



第二十三届全国核电子学与核探测技术学术年会(NED2026)

超级陶粲装置缪子探测器的读出电子学

Readout Electronics for Muon Detector of Super τ -Charm Facility

指导老师：胡坤

汇报人：唐净如

参与者：贺倩、孙小涵、王博、唐净如



目录

CONTENTS

01 研究背景及内容

02 原型电子学系统设计

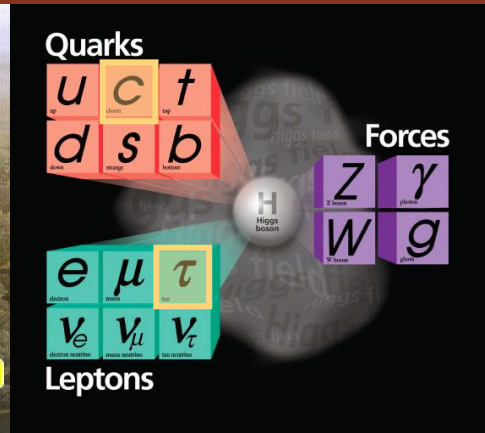
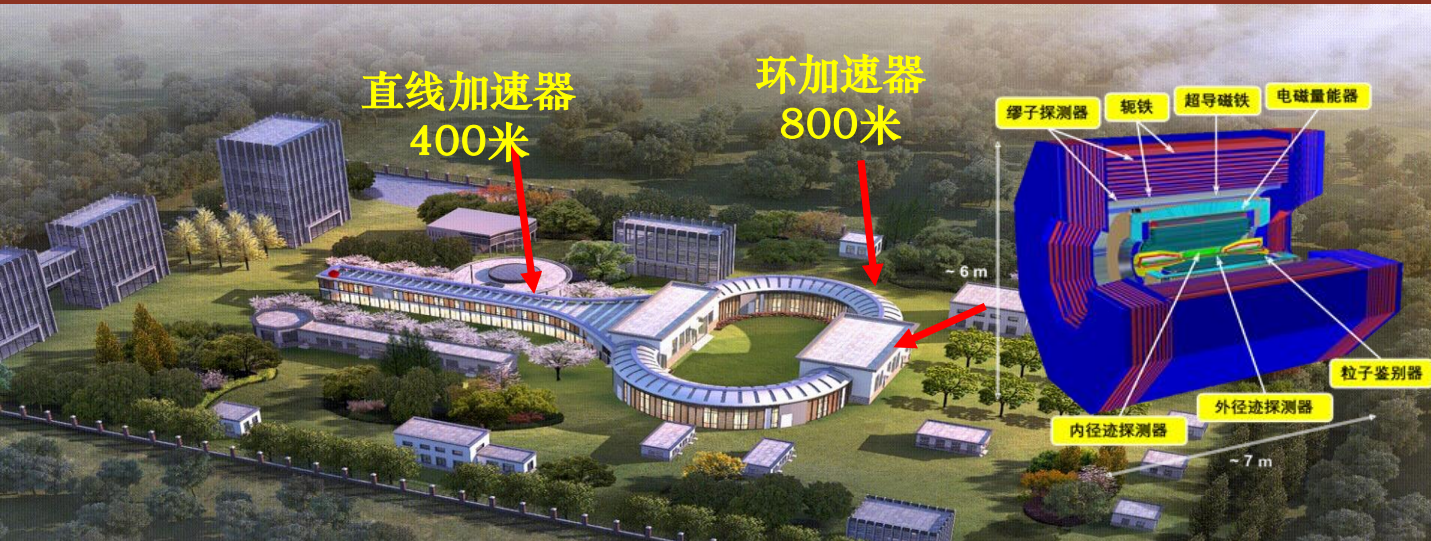
03 系统测试与验证

04 总结与展望



01 研究背景及内容

超级陶粲装置 Super Tau Charm Facility (STCF)



超级陶粲装置 (STCF) 为中国下一代正负电子对撞机的代表之一，可以实现具有2~7GeV质心能量的对撞，并且亮度高达 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 或者更高。

物理目标:

探索物质-反物质不对称性、强子结构、非微扰强相互作用以及超出标准模型之外的新物理等一系列丰富的课题。

STCF 探测谱仪由五个子探测器构成，缪子探测器为探测谱仪的 **最外层探测器**。



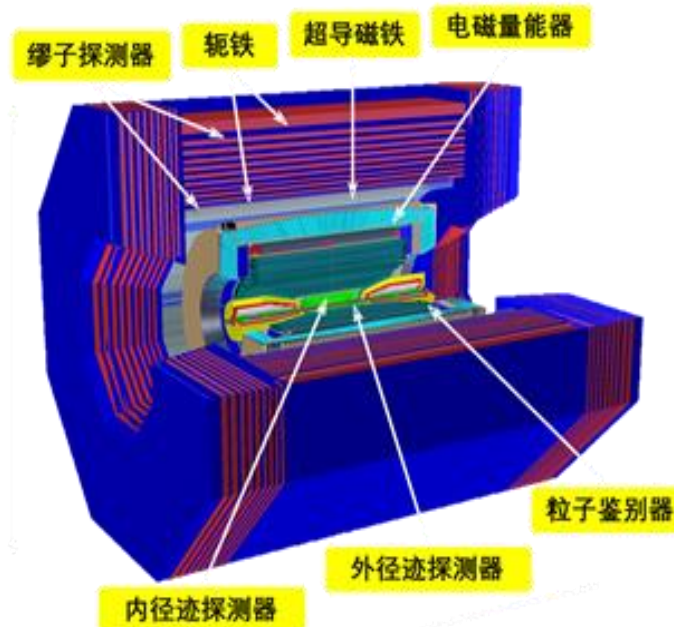
功能

- 缪子鉴别 (μ/π)
- 中性强子鉴别 (n/K_L)



指标

- 缪子探测效率 **> 95%**
- 位置分辨优于 **2 cm**



图：超级陶粲装置探测谱仪几何结构

国内 BES III: RPC缪子鉴别系统

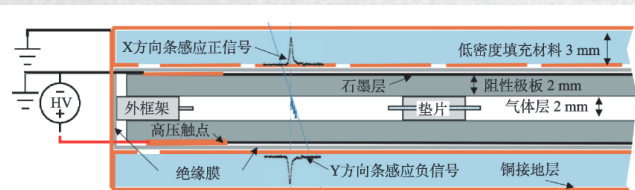


图1: 典型RPC探测器示意图

- RPC典型结构: 两块平行阻性板 (酚醛树脂/玻璃) + 中间气隙充工作气体。
- 优势: 技术成熟、**空间分辨**较好、**成本**较低
- 缺点: **死时间**较长, **高计数率**下效率易下降

国外 Belle II: 塑料闪烁体 + SiPM 读出方案

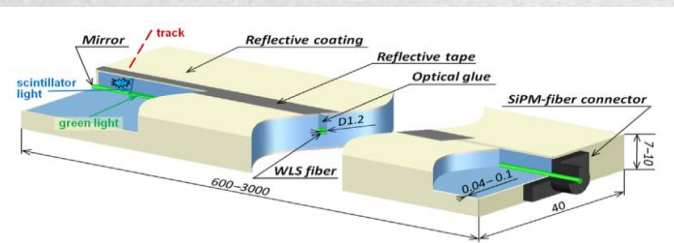


图2: 典型塑闪探测器示意图

- 塑闪典型结构: 塑料闪烁体内嵌波长位移光纤, 闪烁体表面覆盖反光材料
- 优势: **事例率高**、**信号响应快**、易加工、成本低、可以探测**中性粒子**
- 缺点: **受本底影响较大**

STCF缪子探测器要应对**高本底**、**高事例率**环境, 并且可以**鉴别中性强子**, 因此采用**RPC探测器 + 塑闪探测器**的混合设计方案。

探测器性能目标

- ◆ 缪子探测效率:
 $\geq 95\%$ ($p > 0.7\text{GeV}/c$)
- ◆ 空间分辨率:
2 cm
- ◆ 单通道计数率:
98 KHz (最高)
- ◆ 通道数:
16000 (RPC)
25280 (塑闪)



