

文章编号:1007-2780(2017)02-0124-08

哈特曼波前探测器电子倍增增益的 自适应控制方法

李大禹¹, 朱召义^{1,2}, 王少鑫¹, 宣 丽^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文提出自适应光学成像系统中哈特曼波前探测器电子倍增增益的自适应控制方法, 以使哈特曼波前探测器保持较高的信噪比同时避免亮度过饱和。利用亮度接近哈特曼饱和值的光源作为被观测目标, 探测到的光斑阵列中有一个最高亮度值 I_m , 统计 200 帧~500 帧中的 I_m , 计算其相对统计帧数的均值 $\bar{I}_m$ 、 I_m 相对 $\bar{I}_m$ 的均方差值 σ_m ; 设定理想最高亮度值 $\bar{I}_{ms}$ 比饱和亮度低 $3.0\sigma_m \sim 3.2\sigma_m$; 再将光斑的亮度最大值相对一帧阵列中的光斑数计算平均值记为 I_a , 实时监测 I_a ; 依据信号强度 I 与增益 G 的线性关系, 事先测得哈特曼波前探测器的技术特征参数 k_a 、 k_m 和理想最高亮度值 $\bar{I}_{ms}$, 即可以由当前帧探测数据 I_a 和增益 G_a 计算得到所需调整的增益值 G_{ms} 。

关键词: 自适应控制; 电子倍增增益; 哈特曼波前探测器; 电子倍增 CCD

中图分类号: O753; TP217 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173202.0124

Adaptive control of EMCCD gain in Hartmann wavefront sensor

LI Da-yu¹, ZHU Zhao-yi^{1,2}, WANG Shao-xin¹, XUAN Li^{1*}(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Electron multiplying charge-coupled-device (EMCCD) in Hartmann wavefront sensor (WFS) makes the SNR higher than the ordinary CCD. However, a fixed EM gain may not work when the brightness of the observed target changes in large ranges within a few minutes. Thus, an adaptive control method of the Hartmann WFS' gain is proposed. The control value is the average of the maximum signals of all the light spots in a frame. The goal value for control is predetermined based on the linear relation of the signal with the EM gain and the number of photons collected in sub-apertures. The self-protection for brightness super saturation of the EMCCD has to be considered for the goal value. Simulations and experiments indicate that the proposed control method keeps the sensing in a high SNR without the self-protection of the EMCCD occurred even when the target brightness changes in sine curves.

收稿日期: 2016-09-19; **修订日期:** 2016-11-15.

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61405194)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61405194)

* 通信联系人, E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

Key words: adaptive control; EM gain; Hartmann wavefront sensor; electron multiplying CCD

1 引言

利用望远镜对天体目标进行观测时,由于大气湍流的随机干扰,成像光波前发生动态畸变,导致望远镜成像分辨率下降。连接于望远镜终端的自适应光学系统可实时探测和校正大气湍流造成的畸变波前,以恢复望远镜理想的高分辨率成像。哈特曼波前探测器是当前自适应系统中广泛应用的波前探测器。该探测器由前置的微透镜阵列与位于微透镜阵列焦平面上的相机组成,微透镜阵列将入射波前分割为子波前的阵列,使通过的光束在每个微透镜后的相机上会聚成点状光斑,计算光斑质心位置获得子波前的倾斜信息,进而重构出入射的整体畸变波前。

目标亮度越强信噪比越高,光斑的质心计算受噪声干扰越小,哈特曼波前探测器的探测精度越高;而目标亮度变弱时哈特曼波前探测器的探测精度下降,更严重的是大气湍流会造成接收口径内能量分布不均匀,某些光斑亮度会低于检出限,引起很大的波前探测误差。为了提高暗弱目标的波前探测精度,哈特曼波前探测器中的相机大多使用电子倍增型的EMCCD^[1-8],通过设置适宜的电子倍增增益提高信噪比,减少弱暗光斑丢失的几率。

如何确定一个适宜的增益,是使用基于EMCCD的哈特曼波前探测器的关键问题,尤其运动目标在被跟踪成像过程中亮度发生较大变化时,设置固定的增益值不是造成局部信号亮度过饱和就是丢失弱暗光斑。例如,当观测围绕地球运动的人造卫星时,望远镜接收到的主要是人造卫星对太阳的反射光,反射光强随着人造卫星与太阳、地面望远镜的相对位置而变化^[9],进而导致入射到哈特曼波前探测器中的信号光能量随之变化。如果设置的增益偏高有可能会在观测过程中出现EMCCD亮度过饱和而不能正常工作,如果设置的增益偏低又有可能出现信噪比不足、局部光斑丢失甚至被观测目标丢失的情况。因此需随着被观测目标亮度的变化,自适应地控制哈特曼波前探测器的增益,以实现稳定的高信噪比,达到高精度波前探测的目的。

