

# AIMS太阳望远镜波前检测技术研究

鄂可伟<sup>a</sup>, 沈宇樑<sup>b</sup>, 付兴<sup>a</sup>, 雷昱<sup>a</sup>, 王鹏<sup>a</sup>, 严翔宇<sup>a</sup>, 薛勋<sup>a</sup>,  
李华<sup>a</sup>, 赵建科<sup>a</sup>, 王东光<sup>b</sup>

<sup>a</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119, 中国;

<sup>b</sup> 中国科学院国家天文台怀柔太阳观测基地, 北京100101, 中国;

第十届海峡两岸天文望远镜与观测前沿技术研讨会  
2023年11月20日  
中国·台湾





# 目录

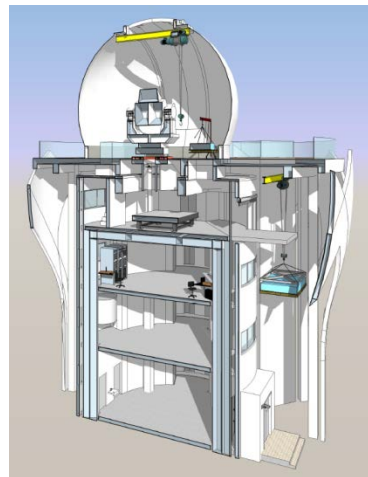
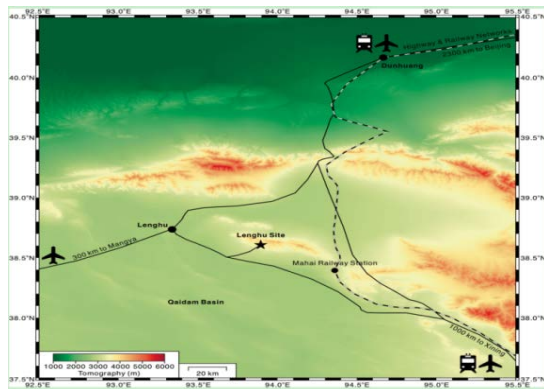
- AIMS太阳望远镜简介
- AIMS主镜CGH检测方法研究
- 系统波前子孔径拼接检测技术
- 夏克-哈特曼波前传感技术
- 总结





# AIMS 太阳望远镜

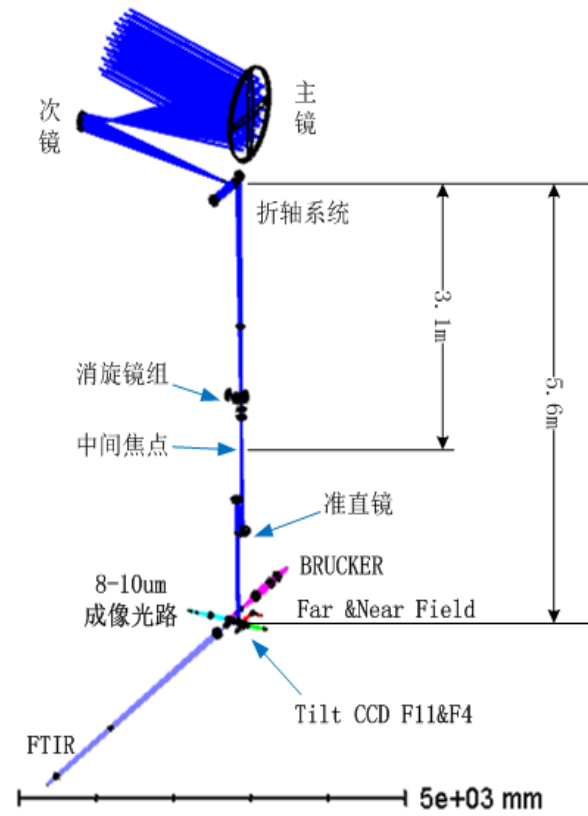
- **AIMS:** 用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统
- 国家自然科学基金项目支持: 9136万人民币
- **安装台址:** 青海省冷湖镇赛什腾山
- **海拔:** 4000m
- 口径为1米的离轴光学系统
- **应用波段:** 中红外
- **视场:**  $6.4' \times 6.4'$
- **焦面仪器:**
  - a.  $12.32 \mu\text{m}$  波段光谱仪
  - b.  $8-10 \mu\text{m}$  成像仪
- **研究机构:** 中国科学院国家天文台, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 中国科学院上海技术物理研究所, 中国科学院南京天文仪器有限公司