电子学设计指标

$\leq 100\text{ ps}$

时间测量精度

$\geq 100\text{ kHz}$

单通道事例率

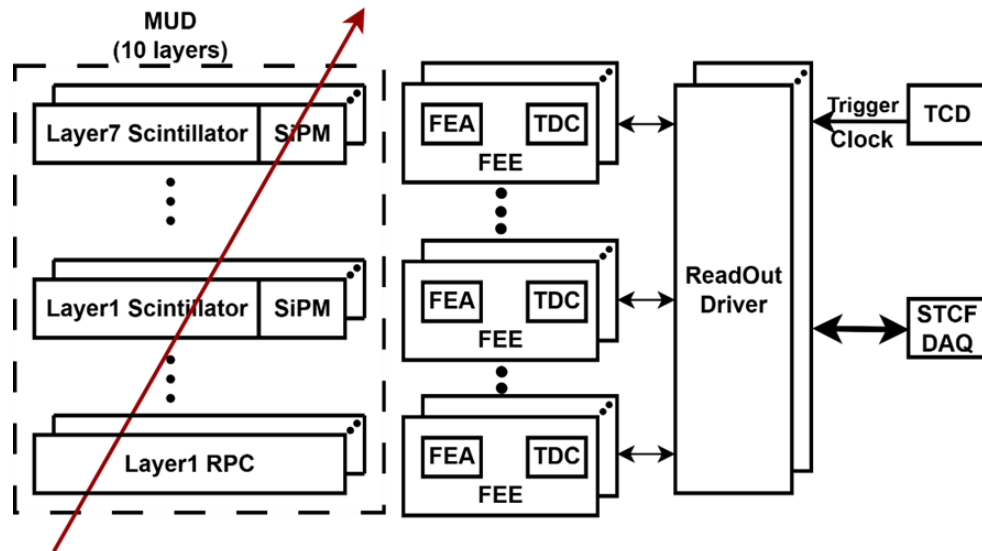
- 支持多通道并行采集
- 实现100ps以内时间精度
- 单通道事例率高于100KHz
- 满足高本底环境下稳定运行

基于以上需求指标，本研究设计并完成了基于FPGA的32通道原型电子学系统



02 原型电子学系统设计

信号链路：探测器信号→前放→前端板→TDC模块→数据汇总→DAQ



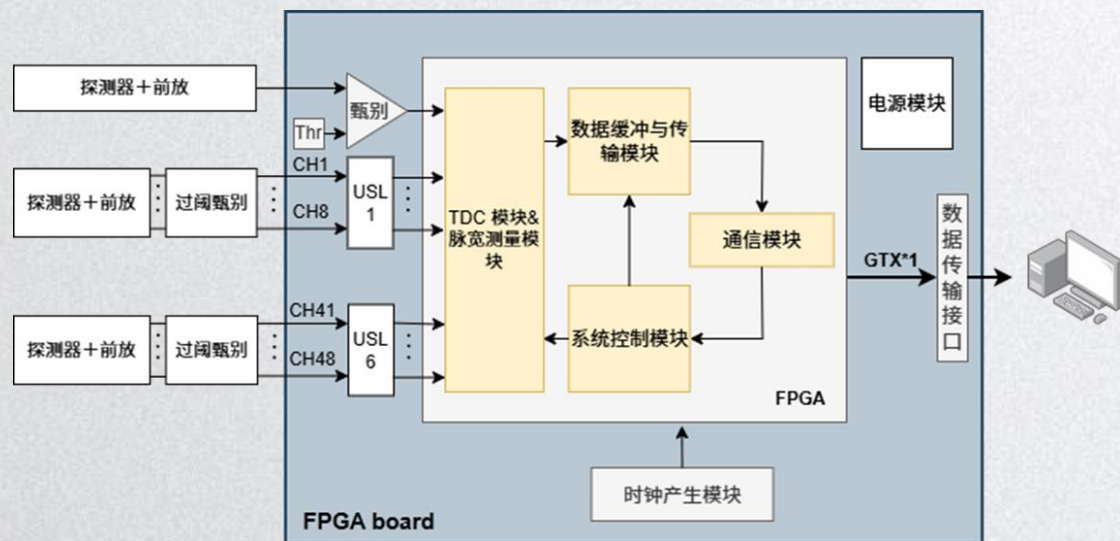
图：超级陶粲装置缪子探测器读出电子学总体方案

工程阶段

- 面向最终系统应用
- 设计抗辐照前端放大器 ASIC
- 设计多通道抗辐照 TDC 芯片
- 降低功耗并提升通道集成度

原型阶段 ★

- 基于商用分立器件构建前端放大器
- 基于FPGA实现TDC与脉宽测量
- 用于样机测试与ASIC方案验证



图：缪子探测器原型读出电子学架构

前端模拟处理+后端FPGA数字处理隔离

前端放大电路

分别针对RPC和塑料闪烁体的信号特点进行前放的匹配设计

前端过阈甄别板

- 将模拟信号转换成数字脉冲
- 完成时间信息的精确拾取

多通道信号采集模块

- 高精度TDC时间测量
- 脉宽测量
- 硬件时间窗判选
- 数据组包上传

前端放大模块对探测器输出的微弱信号进行**放大整形**。RPC与塑料闪烁体探测器信号特性不同，需**分别设计**匹配的前端放大模块。



图1: RPC 前置放大器实物图



图2: 塑闪前置放大器实物图

RPC端: 匹配电阻优化+ AD8000闭环放大 → 抑制反射，保留脉宽特征

塑闪端: SiPM与放大器背靠背排列 → 大幅缩短连接路径，减小寄生电容，保持快上升沿

前端过阈甄别板主要功能是**定时甄别**。探测器输出并放大的模拟信号经过高速比较器 **ADCMP600** 转换为数字脉冲，而阈值的设定由多通道 DAC 芯片 **AD5629** 动态控制。

