

核电子学—— 实验物理与数据分析的桥梁

刘树彬

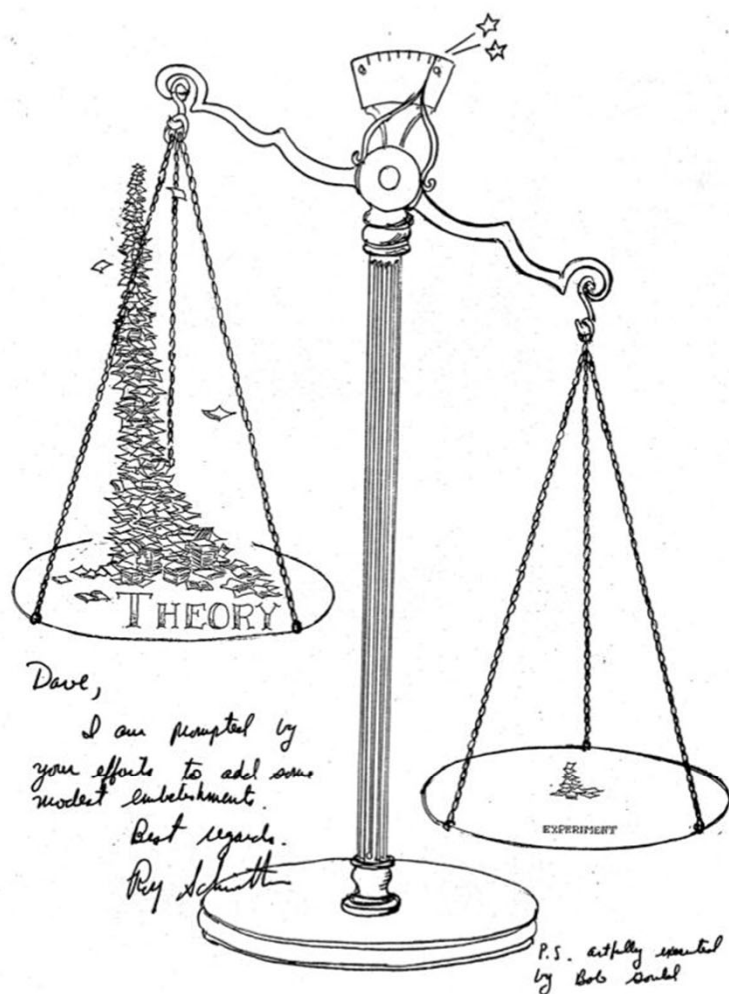
物理学院 中国科学技术大学

2025. 07. 15 西安

内 容

- 1 核 电 子 学 特 点
- 2 信 号 处 理 过 程
- 3 新 需 求 新 研 究
- 4 核 电 子 学 应 用

丁肇中：第一次在诺奖颁奖典礼上用中文发表演讲



Experiment Vs. Theory



国王,皇后陛下,皇族们,各位朋友:

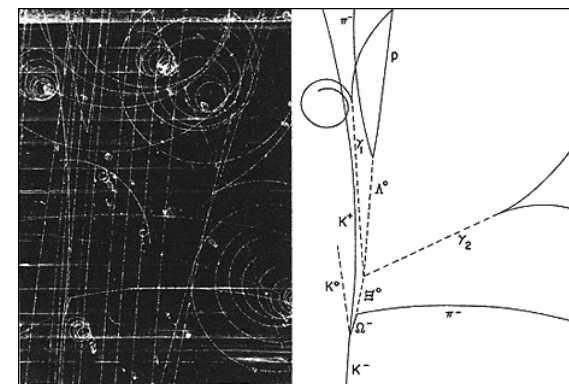
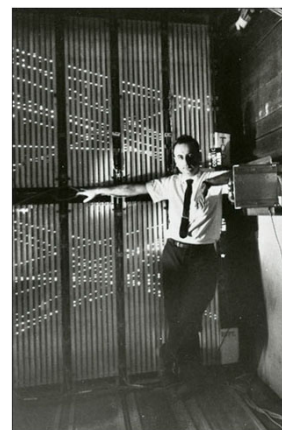
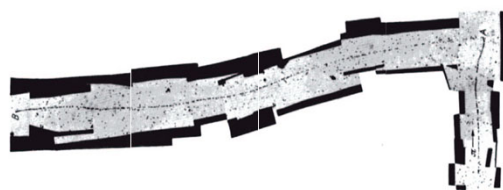
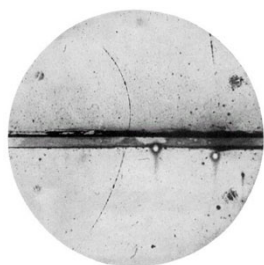
得到诺贝尔奖,是一个科学家最大的荣誉,我是在旧中国长大的,因此想借这个机会向在发展国家的青年们强调实验工作的重要性。

中国有一句古话:‘劳心者治人,劳力者治于人。’这种落后的思想,对在发展国家的青年们有很大的害处。由于这种思想,很多在发展国家的学生们都倾向于理论的研究,而避免实验工作。

事实上,自然科学理论不能离开实验的基础,特别,物理学是从实验产生的。

我希望由于我这次得奖,能够唤起在发展国家的学生们的兴趣,而注意实验工作的重要性。

粒子探测与数据获取

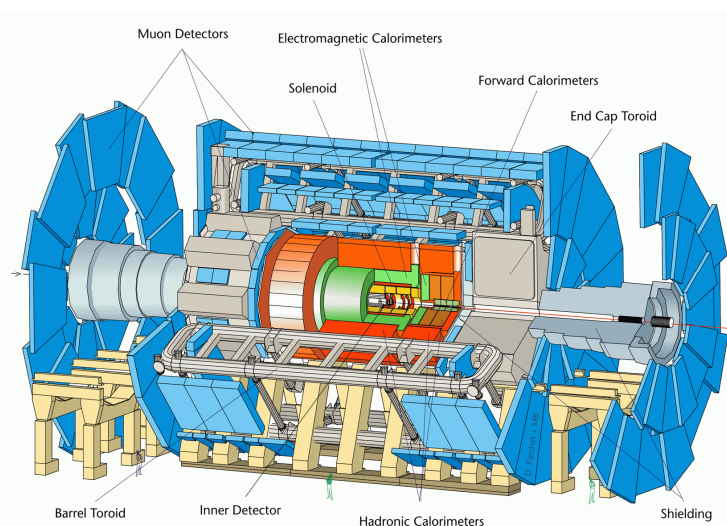


云雾室：1932年正电子的发现
1936年，Aderson获诺贝尔奖

核乳胶室：1947年介子的发现
1950年，Powell获诺贝尔奖

火花室：1962年 μ 中微子的发现
1988年，Lederman等获诺贝尔奖

气泡室：1964年 Ω^- 的发现
1969年，Gell-Mann获诺贝尔奖



1968年,Charpak等发明多丝正比室
探测器进入电信号处理时代
1992年，Charpak获诺贝尔奖

- 核电子学为谱仪获取**时间**、**位置**、**能量**等信息

物理实验数据的获取历史

- 早期:

1932 – Discover
Cloud

6 mm lead plate

63

Cloud chamber



Ω^- , bubble chamber

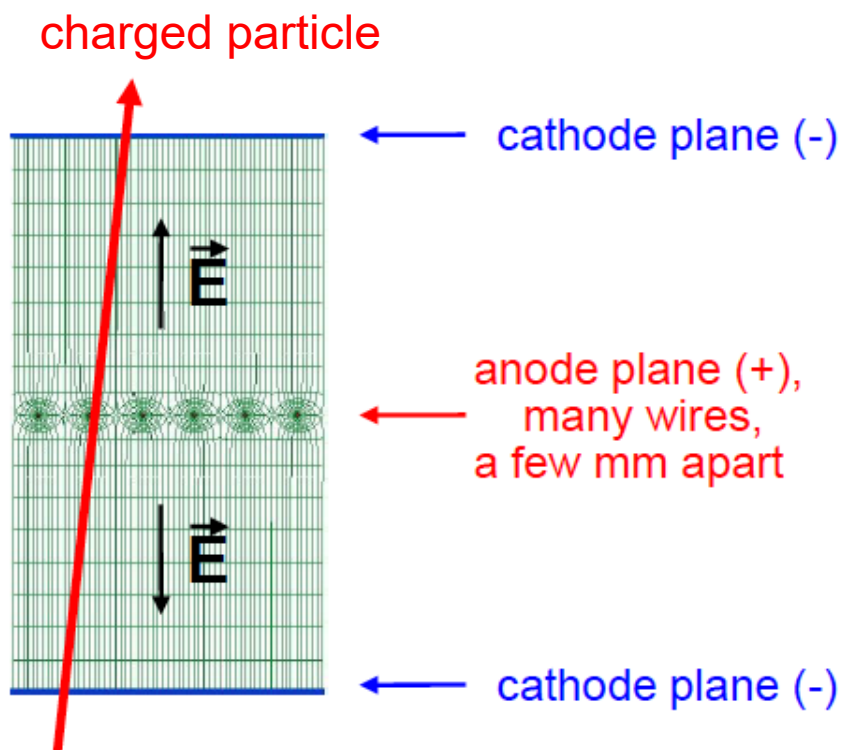


Bubble chamber

物理实验数据的获取历史

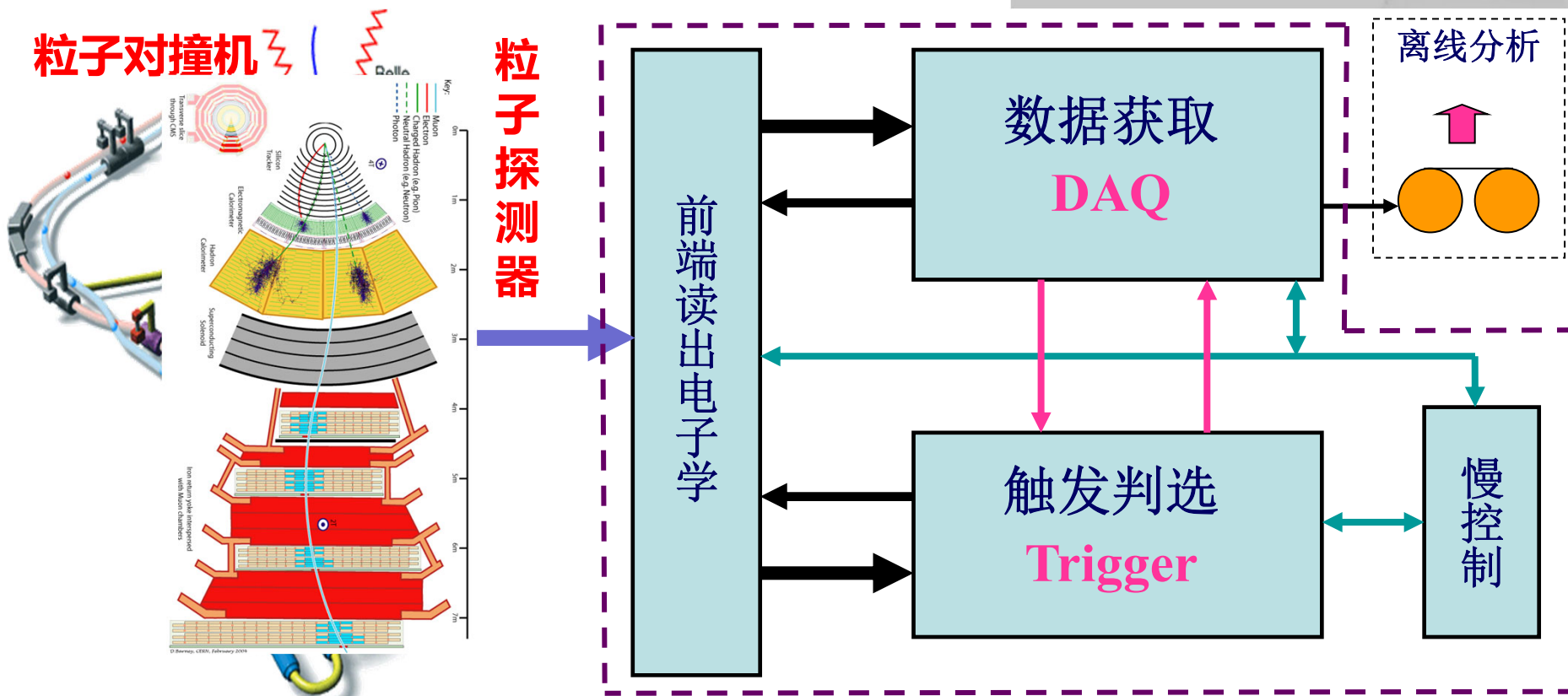
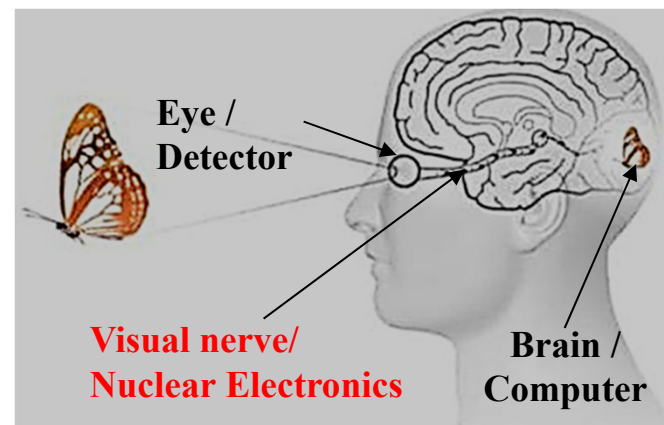
- 多丝正比室：电子读出的开创者

1968 – Multi-Wire Proportional Chamber, Charpak – 1992 Nobel Prize



核电子学在实验物理中的作用

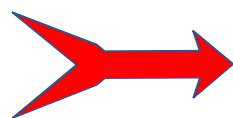
- 粒子物理实验需要多种探测器构成谱仪
- 各种探测器把捕捉到的粒子信息转换为电信号
 - ✓ 探测器相当于工业领域的传感器
 - ✓ 物理量→电信号
- 核电子学负责事例数据采集、处理、筛选、传输



信号特征

➤ 面向对象：粒子探测器

- 闪烁探测器
- 半导体探测器
- 气体探测器
-



电流、电荷信号
能量、时间、计数信息

➤ 信号特点：微弱、随机

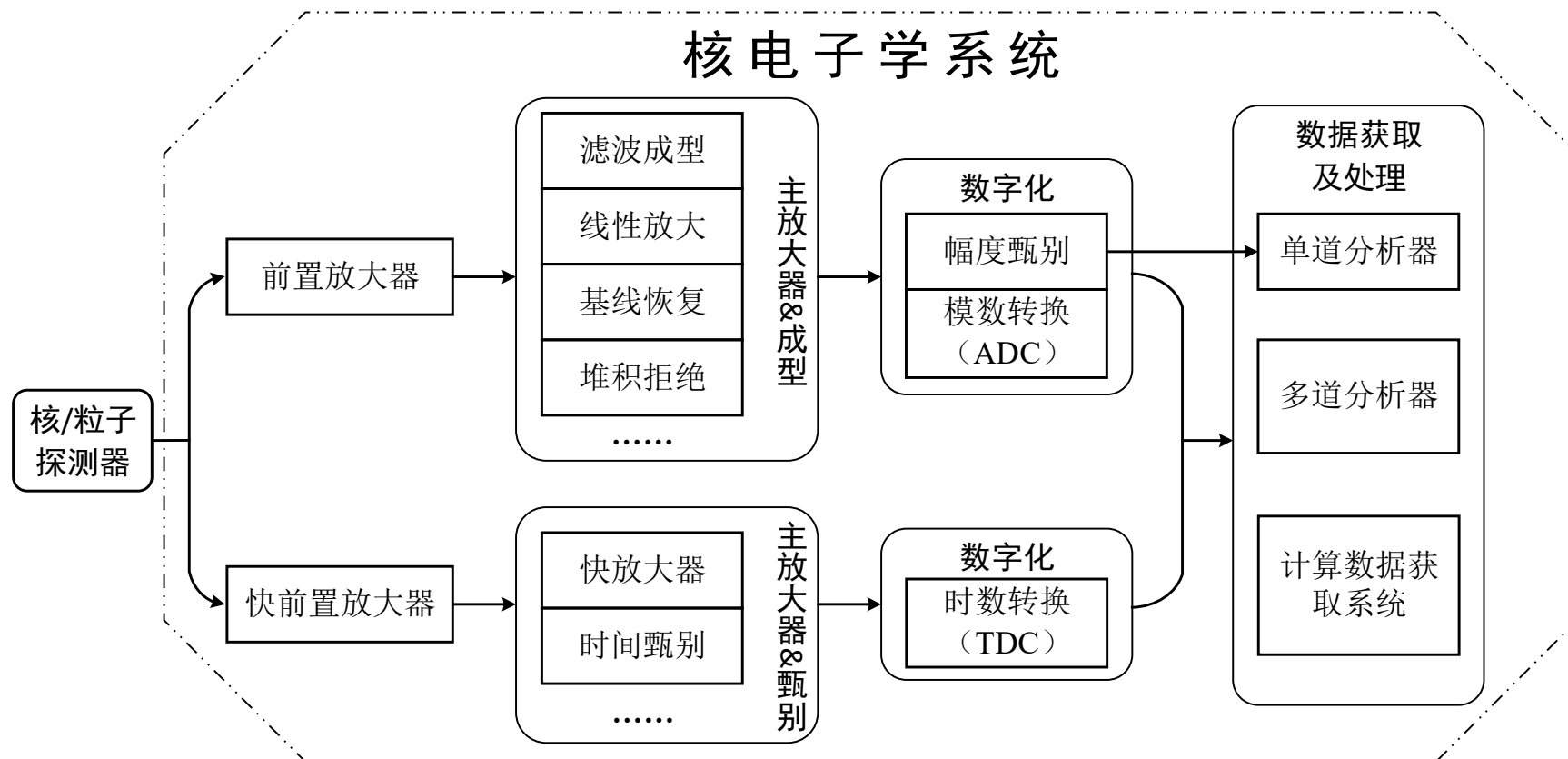
➤ 关注指标：信噪比（分辨率）、线性、稳定性.....

□ 核电子学中的噪声与干扰

- 噪声：散粒噪声、热噪声、低频噪声
- 干扰：外界电磁干扰

➤ 分析手段：统计、时域和频域分析

核电子学信号处理

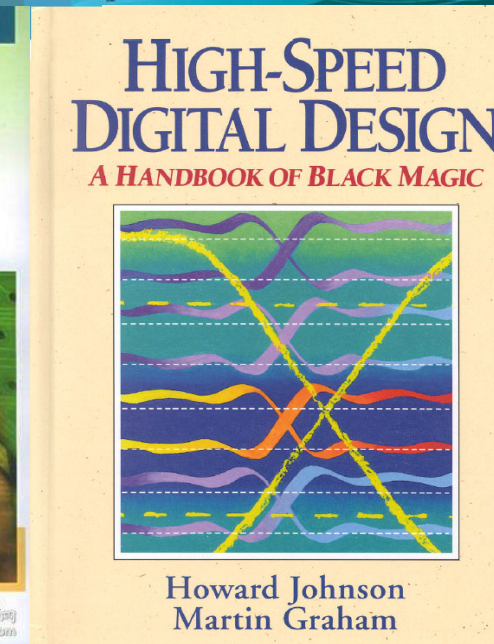
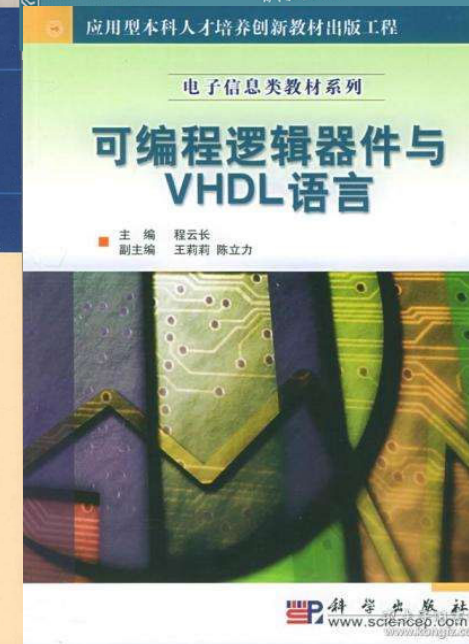
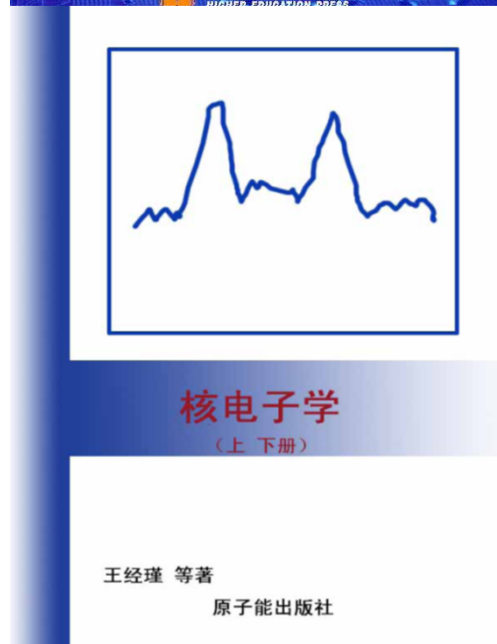
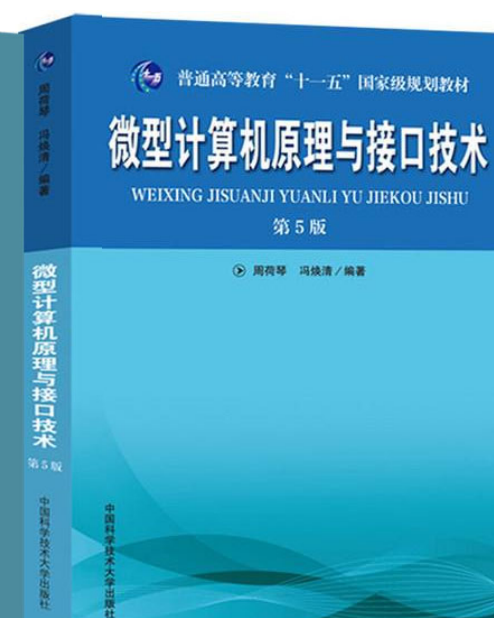
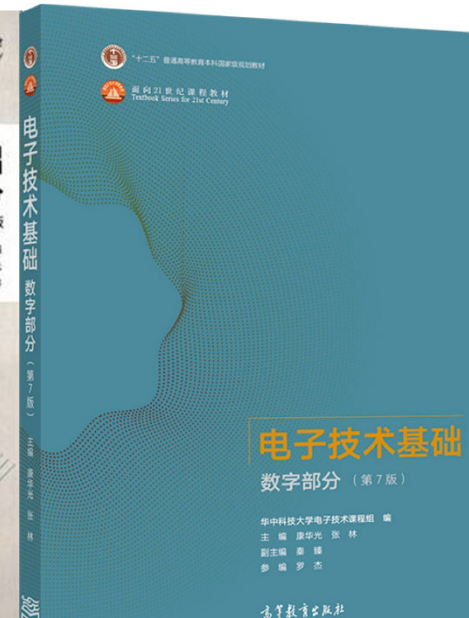
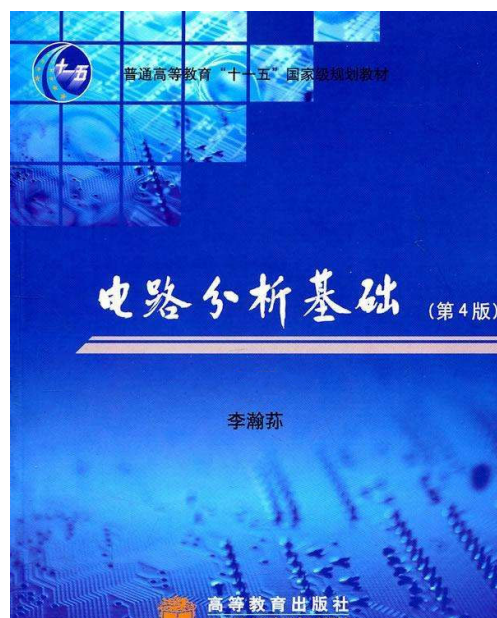


核电子学系统组成与功能

- 信号调理
 - 微弱信号的放大、成形、甄别....
- 数字化
 - ADC、TDC、事例计数
- 数据筛选
 - 位置信息
 - 时间信息
 - 能量信息
 -
- 数据的处理
 - 数据的零压缩
 - 归一化
 -



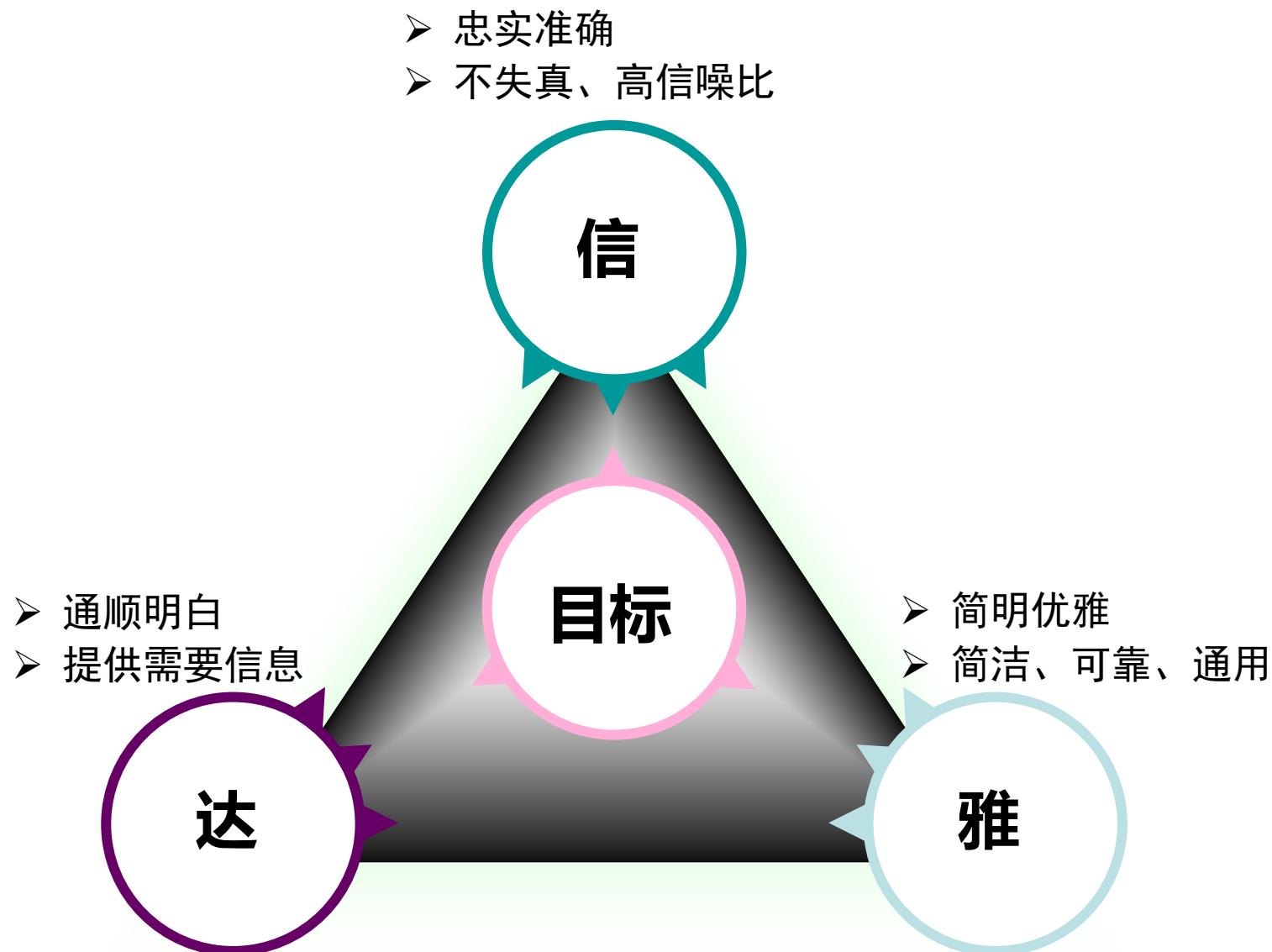
学科基础



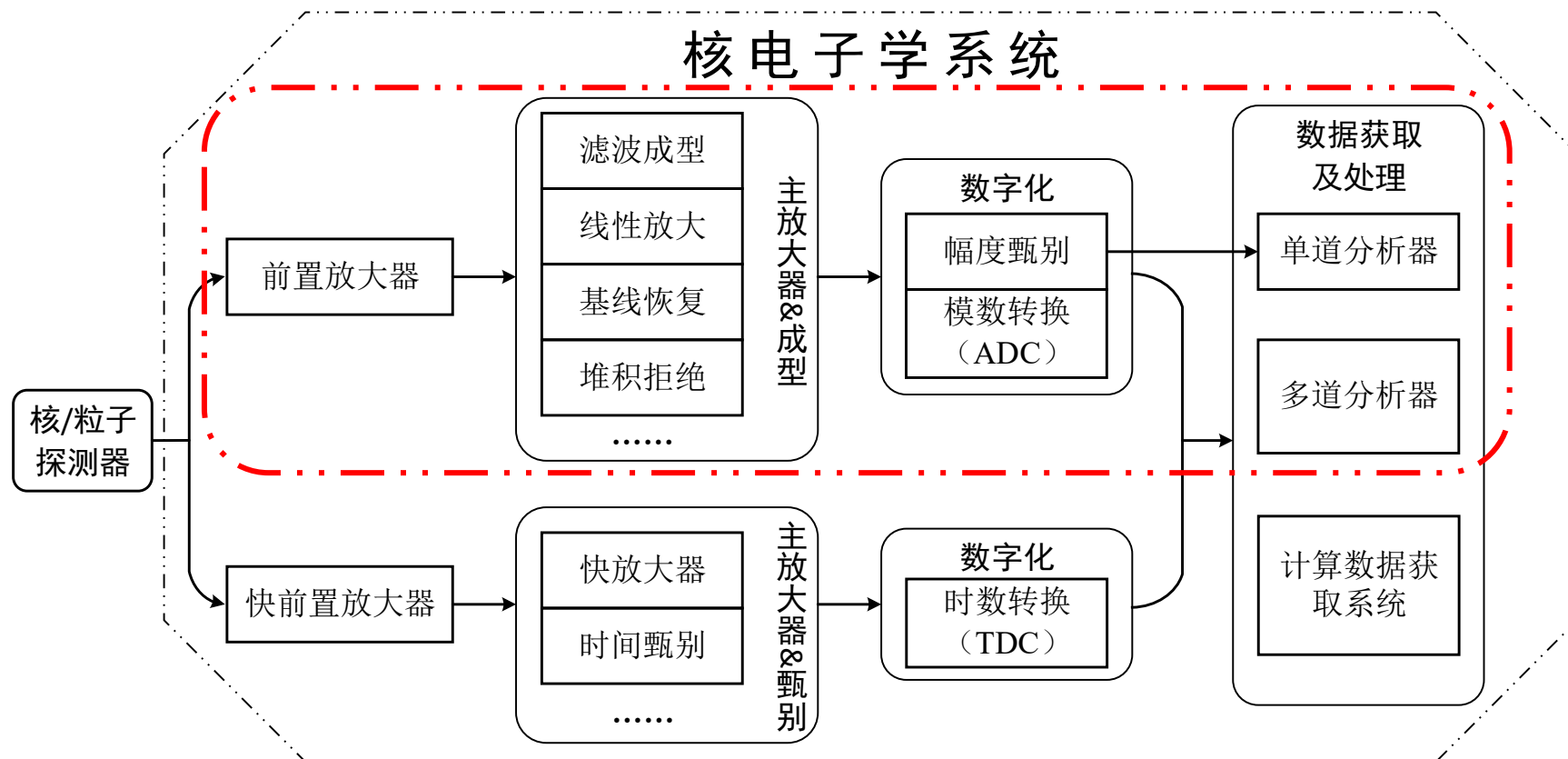
内 容

- 1 核 电 子 学 特 点
- 2 信 号 处 理 过 程
- 3 新 需 求 新 研 究
- 4 核 电 子 学 应 用

核电子学追求的目标 借用严复翻译三原则



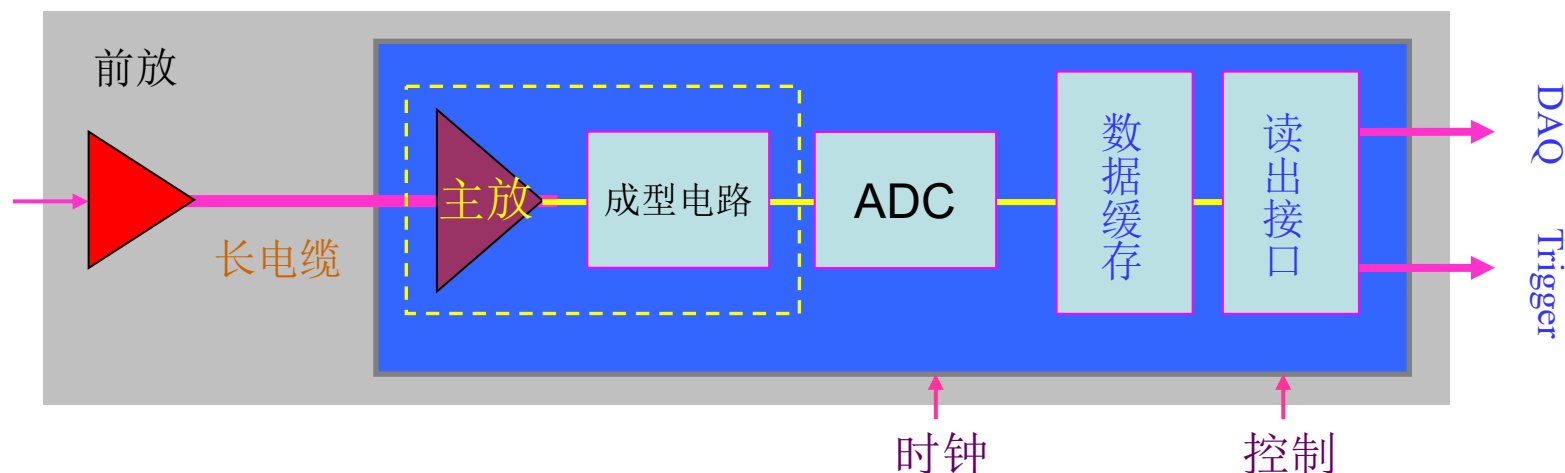
核电子学信号处理



电荷（能量）测量

粒子通过探测器时探测器产生电离、激发或光电转换等过程，输出信号的电荷量往往正比于粒子在探测器中消耗掉的能量

电荷（能量）测量概念框图



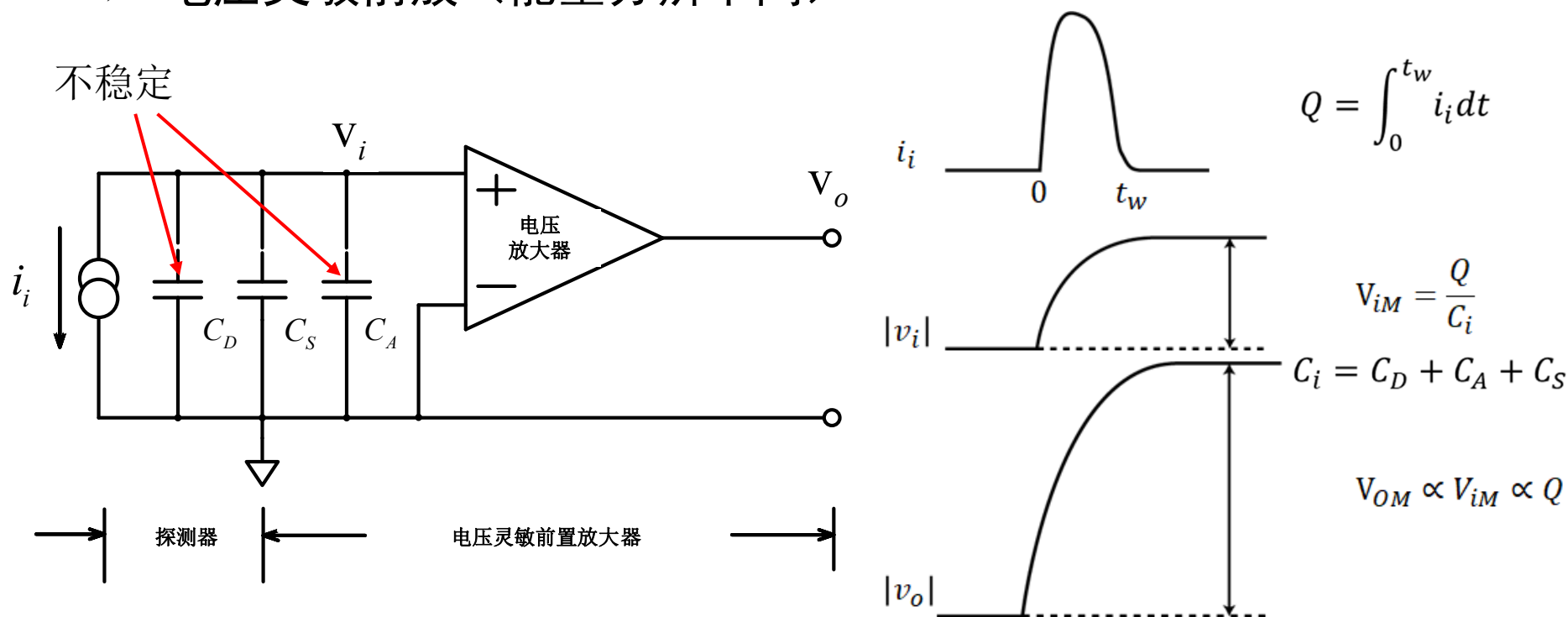
- | | |
|----------------|---------------|
| 前放（Pre-Amp） | :信号放大、阻抗变换和驱动 |
| 成型放大（Shapping） | :幅度放大和最佳滤波 |
| 数字化（ADC、QDC） | :多道、ADC等 |
| 数据缓存 | :暂存数据，等候命令输出 |

前置放大器 (Pre-Amp)

