



光学综合孔径共相实验中的共相标定控制系统设计

王蓓 上海天文台 wb@shao.ac.cn
指导老师: 陈欣扬

1 前言

1.1 概述

光学综合孔径望远镜是以斐索型光干涉成像原理, 通过若干独立小口径望远镜或子镜面, 按一定基线方式排布, 在像面直接干涉成像, 获得与单个大口径望远镜等效的空间高分辨率。斐索型光干涉望远镜有独立子孔径和子镜拼接式两种望远镜结构形式。独立子孔径形式是指组成综合孔径的子孔径具有各自独立的主、副镜光学系统; 阵列中的各子孔径望远镜结构完全相同, 易于实现模块化。由于各子孔径均有副镜, 因此中心遮挡较多造成集光能力有所降低, 共相校正光路中的平面转折较多, 在一定程度上也会降低效率。该形式焦距较短, 易展开, 在未来空间干涉仪应用中具有一定优势。

对于独立子孔径形式望远镜而言, 保持系统的共相性是实现干涉成像的前提条件和影响成像质量优劣的重要因素。在光学综合孔径阵列中, 各子孔径之间存在的轴向光程差 (Piston) 和各子孔径本身绕X轴的倾斜误差 (Tip) 及绕Y轴的倾斜误差 (Tilt) 是共相误差的主要分量。轴向光程差增加会造成点扩展函数强度减弱和光斑畸变, 削弱干涉望远镜成像质量。随着倾斜误差的增大, 点扩展函数沿相应的轴逐渐远离理想位置, 并且衍射图样的形状也发生了变化。因此需要精确检测并加以有效补偿。

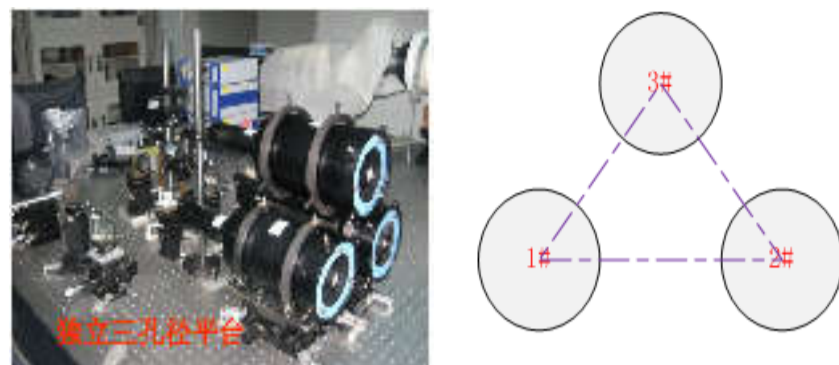


图1 独立三孔径干涉成像实验系统

1.2 光学综合孔径干涉成像

课题组已研制完成了由3个独立的100毫米口径望远镜组成的独立子孔径形式光学综合孔径干涉成像实验样机, 如图1所示。实验光源采用NKT的超连续谱宽光谱光源, 中心波长选择600纳米, 带宽20纳米 (即意味着相干长度180微米)。利用ZYGO激光干涉仪对每个子孔径望远镜进行精确调焦, 确保子孔径望远镜达到最佳准直性要求。其干涉成像光路如图2所示。