# AIMS太阳望远镜

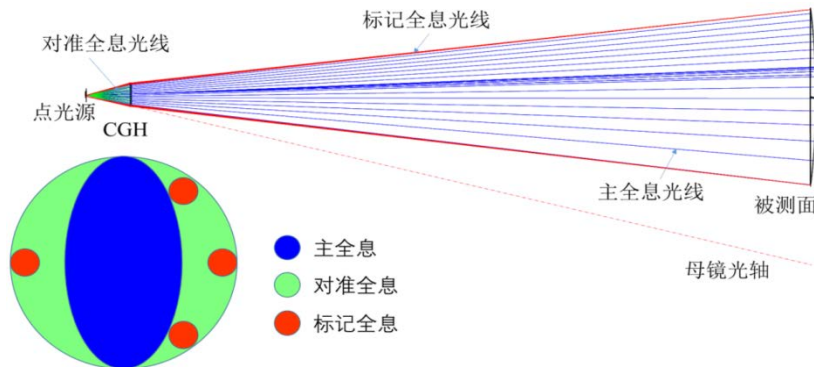
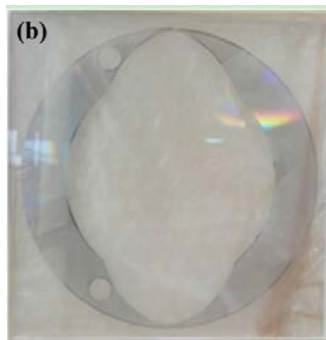
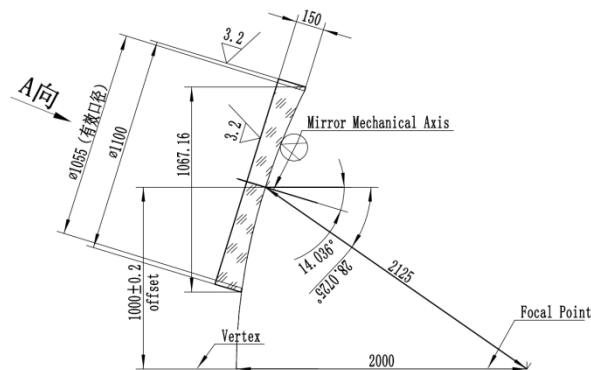
- 1米口径离轴格力高利系统设计
- 系统包含多个离轴镜和平面反射镜
  - 离轴抛物面镜：M1和M7
  - 离轴椭球镜：M2和M4
  - 平面反射镜：M3, M5, M6, M8, M9
- **AIMS 需要在多个焦点位置处控制系统波前**
  - 主镜焦点 (F/2)：M1 镜面面形
  - 格力高利焦点 (F/10)：M1和M2的对接装调
  - 中间焦点 (F/50)：M4装调
  - 可见光焦点 (F/10)：M7装调，系统波前
  - F13摆镜支路：在不同俯仰角下的像差测量及系统校准





# AIMS主镜面形检测

- 主镜光轴和水平轴的最小夹角为 $14.03^\circ$ 。
- 为确保主镜在工作状态下的面形误差达到指标要求，需要开展在位检测。
- 设计完成了一6英寸的CGH(计算全息)来测试主镜。
- 计算全息包含主全息(蓝色椭圆区域)，对准全息(绿色区域)和标记全息(红色区域)。

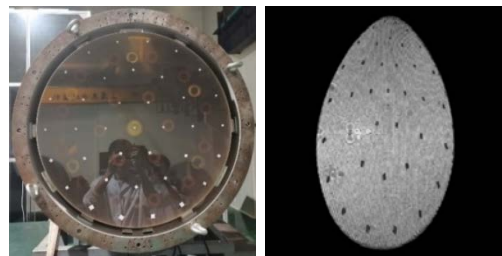
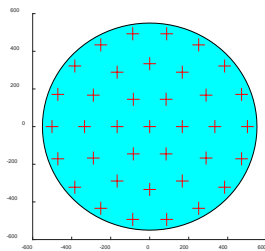




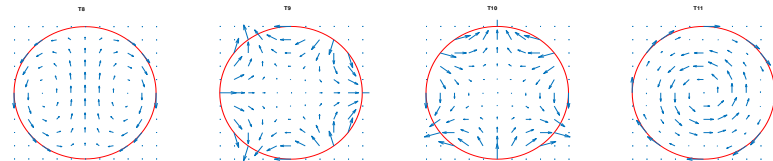
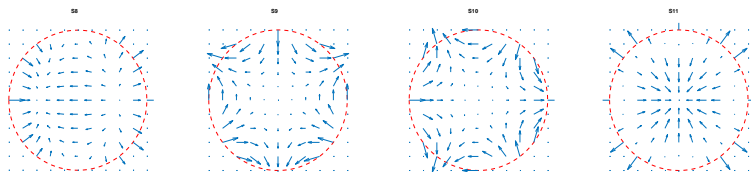
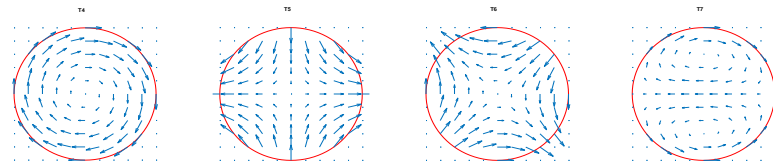
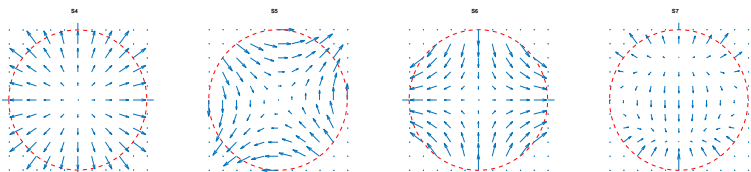


# AIMS主镜面形检测

- 37 个特殊设计的标记点被粘贴到主镜上，并精确测量了其位置坐标。
- 标记点的坐标位置和其在干涉条纹上的位置点对应关系使用S和T矢量多项式集进行拟合。
- 映射关系被用于面形误差的畸变校正。