本文针对运动目标观测中亮度发生变化的问题,对哈特曼波前探测器的增益进行自适应控制,目的是使哈特曼波前探测器保持较高的信噪比,同时避免亮度过饱和。

2 增益控制原理

图1展示了哈特曼波前探测器输出的一幅典型光斑阵列图像,微透镜会聚光斑位于离散的相机像素上,质心位置由像素上离散亮度分布的质心公式计算出来。针对一个亮度恒定的被观测目标,首先将哈特曼波前探测器的增益 G_{EM} 设置为初始增益 $G_0=10$,统计哈特曼波前探测器采集的每一帧光斑阵列中像素上的最高亮度值 I_m 的起伏变化,逐渐增大哈特曼波前探测器的增益,使监测到的最高亮度值 I_m 逐渐逼近并小于哈特曼波前探测器的饱和亮度值 I_L ;在此条件下统计200帧~500帧中像素上的最高亮度值 I_m ,计算其相对统计帧数的均值 $\bar{I}_m$ 、 I_m 相对最高亮度均值 $\bar{I}_m$ 的均方差值 σ_m ;为使哈特曼波前探测器在采样中不出现过饱和且接近饱和,需限定最高亮度均值 $\bar{I}_m$ 等于理想最高亮度值 $\bar{I}_{ms}$,令 $I_L - \bar{I}_{ms}$ 等于 $3.0\sigma_m \sim 3.2\sigma_m$,其中 σ_m 为哈特曼波前探测器的技术特征参数,只要测得 σ_m 就能使 $\bar{I}_{ms}$ 值被确定下来,因此理想最高亮度值 $\bar{I}_{ms}$ 也是哈特曼波前探测器的技术特征参数。

为了即时控制哈特曼波前探测器的信号亮

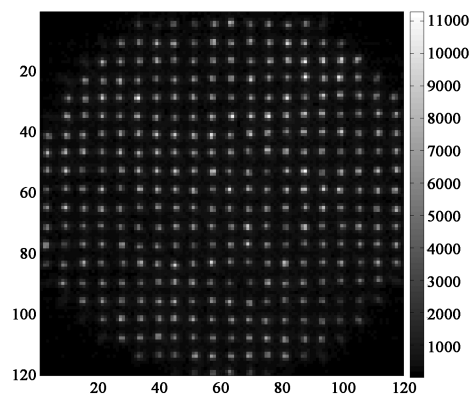


图1 哈特曼波前探测器输出光斑阵列图像

Fig.1 An array of light spots in the S-H WFS

度,还需要寻找一个判断每帧信号亮度的参量。因此再将一帧光斑阵列上每个光斑在像素上的亮度最大值相对阵列中的光斑数计算平均值记为 I_a ,简称为平均光斑最大亮度 I_a 。 I_a 相对 I_m 要稳定得多,作为即时判断每帧信号亮度的监测参量。进一步找出 I_a 与 $\bar{I}_m$ 的关系即可以通过即时监测每帧的平均光斑最大亮度 I_a 来控制增益使哈特曼波前探测器的 $\bar{I}_m = \bar{I}_{ms}$ 成立。依据 CCD 光强 I 的线性方程^[10]:

$$I = k \cdot N_{\text{aper}} \cdot G_{\text{EM}}, \quad (1)$$

其中: I 对应本文中的 I_a 、 I_m ; k 为相对 I 的常量系数,即 I_a 、 I_m 相应的 k 为 k_a 、 k_m ,看出 k 也是哈特曼波前探测器的技术特征参数,需要说明的是各参量的平均值以及特征值,如 I_m 的统计平均值 $\bar{I}_m$ 和特征值 $\bar{I}_{ms}$,都与 I_m 是同一性质的参量,故对应同一常量系数 k ,由于参量平均值的离散误差小,式(1)左侧的 I 应尽可能使用参量平均值;(1)式中的 N_{aper} 为对应被观测目标亮度等级的参量,是在 $G_{\text{EM}} = 1$ 的条件下光斑阵列上每一个微透镜子孔径内所有像素上的亮度信号之和相对于子孔径数的平均值 N 、再相对所采集的所有光斑阵列的 N 求平均值得出 N_{aper} ,简称 N 为子孔径亮度、 N_{aper} 为子孔径亮度平均值。令 k_a 为当前帧平均光斑最大亮度 I_a 的常量系数,哈特曼波前探测器当前帧的增益为 G_a , k_m 为 $\bar{I}_m$ 的常量系数,对应 $\bar{I}_m = \bar{I}_{ms}$ 条件的哈特曼波前探测器调整后的增益 G_{ms} 须满足式(2):

$$\frac{I_a}{\bar{I}_{ms}} = \frac{k_a}{k_m} \cdot \frac{G_a}{G_{ms}}. \quad (2)$$

由式(2)可以看出:事先测得哈特曼波前探测器的技术特征参数 k_a 、 k_m 和理想最高亮度值 $\bar{I}_{ms}$,即可以由当前帧探测数据 I_a 和 G_a 计算得到所需调整的增益值 G_{ms} ,施加这一新的增益,即可完成一次增益控制,如图 2 所示。

