

文章编号 : 0253-2239(2002)01-0067-07

# 光子计数式光电倍增管四象限型和弱光像增强 CCD 跟踪系统的性能比较\*

饶长辉 张学军 姜文汉 汤国茂

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘要: 基于光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统和弱光像增强 CCD 跟踪系统的基本原理, 分析了这两种跟踪系统的测量噪声误差、系统控制特性和系统闭环噪声等, 并重点根据实验结果分析和比较了这两种跟踪系统的性能。结果表明, 光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统的性能优于弱光像增强 CCD 跟踪系统。

关键词: 跟踪系统; 四象限探测器; 像增强 CCD 探测器; 整体倾斜; 噪声; 性能比较

中图分类号: P414 文献标识码: A

## 1 引 言

在光学精密跟踪控制系统中, 两维高速倾斜镜通常用于校正大气湍流带来的整体波前倾斜和望远镜跟踪误差等<sup>[1,2]</sup>。一般而言, 这类跟踪系统通常是由跟踪探测器、倾斜镜和跟踪控制处理机等所组成。我们研制了两套跟踪控制系统, 用于波前整体倾斜信号的提取与校正: 一种是光子计数式四象限跟踪系统, 另一种是弱光像增强 CCD (ICCD) 跟踪系统。为了正确评价这两种跟踪系统的优劣, 有必要对其探测精度、噪声水平、控制特性等性能进行分析和比较。本文在简要介绍光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统和弱光像增强 CCD 跟踪系统的基本原理基础上, 对这两种跟踪系统的测量噪声误差、系统控制特性和系统闭环噪声进行了分析, 并重点根据实验结果分析和比较了这两种跟踪系统的性能。

## 2 两种跟踪系统的基本原理

### 2.1 光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统

光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统的基本原理<sup>[3]</sup>如图 1 所示。它主要由光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器、倾斜镜、跟踪控制处理机等组成。由望远镜进来的平行光经过前面的引导光学系统和倾斜镜后, 通过跟踪物镜将其会聚到两个相互正交的分光三棱镜上, 从而最终得到四束光, 达到四象限分光的目的。当入射光方向变化时, 会引起光点在分光棱镜处产生位置移动, 从而使四束光的光能重新分配。这四束光被分别耦合到四个光电倍增管中由光电探测器接收, 从而测出四束光的光能量, 进而由跟踪控制处理机测量出入射光的波前整体倾斜。

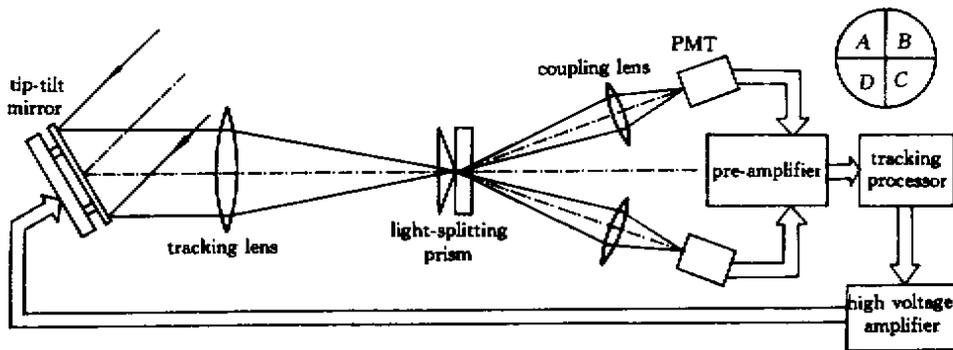


Fig. 1 Photon counting PMT quadrant tracking system

\* 国家 863 高技术计划资助课题。

收稿日期 2000-12-11; 收到修改稿日期 2001-01-27

如果四个象限由光电倍增管所测得的光电子数分别为  $N_A$ 、 $N_B$ 、 $N_C$  和  $N_D$  (如图 1 所示) 则  $x$  和  $y$  方向的波前斜率可分别由 (1) 式和 (2) 式算得:

$$G_x = K_q \frac{(N_B + N_C) - (N_A + N_D)}{N_A + N_B + N_C + N_D}, \quad (1)$$

$$G_y = K_q \frac{(N_A + N_B) - (N_C + N_D)}{N_A + N_B + N_C + N_D}, \quad (2)$$

式中  $K_q$  为探测比例系数。四象限跟踪探测器的探测比例系数  $K_q$  与光斑形状和大小直接相关。当入射光斑的光强呈高斯分布时,在线性响应区间,探测比例系数  $K_q$  与光斑的高斯宽度  $\sigma_A$  成正比<sup>[4]</sup>:

$$K_q = \sqrt{\pi} \sigma_A / \sqrt{2}. \quad (3)$$

相对于普通的四象限跟踪探测器而言,光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器有如下特点:

1) 由于采用了高灵敏度的光电倍增管作为光能探测器,整个跟踪探测器对弱目标的探测能力较一般四象限跟踪探测器大大提高,它可以工作在光子计数水平。

2) 由于采用光学分光的办法,可以得到很高的位置探测分辨率。当探测器的分光元件位于跟踪物镜的焦点附近时,目标像点位置的很小变化就可以

引起较大的输出信号响应。

3) 跟踪探测器的采样速率可根据需要随时调整,对目标有较强的适应能力。当目标较亮时,为防止探测器饱和,可提高采样速率,同时也可以得到较高的控制带宽。当目标较暗信噪比较低时,可降低采样速率,虽然可能导致较低的控制带宽,但可以得到较高的探测信噪比。

## 2.2 弱光像增强 CCD 跟踪系统

弱光像增强 CCD 跟踪系统的基本工作原理如图 2 所示。它主要由弱光像增强 CCD 跟踪探测器、倾斜镜、跟踪控制处理机等组成。望远镜来的平行光经过引导光路和倾斜镜后,由跟踪物镜会聚,在其焦点位置处放置像增强器把焦点处的微弱光点像增强,然后通过耦合物镜把像增强器荧光屏上增强的光点耦合到 CCD 靶面上。跟踪控制处理器采集到 CCD 上的光点像,通过一定的算法计算出光点重心的坐标,然后与事先已经标定好的零点坐标比较,就可得到波前  $x$ 、 $y$  两个方向的波前整体斜率。

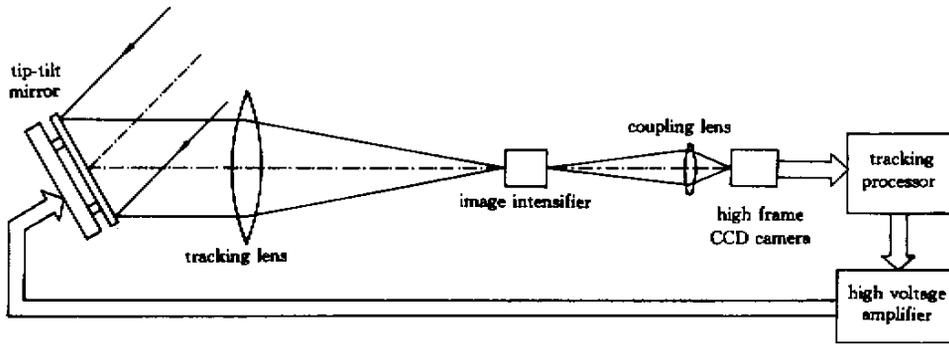


Fig.2 ICCD tracking system

设光斑成像在 CCD 上时,第  $i$  行第  $j$  列的像素灰度值为  $I_{ij}$ ,则光斑的重心坐标可由下式计算:

$$X_c = \frac{\sum_i \sum_j i I_{ij}}{\sum_i \sum_j I_{ij}}, \quad Y_c = \frac{\sum_i \sum_j j I_{ij}}{\sum_i \sum_j I_{ij}}, \quad (4)$$

与光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器相比,ICCD 跟踪探测器有调整容易、使用方便的优点,但它的采样率相对固定,当它对弱目标工作、信噪比较差时,不易通过降低采样率来提高信噪比。

## 3 探测噪声误差

### 3.1 光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器的噪声误差

对于光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器,其主要噪声源为光子起伏散粒噪声。在只考虑

光子起伏散粒噪声(服从泊松分布)且光斑均匀地分布在四个光电倍增管探测器上的情况下,

$$N_A = N_B = N_C = N_D = N/4, \quad (5)$$

$$\sigma_{N_A} = \sigma_{N_B} = \sigma_{N_C} = \sigma_{N_D} = \sqrt{N}/2, \quad (6)$$