- 积分型放大器

- 输出信号幅度正比于其输入电流对时间的积分，即输出信号的幅度与探测器输出的总电荷量成正比

- 电压灵敏前放（能量分辨不高）

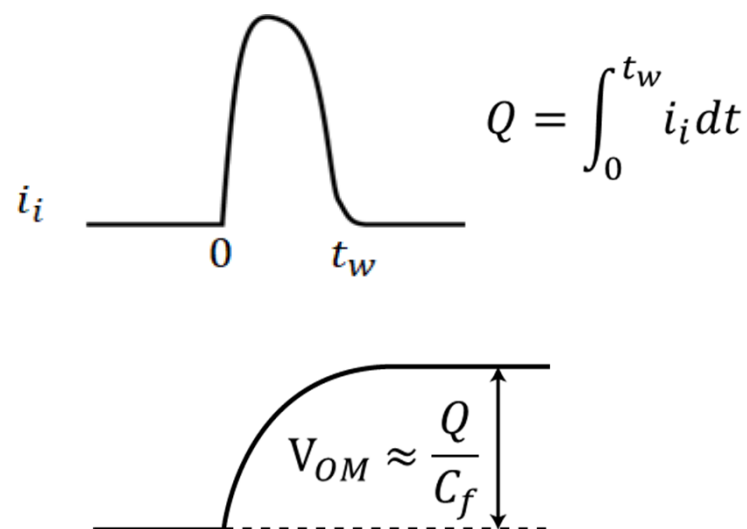
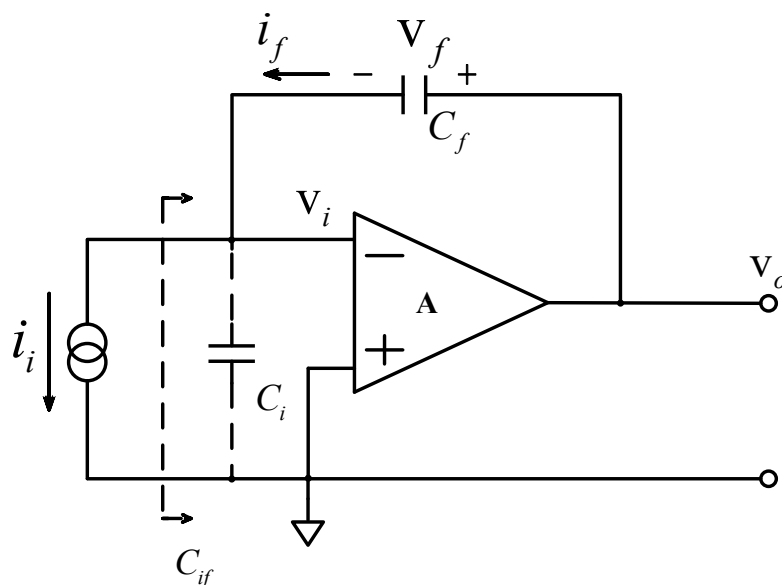


前置放大器 (Pre-Amp)

- 积分型放大器

- 输出信号幅度正比于其输入电流对时间的积分，即输出信号的幅度与探测器输出的总电荷量成正比

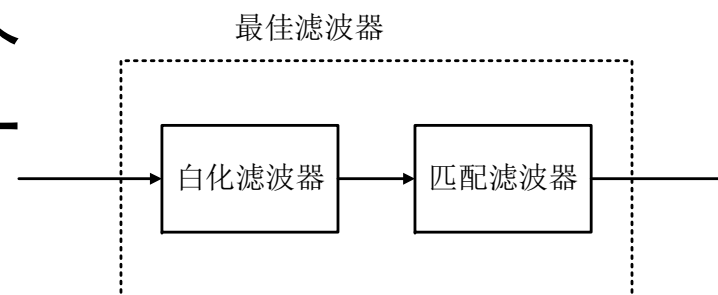
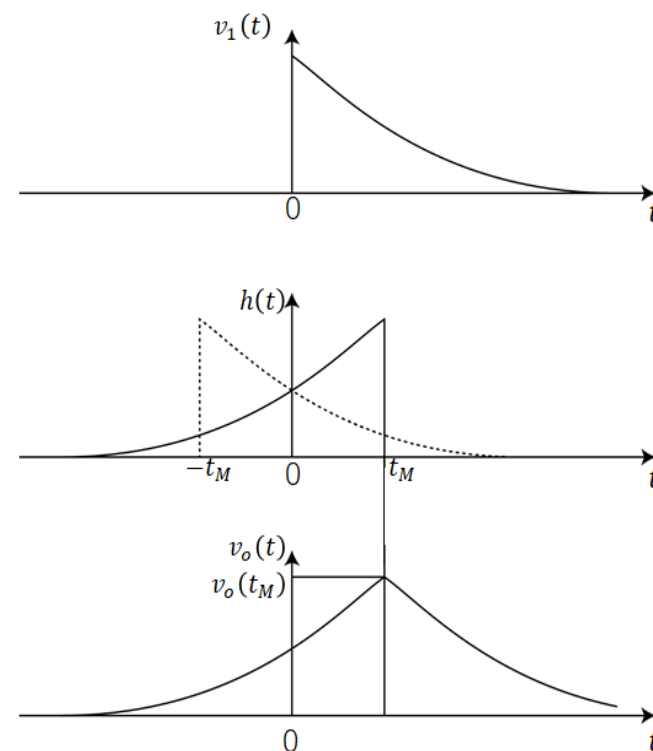
➤ 电荷灵敏前放



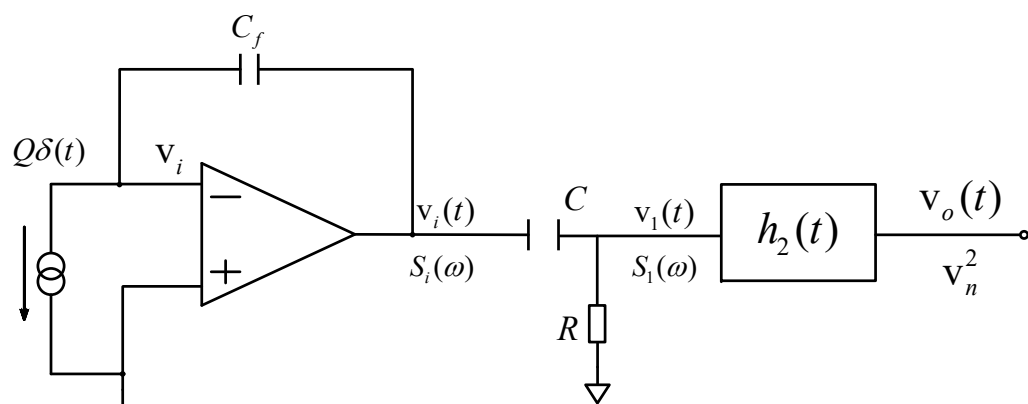
$$(1 + A_O)C_f \gg C_i$$

最佳滤波

- 通过滤波提高信噪比
 - 滤除噪声
- 对叠加于白噪声上的信号，滤波器的频域响应为输入信号频谱的复共轭时可以获得最佳的信噪比
 - 滤波器的冲击响应为输入信号波形的镜像，但延迟了一个输出信号的达峰时间 (t_M)
 - 最佳滤波器输出信号是输入信号与滤波器冲击响应的卷积
- 输入噪声不是白噪声时，利用一个白化滤波器将噪声白化，再串联一个匹配滤波器



电荷灵敏前放后的最佳滤波

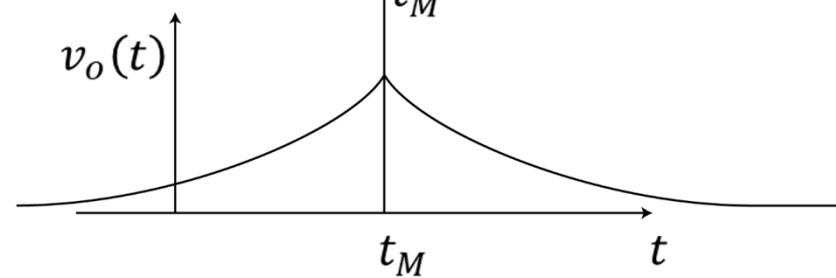
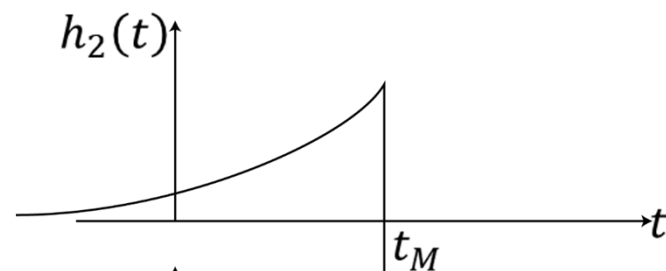
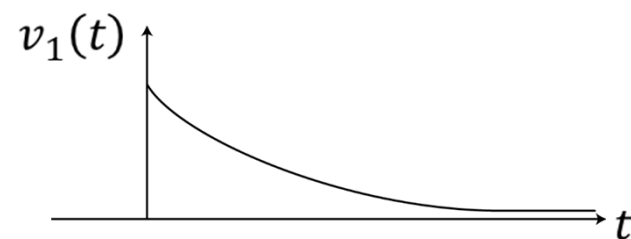
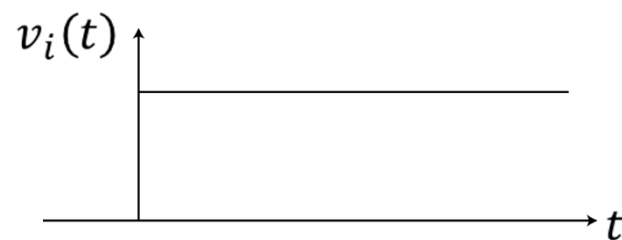


前置放大器

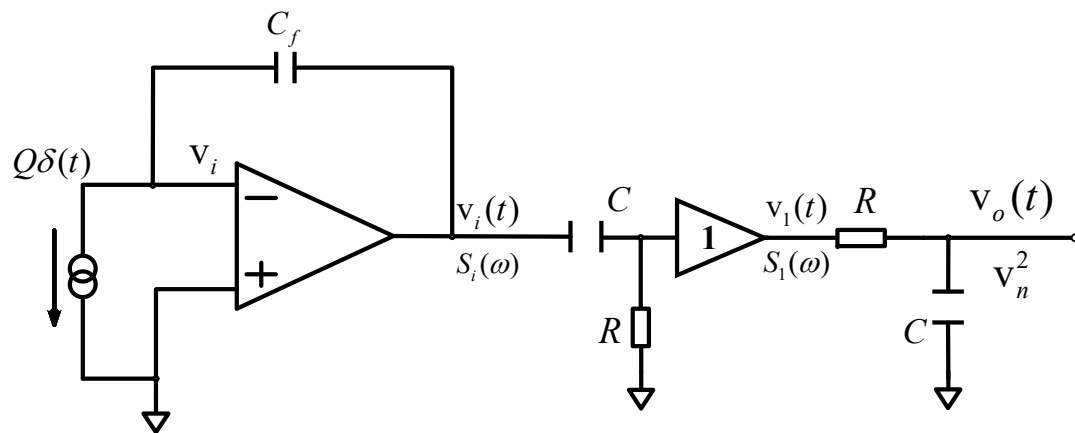
白化滤波器
 $RC = \tau_c = \frac{a}{b}$

匹配滤波器

$$h_2(t) = e^{-\frac{t-t_M}{\tau_c}} u(t_M - t)$$

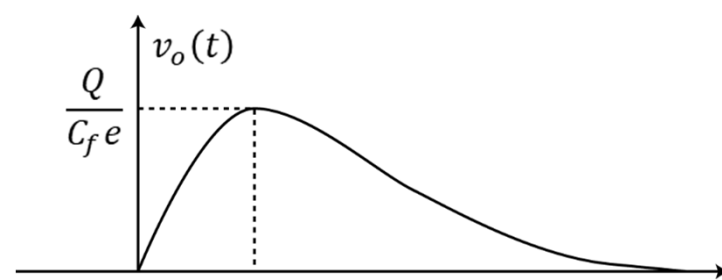
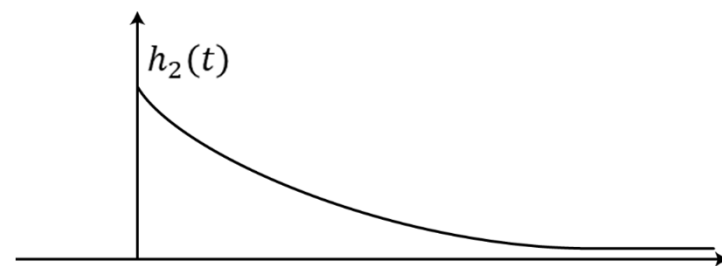
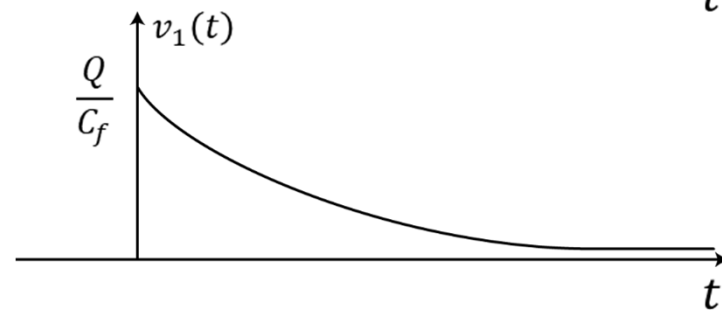
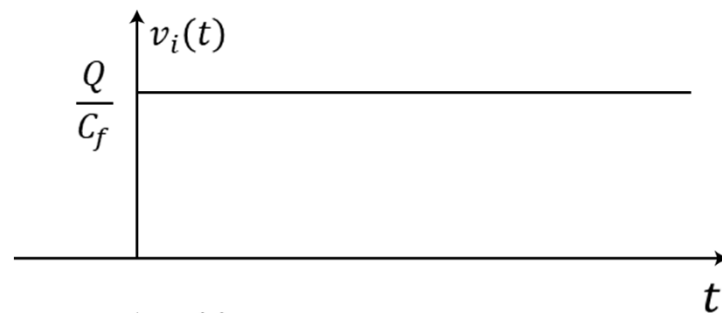


CR-RC滤波



$$h_{\Sigma}(t) = \frac{t}{\tau C_f} e^{-\frac{t}{\tau}} u(t)$$

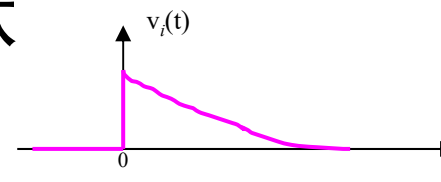
$$F = \frac{\eta_{\infty}}{\eta_{opt}} = \frac{e}{2} = 1.359$$



成形电路

- 使信号成为某种方便采集的某种形状

- 消除弹道亏损、堆积畸变等带来的影响



- 要求

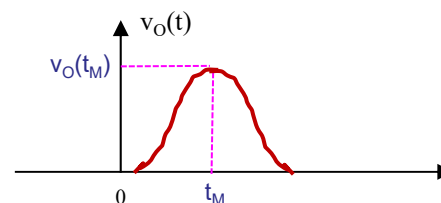
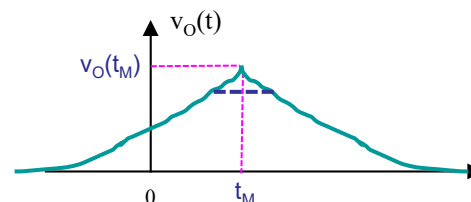
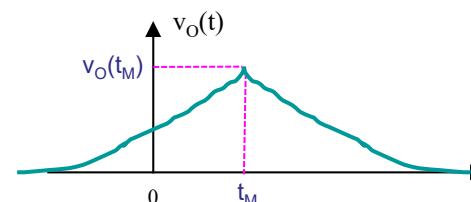
- 系统线性

- 脉冲无反向下冲

- 脉冲宽度尽量窄

- 脉冲峰顶部分平坦

- 电路简单，时间常数或脉冲宽度易调节



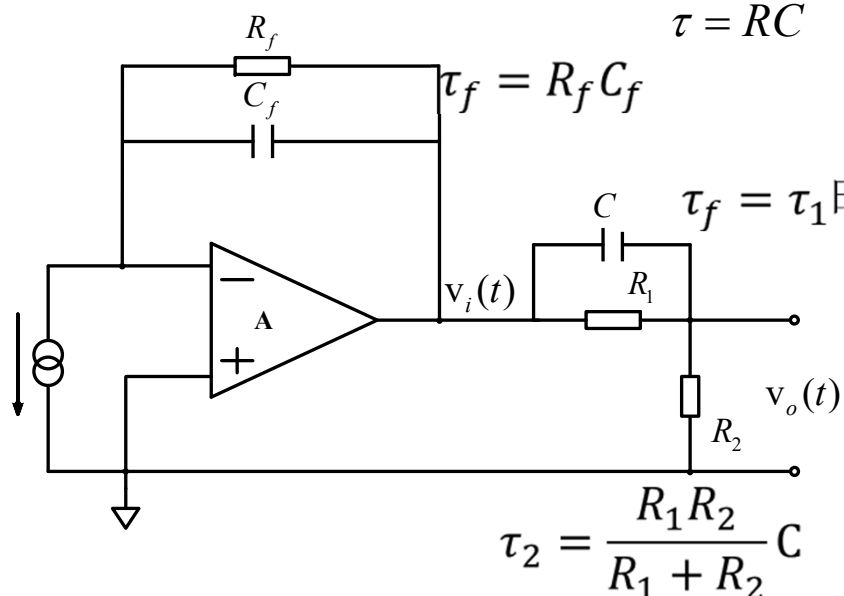
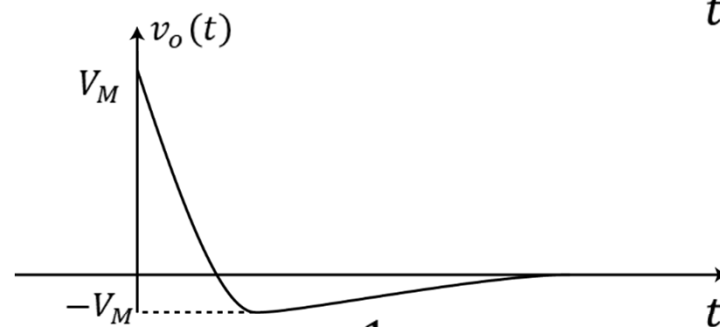
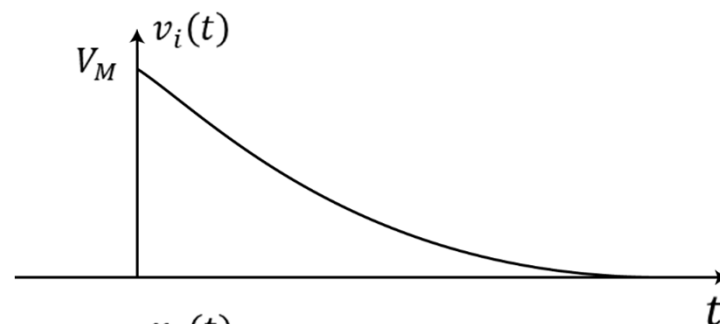
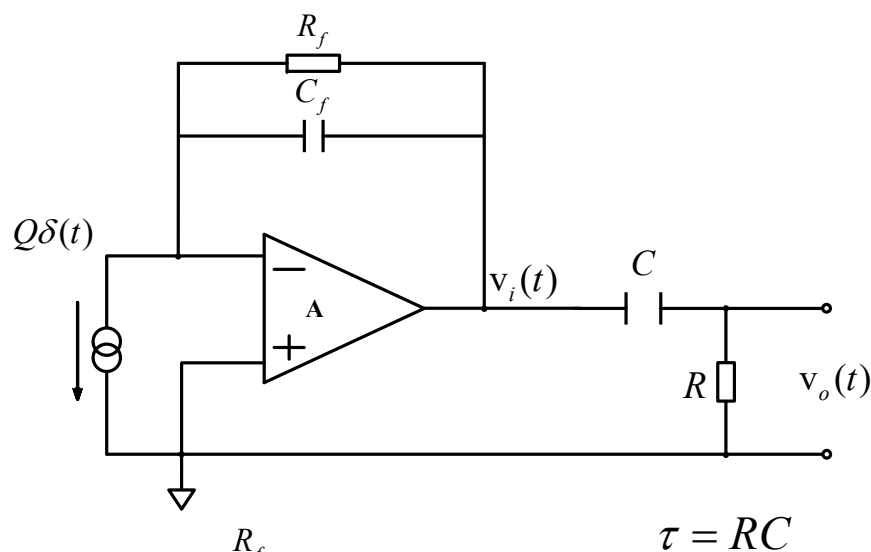
- 形式

- 极-零相消、阻容滤波、基线恢复、堆积拒绝、展宽

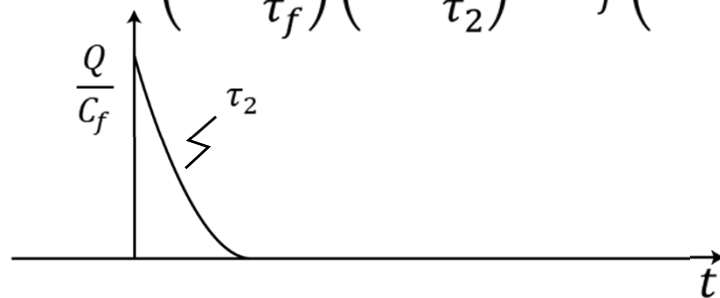
.....

极-零相消

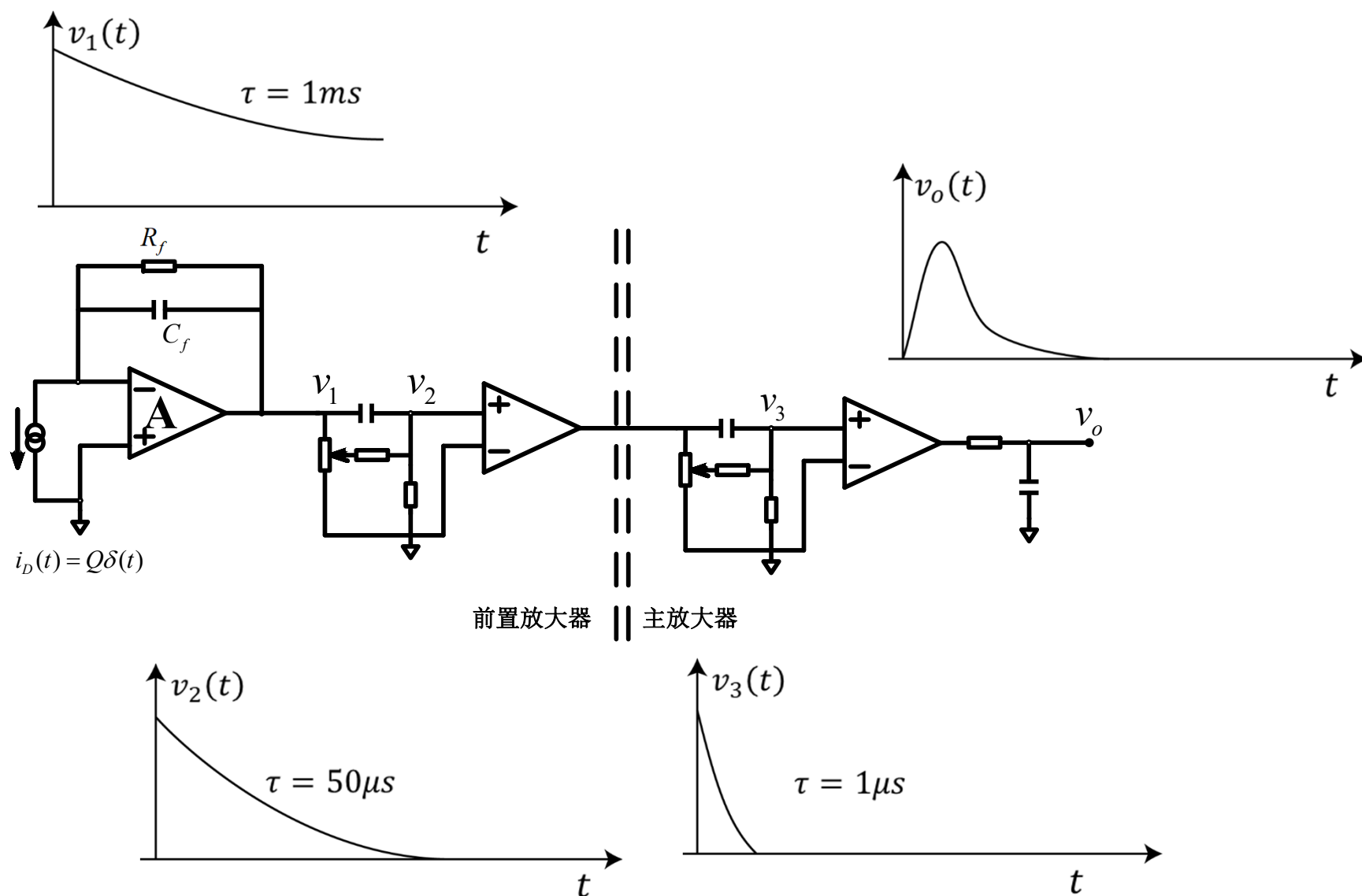
前级传递函数的极（零）点和后级的零（极）点抵消以改善输出波形



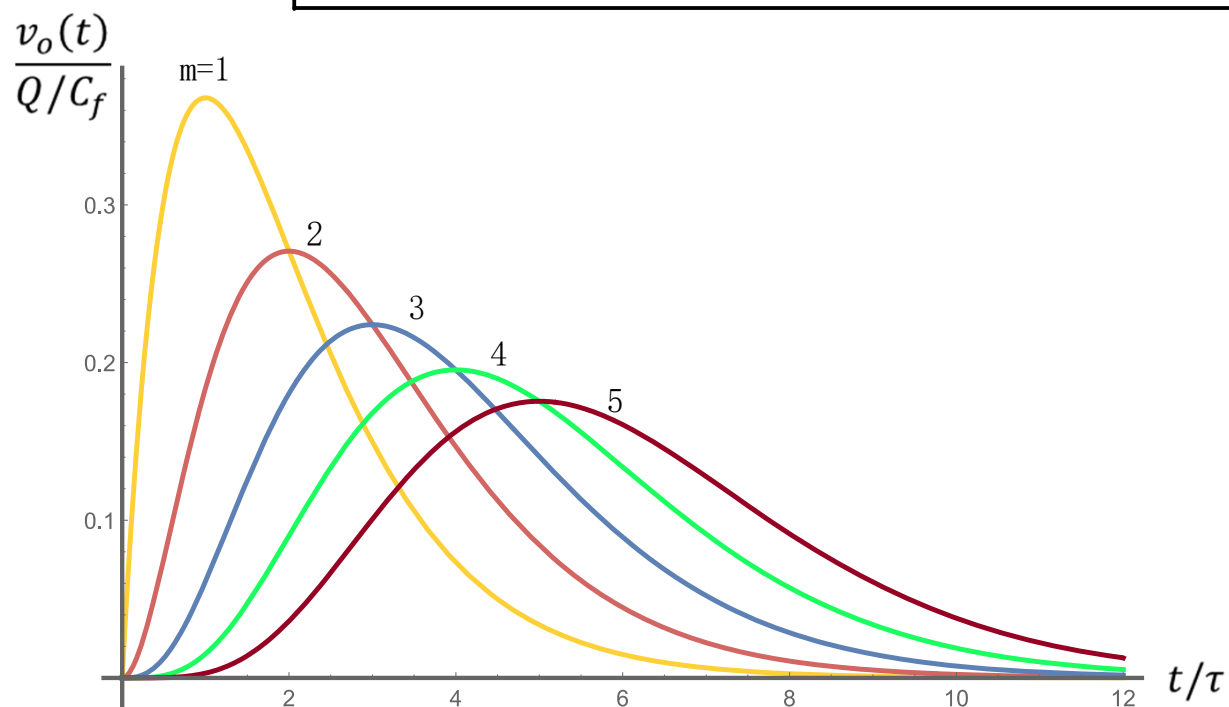
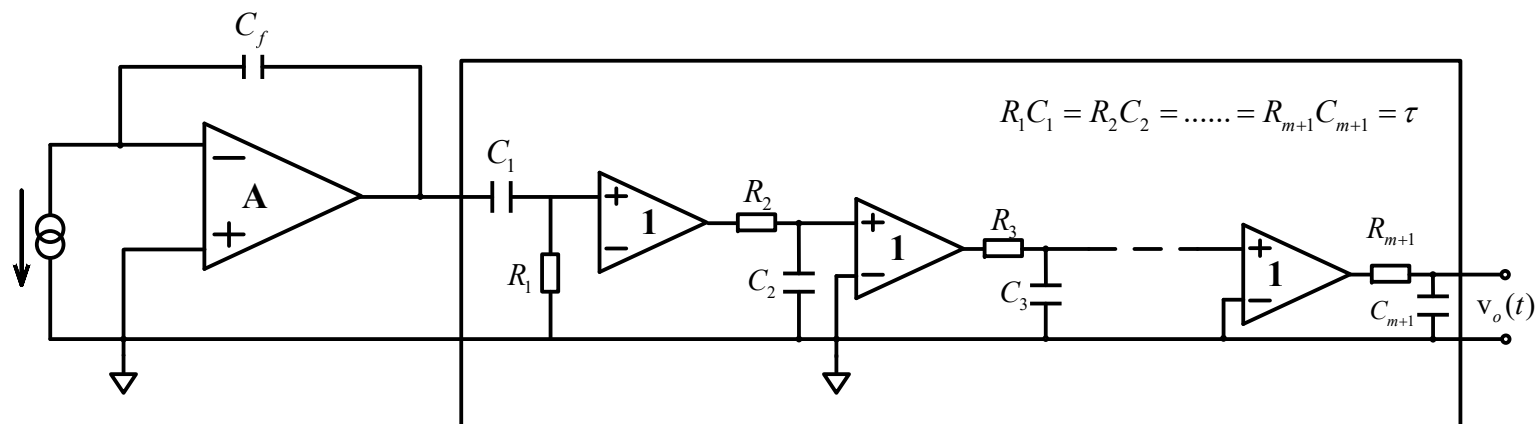
$$\tau_f = \tau_1 \text{ 时 } V_o(s) = \frac{Q}{C_f} \frac{s + \frac{1}{\tau_1}}{\left(s + \frac{1}{\tau_f}\right) \left(s + \frac{1}{\tau_2}\right)} = \frac{Q}{C_f} \frac{1}{\left(s + \frac{1}{\tau_2}\right)}$$



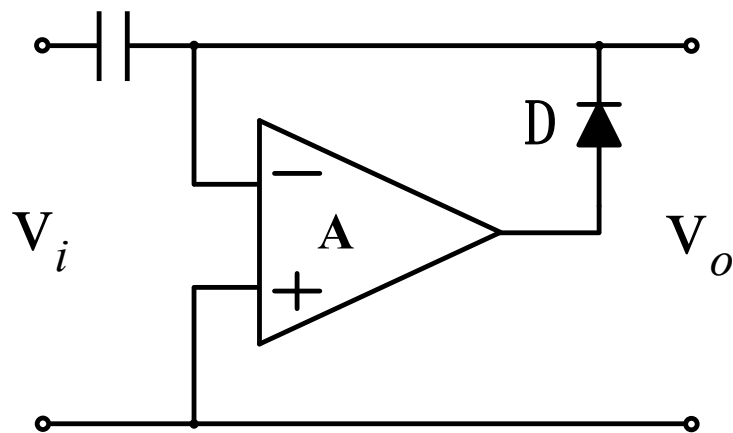
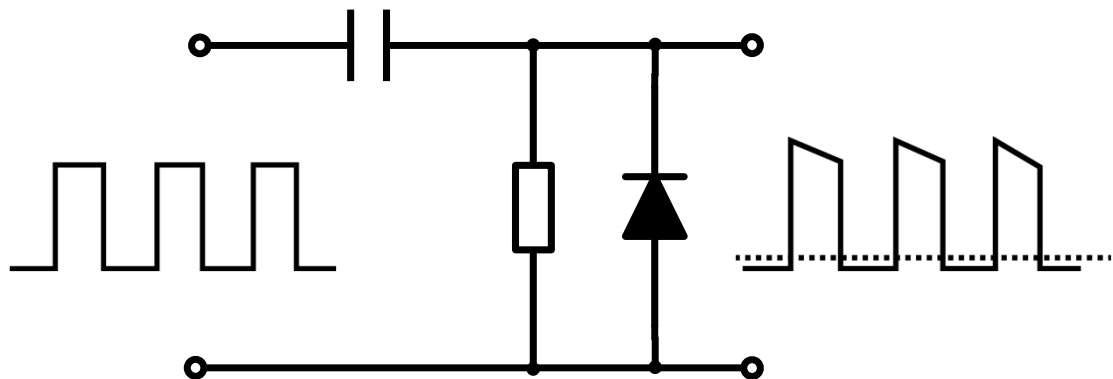
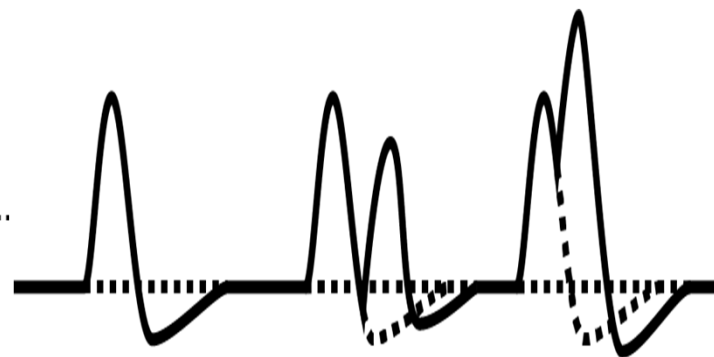
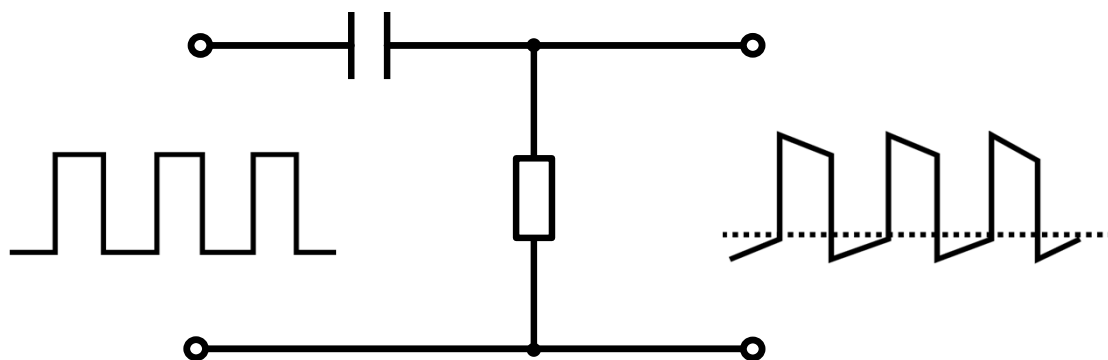
多级极-零相消电路



准高斯成形



基线恢复

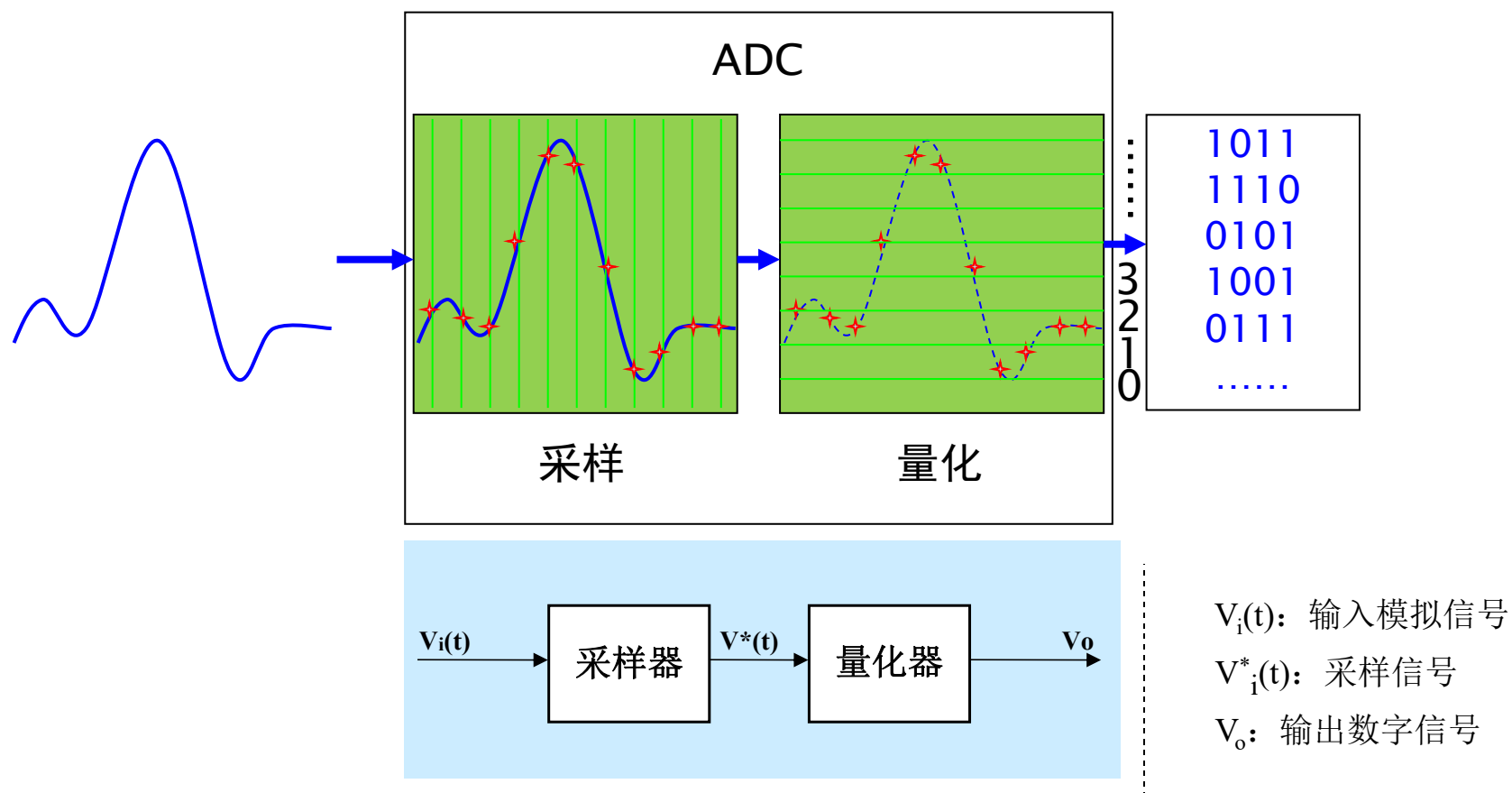


幅度数字化

- 脉冲幅度甄别、单道
- 模拟-数字变换（ADC）
 - 线性放电型（Wilkinson）ADC
 - 并行比较型（Flash）ADC
 - 逐次比较型（SAR）ADC
 - 流水线型（Pipelined）ADC
 -
- 波形数字化技术
 - 开关电容阵列
 - 并行交替采样

模拟-数字变换器 (ADC)