为测量哈特曼波前探测器的技术特征参数 k_a 、 k_m 常量系数和理想最高亮度值 $\bar{I}_{ms}$,做哈特曼波前探测器输出亮度信号 I 与 EMCCD 增益关系的检测,搭建如图 3 所示的检测光学系统。检测光学系统中有光纤光源和直径为 $100 \mu\text{m}$ 的小孔光阑构成的点光源,电源为可编程信号发生器,用以给光纤光源供电,控制其亮度变化,模拟运动目

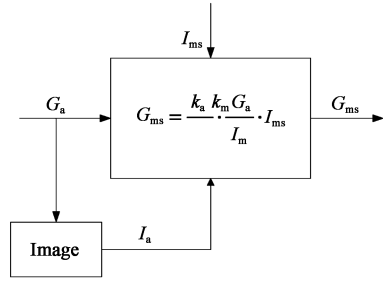


图 2 自动增益控制的示意图
Fig.2 Diagram for the auto-gain-control

标在被观测中信号亮度 I 的变化;点光源位于第一透镜的前焦点上,使通过第一透镜的光束准直为平行光束;令平行光束穿过旋转的湍流屏,湍流屏提供一定强度的大气湍流,模拟大气湍流对信号亮度 I 的扰动;第二透镜与第三透镜作为缩束透镜组,使平行光束缩束为与哈特曼波前探测器口径匹配的光束,从而得到完整的波前探测;计算机与哈特曼波前探测器相连,实时读取、处理哈特曼波前探测器的亮度信号 I ,进行增益的调整。

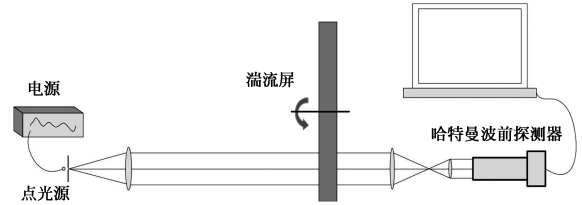


图 3 测量哈特曼波前探测器的亮度线性方程常量系数的检测光学系统

Fig.3 Experiment optical path for testing the auto-gain-control method

哈特曼波前探测器的技术特征参数 k_a 、 k_m 常量系数和理想最高亮度值 $\bar{I}_{ms}$ 的测量步骤如下:

(1)遮光条件下测量哈特曼波前探测器的暗背底,测量 500 帧,计算平均每帧像素上的亮度值分布并记录为背底图像。之后获得的每帧探测信号都需扣除背底图像。

(2)使得光纤光源出射刚刚超过哈特曼波前探测器检出限的微弱光且保持恒定,增益 $G_{\text{EM}} = 1$,采集 200 帧~500 帧光斑阵列图像,将每帧探测信号都扣除背底图像后计算每一帧平均光斑最大亮度 I_a 、最高亮度值 I_m 和子孔径亮度 N ,按照探测帧数排序绘制 I_m 和 I_a 的变化曲线如 4 所

示,其中上下曲线分别为每帧中最高亮度值 I_m 和每个光斑最大亮度相对一帧的平均值 I_a 的波动曲线。由图4看出 I_m 的变化起伏程度高于 I_a ,而 I_a 相对稳定,通过 I_a 判断当前帧光斑阵列的亮度更为合适;再统计平均连续200帧~500帧的平均光斑最大亮度记为 $\bar{I}_a$ 、最高亮度均值 $\bar{I}_m$ 和子孔径亮度平均值 N_{aper} 。

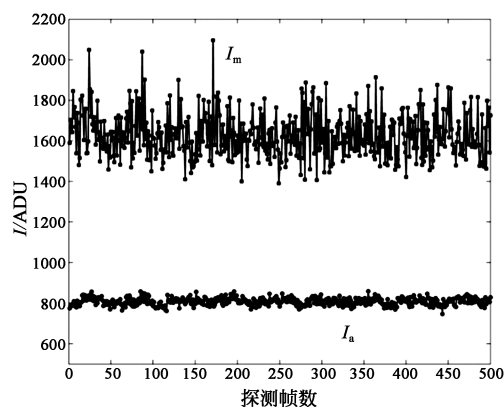


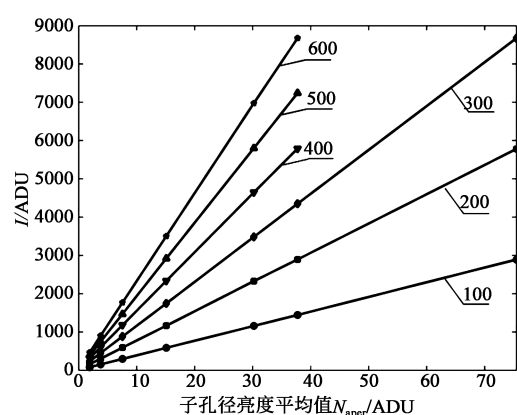
图4 光纤光源的亮度接近哈特曼饱和亮度下的探测信号波动曲线。

Fig.4 Comparisons of the average value with the maximum under unchanging brightness.