式中  $N$  为四象限跟踪探测器所探测到的总光电子数。此时四象限跟踪探测器所探测的波前斜率噪声方差为<sup>[4]</sup>

$$\sigma_{G_x}^2 = \sigma_{G_y}^2 = K_q^2 / N = \pi \sigma_A^2 (2N). \quad (7)$$

可见四象限跟踪探测器的探测精度与入射光强和光斑大小直接相关。入射光越强,光斑高斯宽度越小,探测精度越高。

理想情况下,圆形均匀光斑的衍射成像的光强分布归化为高斯函数时的等效高斯宽度为

$$\sigma_{\text{diff}} = 0.431 \lambda F_D, \quad (8)$$

式中  $\lambda$  为光波波长,  $F_D$  为探测系统  $f$  数(光阑指

数)。当考虑大气湍流的影响时,像斑尺寸将加大。如果大气湍流相干长度为  $r_0$ ,跟踪物镜有效通光口径为  $d$ ,则此时像斑的等效高斯宽度为<sup>[5]</sup>

$$\sigma_A = 0.431\lambda F_D \left\{ 1 + \left( \frac{d}{r_0} \right)^2 \left[ 1 - 0.37 \left( \frac{r_0}{d} \right)^{1/3} \right] \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

### 3.2 弱光像增强 CCD 跟踪系统的噪声误差

对于弱光像增强 CCD 跟踪系统,其噪声源主要包括以下几个部分:光子起伏散粒噪声、像增强器增益起伏噪声和 CCD 读出噪声等。曹根瑞等<sup>[6]</sup>已经对此探测器的噪声进行过分析,根据其分析结果,弱光像增强 CCD 跟踪系统的质心探测精度可表示为

$$\sigma_{x_c}^2 = (1 + K_{ch}) \frac{\sigma_{dl}^2}{V_p} + \frac{\sigma_r^2}{V_p^2} LM \left[ \frac{(L^2 - 1)}{12} + \bar{x}_c^2 \right] \quad (10)$$

式中  $V_p$  为光信号光电子数; $L \times M$  为窗口大小, $K_{ch}$  为由于像增强器增益起伏引起的噪声方差, $\sigma_{dl}$  为光斑衍射成像时的等效高斯宽度, $\sigma_r^2$  为 CCD 每个像元的噪声方差, $\bar{x}_c$  为光斑质心坐标的平均值。

在弱光像增强 CCD 跟踪系统中,为了提高探测精度,减小 CCD 读出噪声,通常采用合理选取 CCD 采样阈值<sup>[7]</sup>的方法。当增加 CCD 采样阈值时,一方面因 CCD 读出噪声明显减小而提高系统探测精度,但另一方面因信号光电子数随之减小而降低系统探测精度。因此在一定的条件下,存在一最佳 CCD 采样阈值,此时系统探测精度最高。

必须指出(7)式是光电倍增管四象限跟踪探测器在光子噪声受限条件下导出的,而(10)式是像增强 CCD 跟踪探测器在非光子噪声受限条件下(既考虑了光子噪声,又考虑了像增强器和 CCD 的噪声)导出的。

## 4 控制特性

从控制系统的角度来看,光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统和弱光像增强 CCD 跟踪系统均是一个以光学波前整体倾斜误差为控制对象的实时闭环反馈控制系统。要比较有效地校正大气湍流和望远镜跟踪抖动所引起的倾斜扰动,系统带宽要求比较宽,而对于以 CCD 为光学波前误差探测器件的跟踪系统而言,它的时间延迟比较长,一般在  $2T \sim 3T$  之间( $T$  为系统采样周期),系统控制带宽严重受限。此外任何探测系统都不可避免地会引入探测噪声,为了减小系统引入噪声,系统带宽不能太宽。

光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统和弱光像增强 CCD 跟踪系统的原理框图和控制框图如图 3 和图 4 所示。