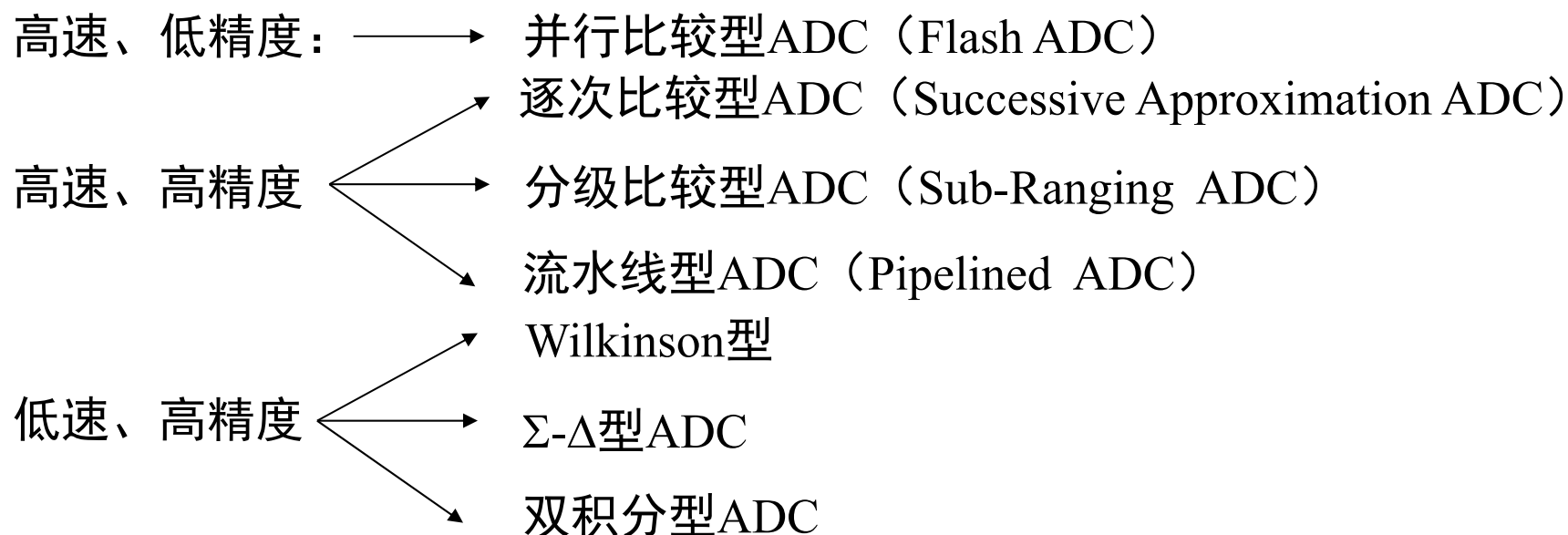
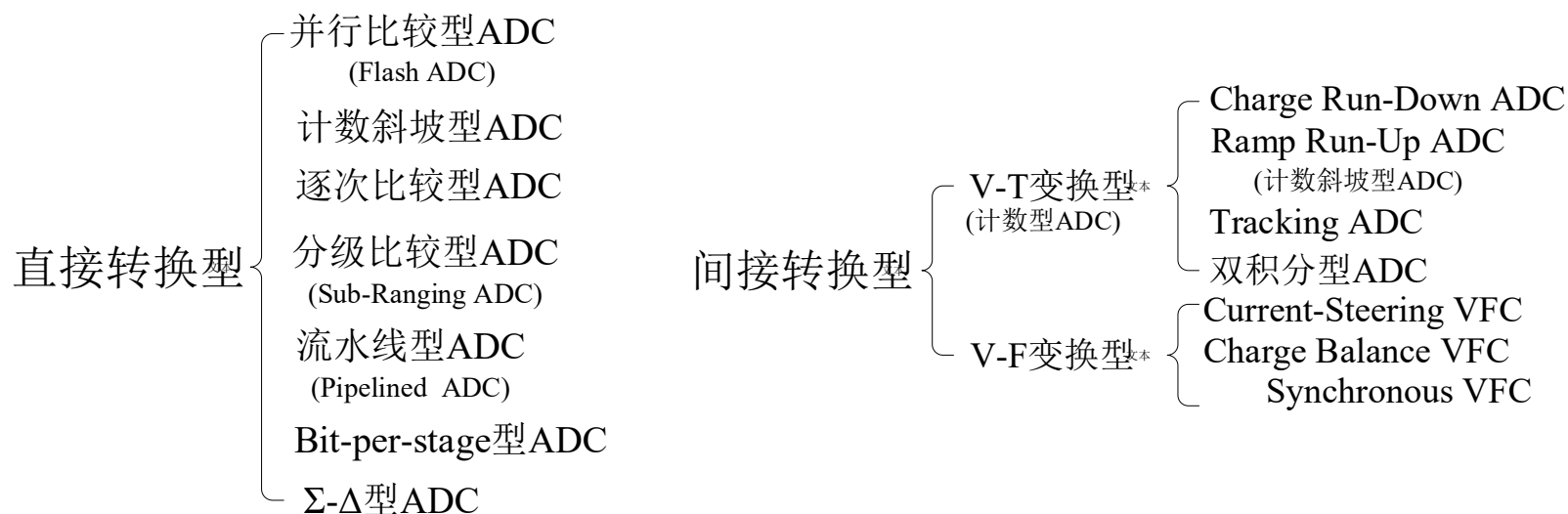
- 指将在时间和幅度都是连续变化的模拟信号转变为在时间和幅度两方面都量化的信号，即所谓的“数字”信号



ADC基本理论

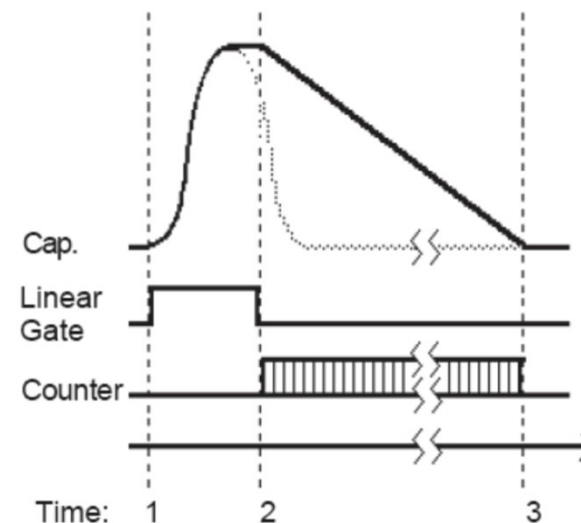
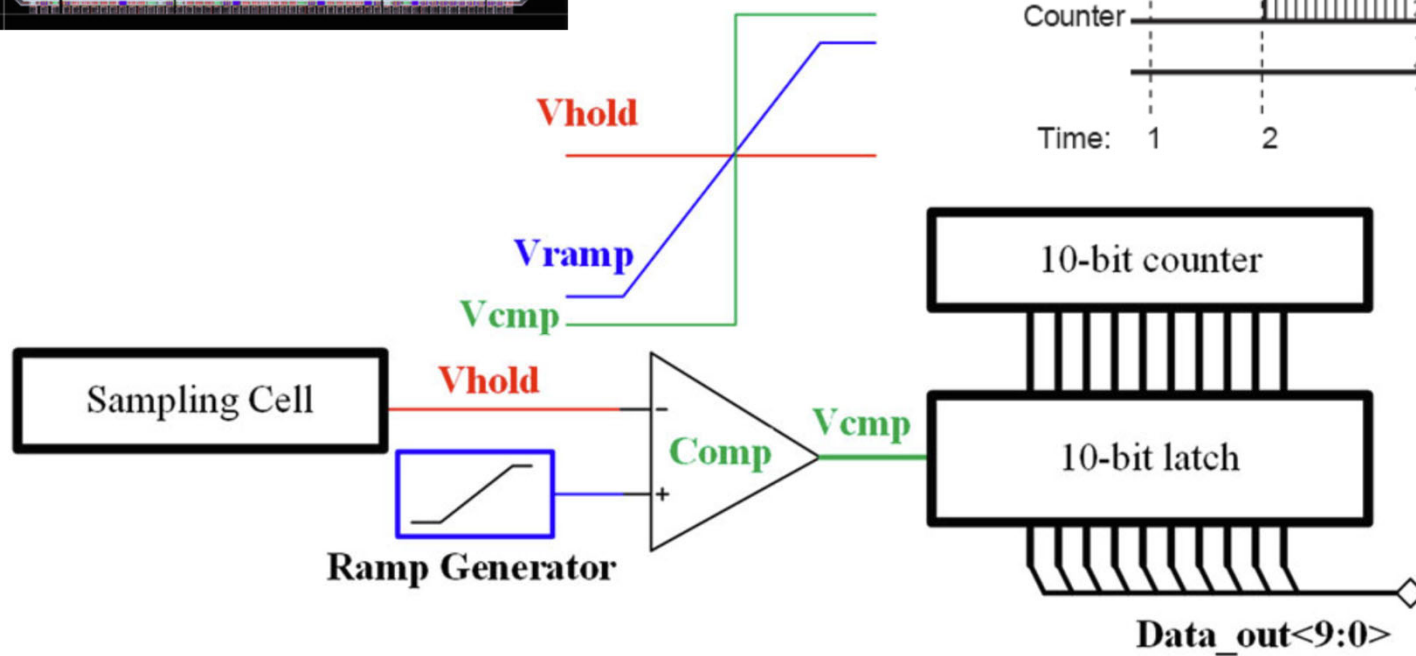
- 采样
 - 采样定理（Shannon采样定理、Nyquist采样定理、WKS采样定理）
 - 过采样
 - 欠采样
 - 等效时间采样
- 保持
- 量化
 - 量化噪声 $\rightarrow$ 理想ADC信噪比： $SNR=6.02N+1.761+10\lg(f_s/2f_a)$
 - 有效位 $ENOB = (SINAD-1.761) / 6.02$
- 编码

ADC基本类型



Wilkinson型ADC

线性好精度高、功耗低、成本小、速度低



Ren, Jy., Wei, W., Jin, Ry. et al. Radiat Detect Technol Methods 4, 63–69 (2020).

并行比较型ADC (Flash ADC) 高速、较低精度、极高功耗

电路组成:

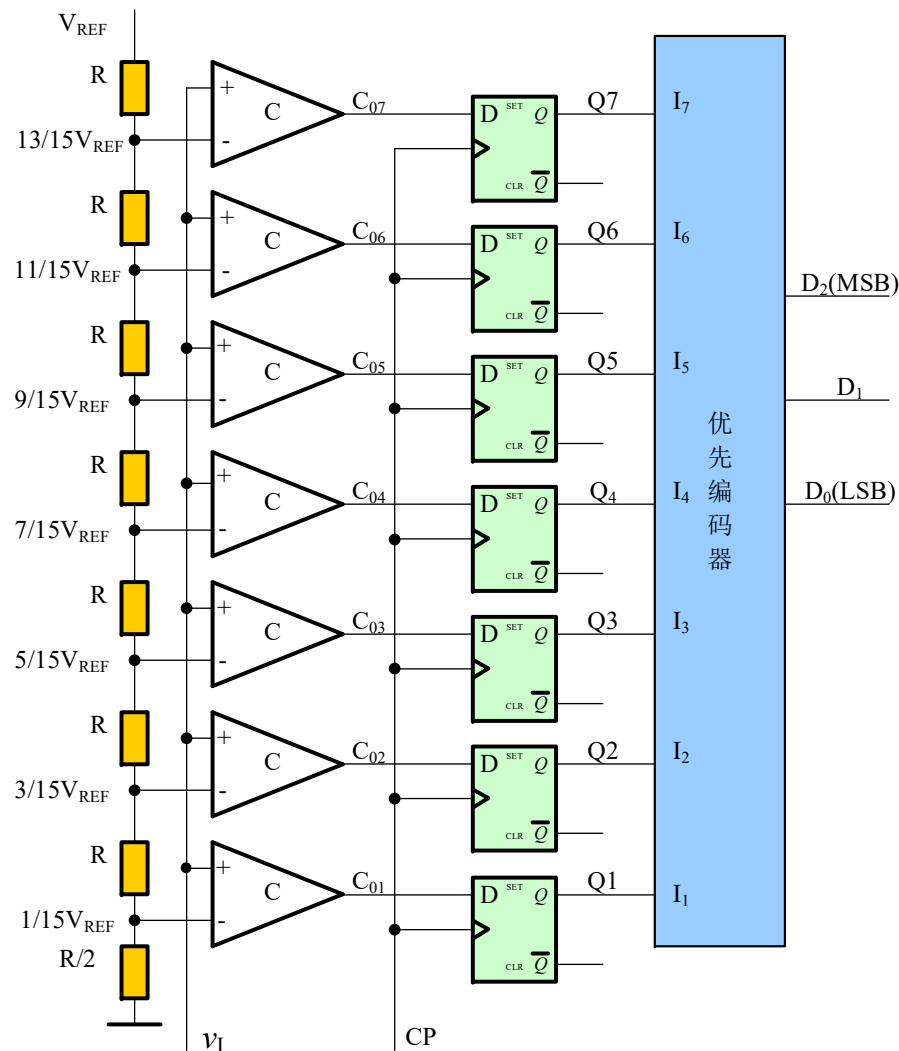
- 由阶梯电阻网络组成的参考电压网络
- $2^n - 1$ 个高速比较器
- 寄存器
- 译码逻辑电路

工作原理:

- 阶梯电阻网络为 $2^n - 1$ 个高速比较器提供阈电平
- 输入模拟信号同时送入所有高速比较器，输入信号幅度大于阈电平的比较器翻转，输出所谓温度计码
- 每个时钟脉冲将当前的温度计码暂存在D寄存器中，经过编码后输出

特点:

- 高速，速度最快ADC(~数十 GSPS)
- 高功耗，高成本
- 精度不高（一般不超过10位分辨）



逐次比较型ADC (Successive Approximation ADC, SAADC)

高精度、低功耗、较低采样率

电路组成：

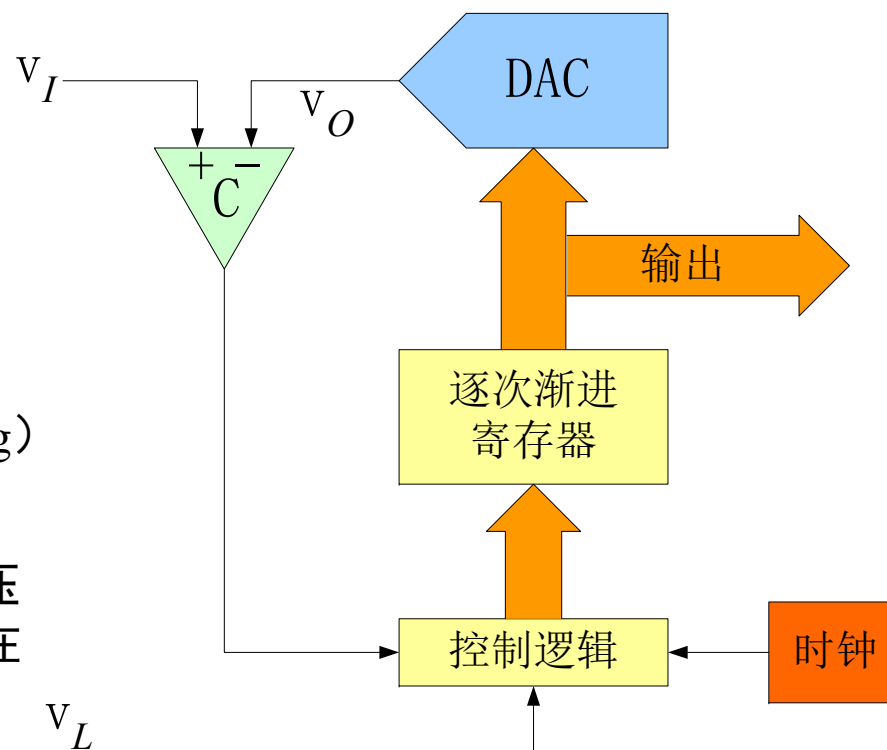
- 取样/保持电路(SHA)
- 高速比较器 (Comparator)
- 逐次渐进寄存器 (SAR)
- 高速数字/模拟变换器 (DAC)
- 控制和定时逻辑 (Control & Timing)

工作原理：

将输入模拟信号与不同的参考电压
做多次比较，使变换所得的数字量在
数值上逐次逼近输入模拟量对应值

特点：

- ◆ n 位ADC完成一次变换需要 n 个时钟周期 (100 KSPS~10 MSPS)
- ◆ 低功耗，低成本
- ◆ 8~16位分辨



SAADC 原理电路图

分级并行比较型ADC(Sub-Ranging ADC)

高速与高精度、低功耗的较好折衷

电路组成(2级并行比较型或其他类型ADC):

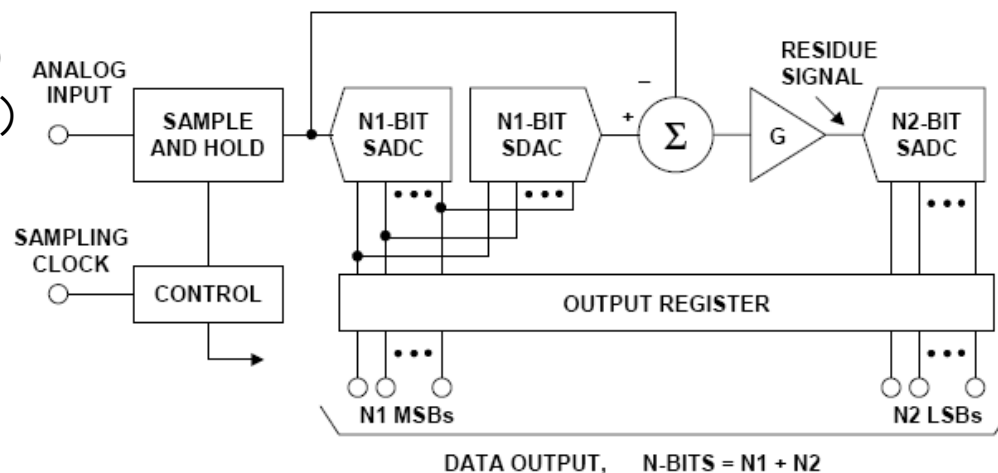
- 取样保持电路
- 第一级Sub-ADC电路
 - N1位高速ADC（并行比较或其他）
 - N1位高速数字/模拟变换器（DAC）
 - 高速相减和放大电路
- 第二级N2位Sub-ADC电路
- 输出电路

特点:

- ◆ 变换速度快, 10 MSPS~100 MSPS
- ◆ 低功耗, 低成本
- ◆ 10~16位分辨

工作原理:

高速ADC（如Flash ADC）和SAADC的结合，将输入模拟信号分多级变换，但每次产生多位数据，且每次变换后相减的差值经放大后再做下一级变换，以提高精度



N-bit两级Sub-Ranging ADC 原理电路图

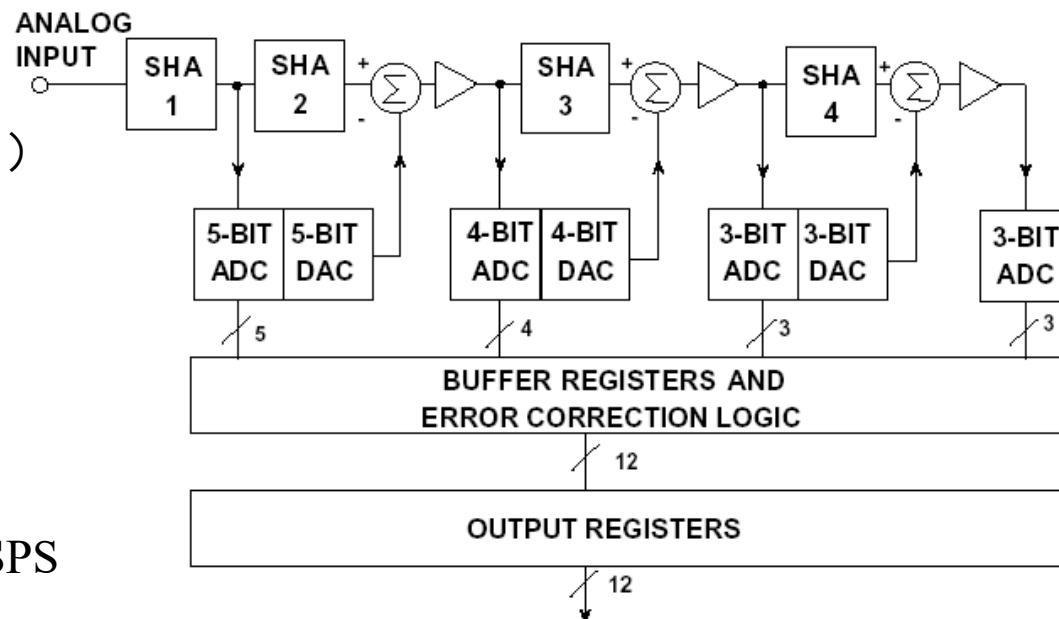
流水线型ADC（Pipelined ADC）

电路组成：

- 输入取样-保持放大器
- 多级高速Sub-ADC电路
 - 取样-保持电路
 - 高速ADC（并行比较或其它）
 - 高速DAC
 - 高速相减和放大电路
- 缓冲寄存器和误差修正电路
- 输出寄存器

特点：

- ◆ 变换速度快，10MSPS~200MSPS
- ◆ 低功耗，低成本
- ◆ 10~16位分辨



Pipelined ADC原理方框图

工作原理：在分级并行比较器型ADC的基础上，每一级均增加一个取样-保持电路

- 每一级ADC变换完毕后，其取样-保持电路即可进行新的取样-保持
- 不必象分级并行比较器型ADC等整个变换过程结束后，输入取样-保持电路才接收新的取样值

基于波形数字化的实验数据采集

- 波形数字化的核心——ADC

- ADC基本理论
- ADC类型及应用

- ADC性能及影响因素

- 基本性能指标 $SNR = 6.02N + 1.76 + 10\log(f_s / 2f_a)$

- 影响因素

- 模拟信号引入

- 信噪比

- 采样率

- 采样时钟的抖动

- 电源与地的设计

- 布局布线.....

$$SNR = 20\lg\left[\frac{1}{2\pi f t_j}\right]$$

ADC的主要技术指标

ADC技术指标种类很多，不同应用有不同侧重：

- 静态性能参数：

1. 偏置失调误差
2. 增益误差
3. 微分非线性误差
4. 积分非线性误差
5. 失码
6. 绝对精度误差

- 动态传输特性指标：

1. 信噪比
2. 总谐波失真
3. 信号与噪声加畸变比
4. 总谐波失真加噪声
5. 有效位
6. 模拟带宽
7. 无伪峰动态范围
8. 互调失真

一些经典参考文献

- **HIGH SPEED DESIGN TECHNIQUES**

Walt Kester, Analog Devices, Inc.

- **MIXED-SIGNAL AND DSP DESIGN TECHNIQUES**

Walt Kester, Analog Devices, Inc.

- **ANALOG-DIGITAL CONVERSION**

Walt Kester, Analog Devices, Inc.

- **IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters**

IEEE Std 1241-2000

- **Full-Speed Testing of AD Converters**

JOEY DOERNBERG, HAE-SEUNG LEE, DAVID, A.HODGERS

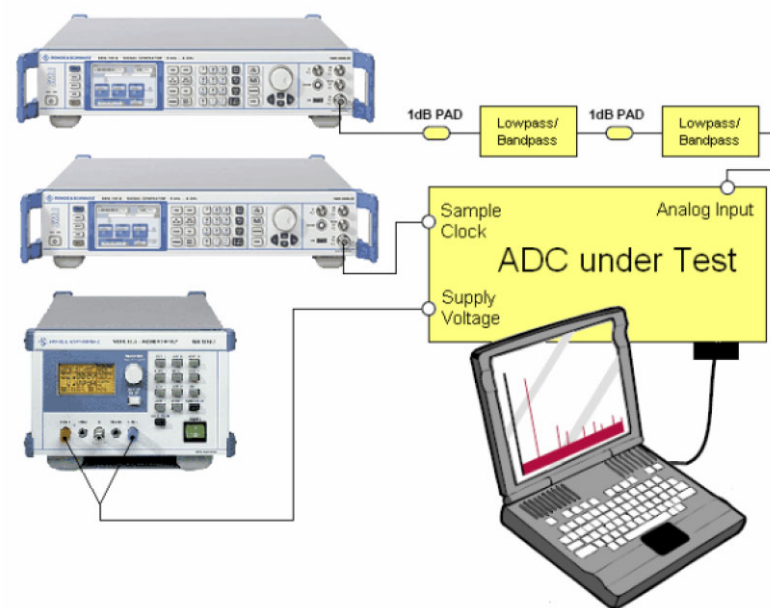
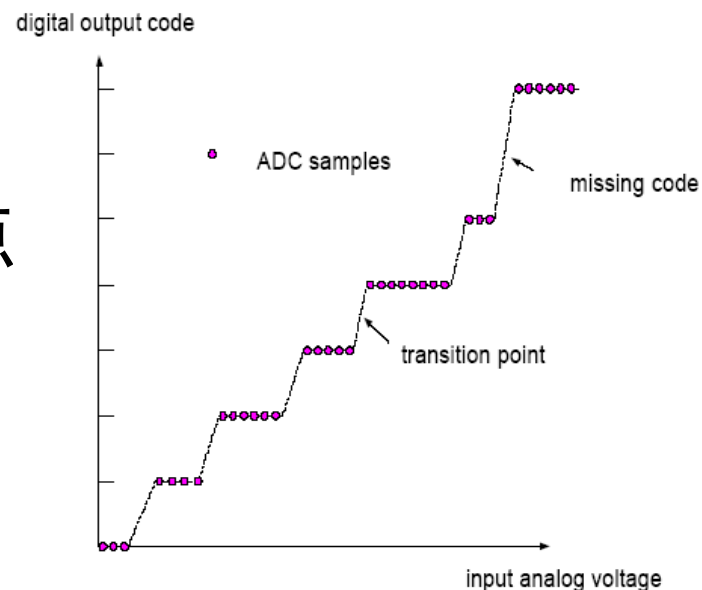
- **ADC characterisation using the code density test method with deterministic sampling**

Valentino Liberali, Franco Maloberti, and Massimo Stramesi,

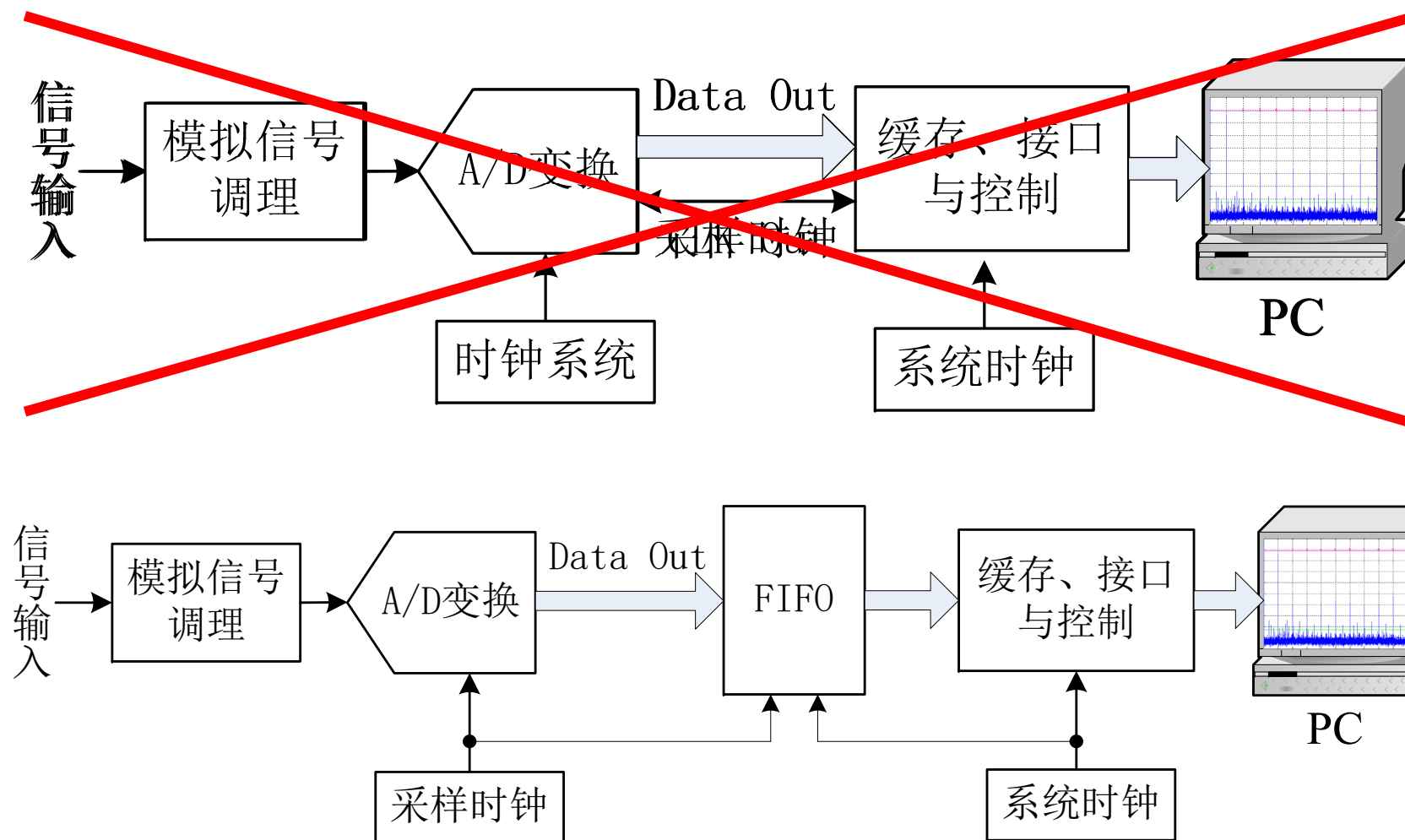
Department of Electronics, University of Pavia

ADC性能的评估方法

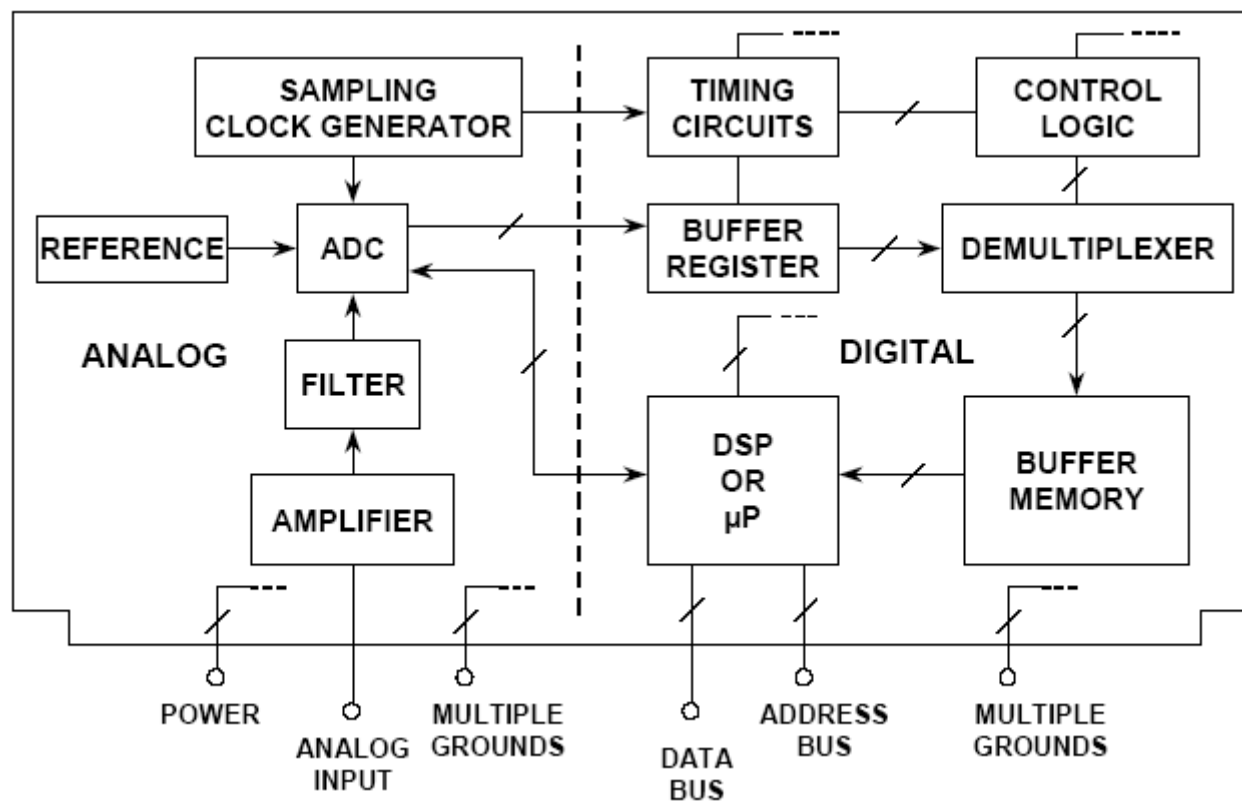
- 静态特性的测试
 - 寻找传输特性曲线的转换点
 - 手动测量
 - 步进测量
 - 直方图统计法
 - 由转换点计算静态特性
- 动态特性的测试
 - 频谱分析法
 - 正弦波四参数估计法



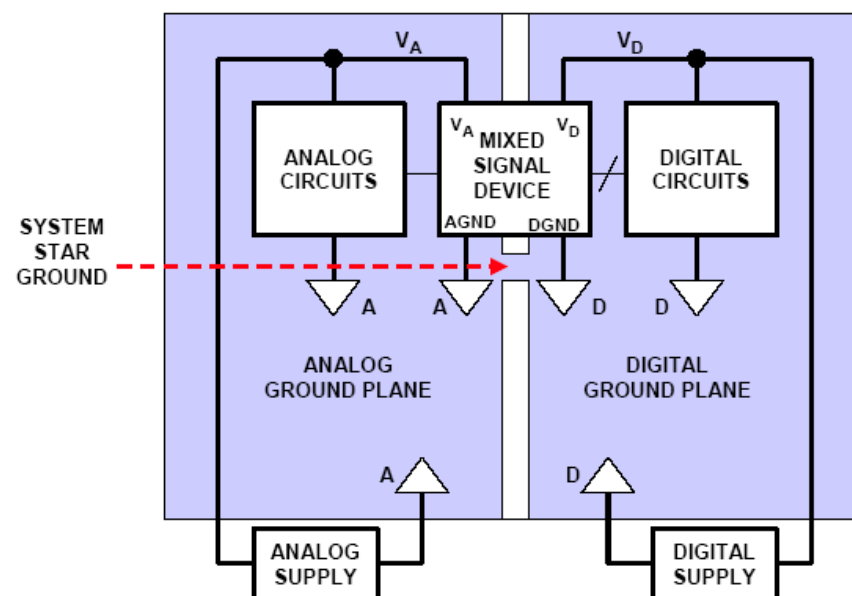
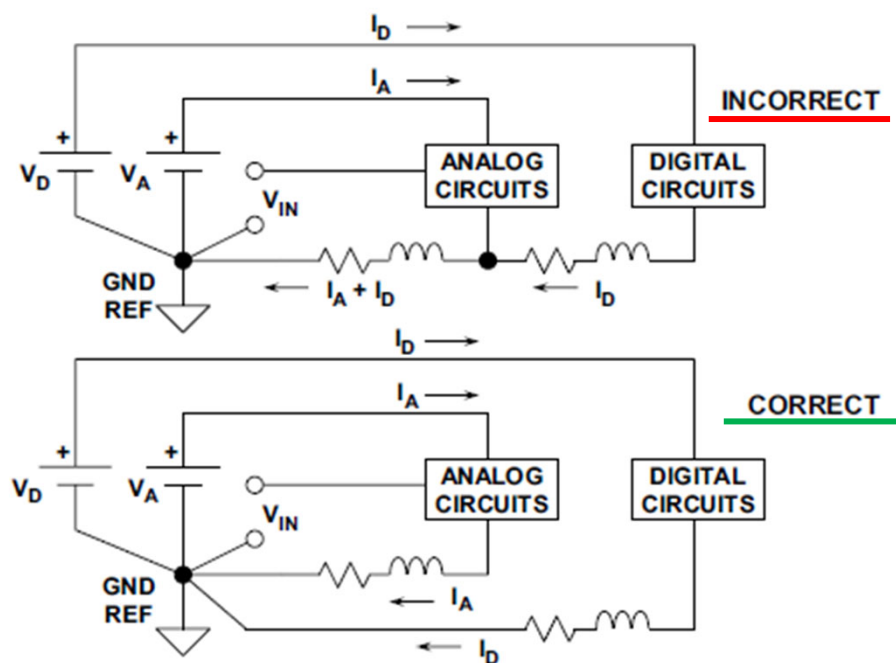
数据采集系统中的时钟



器件分区



模拟/数字地平线



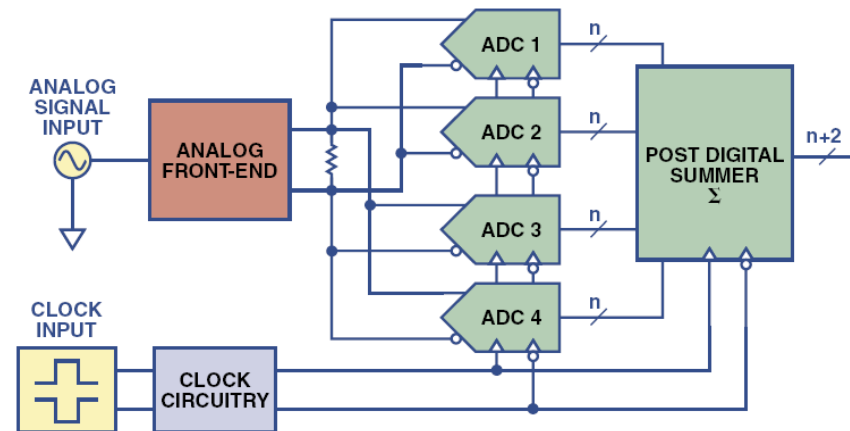
提高ADC性能的方法

- 精度
 - 平均 (Signal Averaging)
- 速度
 - 并行、交替工作(Time Interleaving)
 - 时间扩展(Time Stretching)

Signal Averaging提高信噪比

- 现有技术条件下不降低速度提高精度
- 理论上4片同样的ADC输出相加可提高信噪比6dB（有效位1位）
 - $V_{S1}=V_{S2}=V_{S3}=V_{S4}$ ，信号幅度直接相加
 - 幅度 $\times 4$
 - 各ADC噪声不相关，噪声幅度是方和根（root-sum-square, RSS）
 - 幅度 $\times 2$
 - 信噪比增加 $20\lg(4/2)=6.02$
 - 有效位增加1
 - 更多片ADC平均将更有效提高信噪比
- Averaging还可降低offset、gain误差
- 但不能提高线性和SFDR
 - 由最差的一片ADC决定

$$V_T = V_{S1} + V_{S2} + V_{S3} + V_{S4} + \sqrt{V_{N1}^2 + V_{N2}^2 + V_{N3}^2 + V_{N4}^2}$$



Number of ADCs	Increase in SNR (dB)
2	3
4	6
8	9
16	12
32	15

AD10678芯片

- ADI公司

- 集成4个AD6645 (14bit ADC)、时钟分配系统、1个CPLD（实现高速数字加法）

- 分辨率：16 bit

- SNR of ~80 dBFS @up to 10 MHz
 - AD6645: SNR=74 dB, ENOB~12 bit
 - AD10678: SNR=80 db, ENOB~13 bit