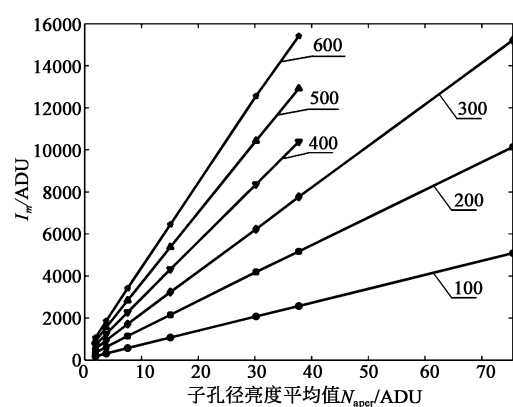
(3)保持增益 $G_{EM}=1$,设置光纤光源的亮度逐渐增加,每改变一次亮度后,重复一遍(2)中步骤,并记录所得到的系列 $\bar{I}_m$ 、 $\bar{I}_a$ 和子孔径亮度平均值 N_{aper} ;绘制所设置增益 G_{EM} 下的 $\bar{I}_a$ 、 $\bar{I}_m$ 分别随子孔径亮度平均值 N_{aper} 的变化曲线。

(4)设置光纤光源的亮度为步骤(3)中所使用的最低亮度,然后设置不同的增益 G_{EM} ,每改变一次 G_{EM} 后,重复一遍(3)中步骤,得到 $\bar{I}_a-N_{aper}$ 和 $\bar{I}_m-N_{aper}$ 两组线性关系如图5;图5(a)为不同增益 G_{EM} 下的一组 $\bar{I}_a-N_{aper}$ 直线,用每一直线斜率除以相应增益 G_{EM} 得出多个 k_a 的特例值,此处为6个,然后对6个特例值求平均得出较准确的 k_a ;图5(b)为不同增益 G_{EM} 下的一组 $\bar{I}_m-N_{aper}$ 直线,同样用每一直线斜率除以相应增益 G_{EM} 得出多个 k_m 的特例值,此处也为6个,然后对6个特例值求平均得出较准确的 k_m 。

(5)接下来确定哈特曼波前探测器的理想最高亮度值 $\bar{I}_{ms}$ 由哈特曼波前探测器的技术手册查出其背部的 EMCCD 的饱和亮度值 I_L ;再由上一



(a)



(b)

图5 哈特曼波前探测器在不同增益 $G_{EM}=100$ 、200、300、400、500、600 的设置下,光纤光源的亮度逐渐增加时,(a)一帧平均的光斑最大亮度 $\bar{I}_a$ 与子孔径亮度平均值 N_{aper} 的线性关系,(b)最高亮度均值 $\bar{I}_m$ 与子孔径亮度平均值 N_{aper} 的线性关系。

Fig.5 Linearity of the control value with photons collected in sub-apertures and EM gain, (a) the average of the maximum signals, (b) the maximum signals.

步骤测量 $\bar{I}_m-N_{aper}$ 直线关系时获得的最大增益 G_{EM} 下的 $\bar{I}_m$ 和200帧~500帧最高亮度值 I_m ,这些 I_m 已接近并小于哈特曼波前探测器的饱和亮度值 I_L ,利用这200~500个最高亮度值 I_m 和最高亮度均值 $\bar{I}_m$,计算出 I_m 相对最高亮度均值 $\bar{I}_m$ 的均方差值 σ_m ,再令 $I_L - \bar{I}_{ms}$ 等于 $3.0\sigma_m \sim 3.2\sigma_m$,即可以获得哈特曼波前探测器的理想最高亮度值 $\bar{I}_{ms}$ 。

将上述步骤求得的 $\bar{I}_{ms}$ 、 k_m 、 k_a 以及监测量 I_a 和相应的 G_a 代入式(2)即可求出当前应给哈特曼波前探测器施加的增益 G_{ms} 。

进一步设置增益控制的其它条件:哈特曼波前探测器背部的 EMCCD 每一次增益改变需要延迟时间数十毫秒,记为 Δt ,限定平均光斑最大亮度 I_a 的检测时间间隔 $T \in [\Delta t, \Delta t + 10 \text{ ms}]$ 的范围;另外监测量即平均光斑最大亮度 I_a 自身存在起伏,按照图 4 所示的 I_a 曲线,统计对应 $\bar{I}_m = \bar{I}_{ms}$ 条件的 I_a 曲线起伏范围,记为 ΔI_a ,故设置增益调整控制判断条件为:当前帧的平均光斑最大亮度 I_a 和上一帧的平均光斑最大亮度 I_a^* 之差满足 $|I_a - I_a^*| \geq 3\Delta I_a$,当该条件成立时,需对当前增益 G_a 进行调整,否则无需对增益 G_a 进行调整;设置初始增益 $G_0 = 10$ 。