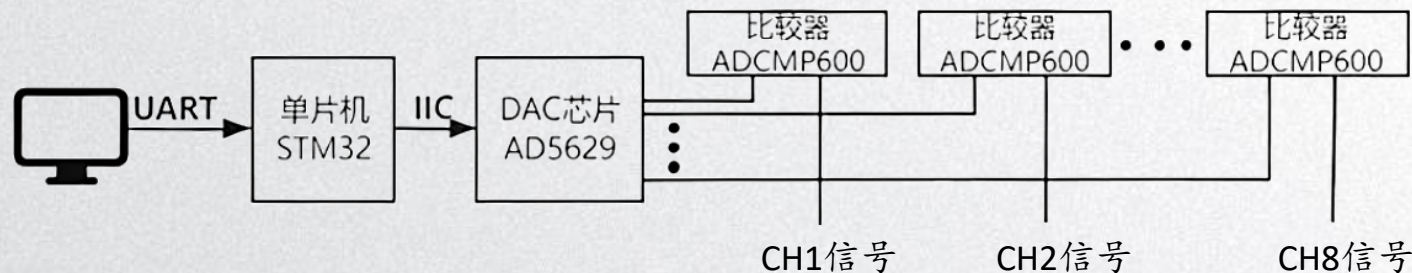


图1：前端过阈甄别板配置流程



图2：前端过阈甄别板实物图

4个前端过阈甄别板（即**32通道**）与FPGA读出板的硬件连接如图1所示。各前端板阈值可通过**串口**选择端口，在上位机配置界面（图2）独立设置。

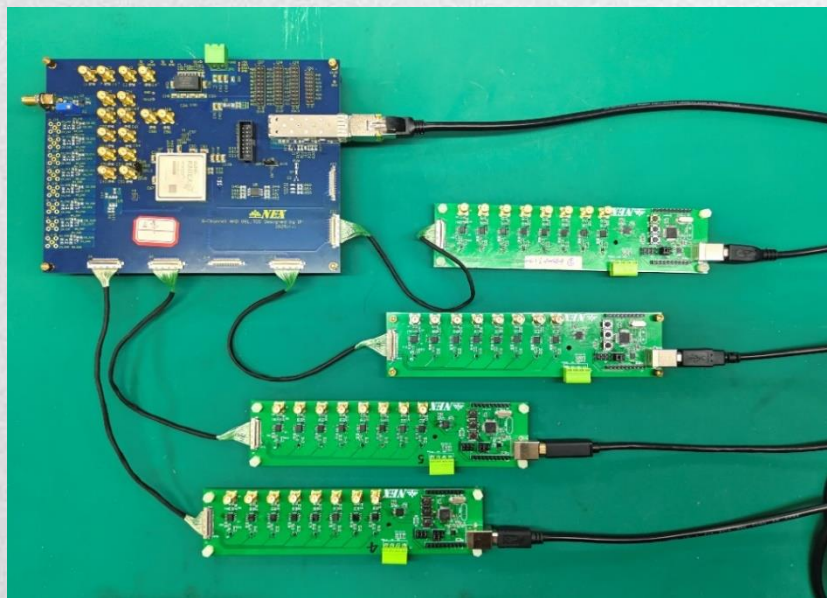


图1：前端过阈甄别板与FPGA读出板连接实物图



图2：阈值配置界面

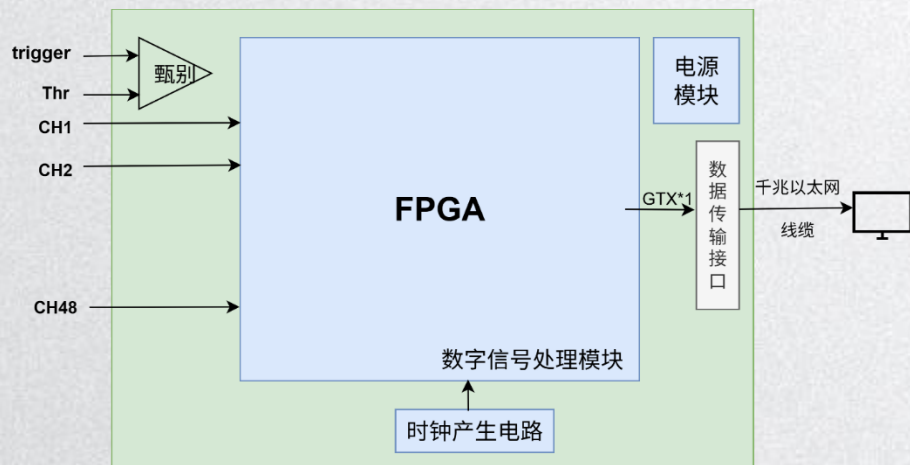


图1：多通道信号采集模块框架图

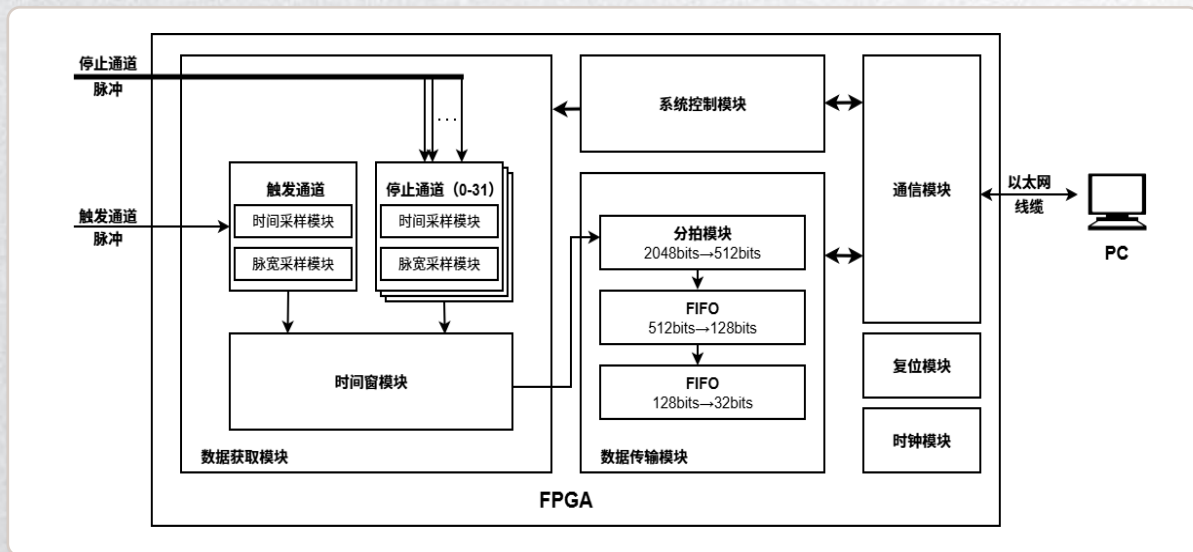


图2：多通道信号采集模块实物图

关键硬件模块

- ◆ 时钟模块：提供稳定采样与多相位时钟
- ◆ 电源模块：为 FPGA、比较器、接口电路提供低噪声电源
- ◆ 数字信号处理模块（FPGA）：实现 TDC、时间窗、脉宽测量与数据打包
- ◆ 通信模块：完成上位机控制与数据回传

FPGA内部逻辑设计



图：FPGA内部逻辑框图



主要功能模块

- 时间采样模块
- 脉宽采样模块
- 时间窗模块
- 数据传输模块
- 系统控制与通信模块
- 上位机数据采集模块

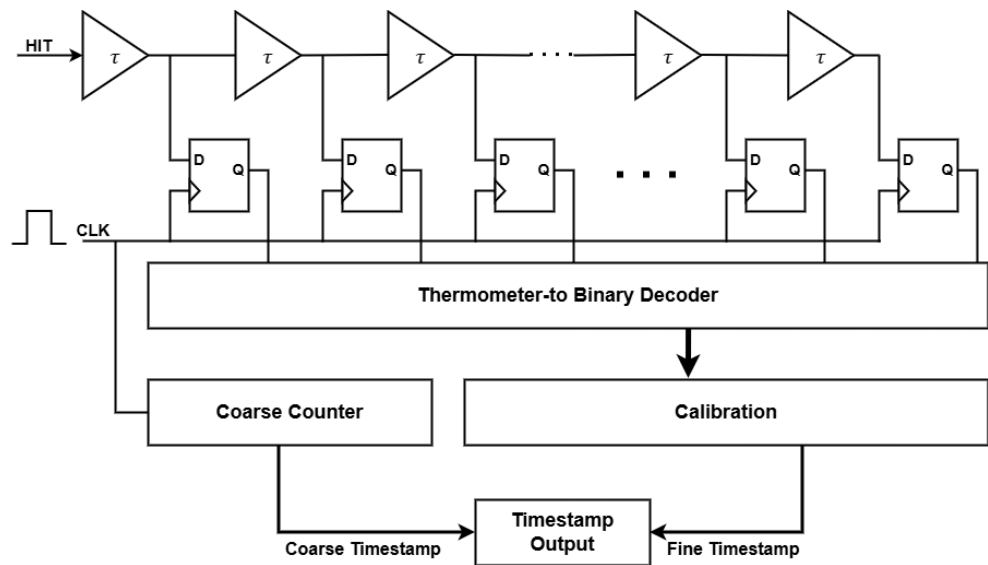
- 采用触发通道与停止通道两路并行处理的架构设计，其中停止通道支持最多32路输入。
- 两路数据经时间采样和脉宽采样后进入时间窗模块进行硬件时间窗判选。
- 通过分拍模块与多级FIFO缓存降宽，最终经以太网上传至上位机。