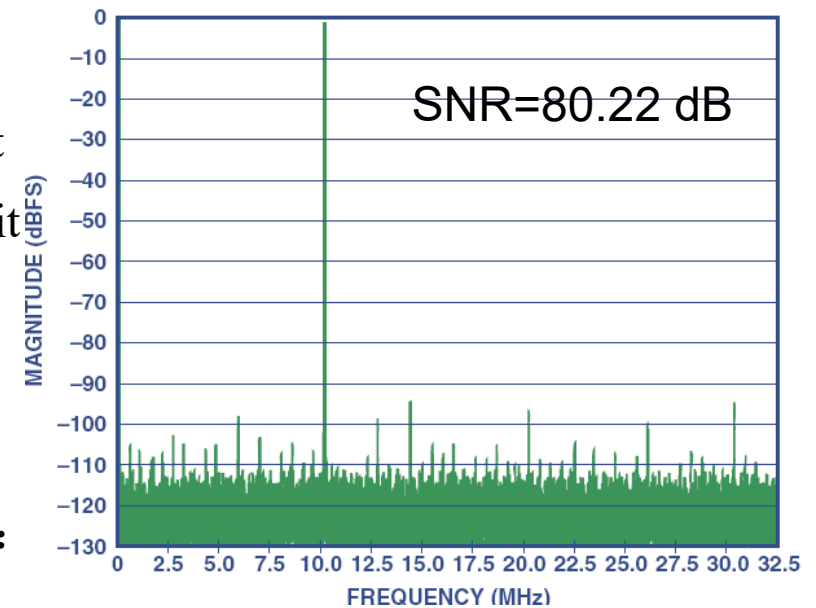
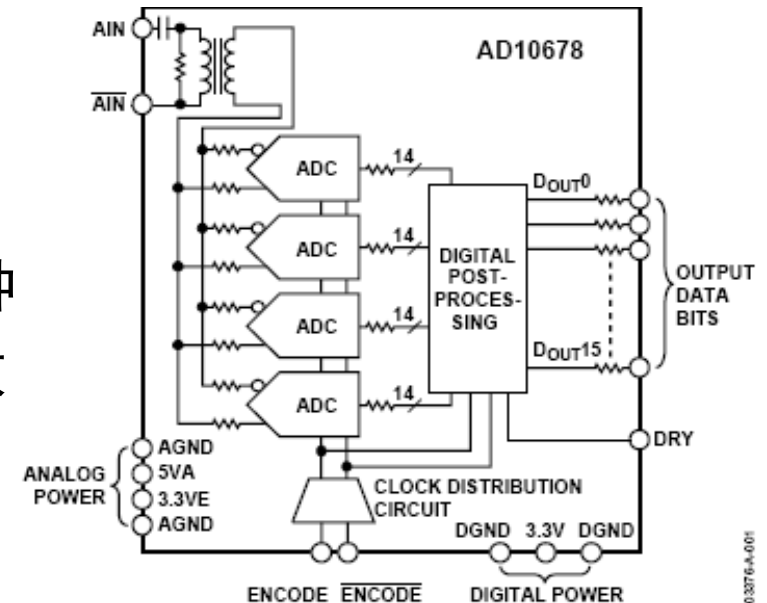
- 采样率：80 MSPS

- 模拟带宽0.4 MHz ~ 220 MHz

✓多通道封装的ADC芯片有利于Averaging的设计:

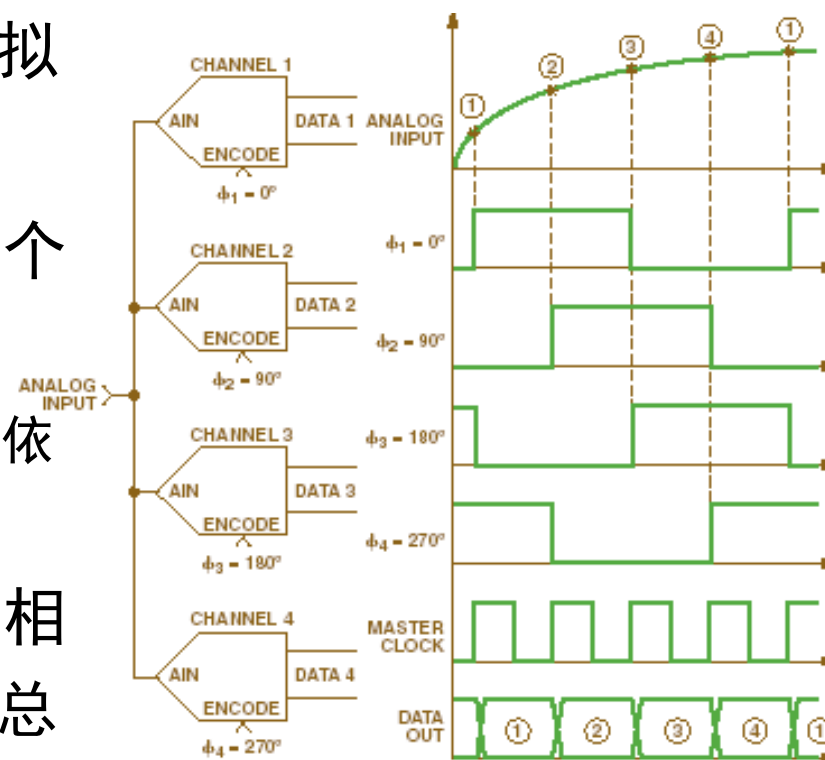
AD9229: 4通道、12 bit@65 MSPS

AD9252: 8通道、14 bit@50 MSPS



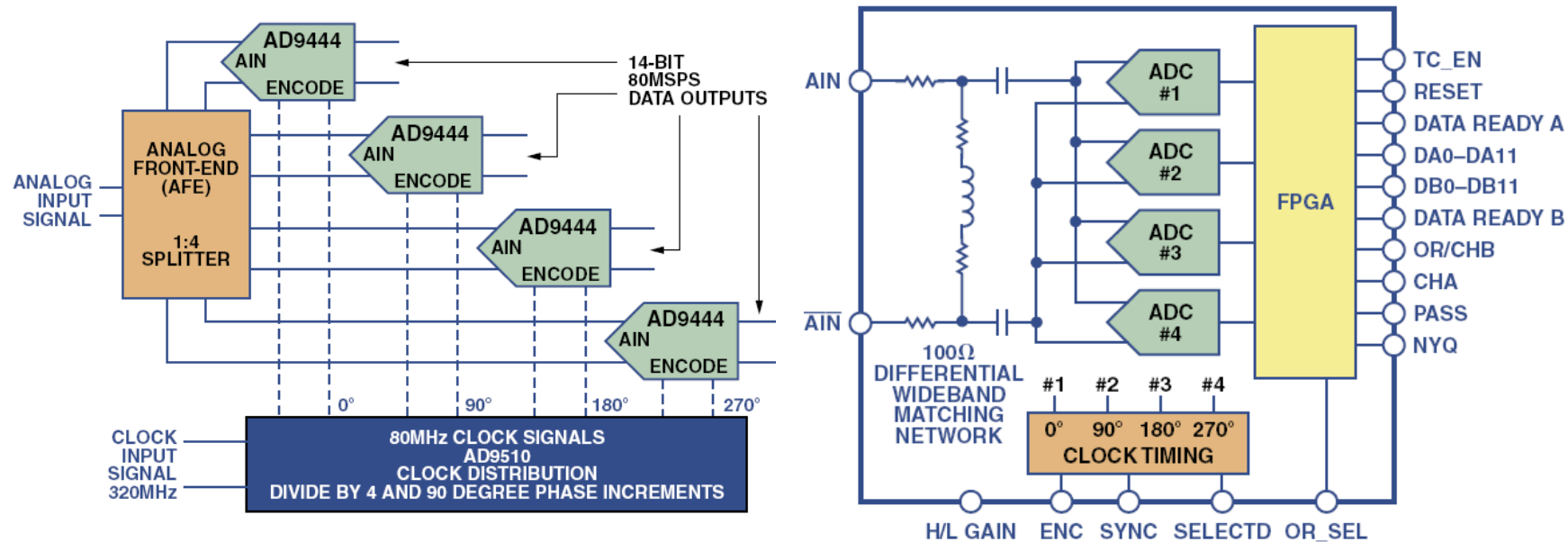
Time Interleaving提高采样率

- 1980年，美国Black和Hodges提出
- M个并行ADC共同对同一个模拟输入信号进行变换
- 各ADC的变换时钟依次错开一个固定的相位，
 - 使各ADC以一个固定的时间间隔依次对输入信号进行变换
- 最后所有ADC的数字输出再按相同规律汇总在一起，形成一个总的数字输出



等效于将ADC的采样速率提高了M倍

典型应用：ADI公司芯片



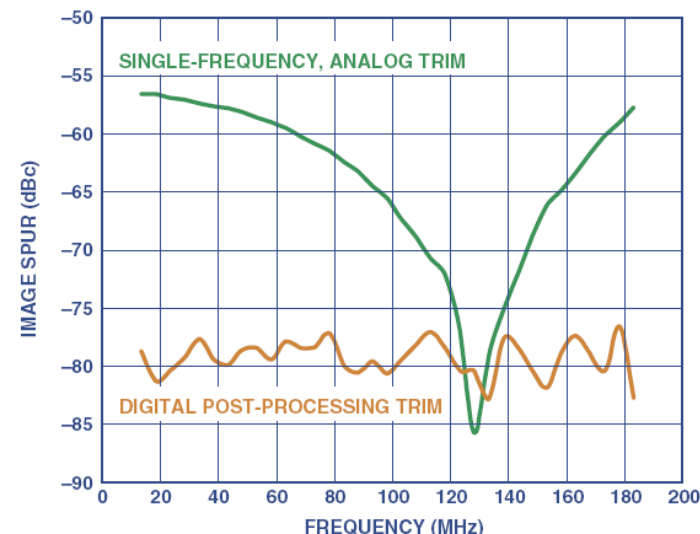
AD12500:12-bit, 500-MSPS ADC

并行采样的难点：通道间失配

- 增益失配（Gain Mismatch）
 - 由采样电路和量化过程中各通道增益不一致而引起
 - 导致采样信号的幅度调制
- 时钟相位失配（Time-Skew Mismatch）
 - 由于多相时钟不完全理想及PCB 板布线的延迟不一样而引起
 - 导致采样信号的相位调制
 - 增益误差和时间相位误差相互影响，在频谱上导致原始信号频谱在单通道采样率整数倍频点上的频谱搬移
- 偏置/零点失配（Offset Mismatch）
 - 各通道直流偏置不一致而引起
 - 导致在频谱上单通道采样率整数倍的频点上出现伪谱线

传统通道失配调节方法

- 减少通道之间物理和电子学上差别
 - 增益
 - 使用公共的基准电压
 - PCB设计时仔细地进行芯片布局和布线
 - 时钟相位
 - 时钟信号的一致性考虑
 - 上升/下降时间、偏置电平、触发电平
 - 时钟信号的分布和传输
 - 差分信号传输、1: N的时钟信号驱动、精确的相位调节、减少串扰
 - PCB设计时仔细地进行芯片布局和布线
 - 偏置失配
 - 仔细调节各ADC的偏置电压
- 缺点：当时间、温度和工艺改变后，修正的结果就变为无效

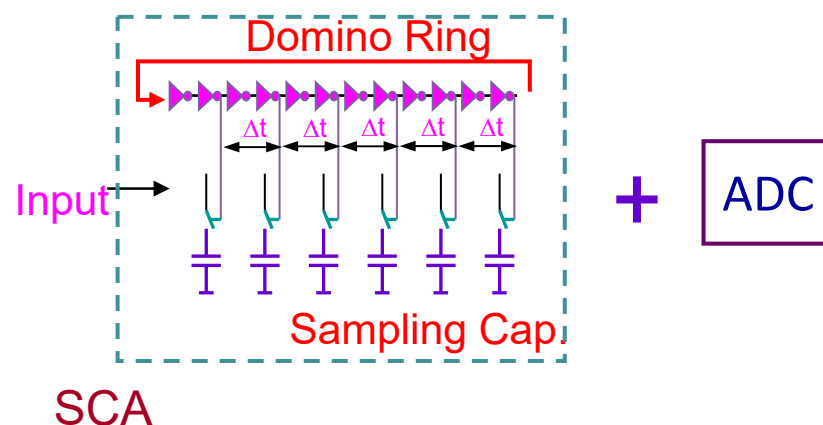


数字化通道失配调节方法

- 数字后端处理技术(Digital Post Processing Techniques, DPP)
 - 误差估计算法
 - 误差修正算法
- 采用离线（计算机软件）或实时（DSP、FPGA、CPLD、ASIC等）手段对数据进行处理
- 优点
 - 性能大大提高（提高速度）
 - 大大减少硬件电路的设计难度（模拟和数字两方面）
 - 系统成本减少
 - 灵活：实时或离线处理
 - 技术生命力强，可持续应用到每一代新的ADC芯片上

SCA (Switched Capacitor Array)

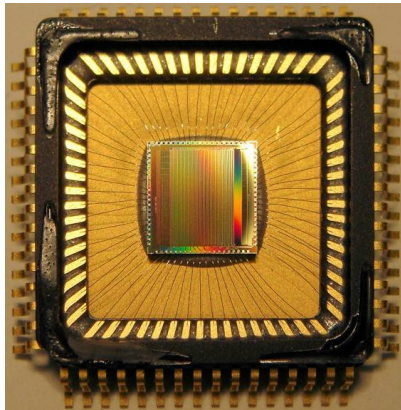
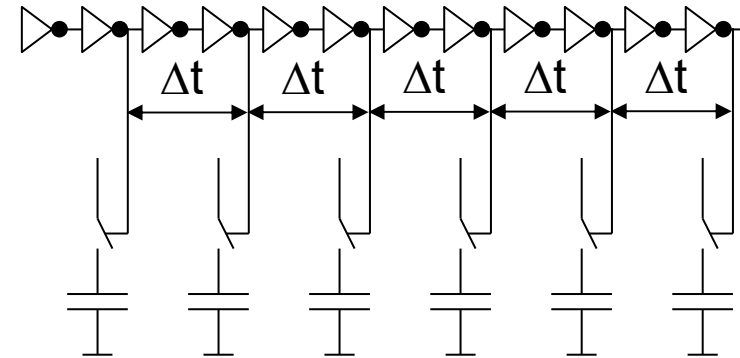
- 多是开关电容阵列与Wilkinson型等其他ADC的结合 (SCA + ADC)
- ATWD、LAB、DRS等.....
- 用于物理实验等事例率不高的波形数字化



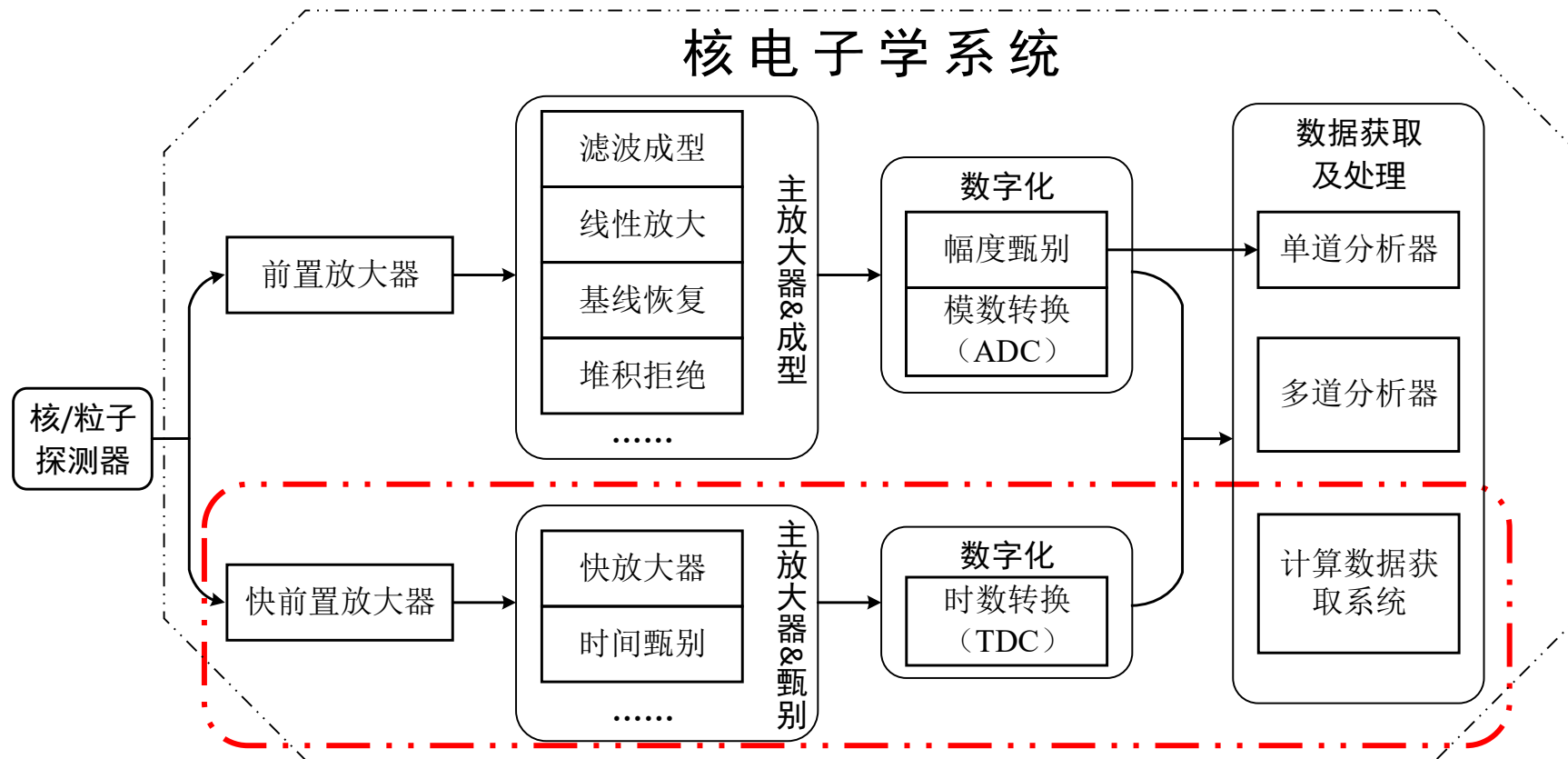
SCA \ 参数	采样率/GHz	存储深度/cell	通道	读出时间/ μ s	功耗 mW/ 通道
DRS4	6	1024/8192	9	30~245	45
TARGET7	1	16384	16	5.9~3020	10
PSEC4	15	256	6	3.2~19.2	17

DRS4

- Paul Scherrer Institute (PSI)研发
- 采样率：700 MSPS~5 GSPS
- 读出时间：每个点33 ns
- 功耗：140 mW@2 GSPS
- 采样深度：1024 cells
- 通道数：8+1

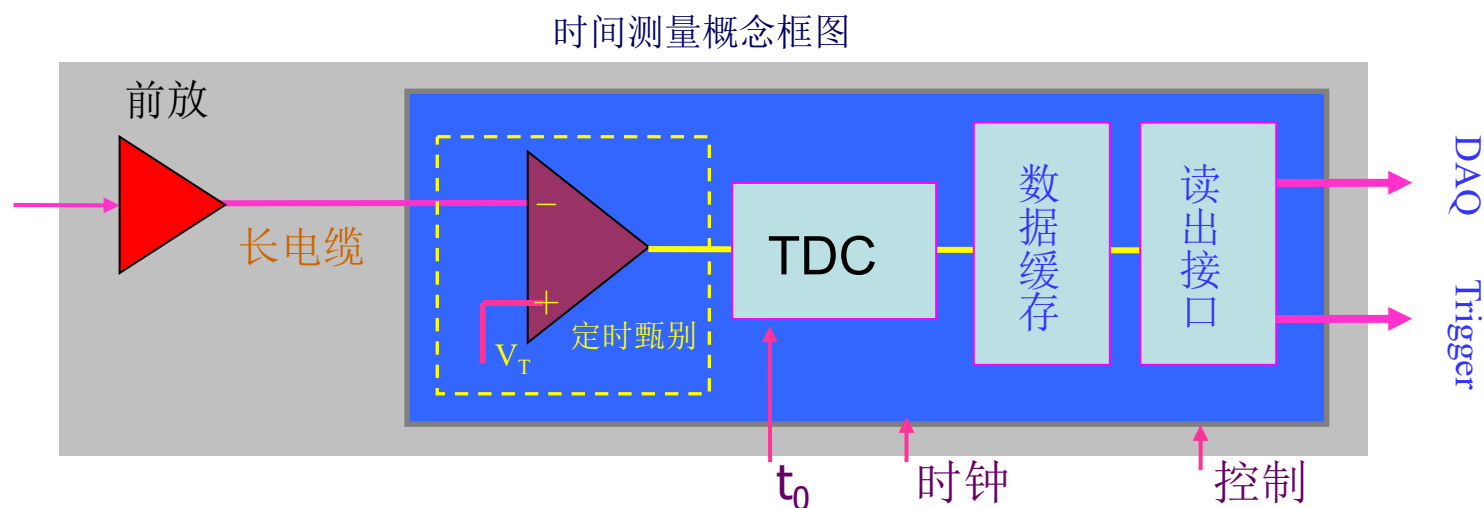


核电子学信号处理



时间测量

测量探测器输出信号的出现时间，即针对某一参考信号 (t_0) 的时间间隔



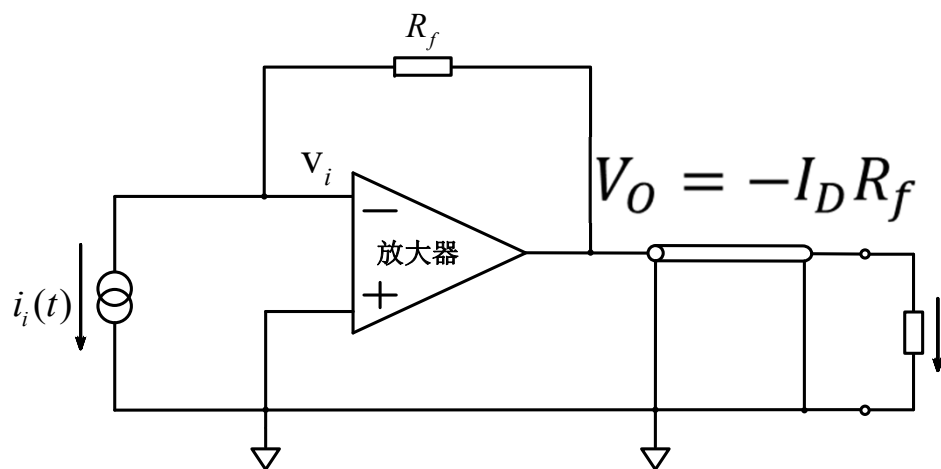
由定时甄别电路确定信号的出现时刻

由时间—数字变换 (TDC) 电路将被测信号和参考信号 (t_0) 之间的时间间隔转换成数字数据

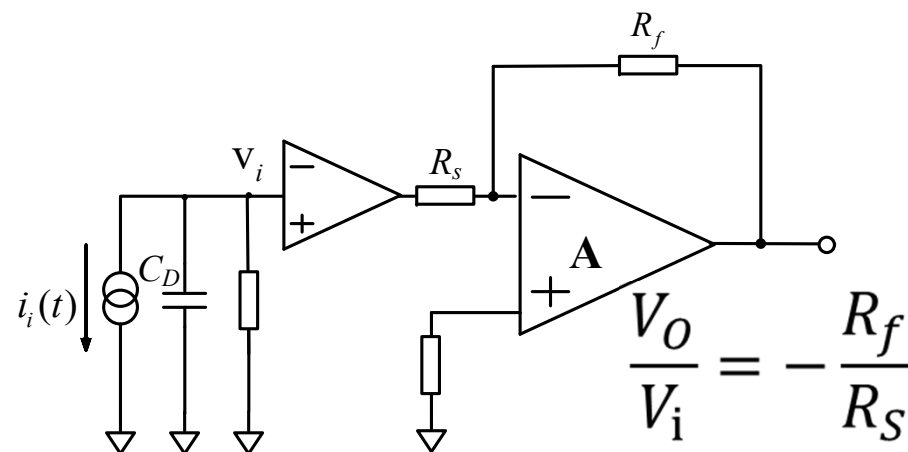
快前置放大器

- 快时间响应
 - 保持输入信号波形
 - 相对大的噪声

➤ 电流灵敏前放



➤ 电压快前放



定时甄别

- 前沿定时 (Leading Edge Disc.)

- 电路简单定时精确，时间晃动小
- 存在着“幅度-时间游动”效应

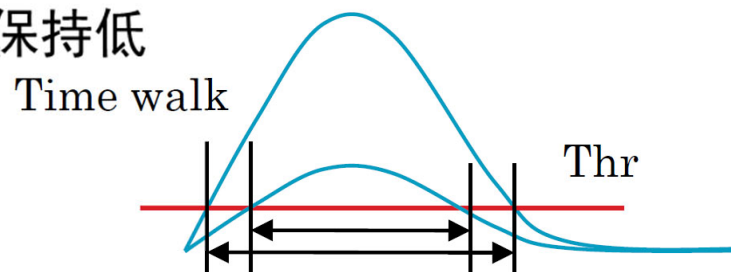
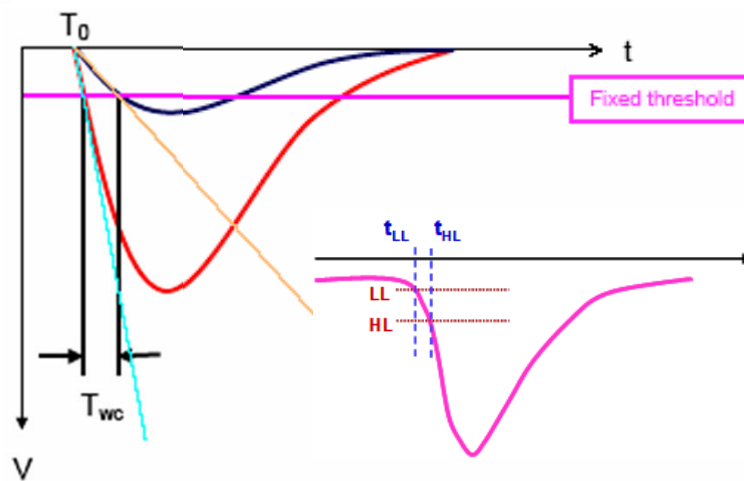
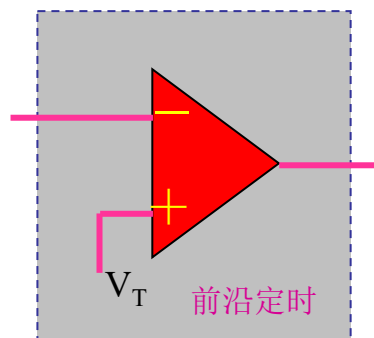
- 触发比: $f = \frac{V_T}{V}$

- 对于时间晃动特性: 希望较大触发比
- 对于时间游动效应: 希望较小触发比

- 经常采用双阈甄别技术

- 只有高于高阈的信号，电路才有输出
- 利用高阈来剔除噪声和干扰信号，又保持低阈甄别的时间信息

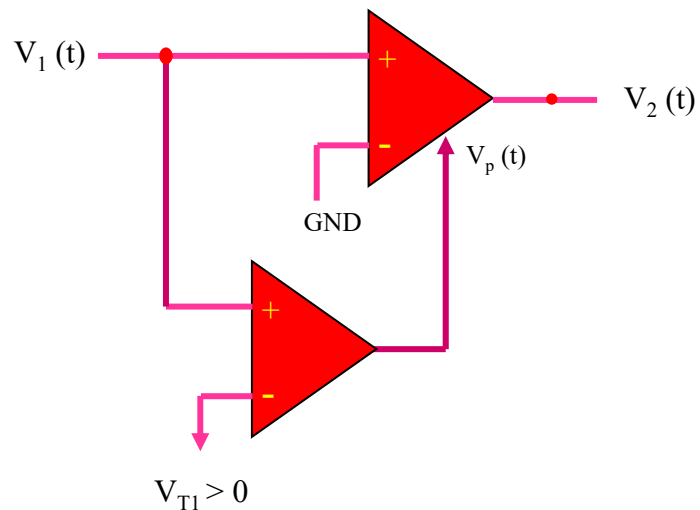
- 需要幅度/电荷测量修正T0



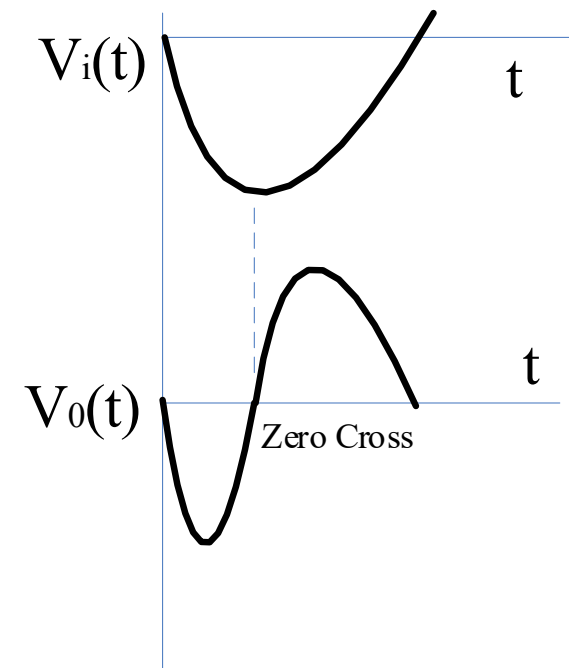
TOT (Time Over Threshold) 方法

定时甄别

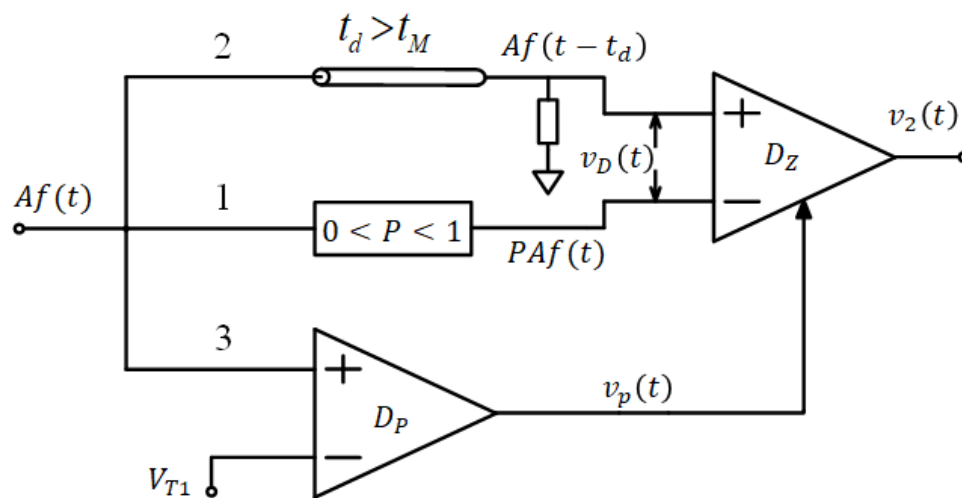
- 过零定时(Cross Zero Disc.)
 - 前沿和脉宽相同，仅幅度不同的信号，其微分后的过零点时间总是相同



带预甄别的CZD避免噪声触发



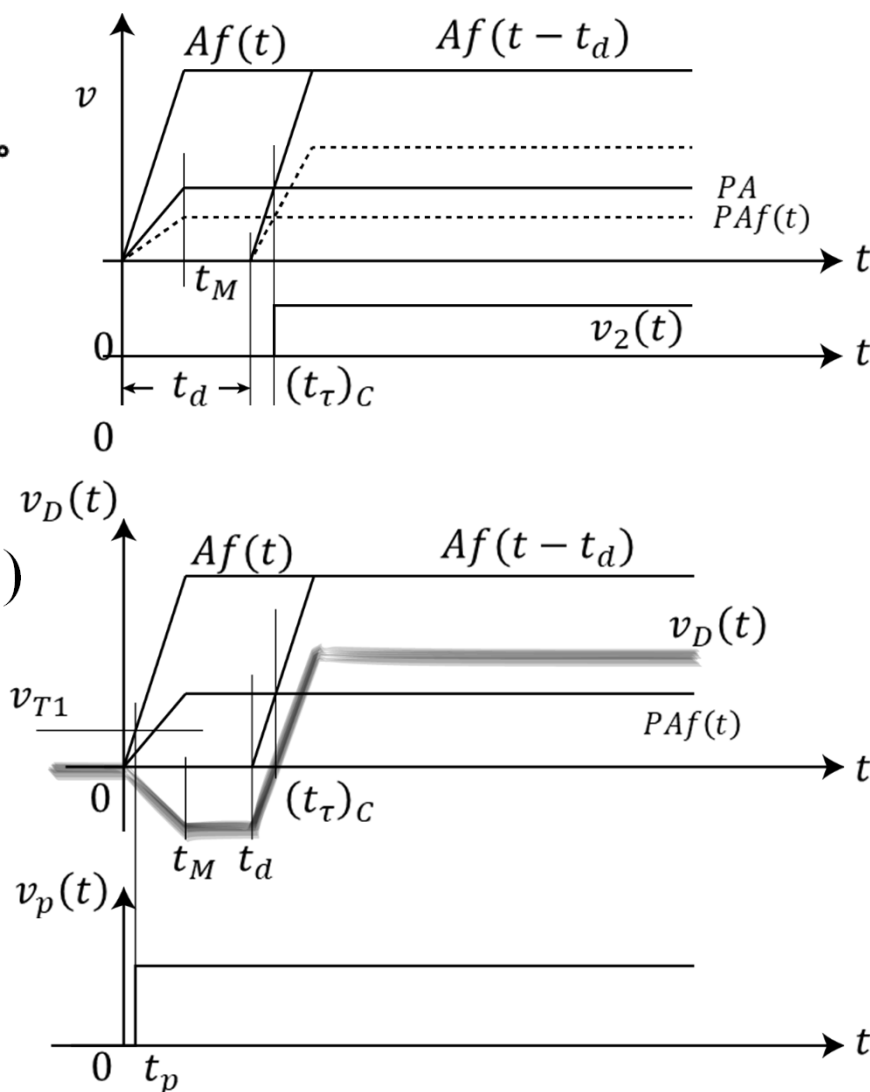
定时甄别



- 恒比定时(Constant Fraction Disc.)

- $0 < P < 1, t_d \geq (1 - P)t_M$
- 由 $Af(t - t_d) = PA$
- 得 $f(t - t_d) = P$
 - 与输入幅度无关
 - 触发比 $f = \frac{PA}{A} = P$

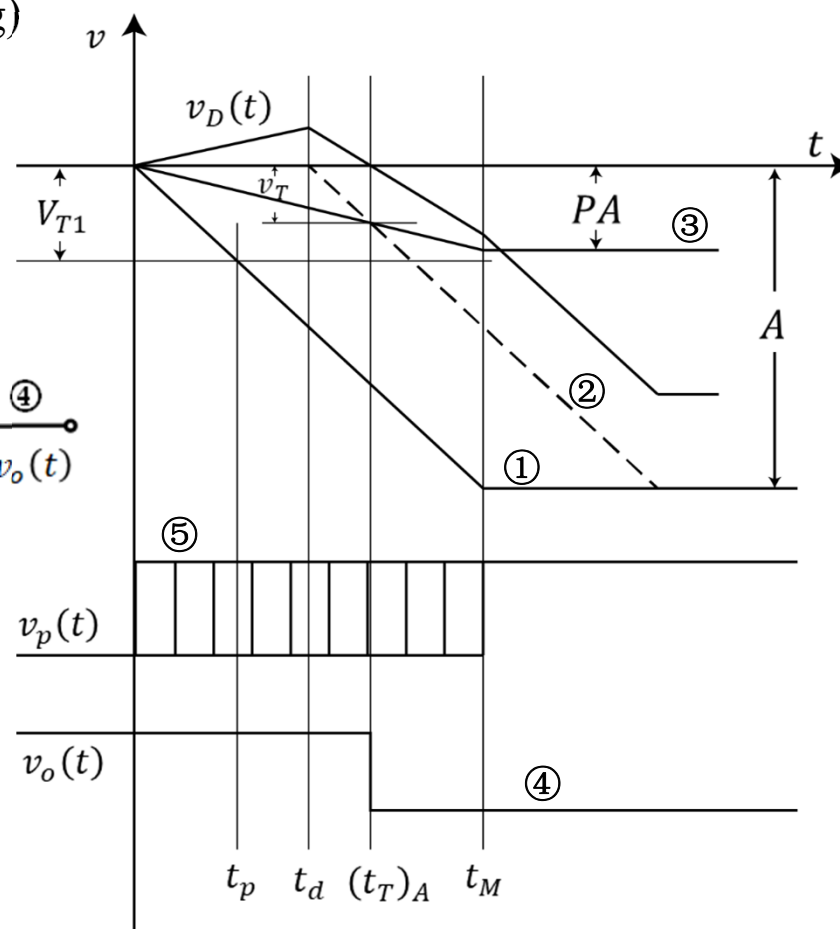
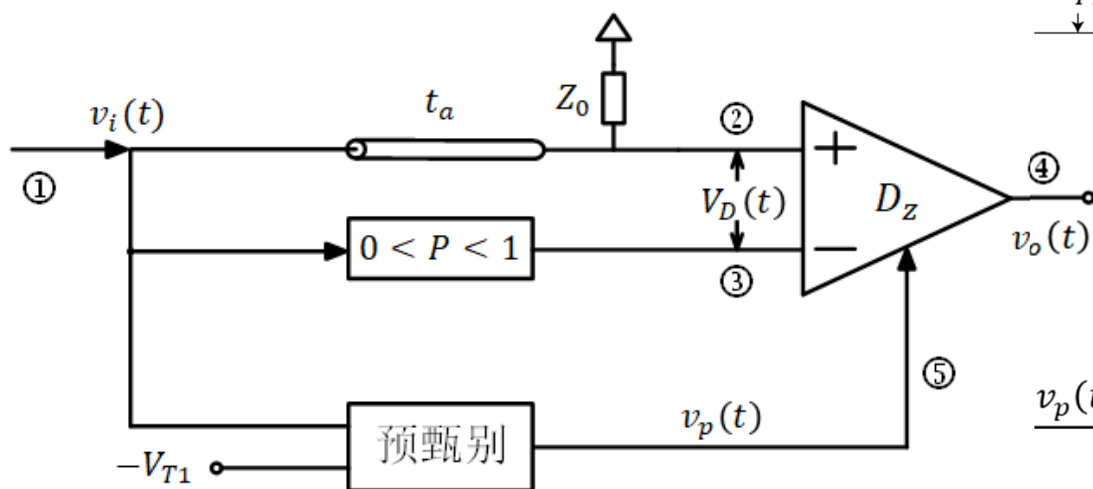
可通过调节衰减系数P，调节触发比使时间晃动最小



定时甄别

• 幅度和上升时间补偿定时

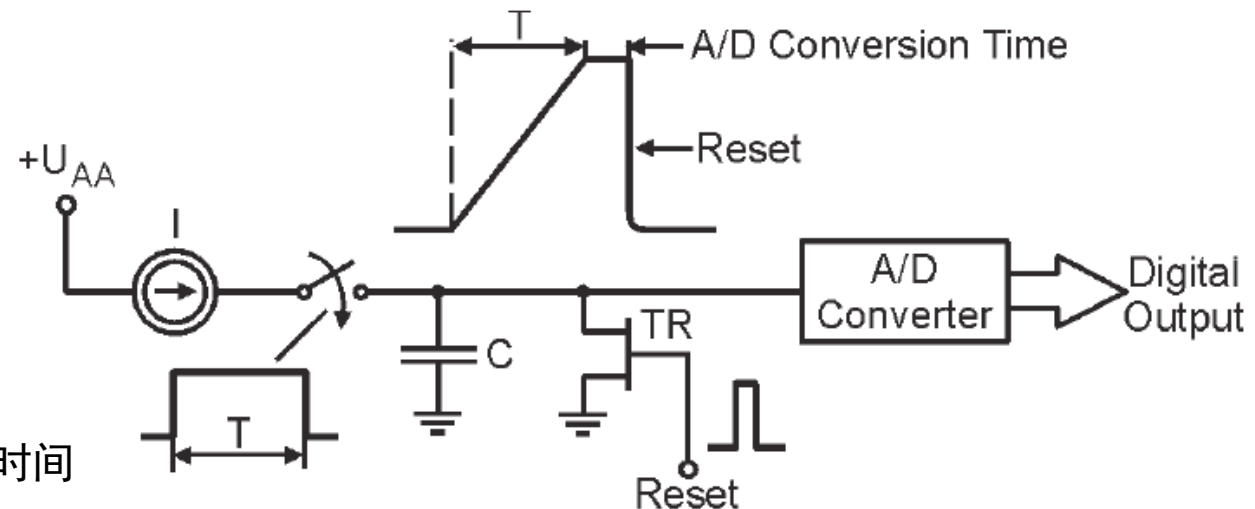
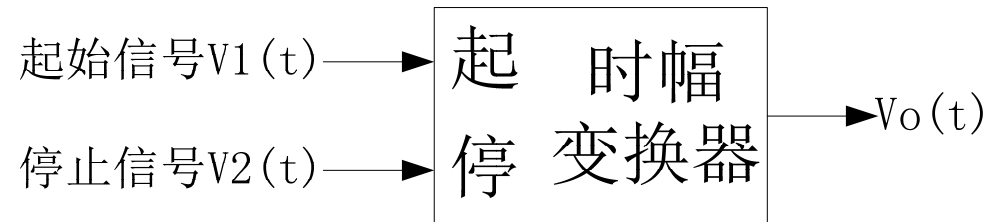
(Amplitude and Rise time Compensated Timing)



时间数字化

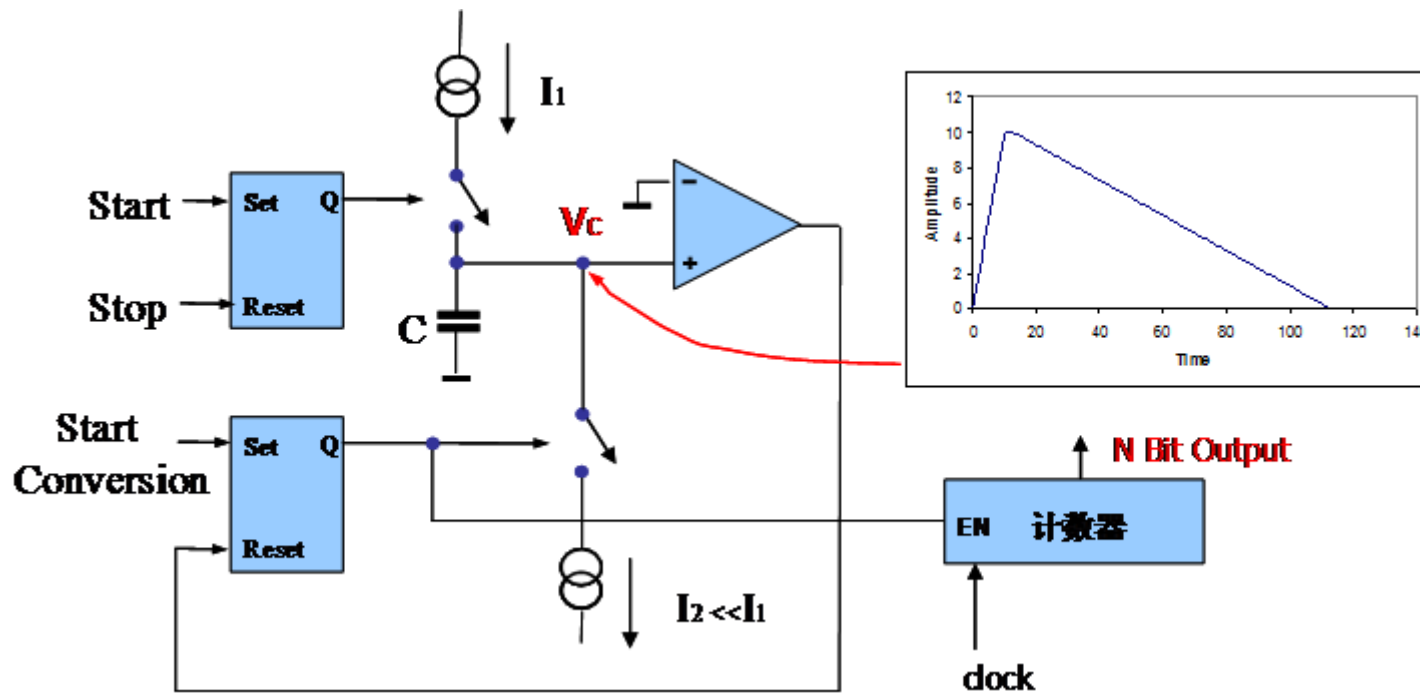
- 时间-幅度变换 + ADC
- 时间-数字变换 (TDC)
 - 线性放电型TDC
 - 数字计数型TDC
 - 时间内插型TDC
 - 定制ASIC: HPTDC、TDC-GP系列、GET4.....
 - TDC@FPGA

TAC时间测量（起停型）



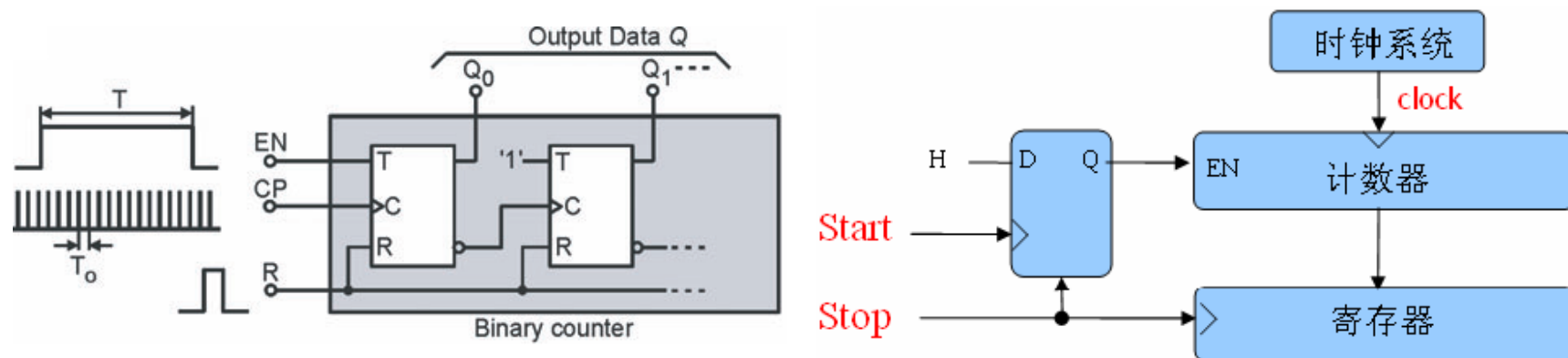
- 较小的死时间
 - 取决于ADC转换时间
- 可达到较高分辨率
 - LSB: 1 ps~20 ps
- 容易受环境温度和外界干扰影响
 - 影响时间测量精度的主要因素：恒流源的稳定性、充电电容的线性、电路噪声（特别是积分环节上的噪声），及后续ADC电路的特性

Wilkinson型TDC（双斜率型TDC）



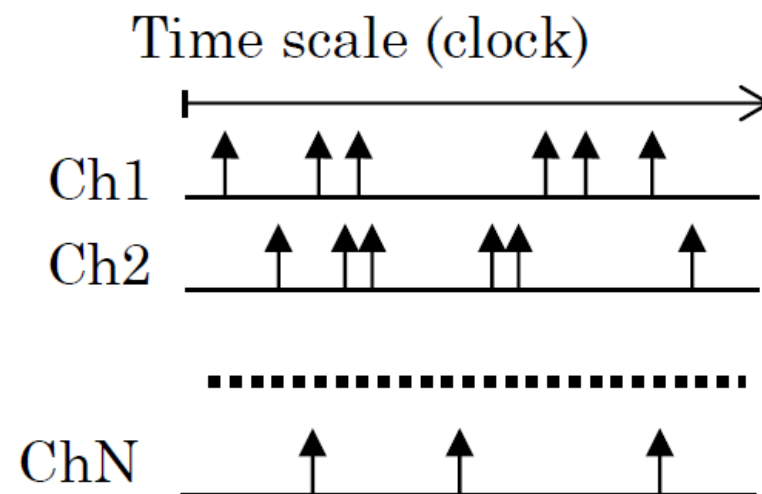
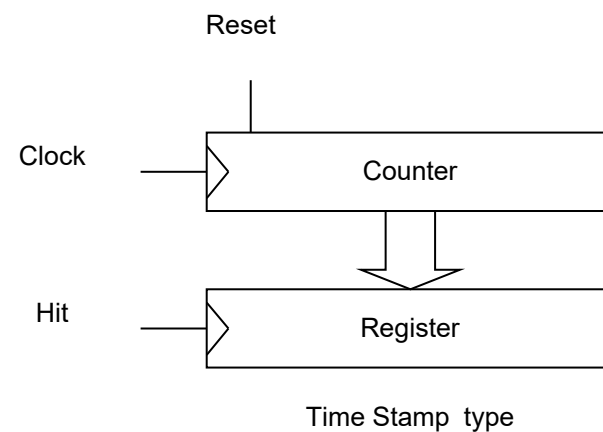
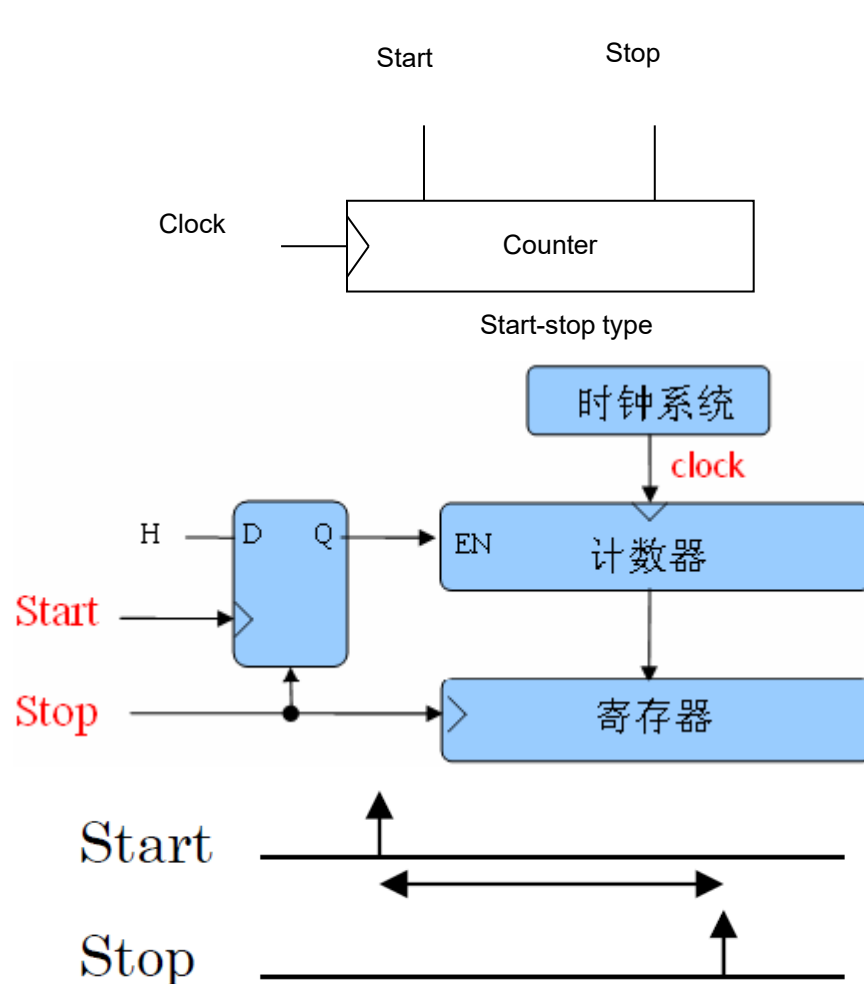
- TAC + Wilkinson型ADC
- 时间放大（Time Stretch）原理
 - 大电流 I_1 对电容快速充电
 - 小电流 I_2 放电，同时计数器对放电时间 T_2 计数
 - 时间放大因子 $K = T_2/T_1 = I_1/I_2$
- 缺点：
 - 死时间大： $(K+1) T_1$
 - 充放电时易受噪声干扰

直接时间数字变换（计数器型）



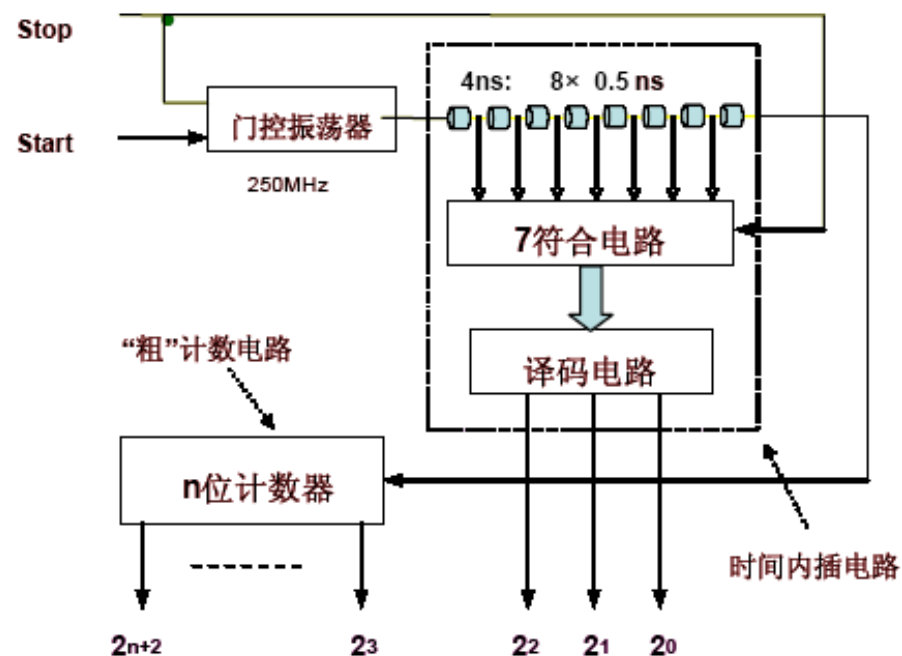
- 易于实现
 - 异步计数器→同步计数器→格雷码计数器
- 容易得到大的动态范围
 - 增加一个触发器即扩大一倍动态范围
- 精度不易提高
 - 1 GHz 时钟频率 $\leftrightarrow$ LSB=1 ns
 - 与信号异步，最大误差 $\pm$ LSB
 - 可通过多次测量求平均提高精度

起停型和时间戳型TDC

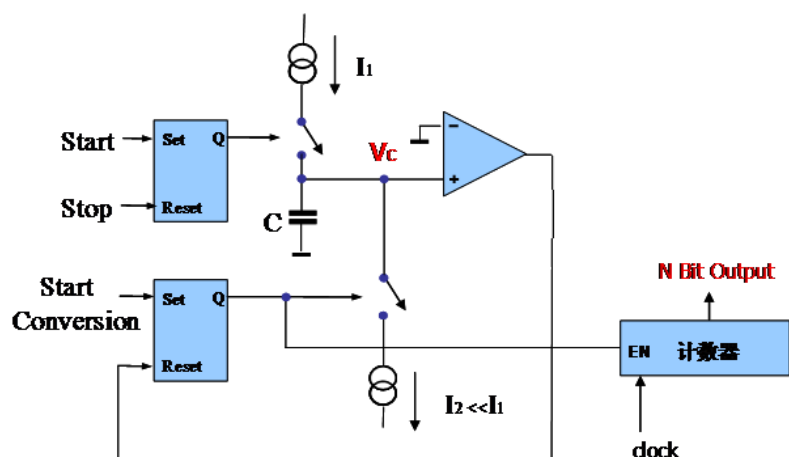


提高分辨率的措施

- 提高时钟频率——锁相环技术、.....
- 时间放大技术
 - 模拟时间放大
 - 数字时间放大——游标尺原理
- 时间内插技术
 - 时间放大型内插
 - 游标尺型时间内插
 - 时幅变换内插法时数变换
 - 延迟线抽头内插
 - 时钟相位延迟内插
 - 输入信号延迟内插
 - 模拟时间内插
 -



模拟时间放大方法 (Time Stretch)



■ 优点

□ 分辨率高

- 目前可达1 ps

■ 缺点

□ 死时间大

□ 动态范围小

□ 易受外界影响精度

- 目前RMS: 5~10 ps

First pulse

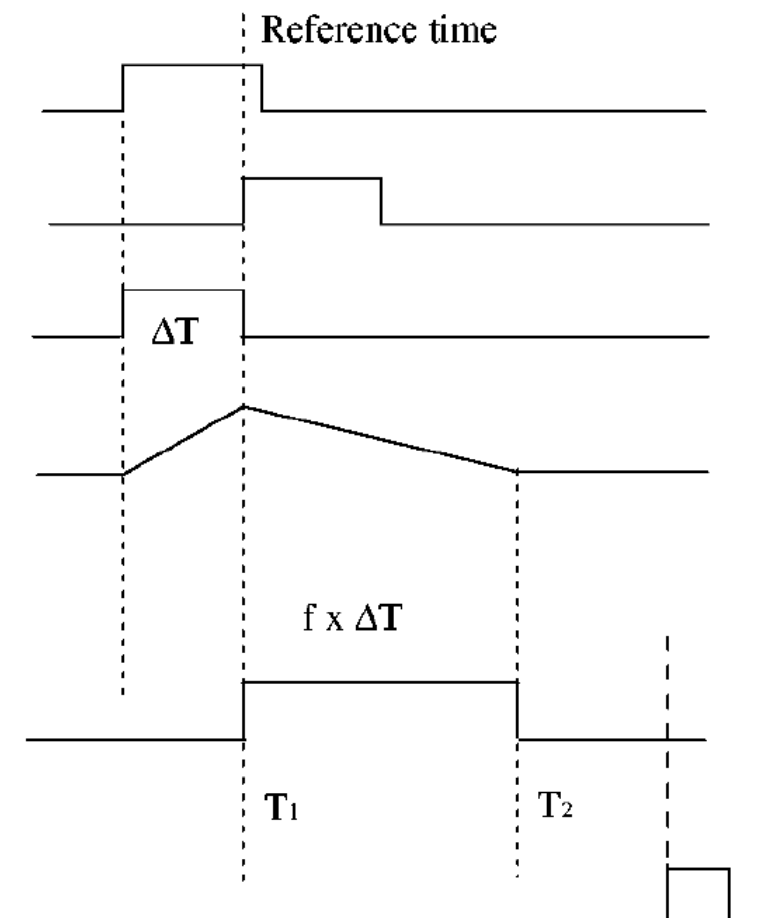
Second pulse

Difference Pulse

Ramp

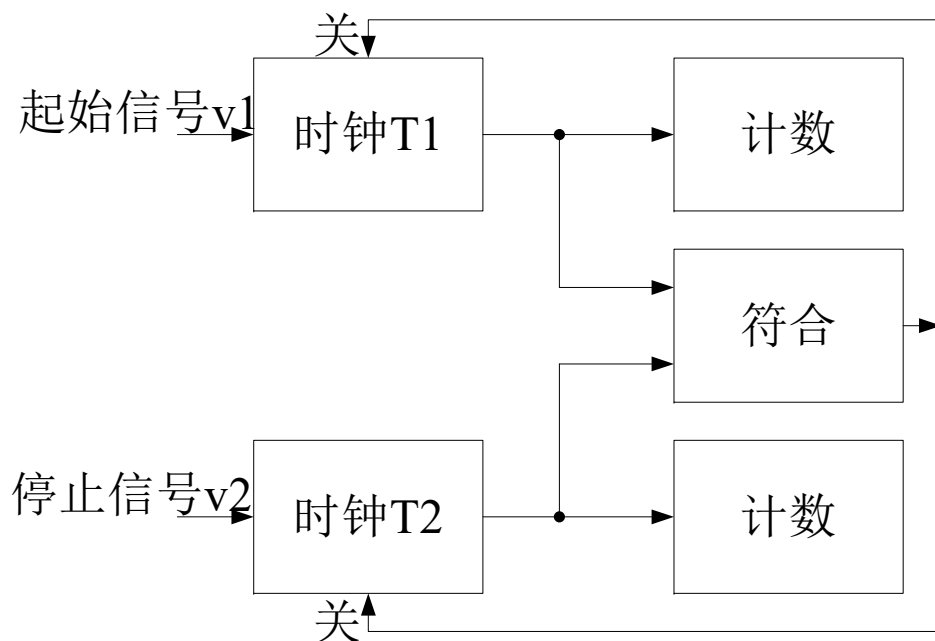
TS output

TDC Stop



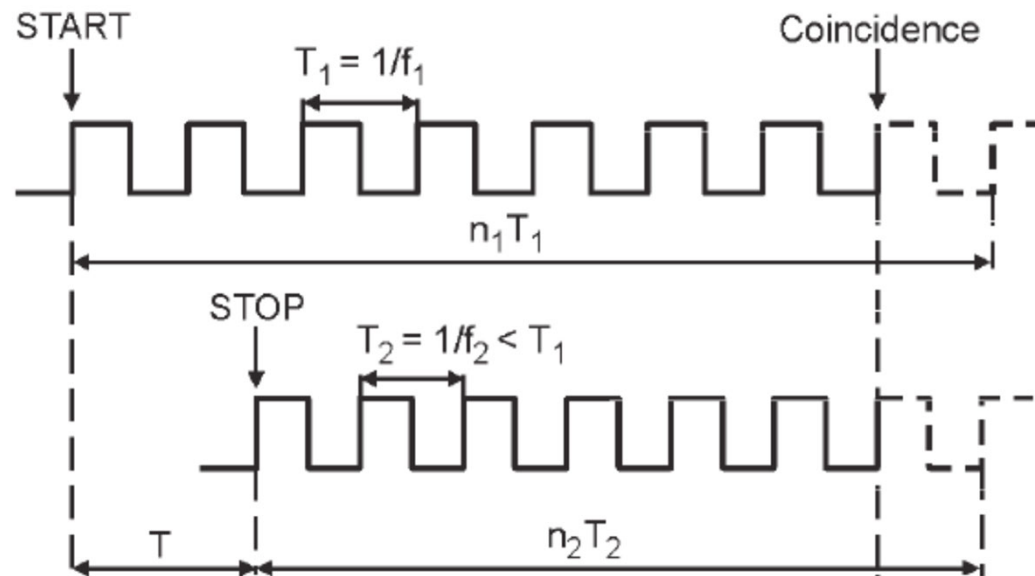
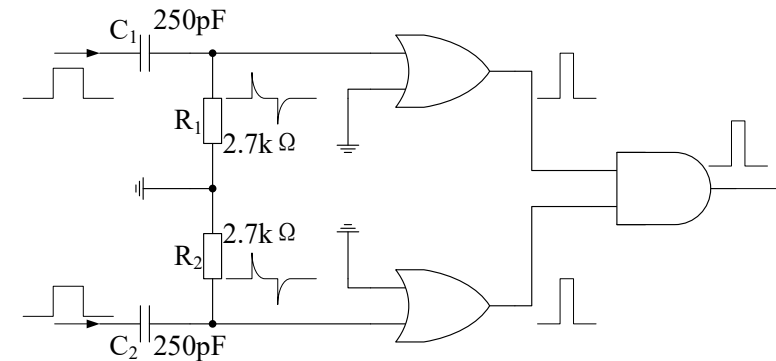
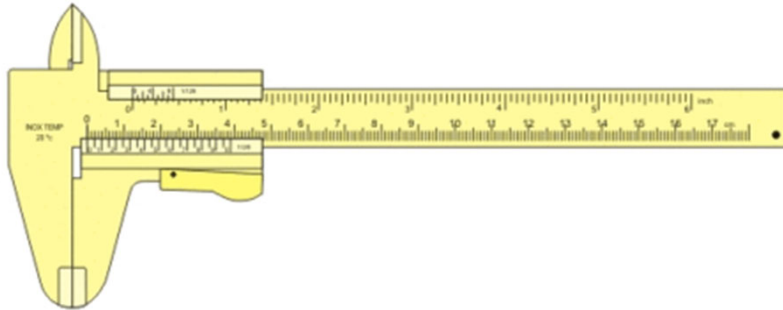
游标尺型时间放大传统工作原理

- 利用时钟周期的微小差别：游标卡尺原理
- 第一种数字式提高时间测量精度的方法
- 可算做数字时间放大



- 两个门控振荡器产生频率略微不同两个时钟信号， T_1 略大于 T_2 ， $T_1 - T_2 = \tau$
- 代表待测时间间隔的起和停信号通过启动两个门控振荡器，使两个计数器开始计数
- 当门控振荡器产生的两个时钟信号的前沿重合时，符合电路输出关闭门控振荡器，使计数停止
- 计数器此时的计数分别为 n_1 和 n_2

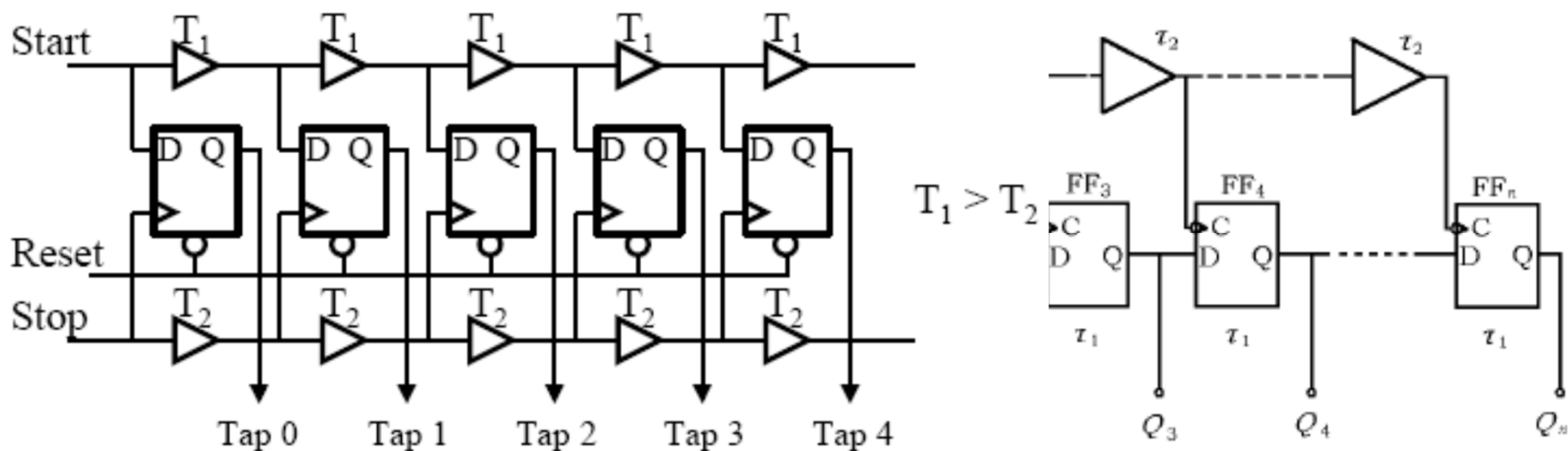
游标尺型时间放大工作波形



$$\begin{aligned}\Delta T &= n_1 T_1 - n_2 T_2 \\ &= (n_1 - n_2) T_1 + (n_2 T_1 - n_2 T_2) \\ &= (n_1 - n_2) T_1 + n_2 \tau\end{aligned}$$

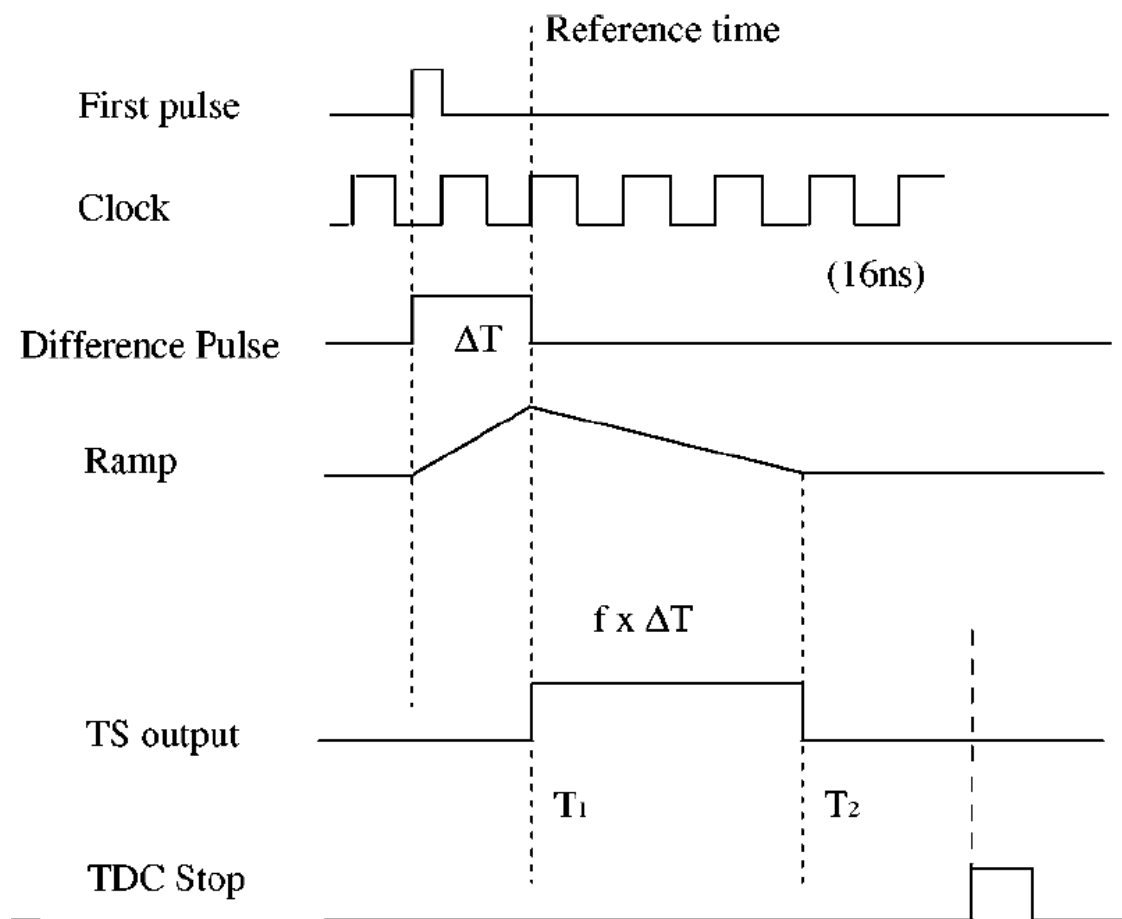
$$\tau = T_1 - T_2$$

利用延迟线进行游标型时间放大测量

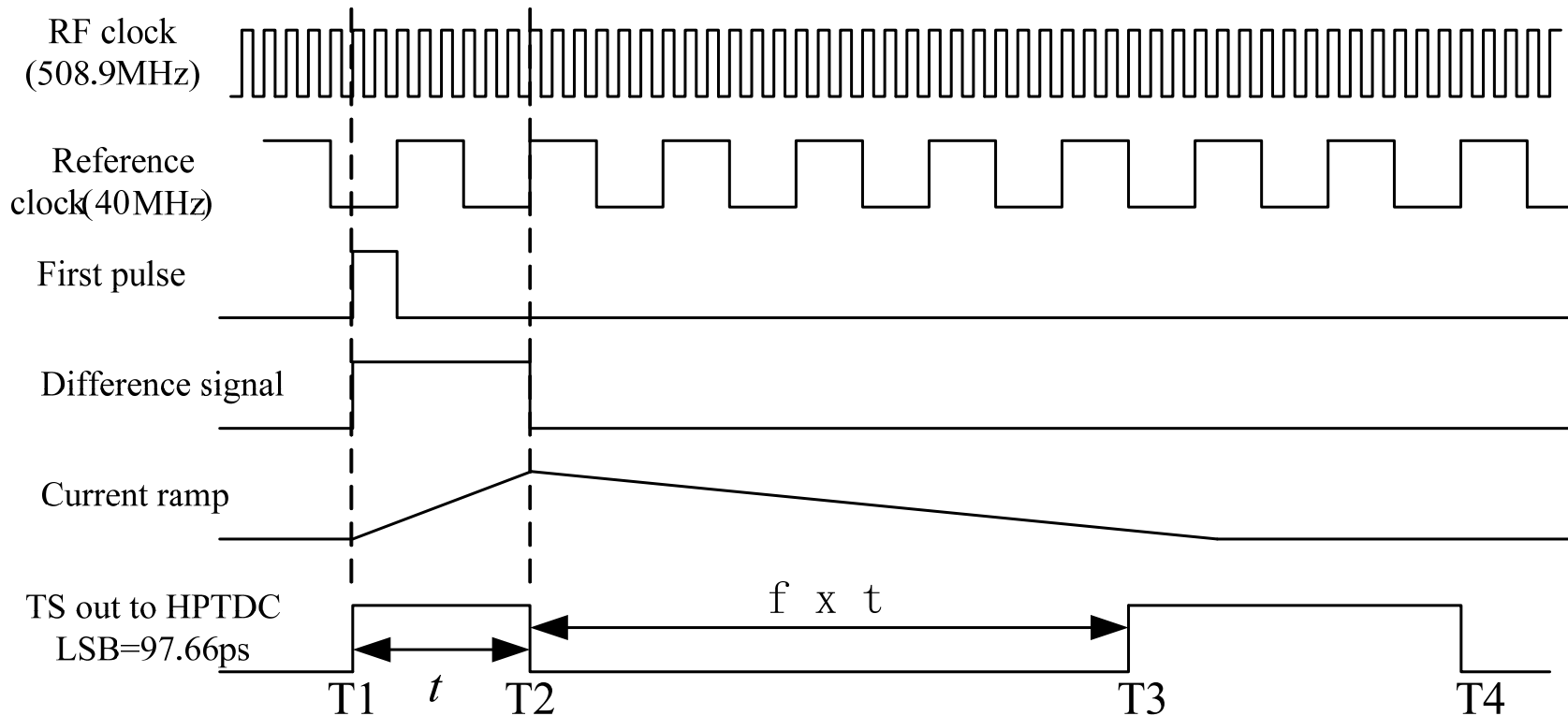


- “起始”和“停止”信号分别在两条延迟线中传输，“停止”信号的上升沿锁存“起始”信号延迟线的状态
 - “起始”信号延迟线的单位延迟 T_1 比“停止”信号延迟线的单位延迟 T_2 略大，第一个没有被置位的触发器的位置 N 给出了时间间隔： $T_{in}=N(T_1-T_2)$
- 改进：“起始”延迟线可以用每个D触发器的延迟代替
- 目前ASIC设计常见

同步锁存时间放大

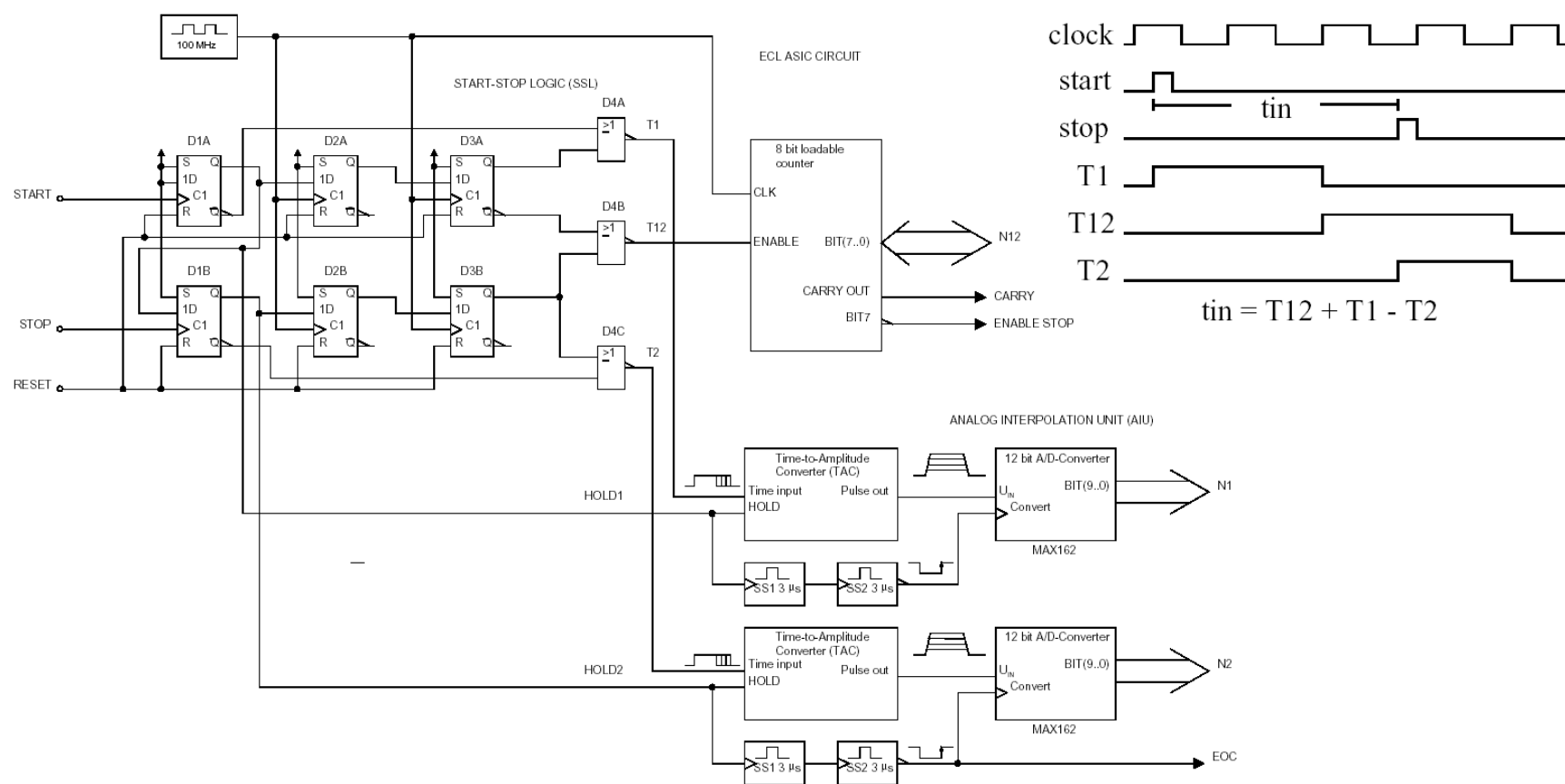


同步锁存时间放大输入输出信号关系

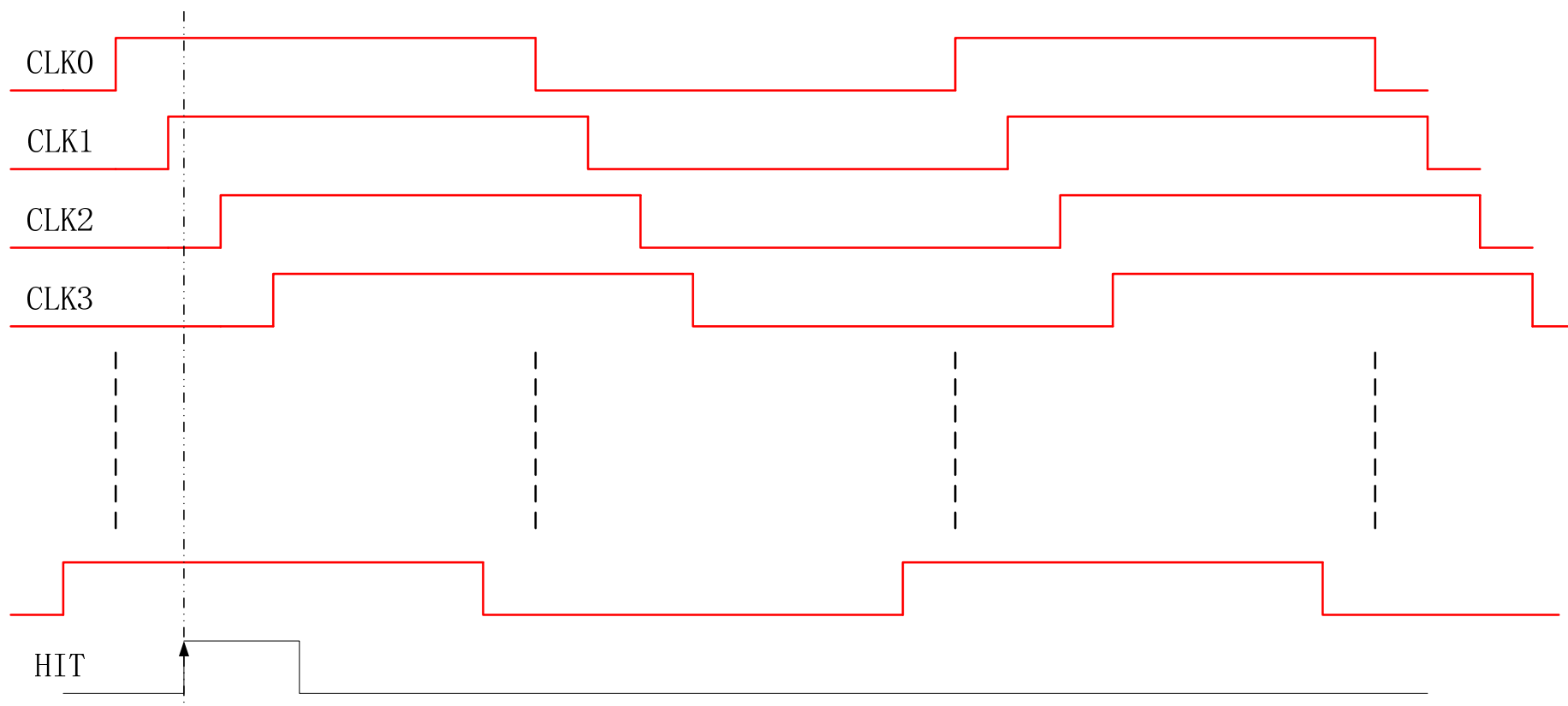


- **Input:** TOF Hit Signal and Reference Clock
- **Output:** Time Tag: T1, T2, T3 and T4, $\Delta t = T2 - T1$; $f \times \Delta t = T3 - T2$
- $T2' - (T3 - T2)/f$ 可得精确事例时间