综上所述,哈特曼波前探测器的增益自适应控制程序的思路如图 6 所示。

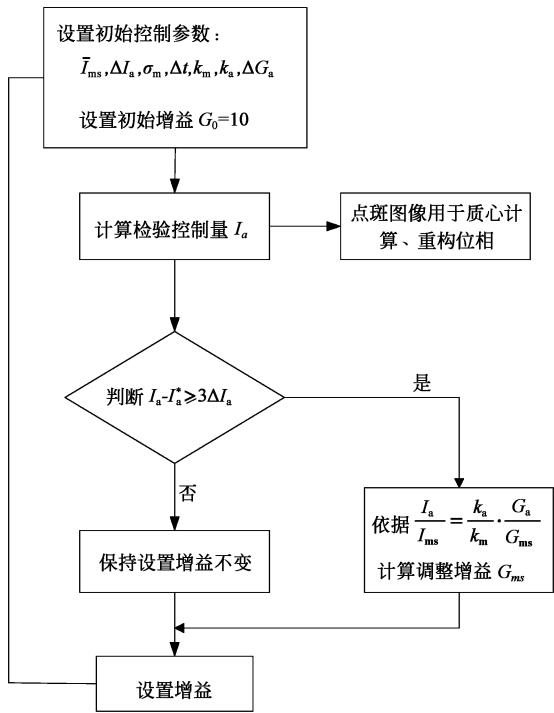


图 6 增益自适应控制程序框图

Fig.6 Block diagram for the gain adaptive control program

3 实 验

搭建如图 3 所示的模拟光路系统,模拟被观测目标的光强度发生大幅度的迅速变化,采用本

方法对哈特曼波前探测器增益进行自适应控制,以提高弱信号时的探测信噪比。

光路系统中各元件的技术参数为:

电源,美国海洋光学公司,型号 HL-2000-HP-232R,最大输出功率 20W;

光纤光源,大恒新纪元科技公司,型号为 GCI-020107;

小孔光阑,大恒新纪元科技公司,型号为 GCO-01100;

第一透镜、第二透镜、第三透镜的焦距分别为 200 mm、200 mm、100 mm;

哈特曼波前探测器中的微透镜阵列由 20×20 个呈正方形排列的微透镜组成,其参数如表 1。

表 1 哈特曼波前探测器参数
Tab.1 Parameters of the S-H WFS

EMCCD 型号	e2v CCD220
饱和亮度值	$I_L = 2^{14}$
增益自动重置条件	超过 8% 的像素上出现亮度过饱和
增益改变需要延迟时间	50 ms
EMCCD 像素数	120×120
EMCCD 像素尺寸	48 μm
微透镜数	20×20
微透镜子窗口像素数	6×6
微透镜孔径	288 μm
微透镜焦距	19.35 mm
艾里斑直径	90 μm
中心波长	550 nm

湍流屏是美国 Lexitek, Inc. 公司的产品,型号为 Near-Index-Match™ phase plate,自带控制盒,能够控制产生符合要求的大气湍流,此处设置湍流强度对应大气相干长度 10 cm、望远镜接收口径 2 m、格林伍德频率为 50 Hz。

遮光条件下测量哈特曼波前探测器的暗背底,测量 500 帧,计算平均每帧像素上的亮度值分布并记录为背底图像,存入计算机中,之后获得的每帧探测信号都需扣除此背底图像。

设置电源输出较低的恒定电流,使得光纤光源出射刚刚超过哈特曼波前探测器检出限的

暗弱光,设置哈特曼波前探测器的增益 $G_{EM}=1$,保持光纤光源的亮度恒定,采集 500 帧哈特曼波前探测器实时探测的光斑阵列图像,存入计算机中,每帧探测信号都扣除背底图像,计算每一帧平均光斑最大亮度 I_a 、最高亮度值 I_m 和子孔径亮度 N ;再统计连续 500 帧的平均光斑最大亮度记为 $\bar{I}_a$ 、最高亮度均值 $\bar{I}_m$ 和子孔径亮度平均值 N_{aper} 。

保持增益,设置光纤光源的亮度逐渐增加,每改变一次亮度后,重复一遍(3)中步骤,并记录所得到的系列 $\bar{I}_m$ 、 $\bar{I}_a$ 和子孔径亮度平均值 N_{aper} ;绘制增益条件下的 $\bar{I}_a$ 、 $\bar{I}_m$ 分别随子孔径亮度平均值 N_{aper} 的变化曲线。

