



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

光电探测技术实验室
lodetech.ustc.edu.cn

Electronic design and performance test of the prime focus camera of Wide Field Survey Telescope

代表WFST相机团队：王坚、张鸿飞、王之越、张军、王辉、冯琪、曾峰

中国科学技术大学物理学院光电探测技术实验室

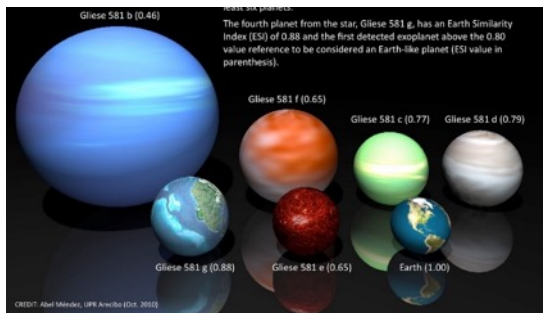
核探测与核电子学国家重点实验室/深空探测实验室（天都实验室）



目录

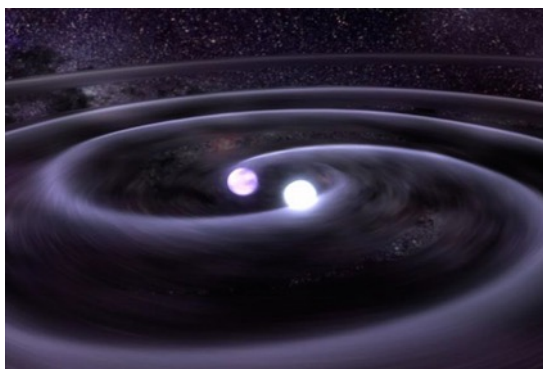
- 背景介绍
- 设计路线及方案
- 性能测试表征
- 总结与展望

现代天文技术和信息技术快速发展，开启了以动态天文事件为研究对象的时域天文这一全新领域。



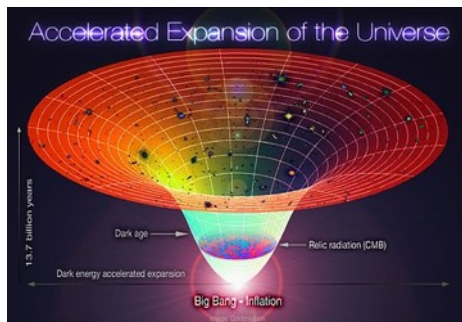
太阳系外行星发现（1995）

2019年诺贝尔物理学奖



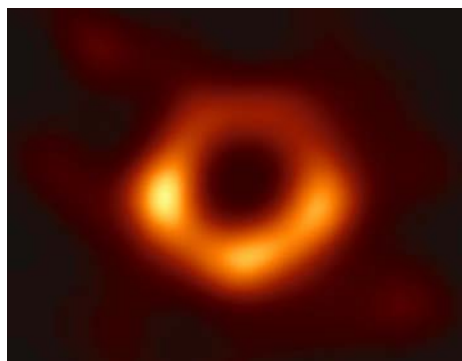
引力波直接探测（2015）

2017年诺贝尔物理学奖



宇宙加速膨胀（1998）

2011年诺贝尔物理学奖



利用“事件视界望远镜”拍到的首张黑洞照片（2019）

► 时域天文：研究天体光度和天体位置随时间变化

► 光度变化天体：超新星、活动星系核、伽玛暴、快速射电暴、引力波、**黑洞潮汐瓦解事件**等

► 位置变化天体：外太阳系天体搜寻、普查；空间碎片监测；星际天体发现等

1990年以来天文学最重要的4大发现，都与时域天文研究相关。

时域天文研究需要开展大天区、深度、高频次巡天观测。

国际巡天望远镜现状

斯隆巡天望远镜 (SDSS) (美国 2000)

- 2.5米口径, 2.5度视场
- 主焦相机采用30片 $2k \times 2k$ CCD拼接, 共1.2亿像素

昴星团 (Subaru) 望远镜 (夏威夷 2013)

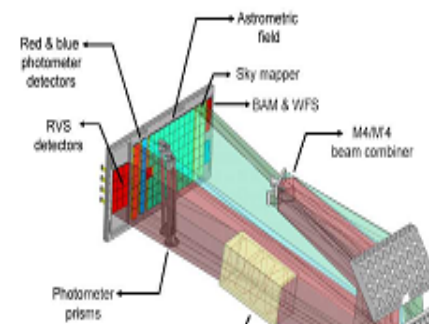
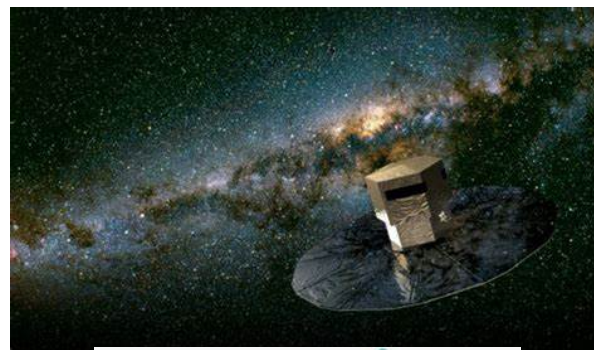
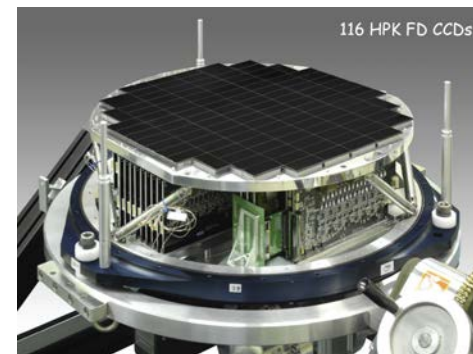
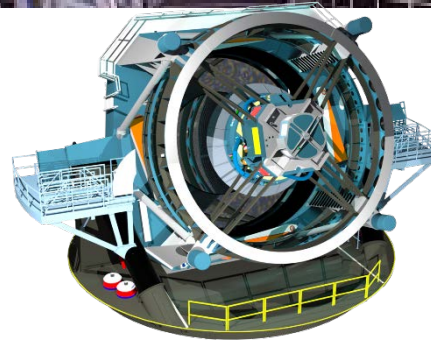
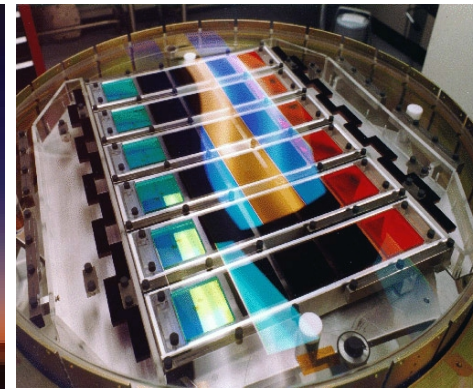
- 8.2米口径, 极限星等约为26, 1.5度视场
- 主焦相机HSC: 116片 $4k \times 2k$ 片 CCD拼接, 共9.7亿像素

盖亚 (Gaia) 望远镜 (空间 2013)

- 两座 1.45×0.5 米口径
- 主焦相机: 106片 $2k \times 4.5k$ CCD拼接, 共9.5亿像素

大型综合巡天望远镜 (LSST) (智利 2023)

- 8.4米口径, 3.5度视场
- 主焦相机: 189片 $4k \times 4k$ CCD拼接, 共30.2亿像素



4 最大口径达8米级, 视场 2° 以上。

中国的巡天望远镜现状

已建成巡天望远镜

- 口径多为两米级以下

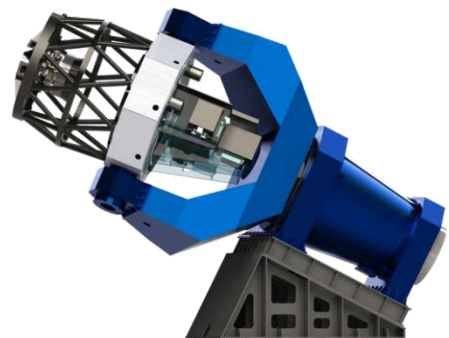
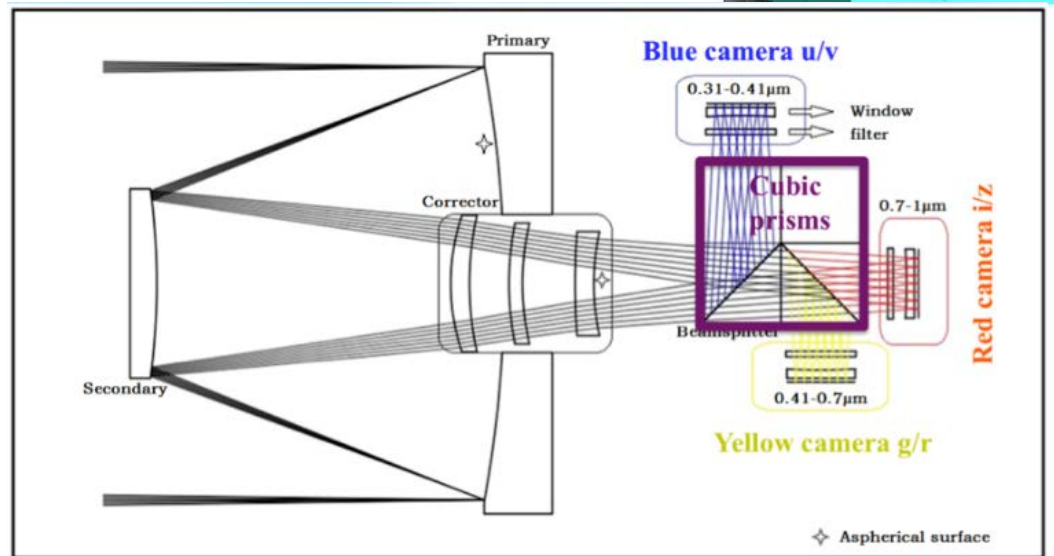
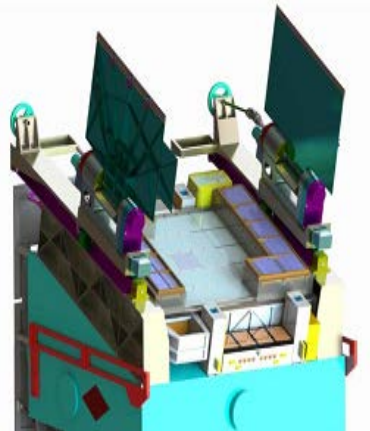
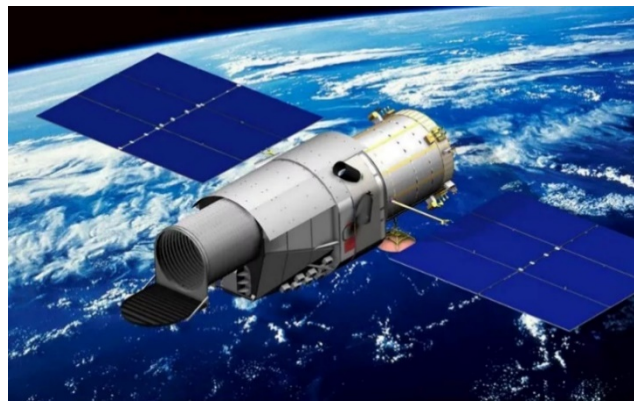
建设中的望远镜

中国巡天空间望远镜CSST（空间 2024）

- 2米口径，1度视场
- 主焦相机：30片CCD或CMOS拼接

多通道测光巡天望远镜 Mephisto（云南丽江 2022）

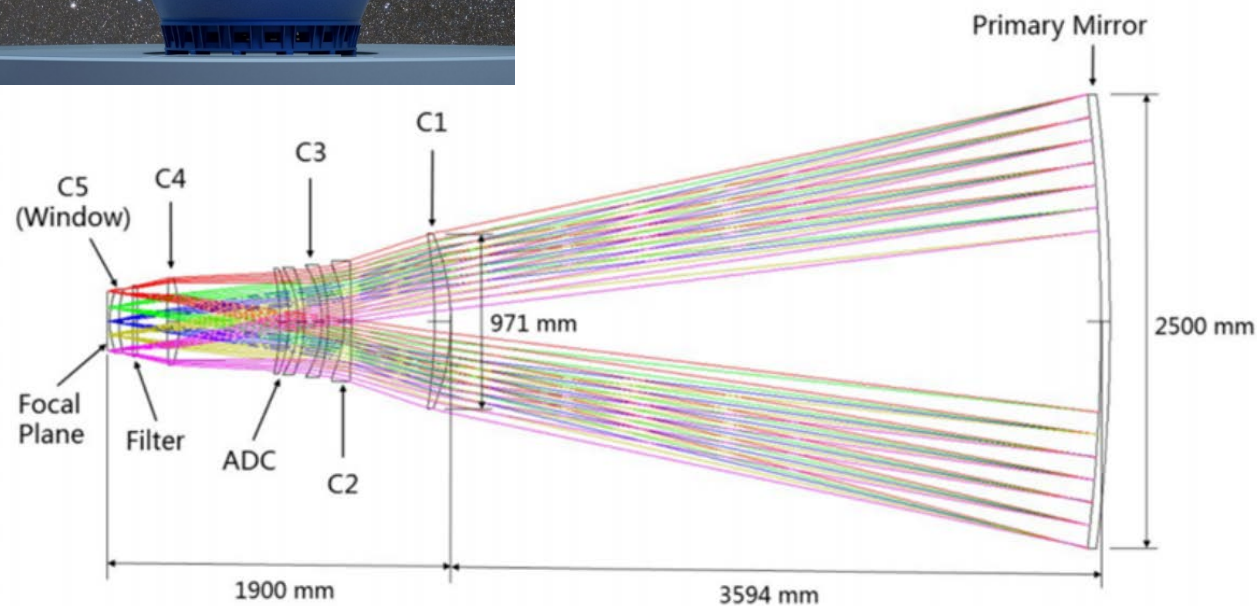
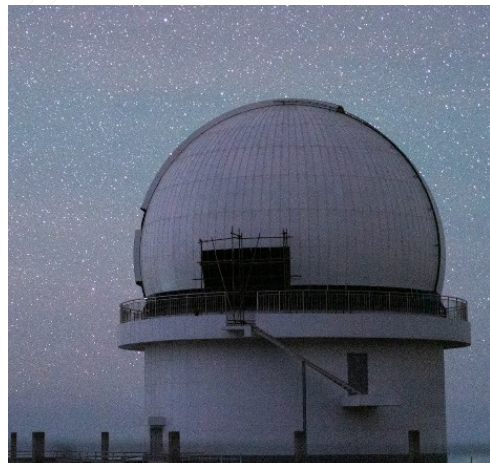
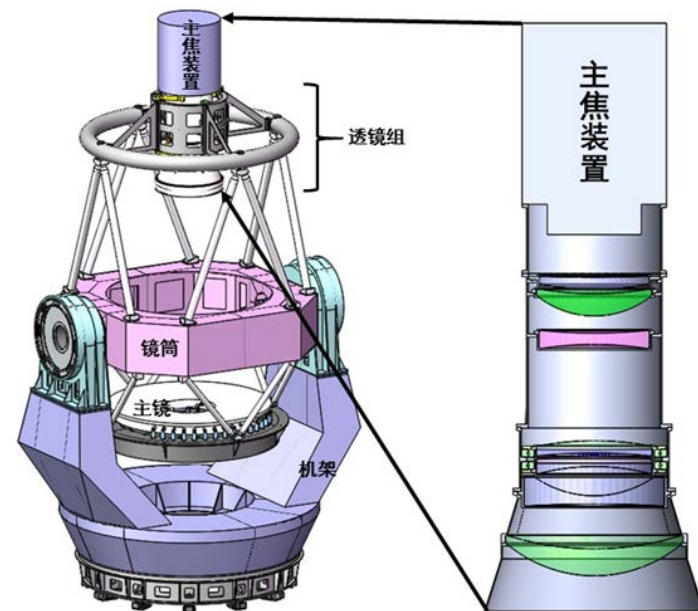
- 1.6米口径，3.14度视场
- 主焦相机：目前使用单CCD商用相机，后续计划使用4片CCD拼接的相机



墨子巡天望远镜

墨子巡天望远镜 Wide Field Survey Telescope (WFST)

- 由中国科学技术大学、中国科学院紫金山天文台和深空探测实验室共同投资建设
- 台址位于青海省海西州冷湖镇赛什腾山C点
- 2.5米口径，3度视场，主焦式设计
- 科学成像采用 9片 9k*9k CCD拼接，总像素数达7.6亿



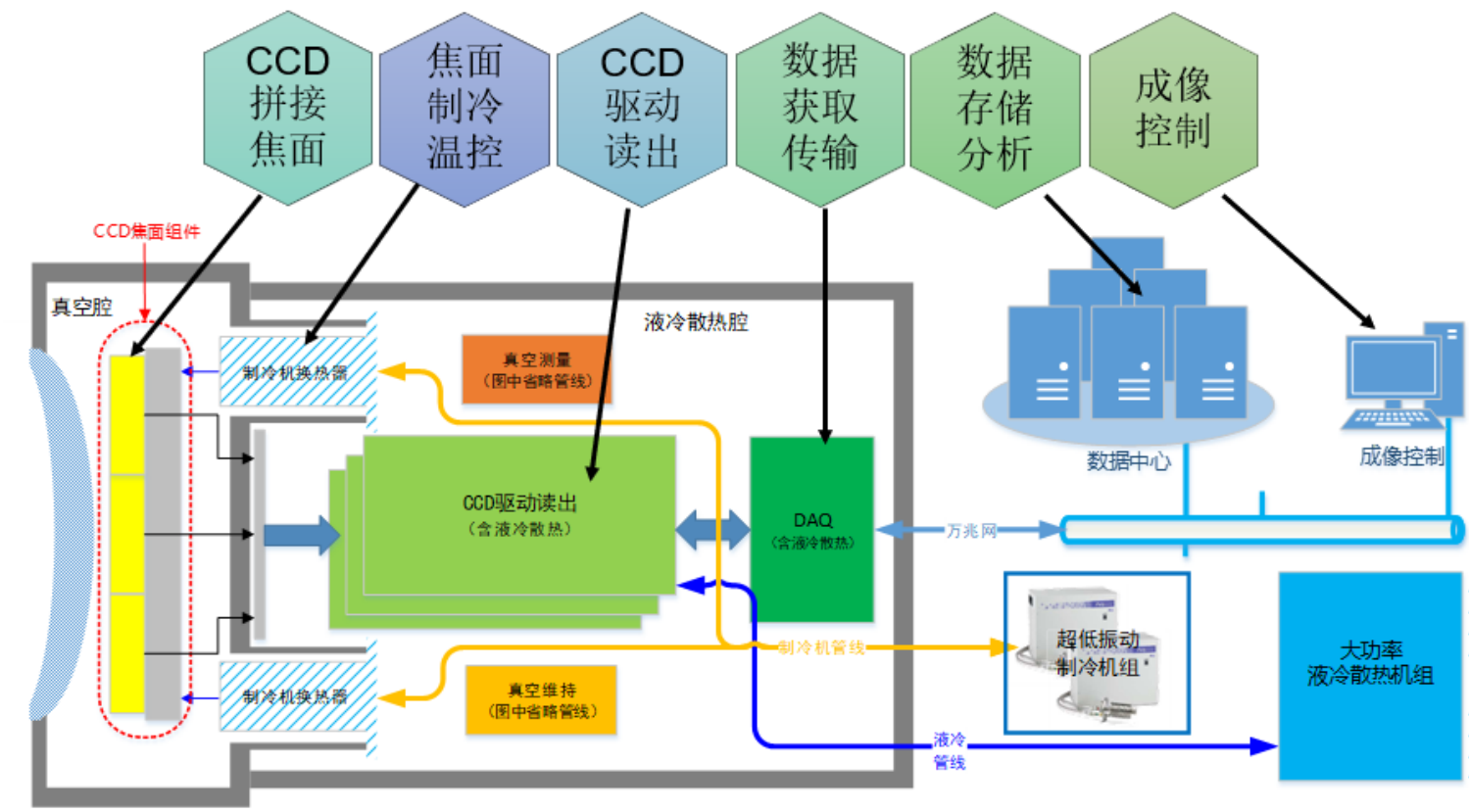
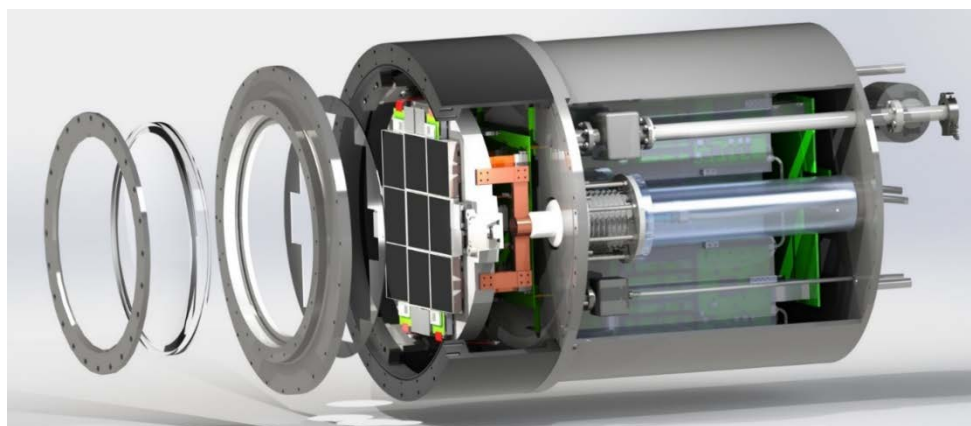
主焦相机的主要设计指标

参数	技术指标
波段	320-1028nm ; u,g,r,i,z,w
成像靶面	325mmx325mm (视场3度)
像元尺寸	10 μ m*10 μ m (CCD290-99)
拼缝要求	≤ 0.5 mm
最长积分时间	> 1h
读出噪声	≤ 8 个电子@500k; ≤ 15 个电子@1M
暗流	0.005个电子/pixel/s (at -100 $^{\circ}$ C)
数字输出	16bit
非线性	$\leq 1\% \sim 5\%$ (不同波段有差异)
成像面平整度	≤ 20 um (Peak to Valley)
满阱电荷	≥ 80 ke-
快门通光口径	不小于500 mm
焦面制冷温度	$< -100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
输出接口	光纤
外形尺寸	不大于直径600mmX1200mm，包含法兰

大靶面拼接CCD相机系统

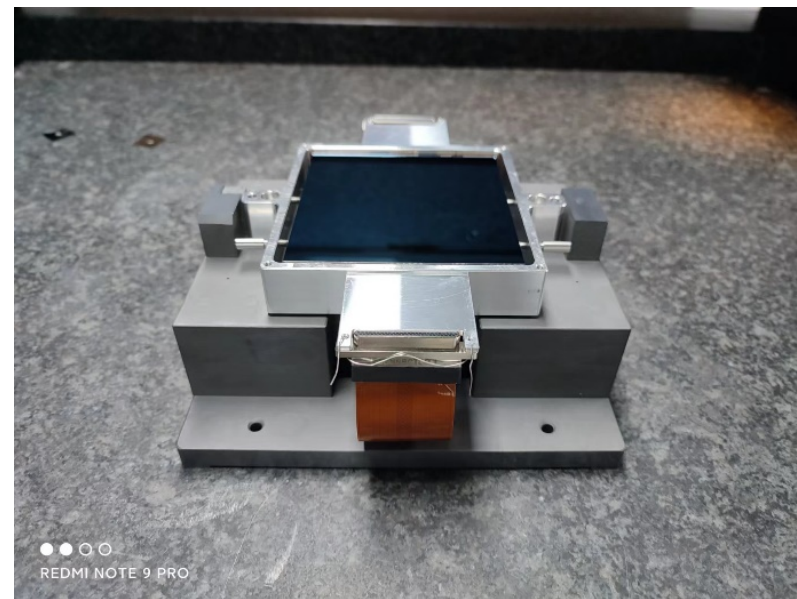
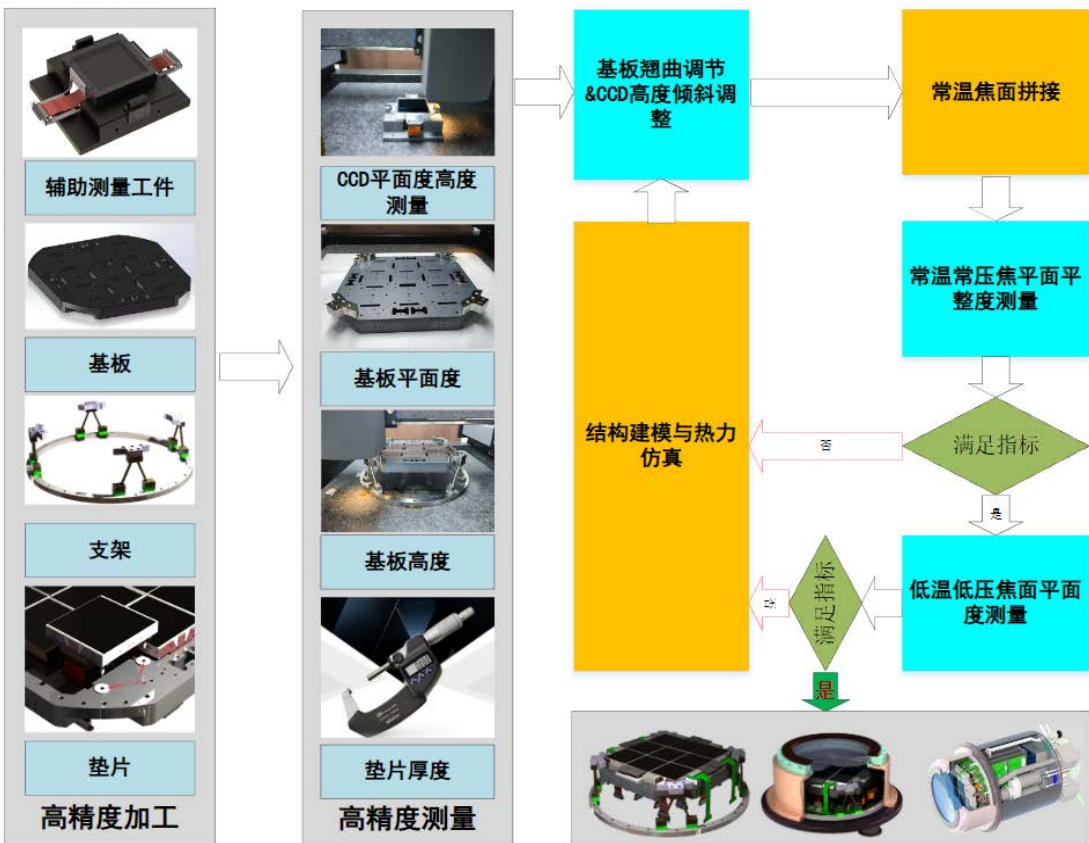
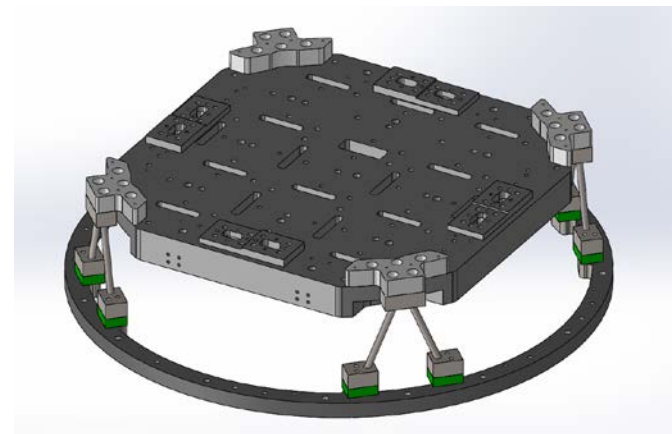
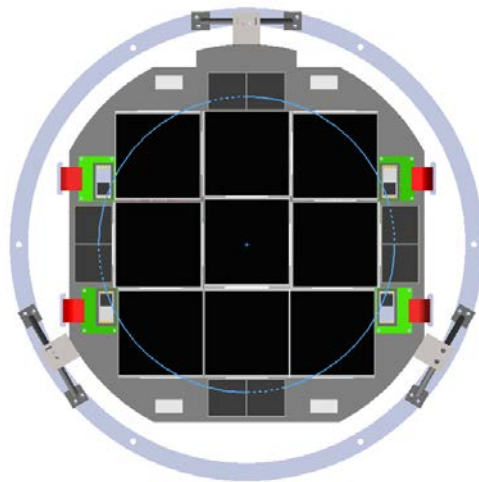
关键技术

- ◆ 大靶面、高精度 CCD 拼接
- ◆ 低温真空封装技术
- ◆ 超低噪声低功耗读出和驱动
- ◆ 高效相机控制系统

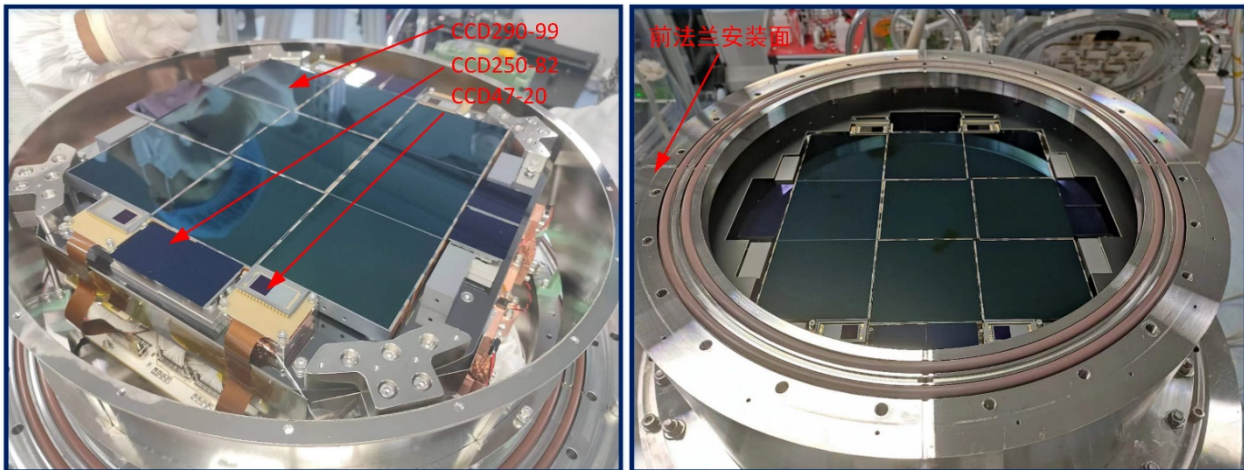


高精度CCD拼接

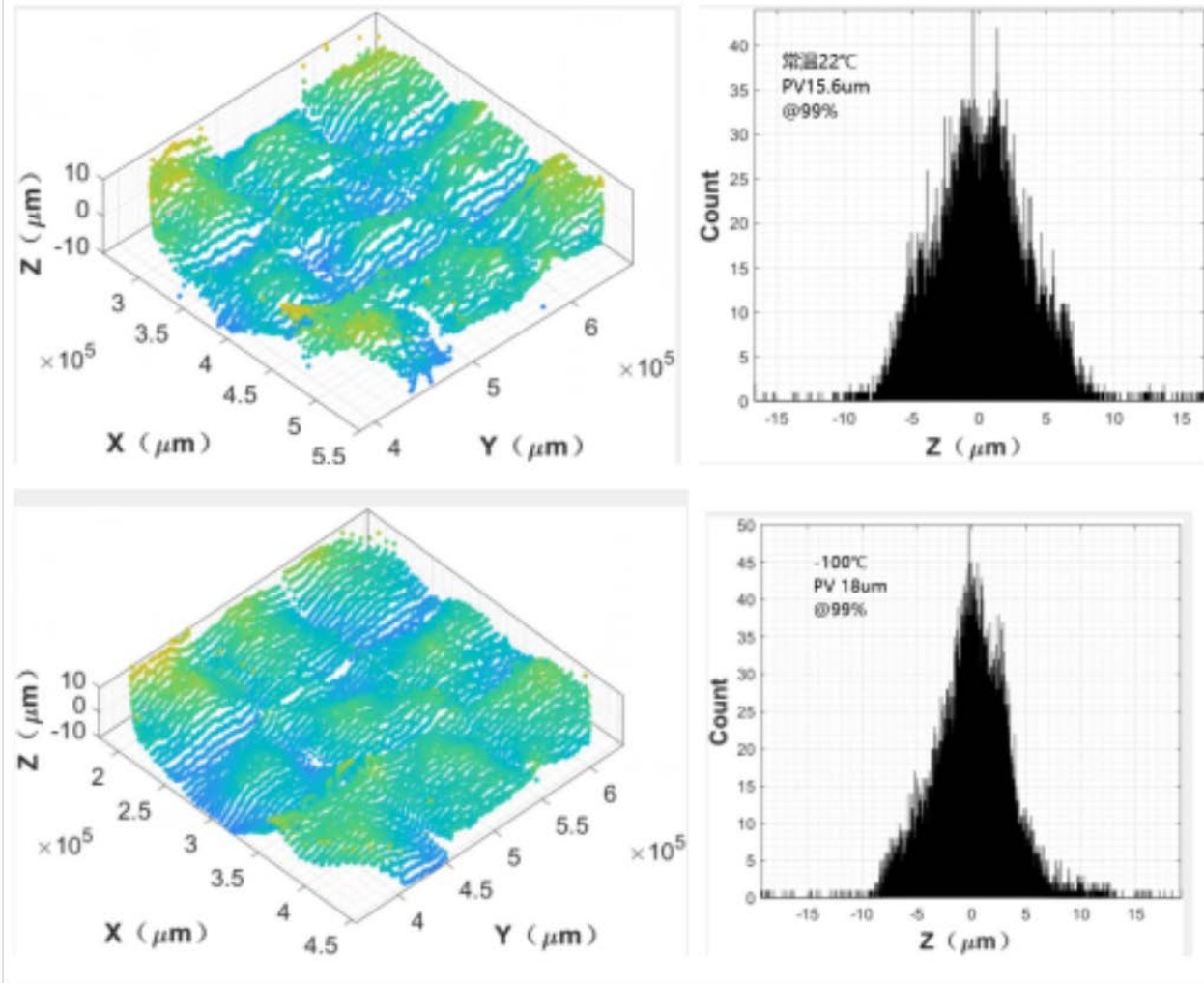
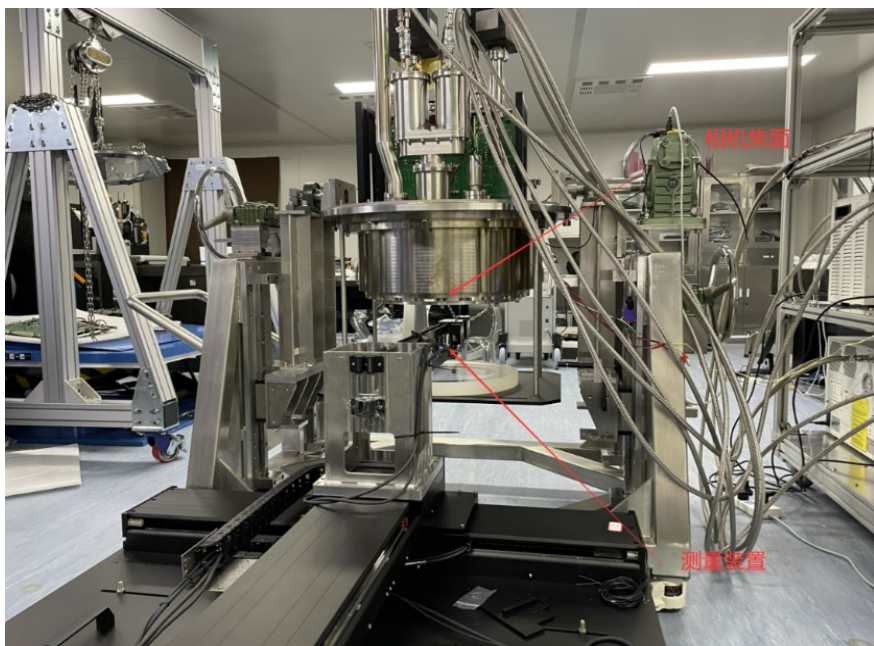
- 焦面尺寸大：焦面直径达325 mm，采用 9片 9K x 9K CCD芯片拼接
- 焦面平整度要求高：满足科学需求（像质退化 < 2%），零下100度真空条件下，平整度优于20 μm



拼接和测量



低温制冷下焦面平整度的测量



常温22°C下

➤ 拼接焦面测量平整度为 \sim PV15.6 μ m @99%

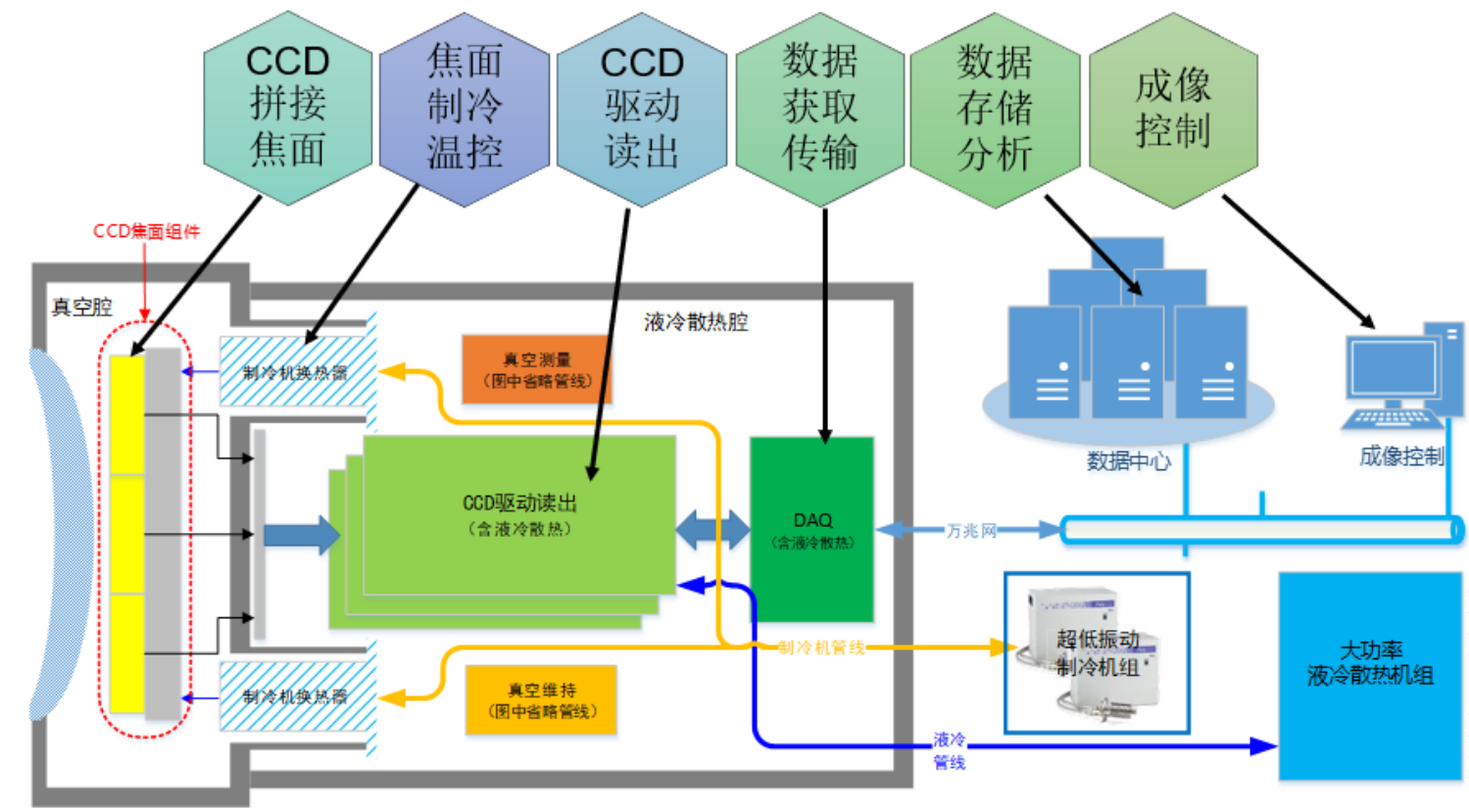
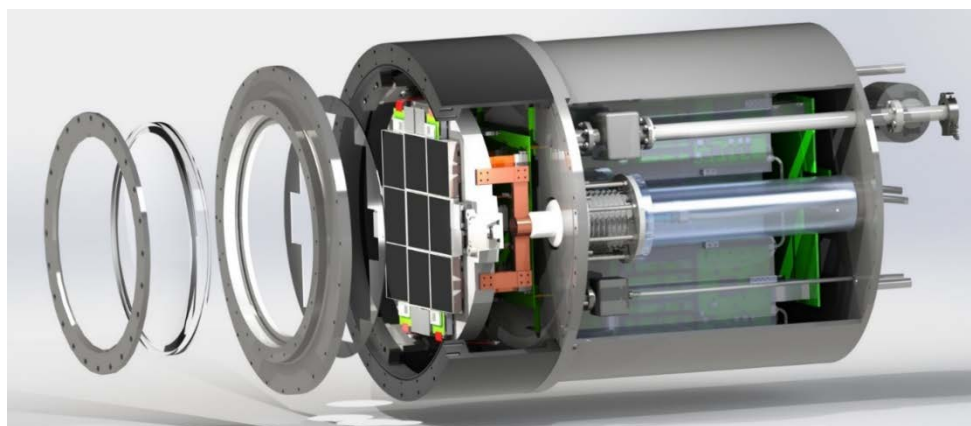
低温制冷-100°C下

➤ 拼接焦面测量平整度为 \sim PV18 μ m @99%

大靶面拼接CCD相机系统

关键技术

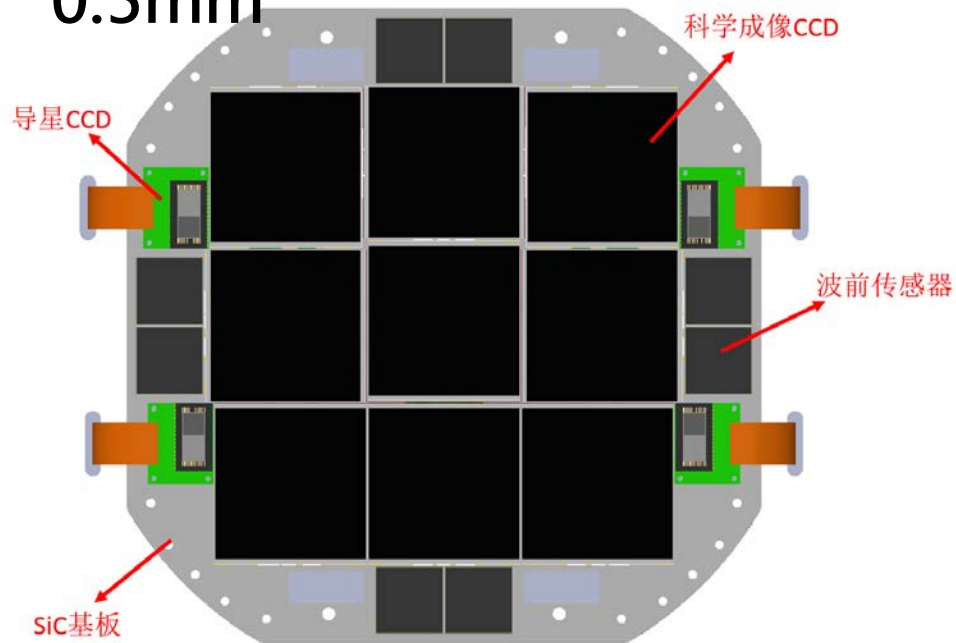
- ◆ 大靶面、高精度 CCD 拼接
- ◆ 低温真空封装技术
- ◆ 超低噪声低功耗读出和驱动
- ◆ 高效的相机控制系统



CCD焦面

- ◆ 成像面大小325mm， 总共21片 CCD
- ◆ 科学成像： 9片 9K x 9K CCD， 10 μm 像元
- ◆ 曲率波前传感： 8片 4K x 4K（只读出8个通道） CCD， 10 μm 像元
- ◆ 导星CCD： 4片 1K x 1K CCD， 帧转移， 13 μm 像元

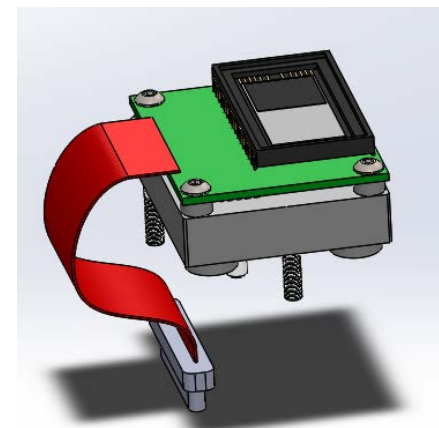
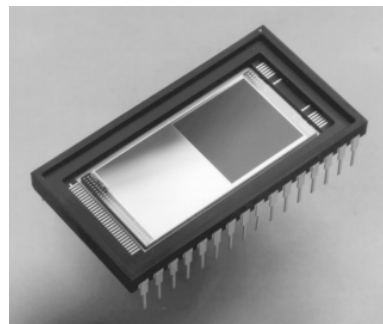
科学成像芯片gap小于
0.5mm



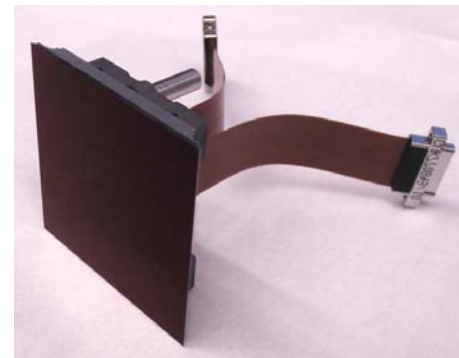
三合一：科学成像，波前传感，导星

● 导星CCD E2V CCD47-20

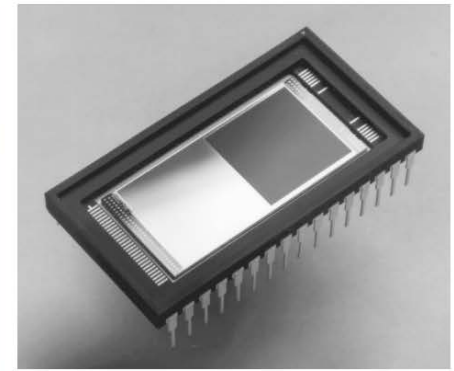
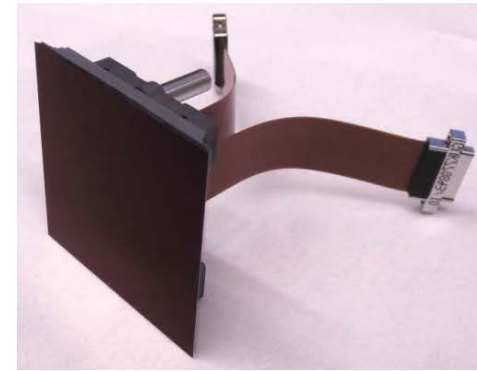
- 二次封装



● WFS使用E2V公司的 CCD250（离焦1mm）



CCD读出电子学需求



	CCD290-99	CCD250-82	CCD47-20
功能	科学成像	波前传感	导星
使用数量	9	8	4
像素	9216 (H) × 9232 (V)	4096 (H) × 4004 (V)	1024 (H) × 1024 (V)
通道	16 (32)	16	2
读出噪声	4 e ⁻ @500 KHz	5 e ⁻ @550 KHz	6 e ⁻ @1 MHz
最高读出频率	3 MHz	550 KHz	5 MHz

- 共21片 CCD，216个输出通道；
- 科学成像要求读出噪声尽可能低，但同时要求高读出速率以提高巡天效率；
- 整体电子学功耗尽可能低；

CCD读出方式对比:

模拟方式

双斜积分法 (DSI)

钳位采样法 (Clamp and Sample)

数字方式

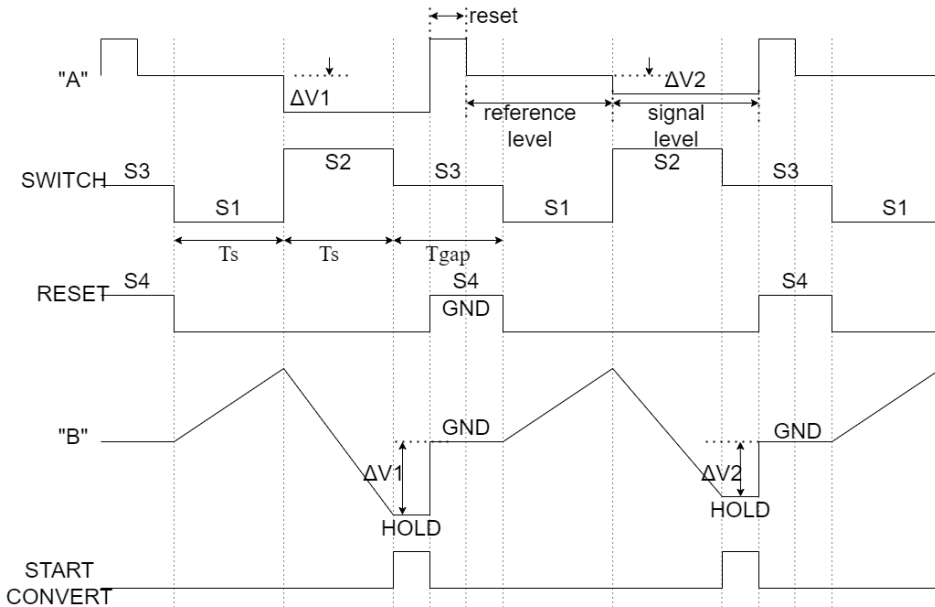
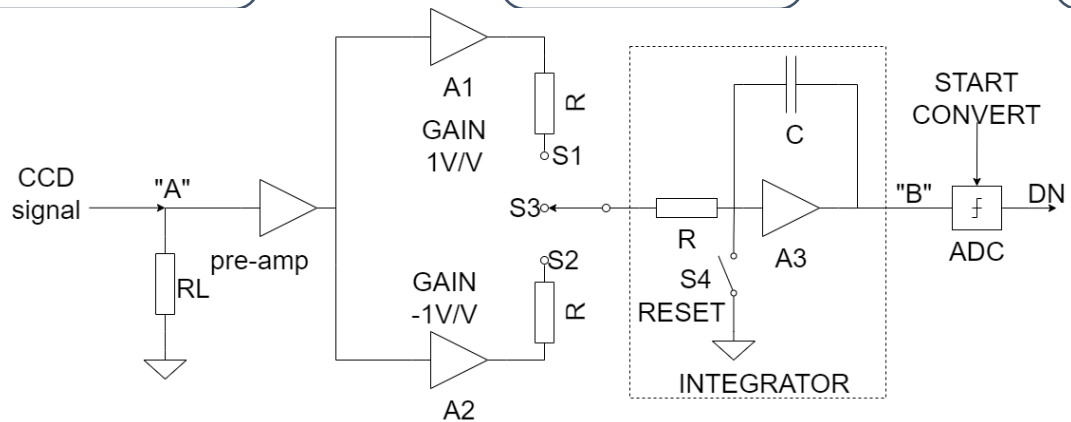
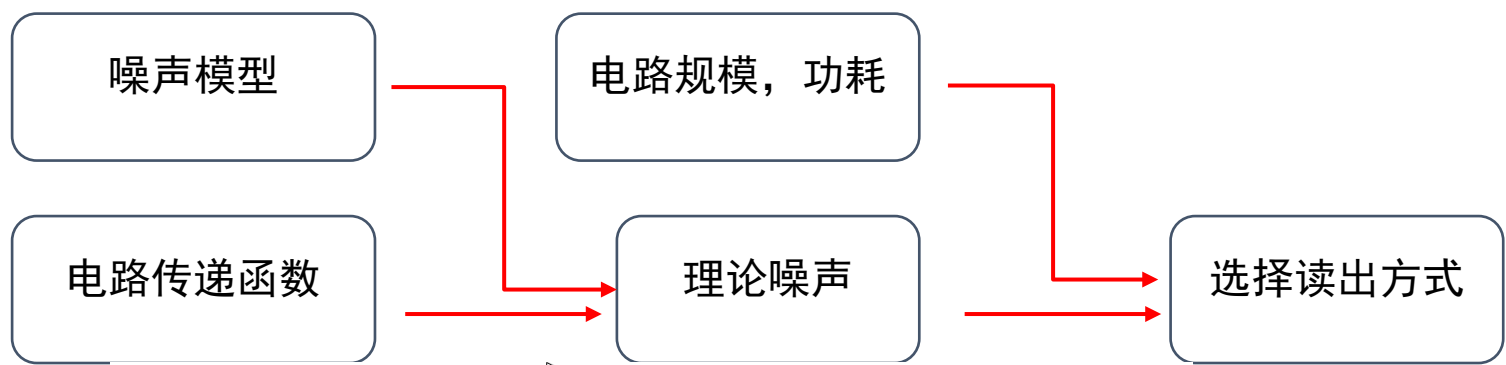
数字双相关采样法 (DCDS)

双斜积分法

- 前放放大
- 正向积分
- 反向积分
- 低速ADC采样
- 积分电容复位

传递函数

$$|H_{DS}(f)|^2 = \frac{4\sin^2(\pi f T_s) \sin^2[\pi f (T_s + T_{gap})]}{(\pi f \tau)^2}$$



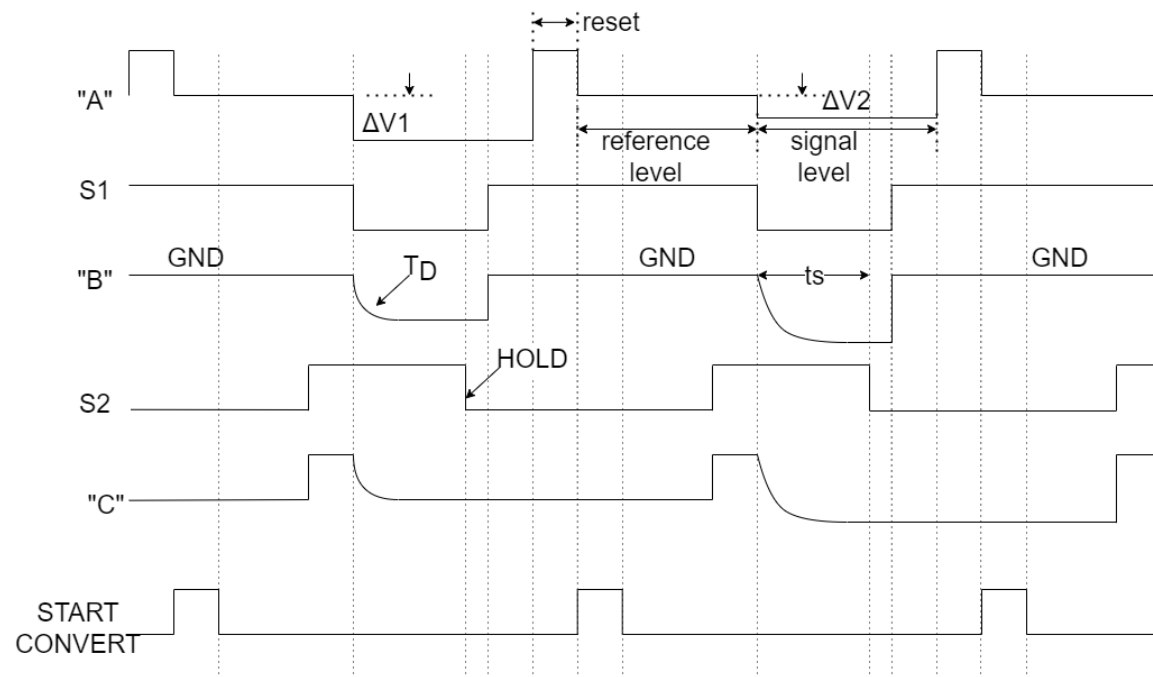
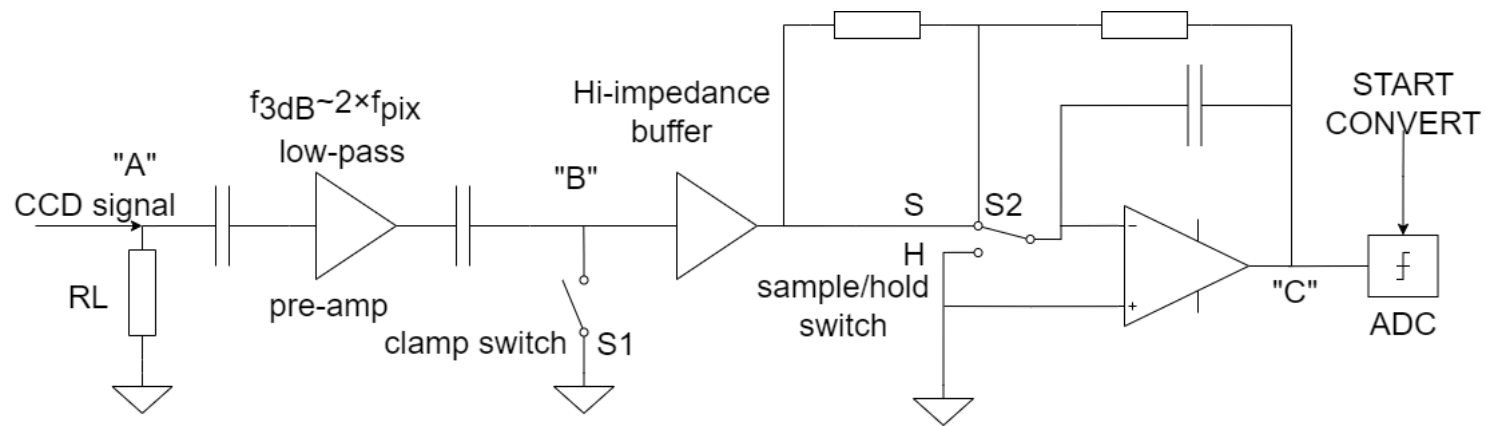
CCD读出方式对比:

钳位采样法

- 前放放大，并限制带宽
- 参考电平阶段，钳位
- 信号电平阶段，采样
- 保持阶段，低速ADC采样

- 传递函数

$$|H_{CS}(f)|^2 = \frac{4\sin^2(\pi f T_s)}{1 + \left(\frac{f}{f_{3dB}}\right)^2}$$



CCD读出方式对比:

数字双相关采样法 (DCDS)

前端放大器
高速ADC采样

平均滤波器 (DA) 传递函数

$$|H_{DA}(f)|^2 = \frac{4\sin^2(\pi Nft_s)\sin^2[(N+M)\pi ft_s]}{N^2\sin^2(\pi ft_s)}$$

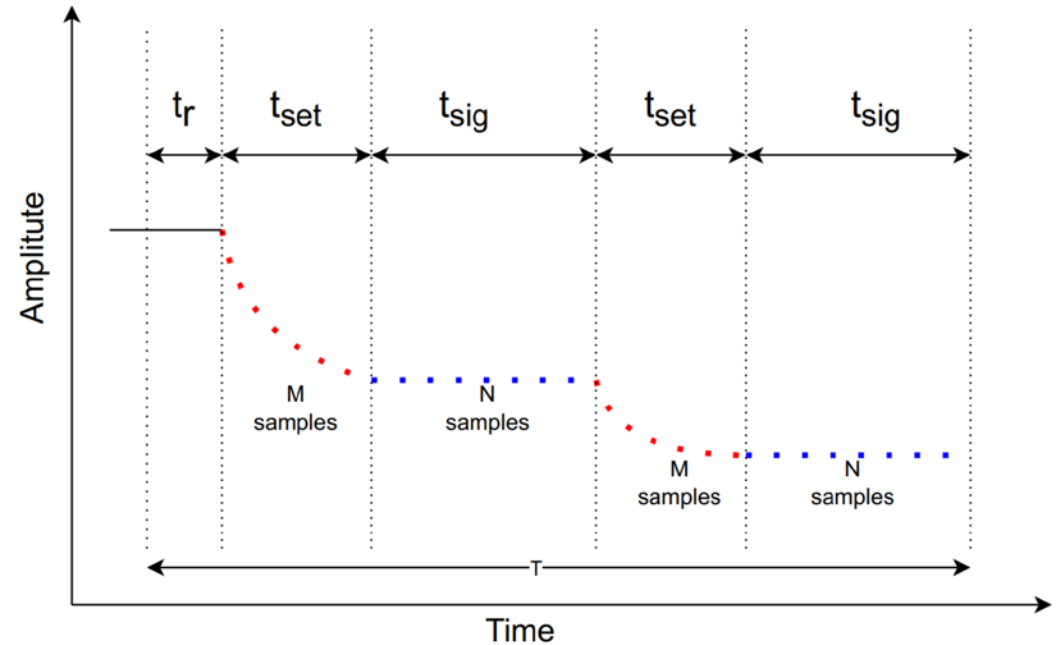
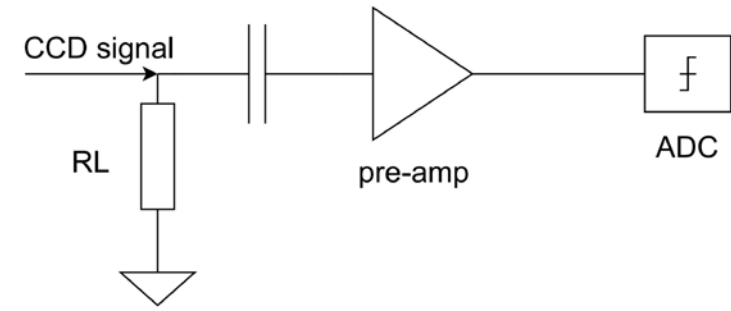
$$|H_{DSI}(f)|^2 = \frac{4\sin^2(\pi fT_s)\sin^2[\pi f(T_s + T_{gap})]}{(\pi f\tau)^2}$$

$$Nt_s = T_s$$

$$(N+M)t_s = T_{gap}$$

$$\sin^2(\pi ft_s) \rightarrow (\pi ft_s)^2$$

$$|H_{DA}(f)|^2 = |H_{DSI}(f)|^2$$

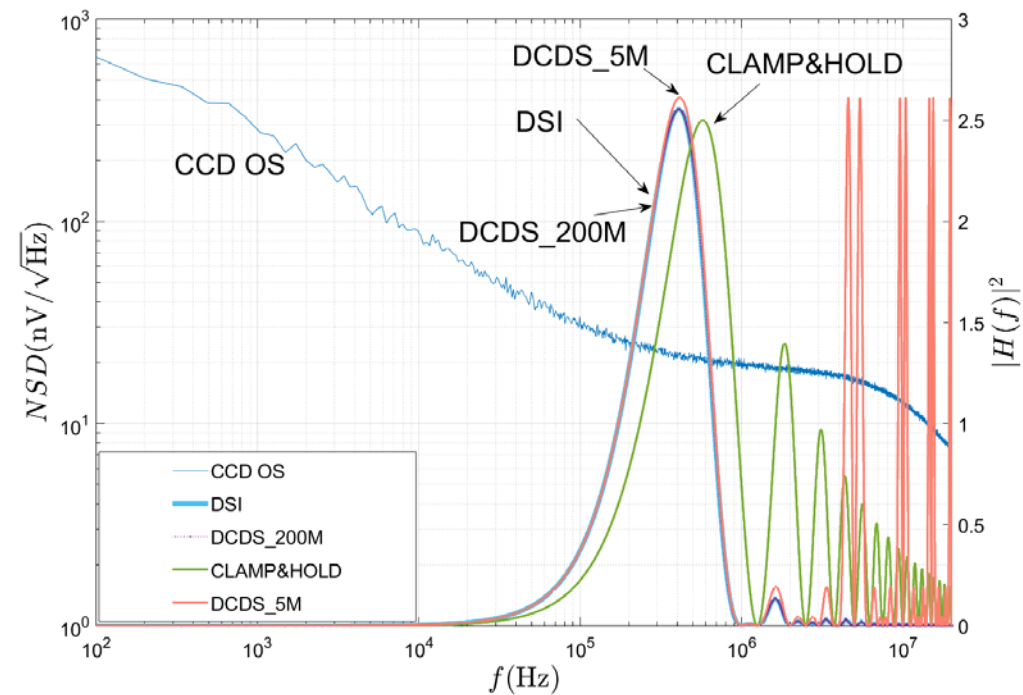


高速ADC采样情况下数字双相关采样与双斜积分法等效

CCD读出方式对比:

利用噪声谱和传递函数可以估算电路噪声

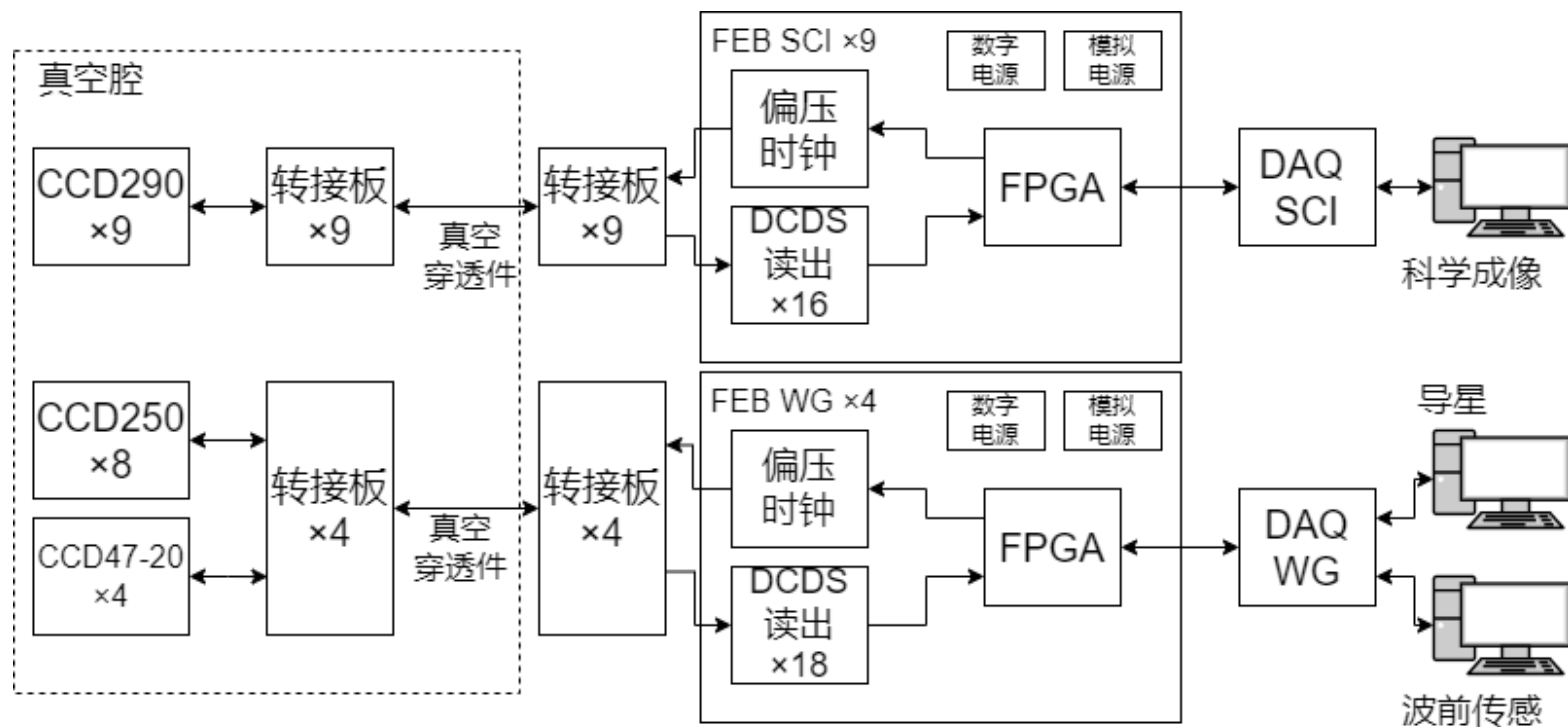
$$\overline{v_n^2} = \int_0^{f_{max}} |H(f)|^2 \cdot NSD(f)^2 df$$



参数	双斜积分法	钳位采样法	数字双相关采样法
最快读出频率	低	高	高
增益	变化	不变	不变
噪声	低	高	低
功耗	低	低	较高
电路规模	大	较大	小

综合考虑，选用DCDS作为WFST的CCD的主要读出方式

主焦相机CCD读出系统方案设计

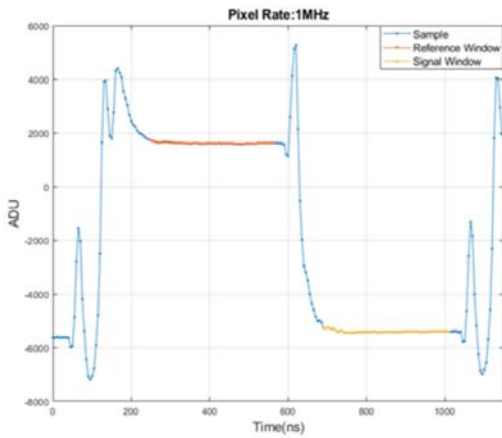
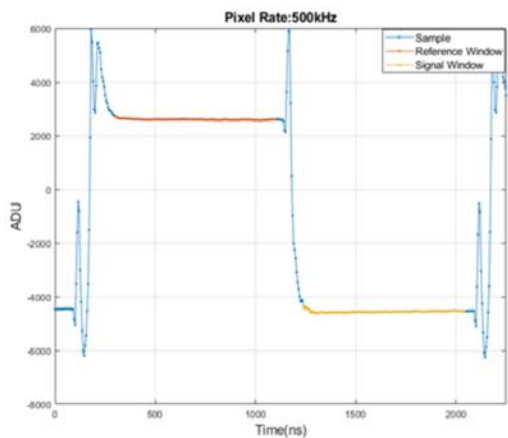
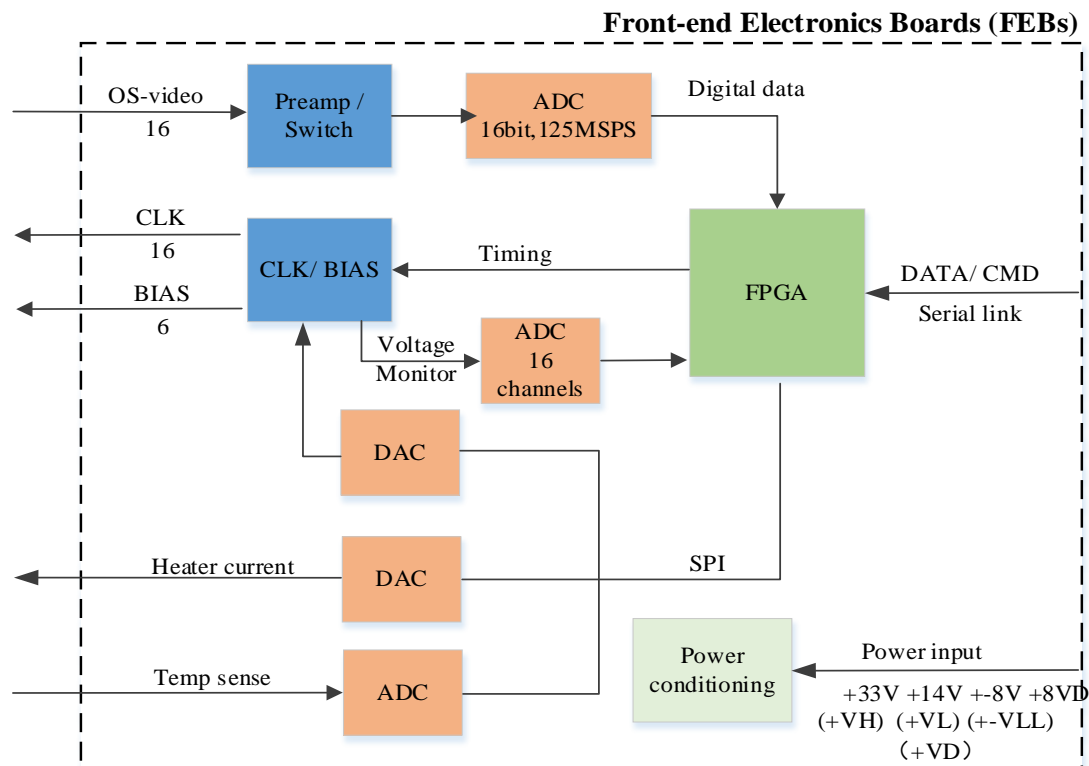


- **模块化设计：前端电子学板、数据获取板(Data Access board)**
- **读出电子学位于真空腔外，通过转接板和真空穿透件进行信号引出**

- CCD信号通过转接板引出真空腔
- 单FEB-SCI板控制一片CCD290
- 单FEB-WG板控制2片CCD250和一片CCD47-20
- 每块FEB使用一块电源板进行供电
- 两块DAQ分别控制所有的SCI板与WG板

读出电子学

- 采用DCDS读出方案
- 产生多路偏压时钟驱动
- FPGA作为主控芯片
- 多路低噪声直流供电
- 监测CCD和板级温度
- 监测板级电压电流
- 可实现CCD原始波形数据上传



读出电子学



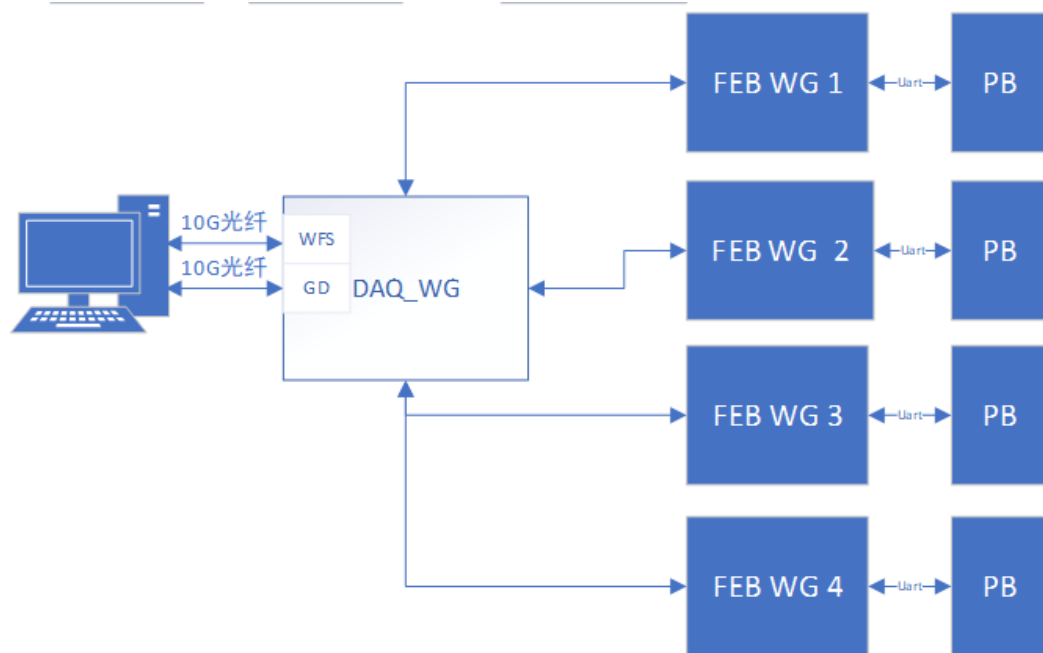
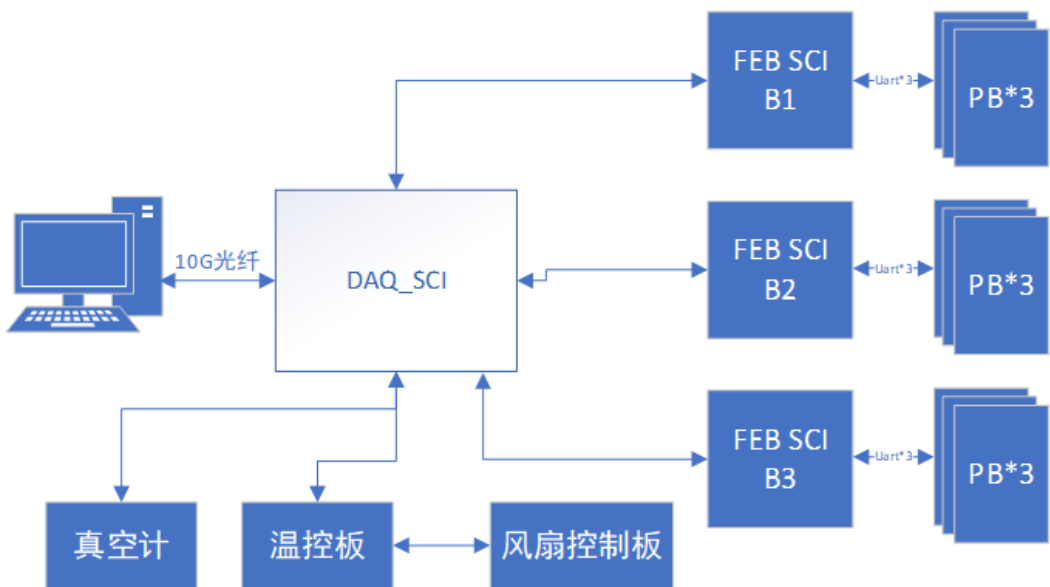
- 完成命令分发功能
- CCD图像数据的缓存和上传
- 与真空计、温控板等设备通信
- 10Gbps UDP通讯协议，图像重传功能
- 逻辑固件支持远程升级功能

需求分析

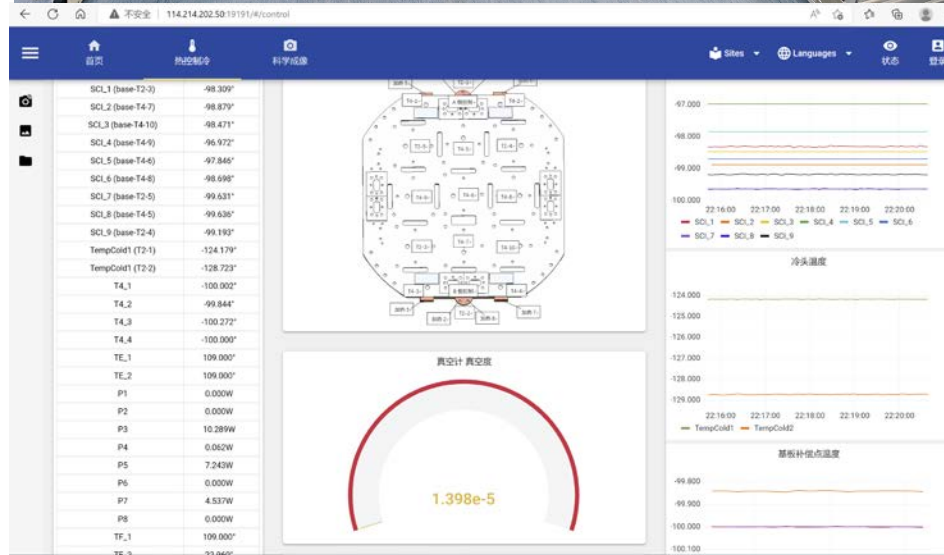
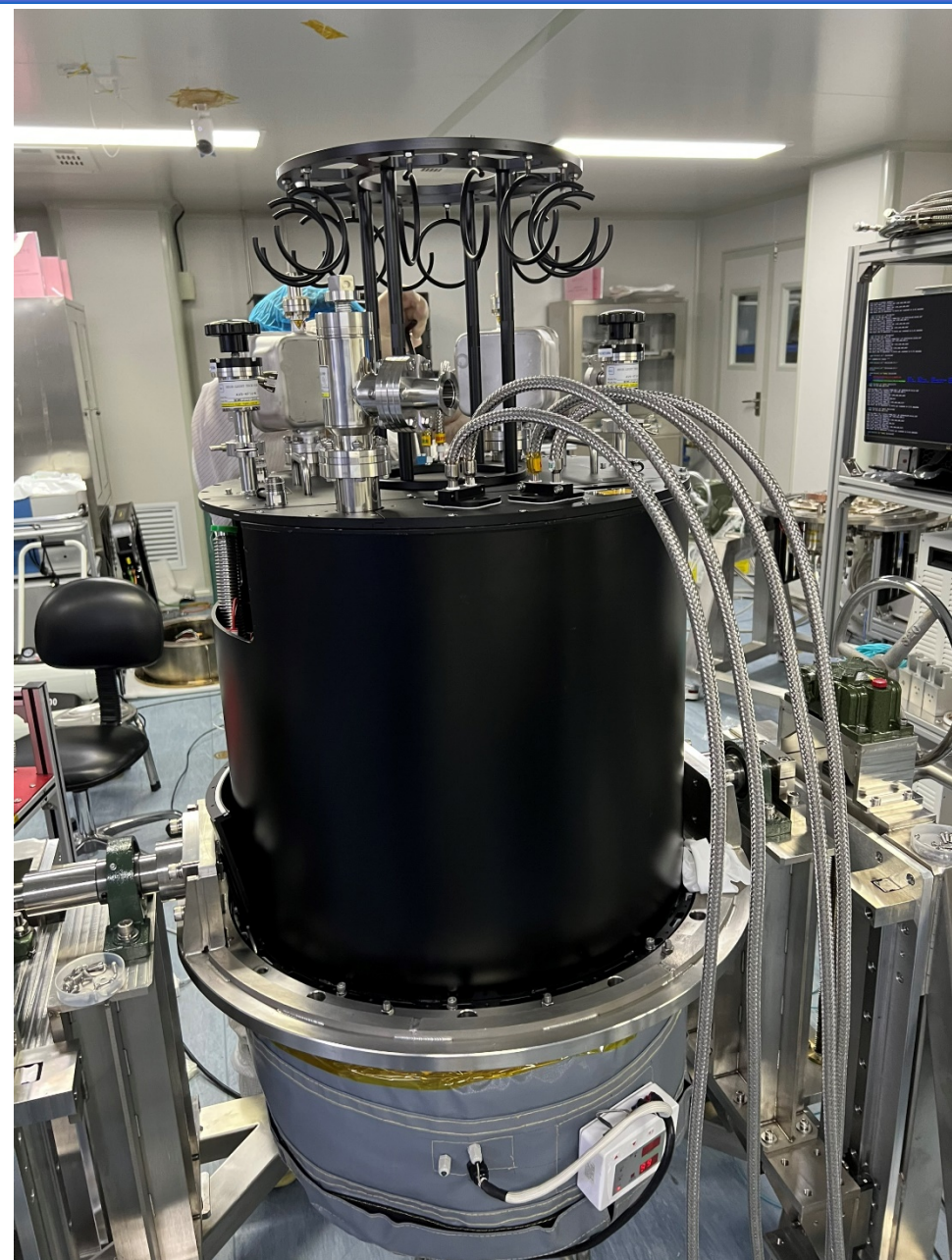
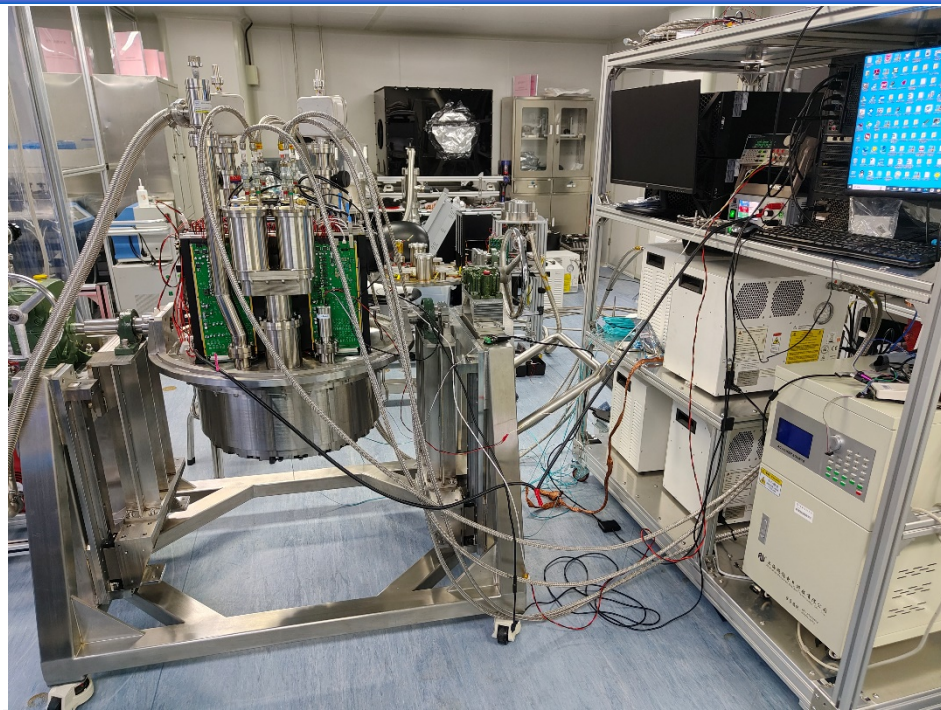
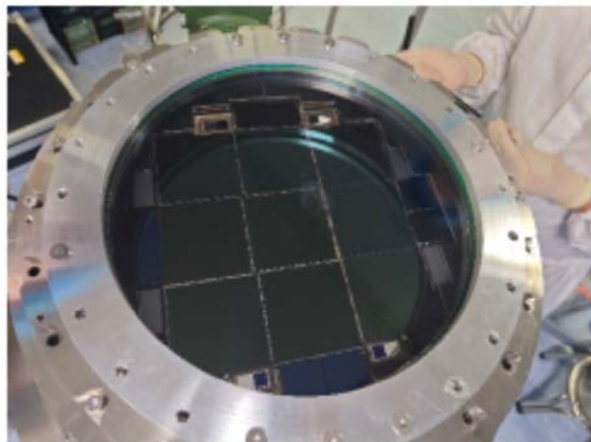
- 分为科学成像，导星与波前传感两部分
- 内外部设备通信
- 图像缓存：180MByte × 9 = 1620MByte

接口速率

- DAQ与FEB接口速率：2MHz × 16通道 × 16bit = 512Mbps
- DAQ与上位机：512Mbps × 9 = 4.6Gbps



相机组装和测试



相机功耗测试

功耗测试

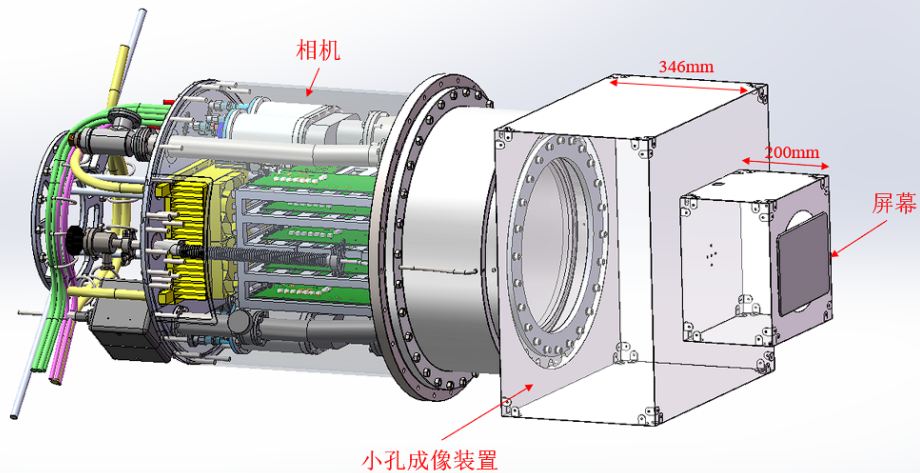
FEB板功耗/CCD

电压	电路功能	功耗 (mW)	电流 (mA)
模拟 8 V	前放	903	1053.125
	ADC 驱动器	1287.5	
	ADC	4374	
	ADC 时钟	1716	
	CCD 时钟、偏压	144.5	
	小计	8425	
模拟-6 V	前放	1152	207.3
	CCD 时钟、偏压	91.8	
	小计	1243.8	
模拟 13.5 V	CCD 时钟、偏压	168	12.4
	小计	168	
模拟 33.5 V	CCD 时钟、偏压	241.2	71.2
	CCD 输出负载	2358	
	小计	2599.2	
数字 8 V	FPGA	4158	699.5
	DDR	415	
	USB	635	
	时钟芯片	388	
	小计	5596	
	总计	17864	

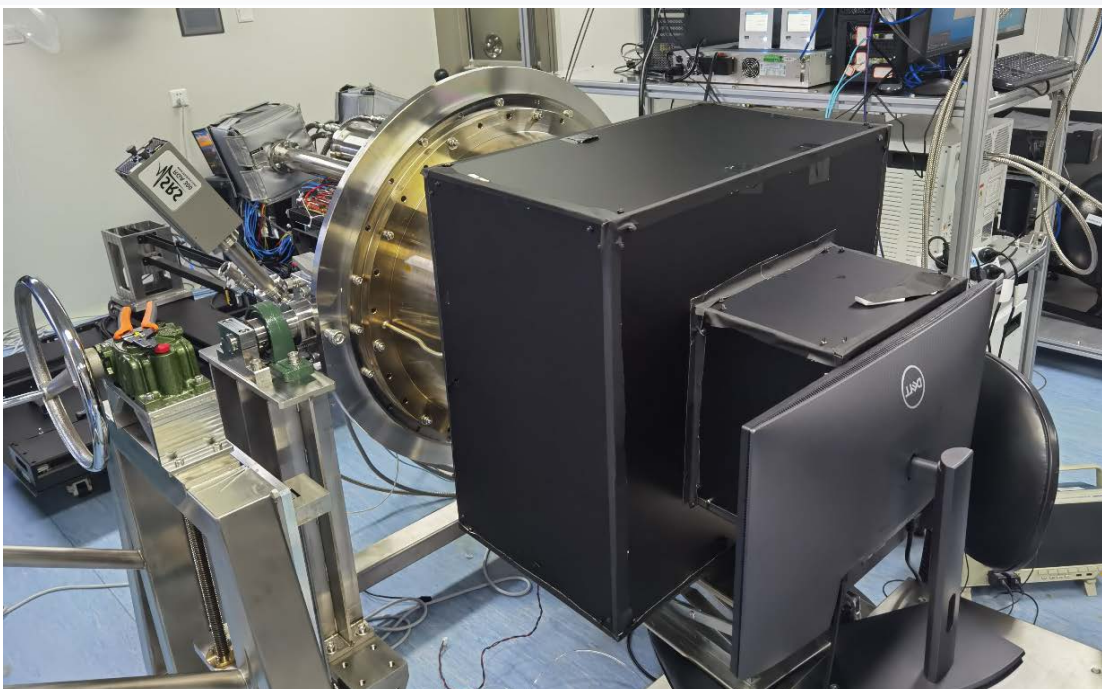
- 远低于同样使用DCDS方法的其他相机
- 接近使用模拟DSI方法，在曝光时关闭部分模拟电路可以进一步降低约一半的功耗

望远镜	读出方式	总功耗 (W)	通道数	单通道功耗 (W)
LSST	DSI (ASIC)	1053	3216	0.33
HSC	DSI	450	496	0.97
Euclid	DSI	226	144	1.57
J-PAS	DCDS	1400	224	6.25
ZTF	DCDS	400.3	72	5.56
WFST	DCDS	349	216	1.61

成像测试



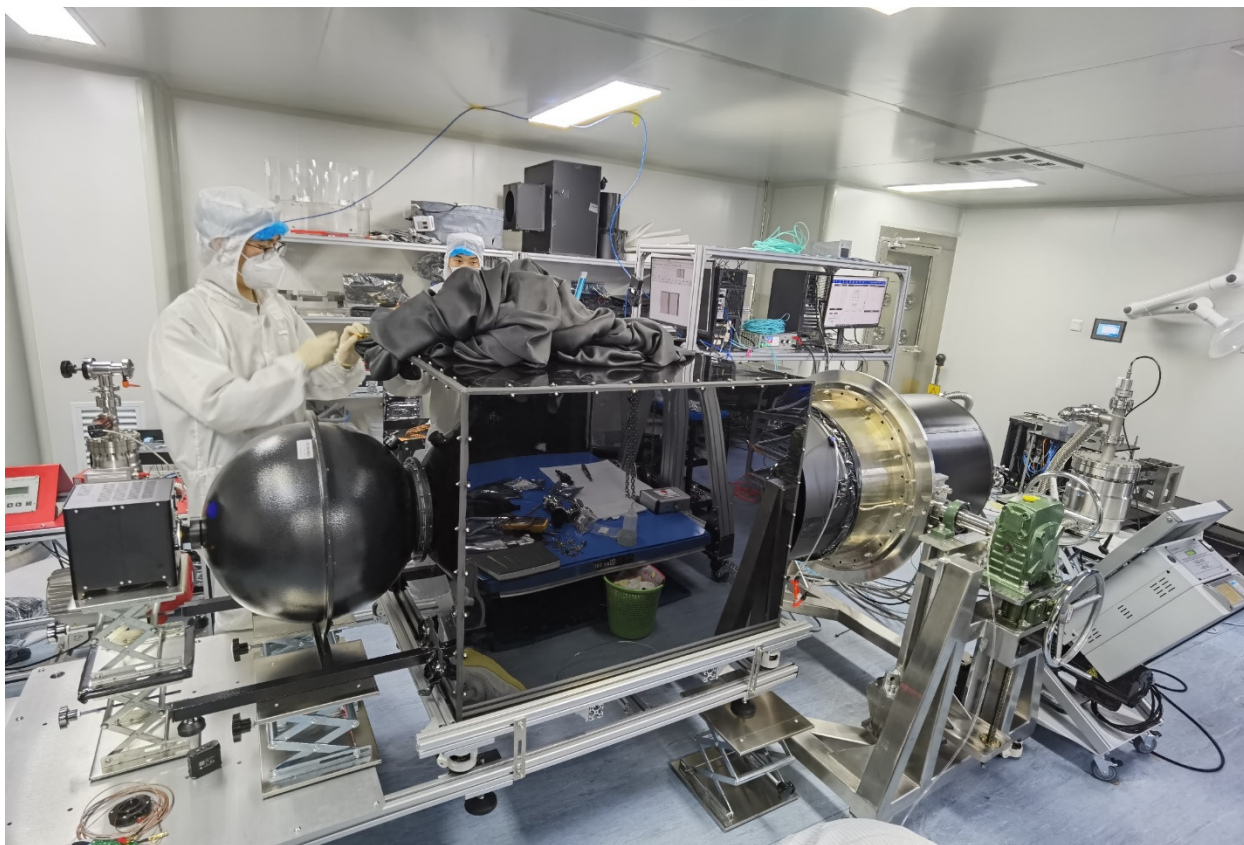
科学成像9片CCD的小孔成像图片



相机整体性能测试

噪声测试

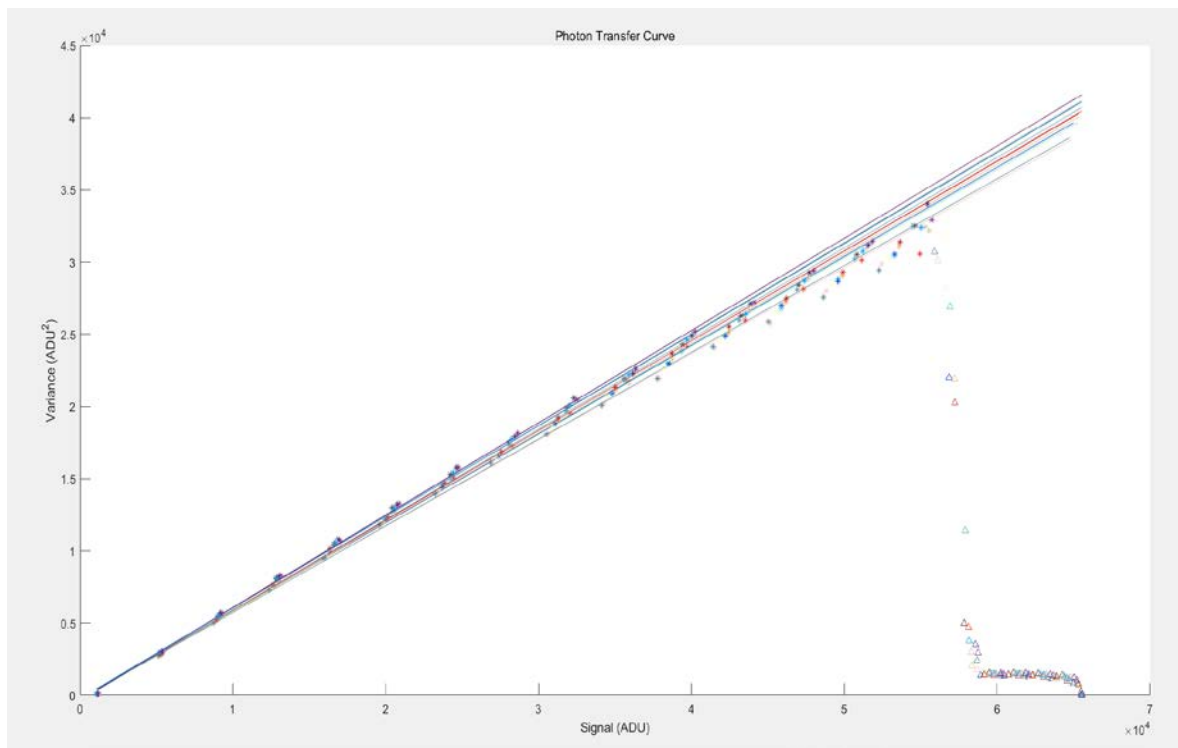
- 500 kHz 平均读出噪声 $5.64e^-$, 1MHz 噪声 $7.79e^-$ 、2M 噪声 $11.89e^-$
- 满足设计指标 ($8e^-$ @500 kHz, $15e^-$ @1 MHz)



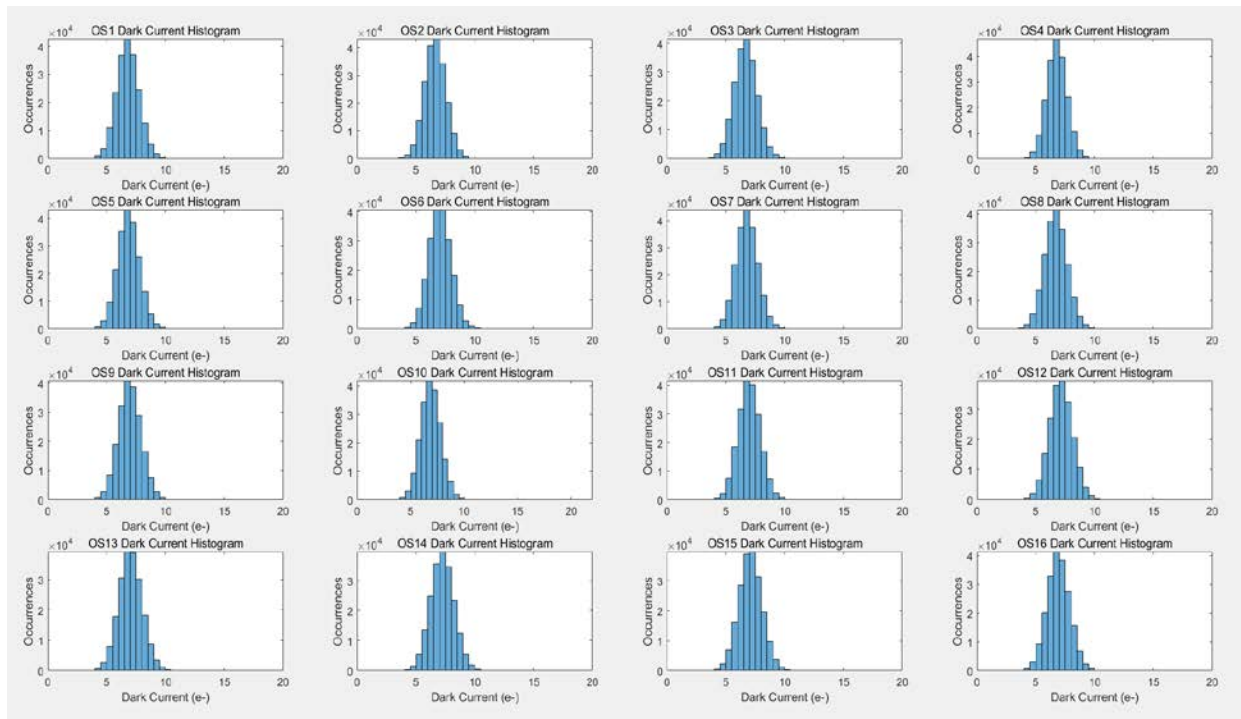
读出速率	测试项目	OS1	OS2	OS3	OS4	OS5	OS6	OS7	OS8	OS9	OS10	OS11	OS12	OS13	OS14	OS15	OS16	AVG
500K	噪声 (e-)	5.61	5.76	5.64	6.06	5.52	5.42	5.65	5.29	5.68	5.27	6.13	5.61	5.77	5.74	5.56	5.61	5.64
1M	噪声 (e-)	7.85	7.87	7.89	8.13	7.80	7.66	7.68	7.60	7.61	7.46	7.82	7.90	8.14	7.55	7.85	7.88	7.79
2M	噪声 (e-)	11.99	12.12	12.25	11.19	12.44	11.62	11.52	11.44	11.59	11.71	11.91	12.18	12.19	11.80	11.95	12.32	11.89

S9 低增益下的读出噪声

相机整体性能测试



S9-1M-低增益模式下的 PTC 曲线拟合

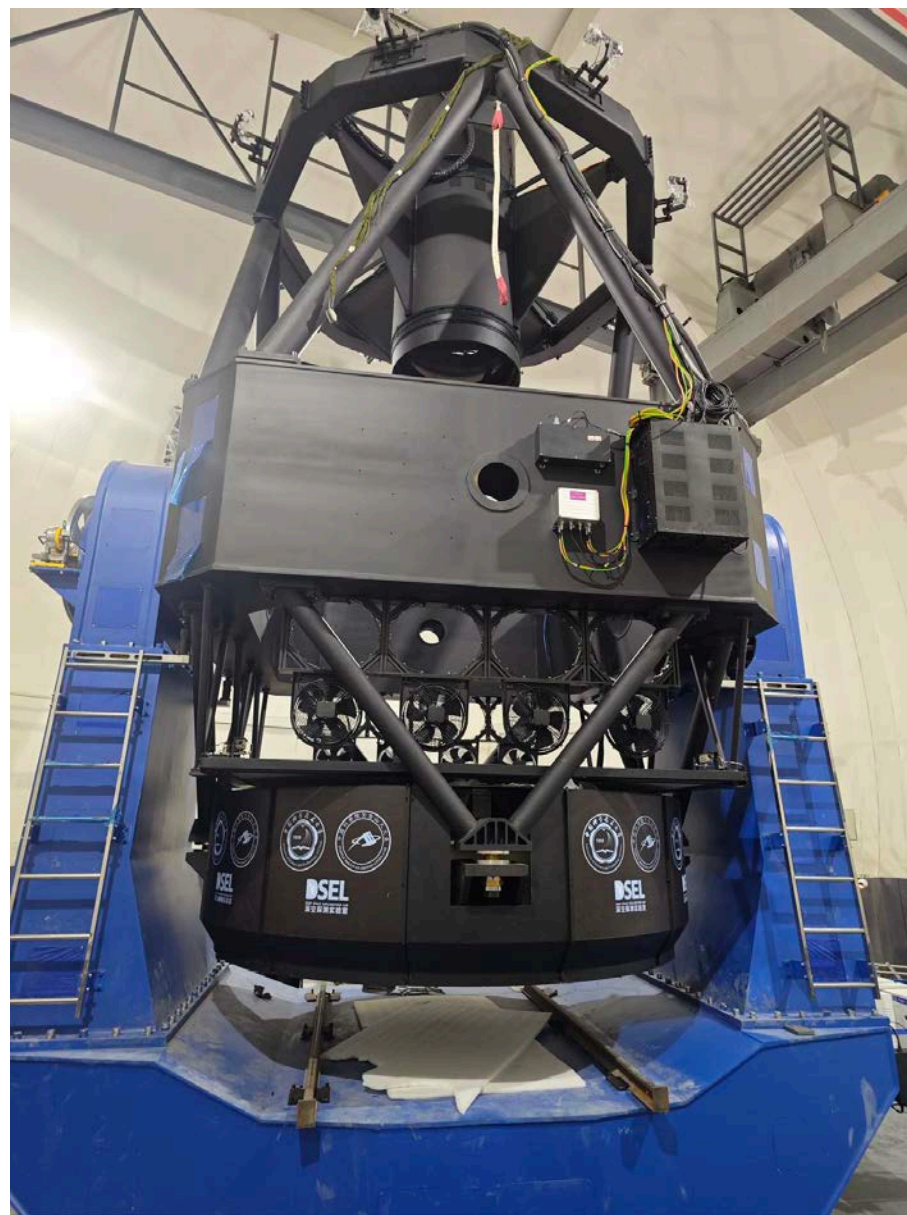
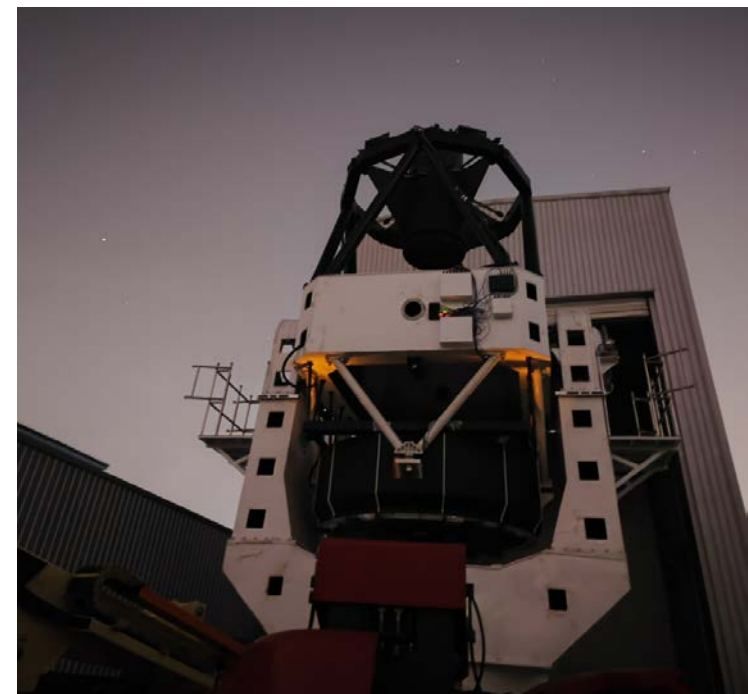


S9暗电流柱状图分布

测试项目	OS1	OS2	OS3	OS4	OS5	OS6	OS7	OS8	OS9	OS10	OS11	OS12	OS13	OS14	OS15	OS16	AVG
低增益 (e-/ADU)	1.62	1.67	1.65	1.64	1.64	1.64	1.64	1.67	1.59	1.61	1.61	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.62
高增益 (e-/ADU)	4.37	4.501	4.404	4.372	4.407	4.369	4.391	4.458	4.281	4.36	4.294	4.219	4.248	4.241	4.288	4.256	4.34
CCD暗电流 (e-/pixel/h)	10.881	10.866	11.085	11.013	11.319	11.282	11.278	11.18	10.965	11.109	11.123	11.177	10.925	11.194	11.309	10.939	11.10

S9的增益和暗电流

WFST望远镜首光



2023年9月17号发布的M31仙女座星系

总结

- 针对国内首个大靶面拼接式相机，进行了CCD读出方案的设计和分析，最终实测结果在500kHz平均读出噪声 $5.64e^-$ ，1MHz噪声 $7.79e^-$ 、2M噪声 $11.89e^-$ 。
- 主焦相机采用DCDS读出方案的读出噪声接近DSI读出方案，功耗上优于国际上其它相机，整体读出电子学功耗349W。
- WFST主焦相机的焦面尺寸达到325mm，成像面的探测器拼接平整度 $\leq 20\mu\text{m}$ (Peak to Valley)，最终拼接平整度达到 $18\mu\text{m}@99\%$ 、 -100°C ，优于国际上多数拼接相机；

Thank you for your attention!