时幅变换内插法时数变换

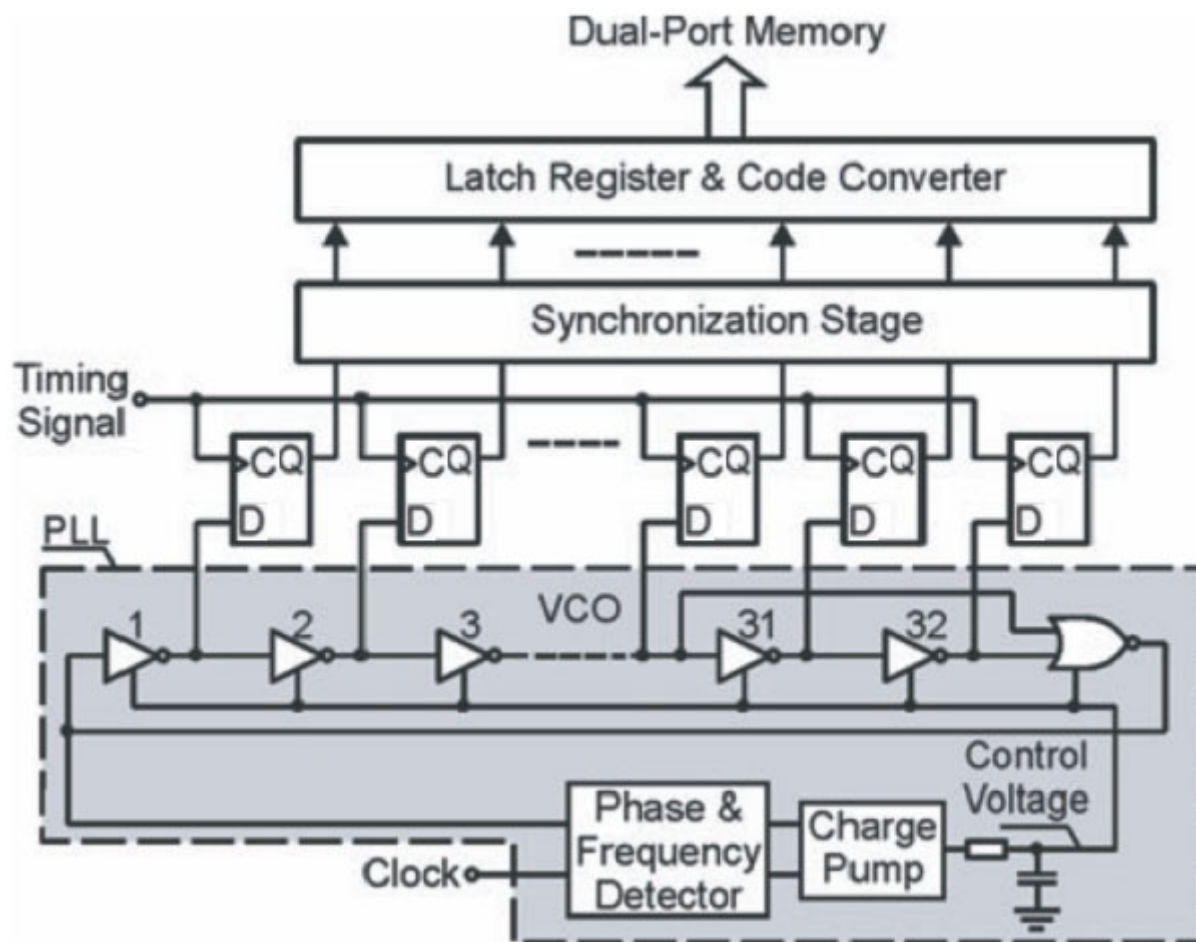


时钟相位延迟内插技术



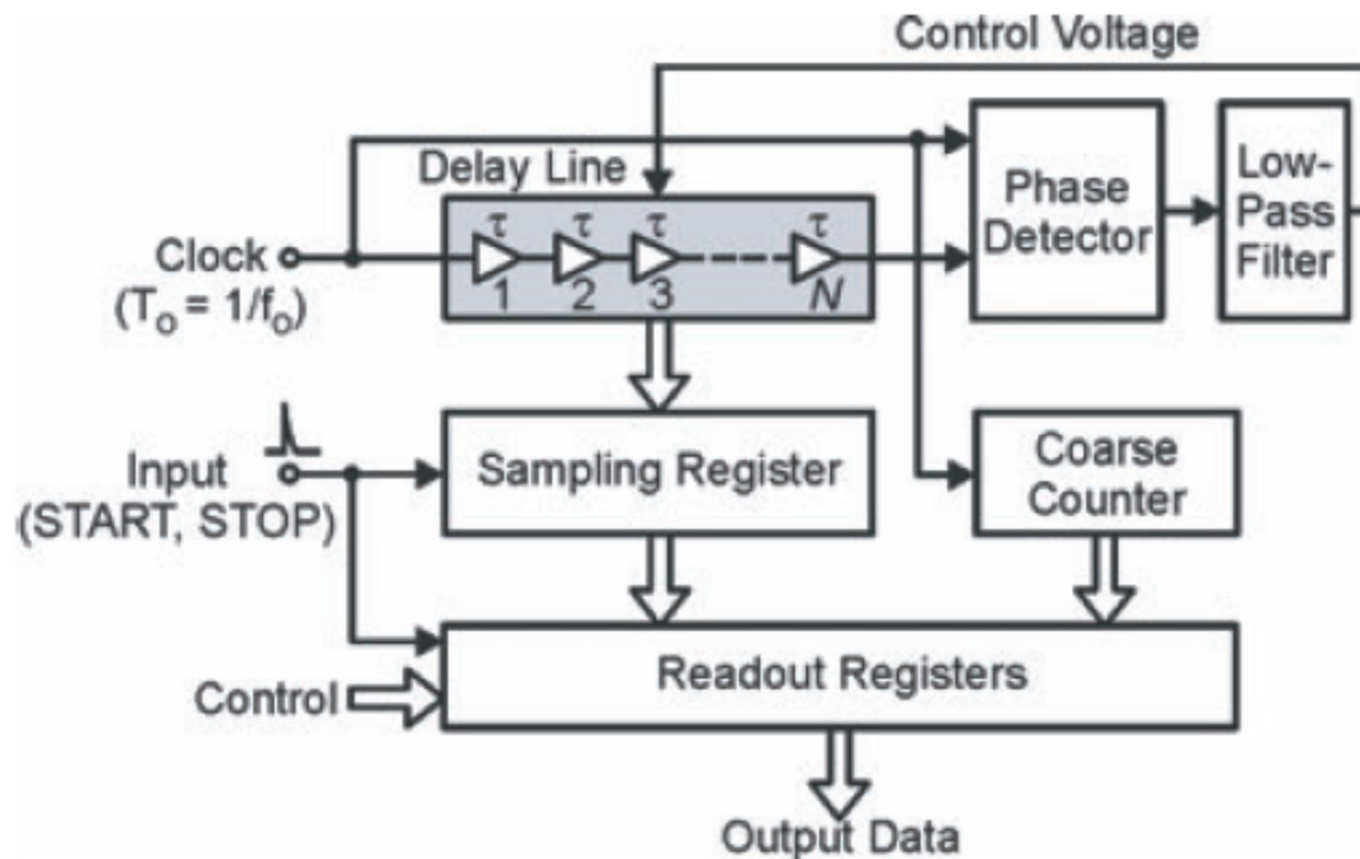
- 记录当hit信号到来时，时钟信号在延迟线上传输位置，即时间延时信息
 - 相当于将“粗”时间计数的时钟周期细分 2^n 个等分
- 该信息经译码电路译码后输出，作为时间数据最低的n位数据，实现了细时间分辨的内插测量

利用PLL实现时间内插



利用DLL实现时间内插

(Delay Locked Loop)



DLL阵列进一步提高分辨率

- bin = $\text{tap}_{m+1,n-1} - \text{tap}_{m,n} = \text{tap}_{m+1} + \text{tap}_{n-1} - (\text{tap}_m + \text{tap}_n)$

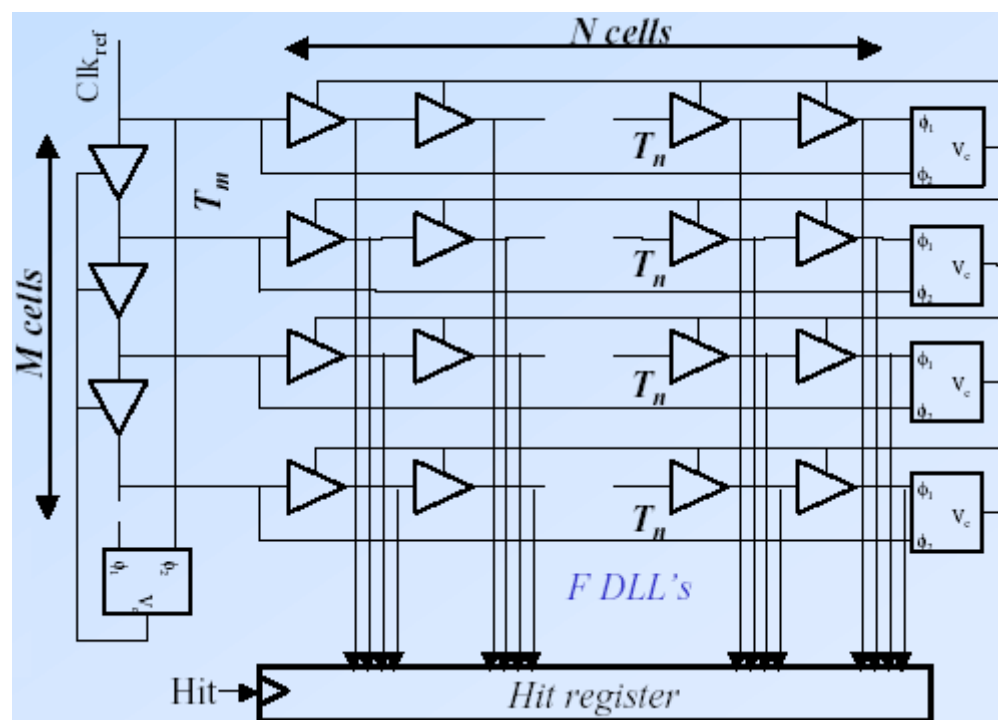
- $T_{bin} = (m+1) * T_m + (n-1) * T_n - (m * T_m + n * T_n)$

$$\rightarrow T_{\text{bin}} = T_m - T_n$$

$$T_{bin} = \frac{T_{clk}}{M} - \frac{T_{clk}}{N}$$

若要使 $T_{bin} = \frac{T_{clk} / N}{F}$

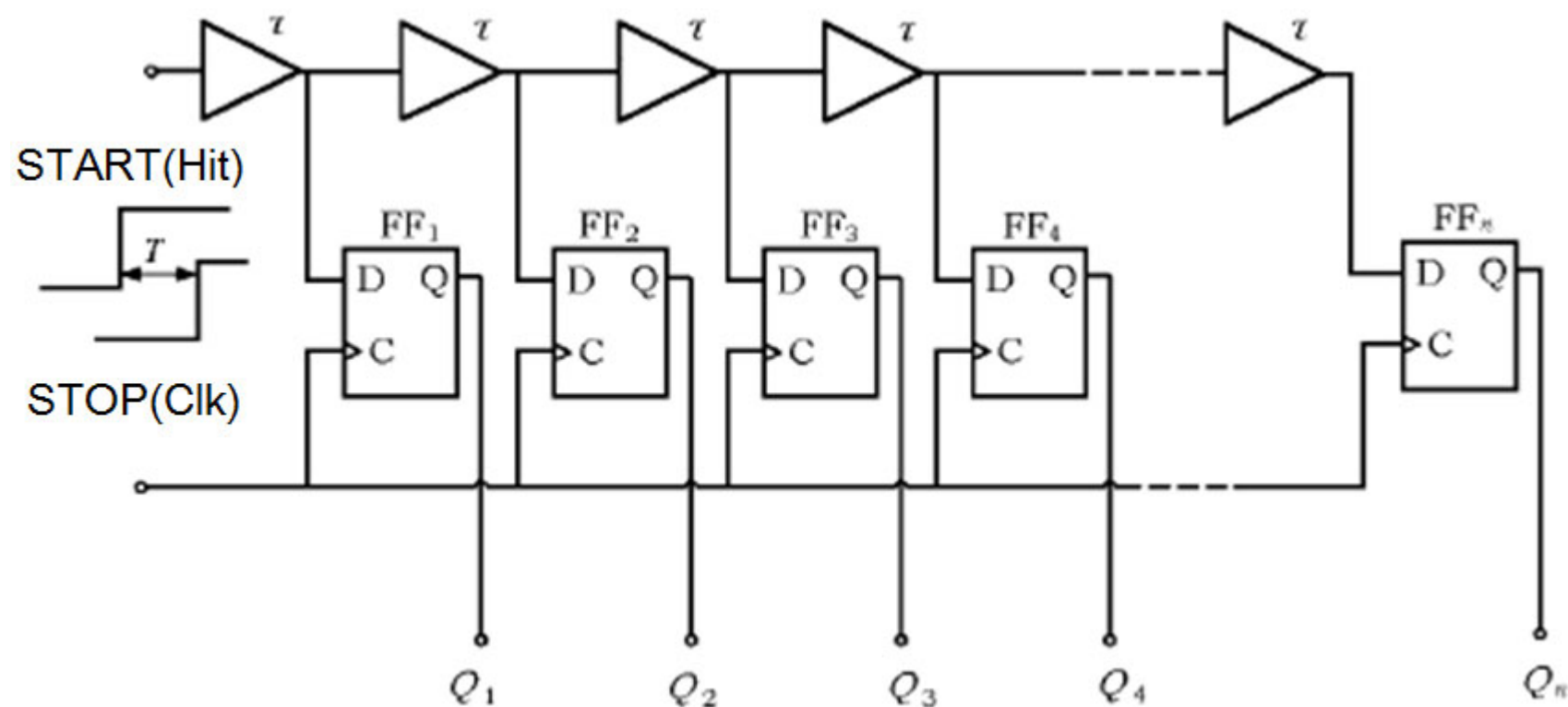
F: DLL的细分因子



$$M = N \cdot \frac{F}{F+1}$$

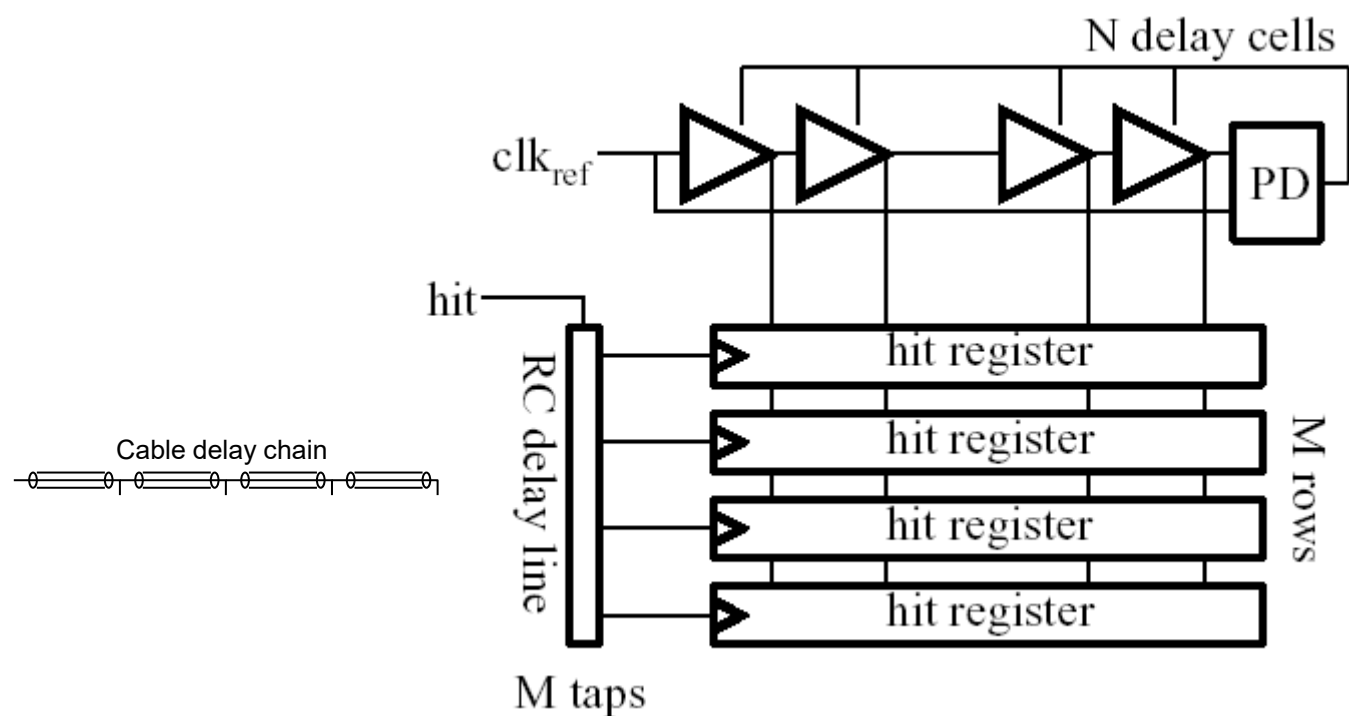
F很难恰好是 2^n ,
需要二进制转换

输入信号延迟内插



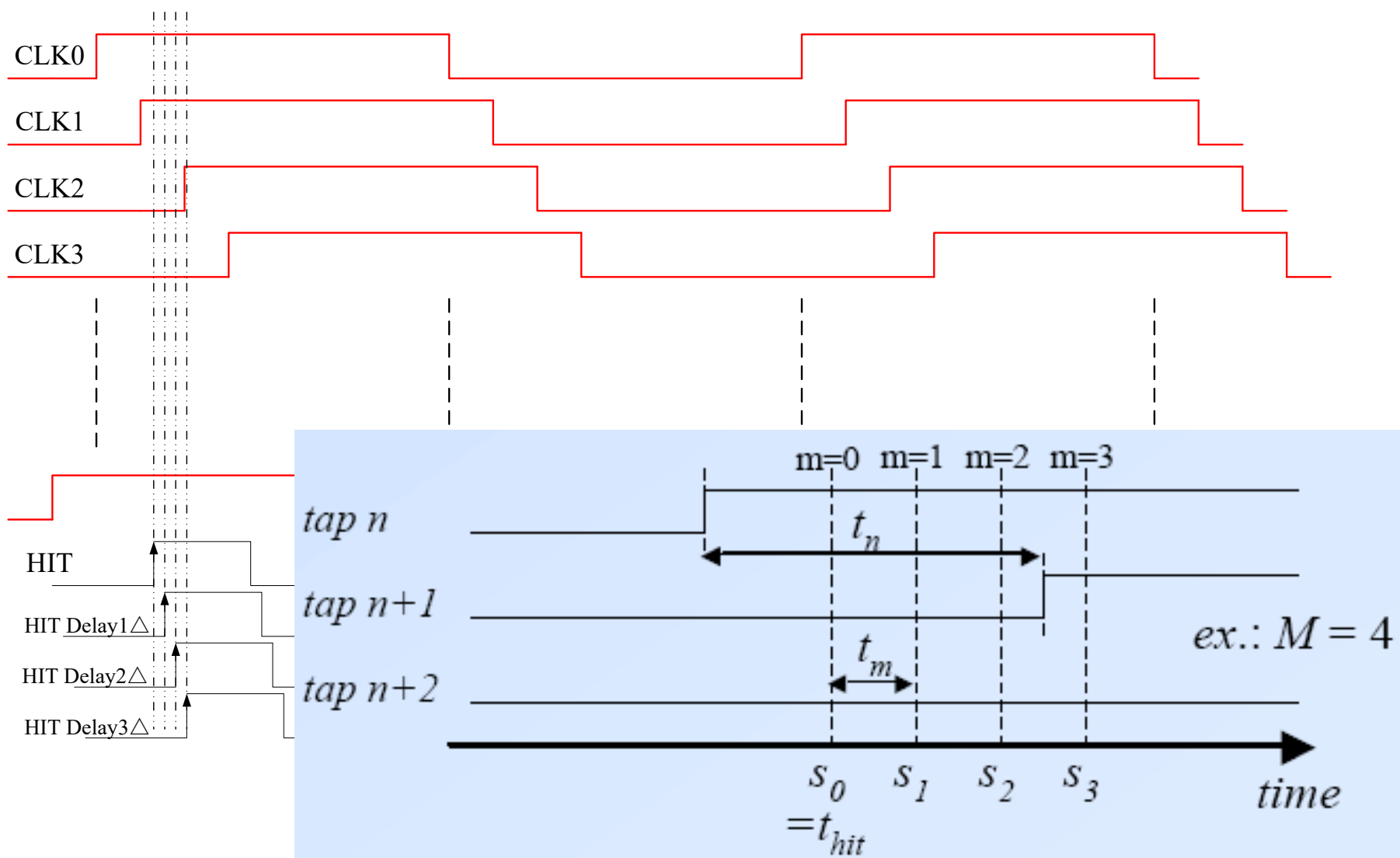
时钟相位延迟内插和信号延迟内插配合

无源RC延迟线内插配合DLL时钟相位延迟内插



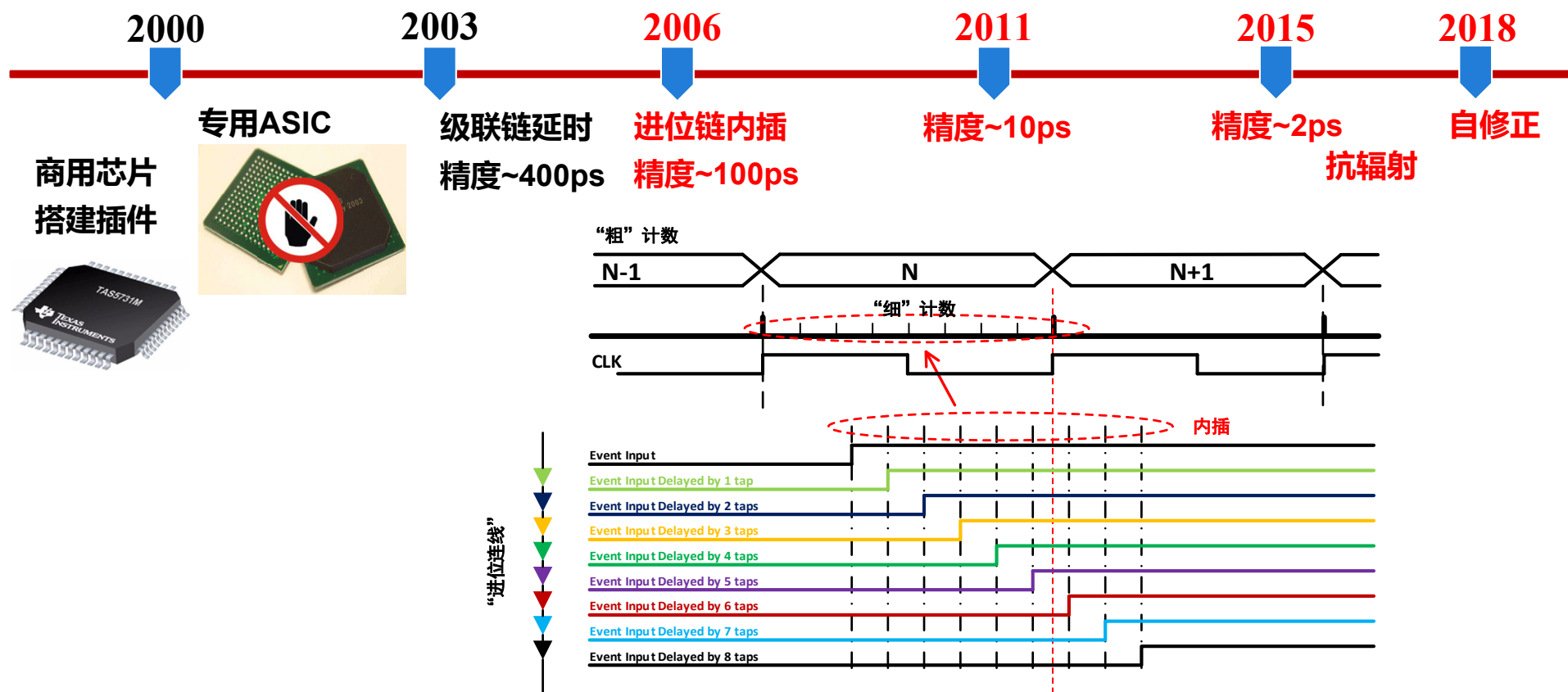
$$T_{bin} = \frac{T_{clk}}{N \cdot M}$$

无源RC延迟线内插与DLL内插



TDC@FPGA技术研究

- 自主知识产权的 μs 级精密时间测量，最高精度可达 ps
- 可实现抗辐射加固设计



TDC@FPGA技术的发展

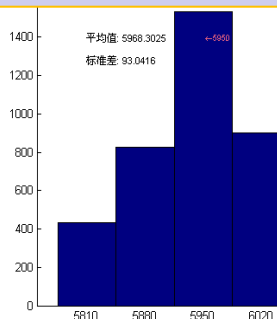
236 IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 53, NO. 1, FEBRUARY 2006

A High-Resolution Time-to-Digital Converter Implemented in Field-Programmable-Gate-Arrays

Abstract—A high-resolution time-to-digital converter (TDC) is implemented in a general purpose field-programmable gate array (FPGA) is presented. Dedicated carry lines are used as delay cells to perform time interpolation over a period and to realize the fine time measurement. The TDC is implemented using counters, working on in-phase and out-of-phase, respectively, are designed to get the stable measurement. The fine time code and the value, along with the channel identifier, are stored in a first-in first-out (FIFO) buffer. Tests have shown the performance of the TDC. The resolution reaches 50 ps.

Index Terms—Field programmable gate array (FPGA), time-to-digital converter (TDC), time measurement.

RMS<100ps



446 IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 58, NO. 4, AUGUST 2011

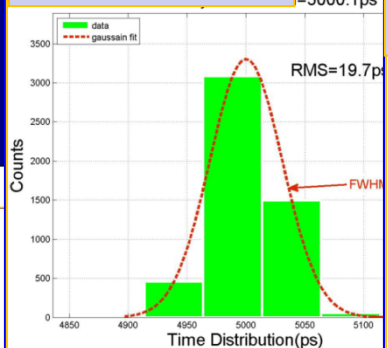
A Fully Fledged TDC Implemented in Field-Programmable Gate Arrays

Jinhong Wang

Abstract—The motivation of this paper is to implement a fully fledged time-to-digital converter (TDC) in a field-programmable gate array from Xilinx Virtex 4 family with self-temperature variation compensation features. The TDC resolution is temperature and supply voltage dependent which, to be compensated. A self-test procedure, which covers a range of 30 °C to 60 °C is used to determine the constants. After compensation and integral nonlinear calibration, the TDC presents a timing resolution of 23 ps per LSB. A total of 9 channels TDCs are implemented in the FPGA.

Index Terms—Compensation, field-programmable gate array (FPGA), time measurement, time-to-digital converter.

RMS<25ps



IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 58, NO. 4, AUGUST 2011

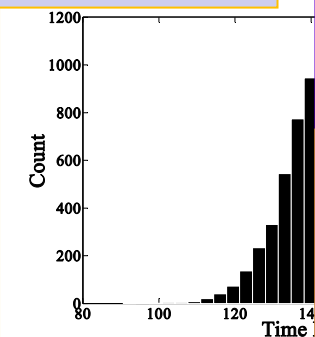
The 10-ps Multitime Measurements Averaging TDC Implemented in an FPGA

Jinhong Wang

IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 62, NO. 3, JUNE 2015

Abstract—We present a theoretical analysis of a multitime averaging TDC and a calibration scheme that is adapted to our previous TDCs from Xilinx Virtex 4 family without hardware. Using MATLAB we simulate the multitime averaging TDC on a variety of simulation results are verified with benchmark agreement between the theoretical analysis and the simulation results.

RMS<10ps



IEEE Transactions on Nuclear Science 53, 236-241(2006)

IEEE Transactions on Nuclear Science 57, 446-450(2010)

IEEE Transactions on Nuclear Science 58, 2011-2018(2011)

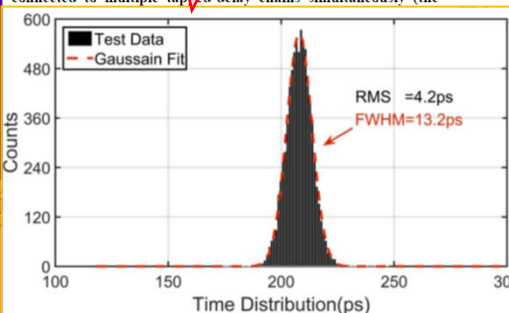
IEEE Transactions on Nuclear Science 62, 947-954(2015)

A 1.7 ps Equivalent Bin Size and 4.2 ps RMS FPGA TDC Based on Multichain Measurements Averaging Method

Qi Shen, Shubin Liu, Binxiang Qi, Qi An, Shengkai Liao, Peng Shang, Chengzhi Peng, and Weiyue Liu

Abstract—A high precision and high resolution time-to-digital converter (TDC) based on multichain measurements averaging method is implemented in an FPGA. The complete TDC module shows the intrinsic resolution and precision without increasing the delay. The test results agree with the simulation results quite well. In such a TDC, the input signal is connected to multiple tap delay chains simultaneously (the

RMS=4.2ps

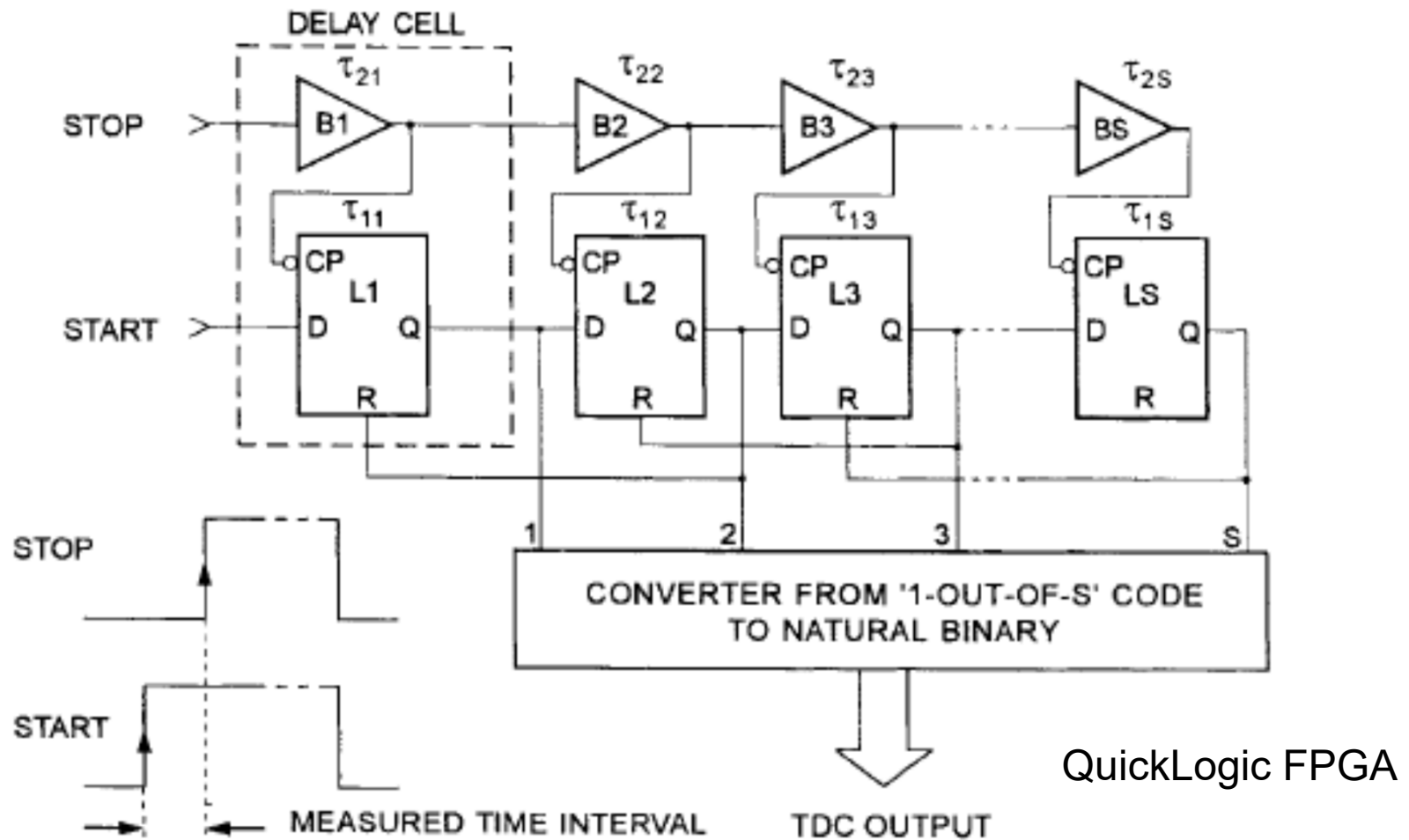


I. INTRODUCTION

TIME TO DIGITAL CONVERTERS (TDCs) are required in many areas, especially in time-of-flight measurement for particle physics experiments [1] and positron emission tomography (PET) imaging [2]. The TDCs can be implemented in application specific integrated circuits (ASICs) or in field programmable gate arrays (FPGAs). The performance of the ASIC-based TDC is commonly better than the FPGA-based

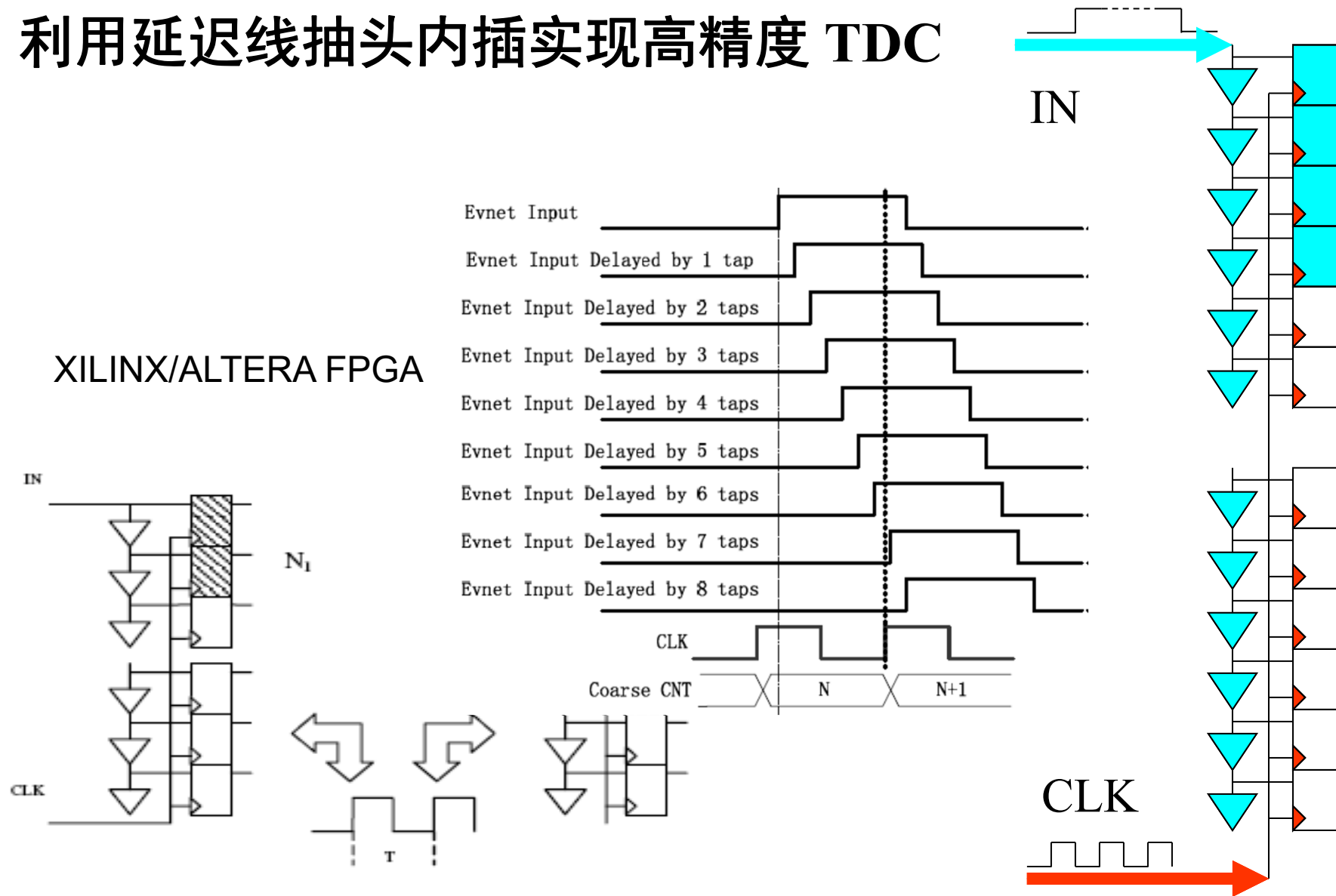
use ASICs can fully be customized while the FPGA is limited by the fixed programmable fabric provided. However, the FPGA-based TDC have the advantages of configuration, low cost and short development time. In the past decades, the performance of FPGA-based TDC improved rapidly from 200 ps bin size and 129 ps [4] down to below 10 ps bin size and 10 ps RMS [5], only benefits from both the improved FPGA manufacturing technology and the developed TDC architecture. Kalisz *et al.* implemented a 200 ps resolution TDC using delay line method to achieve time interpolation. In [6], *et al.* used a multiphase 192 MHz quadrature clock to realize a TDC in an FPGA with 1.4 ns resolution and 100 ps precision [6]. In 2003, a TDC with 400 ps bin size was implemented by Wu *et al.* in an Altera ACEK FPGA

利用游标尺时间内插中实现的200 ps TDC



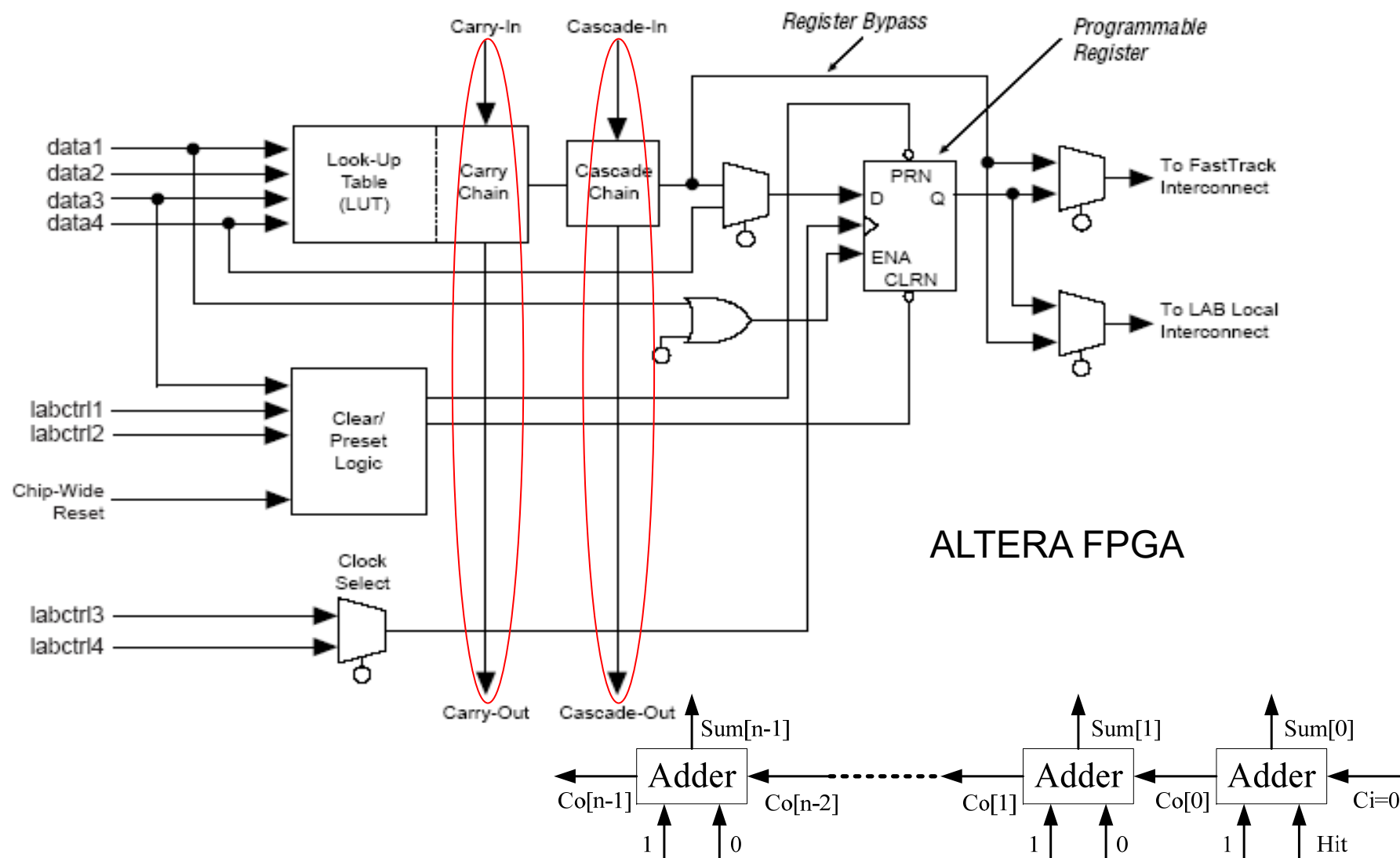
IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 46, NO. 1, FEBRUARY 1997

利用延迟线抽头内插实现高精度 TDC



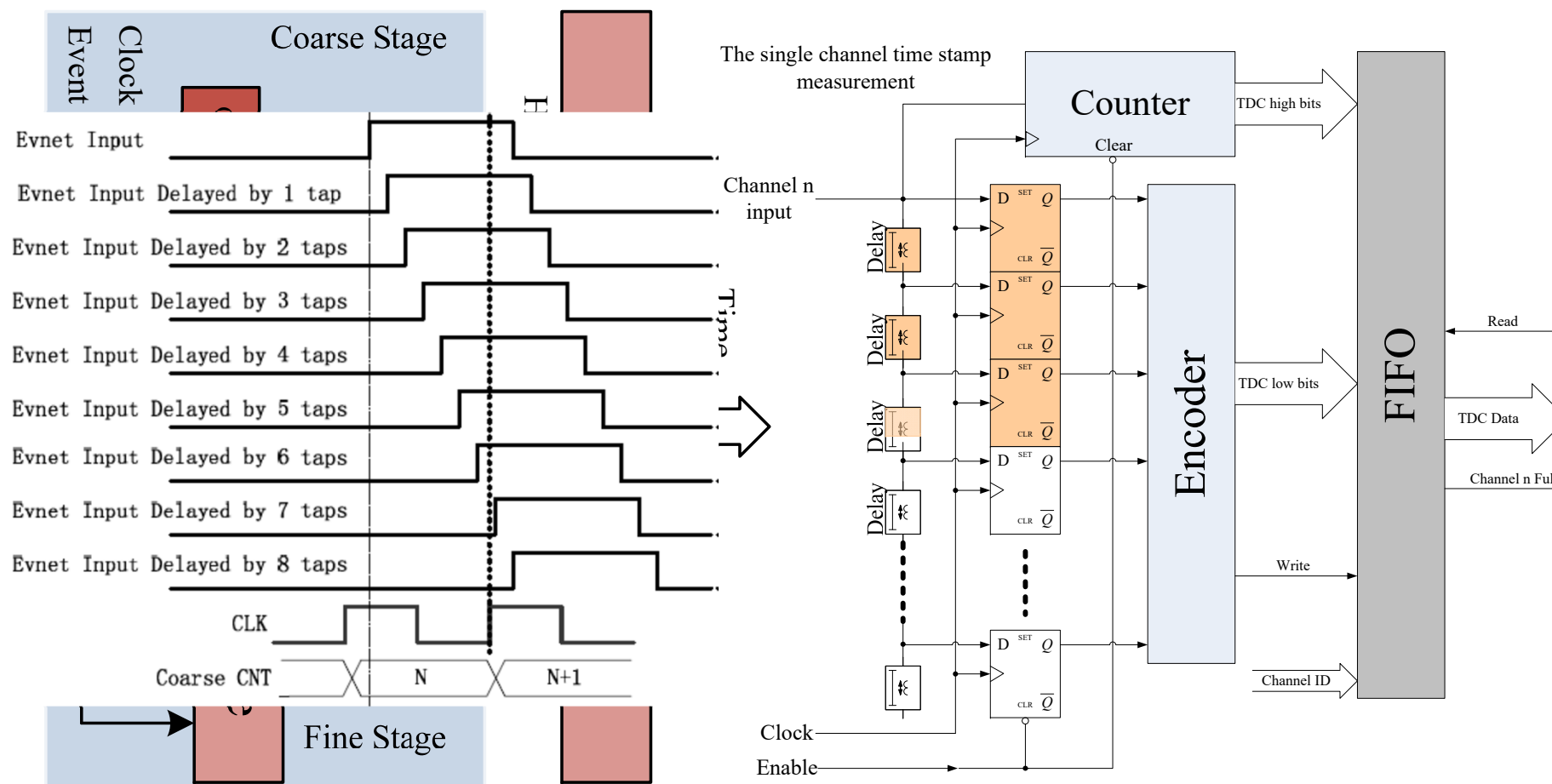
J. Wu, Z. Shi, and I. Y. Wang, Firmware-only implementation of time-to-digital converter in field programmable gate array, in Proc.IEEE Conf. Rec. NSS., vol. 1, 2003, pp.177–181

专用进位连线资源

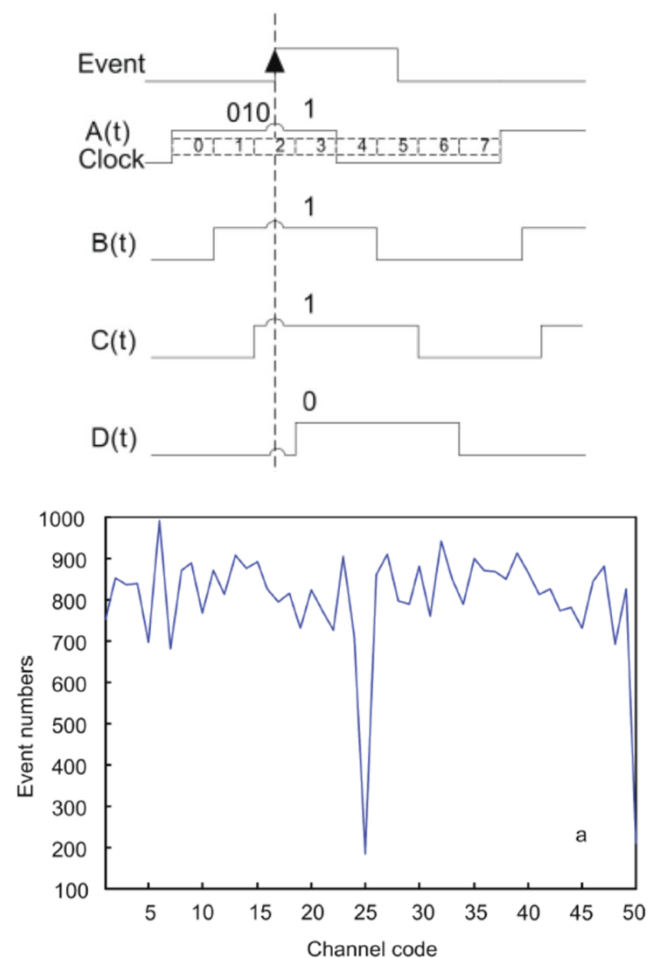
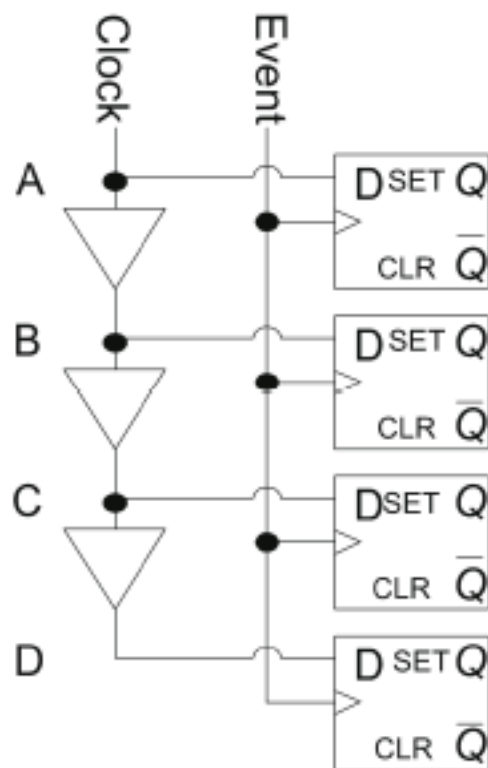


Jian Song, Qi An, Shubin Liu, A high resolution time-to-digital-converter implemented in field-programmable-gate-arrays, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 53, No. 1, pp. 236–241, Feb. 2006;

延迟线抽头内插型TDC框图（1）

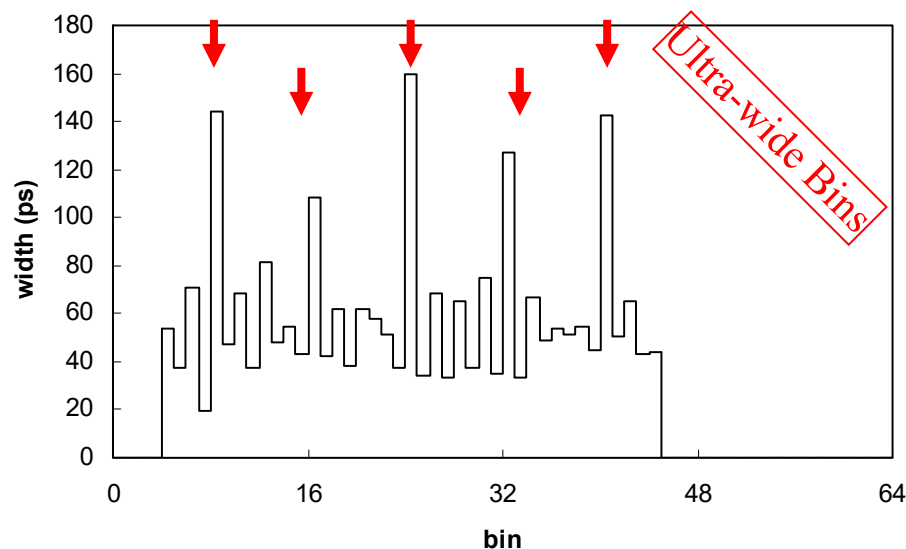
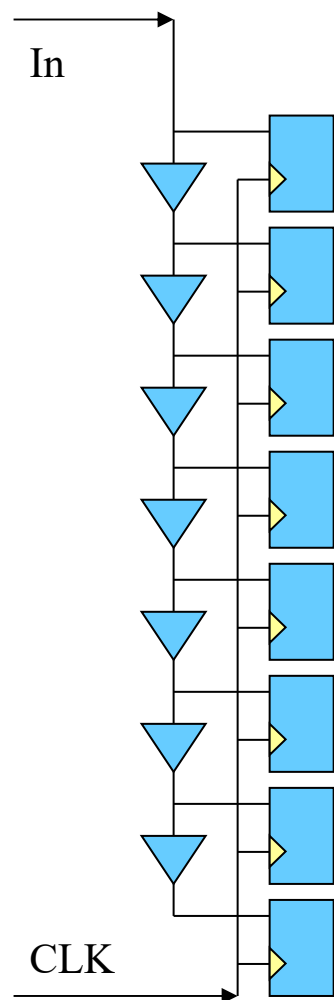


延迟线抽头内插型TDC框图（2）



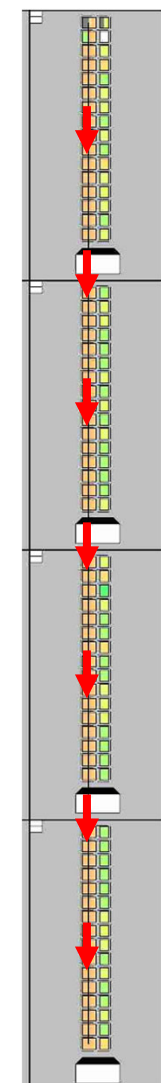
Chen Kai, Liu Shubin, An Qi, A high precision time-to-digital converter based on multi-phase clock implemented within Field-Programmable-Gate-Array, Nuclear Science and Techniques, 21 (2010) 123–128

提高TDC@FPGA时间测量精度的方法



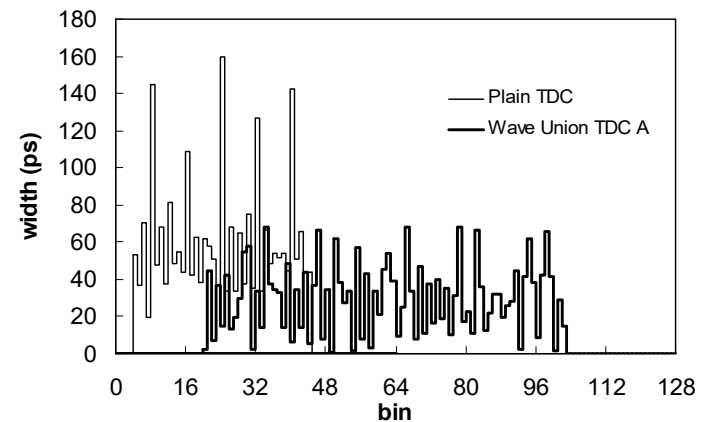
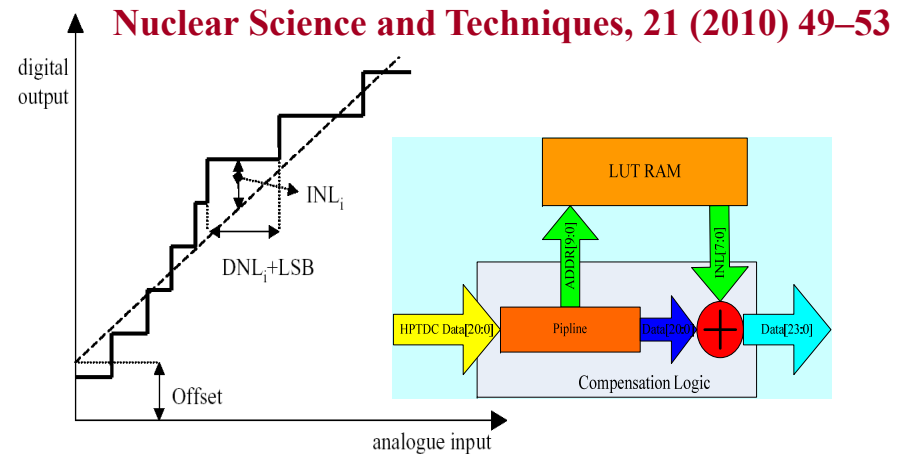
影响精度提高的因素：

- 分辨率（码宽）
 - 受限于FPGA工艺、结构，无法改善
- 非线性
 1. 随电压和温度的变化，码宽可能变化
 2. 由于FPGA底层结构，某些码可能特别宽



改善TDC@FPGA非线性的途径

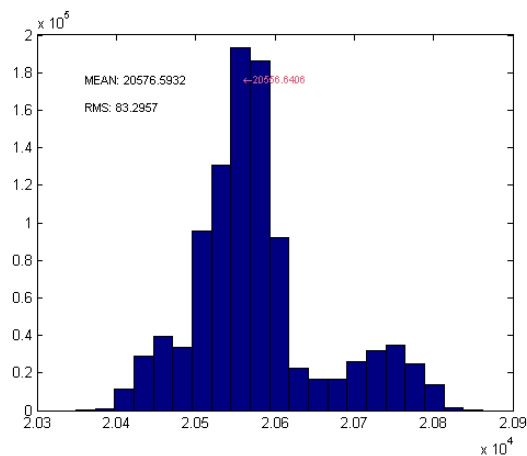
- 非线性的补偿（修正）
- 多次测量求平均
 - Wave Union/Dither



Proc. IEEE Nuclear Science Symp. Conf. Rec., 2008, pp. 3440–3446

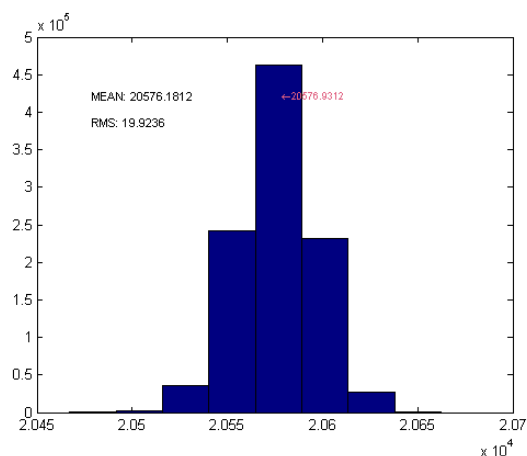
非线性补偿

非线性补偿前

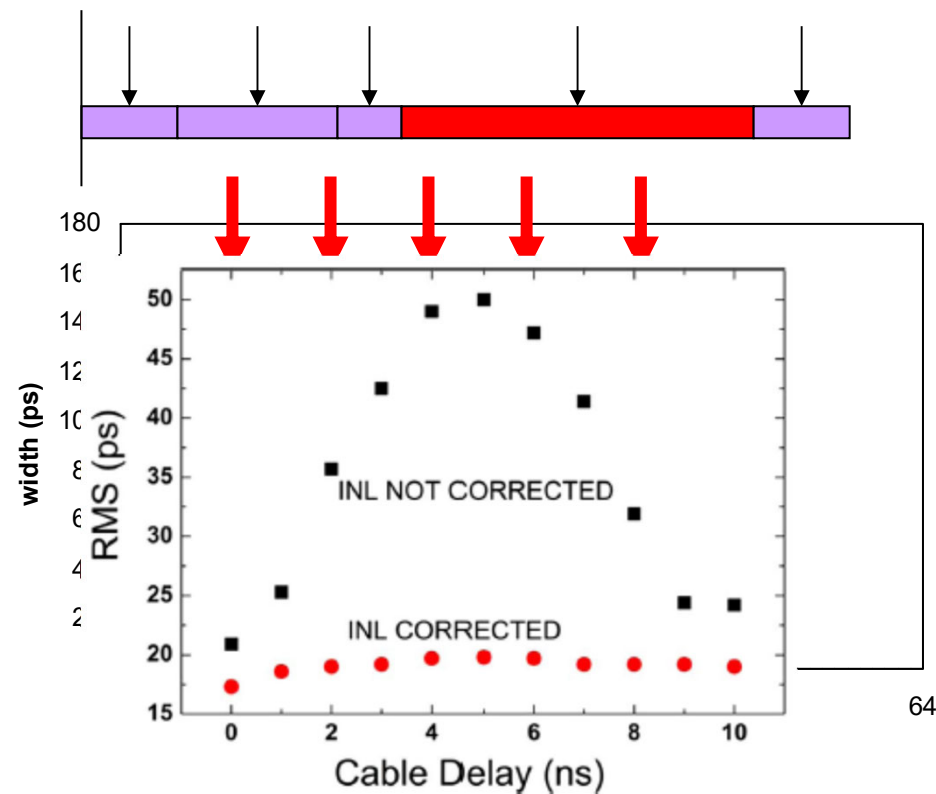


$$83.2957/1.414=58.9\text{ps}$$

非线性补偿后



$$19.9236/1.414=14.1\text{ps}$$

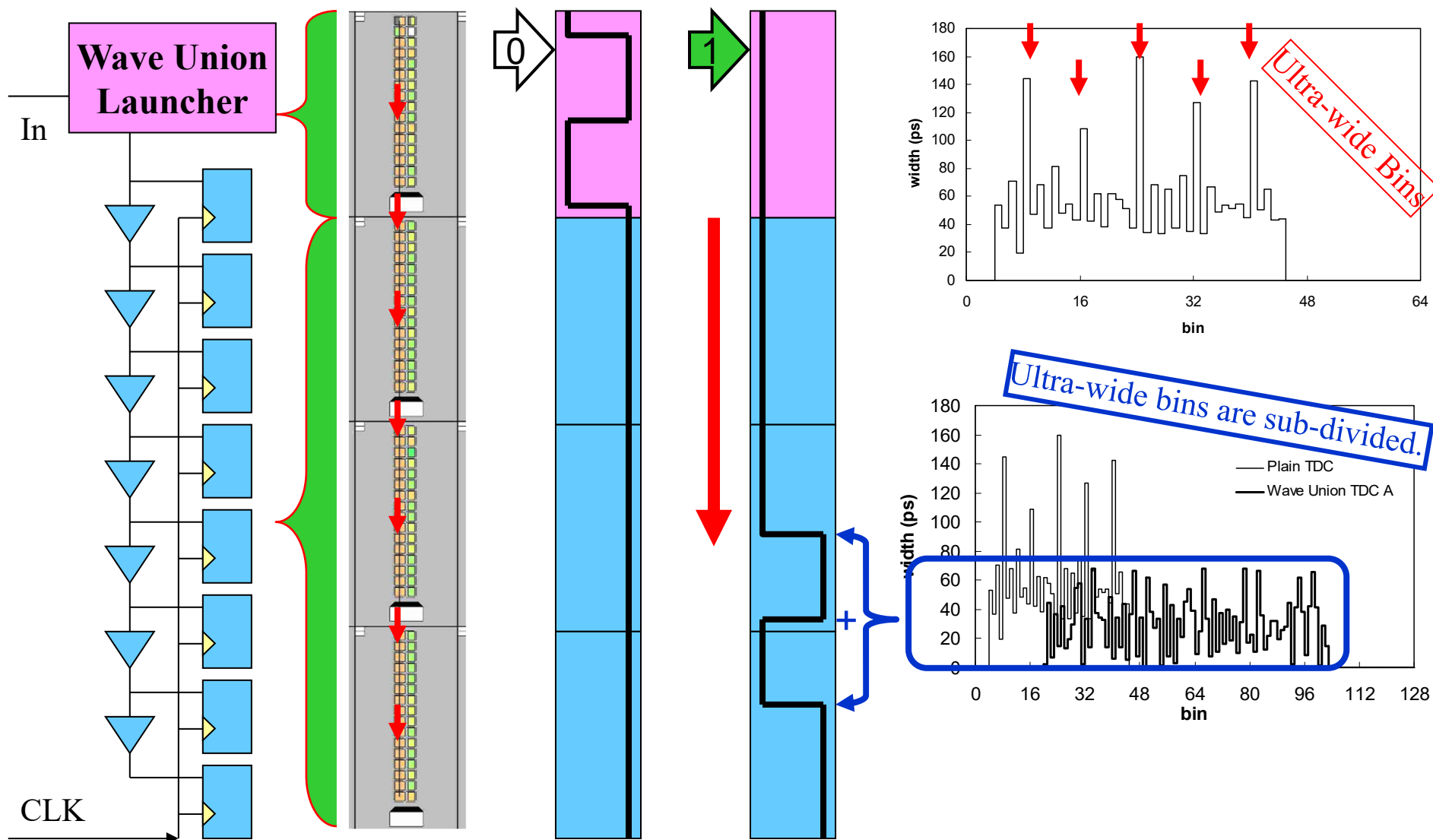


- 可相对提高测量精度😊
- 但无法消除过大的码宽 😞

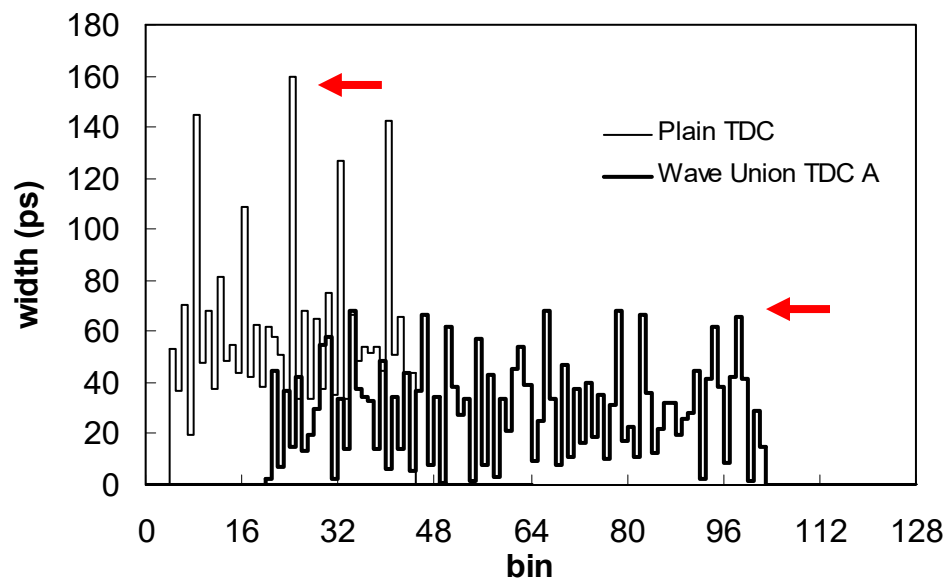
Wave Union (According to Wu Jinyuan @Fermilab)

0: Hold

1: Unleash



Wave Union方式减小了非线性



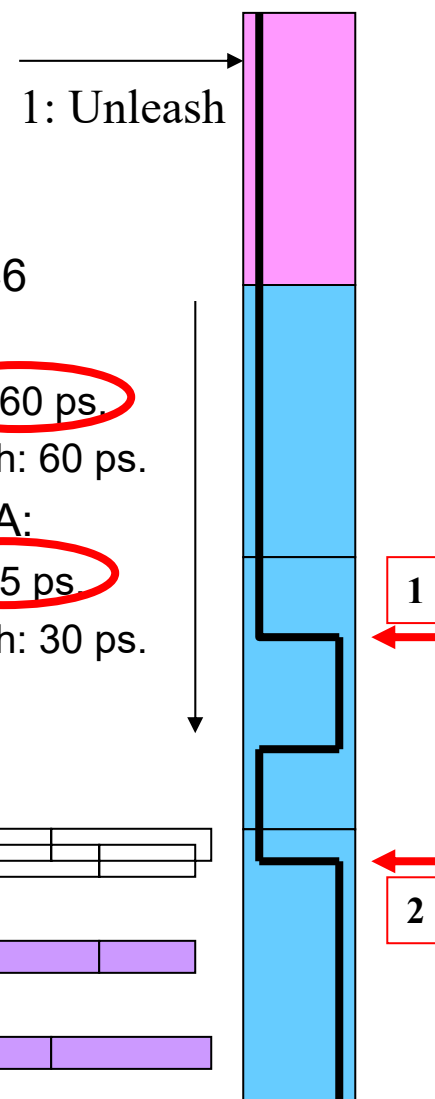
Device: EP2C8T144C6

Plain TDC:

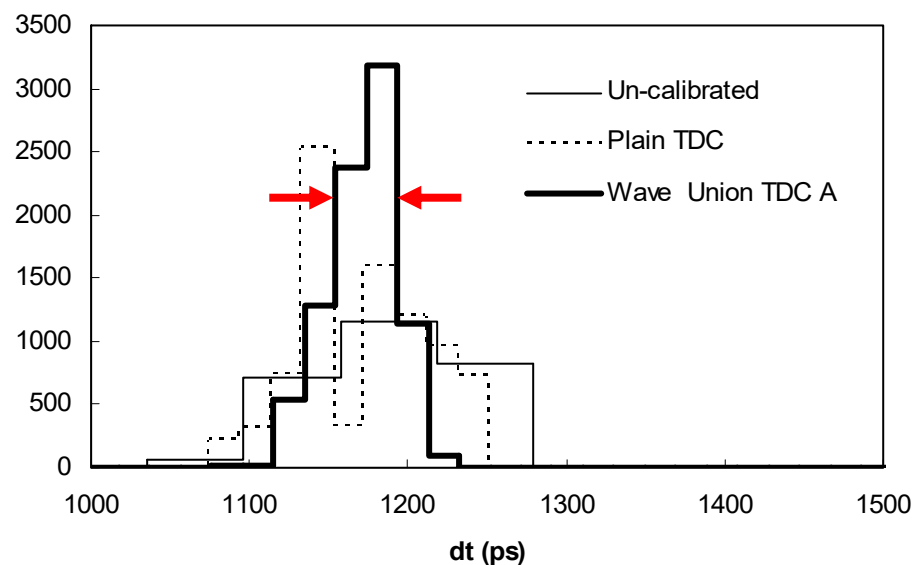
- Max. bin width: 160 ps.
- Average bin width: 60 ps.

Wave Union TDC A:

- Max. bin width: 65 ps.
- Average bin width: 30 ps.

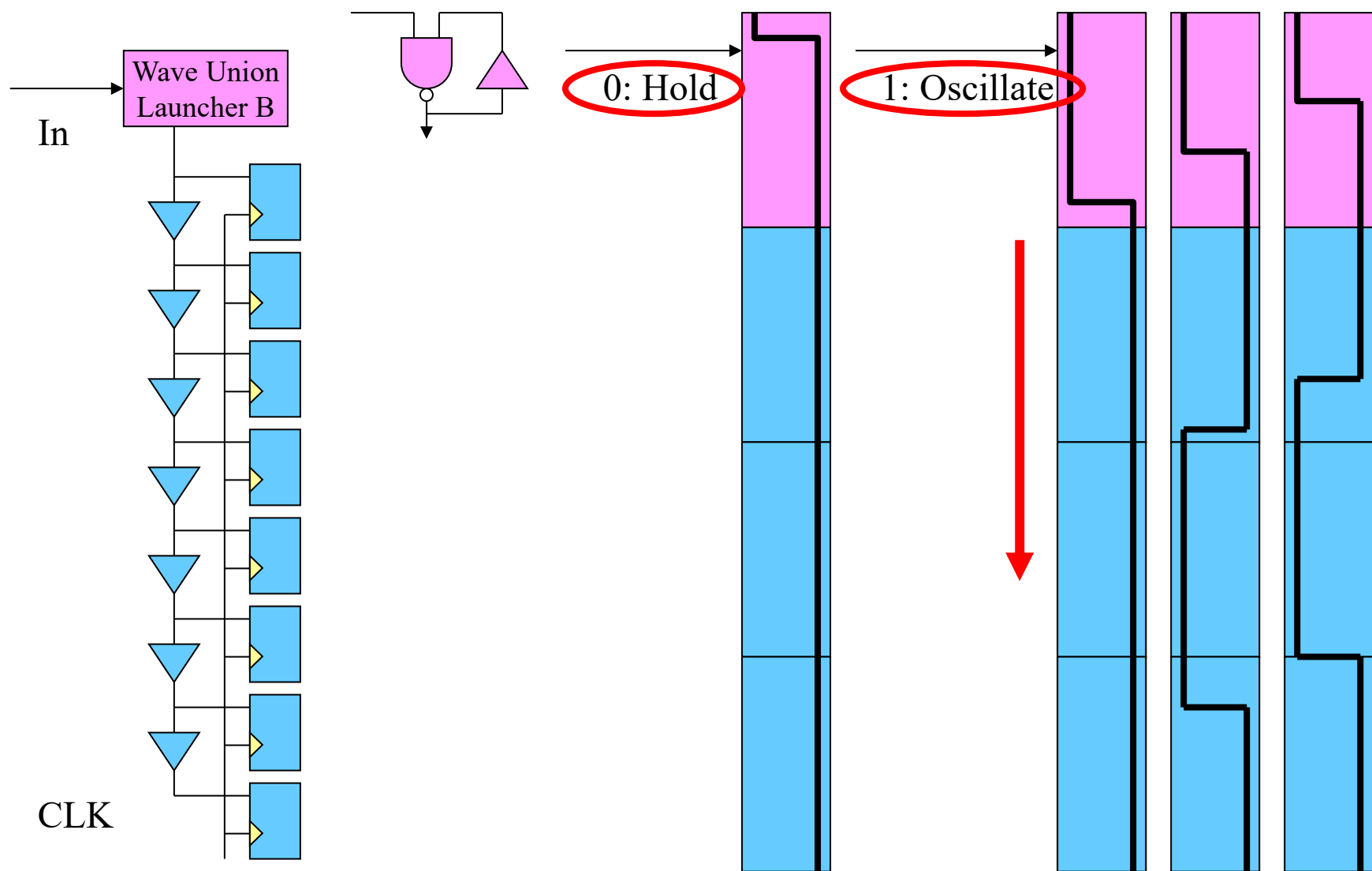


Wave Union方式提高了精度

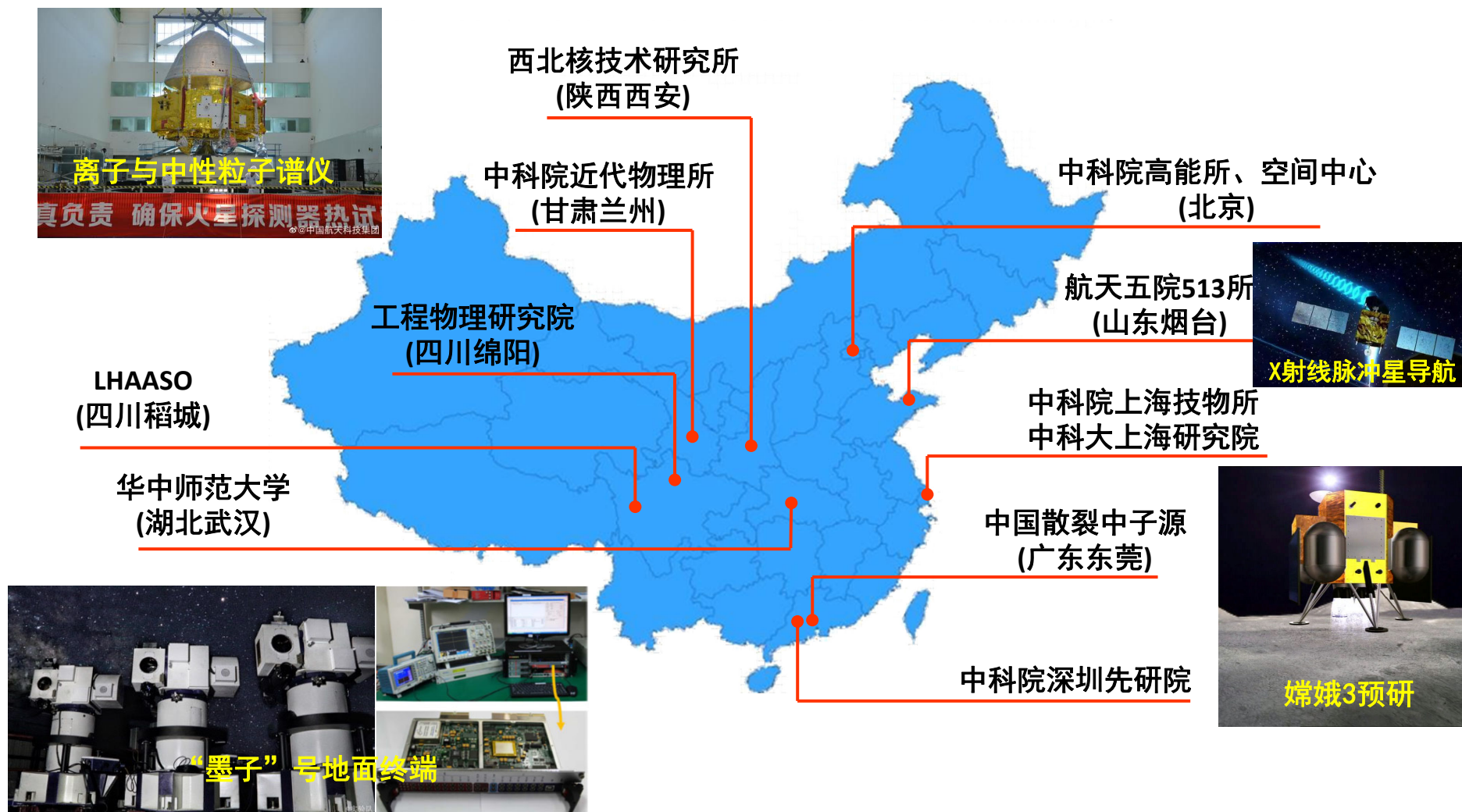


- Plain TDC:
 - delta t RMS width: 40 ps
 - 25 ps single hit
- Wave Union TDC A:
 - deltat RMS width: 25 ps
 - 17 ps single hit

