探测天体的星等数大于 M 时,信噪比比普通 CCD 高;最大光强探测能力较大。它的缺点:量子效率低,影响到信噪比的大小,当被探测天体的星等数小于 M 时,信噪比比普通 CCD 低;暗发射电子数多,并且随温度的变化而变化很大;动态范围:一般小于 $10^7/s$ 。

普通 CCD 的优点:量子效率高,使得当被探测天体的星等数小于 M 时,信噪比比光电倍增管高;单个像素的暗电流小;当光斑所占像素点较少时,总暗电流比光电倍增管小;单个像素的饱和光电子数在 $10^5 \sim 10^6$,由于光斑占据多个像素,所以在探测同等光照强度时,其积分时间可以比光电倍增管的积分时间长;最大光强探测能力最大。它的缺点:有读出噪声,并且读出噪声是高斯分布的,在光斑直径较大,所占像素较多的时候,读出噪声会严重降低信噪

比,所以其探测极限星等能力低于光电倍增管,并且当探测天体的星等数大于 M 时,信噪比比光电倍增管的低;填充因子也会降低其信噪比;动态范围:一般小于 $10^6/(s \cdot \text{pixel})$ 。

电子倍增 CCD 的优点:除了具有普通 CCD 的优点外,还具有读出噪声低($1e^-/(s \cdot \text{pixel})$)的优点,所以其探测极限星等能力和在探测不同亮度的天体时的信噪比都要高于前两种器件。它的缺点:有读出噪声,信噪比随光斑直径的增大而增大,所以光斑直径不能过大;填充因子会降低其信噪比;动态范围:一般小于 $10^5/(s \cdot \text{pixel})$;最大光强探测能力最小。

5 实 验

为了正确比较 CCD 与光电倍增管在光度测量中的性能优劣,我们在暗室内进行了实验。图 5 为实验光路布局图。采用的微光光源经过强衰减的 He-Ne 激光,通过可调衰减片来调节进入透镜的光强;为了便于比较,在透镜后加了一个平面反射镜座,电子倍增 CCD 和光电倍增管都位于透镜的焦距处,没有加反射镜时,由电子倍增 CCD 探测光强,加了反射镜后,由光电倍增管探测光强。在实验过程中,通过调节电子倍增 CCD 的增益来完成普通

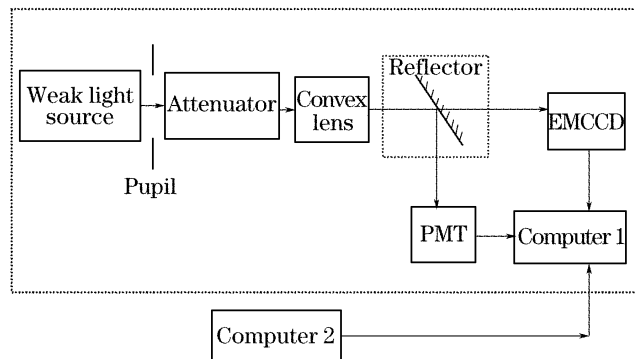


图 5 实验光路框图

Fig. 5 The block diagram of experimental setup

CCD 和电子倍增 CCD 的切换,即当增益为 0 时,为普通 CCD;当增益为 200 时,为电子倍增 CCD。计算机 1 在暗室内对光电倍增管和电子倍增 CCD 发出控制命令、接收和存储由它们采集到的数据。为了避免计算机 1 的荧光屏和鼠标等光源对实验的干扰,利用在暗室外的计算机 2 来控制计算机 1 完成一系列工作,这样就可以关闭或遮盖计算机 1 的全部发光设备。

5.1 实验步骤

先调节光强到最弱。

1) 不加反射镜,设置电子倍增 CCD 的增益为 0,在积分时间为 10 ms,50 ms 和 100 ms 时分别采集 100 帧图像;

