



中国科学院国家天文台  
NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES, CAS



# 光学合成孔径望远镜 共相探测技术研究

报告人：刘骁

2022年11月03日



# 报告内容

---



01

**教育背景**

02

**研究背景**

03

**色散条纹传感技术 (DFS)**

04

**相位差技术 (PD)**

05

**未来计划**



# 一. 教育背景

**2010-2014: 中国科学技术大学应用物理系——理学学士**

**2014-2019: 美国威廉玛丽学院应用科学系——理学博士**



US News top 30 院校

博士全额奖学金

US Department of Energy 赞助

导师: Gunter Luepke 教授

实验室: Ultrafast Spectroscopy Laboratory

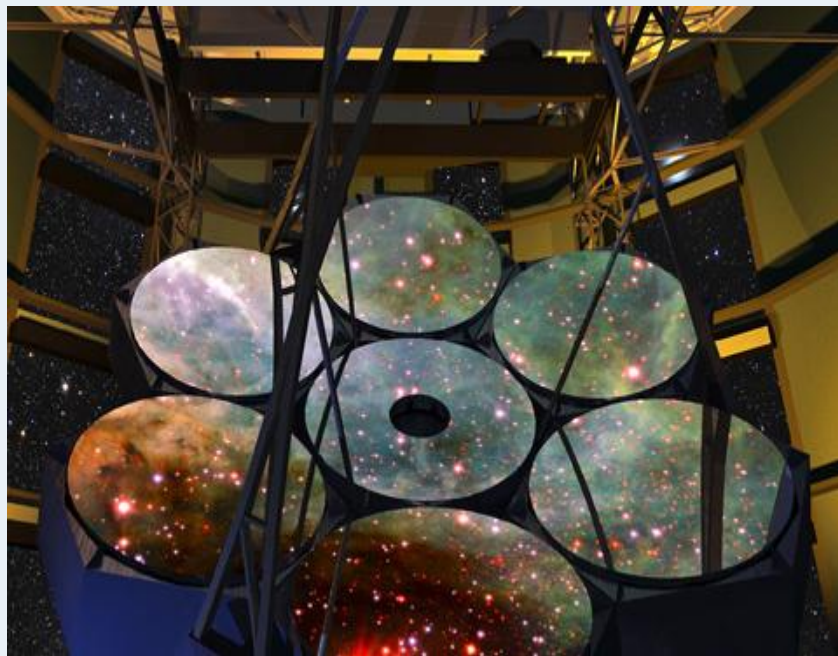
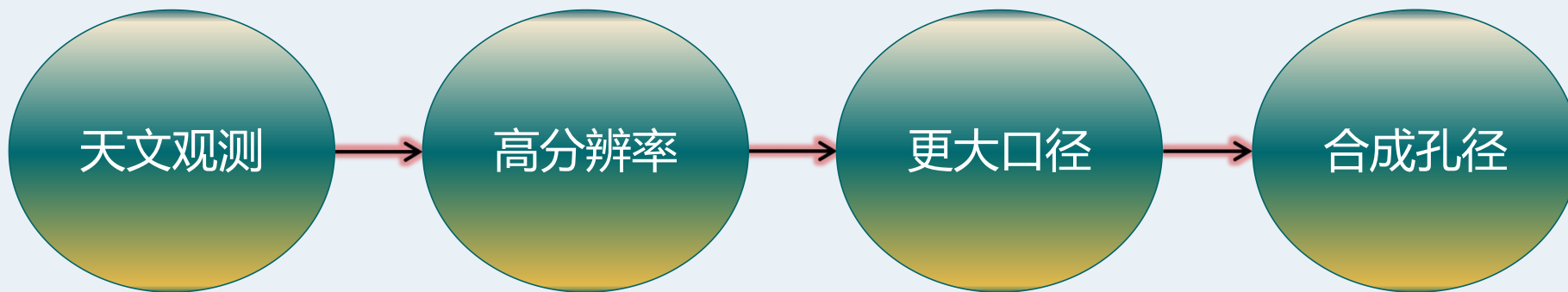
**2020至今: 中国科学院国家天文台——博士后**

合作导师: 姜爱民 研究员

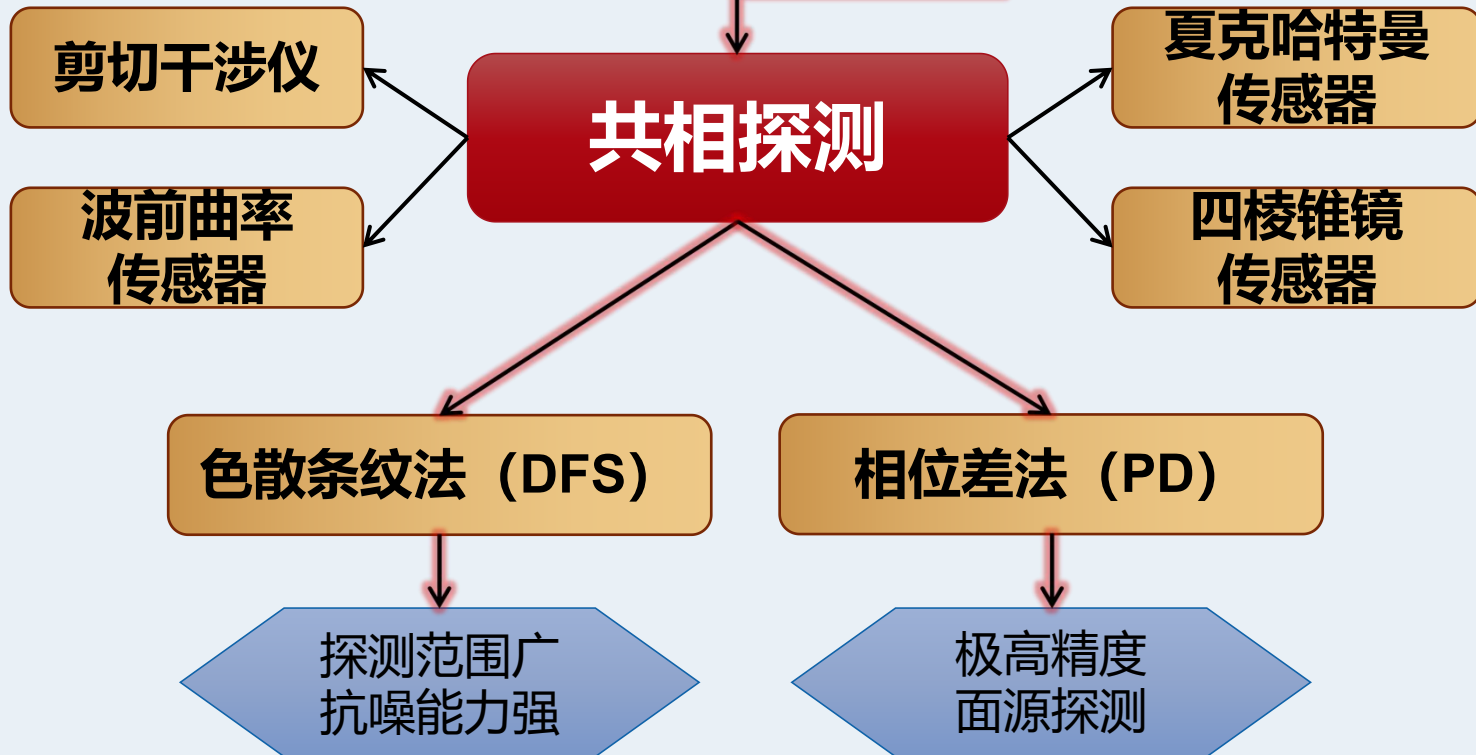
团组: 空间天文技术研究团组



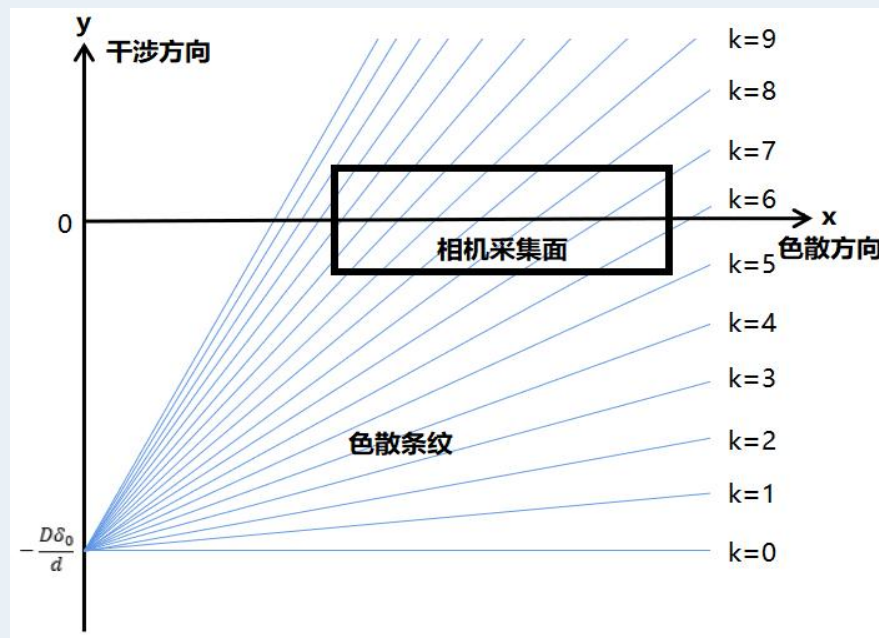
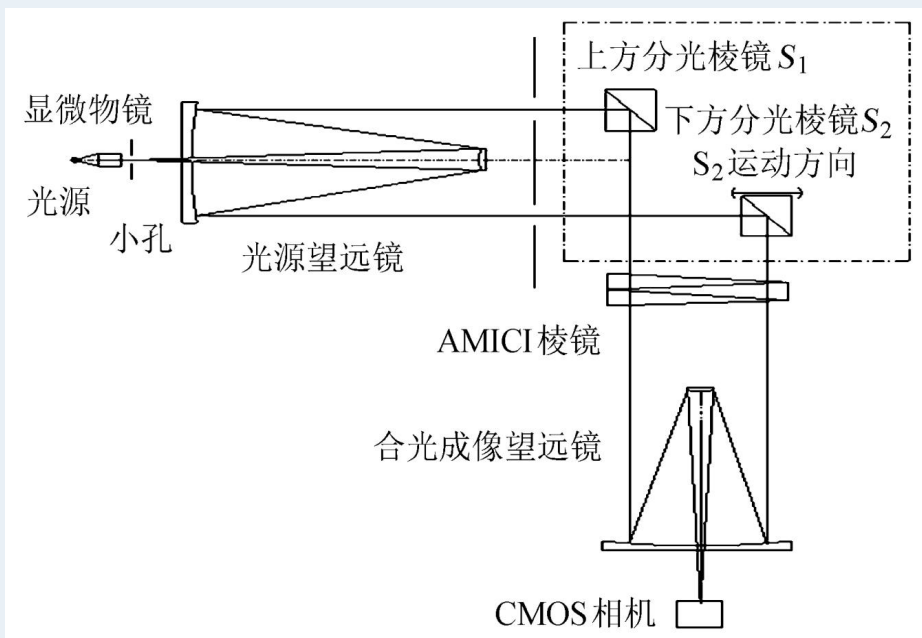
## 二. 研究背景