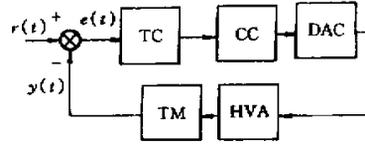


Fig. 3 Schematic diagram of tracking system

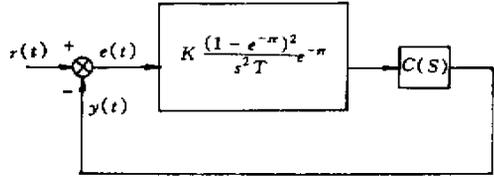


Fig. 4 Controlling diagram of tracking system

在图 3 和图 4 中, $r(t)$  为扰动信号, $e(t)$  为误差信号, $y(t)$  为反馈信号, $C(s)$  为系统所加控制器的传递函数。由光子计数式光电倍增管四象限探测器和弱光像增强 CCD 跟踪探测器所探测到的光电信号经波前倾斜计算(TC)、控制运算(CC)和数/模转换(DAC)后,再由高压放大器(HVA)放大输出到波前校正器(TM)各个驱动器上,从而实现闭环控制。一般而言,倾斜跟踪控制系统可以用一个二次采样滞后过程来描述,其控制传递函数为<sup>[8]</sup>

$$G(s) = K \frac{[1 - \exp(-sT)]^2}{s^2 T} \exp(-s\tau) \quad (11)$$

式中  $s$  为拉普拉斯变换因子, $K$  为系统中对象总增益系数。对于光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统, $\tau$  仅为波前处理运算时间延迟;对于像增强 CCD 跟踪系统, $\tau$  为 CCD 读出和波前处理运算总时延。一般而言,光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统的等效时延为  $\tau_d \approx 1T$ ;像增强 CCD 跟踪系统等效时延为  $\tau_d = 2T \sim 3T$ 。显然,像增强 CCD 跟踪系统比光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统的时间延迟要大得多。在相同的系统采样频率情况下,加入控制算法后,由于时间延迟限制,像增强 CCD 跟踪系统所能实现的误差校正带宽要比光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统窄得多。

## 5 闭环噪声

在倾斜跟踪系统中,系统噪声是从波前探测器引入的。相对于系统闭环带宽而言,系统探测噪声可以认为是一高斯白噪声。对于实际有时间延迟的倾斜跟踪系统,其波前探测和波前校正不是同时进

行的。这时系统的闭环传递函数一般可表示为：

$$H_c(jf) = \frac{\exp(-j2\pi f\tau)}{1 + jf/f_{3\text{dB}}}, \quad (12)$$

式中  $f$  为频率,  $f_{3\text{dB}}$  为系统闭环 -3 dB 带宽,  $\tau$  为系

统时间延迟。

假设系统噪声功率谱为  $F_{fn}$ ,  $f_s$  为系统采样频率, 则系统闭环噪声方差为<sup>[9]</sup>

$$\sigma_{\text{en}}^2 = \int_0^{f_s/2} F_{fn} |H_c(jf)|^2 df = F_{fn} \int_0^{f_s/2} \left| \frac{\exp(-j2\pi f\tau)}{1 + jf/f_{3\text{dB}}} \right|^2 df = F_{fn} f_{3\text{dB}} \arctan\left(\frac{f_s}{2f_{3\text{dB}}}\right). \quad (13)$$

## 6 实验结果

### 6.1 实验光路布局

为了正确比较光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统和弱光像增强 CCD 跟踪系统的性能优劣, 我们在室内进行了一系列系统波前倾斜探测和闭环校正实验。

图 5 给出了实验光路布局图。实验中采用  $0.6328 \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器作为光源。He-Ne 激光器发出的激光经一针孔滤波后, 由透镜  $L_1$  准直成平行光, 再经倾斜反射镜 TM 和一系列反射镜和分光

镜 DM、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $M_1$  后, 由跟踪物镜  $L_3$  会聚到跟踪探测器上。为了便于进行两种跟踪系统的比较实验, 我们在跟踪探测器前加入了一块平面反射镜  $M_2$ , 用于这两种跟踪系统实验的切换。此外, 我们还利用将分光镜  $S_1$  所反射的部分光经透镜  $L_2$  会聚到一光子计数系统上, 用于光强测量。

实验中首先分别实时采集存储 2048 帧光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统和弱光像增强 CCD 跟踪系统所探测的倾斜信号数据, 然后计算其均方根误差或求快速傅里叶 (FFT) 变换得到噪声功率谱等数据。

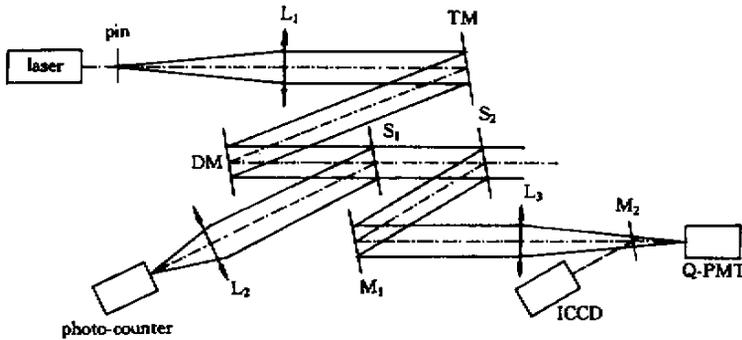


Fig.5 The experimental setup of tracking system

### 6.2 倾斜跟踪探测噪声实验结果

我们对各种不同光强情况下光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器和弱光像增强 CCD 跟踪探测器的探测精度进行了实验研究。实验中, 弱光像增强 CCD 跟踪探测器被调整到跟踪物镜的焦面上, 而对于光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器, 为保证四个象限光斑的均匀性, 很难将其调整到跟踪物镜的焦面上。另外所用的光束分割棱镜的屋脊棱边存在一定的残余宽度, 当光斑太小时, 会对探测精度有直接影响。由于光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器的探测精度与光斑大小直接有关, 因此我们还针对两种不同离焦状态时光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器的探测精度分别进行了实测。图 6 给出了各种不同光强情况下两种跟踪探测

器探测噪声误差的实验结果。图中曲线 1 为根据弱光像增强 CCD 探测器的实测探测噪声误差数据所拟合的曲线, 其光斑高斯宽度为  $\sigma_A = 4.5 \mu\text{m}$ 。曲线 2 和曲线 3 是根据光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器的实测探测噪声误差数据所拟合的曲线。根据拟合结果, 可以折算出其等效光斑高斯宽度分别为  $\sigma_A = 26.5 \mu\text{m}$  和  $\sigma_A = 250 \mu\text{m}$ 。根据系统参数, 理论衍射极限时的等效光斑高斯宽度为  $\sigma_{\text{diff}} = 0.431\lambda F_D \approx 2.3 \mu\text{m}$ 。此图表明：

1) 在等效高斯光斑比较大(跟踪探测器离焦比较大)时, 光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器的探测精度较差;

2) 在等效高斯光斑比较小时, 在相同的光强水

平情况下,光子计数式光电倍增管四象限跟踪探测器比弱光像增强 CCD 跟踪探测器的探测精度要高得多。

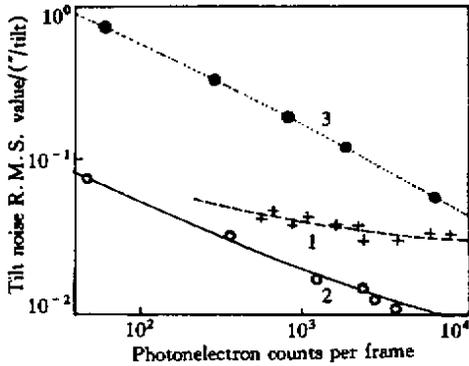


Fig. 6 Tilt noise RMS value vs photoelectron counts per frame. 1:ICCD detector  $\sigma_A = 4.5 \mu\text{m}$ ; 2:quadrant detector  $\sigma_A = 26.5 \mu\text{m}$ ; 3:quadrant detector  $\sigma_A = 250 \mu\text{m}$ . The curves are the fitting curve and the points are the corresponding measured data

另外,如果以倾斜噪声均方根误差为  $0.1''$  作为探测精度极限,那么在  $\sigma_A = 26.5 \mu\text{m}$  时,光子计数式光电倍增管四象限探测器所需要的光能约为每个采样周期 20 个光电子。而对于弱光像增强 CCD 跟踪探测器而言,其所需光能要达到每个采样周期 280 个光电子(由于此时像增强器的增益很大,以至于出现明显的“雪花”,这时像增强 CCD 探测器的噪声误差已不能用 (10) 式来描述,因此未在图 6 中标示此数据点)。必须指出,实验中弱光像增强 CCD 跟踪探测器中像增强器 V1366U-02 型在  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  时的量子效率仅为 6.2% 左右,而光子计数式光电倍增管四象限探测器中光电倍增管的量子效率为 10% 左右。