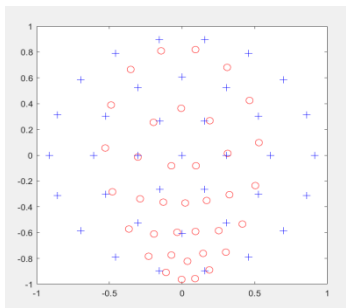
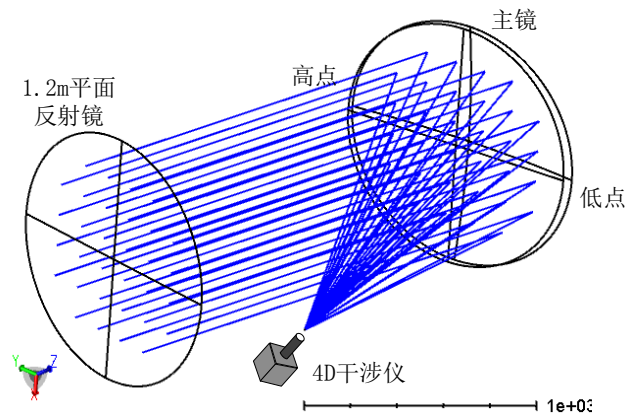
$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \\ y_1 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (S_{x1,1}) \dots (S_{x1,L}) \dots (T_{x1,1}) \dots (T_{x1,L}) & \dots & S_4 \\ \dots & \dots & \dots \\ (S_{xn,1}) \dots (S_{xn,L}) \dots (T_{xn,1}) \dots (T_{xn,L}) & \dots & S_j \\ (S_{y1,1}) \dots (S_{y1,L}) \dots (T_{y1,1}) \dots (T_{y1,L}) & \dots & t_4 \\ \dots & \dots & \dots \\ (S_{yn,1}) \dots (S_{yn,L}) \dots (T_{yn,1}) \dots (T_{yn,L}) & \dots & t_l \end{pmatrix}$$



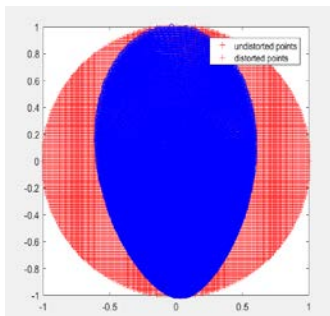


# AIMS主镜面形检测

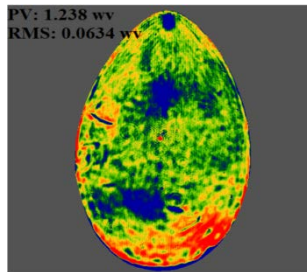
- 在光轴水平条件下，畸变校正的结果和平面镜自准直检测的结果进行了对比验证。
- 依据面形畸变校正的结果，对主镜进行了进一步的抛光，最终主镜面形达到技术指标要求。



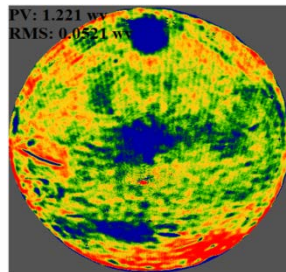
37 标记点及成像点



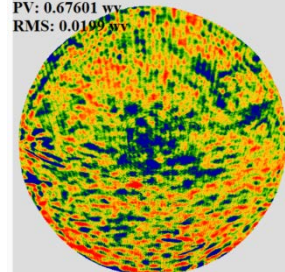
所有的映射点列



畸变面形



校正面形

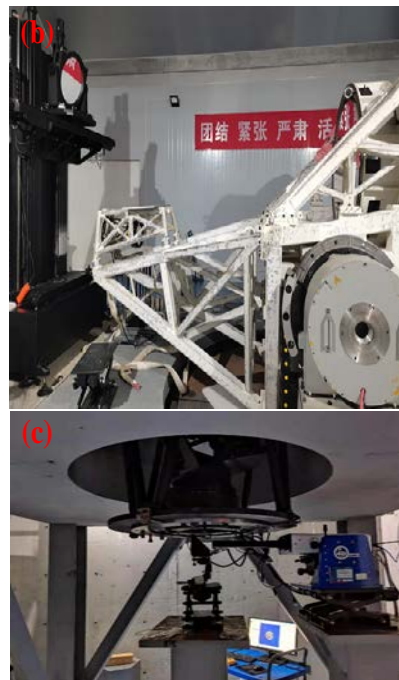
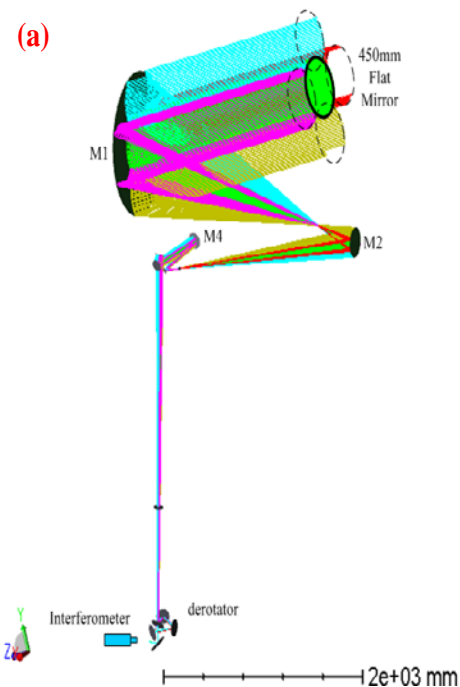
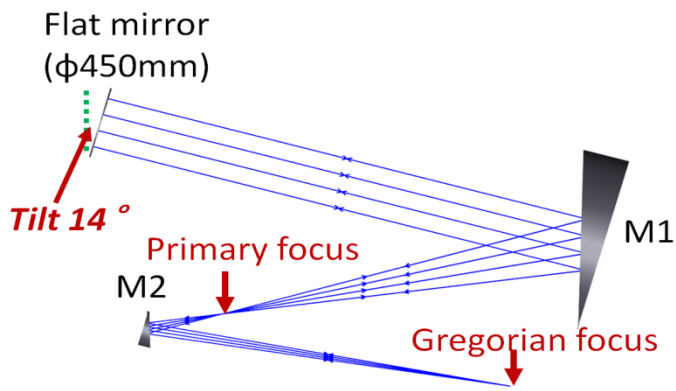