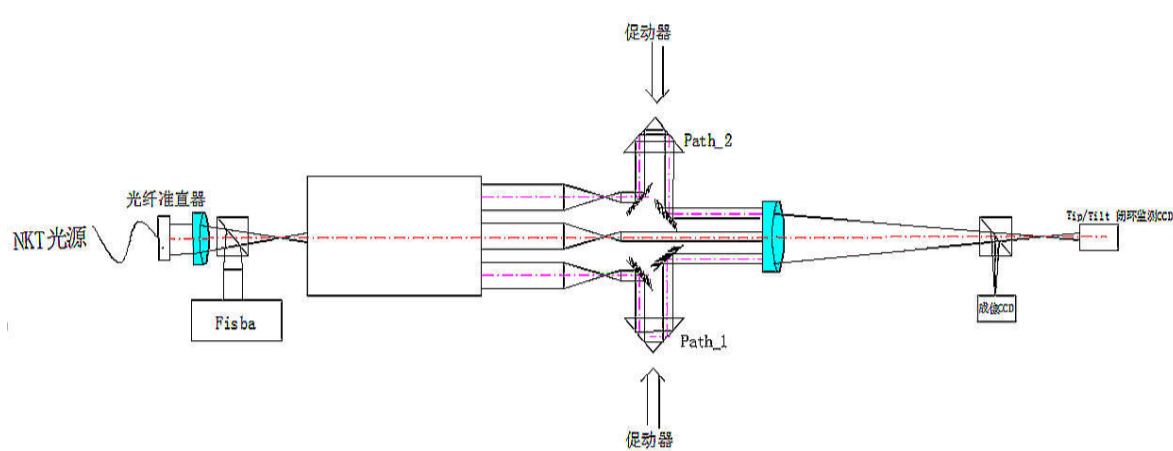


图2 独立三孔径干涉成像实验光路图

2 控制系统设计

2.1 控制系统结构

实验中3#子孔径望远镜作为固定光路, 另两路的共相粗调采用手动多维调整架和电动平移台。共相精调全部采用P公司的纳米微位移驱动器完成, 其中Piston校正均采用单轴电压扫描台P-629 (行程1500微米, 闭环分辨率2纳米); Tip/Tilt校正均采用快速Tip/Tilt偏摆镜S-330 (行程±200角秒, 闭环分辨率0.01角秒)。实验系统光路中还增加了Tip/Tilt闭环控制环节, 更好地提高了共相误差检测与控制精度。为成像相机增加一个机械旋转机构, 使每组干涉条纹方向均与相机水平轴正交, 有利于精确测量条纹对比度。

系统主要由两部分组成: 控制计算机完成对微位移驱动器和电动平移台旋转台的控制, 成像计算机主要完成对电动光阑、远场成像相机和Tip/Tilt闭环测量相机的控制, 两台计算机通过TCP/IP协议进行网络通信。控制计算机发出微位移驱动器步进扫描指令, 触发成像计算机进行图像采集; 成像计算机获得的CCD上光斑质心偏差传输至控制计算机, 完成Tip/Tilt的PID闭环控制。独立孔径干涉成像实验系统的控制框图如图3所示。

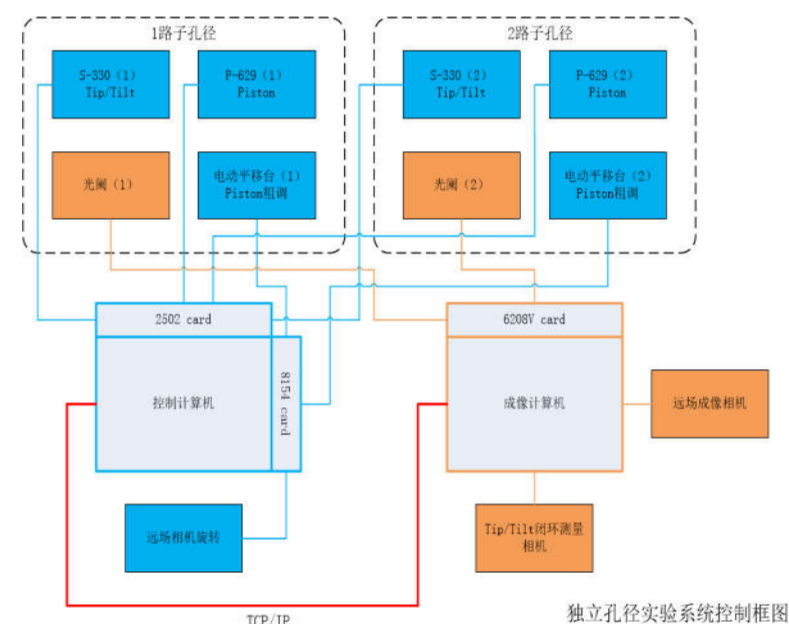


图3 独立孔径干涉成像实验系统控制框图

2.2 控制系统实现

2.2.1 电动平移台和旋转台控制

主要通过模块化设计的高级4轴伺服和步进运动控制卡PCI-8154来完成Piston的粗调, PCI-8154卡共有4个控制轴, 每个子孔径占用一个轴。其控制程序界面如图4所示。