图 7 还给出了光子计数式光电倍增管四象限探测器的探测噪声误差随系统采样频率变化的实验结

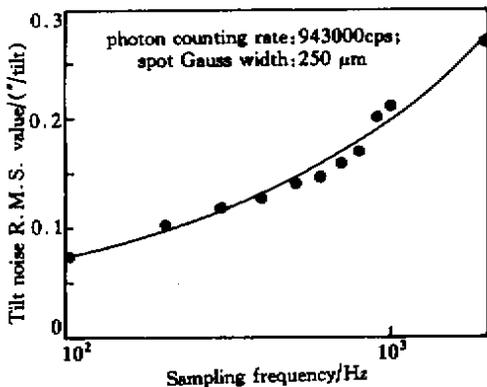


Fig. 7 Tilt noise RMS value for quadrant detector vs sampling frequency. solid line: theoretical curve, dot: the measured data

果。图中实线为根据(7)式所计算的理论曲线。用圆圈表示的点为实测数据点。可见实验结果与理论分析比较吻合。这也表明在一定的光强情况下,降低系统采样频率可以有效提高探测信噪比。在目标极其微弱的情况下,经常采用降低系统采样频率这一方案来有效提取误差信号。

此外图 8 还给出了弱光像增强 CCD 跟踪探测器的探测噪声误差与 CCD 采样阈值之间关系的实验结果。从图可看出,在一定的光强条件下,存在一最佳 CCD 采样阈值,此时系统探测噪声最小,这与前面的分析相一致。因此在实际应用场合,合理选取 CCD 采样阈值,对提高系统探测精度是有利的。

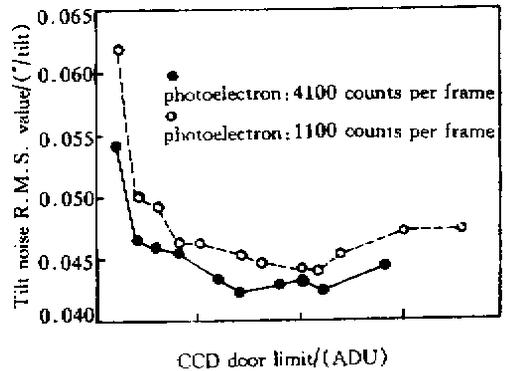


Fig. 8 Tilt noise RMS value for ICCD detector vs CCD door limit. ADU: A/D unit

### 6.3 倾斜跟踪回路系统控制特性

在本实验中,像增强 CCD 跟踪控制回路和光子计数式光电倍增管四象限跟踪控制回路的采样频率分别为  $f_s = 419 \text{ Hz}$  和  $f_s = 400 \text{ Hz}$ 。对于像增强 CCD 跟踪控制回路,由于系统采样、CCD 读出时间和计算等造成的等效时间延迟比较大,为  $\tau_d = 2.4 T$ ,  $T$  为采样周期。而对于光子计数式光电倍增管四象限跟踪控制回路,系统等效时间延迟主要由采样保持造成,为  $\tau_d = 1.15 T$ 。

在闭环控制系统中,系统控制的好坏在时间域上主要由系统误差带宽  $f_c$  (误差幅频为 0 dB 时所对应的频率)以及系统闭环带宽  $f_{3 \text{ dB}}$  决定。系统误差带宽  $f_c$  直接反映的是系统对外界扰动的时域校正能力  $f_c$  越大,系统对外界扰动抑制越强。系统闭环带宽  $f_{3 \text{ dB}}$  反映的是系统引入噪声的多少  $f_{3 \text{ dB}}$  越大,系统引入噪声越多。实质上倾斜跟踪控制系统闭环波正是以系统噪声引入为代价去换取对湍流和望远镜跟踪抖动等动态误差校正的受益。因此在弱光工作条件下,需要根据湍流等动态误差情况、系统噪声水平以及系统的自身状态选择好系统的时间控