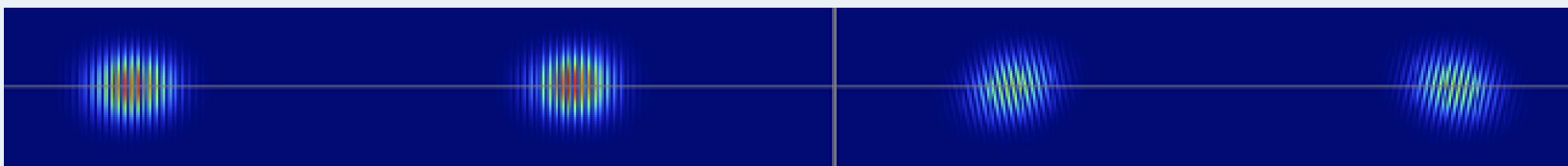
巨型麦哲伦望远镜 (GMT)



# 三. DFS技术—理论探索



光程差 < 相干长度



**像面光强分布:** 
$$I(x, y, \lambda) = \frac{2}{(\lambda F)^2} \left| M \left( \frac{x}{\lambda F}, \frac{y}{\lambda F} \right) \right|^2 \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \delta_0 + 2\pi y_0 y \right) \right]$$

**条纹频域次峰水平位移量与光程差关系式:** 
$$U_p = \frac{a}{\lambda_0^2} \delta_0$$



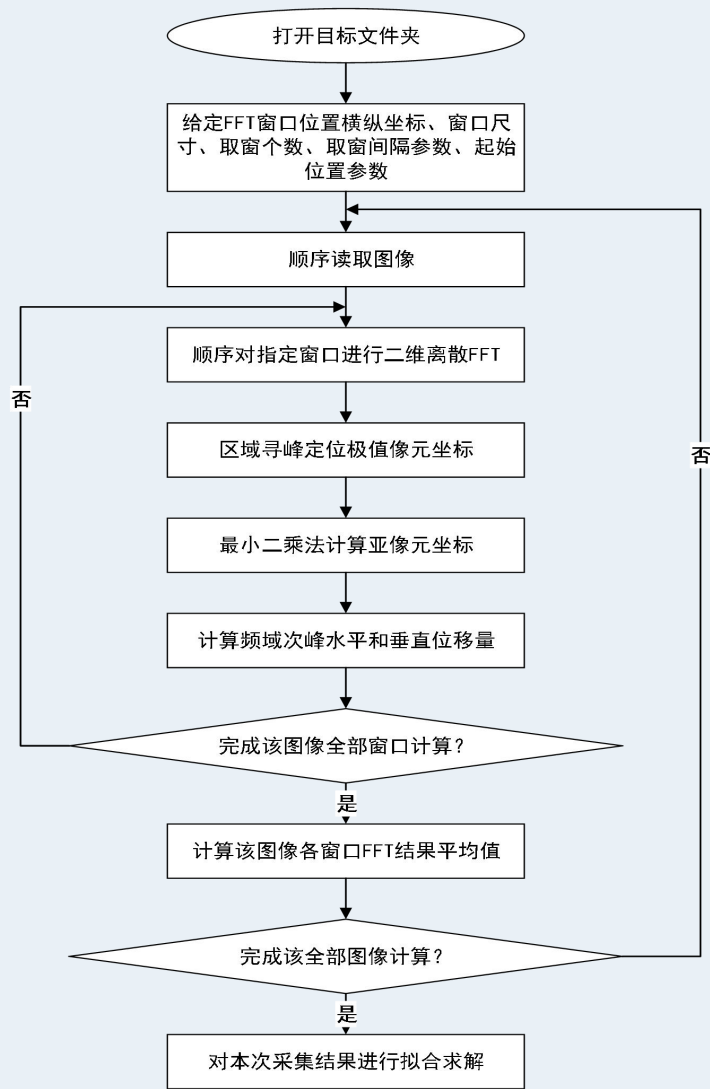
# 三. DFS技术—算法开发



基于python平台，独立开发DFS图像处理算法，累计优化

七个版本，最终算法软件具有如下特点：

- 多峰识别及寻峰算法
- FFT优化处理
- 波长修正



```
import os
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import time

time_start = time.time()

path = './20211001-0-1'
path_list = os.listdir(path)
path_list.sort(key=lambda x:int(x[1:-4]))
# print(path_list)

x = []
y_curve = []
y_surface = []
y_sc = []

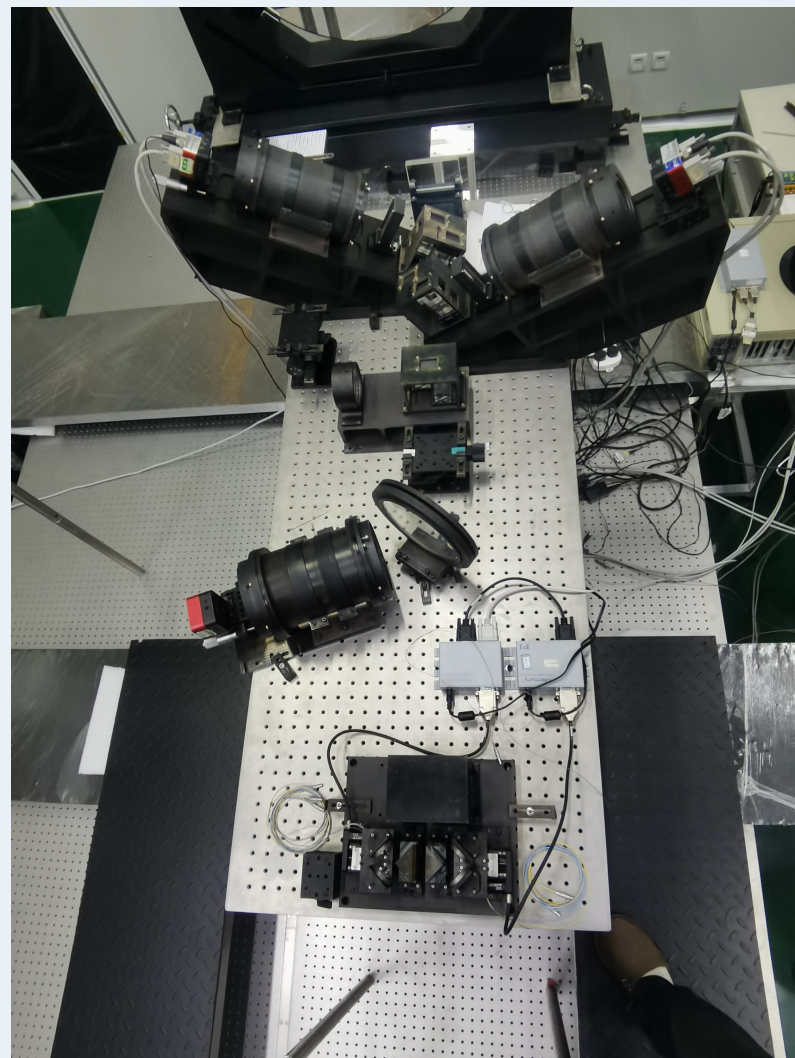
for filename in path_list:
    x.append(int(filename[:-4]))
    img = cv2.imread(os.path.join(path, filename))
    # plt.imshow(img)
    r, g, b = [img[:, :, i] for i in range(3)]
    img_gray = r * 0.299 + g * 0.587 + b * 0.114
    start = 0
    for i in range(300, 800):
        for j in range(100, 1000):
            if img_gray[i][j] > start:
                start = img_gray[i][j]
                N1 = i - 16
                N1 = j - 80
```