最终面形分布



# 子孔径拼接式检测及辅助装调技术

- 子孔径拼接:扫描平面反射镜, 使用4D动态干涉仪测量子孔径波前, 全口径波前从子孔径波前中拼接获取。
- 次镜被安装在一个六自由度调整机构上, 可实现六自由度的精确调整。

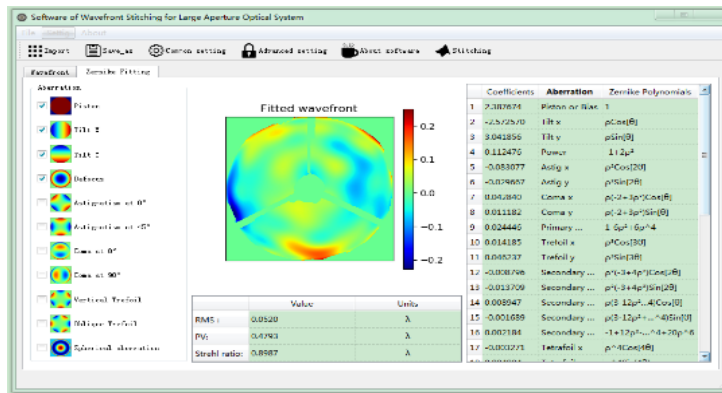
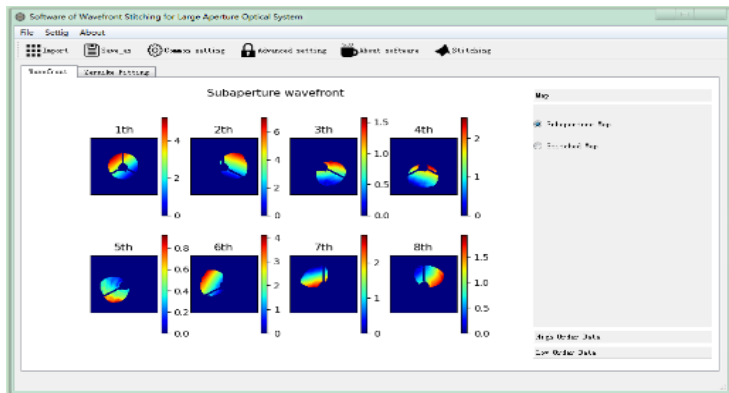
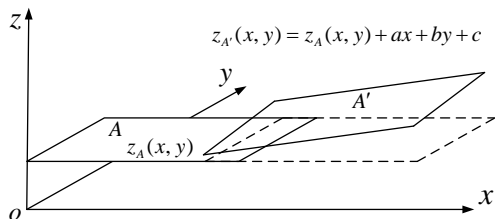




# 子孔径拼接式检测及辅助装调技术

- 子孔径拼接原理：为获取全口径上的波前分布，相邻子孔径上的波前差的平方和

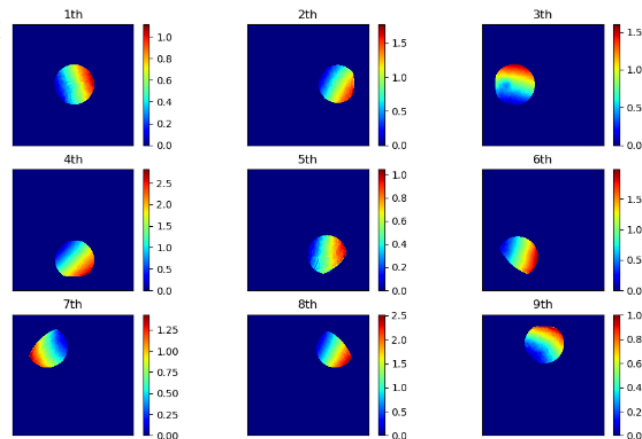
必须达到最小，也即满足：
$$\sum_{i=1 \dots N} \sum_{j=1 \dots N} \left\{ [z_i(x, y) + a_i x + b_i y + c_i] - [z_j(x, y) + a_j x + b_j y + c_j] \right\}^2 = \min$$