制带宽,以充分发挥其校正能力。

为了从控制性能的角度正确评价光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统和弱光像增强 CCD 跟踪系统的优劣,在此引入一个系统带宽因子变量  $\eta$ ,它定义为系统误差带宽  $f_e$  与系统闭环带宽  $f_{3\text{dB}}$  之比,

$$\eta = \frac{f_e}{f_{3\text{dB}}} \quad (15)$$

显然,系统带宽因子变量  $\eta$  越大,系统控制性能越好。图 9 给出了像增强 CCD 跟踪控制系统和光子计数式光电倍增管四象限跟踪控制系统分别加入数字比例积分(PI)控制器后的系统实测带宽因子曲线与系统误差带宽之间的关系曲线。

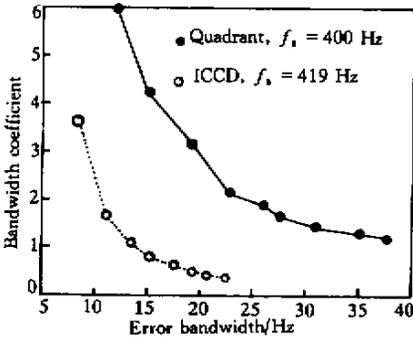


Fig.9 Bandwidth coefficient of tracking system.

The PI controller is added

从图中可以看出,光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统比像增强 CCD 跟踪系统的控制性能要好得多。光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统所能实现的误差校正带宽比像增强跟踪系统要大得多,在相同的误差带宽情况下,光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统比像增强 CCD 跟踪系统的闭环带宽小很多。这表明在系统噪声比较小的情况下,光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统比像增强 CCD 跟踪系统对外界扰动的校正能力要强得多,而引入的噪声误差要小得多。

### 6.4 倾斜跟踪回路闭环噪声实验结果

图 10 给出了在光子计数率为 943000 cps 时弱光像增强 CCD 和光子计数式光电倍增管四象限探测器所分别探测到的波前斜率的噪声功率谱。从图中可以看出,相对于系统闭环带宽而言,系统探测噪声基本上可以认为是高斯白噪声。

图 11 给出了在同一光强情况下不同系统闭环带宽时光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统和弱光像增强 CCD 跟踪系统的闭环噪声误差的实验结果。

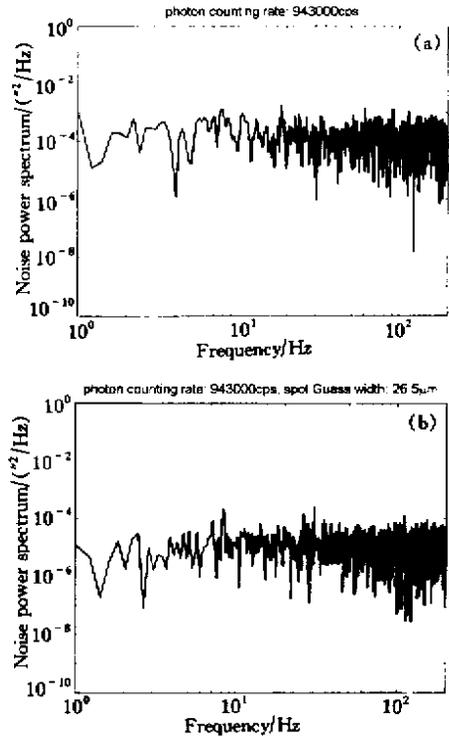


Fig.10 Tilt noise power spectrum. (a)ICCD detector; (b)quadrant detector

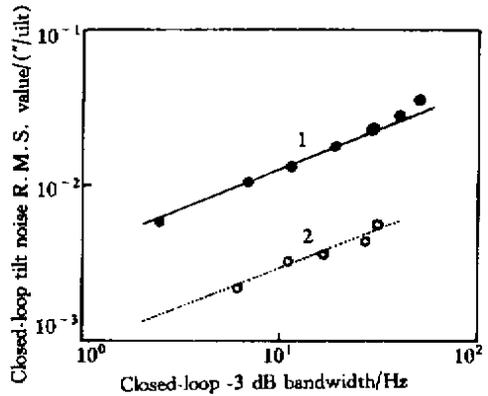


Fig.11 Closed-loop tilt noise RMS value vs the closed-loop -3 dB bandwidth. The photoelectron count is 6400 per frame. 1 :ICCD detector; 2 :quadrant detector,  $\sigma_A = 26.5 \mu\text{m}$ . The curves are the theoretical curves according to the Eq.(11) and Eq.(12) and the points are the corresponding measured data