# 三. 实验系统



光学合成孔径干涉成像望远镜



探测成像平台



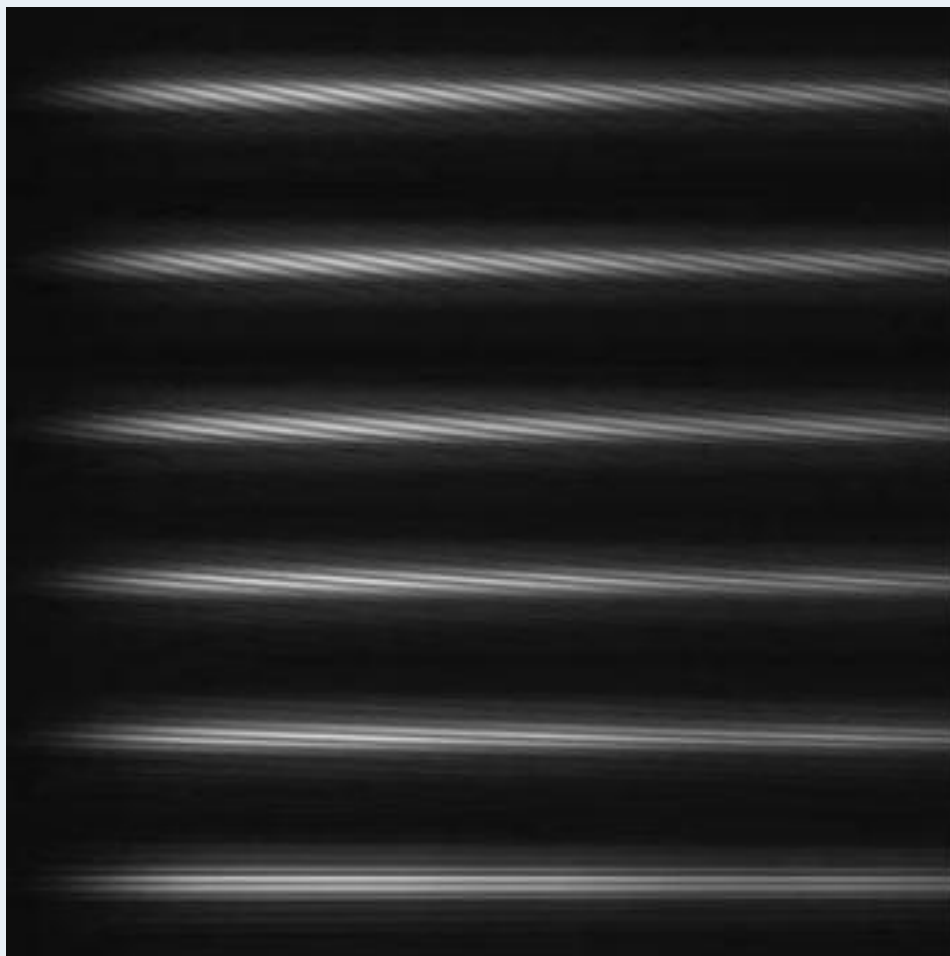
# 三. 双光束DFS—实验验证



倾斜

水平

光程探测相机采集干涉条纹



光程差

-100  $\mu\text{m}$

-80  $\mu\text{m}$

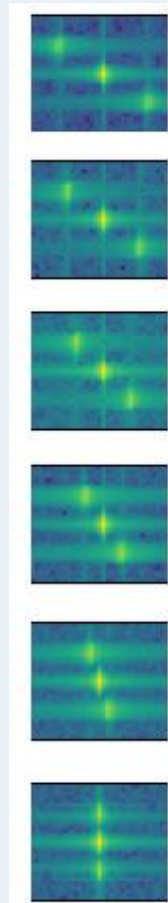
-60  $\mu\text{m}$

-40  $\mu\text{m}$

-20  $\mu\text{m}$

0  $\mu\text{m}$

频域



四镜光程调节机构

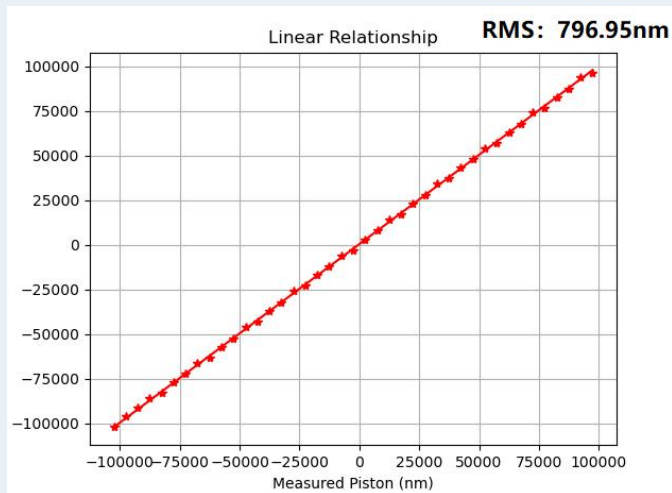




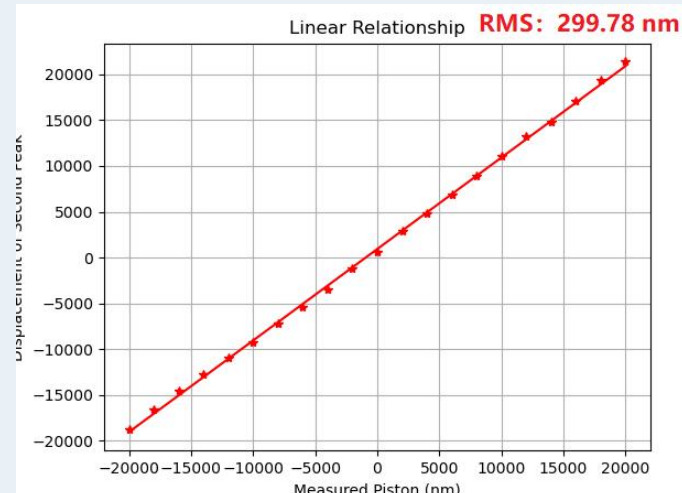
# 三. 双光束DFS—实验结果



**大量程实验**  
(检验DFS探测范围)  
(百微米范围)

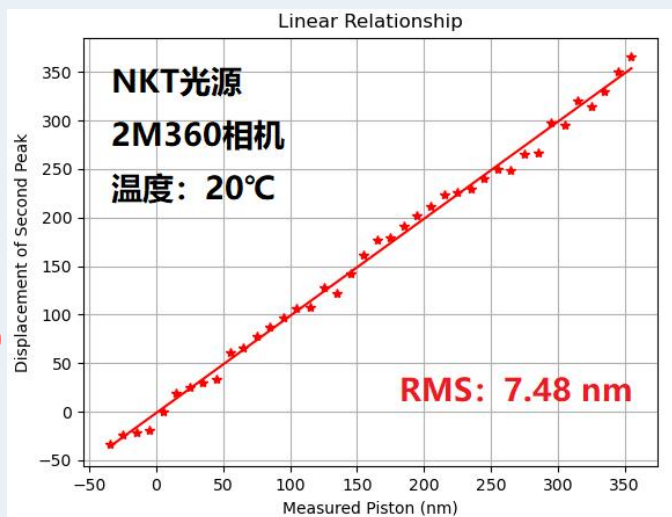


量程200um, 步距5um

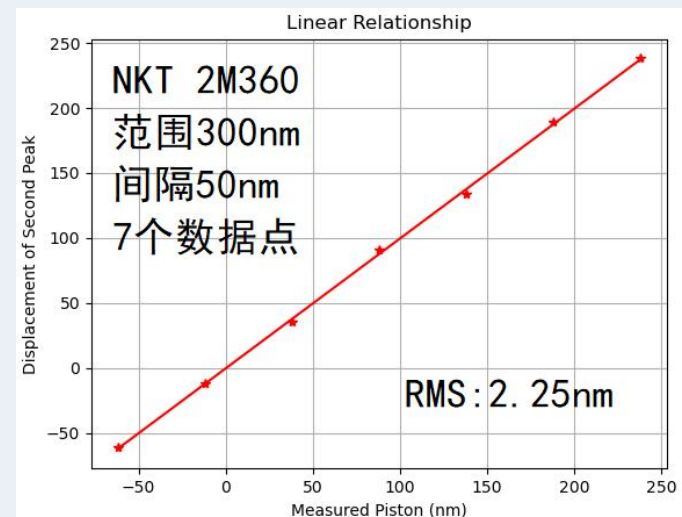


量程40um, 步距2um

**高精度实验**  
(检验DFS探测能力)  
(优于10 nm)



量程400nm, 步距10nm



量程300um, 步距50nm

- 2016年, GMT的瞳面检测粗共相系统样机采用了DFS方法, 在15星等情况下探测精度达到 **50nm** [SPIE, 2016:990946]。

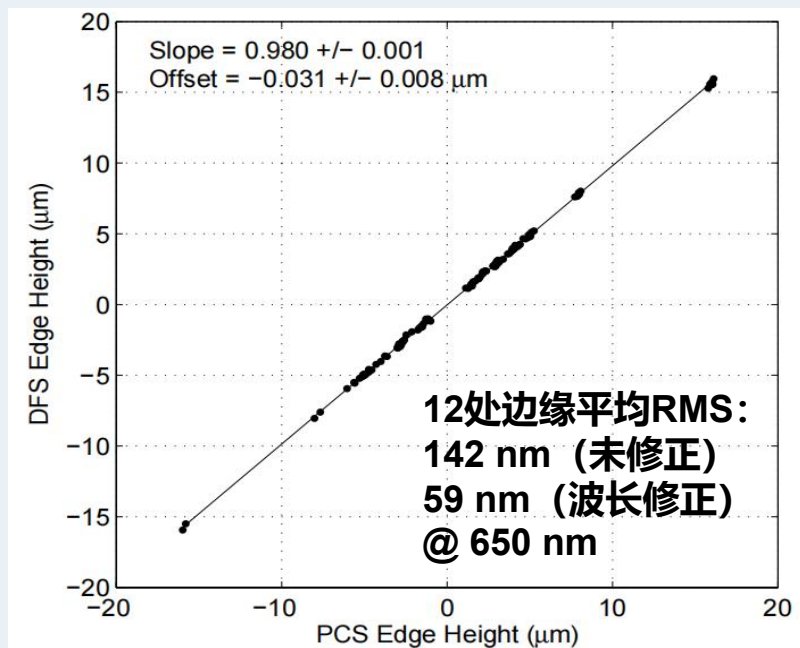
- Caltech的JPL实验室在Keck望远镜上的DFS测试中获得了**31nm**的探测精度 [SPIE, 10.1117/12.552407]。