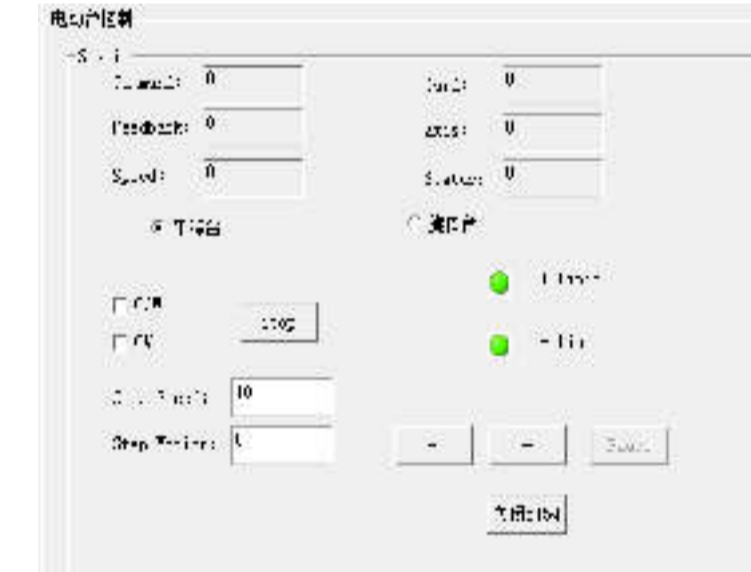


图4 电动平移台和旋转台控制界面

首先对PCI-8154卡进行初始化配置:

```
Ret = _8154_initial(&CardID_InBit, 0); //初始化8154卡,
_8154_set_pls_outmode(m_choose_axis, 0); //配置命令脉冲的输出模式
_8154_set_pls_inptmode(m_choose_axis, 3, 0); //配置外部反馈脉冲的输入模式
_8154_set_feedback_src(m_choose_axis, 1); //将指令脉冲设置为计数信号
```

通过单选按钮完成平移台和旋转台的切换以及运动方向的控制:

```
_8154_tv_move(m_choose_axis, StartSpeed, ComSpeed, 5); //在5秒内达到ComSpeed, 方向由StartSpeed和ComSpeed决定
正反向单步运动:
_8154_start_tr_move(m_choose_axis, StepLen, StartSpeed, ComSpeed, Tacc, Tdec); //以梯形曲线方式运动, 并设定步长、速度、加速时间、减速时间
```

2.2.2 P-629和S-330驱动器控制

主要通过高性能多功能模拟输出卡DAQ/PXI-2502完成对Piston和Tip/Tilt的精细和步进扫描过程, 以及对Tip/Tilt的PID闭环控制。DAQ/PXI-2502卡共有8个模拟输出通道, 每个子孔径需要占用3个通道。其控制程序界面如图5所示。



图5 P-629和Tip/Tilt校正控制界面

首先对DAQ/PXI-2502卡进行初始化配置, 为子1#、2#子孔径配置通道, 1#子孔径占用通道0, 1, 2, 2#子孔径为通道4, 5, 7, 其中Piston、Tip和Tilt均各占用一个通道。设置电压输出为单极性 (0~10V)。在单步驱动过程中, 以Piston反向单步驱动为例: 当DPID标志位为正时, 设置步长和驱动方向标志位, 并通过D2K_AO_Group_Update(card, DA_Group_B, out_voltage)语句更新数据, 每单步一次, 驱动数加一, 驱动器移动相应距离。

在Piston步进自动测量过程中, 首先要创建自动测量的多线程函数, 并在其中调用步进自动测量函数。

在Tip/Tilt闭环控制过程中采用PID闭环控制方法, 通过成像相机得到的光斑质心偏差运用PID计算公式来计算Tip和Tilt的值。

3 控制系统性能分析

3.1 共相测量结果

在共相实验中, 采用对光程的步进扫描方式采集远场条纹像, 然后以对比度为评价指标, 通过拟合对比度测量数据, 获得对比度峰值, 其对应的位置即为两子孔径等光程位置点。通过此方法实现了宽带短相干光 (近似于白光) 条件下的子孔径共相要求, 共相测量误差优于200纳米。两两光路之间步进扫描条纹对比度测量结果如图6、7、8所示。

