

## 第二代象增强器的闪烁噪声

汪 绳 武

(西安应用光学研究所)

**摘要**——本文在分析第二代象增强器荧光屏上闪烁的基础上,通过概率统计,对采用常规微通道板的第二代象增强器输出闪烁噪声进行了研究。结果表明:在微光条件下,闪烁噪声具有散粒噪声的特性,输出信噪比为 $(\frac{\lambda}{2})^{1/2}$ ,其中 $\lambda$ 是在积分时间内,在输出屏取样面上的平均闪烁数。文章给出了第二代象增强器输出信噪比的参数表达式。

### 一、引 言

第二代象增强器的基本结构如图1所示。它的主要特征是含有微通道板(MCP),因此第二代象增强器的许多特性,诸如增益、*MTE*、饱和、噪声等,都与MCP的应用相关联。

当低照度( $10^{-3} \sim 10^{-5}$  Lux)景物由光学系统成象在光学纤维面板输入窗口,并通过光纤面板传输到光阴极上时,光阴极以与输入象空间光强分布相应的密度发射出光电子,并通过电子透镜成象在MCP的输入端。MCP对每一个入射电子进行数量的倍增后,输出电子群脉冲,在屏高压作用下激发荧光屏,产生一个闪烁亮斑。因此,在屏上产生的增强图象,实际上是许多闪烁亮斑的集合。如果我们确认每一个闪烁亮斑是由于单电子经过MCP倍增后所产生的话,那么输出屏上的亮度差异就是闪烁密度的差异。

这种假定是符合实际情况的。当第二代象增强器在低照度下工作时,由于光电子的散粒效应,且当电子入射到同一通道内的时间间隔大于象增强器的积分时间时,屏上的闪烁就是单电子所致。

已知光电子发射过程为泊松过程,光电子经由MCP倍增时,由于MCP的探测效率 $\eta$ ,会使屏上的闪烁数减少,但从概率论知,屏上输出闪烁密度涨落仍将服从泊松分布。因此,由闪烁密度决定的输出屏的亮度是一个随机变量。此外,MCP是一个具有连续打拿极的电

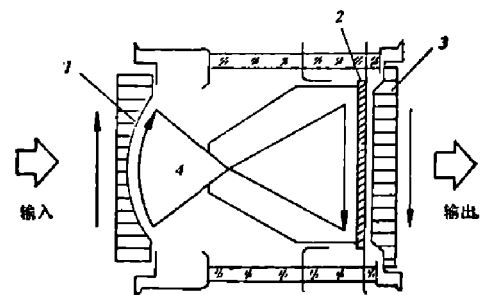


图1 第二代象增强器

1—光阴极; 2—MCP; 3—输出荧光屏;  
4—电子光学系统

子倍增器, 由于进入 MCP 的电子在倍增过程中的二次电子产额  $\delta$ 、二次电子逸出能量、二次电子逸出角度都在随机变化, 并且分别服从泊松分布、瑞利分布和余弦分布<sup>[1]</sup>, 使电子在通道内的倍增级  $n$  也具有随机性, 于是 MCP 的电子增益  $G = \delta^n$  为随机变量, 使输出荧光屏上相应于每个输入电子的输出闪烁亮度也具有随机性。据研究报告<sup>[2]</sup> 以及实验表明, 对于未经低噪声工艺处理的常规 MCP, 输出闪烁的幅度涨落服从负指数分布形式。

因此, 当我们从一个第二象增强器的输出荧光屏上去考察某一取样面积内的闪烁时, 能够探测到闪烁数涨落服从泊松分布和闪烁幅度涨落服从负指数分布的现象。正是上述的闪烁涨落现象, 造成了第二象增强器的输出噪声。图 2 及图 3 是利用计数方法及脉冲幅度分析方法从实际象管的输出屏上测得的闪烁幅度与闪烁数的涨落分布, 与理论的泊松分布和负指数分布值相吻合。因此我们可以利用概率统计的方法对闪烁涨落造成的亮度涨落进行研究, 并得到象增强器的输出噪声。