设置不同的增益 = 100、200、300、400、500、600,每改变一次后,重复一遍(4)中步骤;绘制图 5(a)所示的 $\bar{I}_a$ - N_{aper} 一组直线;绘制图 5(b)所示的 $\bar{I}_m$ - N_{aper} 第二组直线;利用增益 = 600 条件下获得的 500 帧光斑阵列的平均光斑最大亮度 I_a 、最高亮度值 I_m 和最高亮度均值 $\bar{I}_m$,计算此条件下的 I_a 起伏范围 ΔI_a 、 I_m 相对 $\bar{I}_m$ 值的均方差值 σ_m ,得到 $\Delta I_a \approx 8.0 \text{ ADU}$ 。

利用图 5(a)中的一组 $\bar{I}_a$ - N_{aper} 直线,用每一组直线斜率除以相应增益得出增益 = 100、200、300、400、500、600 下的 6 个 k_a 的特例值,然后对 6 个特例值求平均得出较准确的 $k_a = 0.384$;利用图 5(b)的一组 $\bar{I}_m$ - N_{aper} 直线,同样用每一组直线斜率除以相应增益得出 = 100、200、300、400、500、600 下的 6 个 k_m 的特例值,然后对 6 个特例值求平均得出较准确的 $k_m = 0.781$ 。

依据哈特曼波前探测器的技术手册,其背部的 EMCCD 的饱和亮度值 $I_L = 16\,300 \text{ ADU}$;再由(5)步骤求得的 $\sigma_m \approx 1\,000 \text{ ADU}$,令 $I_L - \bar{I}_{ms} = 3.1\sigma_m$,即可以获得哈特曼波前探测器的理想最高亮度值 $\bar{I}_{ms} \approx 13\,000 \text{ ADU}$ 。

将上述步骤求得的 $\bar{I}_{ms}$ 、 k_m 、 k_a 以及监测量 I_a 和相应的 G_a 代入式(2),求出当前应给哈特曼波前探测器施加的增益 G_{ms} 。

进一步设置增益控制的其它条件:哈特曼波前探测器背部的 EMCCD 每一次增益改变需要延迟时间 $\Delta t = 50 \text{ ms}$,限定平均光斑最大亮度 I_a

的检测时间间隔 $T = 55 \text{ ms}$;由第(5)步骤知 $\Delta I_a \approx 80 \text{ ADU}$,故设置增益调整控制判断条件为:当前帧的平均光斑最大亮度 I_a 和上一帧的平均光斑最大亮度 I_a^* 之差满足 $|I_a - I_a^*| \geq 240 \text{ ADU}$;设置初始增益 $G_0 = 10$ 。

将所求得的哈特曼波前探测器的技术特征参数 $\bar{I}_{ms} = 13\,000 \text{ ADU}$ 、 $k_m = 0.029\,5$ 、 $k_a = 0.014\,5$ 、 $\Delta I_a \approx 80 \text{ ADU}$ 、 $T = 50 \text{ ms}$,代入哈特曼波前探测器的增益自适应控制程序中,如图 6 所示。

4 结 果

设置电源输出正弦形状变化电流,使光纤光源输出的信号光强度发生大幅度的迅速变化,远超过实际被观测目标的光强变化范围与速度;设置固定增益 $G_{EM} = 1$,记录哈特曼波前探测器实时探测的光斑阵列信号,计算每帧中平均光斑最大亮度 I_a 和最高亮度值 I_m ,按帧序列排布的 I_a 和 I_m 均呈现为正弦形状的曲线,周期与电源输出的正弦电流周期一致, $G_{EM} = 1$ 条件下的 I_a 和 I_m 曲线如图 7(a)所示,其中下曲线为波动幅值约 40 ADU、峰值只有 70 ADU 的平均光斑最大亮度 I_a 的曲线,上曲线为波动幅值约 70 ADU、峰值只有 120 ADU 的最高亮度值 I_m 的曲线;设置 $G_{EM} = 100$ 、200,分别在每个增益条件下重复上述的 I_a 和 I_m 的检测,但这两个条件下的最高亮度值 I_m 均在正弦信号的强度上升过程中出现过饱和,增益自动重置为 1,未完成完整曲线的测量。

保持电源输出正弦形状变化电流,记录哈特曼波前探测器实时探测的光斑阵列信号,开启增益自适应控制程序,每隔 $\Delta t = 50 \text{ ms}$ 计算一帧的平均光斑最大亮度 I_a 和最高亮度值 I_m ,再由 I_a 计算出理想最高亮度值 $\bar{I}_{ms}$ 对应的增益 G_{ms} ,自适应控制增益,使最高亮度值 I_m 和平均光斑最大亮度 I_a 曲线中的正弦波动几乎祛除,如图 7(b)所示,其中下曲线为增益控制后平均强度升高至 6 000 ADU 的平均光斑最大亮度 I_a 的曲线,上曲线为增益控制后平均强度升高至 11 500 ADU 的最高亮度值 I_m 的曲线。