2) 不加反射镜,设置电子倍增 CCD 的增益到 200,在积分时间为 10 ms,50 ms 和 100 ms 时分别采集 100 帧图像;

3) 不加反射镜,控制光电倍增管在积分时间为 10 ms,50 ms 和 100 ms 时分别采集 100 个数据;

4) 加上反射镜,控制光电倍增管在积分时间为 10 ms,50 ms 和 100 ms 时分别采集 100 个数据。

调节可调衰减片逐步增加光强,在不同的光强下重复上面四个步骤。

5.2 数据处理

5.2.1 信号提取

1) CCD

如果 CCD 的每幅图像由 $i \times j$ 个像素组成,共采集了 p 幅图像,每点采集到的灰度值为 $S_{g_1, g_2, b}$ 。正如前面讨论的,由于各种扰动的存在,为了使光斑始终落在信号区域,信号区域必须比光斑区域大(即光斑区域只占信号区域的一部分),并且取图像的四个角采集到的灰度值作为背景区域,如图 6 所示。假设信号光斑所占像素点为 $m_1 \times n_1$ 的矩阵,而噪声区域为四个 $m_{2i} \times n_{2i}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 的矩阵,则第 b

幅图像的信号区域平均值为

$$s_b = \frac{1}{m_1 \cdot n_1} \cdot \sum_{k_1=1}^{m_1} \sum_{k_2=1}^{n_1} S_{k_1 k_2 b}, \quad (9)$$

第 b 幅图像的背景噪声区域平均值为

$$N_b = \frac{1}{4 \cdot m_2 \cdot n_2} \cdot \sum_{i=1}^4 \sum_{g_1=1}^{m_{2i}} \sum_{g_2=1}^{n_{2i}} S_{g_1 g_2 b}, \quad (10)$$

所以第 b 幅图像的信号平均值为

$$P_b = s_b - N_b. \quad (11)$$

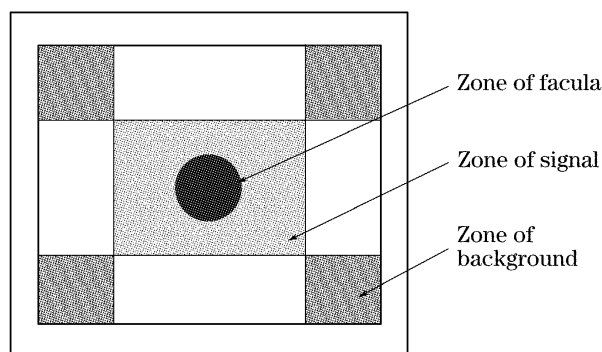


图 6 CCD 的信号和噪声区域

Fig. 6 The zone of signal and noise of CCD

2) 光电倍增管

在同等条件下,实验步骤 3) 和 4) 采集到的数据实际上分别是噪声 N'_p 和信号 s'_p , 所以第 b 点的信号值为

$$P'_b = s'_b - N'_b, \quad (12)$$

到达靶面的信号光子数为

$$G_b = P'_b / \eta. \quad (13)$$

图 7 分别是普通 CCD、光电倍增管和电子倍增 CCD 三种探测器件在积分时间为 0.1 s 时对同一光强连续探测 10 s 得到的“时间-信号”曲线。可以直观地看出,普通 CCD 的起伏最大;光电倍增管次之;电子倍增 CCD 的起伏最小。也就是说在当前探测状态下,电子倍增 CCD 的信噪比最高;光电倍增管次之;普通 CCD 的信噪比最小。

