



CSNS高能质子 束流望远镜系统 研制与测试

第二十三届全国核电子学与
核探测技术学术年会

李岚坤

中国科学院高能物理研究所
散裂中子源科学中心



01

研究背景

HPES线站需求与
束流望远镜应用背景

02

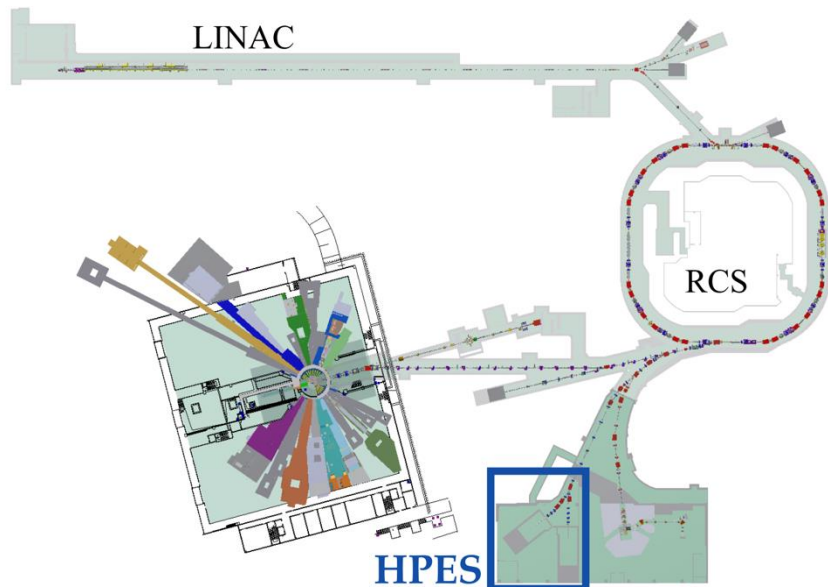
系统设计

模块设计、系统模拟、
电子学系统、高精度实验测试台
触发系统等

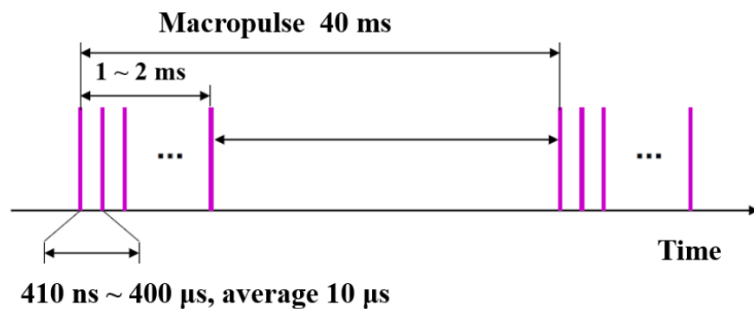
03

实验验证

1.3 GeV电子束流实验



HPES 位于 CSNS 高能质子实验区，并设置两个用户终端



束流宏脉冲结构示意图

线站定位

HPES 是 CSNS 二期规划的高能质子实验终端，可用于径迹探测器的性能测试和量能器的标定等。

包含5套探测器系统：束流望远镜系统、能量测量系统、触发系统、束斑和流强监测系统

0.8–1.6 GeV

能量连续可调

< 2%

1.6 GeV 条件下能散

10^3 – 10^8 p/s

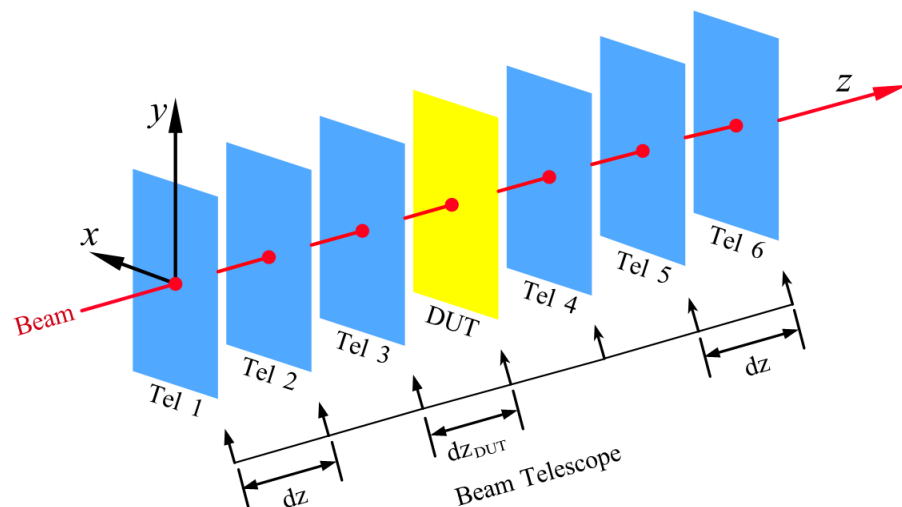
覆盖单粒子测试与辐照测试

24 Hz

束流宏脉冲频率



High-Energy Proton Beam Telescope (HEPTel)



上游 3 层

DUT

下游 3 层

设计目标

径迹分辨率：设计目标 好于 $10\text{ }\mu\text{m}@1.6\text{GeV}$;

低物质量：减少多次库伦散射的影响，提高参考径迹重建精度。

工作原理

在DUT上下游各布置3层探测模块。六层击中用于重建参考径迹并外推至DUT平面，从而测量DUT的空间分辨率与探测效率。



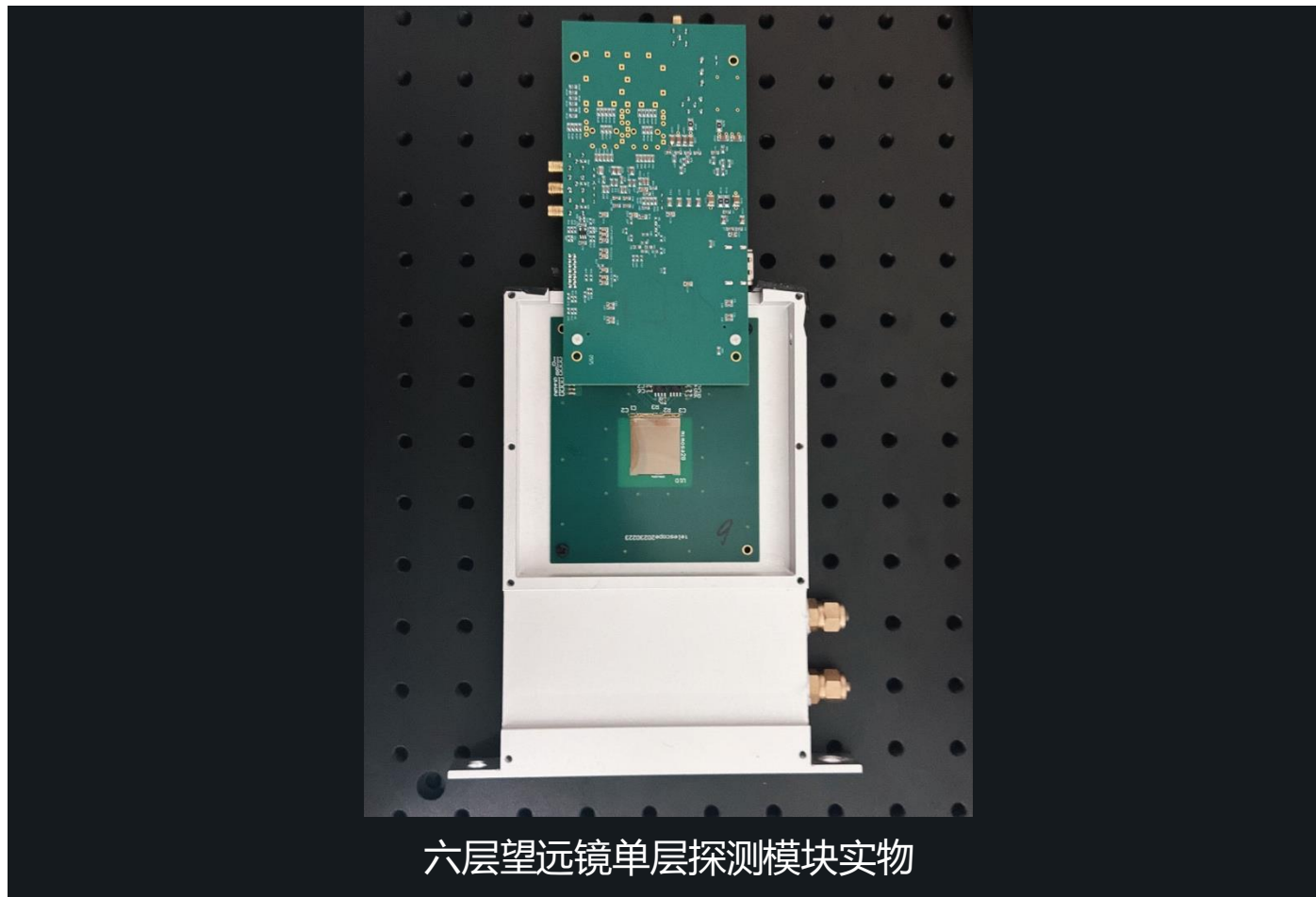
- **六层 MAPS 型探测模块：提供上、下游六个位置测量点**
- **电子学系统：各层独立读出，经 SiTCP 千兆以太网传输**
- **高精度实验测试台：调节层间距、支持不同尺寸的DUT和远程控制**
- **线站触发与 DAQ：分发 TriggerID，完成DUT和望远镜的事例对齐**

HEPTel总体框图：六层望远镜模块、触发、电子学系统与DAQ等

望远镜探测模块：单层物质质量约 $0.061\% X_0$

采用50 μm 厚度的 MIMOSA-28制成

探测模块



六层望远镜单层探测模块实物

928×960

像素矩阵

$20.7 \mu\text{m}$

像素尺寸

$185.6 \mu\text{s}$

读出时间

$0.061\% X_0$

单层物质质量

- 前端PCB板采用镂空设计，灵敏区内物质质量 $\sim 0.061\% X_0$ →有效减少多次库伦散射的影响
- 铝制屏蔽盒提供保护，两层12.5 μm Kapton用于遮光
- 通过水冷降低屏蔽盒整体温度

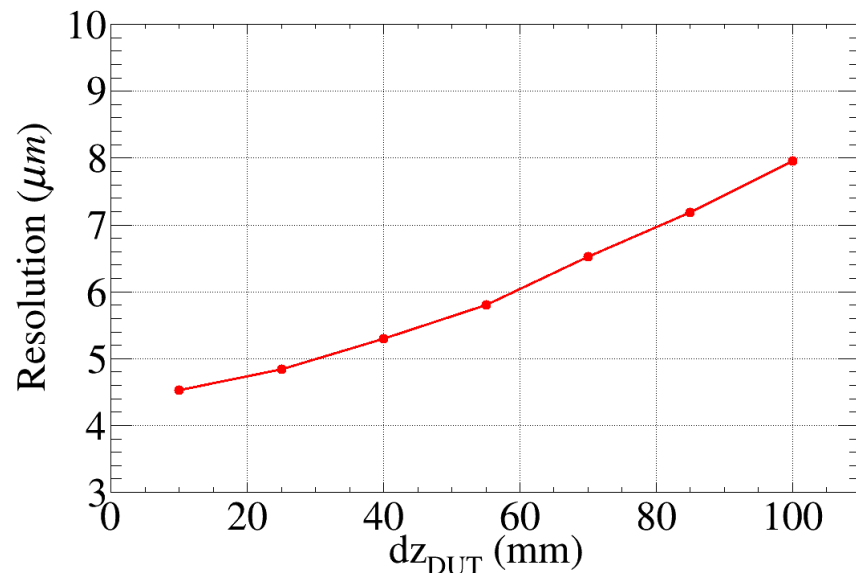
1.6 GeV 质子束下的望远镜性能模拟

模拟



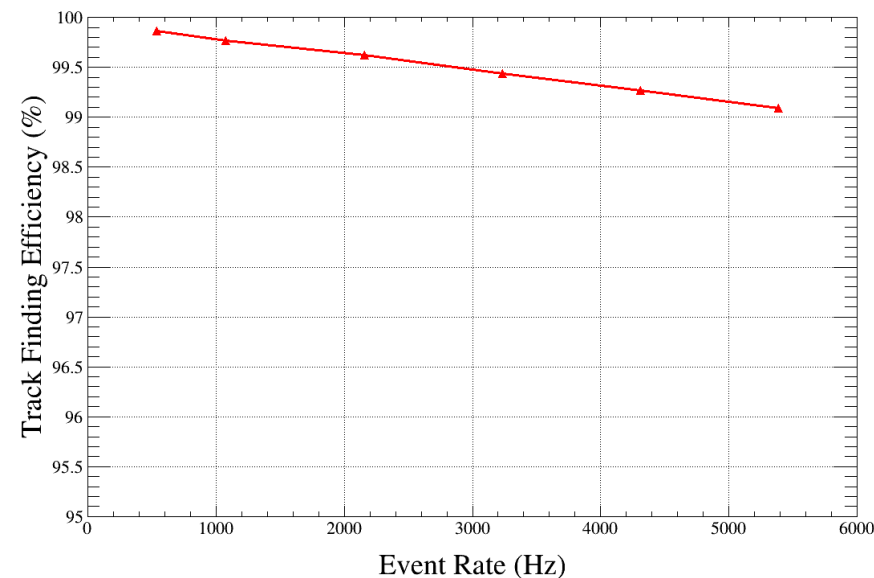
1.6 GeV 质子条件下，分别考察 dz_{DUT} 和事例率对望远镜性能的影响

DUT 与最近望远镜层间距对空间分辨率的影响



25 mm 时 DUT测量残差~ 4.8 μm
其中望远镜系统空间分辨率~ 1.8 μm

HPES预期工作事例率下的寻迹准确率



由于束流结构，宏脉冲有效期间内的事例率远高于平均事例率（40倍），望远镜一帧内包含多条参考径迹
结论：HPES预期工作条件下望远镜寻迹准确率好于99%

模拟条件：1.6 GeV 质子；六层望远镜 + 1 层 DUT（采用相同模型）；望远镜模块间距=25 mm

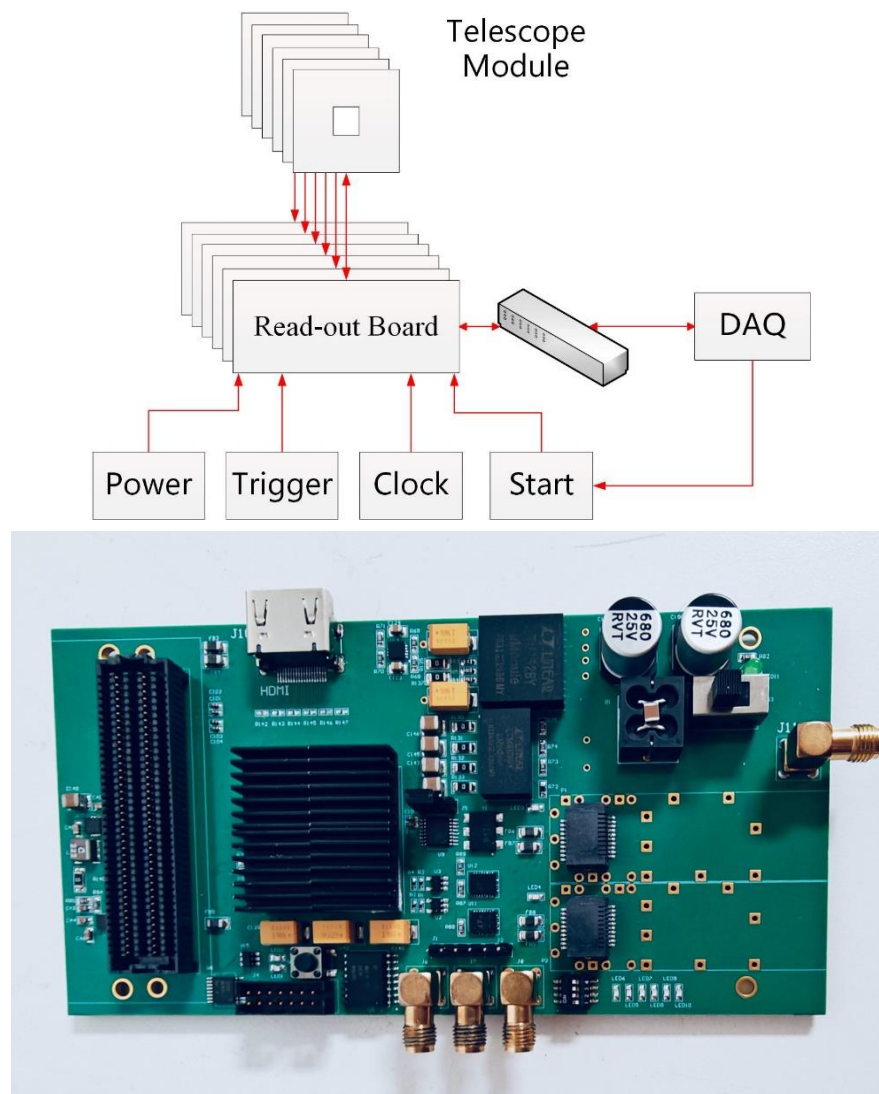
六层探测模块的独立读出与同步控制

各层独立完成数据打包与传输，统一的时钟信号和控制信号保证六层望远镜同步运行

电子学



SNS



读出、控制与数据传输

独立读出

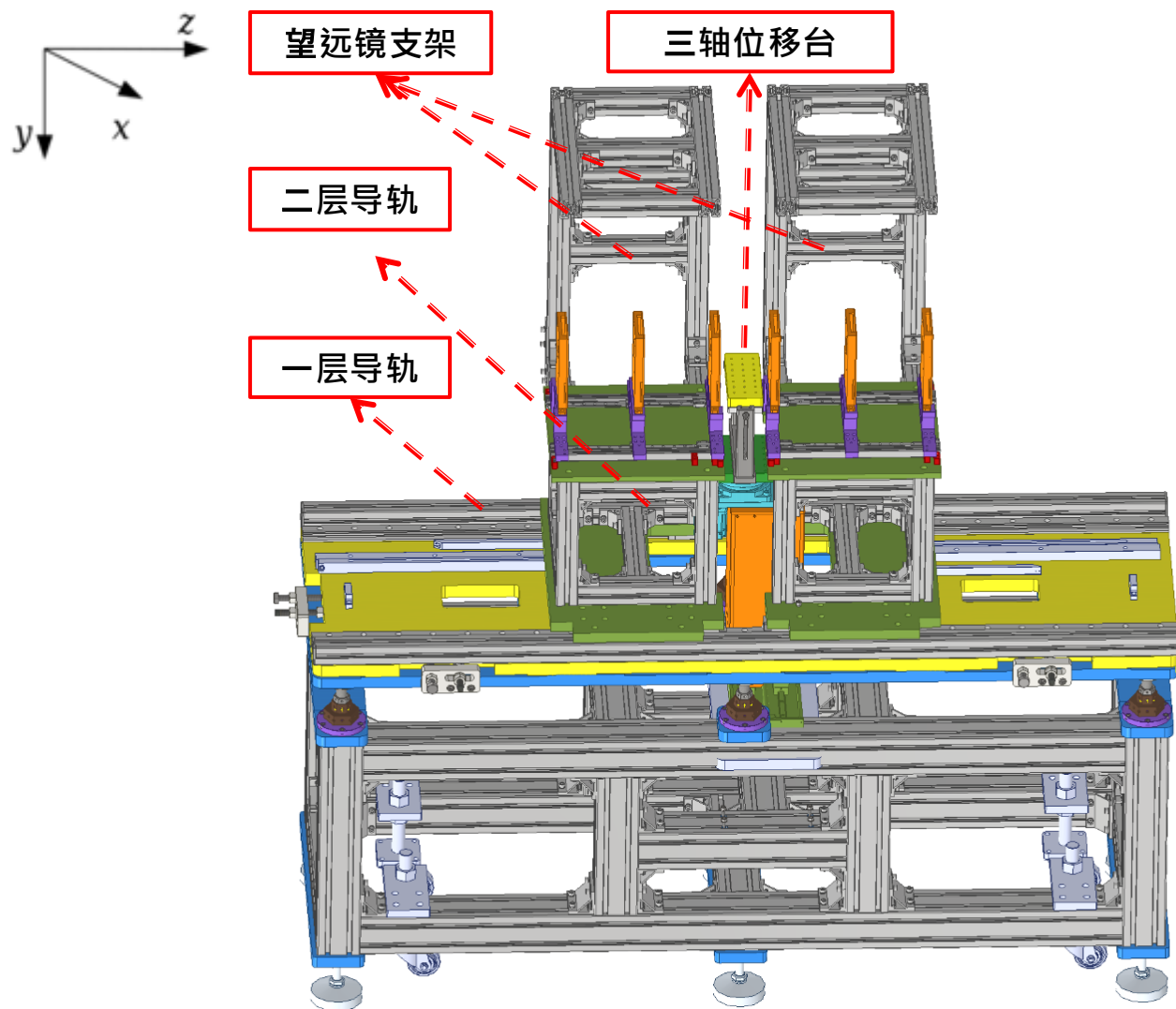
每层配置一块基于 FPGA 的读出板，经 FMC 接口与探测模块连接；FPGA 完成数据缓存与打包。

数据传输

SiTCP 千兆以太网用于配置下发和数据传输，DAQ 在线监视各层运行状态与数据质量。

同步控制

控制板统一分发 Start/Stop 信号，时钟板向六层提供 100 MHz 参考时钟。

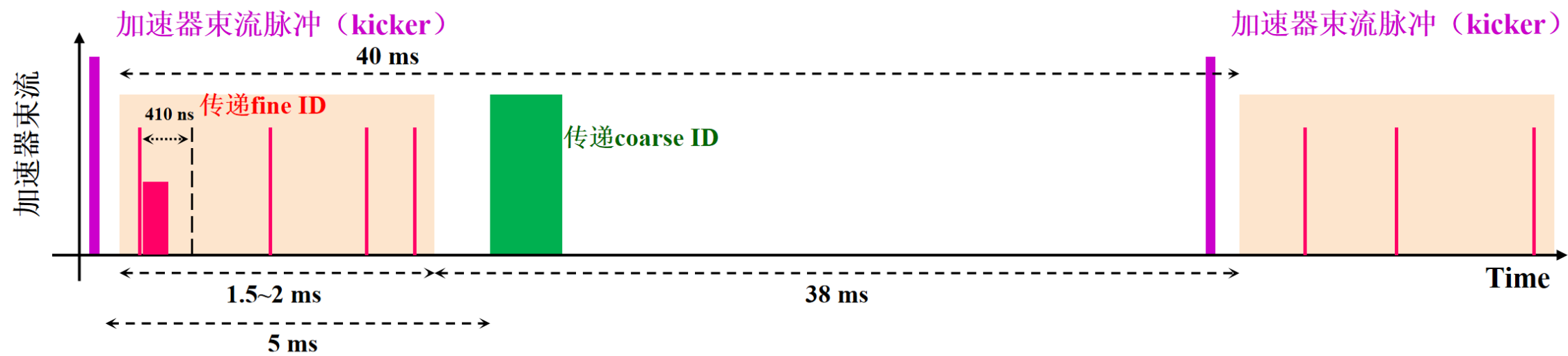


实验台设计

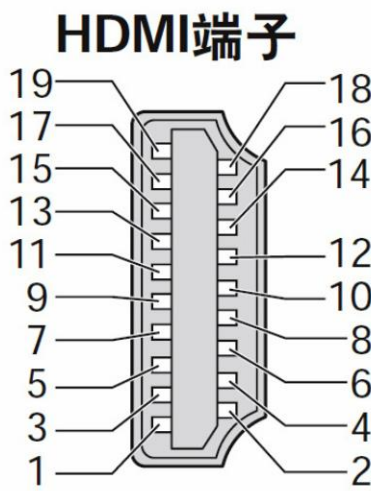
- 前后两组支架分别用于安装 6 层望远镜模块
- 双层导轨分别用于调整望远镜模块间距和 DUT 间距
- 三轴位移台用于安装 DUT，并支持远程控制 DUT 位置与旋转角度
- 光栅尺和机械读数可快速读取 DUT 与望远镜各层位置，用于后续探测器位置的算法校准

触发系统与TLU（触发逻辑单元）协议

coarseID 标识宏脉冲，fineID 标识宏脉冲内事例



- 前后两组闪烁光纤探测器用于提供触发信号
- TLU 完成触发信号符合，并通过 HDMI 接口发送 TriggerID
- 宏脉冲期间，事例触发后发送 10 bit fineID
- 宏脉冲间隙，32 bit coarseID 用于标识宏脉冲



HDMI PIN	TLU SIGNAL
1	CLK
2	GND
3	CLK
4	CONT
5	GND
6	CONT
7	BUSY
8	GND
9	BUSY

HDMI PIN	TLU SIGNAL
10	SPAR
11	GND
12	SPAR

HDMI PIN	TLU SIGNAL
13	NC
14	+3.3V DC

HDMI PIN	TLU SIGNAL
15	TRIG
16	TRIG
17	GND

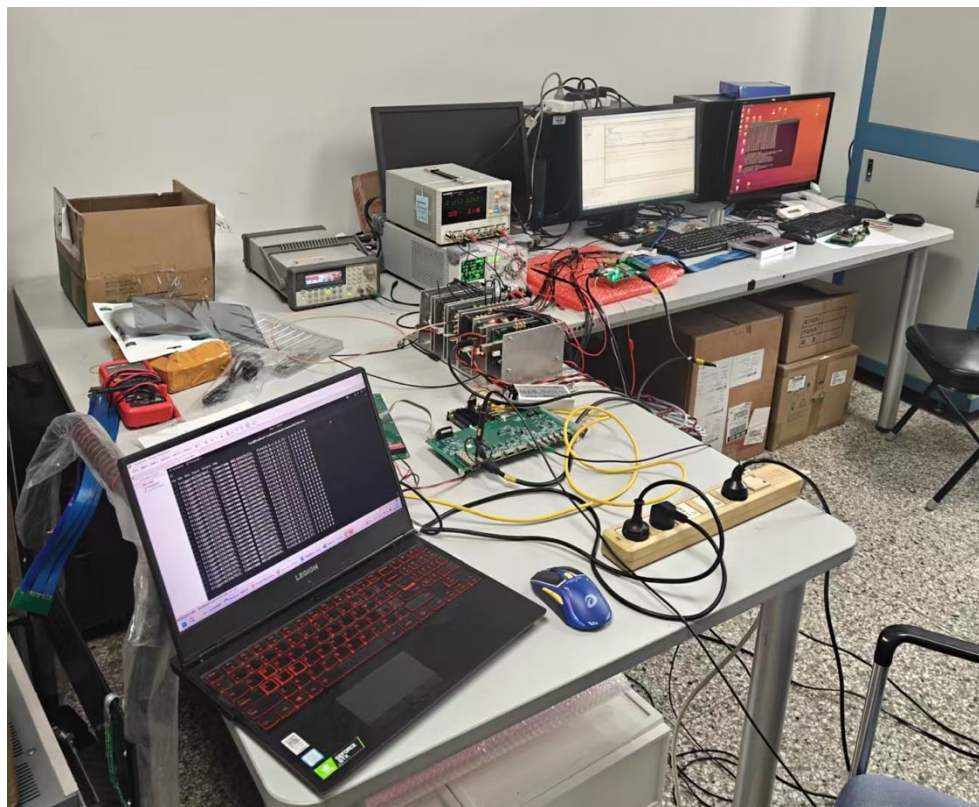
HDMI PIN	TLU SIGNAL
18	TAG
19	TAG

由高能物理研究所钱森老师、郑州大学物理院刘义、谷肖飞老师完成

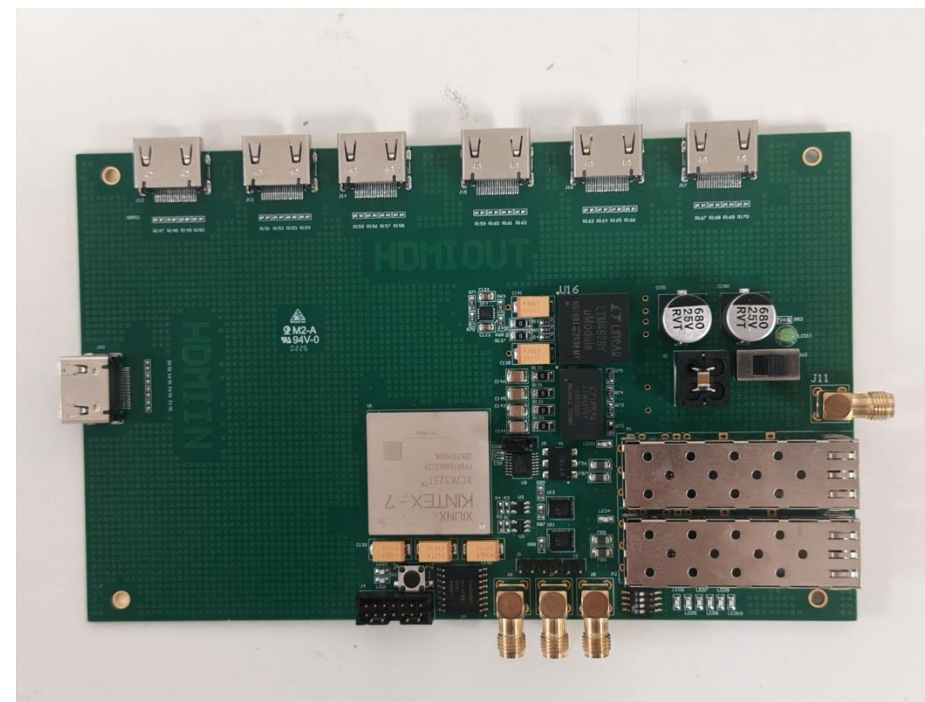
望远镜系统与TLU联调

TLU 扇出板接收 TriggerID，并同步分发至六层读出板完成帧级对齐

触发联调



望远镜电子学—TLU 联调



TriggerID 扇出板 (1 路输入 / 6 路输出)

- TLU 扇出板经 HDMI 连接 TLU，适配触发协议并接收 fineID；当前测试未启用 coarseID。
- 扇出板通过 6 路 HDMI 将同一 TriggerID 同步分发至六层后端读出板。
- 各读出板 FPGA 将 TriggerID 与对应帧数据对齐并写入数据包

1.3 GeV 电子束验证整机读出与重建

五层提供参考径迹；闪烁体触发由 TLU 完成符合与同步

束流实验



实验条件与验证目标

实验条件

束流与几何：1.3 GeV 电子束；第 3 层为 DUT，其余 5 层提供参考径迹，层间距 25 mm。

触发与同步

触发：前、后两块 10 cm × 10 cm 闪烁体提供触发信号。

同步：TLU 完成符合并输出 TriggerID，经扇出板同步分发至六层读出板。

实验目的

性能验证：验证空间分辨率、探测效率等主要性能参数。

链路验证：验证 TLU 协议适配、TriggerID 分发及写入数据包的完整链路。

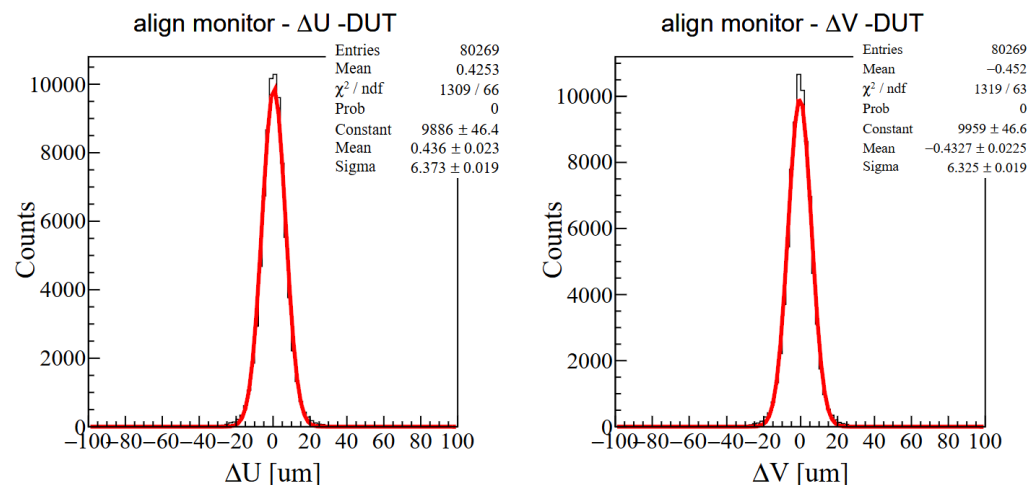
束流实验性能：分辨率与探测效率达到预期

束流结果



DUT 残差 6.37 μm ; 单层 5.77 μm , 望远镜 2.70 μm ; 推荐阈值 5.5–6 σ

DUT 测量残差



关键性能

6.37 μm

DUT (第三层) 测量残差

5.77 μm

单层模块空间分辨率

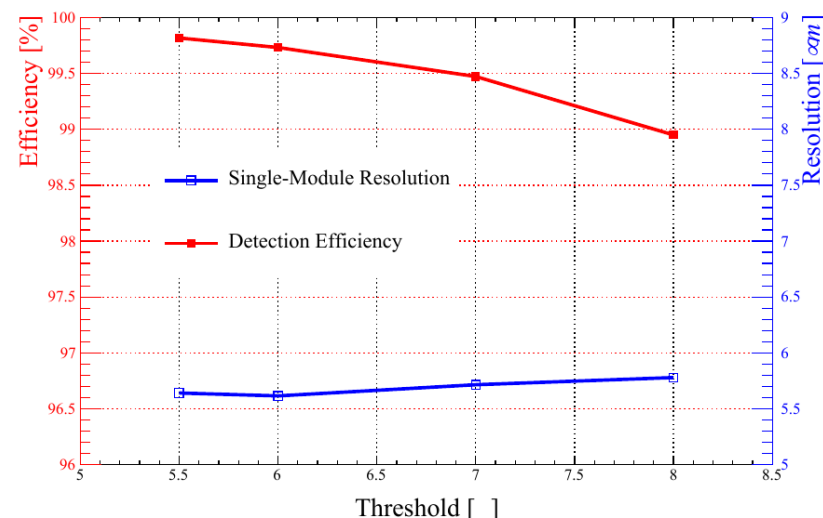
2.70 μm

望远镜空间分辨率

5.5–6 σ

推荐阈值工作区间

不同阈值下的单层空间分辨率与探测效率



结论

5.5–6 σ 工作区间：探测效率 >99.5%，空间分辨率保持稳定。

提高阈值会抑制电荷共享，使空间分辨率与探测效率同步下降。

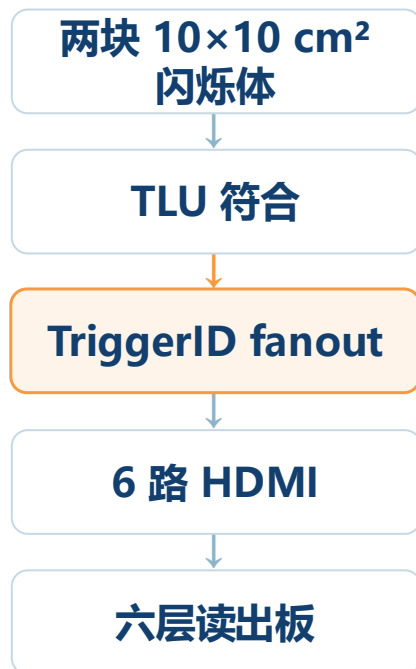
TriggerID 六层同步写入验证

同一 TriggerID 在六层读出板中的写入帧保持一致

束流验证

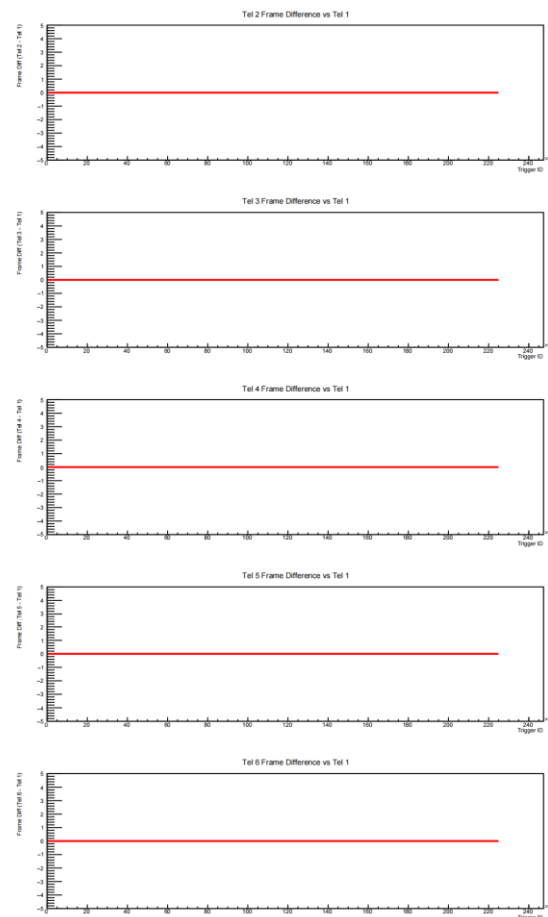


Tel 2-6 相对 Tel 1 的TriggerID写入帧号差



两块闪烁体完全覆盖 2×2 cm² 芯片区域。

TLU 对两路闪烁体信号符合，生成 TriggerID。TriggerID 经 fanout 同步分发至六层读出板，各层将其写入对应帧的数据包。



同一 TriggerID 的六层写入帧号差

关键结论

以 Tel 1 为参考，对比其余五层TriggerID写入的帧数据包ID结果表明 TriggerID 在六层望远镜中实现帧级同步写入。

验证了 TLU → 触发扇出 → 六层读出板的 TriggerID 同步分发一致



先基于帧号独立重建径迹，再检查 TriggerID 变化帧与径迹窗口的对应关系

分析方法

1 统一时钟与控制

六层读出使用统一时钟和控制信号，**帧数据保持同步**

2 独立寻迹与重建

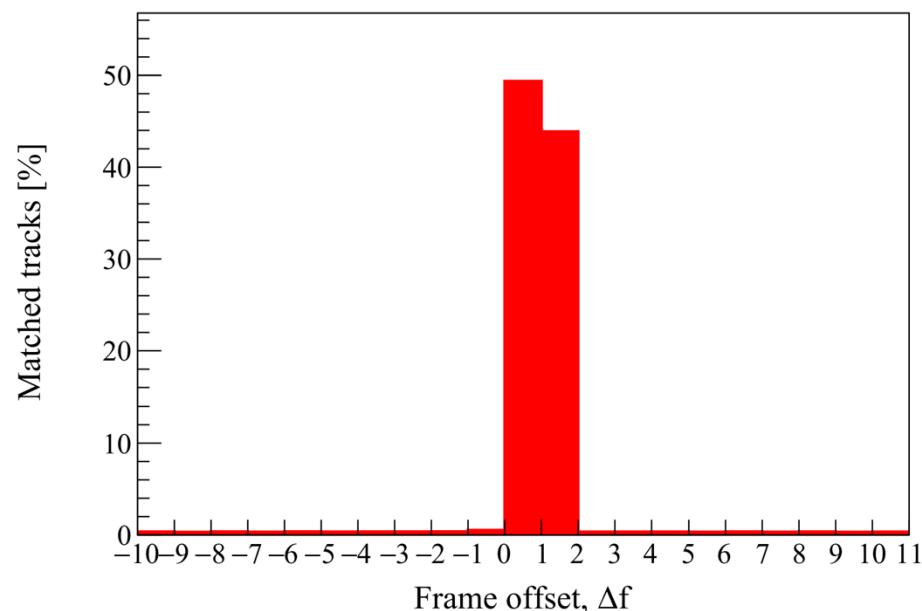
不引入 TriggerID
仅依赖帧数据完成参考径迹重建。

3 搜索 TriggerID 变化

对每条成功重建的径迹，在附近帧内搜索是否有对应的 TriggerID

$$\Delta f = f_{\text{trigger}} - f_{\text{track}}$$

TriggerID 变化帧相对径迹帧的偏移



关键结论：成功匹配的径迹主要集中在 $\Delta f = 0$ 和 $\Delta f = 1$ ，对应 TriggerID 位于两帧寻迹窗口内。
该结果表明 TriggerID 与径迹击中数据在帧级上保持一致。

两项检查共同验证了 TriggerID 和对应的击中数据实现了帧级别的数据对齐。

HEPTel 已完成系统研制与束流验证

后续将进行不同类型的DUT与束流望远镜系统之间的束流实验

01

系统

六层超薄MAPS型探测模块
单层物质质量约 $0.061\% X_0$

02

性能

单层 $5.77\ \mu\text{m}$ · 望远镜 $2.70\ \mu\text{m}$
探测效率 $> 99.5\%$

03

触发

TLU $\rightarrow$ fanout $\rightarrow$ 6 路
HDMI
TriggerID 写入六层数据包

谢谢!

欢迎讨论

李岚坤 · 中国科学院高能物理研究所 / 散裂中子源科学中心

BACKUP



束流望远镜模拟：

- 1.6 GeV的质子源
- 探测器模型：6层望远镜系统+DUT，每层物质量为0.061% X_0 ，间距25 mm
- 芯片像素尺寸设置为：20.7 μm

空间分辨率：

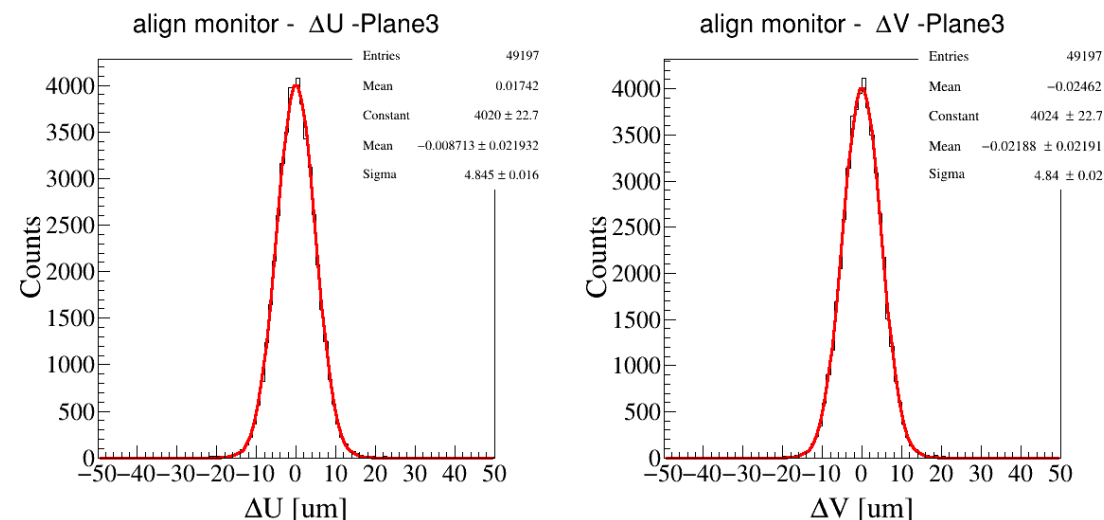
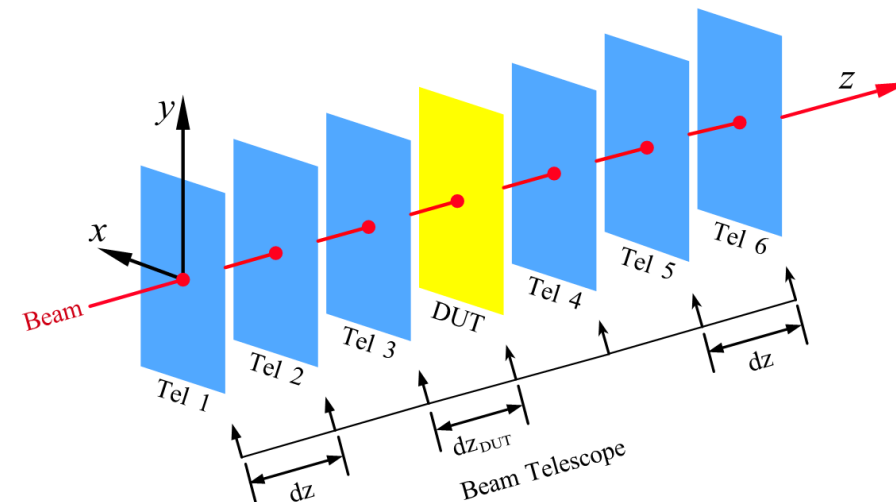
- DUT的测量残差 $\sim 4.84 \mu\text{m}$

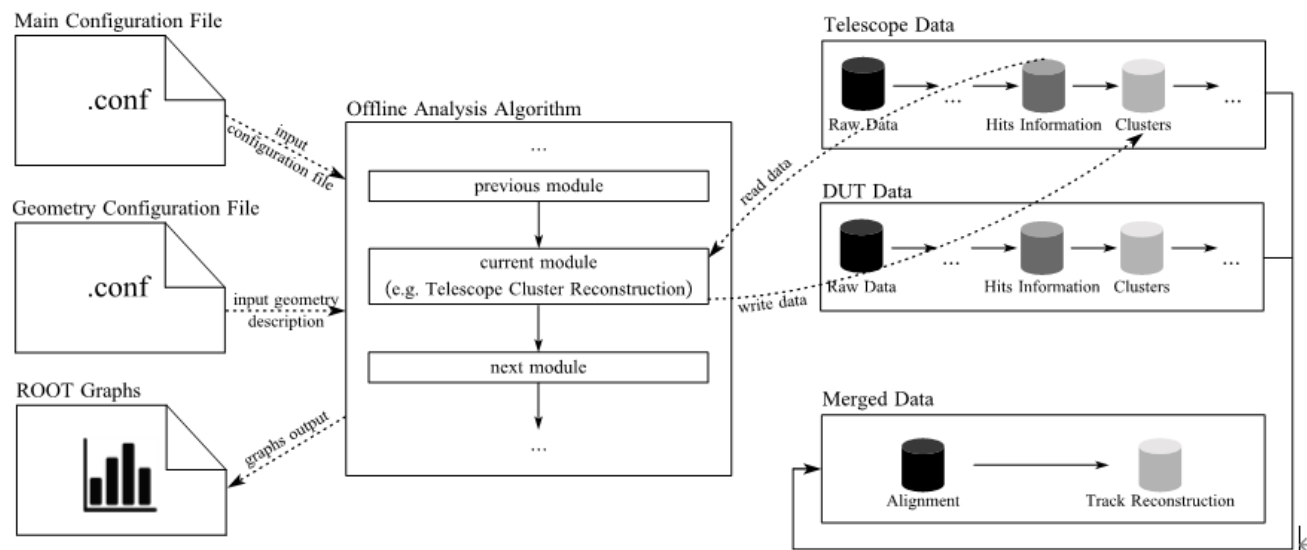
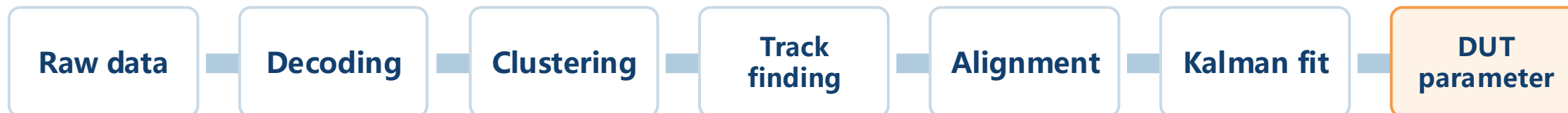
$$\text{DUT的测量残差: } \sigma_{\text{meas}}^2 = \sigma_{\text{DUT}}^2 + \sigma_{\text{tel}}^2$$

$$\sigma_{\text{tel}}^2 = k \sigma_{\text{DUT}}^2$$

$$k = \frac{\sum_i^N z_i^2}{N \sum_i^N z_i^2 - \left(\sum_i^N z_i \right)^2}$$

- DUT的空间分辨率 $\sim 4.48 \mu\text{m}$
- 望远镜系统的空间分辨率 $\sim 1.83 \mu\text{m}$





束流实验离线分析框架，可接入多种 DUT

重建与校准

- 相邻着火像素重建Cluster，中心法计算簇团位置
- 采用多种寻迹算法，由望远镜层击中建立候选径迹
- 基于TriggerID实现DUT和望远镜的事例对齐
- 迭代校正望远镜层和DUT的位移和旋转校准参数
- 多种重建算法用于重建参考径迹信息
- 将参考径迹外推至 DUT，计算DUT测量残差与探测效率