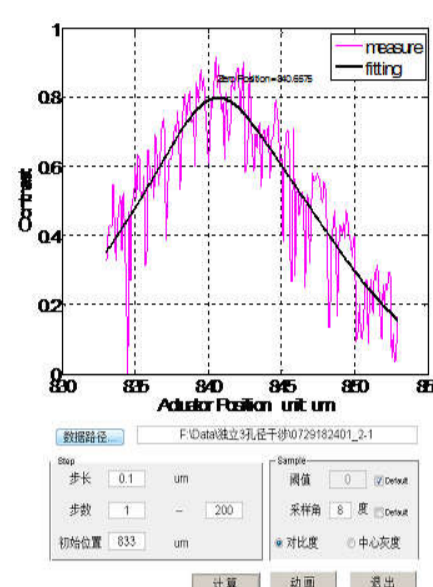


图6 1#与2#子孔径步进扫描干涉条纹对比度

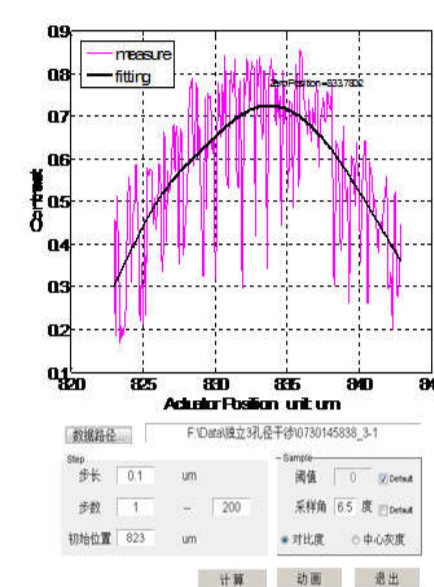


图7 1#与3#子孔径步进扫描干涉条纹对比度

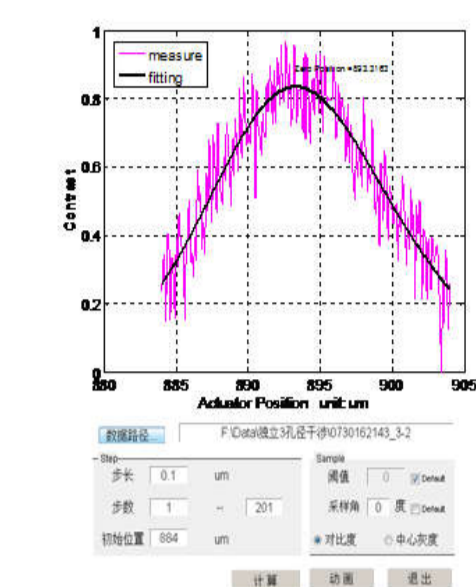


图8 2#与3#子孔径步进扫描干涉条纹对比度

3.2 远场像对比结果

通过物理光学方法和仿真建模工具软件PAOLA仿真建立独立三孔径的成像模型, 获得理想条件下的1#~2#~3#子孔径同时干涉的远场像, 如图9所示。仿真参数完全按照独立三孔径实验系统建立, 见表1。图10是利用NKT光源进行三孔径干涉, 精相后获得的远场干涉条纹像。

表1 独立子孔径干涉仿真参数表

参数项	参数值
CCD像元尺寸	7.4微米
子孔径通光直径	90毫米
合成镜焦距	1260毫米
中心波长	600纳米
带宽	20纳米

由仿真远场像计算出的FWHM约为4.54角秒, 由实验远场像测量出的FWHM约为4.79角秒, 二者能量分布形态以及数值都比较接近, 远场条纹像的半高全宽 (FWHM) 与理想理论值的相对误差优于5.5%。在仿真像中, 主峰在艾里斑中的能量集中度约为15.44%; 在实验像中, 主峰在艾里斑中的能量集中度约为10.55%。并且与其相前的远场像相比, 其像质更好。

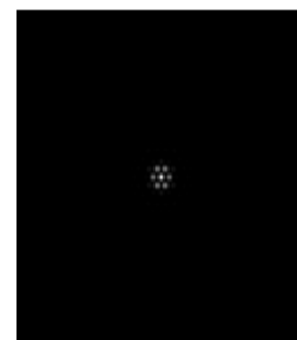


图9 1#~2#~3#子孔径干涉的仿真远场像



图10 独立子孔径干涉的远场像



图11 独立子孔径形式样机共相前的远场像

3.3 PID闭环控制效果

基于色散干涉法的Piston步进测量实验中, 两个原本重合的光斑会逐渐分离, 主要由于外界扰动和步进改变Piston时会引起Tip/Tilt变化, 所以要实时记录CCD上光斑质心偏差, 用来对Tip/Tilt进行闭环控制, 使Piston和Tip/Tilt都能达到精度要求。PID闭环在Piston步进中 (step=30nm) 的实测性能如图12所示。可见在闭环后质心偏移量明显减小, 经计算其均方根值基本不变。