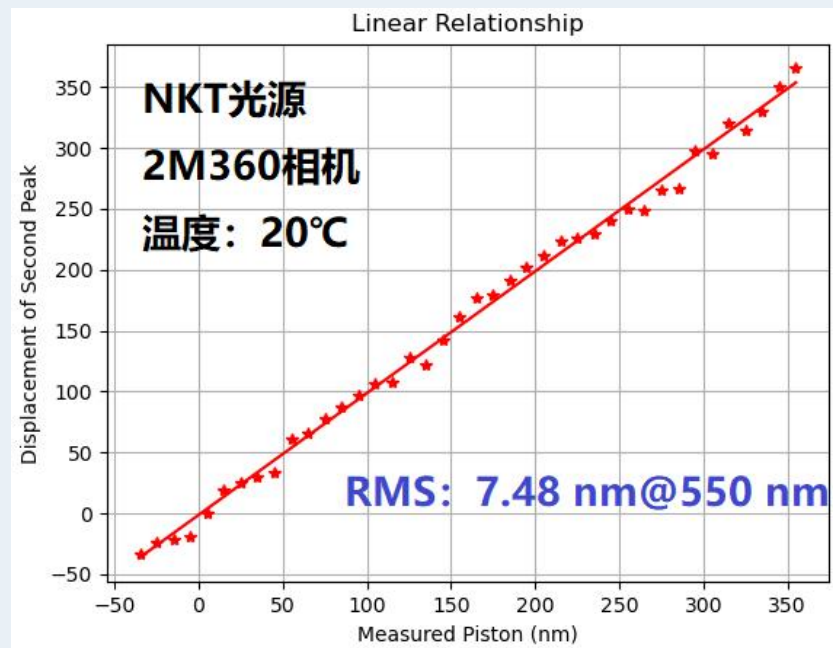
# 三. 双光束DFS—结果比较



Calteck DFS结果:  $1/5 \lambda$  (未修正) or  $1/10 \lambda$  (修正)



国台空间天文技术团组DFS结果:  $1/75 \lambda$



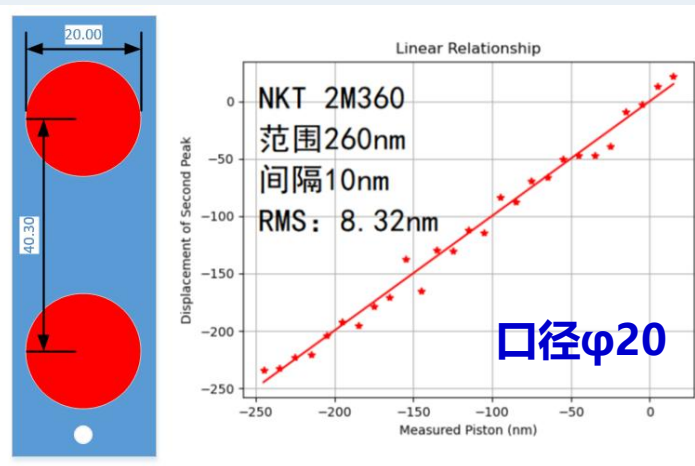
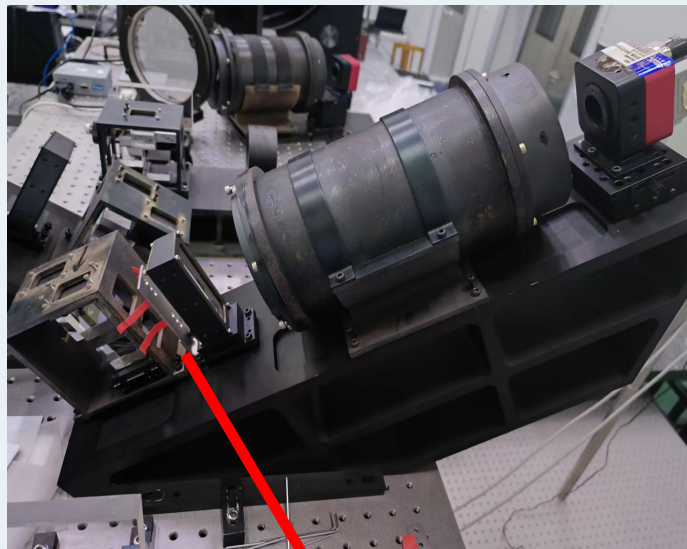
采用传统的活塞误差提取方法，对噪声较为敏感，且依赖于波长标定准确度，精度和可靠性都存在一定问题。如果考虑多光束干涉，则情况更为复杂，该方法不适用。

采用频域次峰位移法提取活塞误差，该方法基于整个像面数据频域分析，具有较强的抗噪声能力，且无需标定波长，具有较高精度和可靠性。经过算法改进，拟合精度能够达到 $1/75 \lambda$ 。

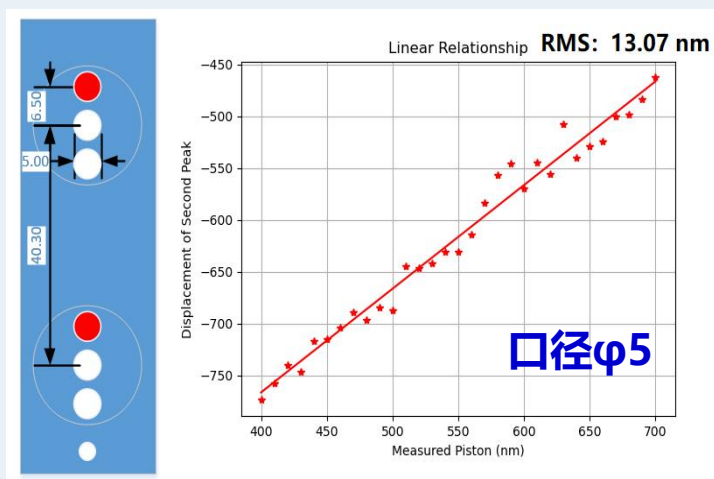
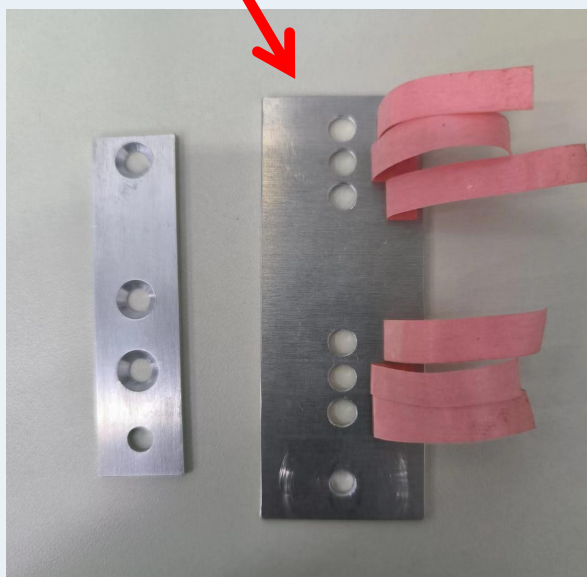
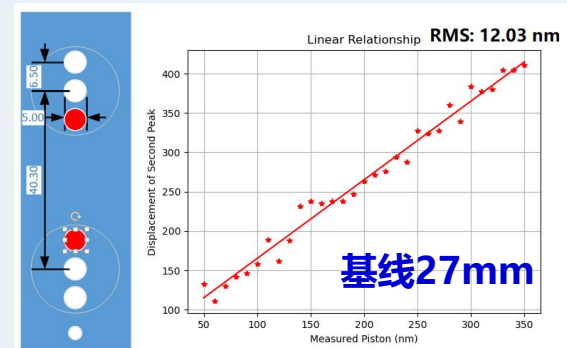
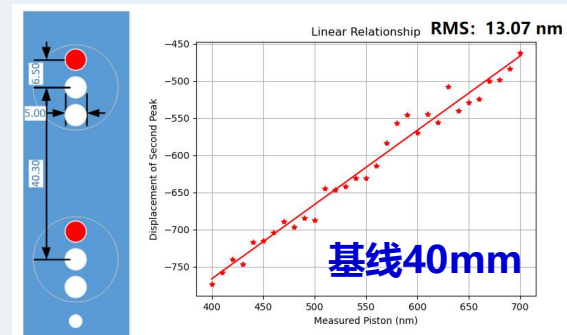
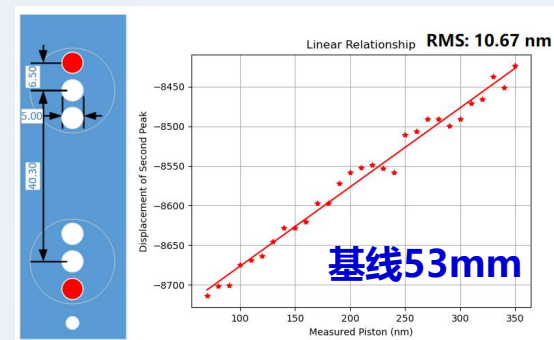


# 三. 双光束DFS—实验结果

## 变口径同基线实验



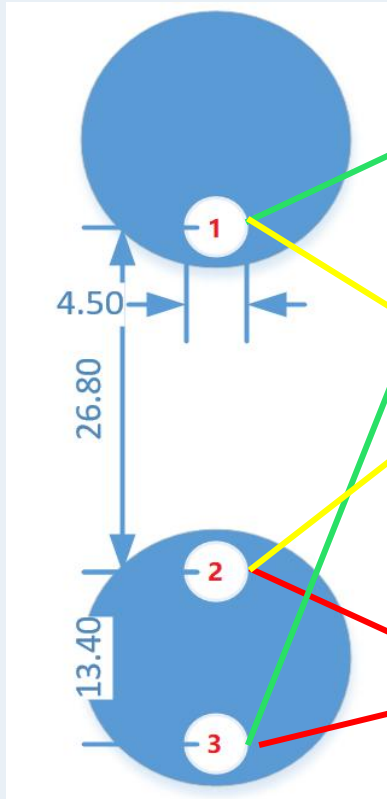
## 变基线同口径实验



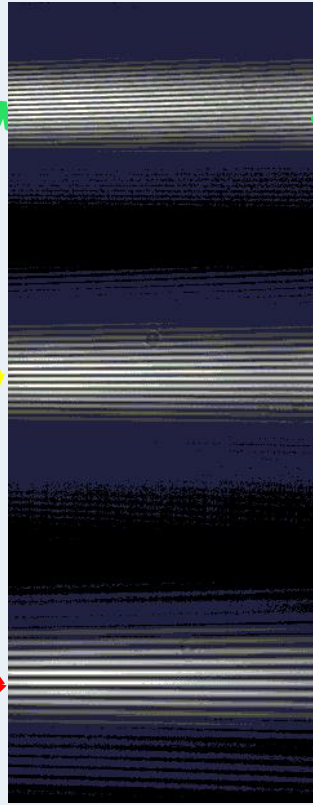
# 三. 三光束DFS—实验验证



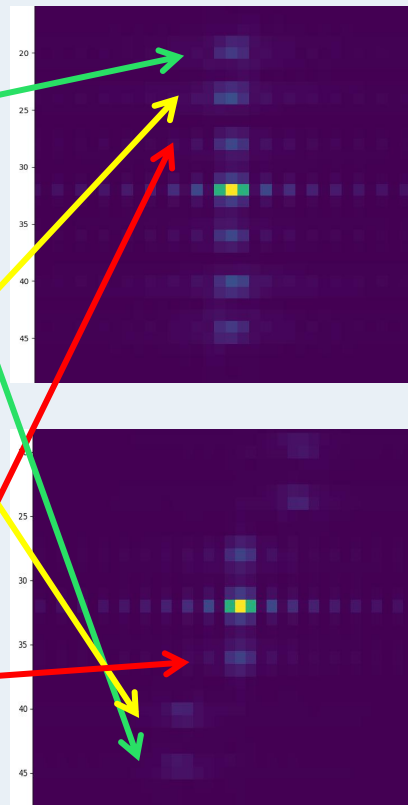
光阑



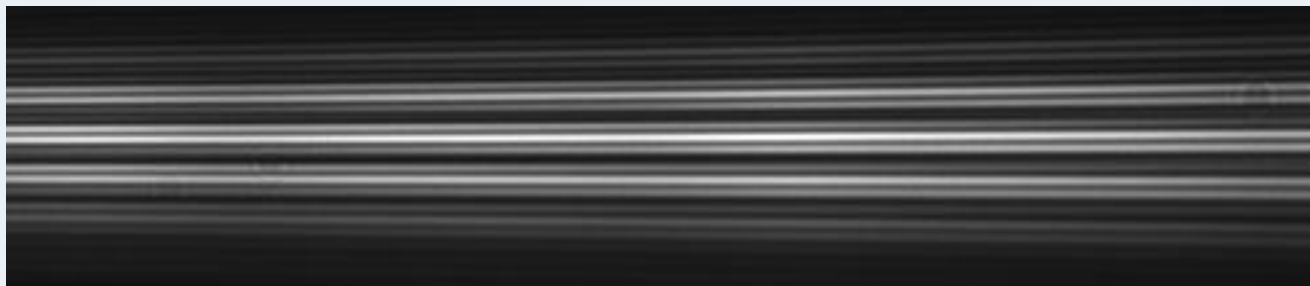
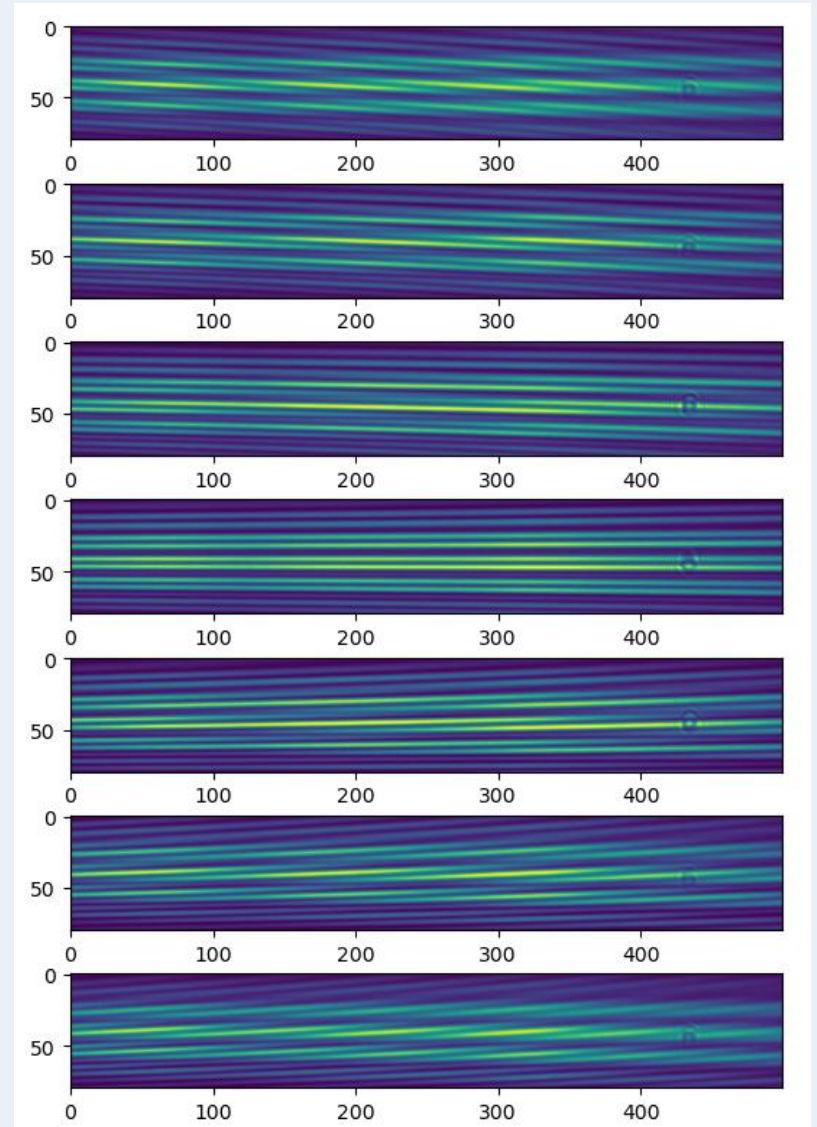
两两干涉条纹



