

文章编号: 1001-4322(1999)05-0579-04

高帧频 Shack-Hartmann 探测的 波前处理技术研究*

王春鸿, 李梅, 李安娜

(中国科学院光电技术研究所, 成都, 610209)

摘要: 高帧频 Shack-Hartmann 波前传感器常用于自适应光学系统中实时探测光束的动态波前误差,其输出信号必须由高速波前处理机进行处理和运算。结合 61 单元自适应光学系统中采样频率为 2900Hz 的 Shack-Hartmann 波前传感器的特点,讨论了采用高帧频 Shack-Hartmann 探测的自适应光学系统的实时波前处理方法。

关键词: 自适应光学; Shack-Hartmann 波前传感器; 波前处理机

中图分类号: O437 **文献标识码:** A

对于天文目标观测的成像系统,大气湍流使得目标成像模糊,分辨率严重受限^[1];对于激光发射系统,大气湍流使到达目标上的激光光斑抖动,能量集中度下降。

自适应光学技术提供了实时探测和校正光学系统的静态像差及大气湍流造成的动态波前像差以提高系统性能的有效方法^[2,3]。图 1 是自适应光学系统的组成示意图。自适应光学系统由波前传感器、波前控制器和波前校正器三大部分组成。图 1 中来自目标的信标光经过大气后,由于大气湍流的影响,产生了波前畸变,该畸变由波前传感器实时探测,其输出信号由波前控制器(波前处理机和高压放大器)处理,最后输出控制电压,驱动波前校正器(高速倾斜镜 FSM 和变形反射镜 DM)工作,从而校正光学系统的静态像差和大气湍流造成的动态波前误差,使目标在 CCD 靶面上成像稳定、清晰。

Shack-Hartmann(以下简称 HS)波前传感器以光能利用率高、结构紧凑等许多优点被广泛用于自适应光学系统。为了有效校正大气湍流在时间域上的高频成份,自适应光学系统中采用高帧频的 HS 波前传感器,以提高系统的采样频率。当系统的规模、采样频率和高压放大器、波前校正器的特性确定以后,如何提高波前处理机的运算速度以减少运算延时,就成为提高系统控制带宽必须解决的瓶颈问题。本文将结合 61 单元自适应光学系统,讨论高帧频 HS 探测的实时波前处理方法。

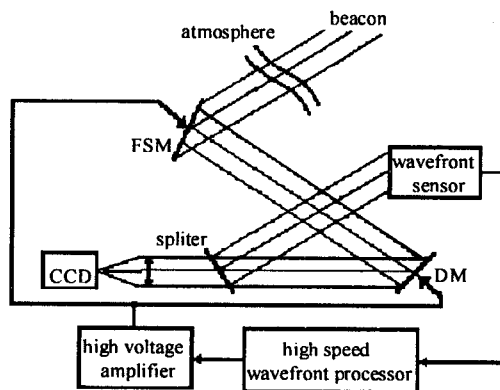


Fig. 1 The adaptive optics system scheme

图 1 自适应光学系统组成示意图

1 高帧频 HS 波前传感器的原理

图 2 是 HS 波前传感器的原理示意图。输入光束经微透镜阵列后,被分割成许多子光束,分

* 国家 863 激光技术领域资助课题
1999 年 6 月 15 日收到原稿,1999 年 9 月 20 日收到修改稿。第五届全国激光科学技术青年学术交流会优秀论文
王春鸿,男,1967 年 3 月出生,副研究员

别在 CCD 靶面上成像为一个子光斑。由于大气湍流的作用,这些子光斑在 CCD 靶面上不停地运动。我们将每个子光斑在 CCD 靶面上的运动区域定义为子孔径。如果不考虑光学系统自身的像差,当入射光束为平面波时,子光斑处于子孔径的中心,即坐标(0,0)处;当入射光束发生波前畸变时,某时刻子光斑的重心处于坐标(Δx, Δy)处,该偏移量正比于子孔径内子光束的平均斜率,由斜率可以复原出光束的波面误差。

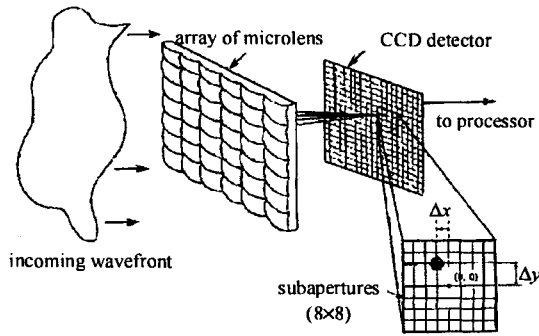


Fig. 2 The principle of Shack-Hartmann sensor

图 2 HS 波前传感器的原理

子孔径内光斑重心的计算采用一阶矩方法

$$x_c = \frac{\sum_{i,j} x_i I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}}, \quad y_c = \frac{\sum_{i,j} y_j I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} \quad (1)$$