其中(a)是 $G_{EM} = 1$ 时正弦变化的探测信号强度,上曲线为波动幅值约 40 ADU、峰值只有 70

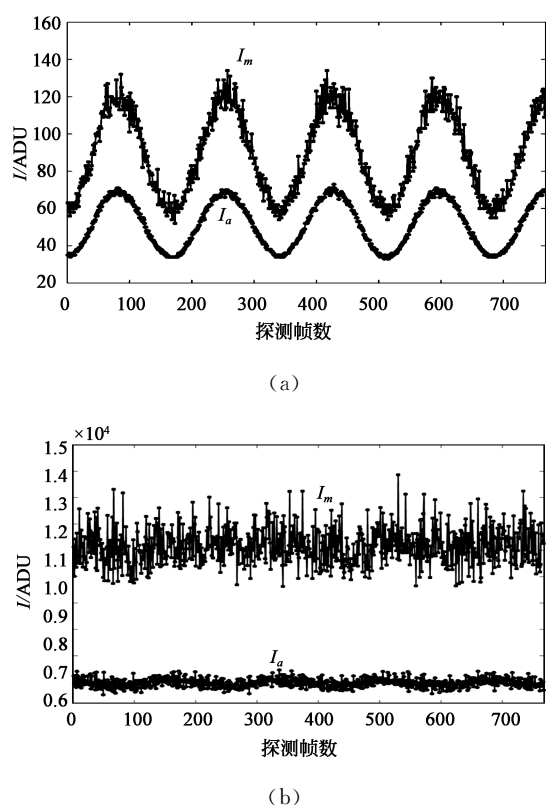


图 7 模拟探测信号强度以正弦形迅速变化时自适应增益控制前后的效果

Fig.7 Comparisons of the control value when a sinusoidal signal is input, (a) without auto-gain-control, (b) with auto-gain-control.

ADU 的平均光斑最大亮度 I_a 的曲线,下曲线为波动幅值约 70 ADU、峰值只有 120 ADU 的最高亮度 I_m 的曲线;(b)是自适应增益控制后的稳定信号强度,下曲线为强度升高至约 6 000 ADU 的平均光斑最大亮度 I_a 的曲线,上曲线为强度升高至约 11 500 ADU 的最高亮度 I_m 的曲线。

计算了在上述正弦形光信号输出条件下设置不同固定增益 $G_{EM}=1, 100, 200$ 和采用自适应增益控制的哈特曼波前探测器中的信噪比 SNR,如图 8 所示,其中下曲线 1 为增益 $G_{EM}=1$ 时的信噪比 SNR 曲线,上曲线 4 为采用自适应增益控制的信噪比 SNR 曲线,当增益 $G_{EM}=100, 200$ 时,在初始低信号亮度段哈特曼波前探测器中的 SNR 均与上曲线 4 重合,但当亮度进一步升高时哈特曼波前探测器中的亮度过饱和、分别在第 42 帧信号和第 27 帧信号时增益被动回归为 1,信噪比曲线分别与下曲线 1

重合。垂直线 2 和垂直线 3 分别为增益 $G_{EM}=100, 200$ 条件下哈特曼波前探测器由于亮度过饱和的增益截止线。图 8 的结果说明,对应光纤光源的最低输出信号 $I_a=35$ ADU 时, $G_{EM}=1$ 增益下的信噪比 SNR 只有 12,这是哈特曼波前探测器的最低限检出信噪比,而 G_{EM} 达到 100 时信噪比 SNR 达到 22, G_{EM} 再增至 200 时信噪比 SNR 仍保持为 22,且与自适应增益控制的 SNR 相同,说明在 $I_a=35$ ADU 的信号强度下 SNR=22 已为信噪比上限,换句话说增益超过 100 是没有意义的;随着光纤光源的输出信号增强, $G_{EM}=1$ 时的信噪比 SNR 最高增至 22,而 G_{EM} 为 100 和 200 固定增益的 SNR 曲线由于先后出现亮度过饱和而使信噪比 SNR 垂直落下与 $G_{EM}=1$ 的 SNR 曲线重合,只有自适应增益控制的信噪比 SNR 升至 30,可见信号增强是 SNR 增大的本质因素,如若不及时降低增益将失去获此收益的机会,因此自适应增益控制不仅使暗弱目标的探测信噪比有效提高,使整个探测过程保持于信噪比的上限,同时避免了基于 EMCCD 的哈特曼波前探测器的亮度过饱和。

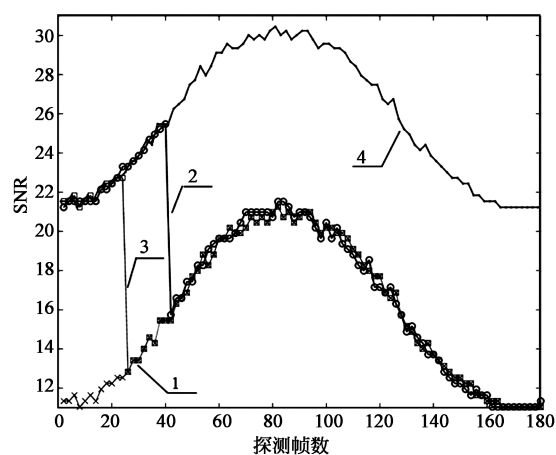


图 8 在正弦形光信号输出条件下设置不同固定增益 $G_{EM}=1, 100, 200$ 和自适应增益控制时哈特曼波前探测器中的信噪比 SNR 曲线

Fig.8 SNR comparisons in the situations of auto-gain-control or fixed gain.