频域图像



范围-18um~18um, 步长6um



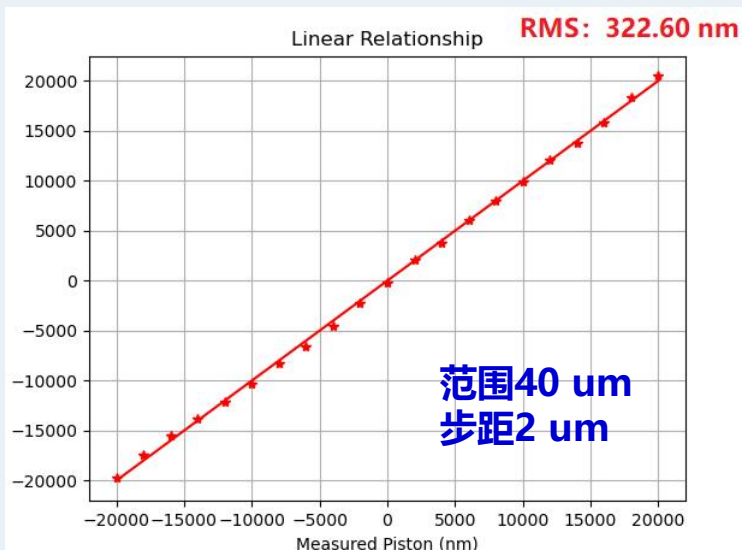
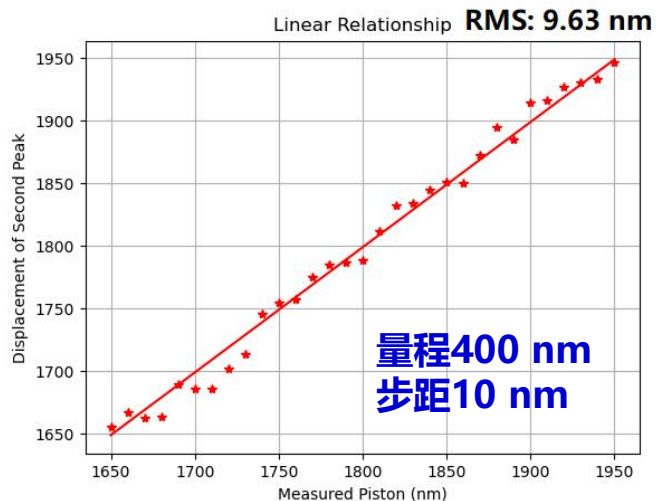
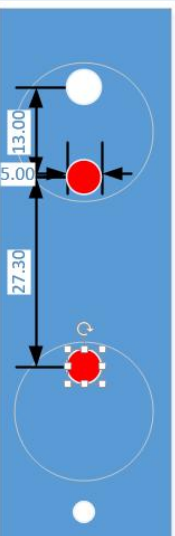
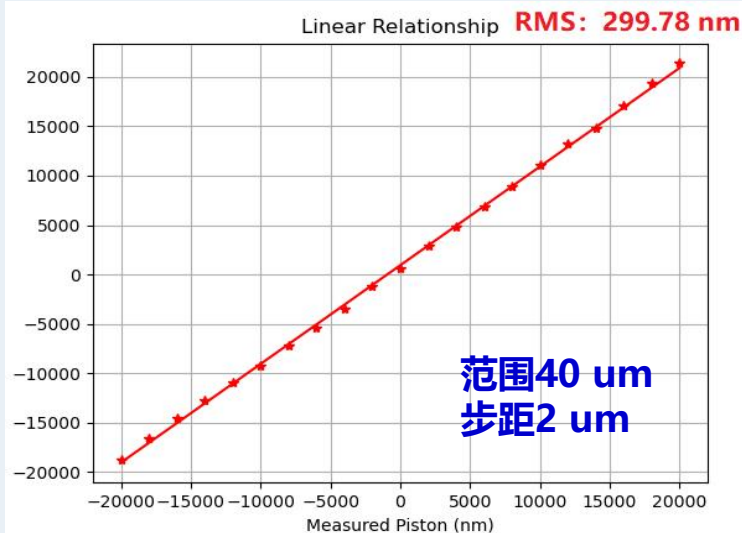
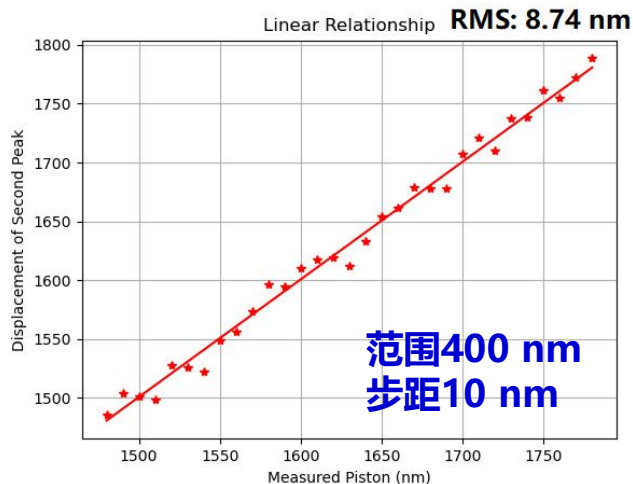
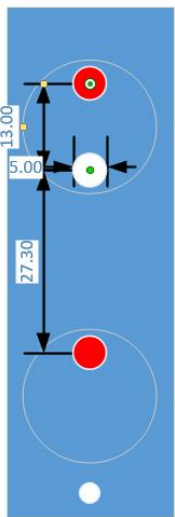
# 三. 三光束DFS—实验结果



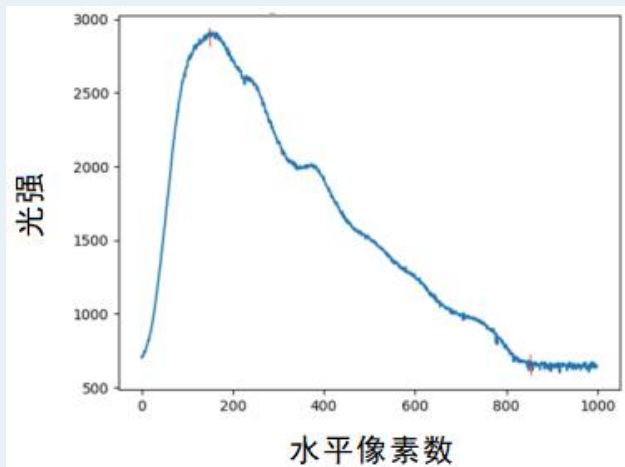
## 高精度实验 (<10nm)

## 大量程实验

结果表明：  
三光束DFS能够达到双光束DFS类似探测精度，为团组进行科技部等项目的系统设计提供了重要的实验数据支撑！

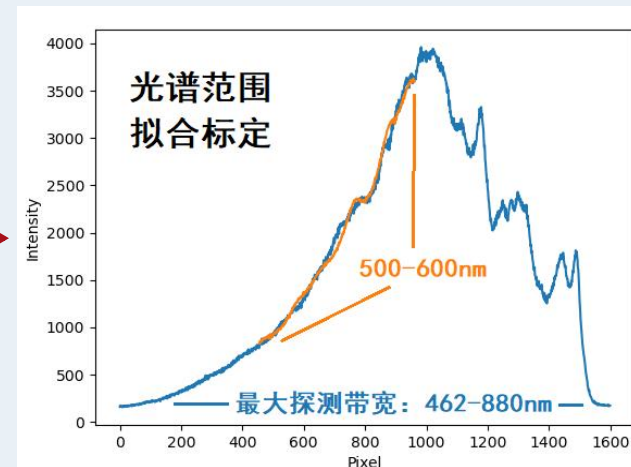


# 三. DFS技术—光谱范围标定



结合AMICI棱镜色散分布，  
估算全谱段范围

光谱标定有助于确定探测器实际光谱  
响应范围，为系统光学设计提供依据。

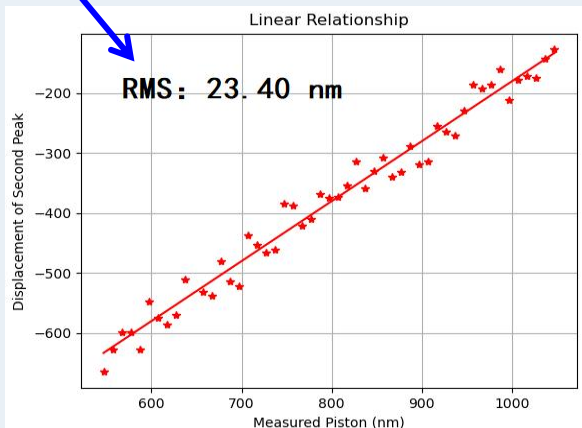


## 500-600nm谱段光强分布

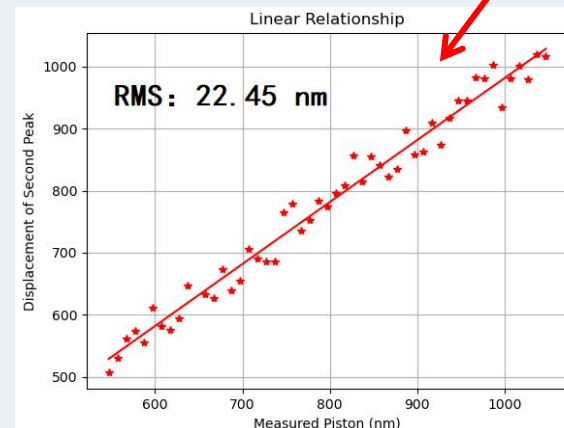
## 全谱段光强分布

蓝端

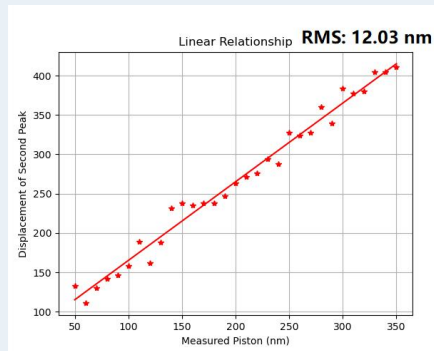
红端



红蓝端数据采集反演结  
果相似，DFS探测精度不  
明显依赖于探测波长。

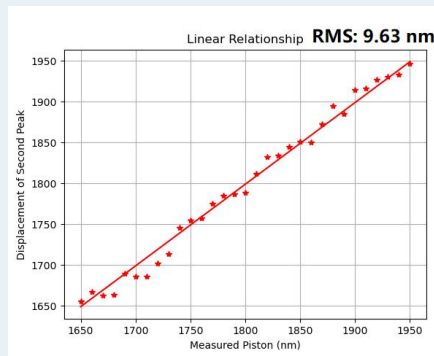
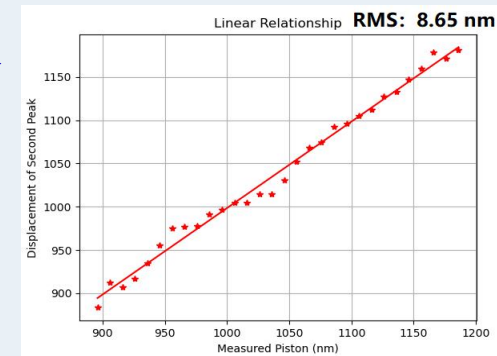


# 三. 光源空间布局国产化测试



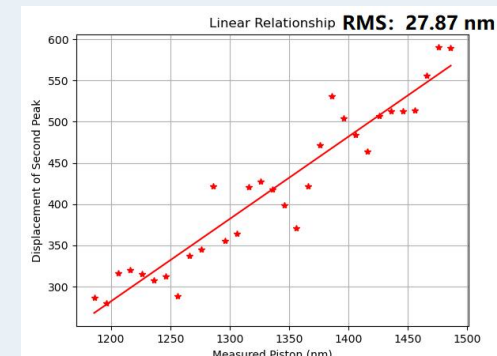
← **双光束DFS对比** →

双光束DFS结果可比, 说明上光所光源满足DFS探测需求;