► 时间采样模块—基于 FPGA 的 TDL-TDC

方案选型：对比多种 TDC 方案，最终采用基于 FPGA CARRY4 的抽头延迟链 TDC。

延迟链设计：同一时钟域内级联 50 个 CARRY4 单元，形成 200 个基本延迟单元，以减小跨时钟域抖动。

时钟频率确定：理论上，为保证 200 个抽头的总延时超过一个时钟周期，时钟频率需 ≥ 377 MHz。考虑工艺差异与稳定性，最终选用 500 MHz 采样时钟。



图：抽头延迟链型TDC结构示意图

➤ 脉宽采样模块

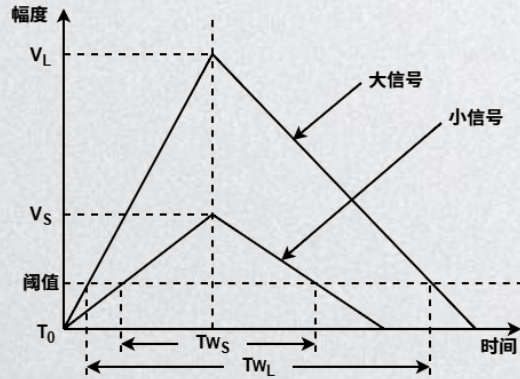


图1: 时间游走效应示意图

在实现数字化处理前，由定时甄别电路确定粒子的到达时间。

系统采用适合于多通道的前沿定时方案，但其主要误差来源于输入信号幅度变化引起的**时间游动 (TimeWalk) 效应**。

采用**基于过阈时间 (Time-Over-Threshold, TOT) 技术**进行修正。

TDC粗计数时钟为500MHz，为提高脉宽测量的精度，采用**多相位法**进行脉宽测量。

通过PLL IP核产生四路相位差90°的时钟信号。四相位时钟的等效分辨率可表示为

$$T_{bin} = \frac{1}{4f_{clk}} = 0.5ns$$

在信号保持为高电平期间，四个相位时钟分别对脉冲持续时间进行计数，信号的脉宽可表示为

$$T_{TOT} = (N_0 + N_{90} + N_{180} + N_{270}) \times T_{bin}$$

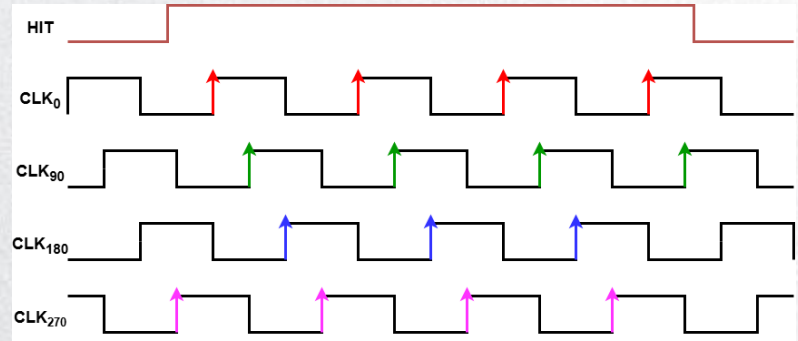


图2: 四相位时钟脉宽测量原理

➤ 时间窗模块

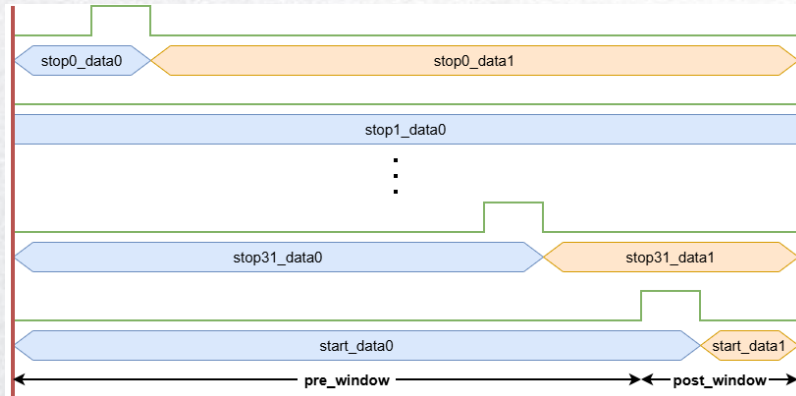
将软件事例判选前移到 FPGA，提高实时性与事例匹配可靠性

实现效果

- 时间窗内到达的信号直接判定为同一事例，减少后端离线判选压力
- 适配不同探测器信号时间差
- 为多通道高计数率运行提供基础

核心实现流程

- 通过片内**环形缓存**持续存储各通道数据
- 触发信号到来后，根据**前窗和后窗参数**计算读起始地址，从缓存中**定位窗口范围**
- 随后在窗口持续期间**逐周期读出数据**，并记录各通道的击中状态
- 窗口结束后，每个通道只取**最后一次**有效数据，无击中的补零，拼接成固定格式帧输出



图：时间窗模块示意图

数据传输模块 多级位宽转换与缓存流水线

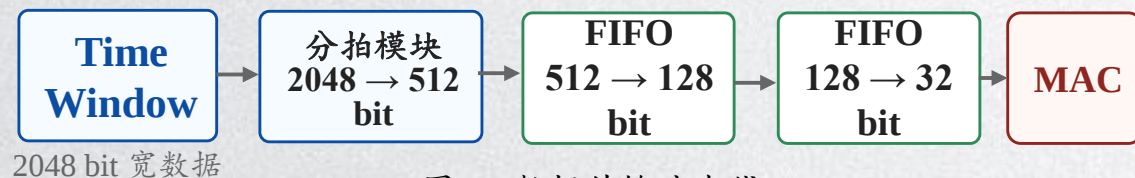


图1: 数据传输流水线

保证数据吞吐能力，降低逻辑复杂度与 FIFO 资源占用，提升高数据率条件下的传输稳定性。

系统控制与通信模块

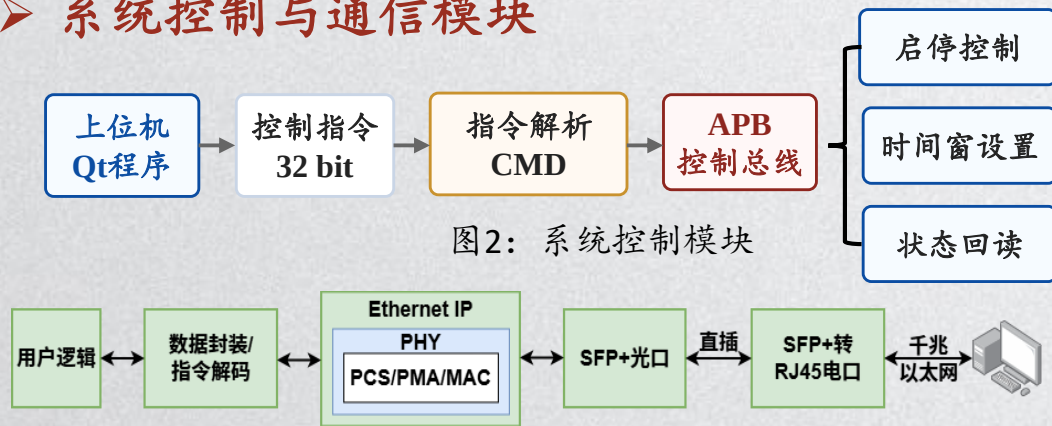


图2: 系统控制模块

图3: 数据通信模块

上位机数据采集模块

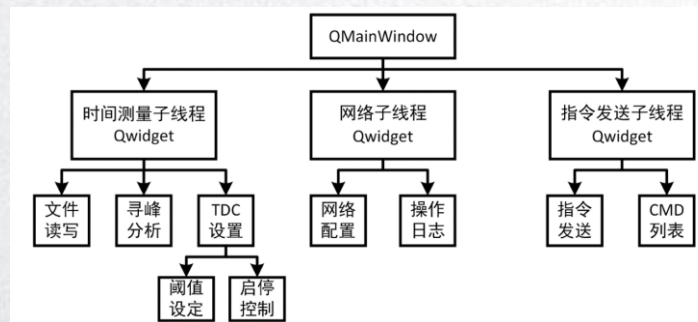


图4: 上位机数据获取整体结构



03 系统测试与验证



图：电子学测试平台

数据采集与分析流程

双路脉冲输入

→ 前端板模数转换

→ FPGA数据采集

→ 千兆以太网

→ Qt程序解析

→ 高斯拟合提取 σ

环

测试环境

室温条件；
信号发生器、低压稳压电源、前端放大甄别板及32通道读出板。

标

测试指标

- 32通道时间分辨率
- 通道间分辨率一致性
- 脉宽测量线性
- 计数率稳定性

时间性能测试

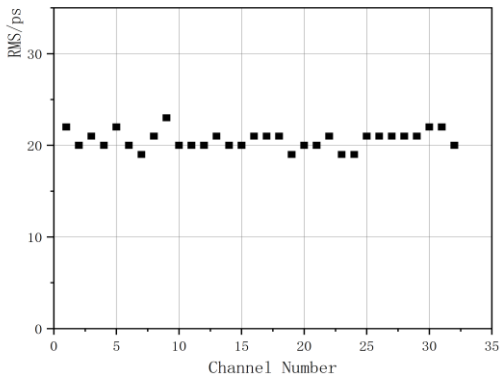


图1: 32 通道时间分辨率分布

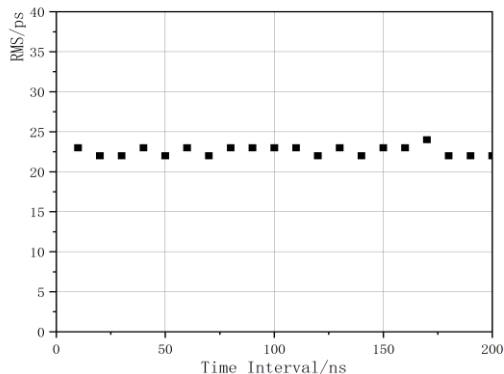


图2: 时间分辨率随时间间隔变化

<30 ps

32 通道时间分辨率

<100 ps

满足电子学指标

性能稳定

不同时间间隔下无
明显退化

脉宽及计数率性能测试

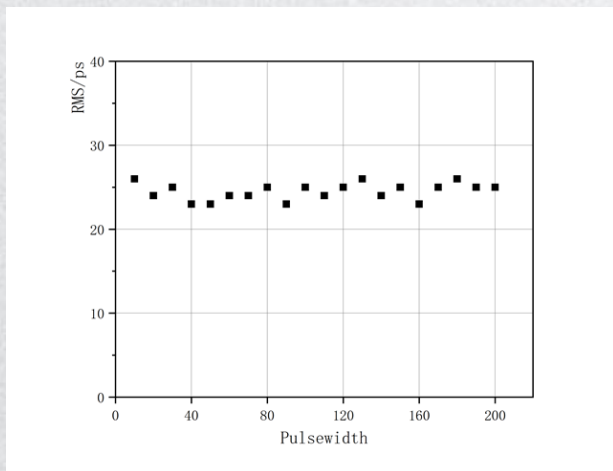


图1：时间分辨率随脉宽变化

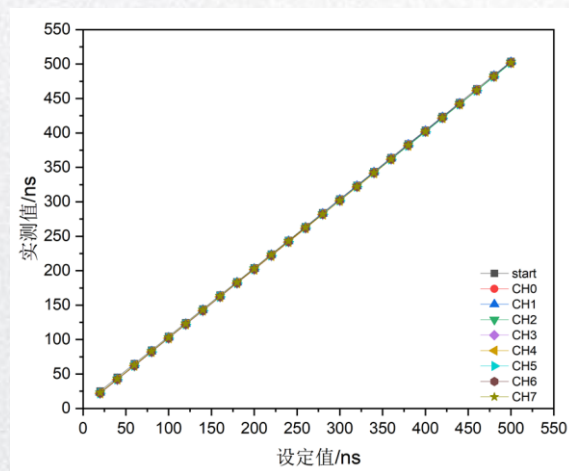


图2：脉宽设定值与实测值关系

优于 0.3%

脉宽线性残差

200 kHz

满足电子学指标

系统运行稳定

数据读出正常



图1: 32 通道塑闪探测器测试平台

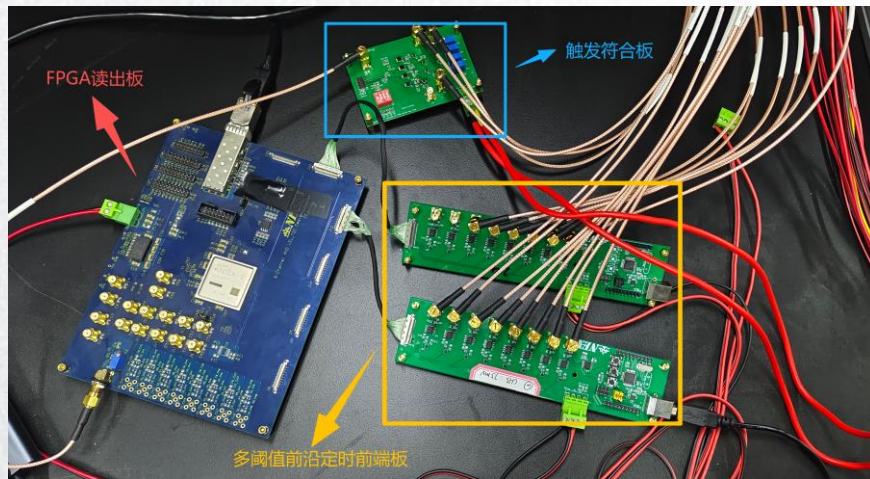


图2: 塑闪探测器电子学测试结构

测试链路

1. 宇宙线缪子经过塑料闪烁体产生闪烁光
2. SiPM 完成光电转换，前置放大器放大整形
3. 多阈值前端板完成过阈甄别，FPGA 记录时间与脉宽
4. 上位机读取数据并进行效率与时间分辨率分析

时间精度测试

两通道时间差分布经高斯拟合得到单通道时间分辨率

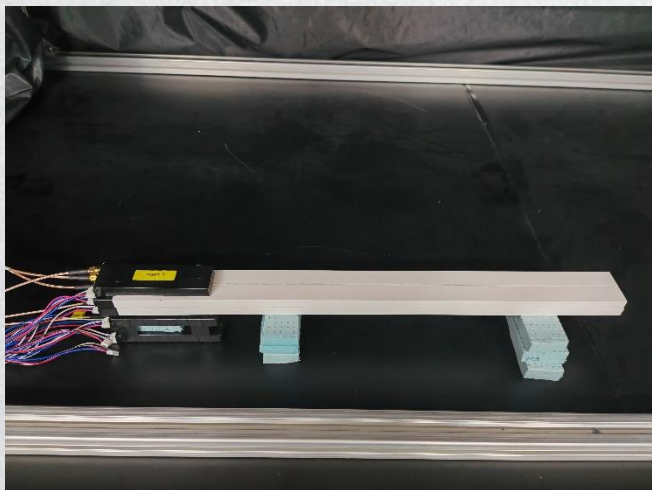


图1：塑闪分辨率测试平台

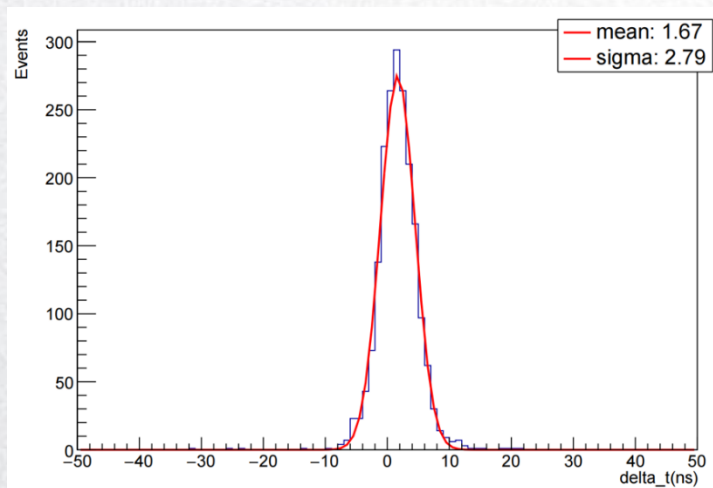


图2：与塑闪探测器联调时间分辨率

结果计算

$$\sigma_{\Delta t} = 2.79 \text{ ns}$$

两通道独立且贡献近似相同： $\sigma_{\text{single}} = \sigma_{\Delta t} / \sqrt{2} \approx 1.97 \text{ ns}$

效率测试

32 通道塑闪分两组（16 通道 / 组）测试，采用统一三层触发结构，减少堆叠导致的机械不稳定与系统性偏差，保障测量条件一致。

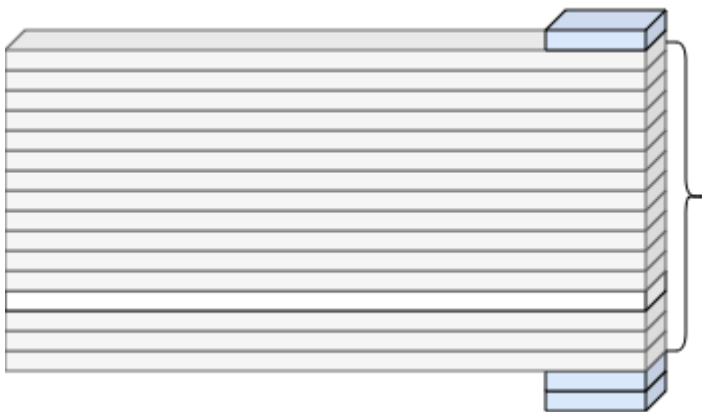


图1：塑闪效率测试示意图

通道	效率	通道	效率	通道	效率	通道	效率
1	0.986±0.002	9	0.975±0.002	17	0.987±0.002	25	0.976±0.002
2	0.986±0.002	10	0.981±0.002	18	1.000±0.002	26	0.980±0.002
3	0.986±0.002	11	0.974±0.002	19	0.987±0.002	27	0.981±0.002
4	0.980±0.002	12	0.983±0.002	20	0.982±0.002	28	0.988±0.002
5	0.983±0.002	13	0.986±0.002	21	0.983±0.002	29	0.988±0.002
6	0.981±0.002	14	0.988±0.002	22	0.981±0.002	30	0.990±0.002
7	0.983±0.002	15	0.983±0.002	23	0.982±0.002	31	0.987±0.002
8	0.982±0.002	16	0.985±0.002	24	0.981±0.002	32	0.989±0.002

图2：塑闪效率测试结果

实验表明：32通道所有通道效率 **>97%**，满足探测器设计指标 **>95%**

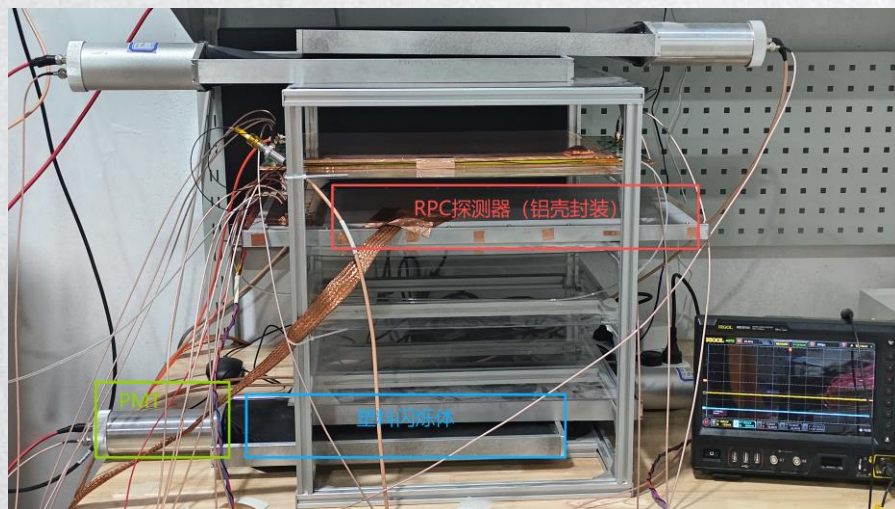


图1: RPC探测器测试平台

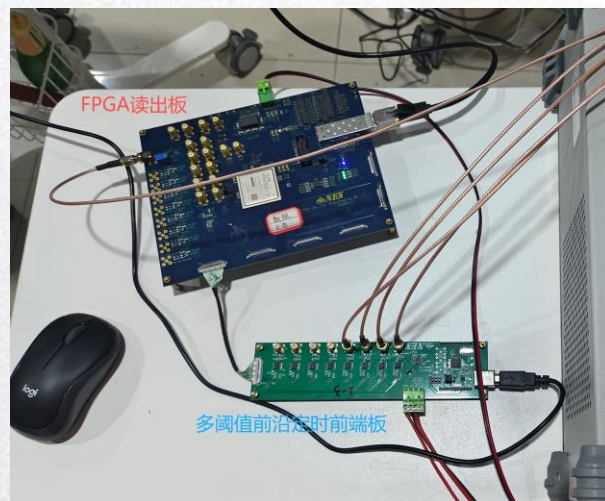


图2: RPC探测器电子学测试结构

测试链路

1. 宇宙线缪子经过RPC探测器产生电信号，前置放大器放大整形
2. 多阈值前端板完成过阈甄别，FPGA记录时间与脉宽
3. 上位机读取数据并进行效率与时间分辨率分析

时间精度测试

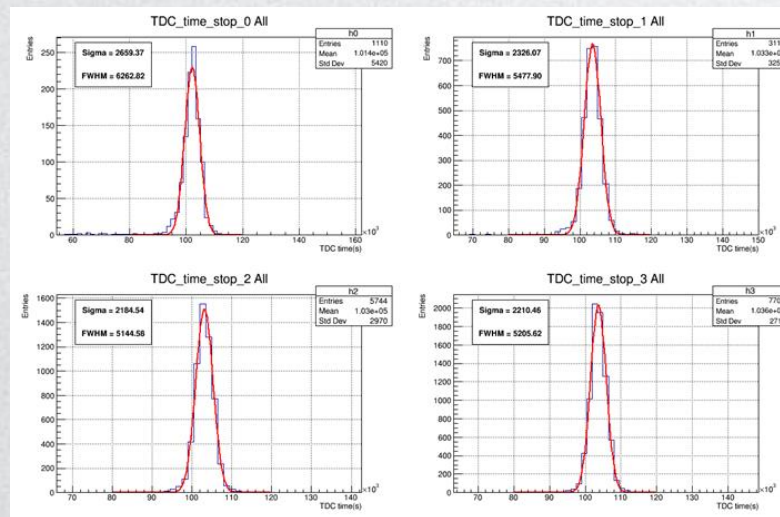


图1: RPC测试系统分辨率

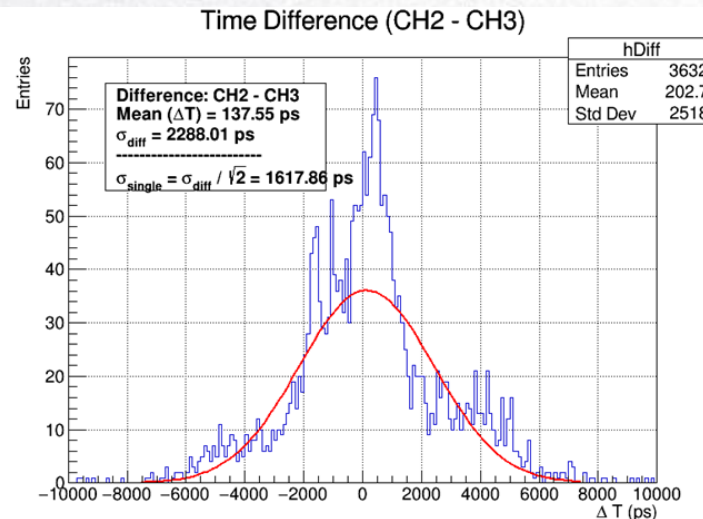


图2: 塑闪触发探测器本征分辨率

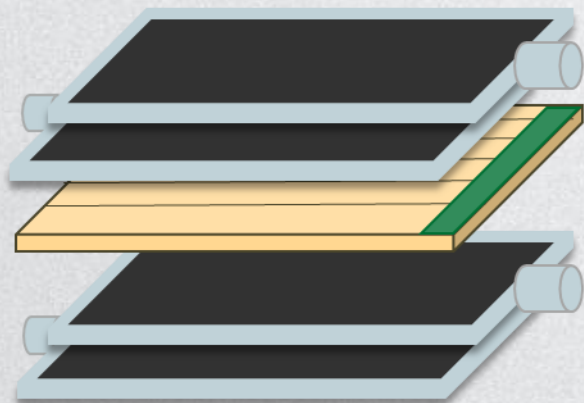
结果计算 $\sigma_{\Delta t} \approx 2.2$ ns ; $\sigma_{trigger} \approx 1.6$ ns

系统分辨率减去触发探测器本征分辨率:

$$\sigma_{RPC} = \sqrt{\sigma_{\Delta t}^2 - \sigma_{trigger}^2} \approx 1.51 \text{ ns}$$

效率测试

上下四层塑闪交错排列作符合触发，覆盖中间四个通道，进行效率测试



图：RPC探测器效率测试示意图

单层RPC探测器板集测试效率测试结果在**88%**左右

使用数字化仪DT5751进行效率测试，在固定阈值的情况下测试效率在**87%**左右，与板集测试结果相符。

证明电子学板集测试正常。

实验表明：电子学板与数字化仪的效率测试结果（88%/87%）一致性良好，**电子学系统验证通过。**

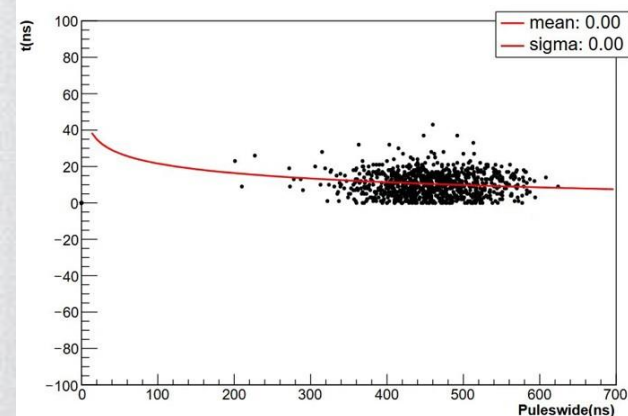


图1: Δt 与脉宽 (TOT) 的相关性

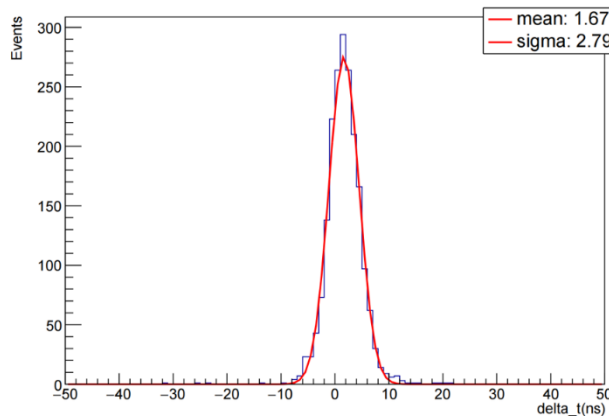


图2: 塑闪修正前高斯分布图

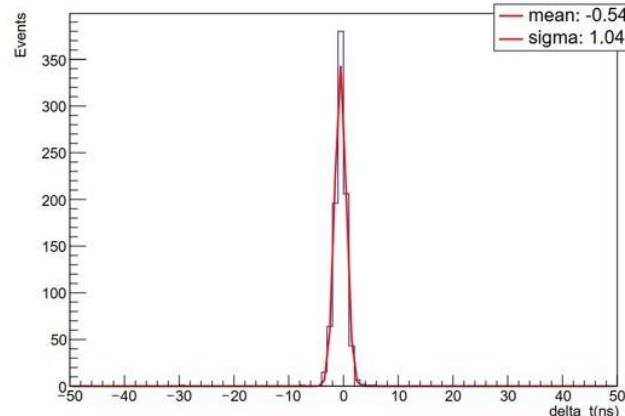


图3: 塑闪修正后高斯分布图

修正流程

1. 构建时间差 Δt 与脉宽之间的相关分布
2. 对 Δt 与脉宽之间的关系进行函数拟合
3. 利用拟合结果对时间测量进行重新映射
4. 对映射后的时间差分布重新进行高斯拟合



优化结果

时间差分布宽度

2.79 ns 降至 1.04 ns

单通道时间分辨率

1.97 ns 降至 0.74 ns



04 总结与展望

围绕 STCF 缪子探测器读出电子学需求，完成了原型阶段基于FPGA的32通道数据获取的设计与调试工作。并完成了与探测器样机的联调测试。

01 原型实现

集成 TDC、时间窗、脉宽测量与数据传输采集

02 性能验证

完成电子学测试与探测器联调，验证系统可用性

关键验证结果

✓ 电子学测试

时间精度优于 30 ps
满足电子学100ps的指标

✓ 计数率能力

200 kHz 稳定工作
满足电子学100 kHz指标

✓ 塑闪联调

读出效率 >97%
满足探测器95%的指标

✓ 时间修正

1.97 ns → 0.74 ns
显著提升时间分辨率

✓ 在FPGA内部实现了时间窗判选功能的硬件化，降低后端数据处理压力

面向工程化应用与大规模系统部署，后续工作可从通道规模、前端性能、集成复杂度和脉宽修正方式四个方面继续优化。

01 读出通道规模扩展与系统验证

百通道规模扩展，优化机械结构与通道密度，并评估系统稳定性。

02 前端放大与整形电路性能优化

优化前放电路结构，提升信号上升沿速度，减小前端对时间分辨率的影响。

03 多阈值前端模块集成优化

为应对通道扩展，将前端板单通道器件逐步改为多通道集成器件，提升系统集成度

04 脉宽修正方式优化

利用数字化仪获取漂移项 - 脉宽拟合函数，基于该函数实现时间测量的脉宽修正。

后续目标：进一步提升系统规模化、稳定性与工程适配能力，为 STCF 缪子探测器读出电子学的实现提供技术支撑。



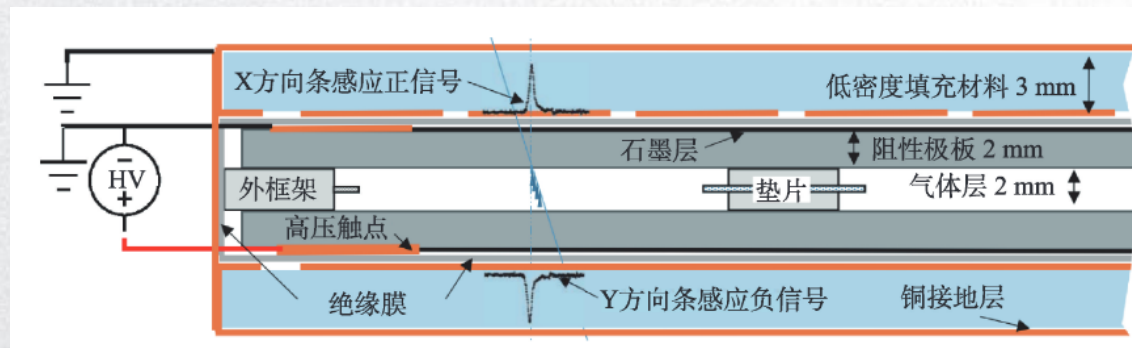
THANKS!



Backup

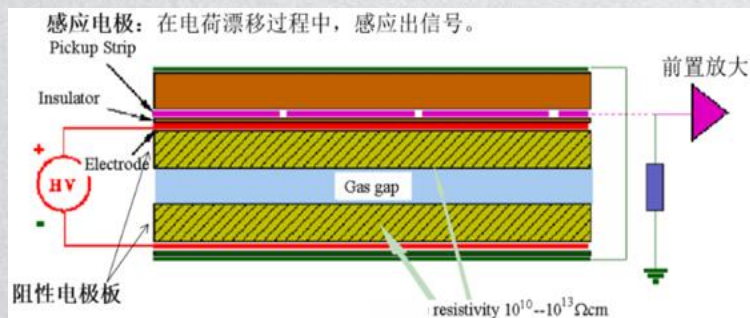
阻性板室气体探测器的特点:

- 具有平面几何结构(使其具有好的时间分辨能力);
- 电极使用阻性材料(使探测器可以自猝灭, 在带电粒子通过灵敏区产生放电后不精要移除高压 (HV), 因此不需要工作在脉冲模式下);
- 高压加在对信号透明的阻性层上; 生产过程简便, 适合覆盖大面积区域。



阻性板室气体探测器的工作原理:

- ◆ RPC主要由阻性电极板、气室和读出板组阻性电极板现有电木和玻璃两种。
- ◆ 气室充有工作气体（氟利昂、异丁烷和六氟化硫）。
- ◆ 读出板用于读出信号，由排列在PCB板上的读出条组成。
- ◆ 带电粒子入射进入气室后，在高压作用下，该粒子与气体作用发生电离雪崩，产生的电子在气室中的移动会在读出条上产生感应信号。

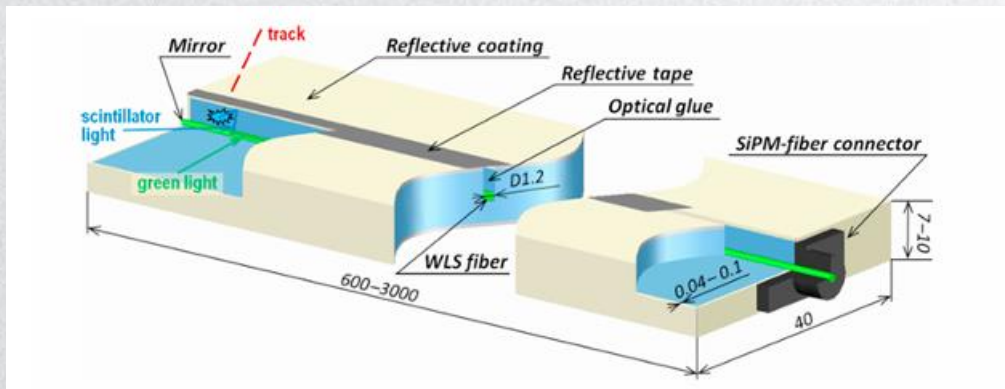


探测单元由聚苯乙烯基闪烁体条组成。在闪烁体中心开有凹槽，并放置波长位移光纤（Wavelength Shifting Fiber, WLSF）。

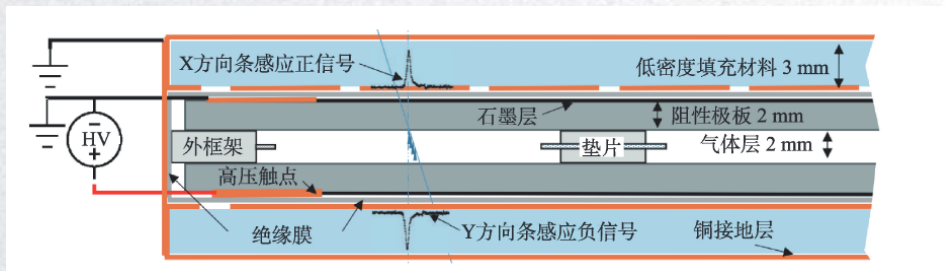
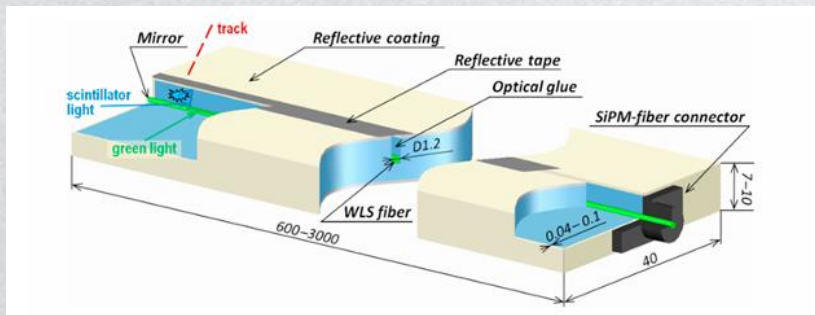
当带电粒子穿过塑料闪烁体时，会在闪烁体材料中沉积能量，使分子被激发；随后激发态退激发并发出闪烁光子。闪烁体产生的蓝光被光纤吸收，并转化为绿光传输到光电探测器。

为了提高光收集效率并减少光子损失，闪烁体表面覆盖高反射率的漫反射层材料，例如TiO₂或特氟龙涂层。

该结构可以保持较高的探测效率，同时具有较好的机械稳定性，也方便进行大面积铺设，因此适用于大尺度谱仪系统。



缪子是带电粒子，包括带负电的 μ^- 和带正电的 μ^+ 。因此它穿过探测介质时会通过电磁相互作用产生电离或激发。对于塑料闪烁体，缪子在闪烁体中沉积能量，使材料分子激发并发出闪烁光，随后由波长位移光纤和 SiPM 转换成电信号，再由前端电子学读出。对于 RPC，缪子穿过气隙时会电离工作气体，产生的电子在高电场下发生雪崩放大，并在读出电极上形成感应信号。因此，塑闪和 RPC 都可以探测缪子，本质上都是利用缪子作为带电粒子在物质中的电离或激发效应。



多通道信号采集模块逻辑设计

时间采样模块

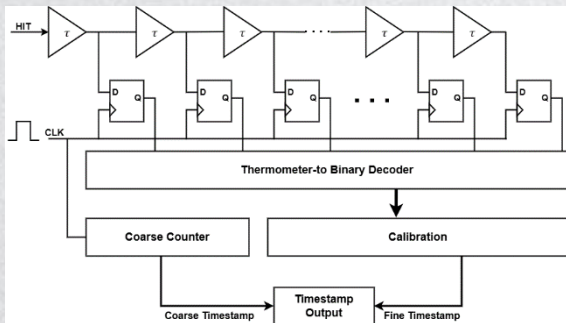


图1: 抽头延迟链型TDC结构示意图

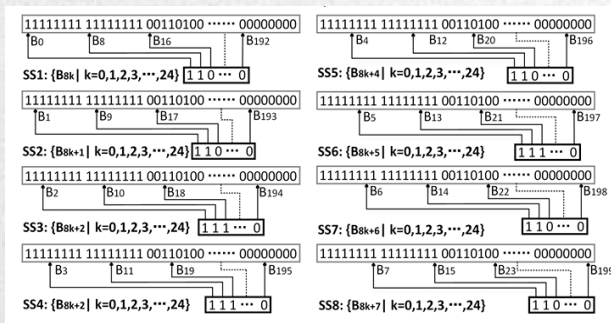


图2: 分组解码原理

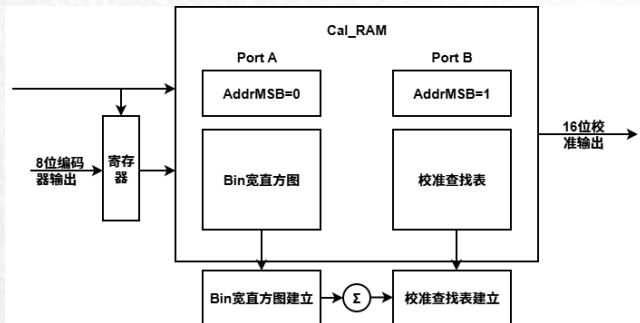


图3: 校准查找表单元

01 基于FPGA的TDL-TDC

方案选型: 采用基于FPGA CARRY4的抽头延迟链TDC。

延迟链设计: 同一时钟域内级联50个CARRY4单元, 形成200个基本延迟单元。

时钟频率: 500 MHz 采样时钟。

02 TDC分组解码

问题: 进位链延迟不均匀和时钟偏移产生的气泡码

分组解码: 200位温度计码按8位间隔抽取, 每组子码独立完成温度计码到二进制码的转换后求和, 得到最终细计数值

03 TDC校准模块

目标: 补偿进位链延迟单元非均匀性, 降低Bin宽度差异带来的时间测量误差

校准原理: 随机脉冲输入 → 码密度统计 → 估计Bin宽度 → 建立校准表