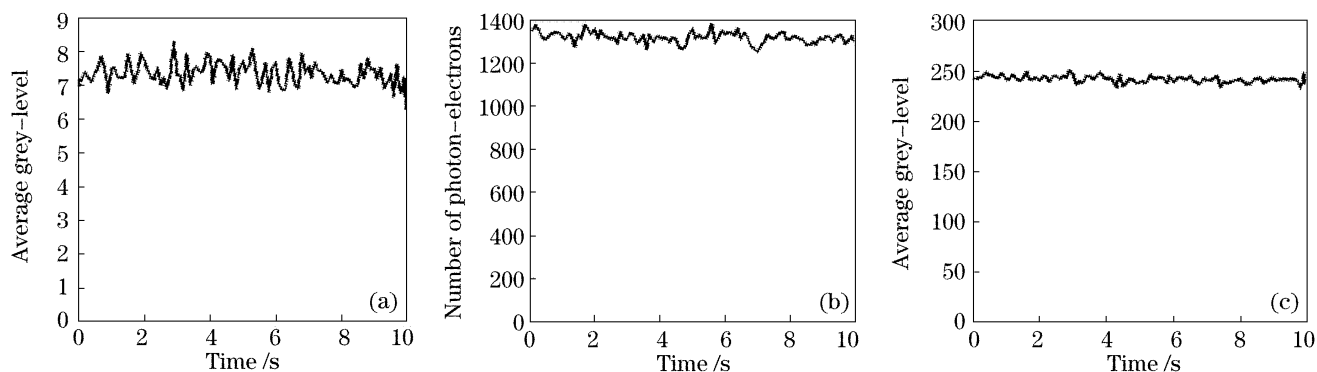


图 7 在积分时间为 0.1 s 时,三种器件所探测到的信号。(a) 普通 CCD, (b) 光倍增管, (c) 电子倍增 CCD

Fig. 7 The signal detected by three devices when integral time is 0.1 s. (a) CCD, (b) PMT, (c) EMCCD

5.2.2 误差平方和

为了比较普通 CCD 和电子倍增 CCD 在探测光辐射时的准确性,利用光电倍增管探测到的光电子数利用(13)式计算得到的到达靶面光子数作为横坐标,将普通 CCD 和电子倍增 CCD 探测得到的平均灰度值作为纵坐标,并用一阶曲线拟合得到图 8。一般可以用误差平方和来在表征离散点与拟合曲线

的偏离程度,误差平方和的计算公式为

$$E = \frac{1}{S} \cdot \sum_{i=1}^S \left[\frac{P_i - F(P'_i)}{F(P'_i)} \right]^2, \quad (14)$$

其中, P_i 为 CCD 采集的第 t 幅图像的信号平均值; P'_i 为光电倍增管采集的第 t 点信号值; S 为总共采集信号的次数; $F(x)$ 为线形拟合函数。

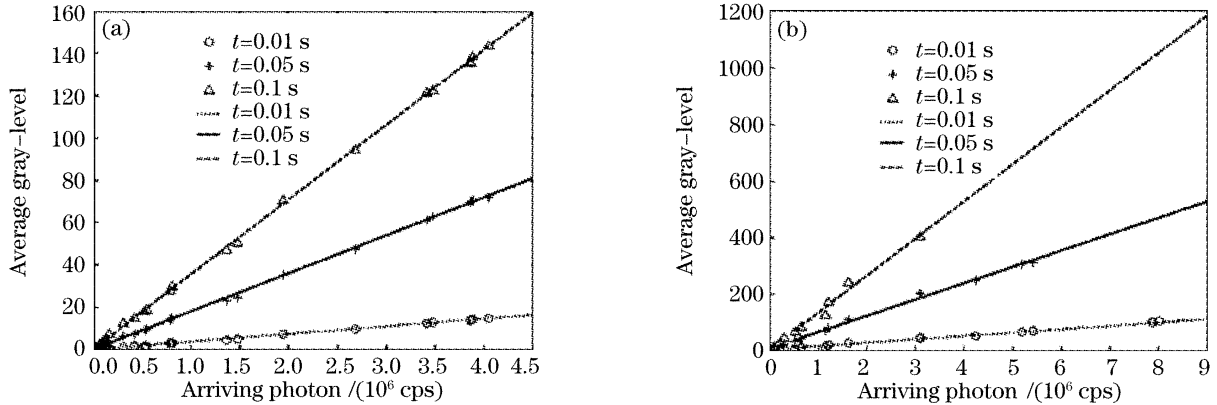


图 8 电子倍增 CCD 和普通 CCD 的平均灰度值与到达光子数的关系(a)普通 CCD, (b)电子倍增 CCD
Fig. 8 The relationship between EMCCD or CCD and the arriving photons. (a) CCD, (b) EMCCD