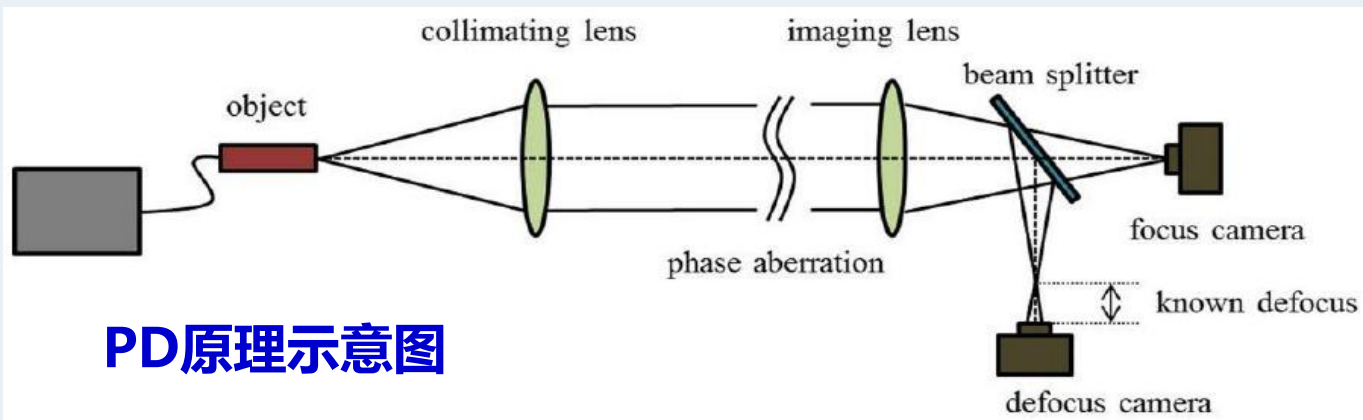


← **三光束DFS对比** →

三光束DFS上光所结果略差, 原因判断为切换光源引入角度变化, 导致各孔径光强分布改变。



# 四. PD技术—原理及算法

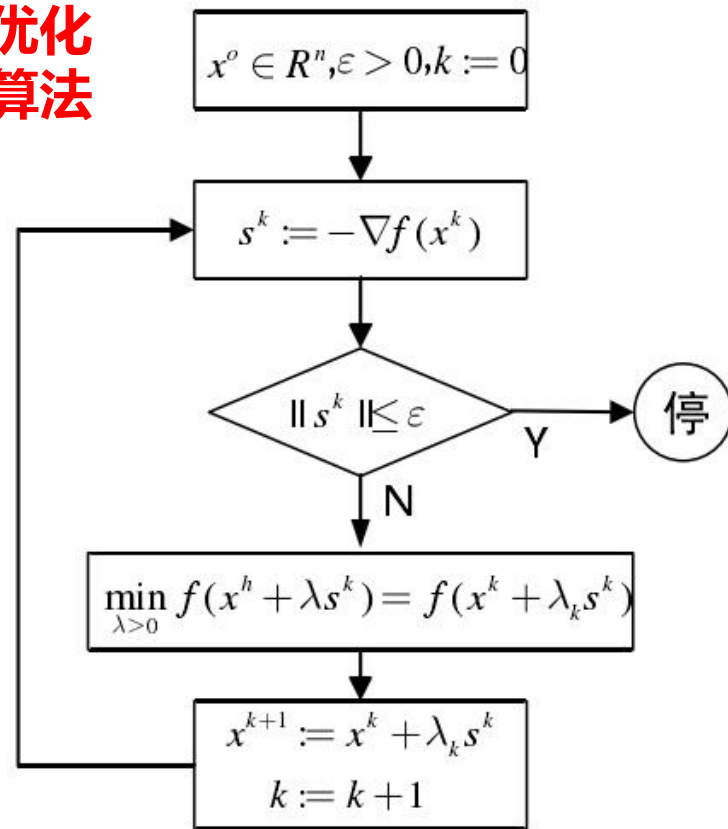


PD原理示意图

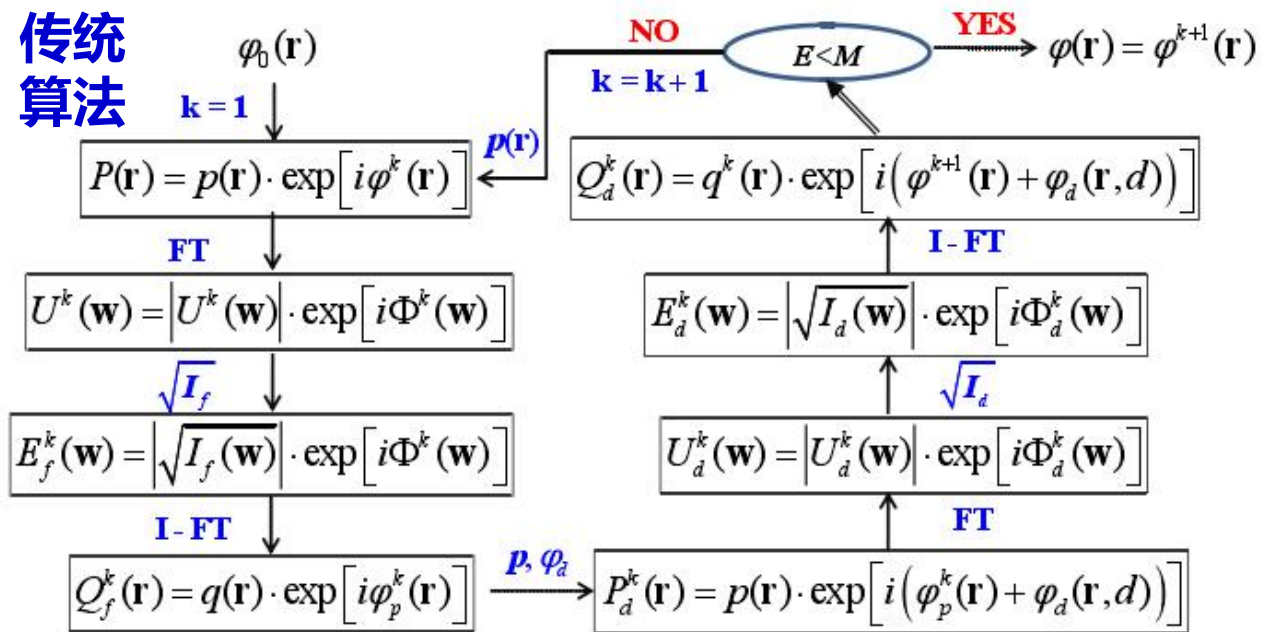
## 评价函数

$$E(a) = \sum_{u \in X} \frac{|I(u)OTF_d(u) - I_d(u)OTF(u)|^2}{|OTF(u)|^2 + |OTF_d(u)|^2}$$