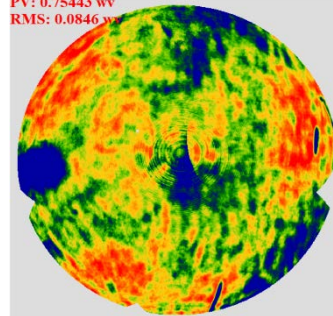


# 子孔径拼接式检测及辅助装调技术

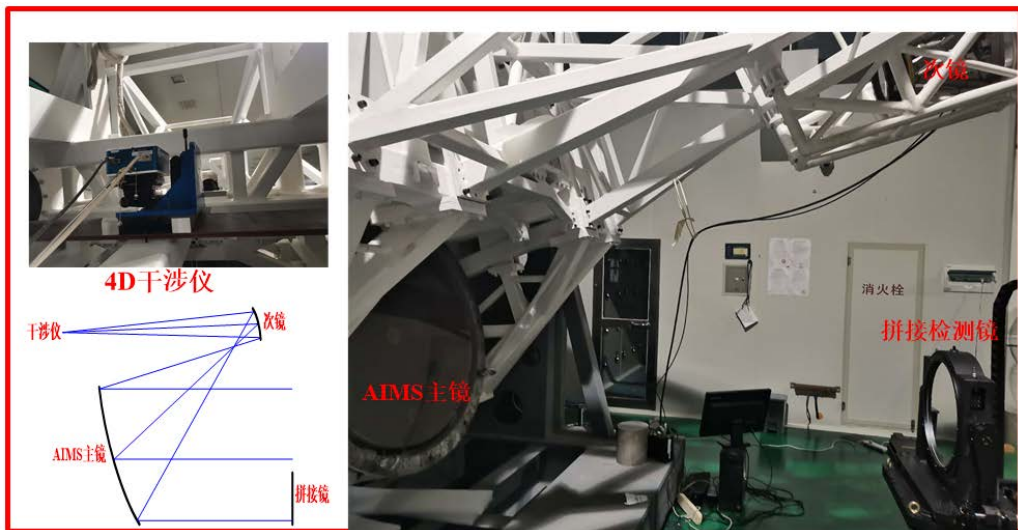
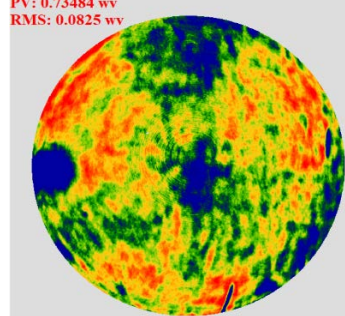
- 子孔径拼接方法的验证：当AIMS的引导光学系统的光轴处于水平状态时，其系统波前分别使用全口径自准直检测及子孔径拼接检测方法进行对比测试。



PV: 0.75443 wv  
RMS: 0.0846 wv



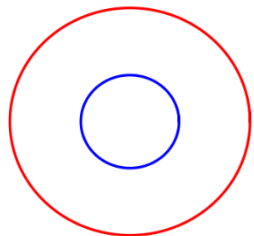
PV: 0.73484 wv  
RMS: 0.0825 wv



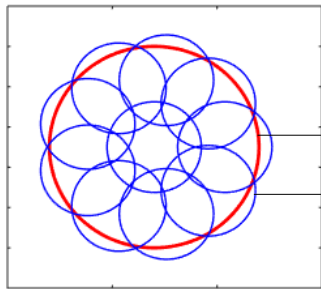


# 子孔径拼接式检测及辅助装调技术

- 计算机辅助装调策略:
  - 使用450mm口径下的波前对系统进行粗略调整。
  - 使用拼接获取的全口径波前进行精调。

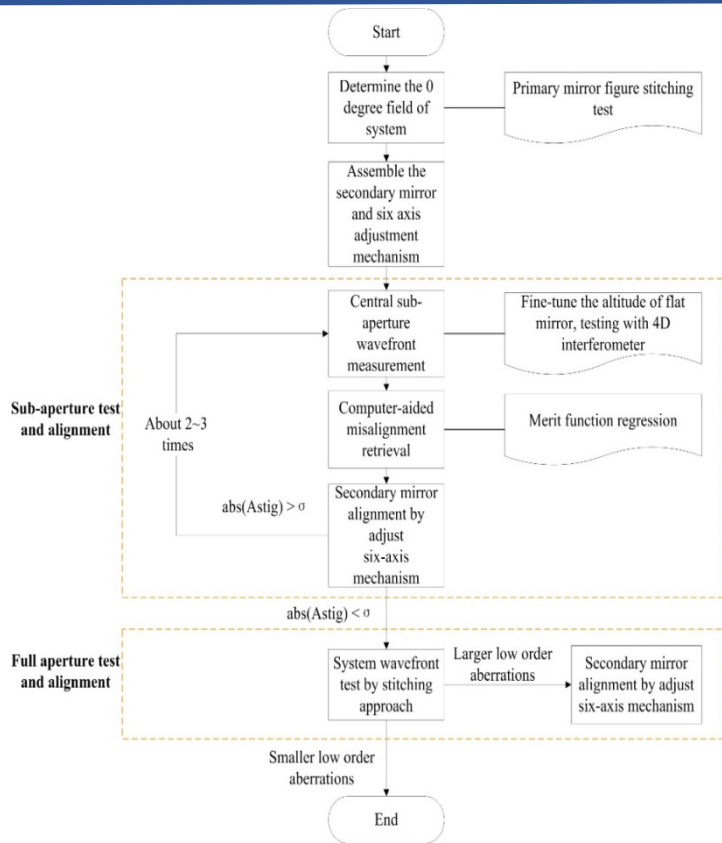


子孔径下进行粗调



全口径下精调

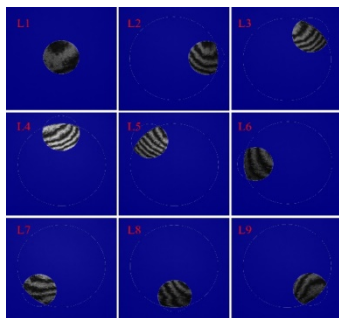
Primary mirror  
450mm flat mirror





# 子孔径拼接式检测及辅助装调技术

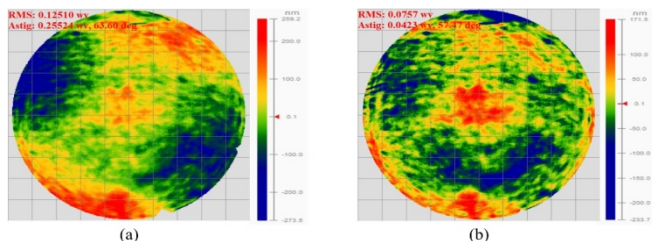
**测量结果：**次镜倾斜最容易产生波前像差，最主要引入的是像散。经过子孔径测量—调整—全口径拼接测量—调整过程，系统像差达到指标要求。