图12 左边两幅图为闭环前质心偏移量, 右边两幅图为闭环控制后质心偏移量

4 对原有控制系统的改进

由于原有控制系统3#子孔径望远镜为固定光路, 只对1#、2#子孔径进行共相调节, 且是在两台控制计算机上分别完成。现对三个子孔径均进行共相调节, 并且综合到一个程序中完成, 如图13所示。由于DAQ/PXI-2502卡只有8个模拟输出通道, 而每个子孔径都需要占用3个通道, 所以3#子孔径可利用PI公司的压电数字控制器E-621和具有串口通讯和命令解释功能的E-816指令集完成对Piston和Tip/Tilt的运动控制。



图13 独立三孔径干涉程序控制界面

首先设置各个控制器的串口通信, 以Piston控制为例, 如图14所示。而其他控制过程与1#和2#子孔径类似。

```
//设置Piston控制串口通信
void OnInitForm_OnPistonStep()
{
    BFDI0816_InterfaceSetupDlg (""); //接口设置
    BOOL p_IsValueRight;
    BFDI0816_GetData ("4", &h_IsValueRight); //设置轴的初始状态
    BFDI0816_GetData ("4", &h_IsValueRight); //获取轴的初始状态
    long real1; BFDI0816_GetData ("0027", BFDI0816_GetData, &real1); //设置波特率
    long real2; BFDI0816_GetData ("0027", BFDI0816_GetData, &real2); //设置波特率
    long real3; BFDI0816_GetData ("0027", BFDI0816_GetData, &real3); //设置波特率
    BFDI0816_GetData ("0027", BFDI0816_GetData, &real4); //设置波特率
    BFDI0816_GetData ("0027", BFDI0816_GetData, &real5); //设置波特率
    BFDI0816_GetData ("0027", BFDI0816_GetData, &real6); //设置波特率
    BFDI0816_GetData ("0027", BFDI0816_GetData, &real7); //设置波特率
    BFDI0816_GetData ("0027", BFDI0816_GetData, &real8); //设置波特率
    BFDI0816_GetData ("0027", BFDI0816_GetData, &real9); //设置波特率
    BFDI0816_GetData ("0027", BFDI0816_GetData, &real10); //设置波特率
}
```

图14 3#子孔径Piston控制器串口通信

5 致谢

本控制系统设计中, 作者所做之处甚微, 感谢陈欣扬老师原有的共相标定控制程序, 感谢干涉实验室所有老师所做的共相实验以及所提供的实验数据, 并感谢上海天文台十三五重大突破课题“共相光学综合孔径望远镜共相关键技术研究”的资助。

参考文献

- [1] 陈欣扬. 国家高技术研究发展计划(863计划)(2013AA0296) 技术总结报告[R]. 上海: 上海天文台, 2013.
- [2] 陈欣扬. 国家高技术研究发展计划(863计划)(2015AA1227) 技术总结报告[R]. 上海: 上海天文台, 2015.
- [3] 颜召军. 色散干涉共相检测方法研究[R]. 上海: 上海天文台, 2014.
- [4] 王超燕. NKT三孔径干涉实验进展[R]. 上海: 上海天文台, 2016.
- [5] 三孔径干涉成像实验进展[R]. 上海: 上海天文台, 2015.
- [6] Laurent Jolissaint, PAOLA Version 6.2 User Manual[M]. 2008.
- [7] Chao-Yan Wang, Xin-Yang Chen. The experiment to detect equivalent optical path difference in independent double aperture Interference light path based on step scanning method[J]. SPIE Proc. 9272, 2014
- [8] PCI8154 Advanced & Modulated 4Axis Servo/Stepper Motion Control Card Users Manual[M]. ADLINK Technology Inc. 2006.
- [9] DAQ-2500/PXI-2500 Series High Performance Analog Output Multi-function Cards User's Guide[M]. ADLINK Technology Inc. 2002.