## 优化算法



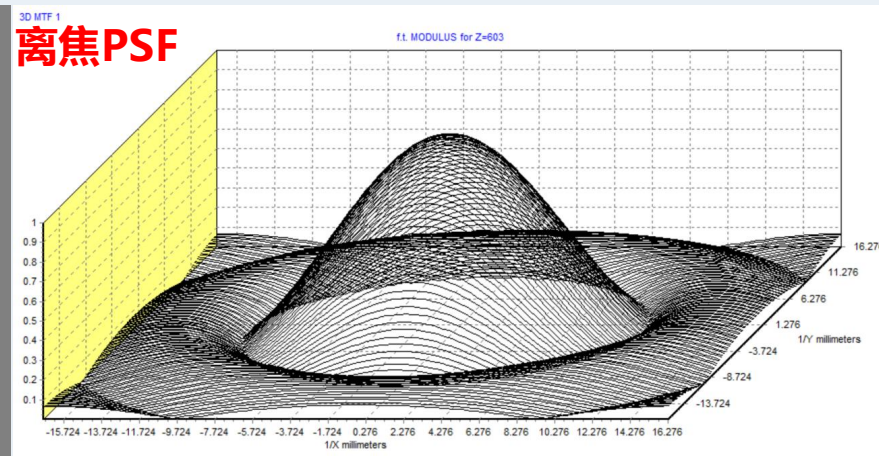
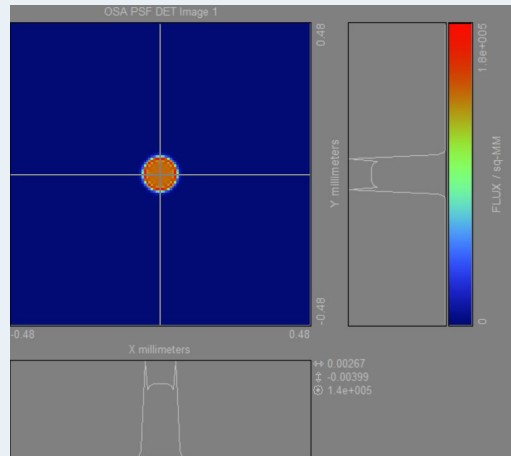
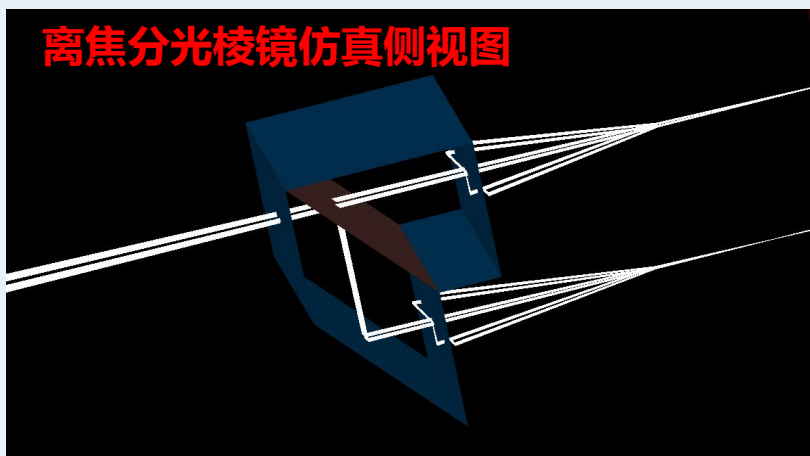
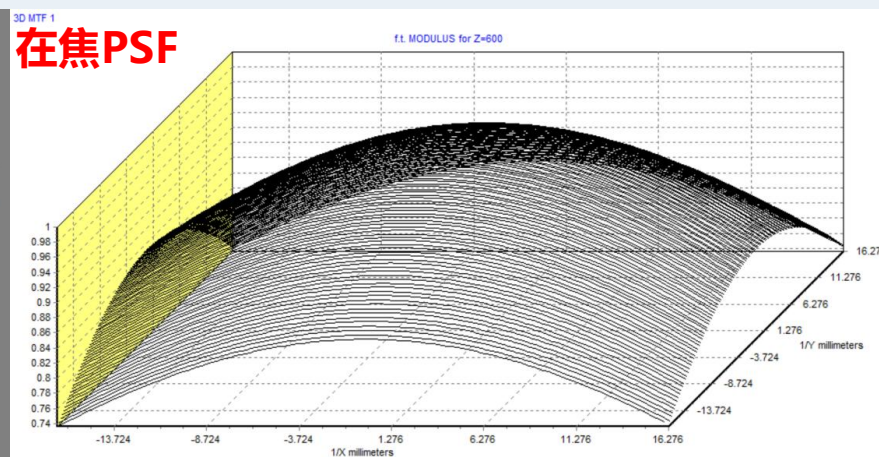
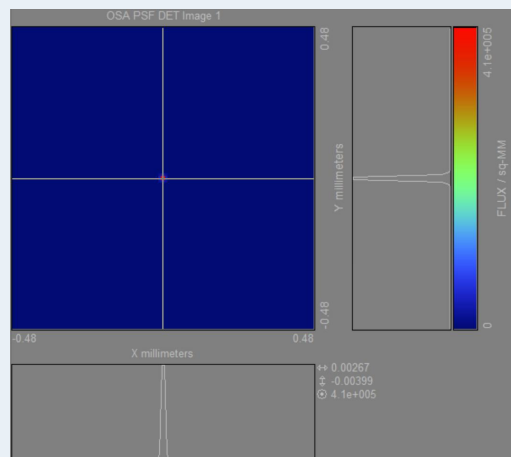
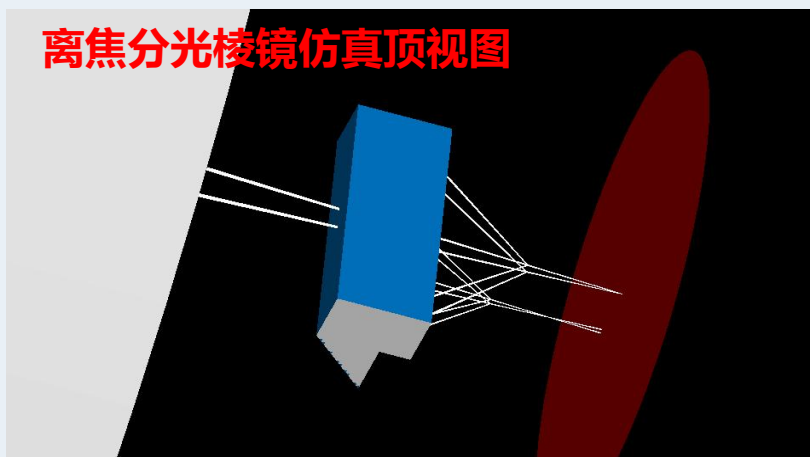
## 传统算法





# 四. PD技术—仿真建模

根据863演示样机系统焦距和光瞳直径等参数，估算该系统最优离焦距离为**2.986mm**，利用ASAP光学仿真软件设计离焦分光棱镜进行在焦图像和离焦图像的同步获取。



# 四. PD技术—仿真计算结果



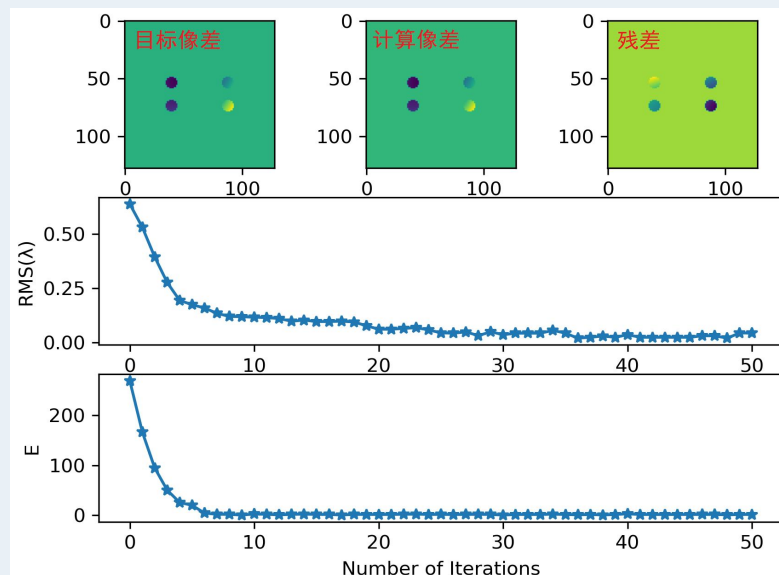
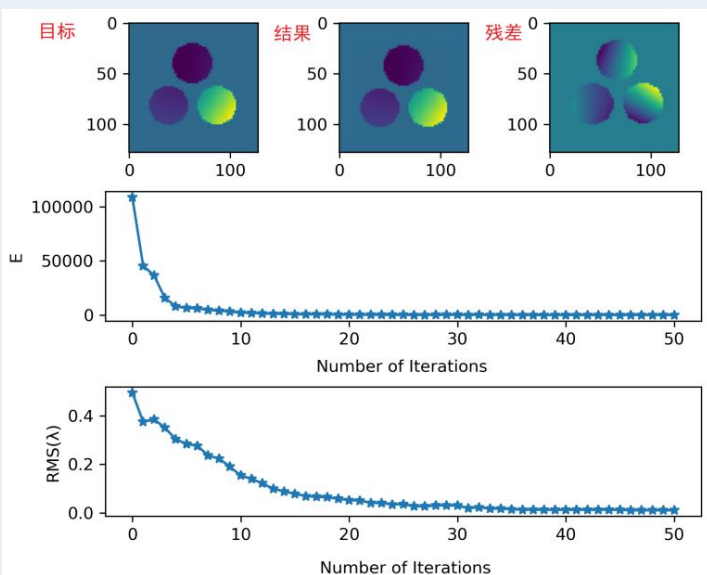
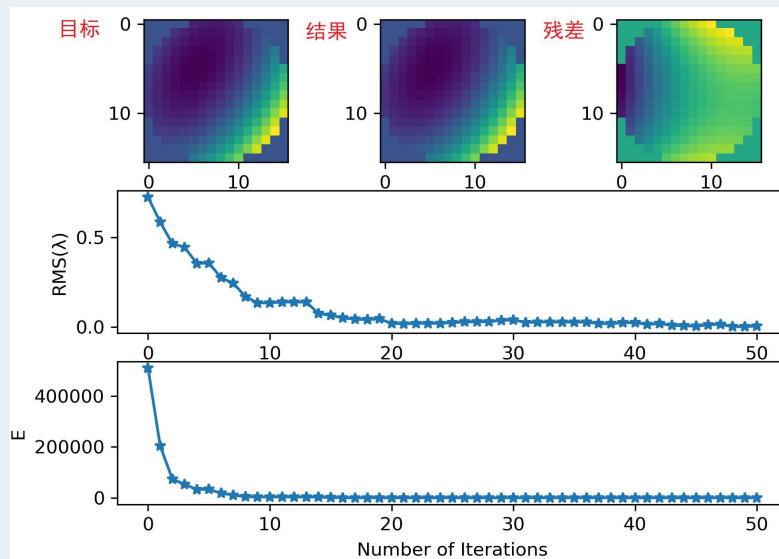
基于Python平台编程，利用随机生成的Zernike多项式系数对目标像差前六阶位相系数进行拟合。

右上：**单口径**像差PD仿真计算；

左下：**三口径系统**仿真计算，外包络 $\varphi 900$ ，单口径 $\varphi 350$ ；

右下：**四口径系统**仿真计算，基线800mm，单口径 $\varphi 80$ 。

在经过10-30次迭代后，各组仿真RMS均能够收敛到 $1/40\lambda$ 以内，后续将加入噪声、离焦误差和图像配准误差进行仿真计算，并开展实验验证。



# 五. 未来计划

---



1. 开展基于内置宽带点光源的光程差探测实验（青年基金支持）。
2. 基于现有863光学合成孔径原理样机，开展PD光程差探测技术实验验证。
3. 完成四孔径变阵望远镜和三孔径面源探测望远镜两套光学合成孔径系统上的光程探测控制模块搭建，开展实时闭环实验测试，验证DFS和PD技术的性能。





**谢谢各位专家，**

**欢迎批评指正！**