9个子孔径下的条纹

Alignm ent number	Adjustment amounts of six-axis adjustment mechanism		Aberration (units: $\lambda$ @632.8nm)		
	$\Delta T_x$ ( $^\circ$ )	$\Delta T_y$ ( $^\circ$ )	Z5	Z6	RMS
1	0	0	0.1036	0.1555	0.0894
2	$7 \times 10^{-3}$	$-9 \times 10^{-3}$	-0.0489	0.0284	0.0525
3	$-6 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-3}$	-0.0450	0.0338	0.0513
4	$-2 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-3}$	-0.0153	0.0467	0.0507
5	$5 \times 10^{-4}$	0	-0.0126	0.0388	0.0498

子孔径波前测量结果



全口径拼接波前分布：  
(a)调整前，(b)调整后

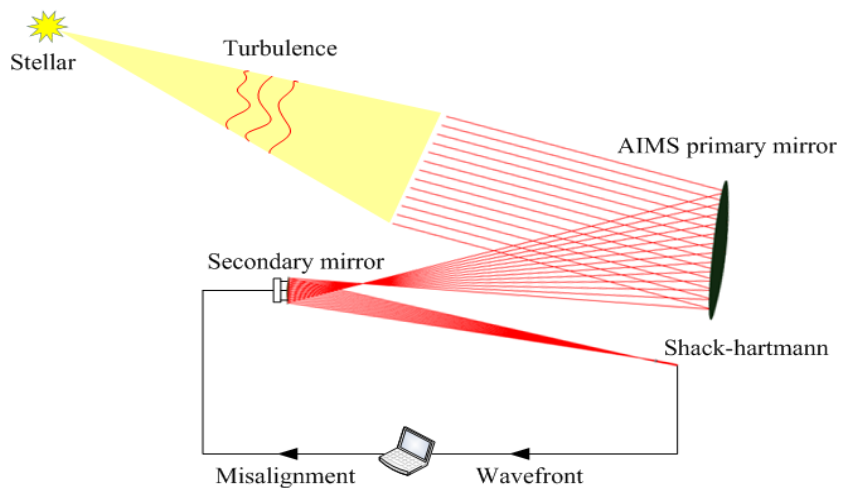
Alignm nt number	Adjustment amounts of six- axis adjustment mechanism		Aberration (units: $\lambda$ @632.8nm)		
	$\Delta T_x$ ( $^\circ$ )	$\Delta T_y$ ( $^\circ$ )	Z5	Z6	RMS
1	0	0	-0.1534	0.2037	0.1251
2	$2.2 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$	-0.0176	0.0385	0.0757

全口径波前测量结果

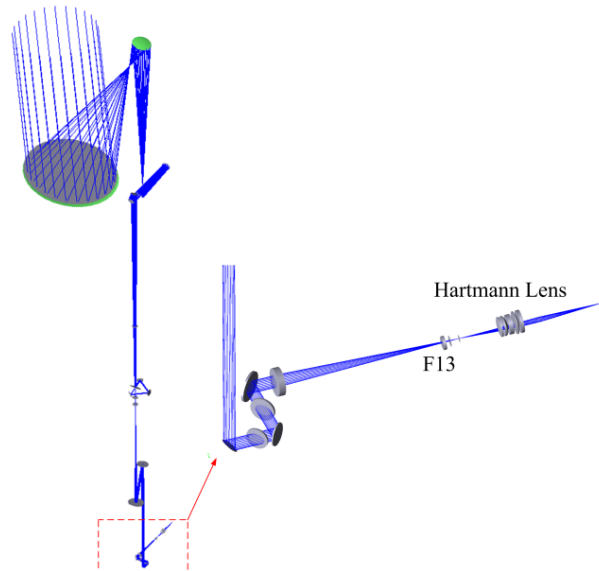


# 夏克-哈特曼波前传感技术

- 望远镜在运行过程中的桁架变形、温度变化等会导致望远镜像质的衰退。
- 在AIMS系统中安装夏克—哈特曼波前传感器，在夜间进行恒星观测，可以实现系统波前的监测并依此完成系统的校准。



波前校准的原理示意图

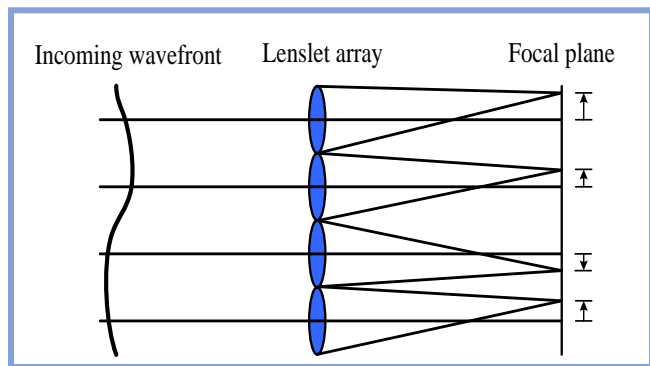


AIMS系统波前传感光路设计图

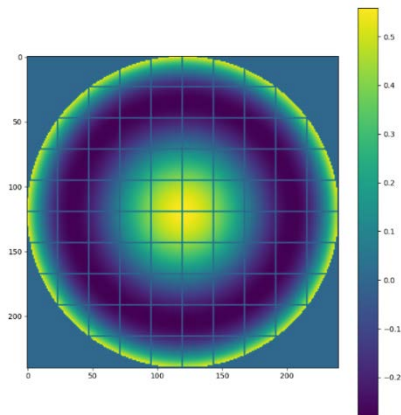


# 夏克-哈特曼波前传感技术

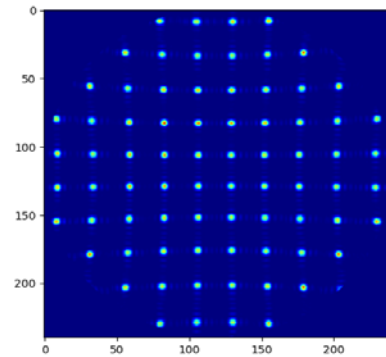
- 夏克-哈特曼波前传感原理：在波前传感器探测器上点阵的质心变化，反映的是系统波前的斜率变化。



$$\sigma(\mathbf{r}) = f_0 \nabla \Phi(\mathbf{r})$$



球差

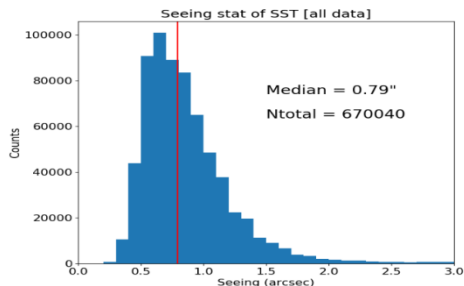


球差点阵



# 夏克-哈特曼波前传感技术

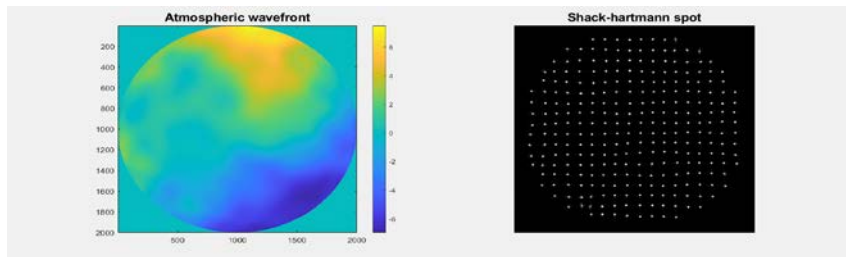
- **数值仿真:** 可以根据冷湖赛什腾山的平均视宁度仿真戈尔莫格洛夫大气湍流屏，并使其在光路中传播。
- 哈特曼波前传感器的参数可以根据大气湍流在传感器上的分布确定。



<http://lenghu.china-vo.org/sitecondition>

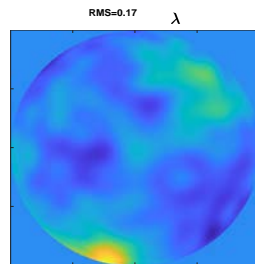
Diameter of micro lens	0.5mm
Focal length	15mm
Wavefront resolution	20×20
Detector pitch	5.5μm
Frame rate	20Hz

参数设计



大气湍流屏

大气湍流对应的点阵



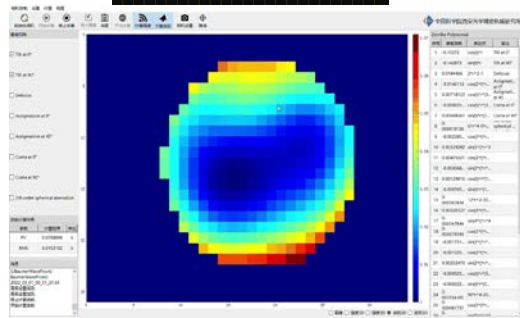
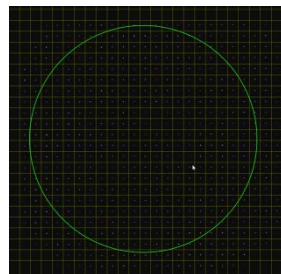
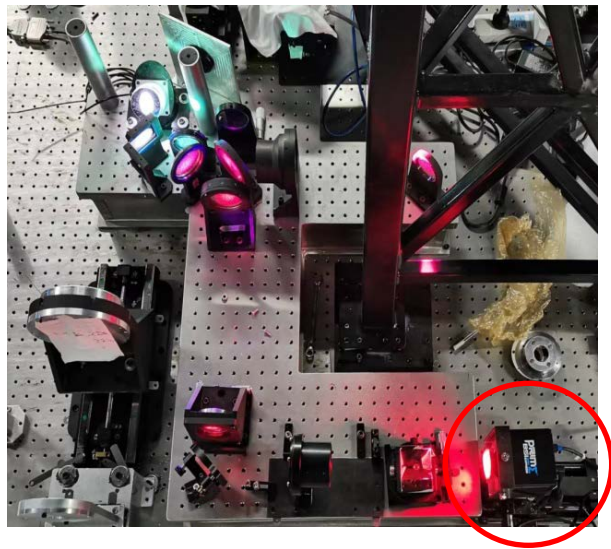
其中一个大气湍流屏

100 组平均结果



# 夏克-哈特曼波前传感技术

- 恒星像获取：设计了针对AIMS的波前传感器并完成测量软件的开发。
- 在夜间观测时，针对不同视星等的恒星，设置的探测器的曝光时间不同。在本系统中，针对0.4星等的恒星，曝光时间为0.3s。





# 夏克-哈特曼波前传感技术

- 在AIMS未完成精确校准前，使用哈特曼波前传感器在夜间测量了不同俯仰角状态下的系统波前。
- 哈特曼测试结果表明，随着俯仰角的增加，系统像质出现了衰退，这和系统在观测太阳时出现的现象是一致的。

- 波前误差:**

-- 22 ° : 0.34 λ

-- 44 ° : 0.60 λ

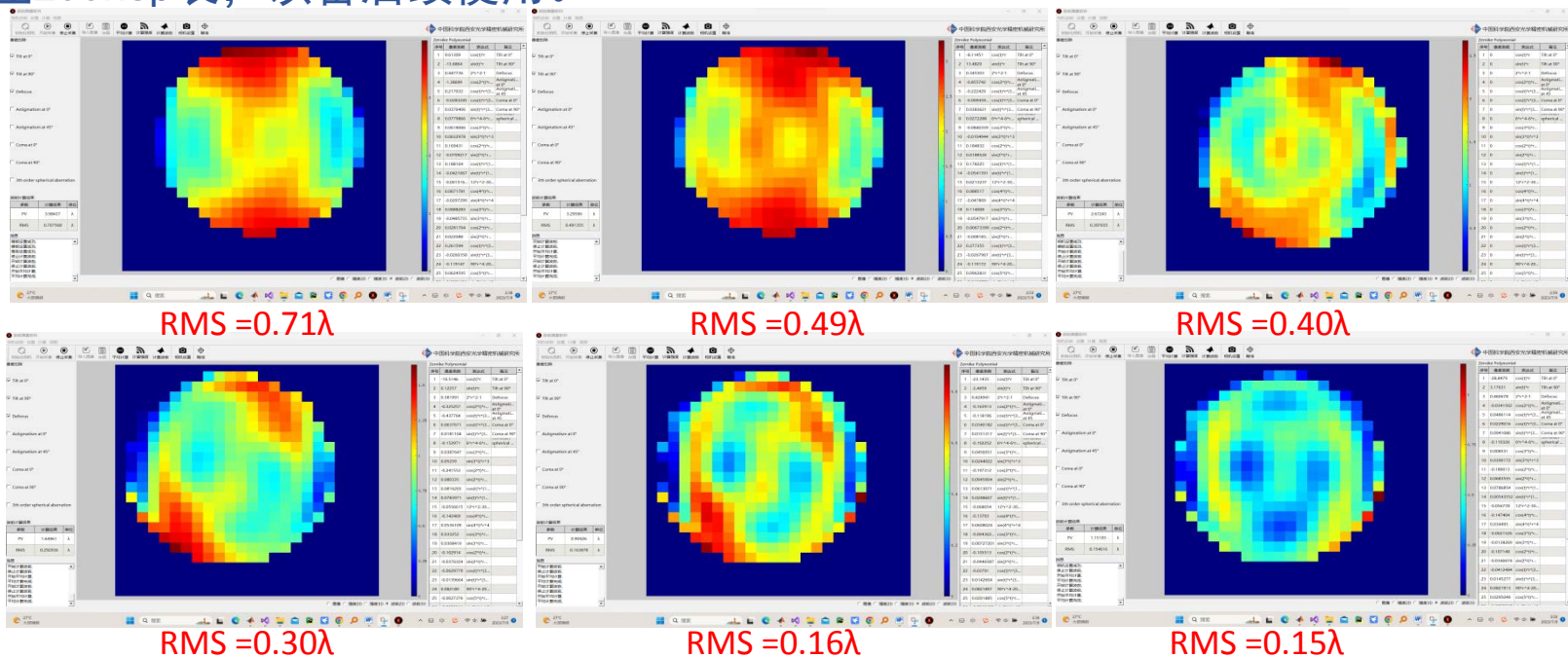
-- 61 ° : 0.70 λ

Zernike	Elevation angle ( ° )		
	22	44	61
Z5	-0.306335333	-0.823093	-1.21302
Z6	-0.240436733	-0.690621	0.4813008
Z7	0.0654215	-0.094883567	0.1121233
Z8	0.1031099	0.198065	0.092021512
Z9	0.076664	0.040631767	0.0509814
Z10	0.0435829	-0.0113648	-0.024330206
RMS	0.3422	0.6053	0.70198



# 夏克-哈特曼波前传感技术

- 在俯仰角为60度时，使用波前数据计算出了次镜的灵敏度矩阵，并使用该矩阵对次镜进行了调整，通常需要5次调整可使得系统波前达到相对较优的效果。据此可建立LookUp表，以备后续使用。





# 总结

---

- 使用一种畸变校正方法，应用在了AIMS太阳望远镜主镜面形的CGH检测过程中，最终的检测数据被用于主镜的进一步抛光过程中。
- 研究了光学系统的子孔径拼接检测技术并建设完成了子孔径拼接检测装置，将其应用在了AIMS的波前检测中，结合于计算机辅助装调技术，完成了AIMS系统各个焦点位置处的像差校准。
- 设计并研制完成了针对AIMS太阳望远镜的波前传感器，并在望远镜台址进行了波前测试，通过这种技术方法，可建立望远镜在不同姿态下的最优像质的次镜位置列表，该列表可供后续观测太阳使用。
- AIMS 望远镜预计在2023年年底完成验收交付。



谢谢大家!