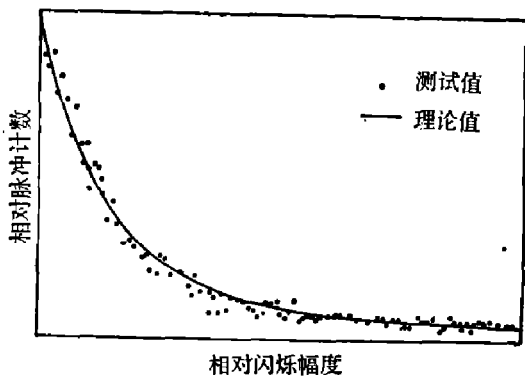


图 2 第二象增强器输出闪烁幅度分布

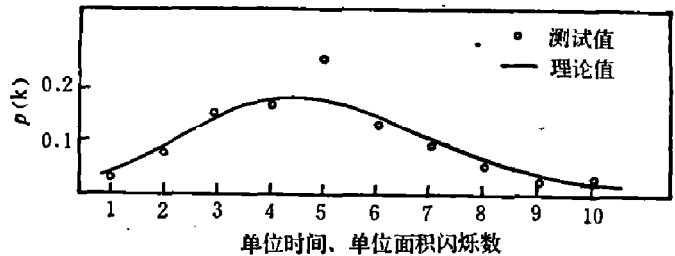


图 3 在荧光屏取样面积上的闪烁数服从泊松分布

## 二、第二象增强器的输出噪声及输出信噪比

假定在第二象增强器输出屏上, 在某一积分时间  $\tau$  内, 取样面积元上恰好出现  $k$  个闪烁, 则相对于  $\tau$  时刻从取样面积上发出的光通量与  $k$  成正比。由前面已经描述过的闪烁幅度随机性可知,  $k$  个闪烁的幅度涨落服从负指数分布形式。又由概率论知, 对于一个由  $k$  个服从指数分布的随机变量迭加而成的随机变量, 其密度函数服从  $\Gamma$ -分布<sup>[3]</sup>, 并具有如下的分布密度函数形式:

$$\varphi(I) = \frac{M^k}{\Gamma(k)} I^{k-1} e^{-MI}, \quad (1)$$

式中  $I = \sum_{i=1}^k X_i$ , 表征屏上取样面积元上的瞬时输出亮度, 其中  $X$  是参量为  $M$  且服从负指数分布  $p(X) = M e^{-XM}$  的闪烁幅度。考虑到在积分时间  $\tau$  内闪烁数为  $k$  的出现概率服从泊松分布:  $p(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$ , 因此, 与  $k$  个闪烁相应的屏上取样面积上的输出亮度为  $I$  的出现概率为

$$\varphi(I_k) = \frac{M^k}{\Gamma(k)} I^{k-1} e^{-MI} \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}. \quad (2)$$

从式(2)可知, 当积分时间  $\tau$  内仅仅且必定出现一个闪烁, 即  $\lambda = k = 1$  时, 式(2)成负指数形

式,也就是图2所示的分布形式。而当 $k$ 足够大时,由中心极限定律可知, $I$ 的涨落将服从正态分布,使输出亮度涨落具有高斯噪声的形式。

图4表示用取样时间为 $2\mu s$ 的脉冲幅度分析器测得的输出亮度涨落分布,随着 $k$ 值的增加,概率密度函数由 $\Gamma$ -分布趋向正态分布的过程。从图6(a)、6(b)和6(d)中的输出亮度涨落波形中,也可以证实以上情况。