5 结 论

本文提出自适应光学成像系统中哈特曼波前

探测器电子倍增增益的自适应控制方法,能够使哈特曼波前探测器保持较高的信噪比同时避免亮度过饱和。首先用亮度接近哈特曼 CCD 饱和的室内光源作为被观测目标,统计探测到的光斑阵列中最高亮度值 I_m 及其起伏均方差值 σ_m ,从而设定哈特曼能接收的最高亮度值 $\bar{I}_{ms}$ 比饱和亮度低 $3.0\sigma_m \sim 3.2\sigma_m$;再针对即时监测的任意目标的一帧光斑阵

列求取每个光斑的亮度最大值的平均值 I_a ,依据信号强度与增益的线性关系,即可以由当前帧探测数据 I_a 和增益 G_a 计算得到所需调整的增益值 G_{ms} 。实验证明用这种方法求得的 $\bar{I}_{ms}$ 和 I_a 都很稳定,能够使增益调整前后哈特曼的最低限检出信噪比 $SNR=12$ 上升至 22,避免弱暗目标由于亮度起伏难以进行波前探测的问题。

参 考 文 献:

- [1] DENVIR D J, CONROY E. Electron multiplying CCDs [C]//*Proceedings of the SPIE 4877, Opto-Ireland 2002: Optical Metrology, Imaging, and Machine Vision*. Galway, Ireland: SPIE, 2002, 4877: 55.
- [2] DOWNING M, FINGER G, BAADE D, *et al.* Detectors for AO wavefront sensing [C]//*Proceedings of the SPIE 7015, Adaptive Optics Systems*. Marseille, France: SPIE, 2008, 7015: 70151R.
- [3] FEAUTRIER P, GACH J L, BALARD P, *et al.* The L3Vision CCD220 with its OCam test camera for AO applications in Europe [C]//*Proceedings of the SPIE 7021, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy III*. Marseille, France: SPIE, 2008, 7021: 70210C.
- [4] FEAUTRIER P, GACH J L, BALARD P, *et al.* Characterization of OCam and CCD220: the fastest and most sensitive camera to date for AO wavefront sensing [C]//*Proceedings of the SPIE 7736, Adaptive Optics Systems II*. San Diego, California: SPIE, 2010, 7736: 77360Z.
- [5] FOPPIANI I, BAFFA C, BILIOTTI V, *et al.* Photon counting CCDs as wavefront sensors for A.O. [C]//*Proceedings of the SPIE 4839, Adaptive Optical System Technologies II*. Waikoloa, Hawai'i, United States: SPIE, 2003, 4839: 312.
- [6] 武星星,刘金国,周怀得,等.制冷对电子倍增 CCD 相机成像质量的影响[J].光学精密工程,2015,23(10):528-532.
WU X X, LIU J G, ZHOU H D, *et al.* Influence of cooling on imaging quality of EMCCD camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 528-532. (in Chinese)
- [7] 何家维,何昕,魏仲慧,等.电子倍增 CCD 星相机的设计[J].光学精密工程,2010,18(6):1396-1403.
HE J W, HE X, WEI Z H, *et al.* Design of EMCCD cameras for star detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1396-1403. (in Chinese)
- [8] 张闻文,陈钱.基于电子倍增 CCD 噪声特性的最佳工作模式[J].光学精密工程,2008,16(10):1977-1981.
ZHANG W W, CHEN Q. Optimum operation mode based on noise characteristics of electron multiplying CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(10): 1977-1981. (in Chinese)
- [9] 杨莉,吕相银,金伟,等.在轨卫星星等建模与计算[J].应用光学,2014,35(3):365-370.
YANG L, LÜ X Y, JIN W, *et al.* Model and calculation of orbital satellite apparent magnitude [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 365-370. (in Chinese)
- [10] VITEK S, HOZMAN J. Image quality influenced by selected image-sensor parameters [C]//*Proceedings of the SPIE 5036, Photonics, Devices, and Systems II*. Prague, Czech Republic: SPIE, 2003, 5036: 14.

作者简介:李大禹(1979—),男,吉林长春人,博士,副研究员,主要从事液晶自适应光学波前处理的研究.E-mail: lidayu@ciomp.ac.cn

宣丽(1957—),女,江苏常州人,博士,研究员,主要从事液晶自适应光学系统与液晶光学器件的研究.E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn