



应用于大气密度成像的 μ 子望远镜读出电子学系统

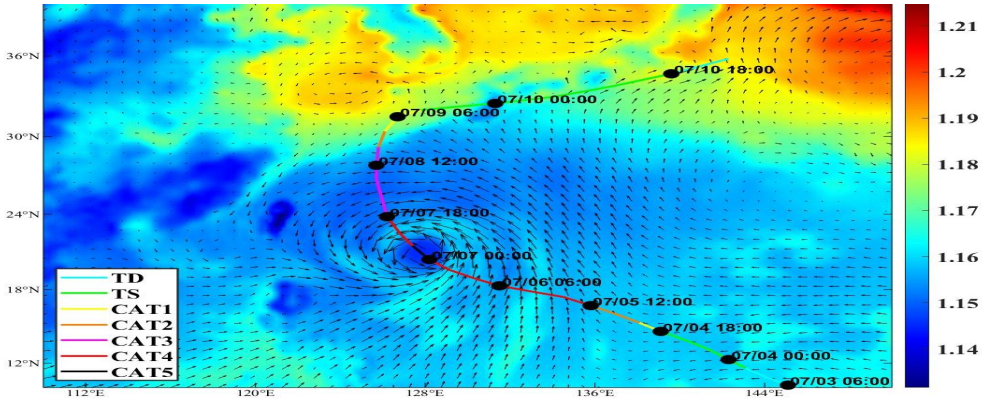
董佳, 孙小涵, 贾康, 李长裕, 胡坤, 祝成光

第十三届全国先进气体探测器研讨会, 上海

2025.8.22

一、项目背景

➤ 大气密度成像：为精确识别台风中心位置、强度和结构演变提供关键数据依据。

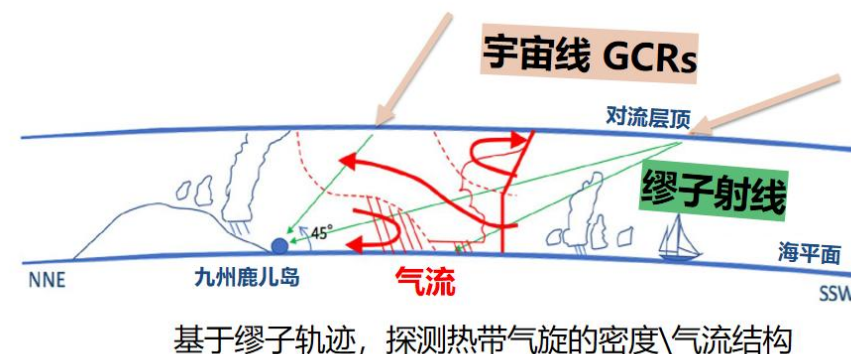


➤ 传统探测瓶颈

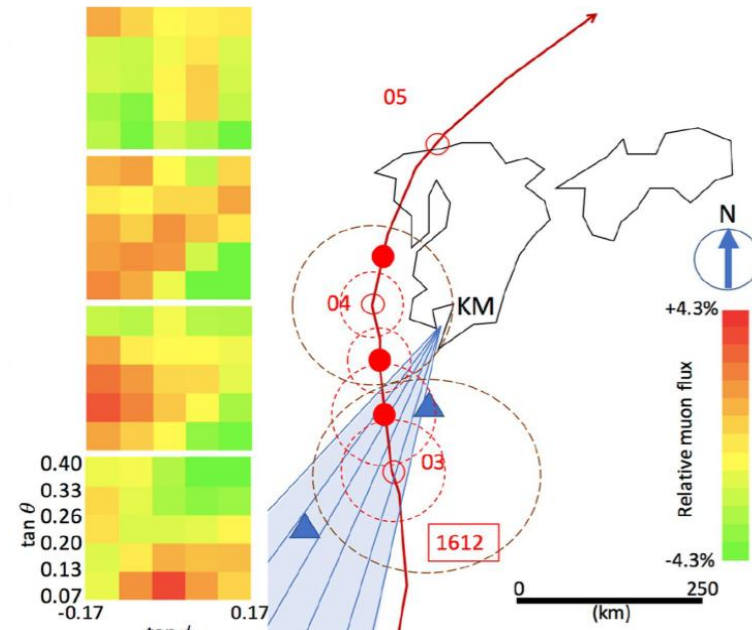
探测技术	核心缺陷	台风监测局限
气象卫星	易受云层、气溶胶遮挡	台风眼区因厚云层覆盖，结构成像失败率 > 60%。
探空气球	单点观测 + 时间分辨率低	台风路径上单站点每日仅 1-2 次数据，难追踪强度突变。
激光雷达	雨雾、沙尘导致信号严重衰减	台风外围暴雨区，探测距离缩至正常 1/5，无法穿透螺旋雨带。

➤ muon穿过大气时与大气原子核相互作用，其**通量和方向变化**可反演大气密度分布。

- ◆ 穿透性强，可获取**台风眼**中心数据。
- ◆ 成本低，可大面积重复部署对台风**多方位**监测。
- ◆ 长期稳定运行，提供台风结构演变的**连续影像**。



探测器
阵列



不同时刻受热带气旋影响下的缪子入射角度

➤ 目标：开发小面积（ 1 m^2 ） μ 子探测器电子学系统，依托“**同济·海一号**”海上平台开展实测验证，为百平米级探测器阵列建设与高精度台风监测提供技术基础。

➤ 设计需求

- ◆ 环境适配：耐受恶劣**海洋环境**（抗盐雾、高湿度）。
- ◆ 性能匹配：优良**时空分辨率**，满足台风精细结构观测需求。
- ◆ 工程实用：成本可控，采用**模块化**结构，支持后期扩展。



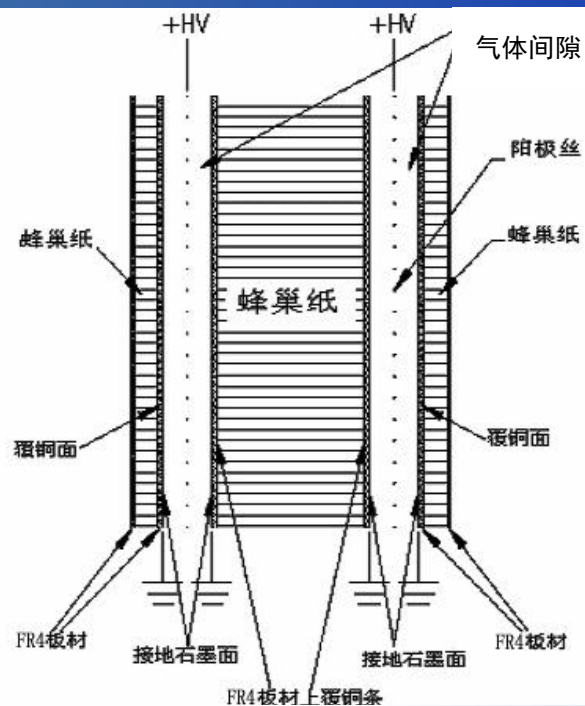
同济·海一号

二、系统介绍

- 工作气体：50%二氧化碳+50%氩气混合气体。
- 高压模块：每层探测器**独立**调节并实时显示电流、电压值。
- TGC探测器：共四层，阳极丝与阴极条信号各**192道**。



- ASDB：TGC探测器**前端读出**电路专用板。
- FEB板、DAQ板：实时判选**符合**事例和**汇总**各探测器单元事例数据。
- PC端：采集储存数据，控制气体流量、高压设置。



➤ 核心部件：高强度蜂巢平板为主体，抗形变。

➤ 整体面积：1m×1m。

➤ 通道间隔：2cm。

➤ 通道数：丝：96 条：96（双层）。

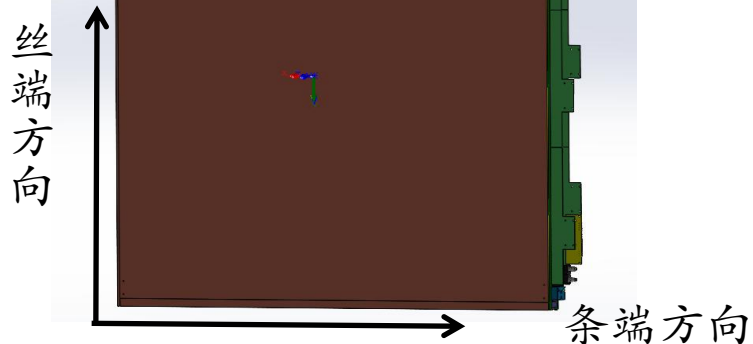
➤ 屏蔽处理

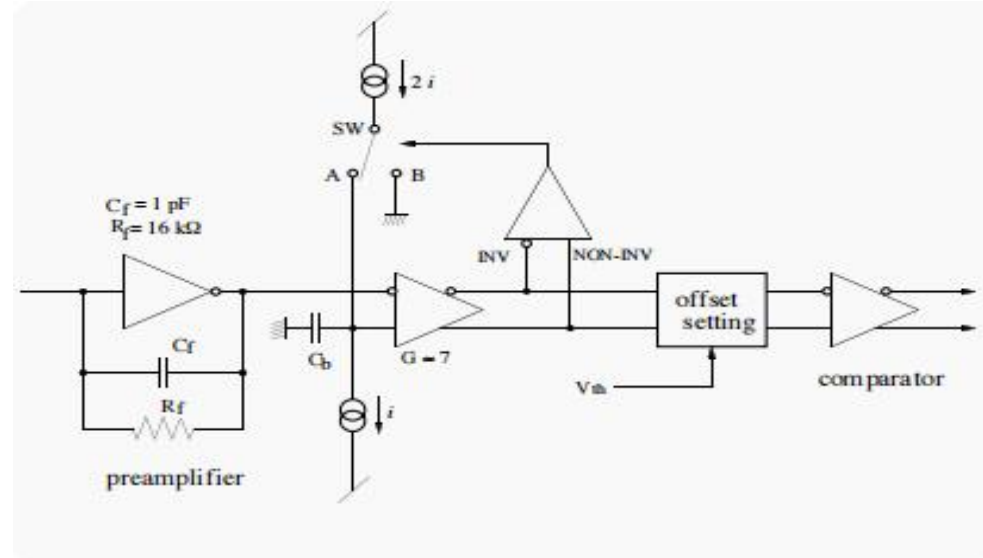
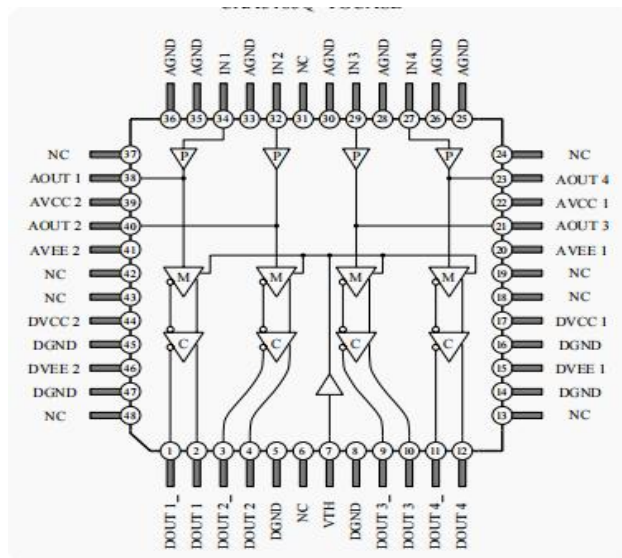
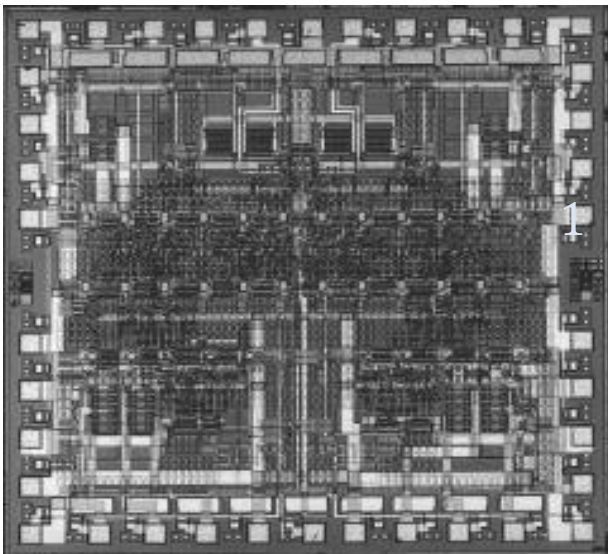
◆ 铜外壳+铜胶带包裹+点涂焊锡。

➤ 耐候性强化

◆ 气体处理：气体入口加装分子筛干燥器，吸附水分、盐雾、腐蚀性气体。

◆ 高压连接：陶瓷绝缘体，兼具耐湿、耐温、绝缘特性。





➤ 组成：48引脚，处理**4路**信号。

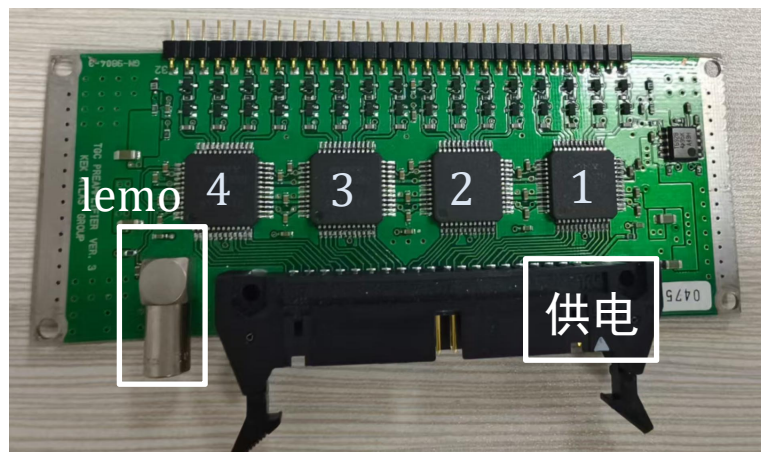
➤ 电荷输入范围：**-1.2pC ~ 2.0pC**。

➤ 阈值：外部输入，**-250mV ~ 250mV**。

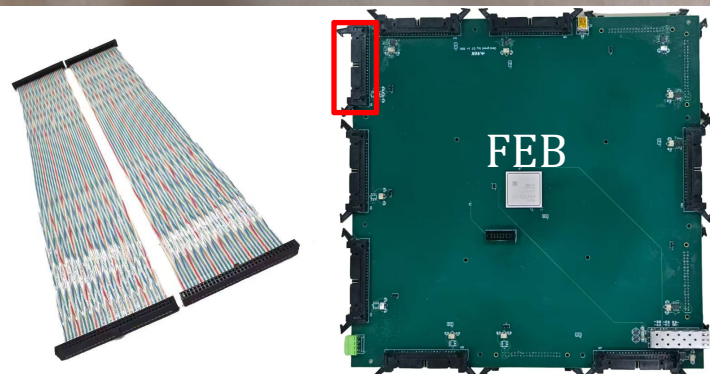
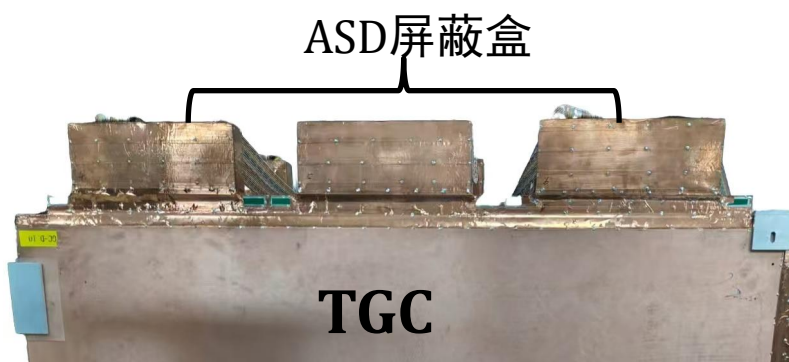
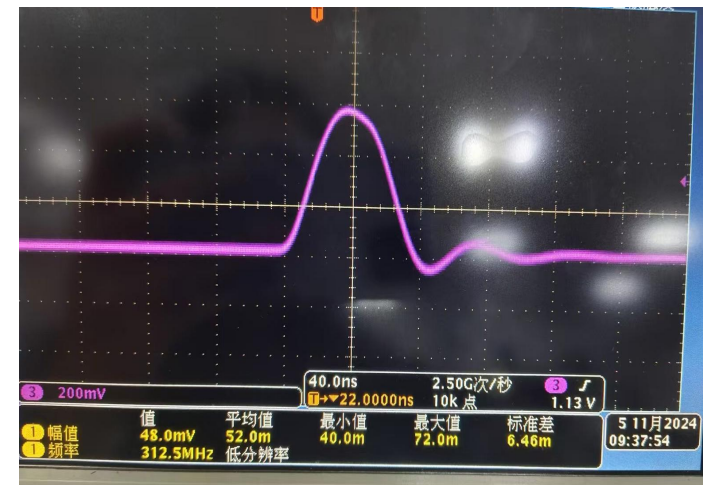
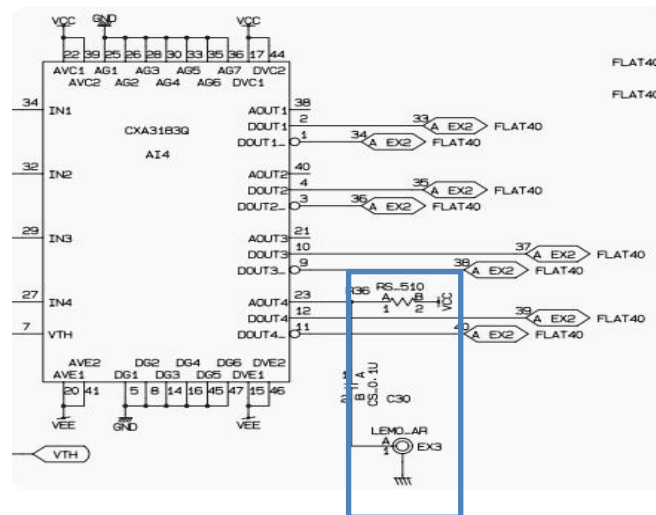
➤ 信号处理：

阳极丝/阴极条 电荷信号 $\longrightarrow$ 前放 $(G \sim 0.8 \text{ V/pC})$ $\longrightarrow$ 主放 $(G \sim 7)$ $\longrightarrow$ 甄别器 $\longrightarrow$ **LVDS** 低压差分信号

ASDB-放大成形甄别板



- 组成：含4个ASD IC，共16个通道。
- 供电： $\pm 3V$ ，GND，阈值。
- lemo口观测前放信号



- 安装位置：32pin排针直接连接在TGC室边缘。
- 后端连接：通过双绞排线连接至FEB采集板。

➤ 信号输入：共**192对**LVDS信号，对应一个TGC单元的所有信号。

➤ 信号处理：FPGA (xc7k325t)

◆ IO资源：192对差分IO。

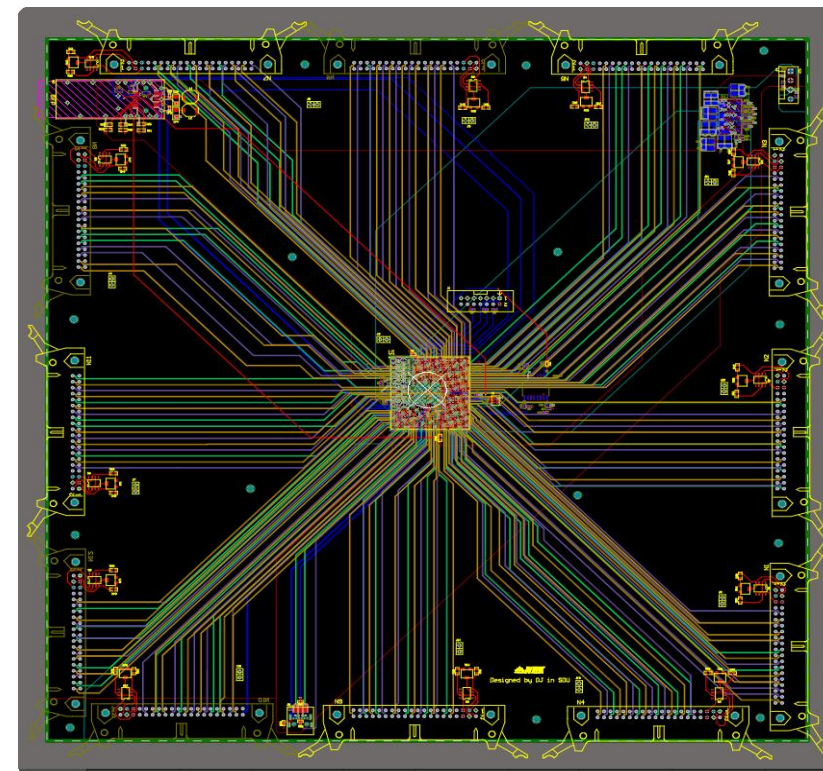
- HR bank (LVDS_25) **160对**
- HP bank (LVDS) **32对**
- LVDS、LVDS_25电平标准**兼容**

◆ 事例初筛

- 同层内丝端与条端在**时间窗**内符合触发
- 锁存通道脉宽计数(时钟10ns，位宽5bit)。

➤ 程序存储设计：

配备 **FLASH** 芯片，实现程序的非易失性存储。

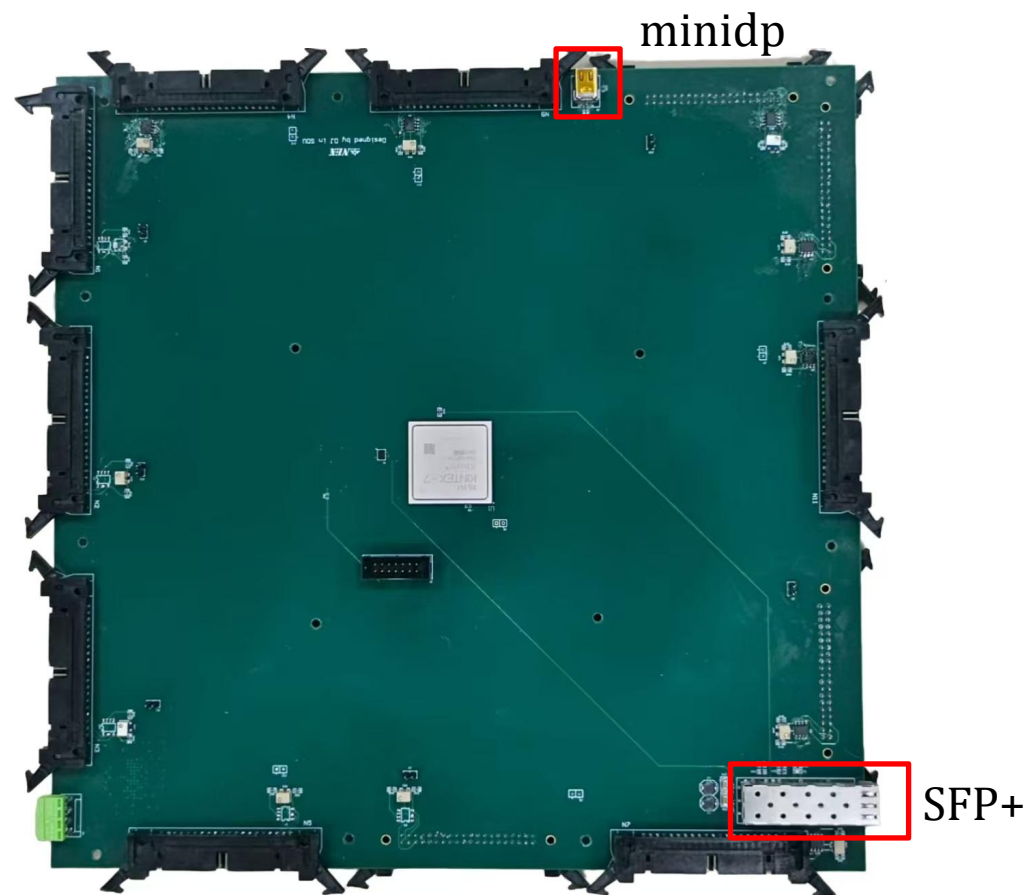


FEB PCB设计图

➤ 数据传输

- ◆ 接口：SFP+。
- ◆ 连接方式：光纤与DAQ板连接。
- ◆ 传输协议：Aurora 8B/10B。
- ◆ 传输速率：3.125G。
- ◆ 数据格式：
192*5 bit + 64 bit自定义包头包尾, 总1024bit。

➤ 扩展接口：minidp



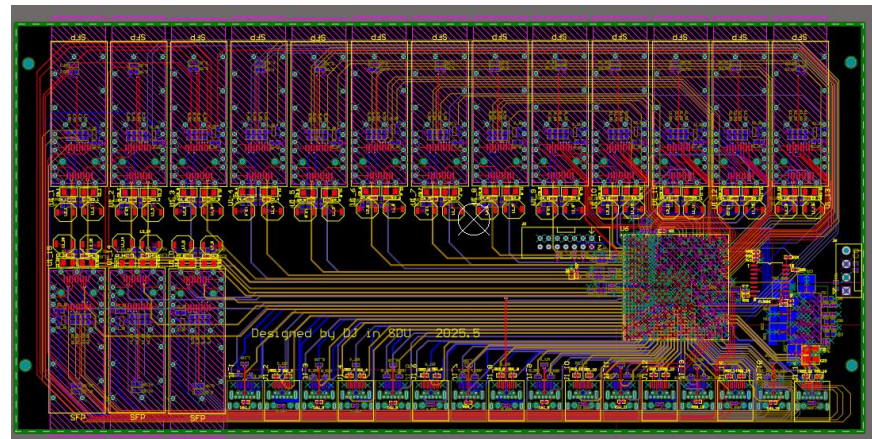
➤ 数据汇总：FPGA(xc7k325t)

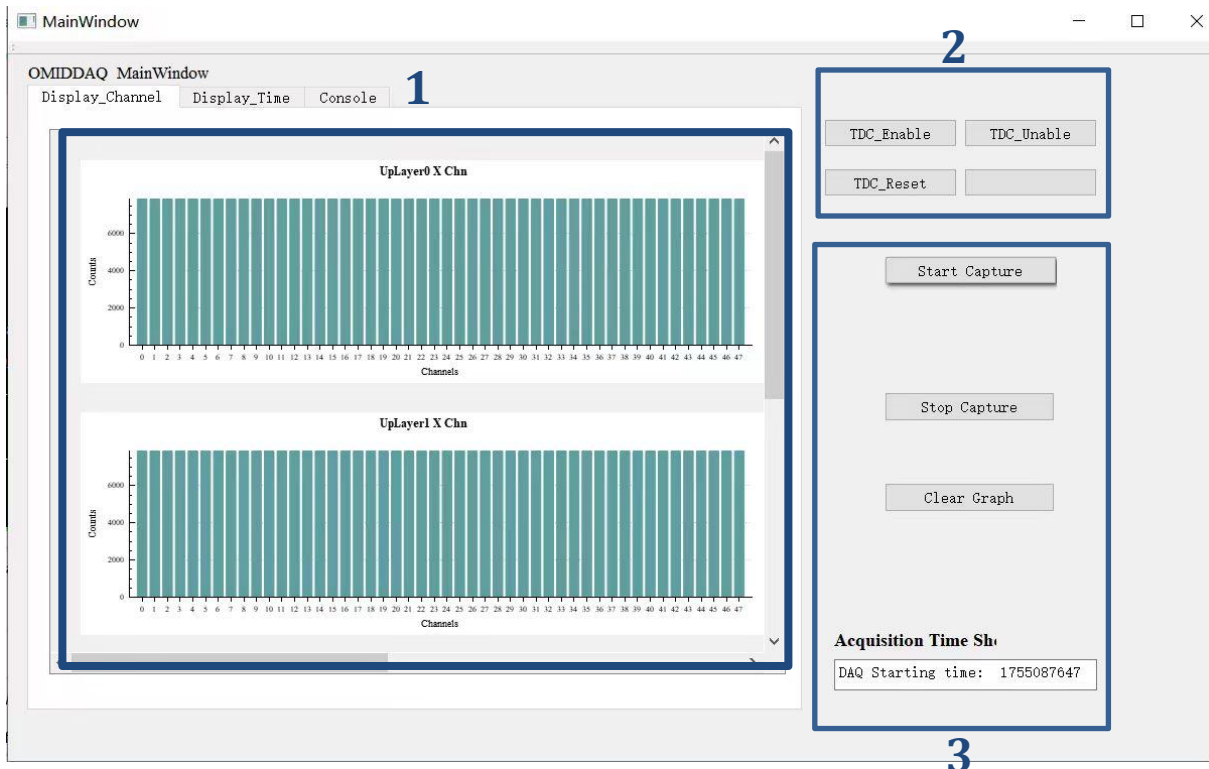
- ◆ GT资源：4个MGT bank的**16个GTX**通道全部启用。
- ◆ 事例筛选：两个TGC单元触发事例在**时间窗**内符合汇总上传。
- ◆ 程序存储设计：配备 **FLASH** 芯片。

➤ 数据传输

- ◆ 接口：SFP+。
- ◆ 连接方式：网线与PC端连接。
- ◆ 传输协议：UDP。

➤ 扩展接口：minidp

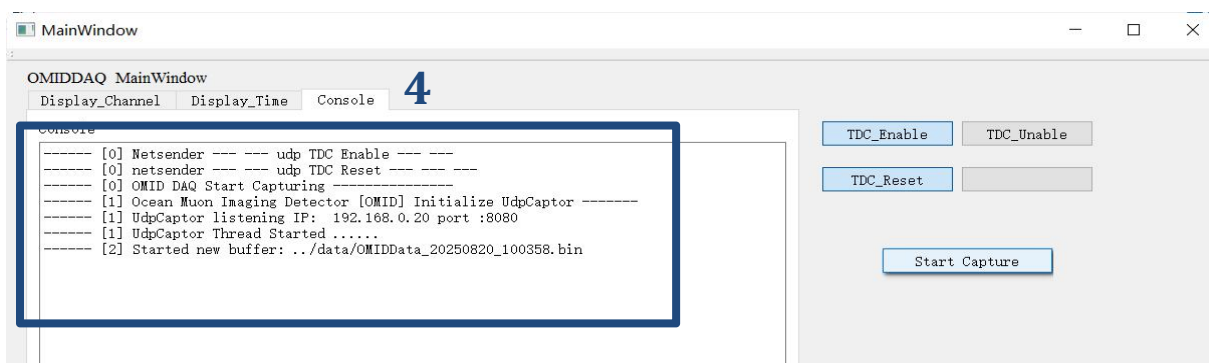




➤ 1、实时监测 384通道触发计数

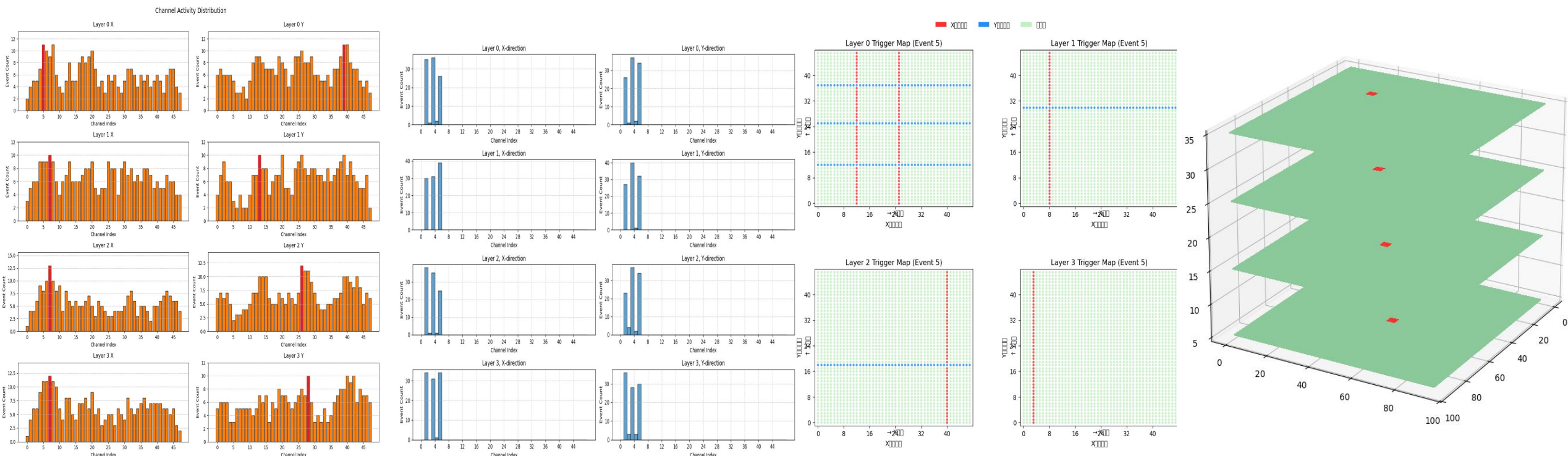
➤ 2、FPGA工作命令
(使能、停止、复位)

➤ 3、开始到停止采集时间记录



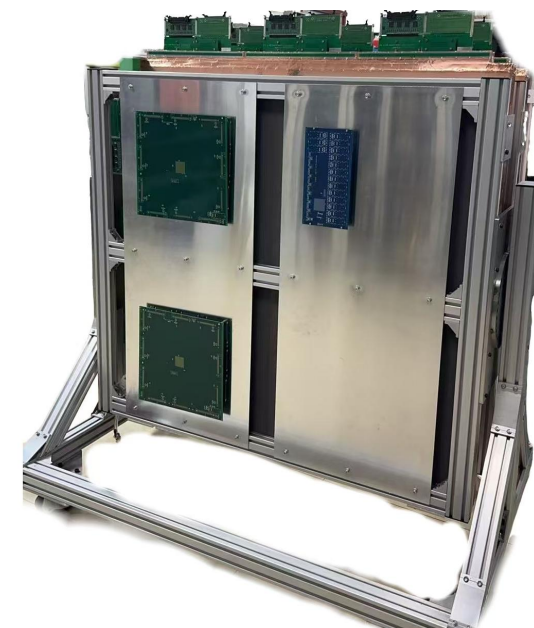
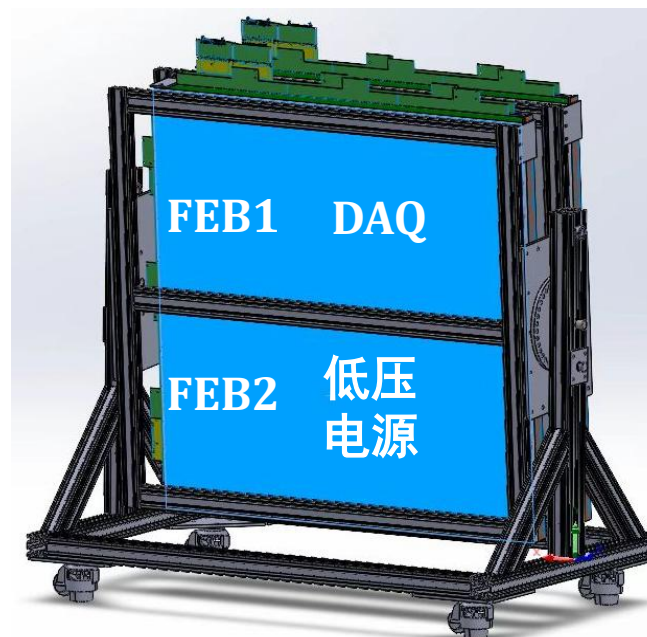
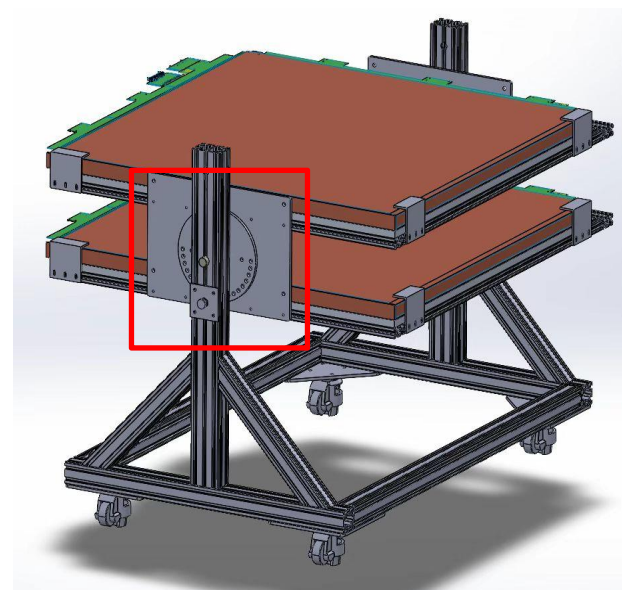
➤ 4、命令下发与数据包计数值可视化

➤ 5、定量存储数据
(连续5万个事例自动储存一个二进制文件)

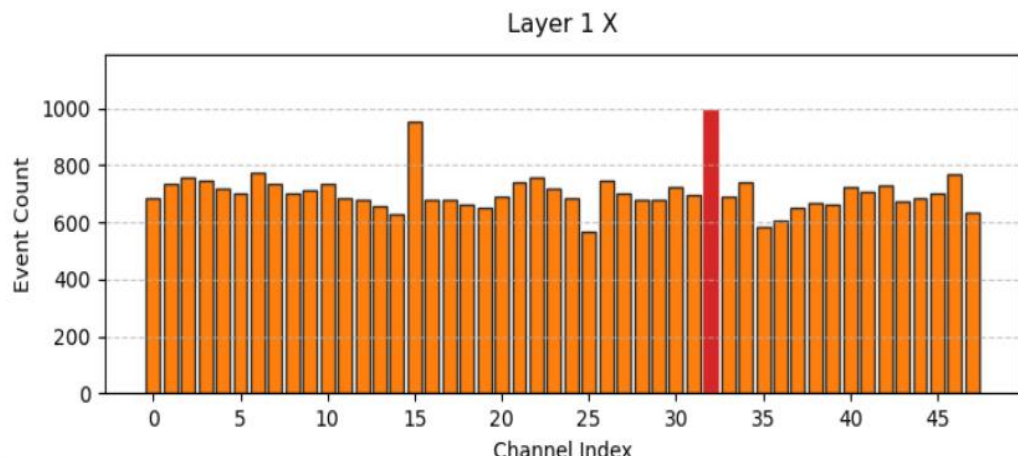


- 计数率：按层、方向细分为8组展示触发计数值。
- 每个事例在不同层、方向触发通道总数统计。
- 二维位置映射：指定事例号查看事例在每层TGC击中的位置。
- 三维径迹还原：查看粒子在探测器中的穿越径迹。

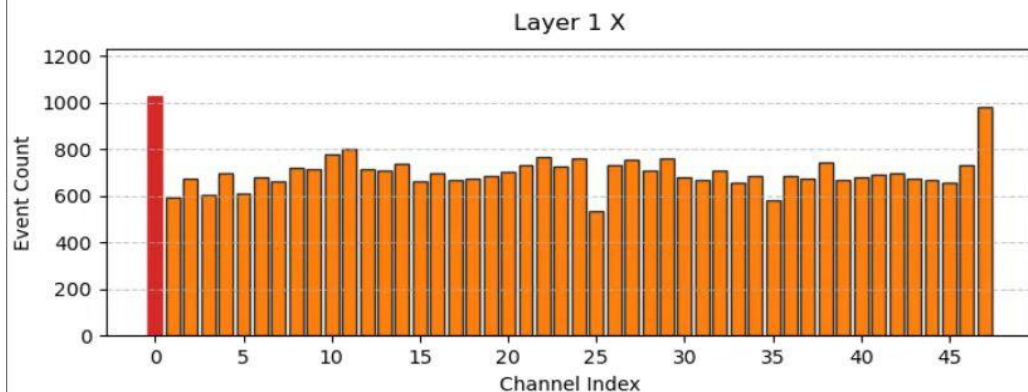
- 探测器与电子学整体模块化
(支架 $0.9\text{m} \times 1\text{m} \times 1.5\text{m}$, 可移动)
- 多方位探测:
支持探测器与水平方向夹角 $0^\circ \sim 90^\circ$ 调节。
- 电子学单元防护
PCB喷涂三防绝缘漆+烘烤干燥



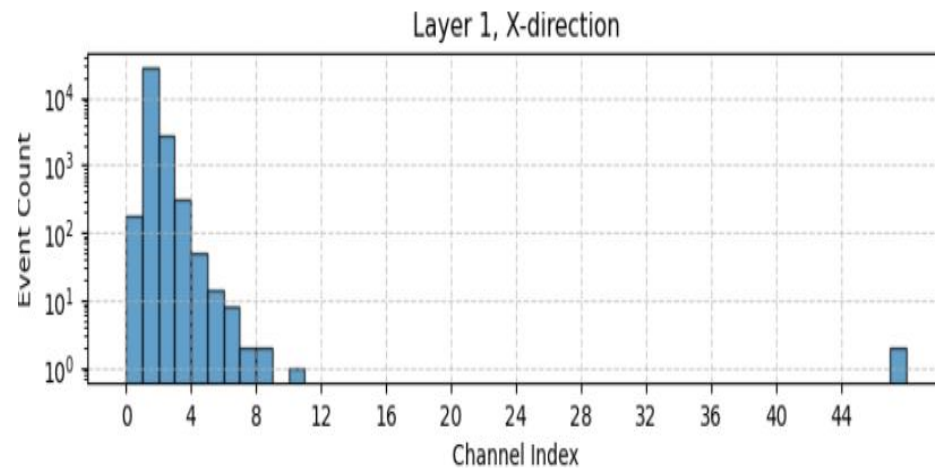
三、测试介绍



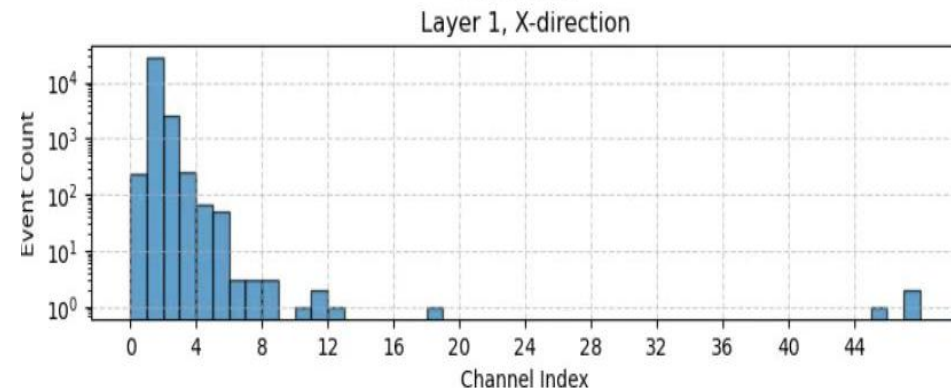
TOP-1层 丝端测试



每个通道触发总数统计



DOWN-1层 丝端测试



每个事例触发通道总数统计

➤ 探测器信号按层、方向单独测试



➤ 探测器四层符合测试（待开展）

- 电子学屏蔽
(裸露安装在支架底侧→加装屏蔽盒)
- ASD 供电优化
(FEB供电→单独电源+稳压模块)
- 程序时间窗调试
(调节合适时间窗降低噪音符合)

四、总结展望

- 探测器与电子学组装完毕，FEB→DAQ→上位机**数据传输**初步联调结束，取数正常。
- 下一步接入四层探测器真实信号，观测不同倾斜角度下的触发**事例率**。
- 实验室环境测试完毕后，运输到“同济·海一号”连续取数，检验系统在**海洋**环境下长期运行的可行性，分析对比有无台风时的数据。

感谢观看