图中实线为根据(13)式和(14)式所计算的理论曲线。可见实验结果与理论分析比较吻合。从图中也可以看出,在光斑等效高斯宽度较小时,光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统比弱光像增强 CCD 跟踪系统的闭环噪声误差要小得多。

结论 本文从系统测量噪声误差水平、控制特性以及闭环噪声等方面,分析和比较了光子计数式光电

倍增管四象限跟踪系统和弱光像增强 CCD 跟踪系统的性能。从整体性能来说,无论就测量噪声误差水平、控制特性还是就系统闭环噪声误差而言,光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统的性能都比弱光像增强 CCD 跟踪系统的性能优越一些。但是从调整使用角度来说,弱光像增强 CCD 跟踪系统则要比光子计数式光电倍增管四象限跟踪系统方便得多。

实验中所用高速倾斜镜由凌 宁研究员和陈东红高级工程师研制,跟踪控制处理机由李梅研究员和王春红副研究员研制。作者还就论文有关问题与沈锋副研究员进行了有益的讨论,在此向他们表示感谢。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Jiang Wenhan , Li Mingquan , Tang Guomao *et al.*. Adaptive optics image compensation experiments on stellar objects. *Opt. Engng.* ,1995 ,**34**( 1 ):15 ~ 20
- [ 2 ] Jiang Wenhan , Ling Ning , Tang Guomao *et al.*. 61-element adaptive optical system for 1.2 m telescope of Yunnan Observatory. *Proc. SPIE* ,1998 ,**3353** :696 ~ 703
- [ 3 ] Zhu Yaming. *Study on Photon Counting Quadrant Detector*(光子计数式四象限跟踪探测器研究)[ MS dissertation ]. Chengdu : Institute of Optics and Electronics , The Chinese Academy of Sciences , 1998( in Chinese )
- [ 4 ] Zhou Renzhong. *Adaptive Optics*(自适应光学). Beijing : Press on National Defence Industry , 1996. 122 ~ 128( in Chinese )
- [ 5 ] Cao Genrui , Yu Xin. Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object. *Opt. Engng.* ,1994 ,**33**( 7 ) 2331 ~ 2335
- [ 6 ] Cao Genrui , Hu Xinqi , Wang Sen. Performance analysis and comparison of ICCD and CCD types of Hartmann-Shack wavefront sensor operated with faint object. *Acta Optica Sinica*(光学学报) , 1999 ,**19**( 7 ):975 ~ 980( in Chinese )
- [ 7 ] Jiang Wenhan , Xian Hao , Shen Feng. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor. *Proc. SPIE* ,1997 ,**3126** 534 ~ 544
- [ 8 ] Rao Changhui , Jiang Wenhan , Tang Guomao. Control optimization for low light level 61-element adaptive optical system. *Opto-Electronics Engineering*(光电工程) ,2000 ,**27**( 1 ):1 ~ 5( in Chinese )
- [ 9 ] Rao Changhui , Jiang Wenhan , Li Mingquan. Noise analysis of an adaptive optics system using photon counting shearing interferometer as wavefront sensor. *Acta Optica Sinica*(光学学报) ,1997 ,**17**( 2 ):175 ~ 179( in Chinese )

## Performance Comparison of Photon Counting Quadrant Tracking System and Intensifier CCD Tracking System

Rao Changhui Zhang Xuejun Jiang Wenhan Tang Guomao  
( *The Institute of Optics and Electronics , Chengdu 610209* )  
( Received 11 December 2000 ; revised 27 January 2001 )

**Abstract** : Based on the basic principle of photon counting Quadrant tracking system and intensifier CCD tracking system , the measured noise error , the controlling characteristic and the closed-loop noise error of these two tracking systems are analyzed and compared. The experimental results are presented. The results show that the performance of photon counting Quadrant tracking system is superior to that of intensifier CCD tracking system.

**Key words** : tracking system ; quadrant detector ; intensifier CCD detector ; tip-tilt ; noise ; performance comparison