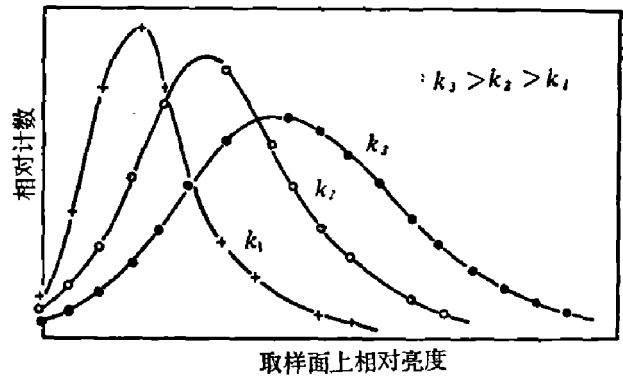


图4 输出亮度谱与 $k$ 的关系

于是我们可以从式(2)中求得 $I$ 的数学期望及均方根偏差值,并得到输出噪声 $N$ 及输出信噪比 $(S/N)_{out}$ 。

$$S = E(I) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[ \int_0^{\infty} I \frac{M^k}{\Gamma(k)} I^{k-1} e^{-MI} dI \right] \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} = \frac{\lambda}{M}, \quad (3)$$

$$E(I^2) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[ \int_0^{\infty} I^2 \frac{M^k}{\Gamma(k)} I^{k-1} e^{-MI} dI \right] \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} = \frac{\lambda(\lambda+2)}{M^2}, \quad (4)$$

$$N = \{E(I^2) - [E(I)]^2\}^{1/2} = \frac{\sqrt{2\lambda}}{M}, \quad (5)$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out} = \left(\frac{\lambda}{2}\right)^{1/2}. \quad (6)$$

式(6)表明,使用常规MCP的第二代象增强器的输出信噪比,与荧光屏取样面积元上积分时间 $\tau$ 内出现的平均闪烁数的平方根值成正比,也就是说,输出信噪比将与光阴极上的输入照度的平方根成正比。以上用概率统计方法得到的结果和结论,与采用频谱分析方法处理散粒噪声所得到的结果与结论类似<sup>[4]</sup>,说明第二代象增强器在微光条件下的闪烁噪声具有散粒噪声的特征。

### 三、实 验

对于式(6)所示的第二代象增强器输出信噪比的实验验证,是在一个可拆卸的模拟装置

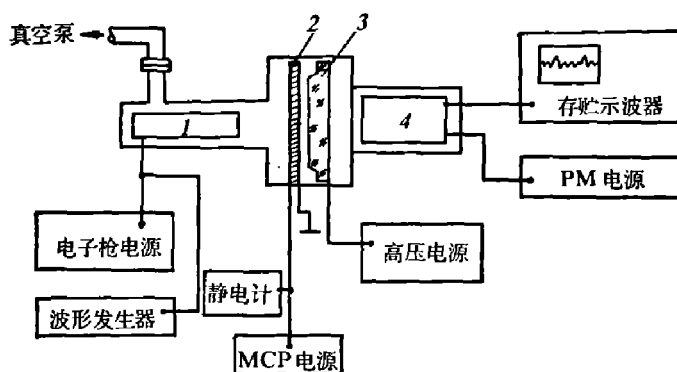


图5 闪烁噪声研究测试系统

1—电子枪; 2—MCP; 3—输出荧光屏; 4—光电倍增管

中进行的。实验布置如图5所示。用电子枪模拟光阴极产生的电子以 $1\sim 2$  keV的能量入射到MCP,聚焦在直径约为 $1\text{mm}$ 的圆斑内。入射电子经MCP倍增后输出电子群脉冲,在荧光屏高压作用下轰击屏,并产生闪烁亮斑。由于屏的滤波作用,对于在荧光屏响应时间内射到屏上的电子,将在屏的输出端产生各闪烁在时间上重迭。用光电倍增管接收荧光屏取样圆斑上由于闪烁迭加而