由表 2 可以发现:普通 CCD 和电子倍增 CCD 的误差平方和都随着探测时积分时间的增加而减小,说明同一器件的积分时间越长,信噪比越高;电子倍增 CCD 的误差平方和总是小于普通 CCD 的误差平方和,说明在相同积分时间的条件下,电子倍增 CCD 的噪声比普通 CCD 的低。这与 CCD 的信噪比公式(8)吻合。

表 2 普通 CCD 与电子倍增 CCD 的误差平方和
Table 2 Sum of squared error of CCD and EMCCD

Time /s	0.01	0.05	0.1
E of CCD	5.7984	2.3154	0.57644
E of EMCCD	1.2815	0.53522	0.12871

5.2.3 信噪比

1) CCD 的信噪比

利用(11)式得到的信号 P_b 的平均值为

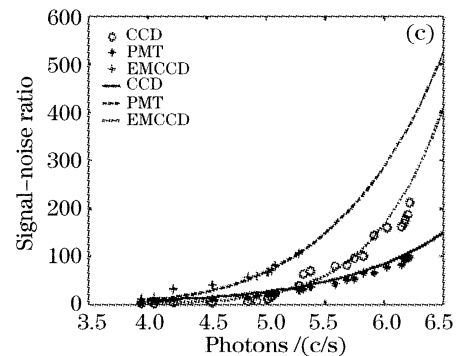
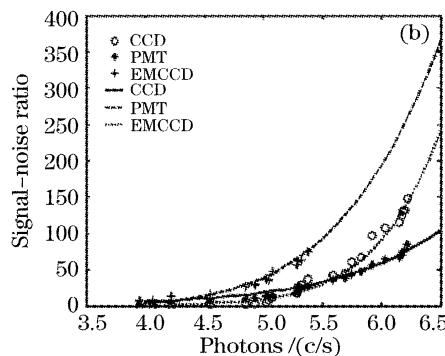
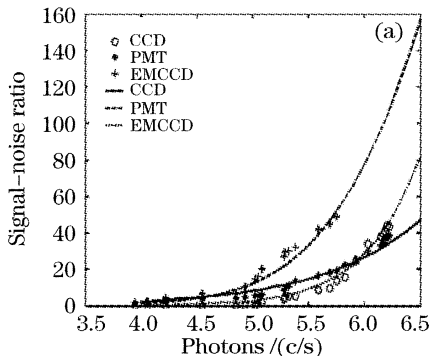


图 9 实验与理论的信噪比曲线,积分时间 t (a) $t=0.01$ s, (b) $t=0.05$ s, (c) $t=0.1$ s

Fig. 9 The signal-noise ratio experimental and theoretically calculated signal-noise ratio, accumulation time t

(a) $t=0.01$ s, (b) $t=0.05$ s, (c) $t=0.1$ s

$$A = \frac{1}{p} \cdot \sum_{b=1}^p P_b, \quad (15)$$

信号的噪声方差为

$$N_{CCD} = \frac{1}{p} \cdot \sum_{b=1}^p (s_b - A)^2, \quad (16)$$

所以 CCD 的整幅图像信噪比为

$$R_{CCD} = A / \sqrt{N_{CCD}}, \quad (17)$$

2) 光电倍增管的信噪比计算

平均信号值为

$$A' = \frac{1}{p} \cdot \sum_{b=1}^p P'_b, \quad (18)$$

信号的噪声方差为

$$N_{PMT} = \frac{1}{p} \cdot \sum_{b=1}^p (P'_b - A')^2, \quad (19)$$

所以光电倍增管的信噪比为

$$R_{\text{PMT}} = A' / \sqrt{N_{\text{PMT}}}. \quad (20)$$

图 9 分别是在积分时间为 0.01 s, 0.05 s 和 0.1 s 时理论和实验测量得到的信噪比曲线。可以看出, 实验计算得到信噪比和理论计算得的信噪比符合得很好。