式中: $I_{i,j}$ 是 CCD 靶面上坐标 (x_i, y_j) 处的光强灰度值, x_i, y_j 分别是像素在 x, y 方向的坐标。考虑到 HS 波前传感器自身光学系统的像差,子孔径光束的斜率为输入像差波时子光斑的重心与输入平面波时子光斑重心之差。

在 61 单元自适应光学系统中,HS 波前传感器输出的子光斑图像如图 3 所示,对应的子孔径如图 4 所示。该传感器中 CCD 采样频率为 2900Hz,靶面 64×64 像素,像素输出频率 16MHz。子光斑和子孔径按 8 行 8 列排布,每个子孔径 8×8 像素,有效的子孔径共 48 个。

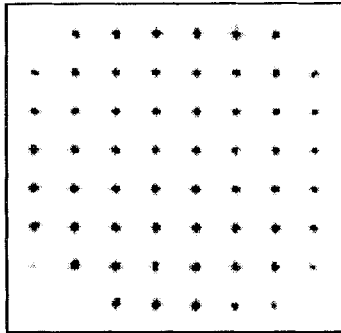


Fig. 3 Beacon spots at 2900Hz HS sensor
图 3 2900Hz HS 的子光斑

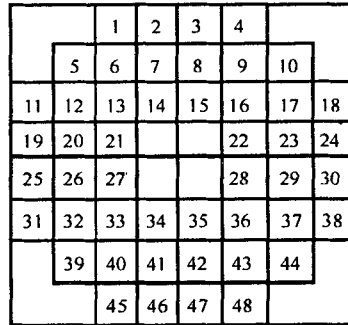


Fig. 4 Array of HS sensor subapertures
图 4 2900Hz HS 的子孔径排布

2 波前处理机的主要任务

波前处理机的任务包括:对高帧频 CCD 输出的图像采集、子孔径波前斜率计算、波前复原运算、控制运算和 D/A 转换,最终输出控制电压到高压放大器。其中主要的运算如下:

(1) 波前斜率计算: 主要是子孔径内光斑的重心计算(见公式 1),由此得到斜率向量 G 。在 61 单元自适应光学系统中, G 是由 48 个子孔径斜率构成的 96 个元素的向量。

(2) 波前复原运算: 即由子孔径的平均波前斜率乘以波前复原矩阵,得到波面误差

$$E = MG \quad (2)$$

在 61 单元自适应光学系统中, G 是 96 个元素的斜率向量; M 是 63×96 个元素的波前复

原矩阵; E 是 63×1 的波面误差向量。

(3) 控制运算: 由复原出的波面误差, 经控制迭代运算, 得到快速倾斜镜、变形反射镜驱动器所需的控制电压

$$\begin{aligned} v &= b_0 e + x_1 \\ x_1 &= b_1 e + a_1 v + x_2 \\ x_2 &= b_2 e + a_2 v + x_3 \\ x_3 &= b_3 e + a_3 v \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $b_0, b_1, b_2, b_3, a_1, a_2, a_3$ 是控制参数; e 是波面误差 E 的分量; v 是控制电压 V 的分量。在 61 单元自适应光学系统中, 控制电压共 63 路, 其中变形反射镜 61 路, 快速倾斜镜 2 路。

由上可见, 波前处理机的运算量很大, 并且大量的运算集中在波前斜率计算和波前复原部分。而这两部分运算主要是矩阵的乘加运算, 适合采用专用的高速 DSP (digital signal processor) 处理。

3 波前处理机的实时性分析

3.1 系统对波前处理机的运算延时要求

为了保证系统的实时性, 系统要求波前处理机在 HS 波前传感器的第 $N+1$ 帧图像输出结束前完成对第 N 帧图像的处理并输出控制电压, 即对一帧图像处理和运算的延时 Δt 必须小于 CCD 相机的采样周期 T 。对于采样频率为 2900Hz 的 61 单元自适应光学系统, $T = 0.34\text{ms}$ 。

3.2 流水和并行处理

从波前处理机的任务看到, 影响处理机延时的因素有: CCD 相机的图像输出时间、波前斜率计算时间、波前复原和控制运算的时间及 D/A 转换的时间。其中 CCD 相机的图像输出时间是固定的, 等于 CCD 相机的采样周期。如果在 CCD 相机的图像输出完成后再进行其它的运算处理, 要在一个采样周期内完成上述运算, 将使波前处理机的复杂性和难度大大增加。