发出的瞬时光通量,并显示于存储示波器的显示屏上。图6是在不同的输入电流密度下,从输出屏上测得的亮度涨落图形。输入电流密度(即闪烁数)的调节,是通过调整电子枪束流

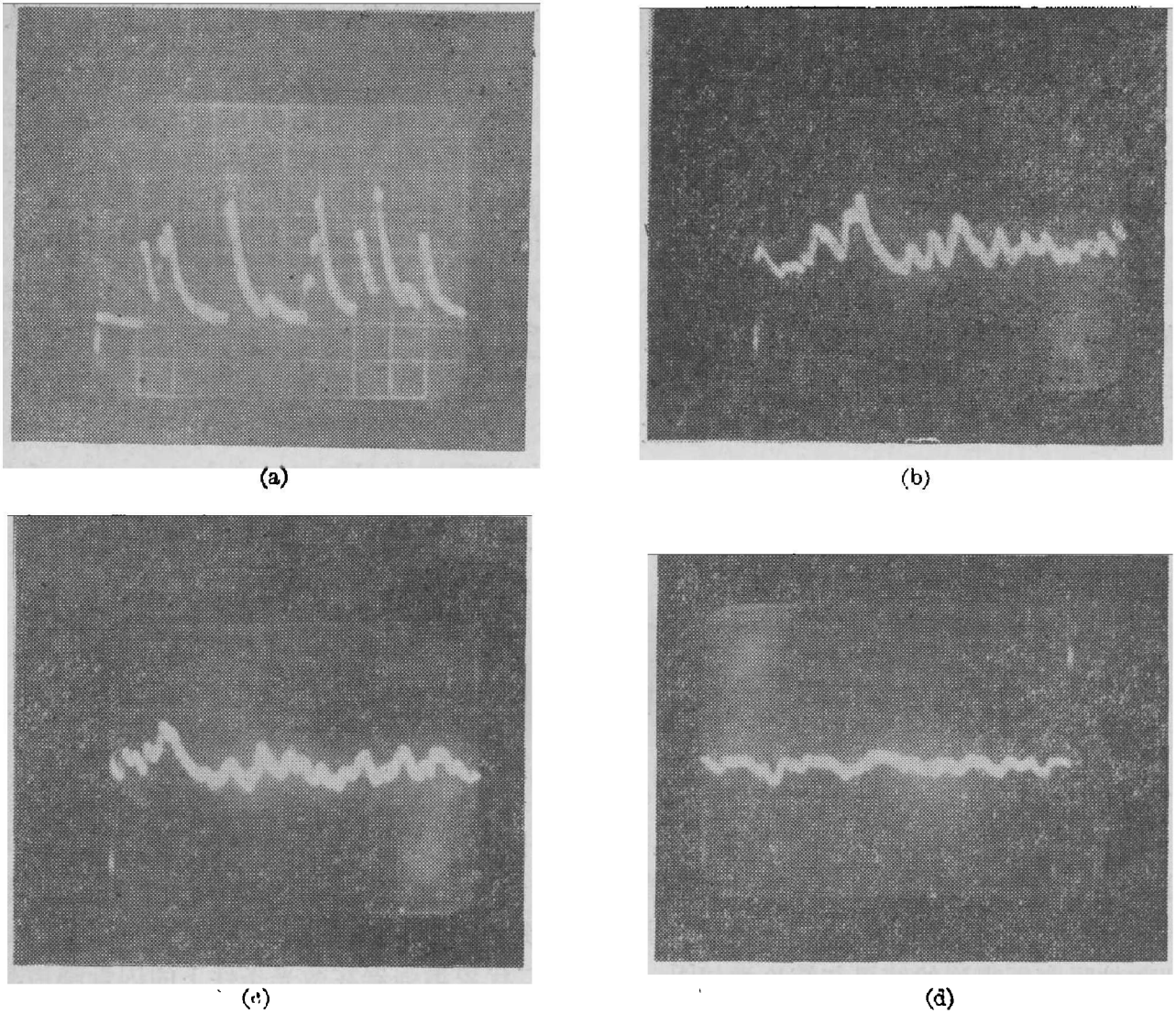


图6 输出屏上的亮度涨落

- (a) 闪烁数相对值=3, 输出信噪比=1.56      (b) 闪烁数相对值=28, 输出信噪比=5.70  
(c) 闪烁数相对值=65, 输出信噪比=7.80      (d) 闪烁数相对值=500, 输出信噪比=23.6

实现的。相应于各种闪烁数的输出信噪比已被计算出来, 并标在图6中。图7表示了模拟不同阴极照度下, 荧光屏上的闪烁数平方根值与输出信噪比的关系, 证实两者具有良好的线性, 表明式(6)是符合实际情况的。

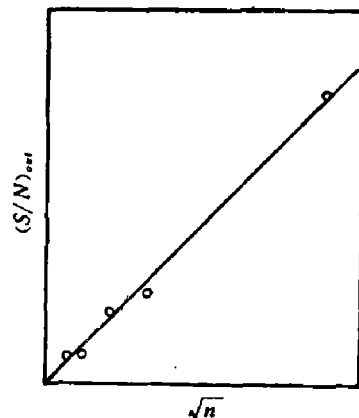


图7 输出信噪比与闪烁数平方根值的关系  
(闪烁数用输入电流密度相对值表示)

## 四、讨论与结语

根据式(6),可以写出第二象增强器输出信噪比的参数表达式。因为在式(6)中,  $\lambda$  是服从泊松分布的闪烁数涨落的均值,故  $\lambda$  表示在屏的积分时间  $\tau$  内,取样面积上出现的平均闪烁数。用第二象增强器中的各参数来表示  $\lambda$ ,可得象增强器输出信噪比的参数表达式

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out}} = \left(\frac{ES A \eta \alpha \tau}{2 \times 1.59 \times 10^{-19} M^2}\right)^{1/2}, \quad (7)$$

式中,  $E$  为光阴极照度( $\text{lm}/\text{m}^2$ ),  $S$  为光阴极积分灵敏度( $\mu\text{A}/\text{lm}$ ),  $A$  为取样面积( $\text{m}^2$ ),  $\eta$  为 MCP 的探测效率,  $\alpha$  为象管系统的电子有效系数,  $\tau$  为象增强器积分时间,  $M$  为电子光学系统放大倍率。

因为积分时间  $\tau$  与象增强器的等效带宽  $B$  的关系为  $\tau=1/B$ , 故式(7)可以写为

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out}} = \left(\frac{ES A \eta \alpha}{3.18 \times 10^{-19} M^2 B}\right)^{1/2}. \quad (8)$$

在象增强器中,对闪烁噪声起主要滤波作用的是荧光屏,因此,  $B$  实际上就是荧光屏的等效带宽。假定荧光屏的时间响应函数为  $h(t)$ ,

则  $B = \frac{1}{H^2(0)} \int_0^{\infty} |H(\omega)|^2 df$ 。其中  $H(\omega) = \int_0^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt$  为  $h(t)$  的频谱。 $h(t)$  可以由图 5

的实验装置测得,图 8 表示用脉冲调制电子枪测得的 P20 屏的时间响应。还可以用正弦变频信号调制电子枪,并从屏上直接测量和算出  $H(\omega)$ 。

测试实验表明,利用式(8)可以对采用常规 MCP 的第二象增强器输出信噪比作出较切合实际的估计。以 Mullard XX1380 管为例,当  $E=225 \mu\text{A}/\text{lm}$ ,  $A=3.14 \times 10^{-8} \text{m}^2$ ,  $E=1.24$

$\times 10^{-5} \text{lm}/\text{m}^2$ ,  $M=1.5$ , 荧光屏与测试系统的带宽  $B=17.5 \text{Hz}$ ,  $\eta\alpha$  取 0.65, 由式(8)计算得  $\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out}} = 2.13$ , 等效到 10 Hz 带宽时,  $\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out}} = 2.81$ , 与实际情况一致。

从式(8)中知,当象增强器的其它参数已经确定时,输出信噪比仅与荧光屏的等效带宽的平方根值成反比:

$$\frac{(S/N)_{\text{out}1}}{(S/N)_{\text{out}2}} = \left(\frac{B_2}{B_1}\right)^{1/2}. \quad (9)$$

因此,可以通过降低荧光屏的等效带宽,采用所谓长余辉屏来提高输出信噪比。

正如在式(8)中所示,第二象增强器的输出信噪比还与 MCP 的探测效率  $\eta$  有关。据报道<sup>[5]</sup>,  $\eta$  除了与 MCP 的开口面积比和入射在通道间界面上的电子返回率有关外,还与 MCP 的工作电压有关。所以在式(8)中已经隐含了第二象增强器的输出信噪比与 MCP 的增益的关系。

扩大 MCP 的开口面积和提高 MCP 首次打拿时的二次电子产额,会使 MCP 输出脉冲

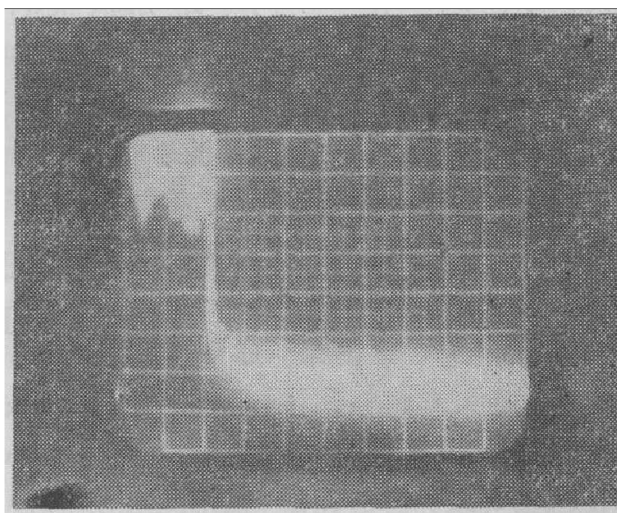


图 8 屏的脉冲响应(5 毫秒/分度)

幅度分布由负指数形式变成峰值分布形式<sup>[6]</sup>,从而使输出噪声降低。这种 MCP 就是与常规 MCP 不同的所谓低噪声 MCP。对于使用低噪声 MCP 的第二代象增强器的输出信噪比,应该用相应的输出闪烁幅度分布对式(1)和(2)作修正,并导出相应的输出信噪比表达式。

在第二代象增强管设计中,为了弥补由 MCP 造成的极限分辨率下降的缺陷,采用放大倍率  $M > 1$  的系统和小孔径 MCP,使象管在一般微光条件下的观察性能有所改善。但由式(8)知,  $M$  的增大将引起象增强器输出信噪比下降,使象增强器微光观察噪声极限提高,从而限制了微光性能。此外,缩小 MCP 孔径,会使与孔径尺度相应的面积上的闪烁数降低,由式(6)可知,输出信噪比将降低,使得与孔径尺度相应的图象细节,在微光条件下的观察性能不能达到预期的要求<sup>[7]</sup>。因此,第二代象增强器放大倍率及 MCP 孔径的选取,需要根据象增强器的实际使用要求作合理的选择。

### 参 考 文 献

- [1] Manley B. W., Guest A. and Holmshaw R. T., *Adv. Electronics & Electron Phys.*, **28A** (1969), 471.
- [2] Chalmerton V. and Chevalier P., *Acta Electronica*, **14**(1971), 1:99.
- [3] 复旦大学,概率论(第一册),人民教育出版社,1979,126~127.
- [4] Lupo Jasper C., *Optica Acta*, **19**, (1972), 8:651~661.
- [5] Chalmerton V., *Acta Electronica*, **14**(1971), 2:225.
- [6] Pollehn H., Bratien J. and Feixgold R., *Adv. Electronics & Electron. Phys.*, **40**(1976), 21~31
- [7] 邹异松,钟生东,工程光学,1982,2:16~24.

## SCINTILLATION NOISE IN SECOND GENERATION IMAGE INTENSIFIER

WANG SHENGWU

(Xi'an Institute of Applied Optics)

### ABSTRACT

Based on the analysis of the fluctuation on the screen of the second generation image intensifier, the output scintillation noise from conventional microchannel plate in the intensifier is studied by using probability statistics. It shows that the scintillation noise is characterized by shot noise in low light level conditions. The deduced output signal-to-noise ratio is  $\left(\frac{\lambda}{2}\right)^{1/2}$ , where  $\lambda$  is an average scintillation number on the sampling area of output screen in the integration time. Some related subjects are discussed and the parametric expression of output signal-to-noise ratio for the second generation image intensifier is also presented in this paper.