这里需要指出的是, 本实验没有模拟大气扰动对光斑扩展和光斑亮度的影响, 在实际测量中需要加以考虑。另外本实验所用光源是单波长的激光光源, 实际测量中还需要考虑不同波长的光波大气透射率与探测器件的光谱响应等因素。

6 结 论

分析了利用光电倍增管、普通 CCD 和电子倍增 CCD 这三种光电器件进行天体光度测量的原理, 得到了它们在天体光度测量中的噪声模型和计算公式, 详细讨论和比较了它们在各种情况下应用时的性能, 即电子倍增 CCD 的性能最好; 在光辐射度较小的条件下, 读出噪声严重的影响了普通 CCD 的信噪比, 光电倍增管的性能较普通 CCD 好; 而在光辐射度较大的条件下, 量子效率成为信噪比的决定因素, 普通 CCD 的性能较光电倍增管好。最后利用实验从误差平方和和信噪比两个方面对理论推导进行了验证, 实验结果和理论计算吻合得很好。为天体光度测量的探测器件的选择提供了重要依据。

参 考 文 献

1 Su Xuezheng. EMCCD technology—single photon imaging

- detection[J]. *Modern Scientific Instrument*, 2005, (2): 51~53 (in Chinese)
- 苏学征. EMCCD 技术——单光子水平成像检测[J]. *现代科学仪器*, 2005, (2): 51~53
- 2 Hu Jingyao, Dong Yisun. *Measurement of Celestial Bodies Luminosity* [M]. Beijing: Popular Science Press, 1989 (in Chinese)
- 胡景耀, 董怡荪. 天体光度测量[M]. 北京: 科学普及出版社, 1989
- 3 Zhu Zi. The response of the photoelectric detector and its influence on the color correction of the stellar magnitude determination [J]. *Publications of the Shaanxi Astronomical Observatory*, 1990, **13**(2): 39~43 (in Chinese)
- 朱 紫. 光电探测器的光谱响应与恒星星等测定的色改正[J]. *陕西天文台台刊*, 1990, **13**(2): 39~43
- 4 Zhao Gang, Zhang Jianwei, Wang Rui. Use of photon counts in the photoelectric astrolabe (type-II) [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 1992, (13): 129~139 (in Chinese)
- 赵 刚, 张建卫, 王 锐. 光子计数技术用于 II 型光电等高仪观测系统[J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 1992, (13): 129~139
- 5 F. Rigaut. *Astronomical Reference Sources* [R]. *Adaptive Optics for Astronomy*, 1994. 73~84
- 6 Yang Boxiong, Hu Xinhe, Fu Huiqing. Noise analysis and processing of CCD working signal [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(4): 51~53 (in Chinese)
- 杨博雄, 胡新和, 傅辉清等. CCD 工作信号的噪声分析与处理 [J]. *光学与光电技术*, 2004, **2**(4): 51~53
- 7 Guo Congliang, Zeng Dan, Li Jie. The noise model for photomultiplier [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2004, **24**(2): 117~121 (in Chinese)
- 郭从良, 曾 丹, 李 杰. 光电倍增管的噪声模型 [J]. *核电子学与探测技术*, 2004, **24**(2): 117~121
- 8 Qi Kangnan, Qin Kecheng, Cheng Lu. *Introduction to Statistical Optics* [M]. Tianjing: Nankai University Press, 1987 (in Chinese)
- 戚康男, 秦克诚, 程 路. 统计光学导论 [M]. 天津: 南开大学出版社, 1987