进一步分析可以看到, 波前处理机的各个任务是相互独立和串行的。因此在波前处理机的设计中, 我们可以采用流水线结构, 即将波前处理机的各个任务分别作为流水线的节点, 采用不同的硬件电路专门处理, 从而使各个任务在时间上并行。采用流水工作方式, 可以使 CCD 相机的图像输出与波前斜率计算并行, 有效地利用 CCD 相机的图像输出时间来进行波前斜率运算。

在流水线中, 波前斜率计算、波前复原运算和控制运算的运算量最大, 容易成为瓶颈。因此对这些部分, 可以采用并行处理技术, 即将一个任务划分成多个相同的任务, 用多个 CPU 分别处理, 从而实现指令级的并行, 保证流水线畅通。

采用流水和并行处理后, 波前处理机的工作时序如图 5 所示。

4 61 单元自适应光学系统中波前处理机的结构

根据以上分析, 在 61 单元自适应光学系统中, 波前处理机采用流水线和并行处理技术。在该流水线中, HS 波前传感器的图像采集、波前斜率计算、波前复原运算、控制运算、D/A 转换分别作为流水线的节点, 用不同的硬件实现。同时, 为了解决流水线的瓶颈, 在波前斜率计算部分采用 8 片 DSP 并行处理, 在波前复原部分采用 4 片 DSP 并行处理, 控制运算部分采用 4 片

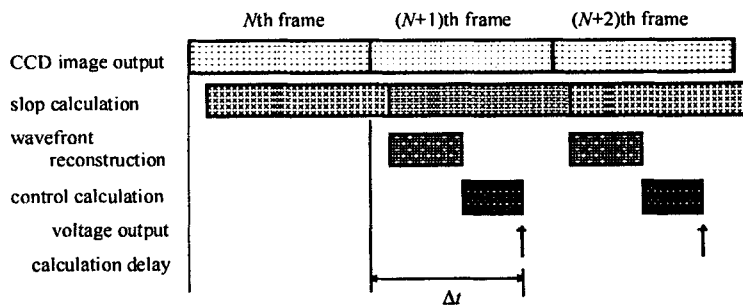


Fig. 5 Operation sequence of wavefront processor

图 5 波前处理机的工作时序

DSP 并行处理, D/A 采用 63 路并行转换。波前处理机与主控 PC 机构成主从式结构, PC 机为主控机, 波前处理机为从机, 波前处理机受 PC 机的监控。

5 结 论

在采用高帧频波前传感器的自适应光学系统中, 波前处理机的设计采用了流水线和并行处理技术。采用流水线方式可以充分利用 CCD 相机的图像输出时间进行运算, 并行处理可以解决流水线中的瓶颈问题。

在 61 单元自适应光学系统中, 针对波前传感器输出信号的特点和运算任务, 采用了流水线和并行处理技术, 共用 17 片高速的 DSP 并行处理, 峰值运算速度达 8.5 亿次/秒, 满足了系统采样频率达 2900Hz 的实时性要求。从系统的延时分析中可以看到, 由于 Hartmann 波前传感器采用 CCD 探测器, 本身不可避免地带来两个 CCD 采样周期的延时, 即 CCD 相机的曝光时间和图像输出时间。因此要从根本上减小系统的延时, 就必须进一步提高 CCD 的采样频率。

参考文献

- 姜文汉, 李明全, 汤国茂, 凌 宁等. 星体目标自适应光学成像补偿实验. 光电工程, 1995, (1)
- 姜文汉等. 61 单元自适应光学系统. 量子电子学报, 1998, 15(2):193~199
- Jiang Wenhan, Li Mingquan, et al. Adaptive optical image compensation experiments on stellar objects. *Optical Engineering*, 1990, 34(1):7~14

RESEARCH OF THE REAL TIME PROCESSING TECHNOLOGY FOR HIGH SAMPLING FREQUENCY SHACK-HARTMANN WAVEFRONT SENSOR

WANG Chun-hong, LI Mei, LI An-na

Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, 610209

ABSTRACT: High sampling frequency Shack-Hartmann wavefront sensor is used to measure the dynamic wavefront error in adaptive optics system. Its output signal must be processed by wavefront processor. In this paper, the method of real time processing for high sampling frequency Shack-Hartmann wavefront sensor was discussed. As an example, the results for 2900 Hz Shack-Hartmann wavefront sensor was given.

KEY WORDS: adaptive optics; Shack-Hartmann wavefront sensor; wavefront processor