更多次平均的Wave Union

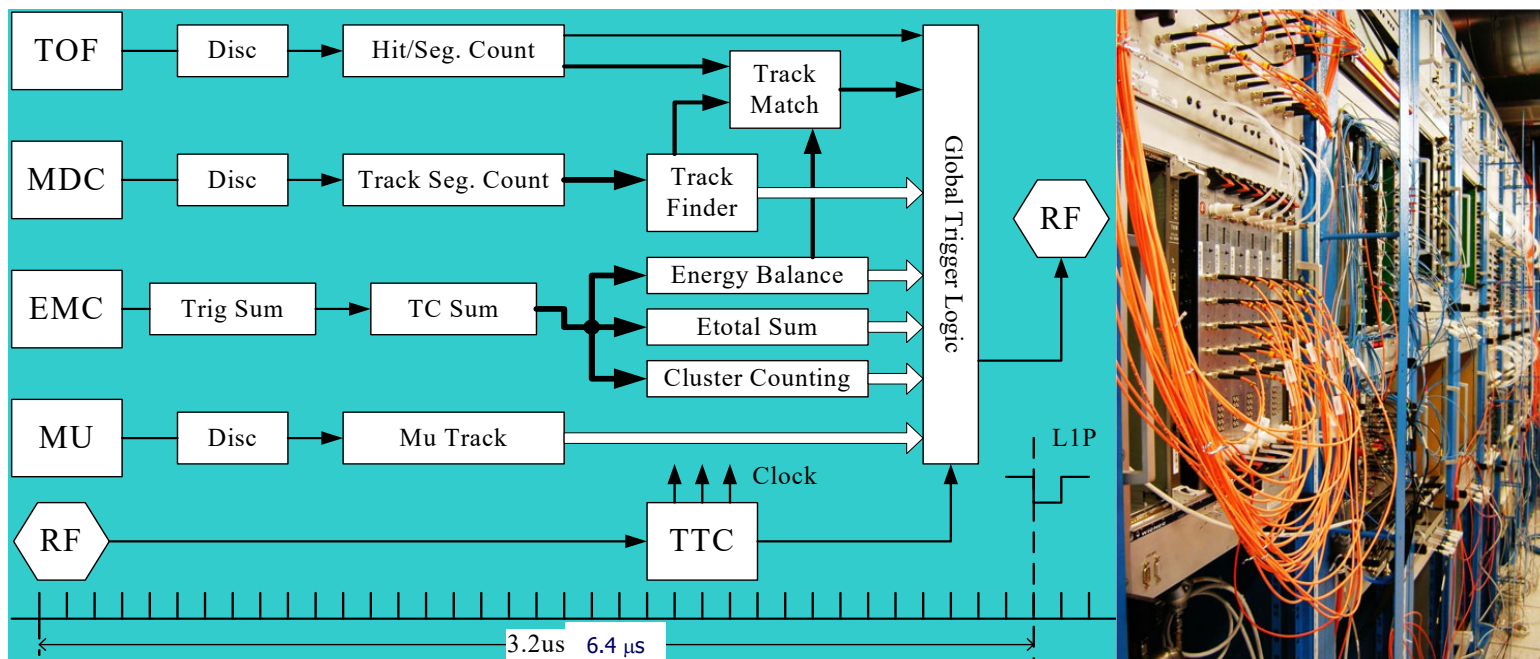


TDC@FPGA已直接应用于国家重大项目



触发判选系统

- 粒子物理实验中进行快速实时事例选择和控制的电子学系统
 - 对前端电子学提供的信号进行实时分析
 - 从大量假事例（本底）数据中挑出物理上感兴趣的事例
 - 决定前端电子学及数据获取系统对每次事例应执行的动作
- 强烈依赖探测器的具体结构，每个实验都有其独特的触发判选系统
 - 须根据具体实验物理目标和探测器结构对具体触发方案进行模拟计算



BES III触发判选系统

数据获取系统（DAQ）

- 收集读出电子学系统数字化数据
 - 装配成完整事例数据，记入海量存储器（磁带、磁盘）中
- 构成

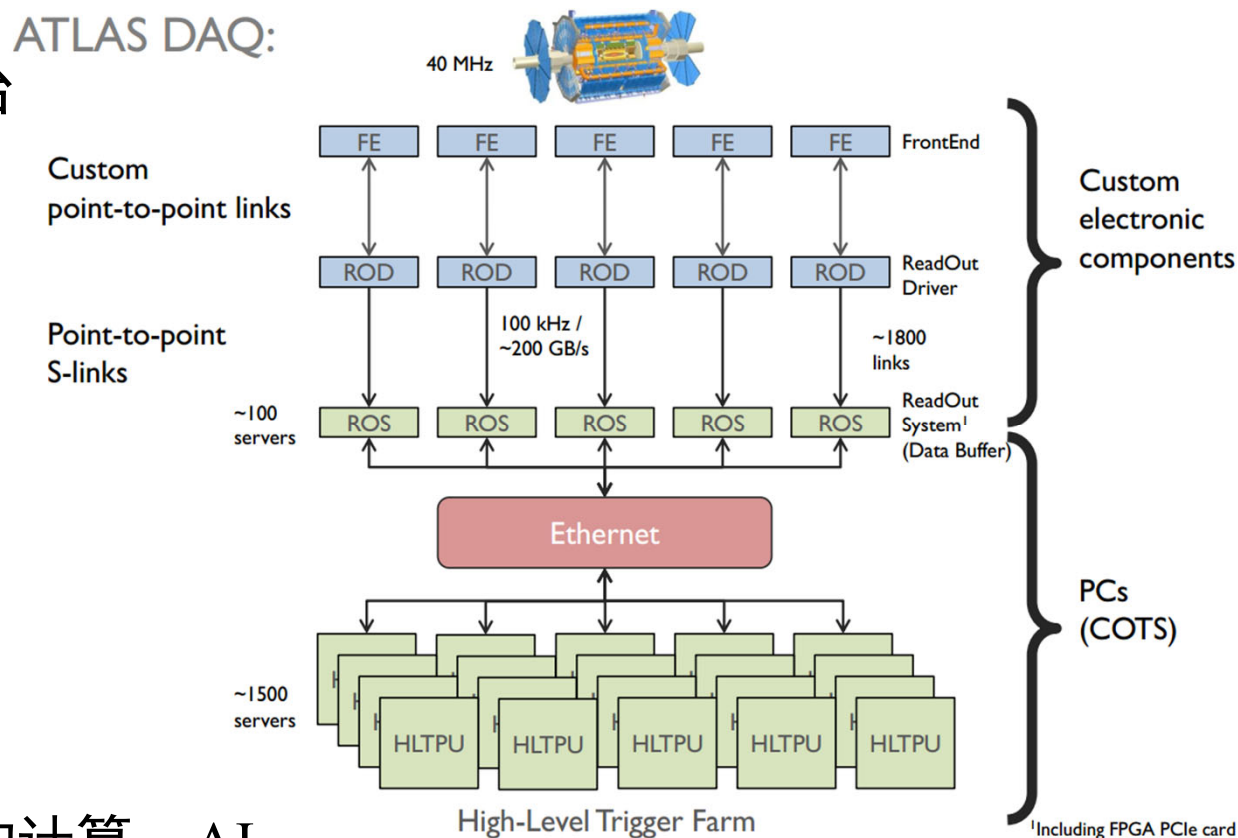
- 高速数据传输平台

- CAMAC
- FastBus
- VME/VME64xP
- ATCA
- 光纤
- 以太网.....

- 实时操作系统

- 快速中断响应
- 进程调度

- 计算机机群、异构计算、AI



内 容

1 核 电 子 学 特 点

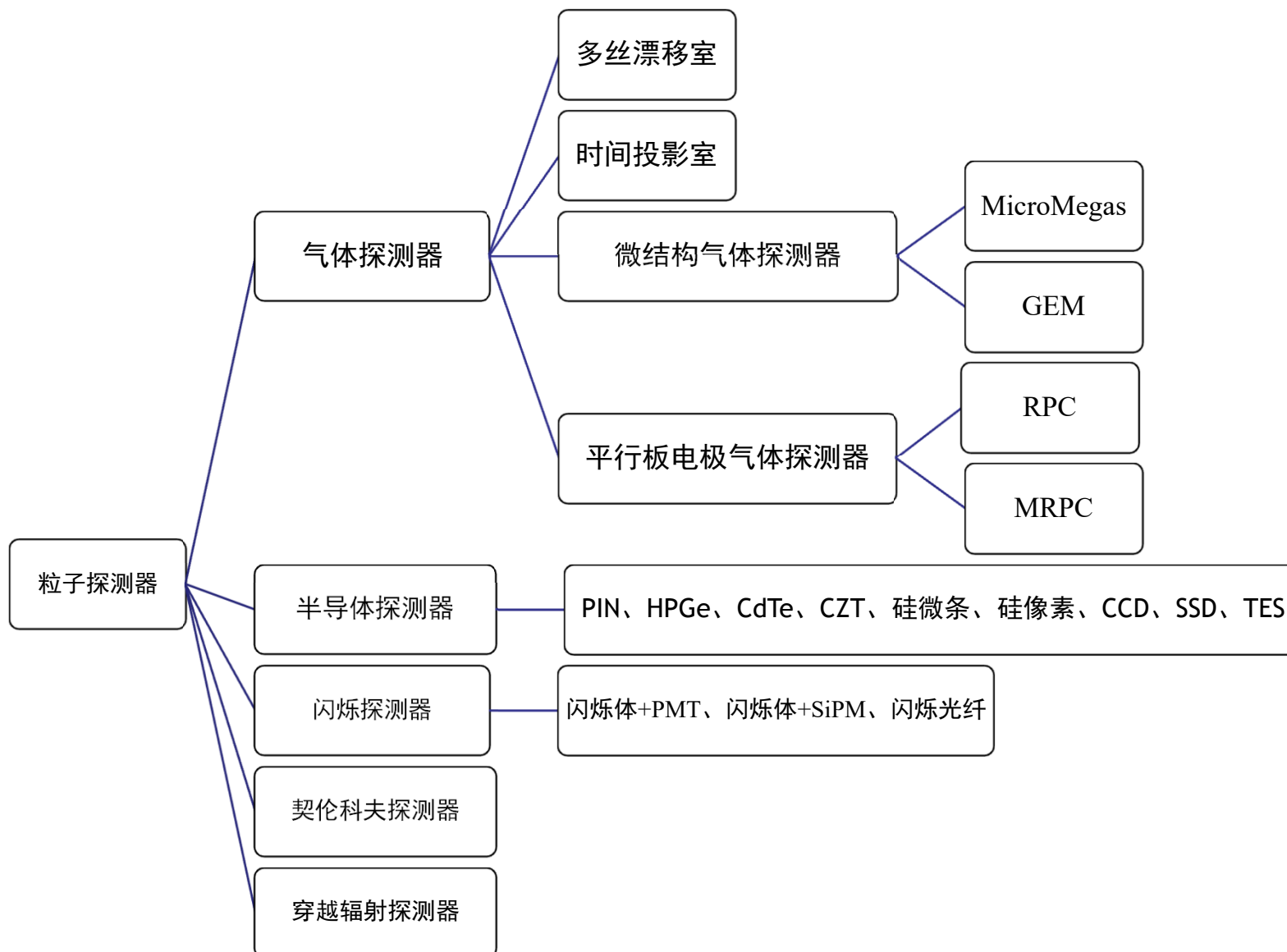
2 信 号 处 理 过 程

3 新 需 求 新 研 究

4 核 电 子 学 应 用

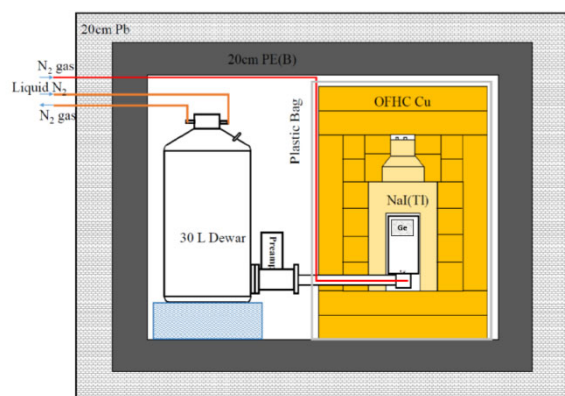


越来越多的探测器类型



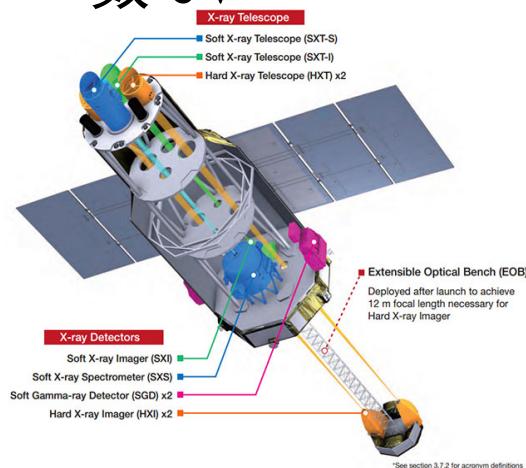
越来越微弱的小信号

- 实验领域：暗物质直接探测、X射线天文等
- 能量范围：百eV 至 keV
- 能量分辨：
 - 半导体探测器(Si/Ge)：~100 eV (电子学ENC<40 e)
 - 微量热器/TES：~数 eV

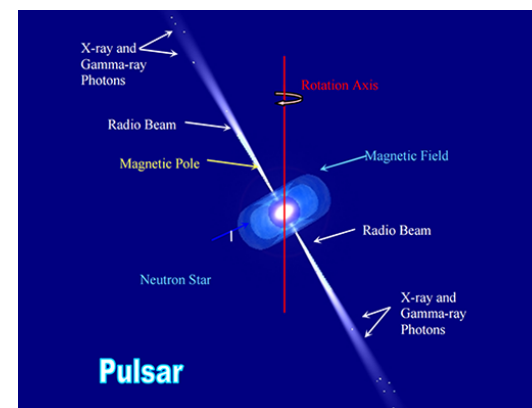


锦屏地下实验 (CDEX)

高纯锗探测器，阈值~180 eV



日本ASTRO-H X射线天文卫星
SXS探测器观测能段：0.3~12 keV
能量分辨指标：<7 eV (采用TES)

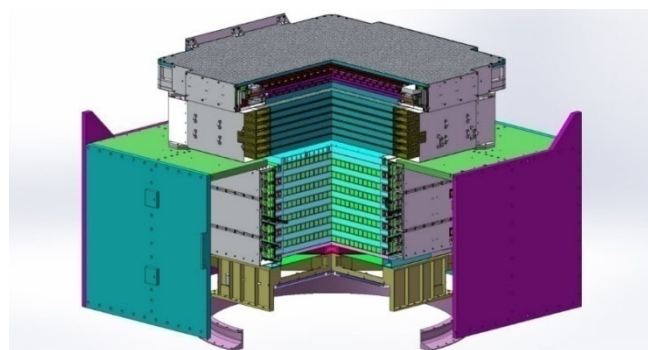


X射线脉冲星导航

观测能段：1~10 keV
分辨：~150 eV (采用SDD)

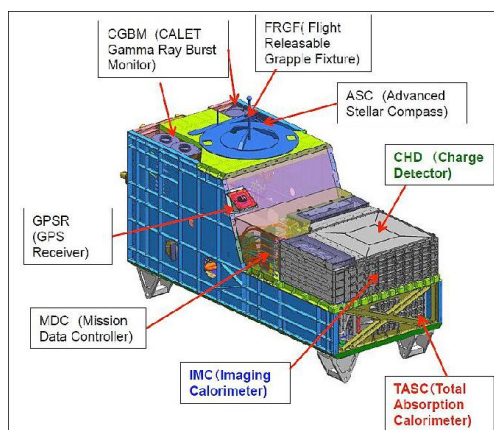
越来越大的动态范围

- 实验领域：空间暗物质探测、宇宙线实验
- 能量范围： >1 TeV
- 能量分辨： $\sim 1\%$



DAMPE卫星

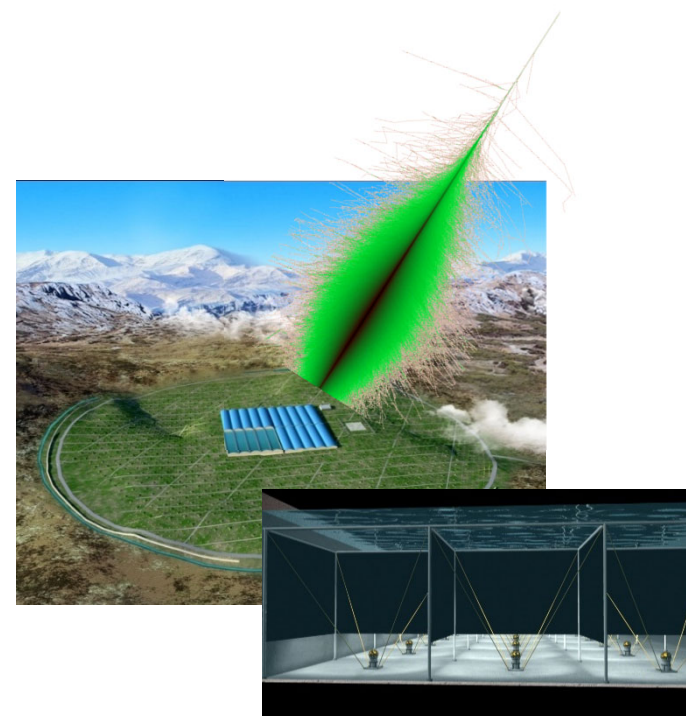
单个探测单元：11 MeV-2 TeV



CALET空间站实验

单个探测单元：0.5 MIP- 10^6 MIPs

(1 MIP=20 MeV)

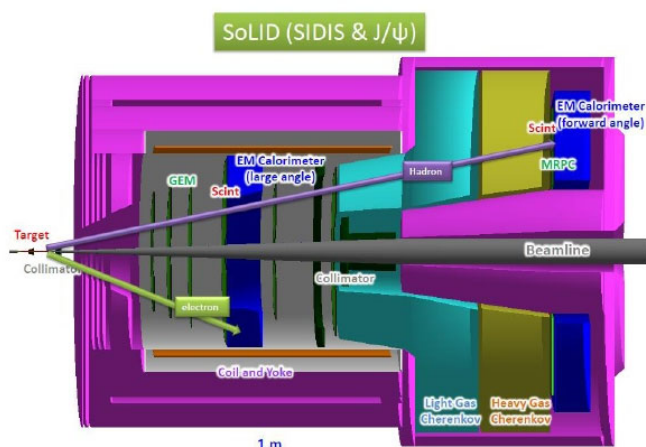


LHAASO WCDA

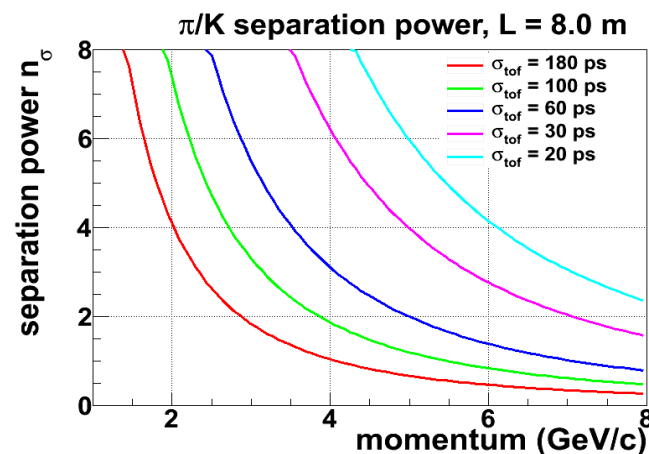
电荷测量动态范围S.P.E. - 4000 P.E.

越来越高的分辨率

- 实验领域：地面加速器实验的TOF探测器
- 系统时间分辨： ~ 20 ps (以JLAB SoLID实验为例)
- 电子学时间分辨： ~ 10 ps
- 技术路线：高精度TDC、开关电容阵列 (SCA)

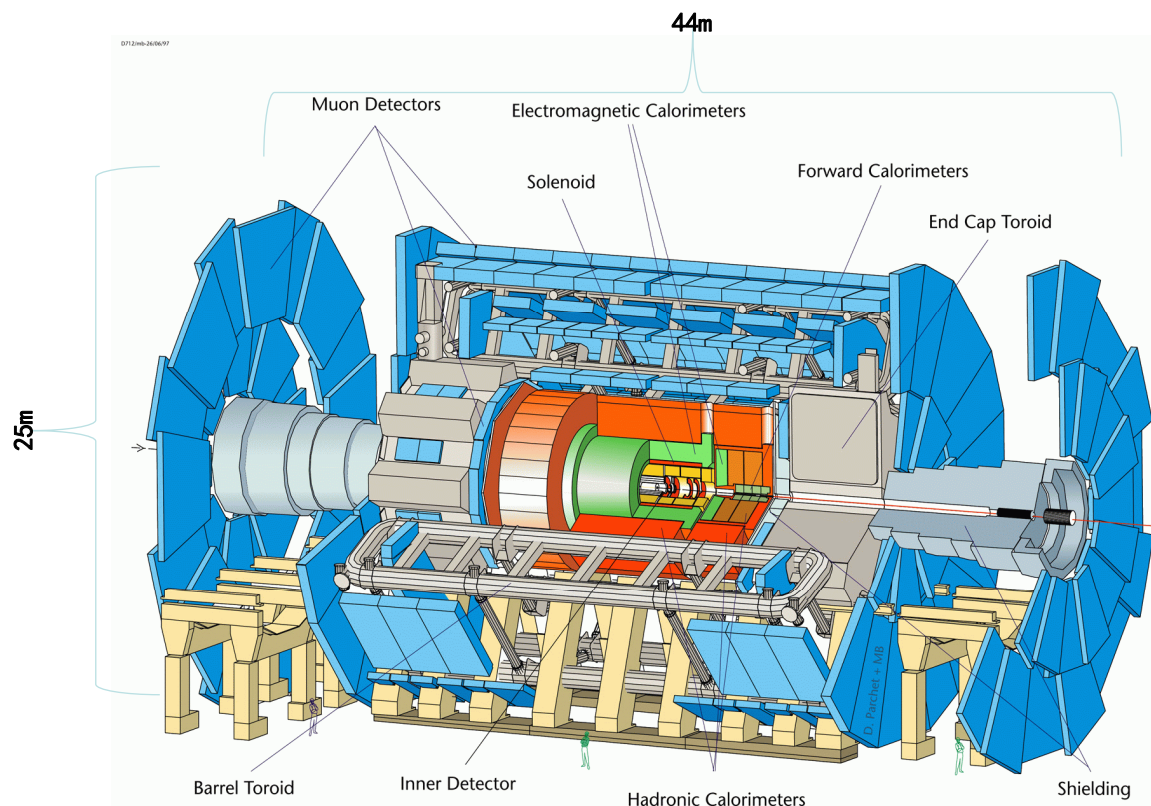


JLAB SoLID实验



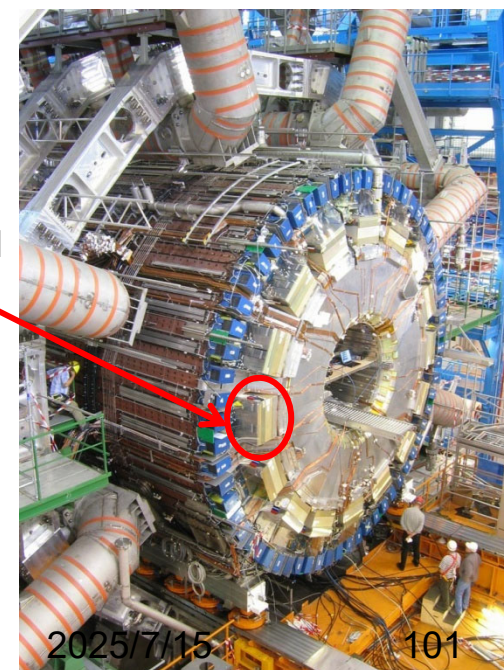
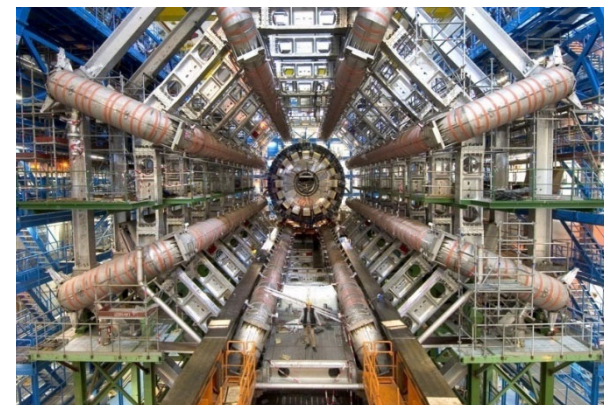
TOF探测器时间分辨：希望达到20 ps
(拟采用高性能MRPC)

狭小的空间Vs.庞大的通道数——ATLAS



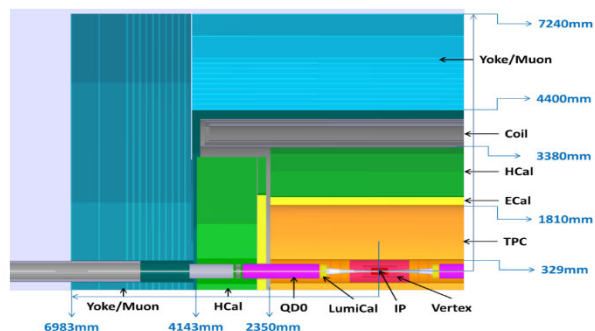
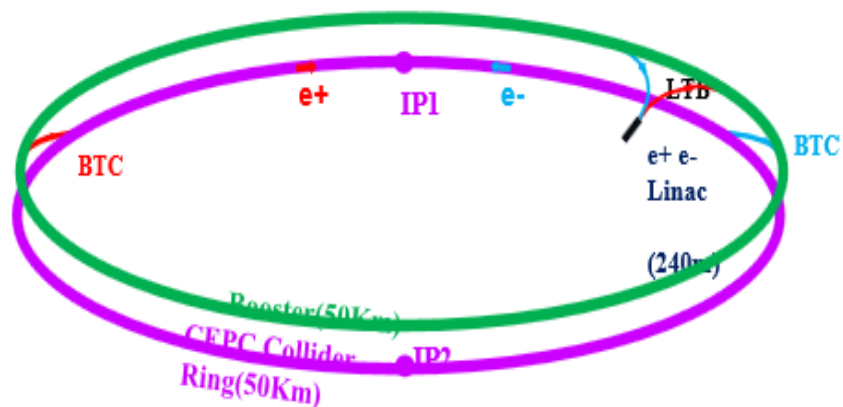
Total Channel: ~90million

- Inner Detector
 - Pixel Detector: 80 million channels
 - Semiconductor Tracker: 6 million channels
 - Transition Radiation Tracker: 350,000 channels
- Calorimeter
 - Tile Calorimeter: 10,000 channels
 - LAr Calorimeter: 110,000 channels
- Muon Spectrometer
 - Thin Gap Chambers: 440,000 channels
 - Resistive Plate Chambers: 380,000 channels
 - Monitored Drift Tubes: 354,240 tubes
 - Cathode Strip Chambers: 70,000 channels



Front End
Crate

CEPC.....



探测器组成:

- 顶点探测器
- 硅径迹探测器
- 时间投影室
- 电磁量能器
- 强子量能器
- 缪子探测器

	Total # channels M(10 ⁶)	Occupancy %	Nbit /channel	# Channels readout/evt k(10 ³)	Volume /evt MBytes	Data rate @100 kHz GBytes/s
VTX	690	0.3	32	2070	8.3	830
Silicon Tracker						
Barrel	3238	0.01 ~ 1.6	32	1508	3.15	315
Endcap	1238	0.01 ~ 0.8	32	232	0.4	40
TPC	2	0.1-8	30	1375	5	500
Drift Chamber	0.056	5-10	480	?	3	300
ECAL						
Barrel	17/7.7	0.17	32	28.8/13.1	0.117/0.053	11.7/5.3
Endcap	7.3/3.3	0.31	32	22.4/10.2	0.090/0.041	9.0/4.1
AHCAL						
Barrel	3.6	0.02	32	0.72	0.0029	0.3
Endcap	3.1	0.12	32	3.72	0.015	1.5
DHCAL						
Barrel	32	0.004	2	1.28	0.00032	0.03
Endcap	32	0.01	2	3.2	0.0008	0.08
Dual Readout Calorimeter	22	0.4-1.6	64	88-352	0.704-2.8	70-280
Muon						
Barrel	4.9	0.0002	24	0.01	< 0.0001	< 0.01
Endcap	4.6	0.0002	24	0.01	< 0.0001	< 0.01

Table 8.1: CEPC DAQ Data Rate Estimation. TPC and drift chamber are options of outer side tracker. With the level-1 trigger operating at 100 kHz, the total raw data rate is 2 TBytes/s.

前端读出电子学

- 极限的需求增长
 - 越来越多的探测器类型
 - 越来越苛刻的性能指标：
 - 微弱的小信号：百eV~keV
 - 动态范围： $\sim 10^5$
 - 时间分辨：10 ps量级
 - 更全面的信息需求：时间、幅度、形状.....
 - 越来越庞大的规模：~千万量级

→新的核电子学设计趋势

- ASIC及定制化电路
- 数字化前移
- 波形数字化
- 通用电子学系统

关键技术研究

- 新型探测器前端读出电子学、ASIC
 - 先进气体探测器：GEM、MicroMegas、MRPC、sTGC.....
 - 半导体探测器：HPGe、CZT、MAPS、SSD.....
 - 微量热器、TES.....
- 波形数字化技术
 - 并行交替采样
 - SCA ASIC设计
- 高精度时间测量技术
 - TDC@FPGA设计
 - TDC@ASIC设计

CEPC量能器预研

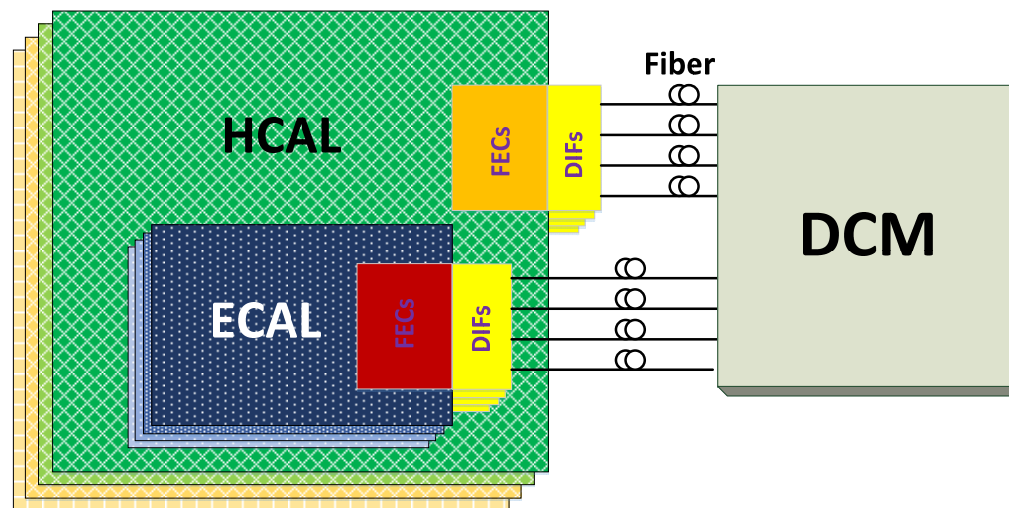
- PFA量能器：细颗粒度、高集成度、大规模

- ECAL

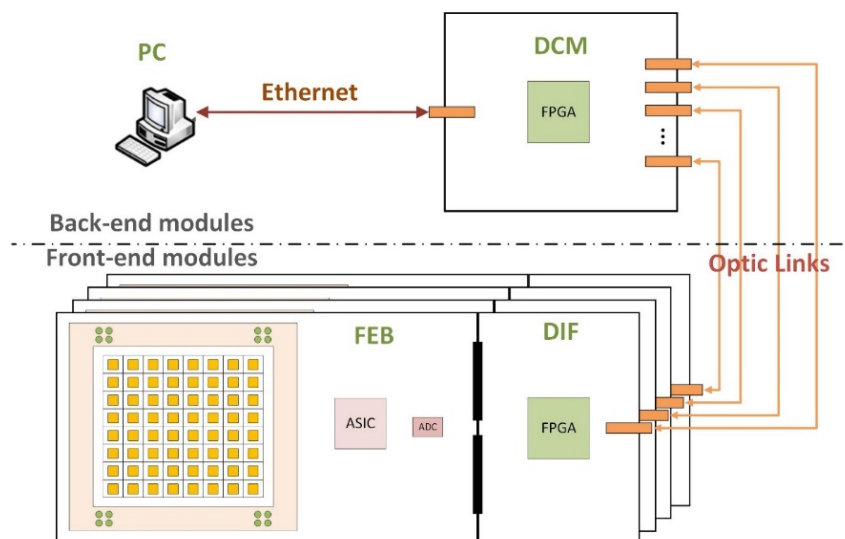
- SiPIN
- 闪烁体+SiPM
- MAPS

- HCAL

- GEM
- 闪烁体+SiPM



- 读出电子学：高集成度、大规模、高带宽、通用、可扩展



ECAL: W-SiPIN读出电子学

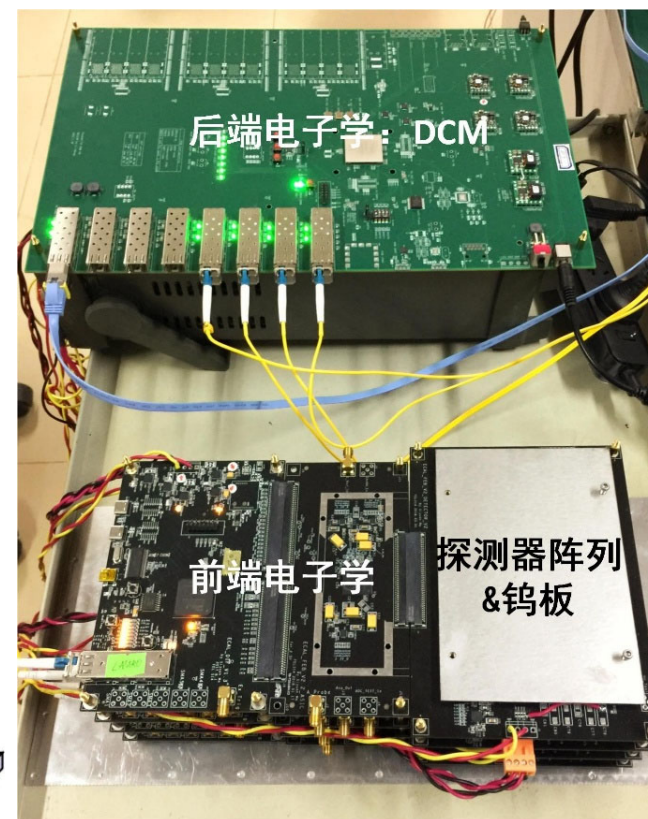
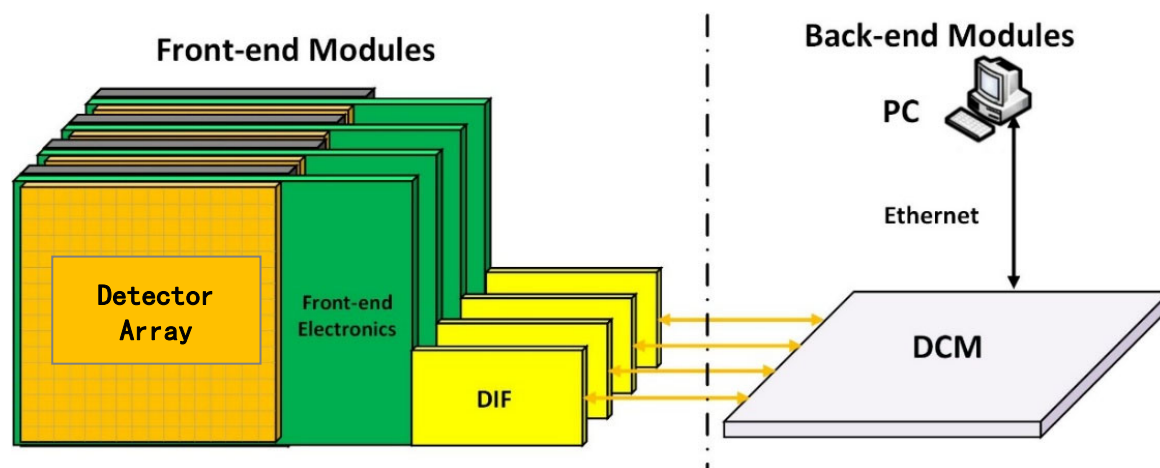
➤ 模块化设计：前端电子学+后端电子学

◆ 前端电子学

- 前端板 (FEB, Front-End Board)
- 数据接口板 (DIF, Data InterFace)

◆ 后端电子学

- DCM (Data Concentration Module)



ECAL&AHCAL: SiPM读出

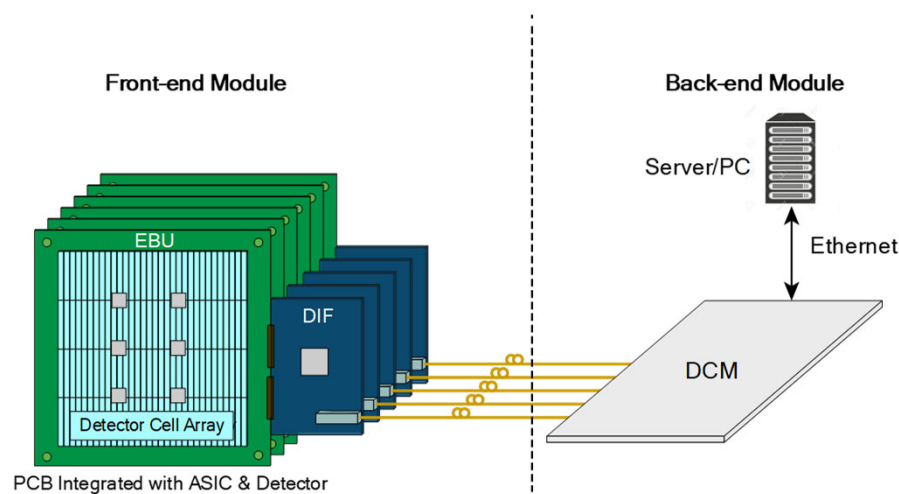
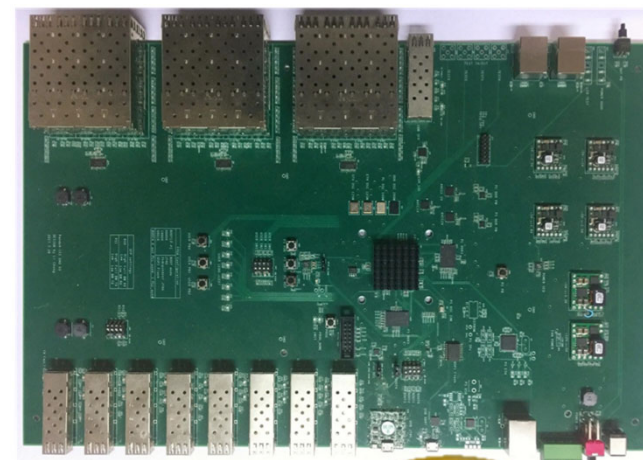
➤ 模块化设计：前端电子学+后端电子学

◆ 前端电子学

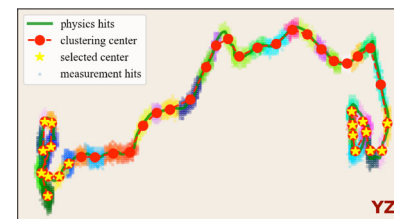
- 前端板 (FEB, Front-End Board)
- 数据接口板 (DIF, Data InterFace)

◆ 后端电子学

- DCM (Data Concentration Module)



PandaX III TPC读出电子学



■ PandaX III大型低本底TPC的Micromegas和读出电子学系统

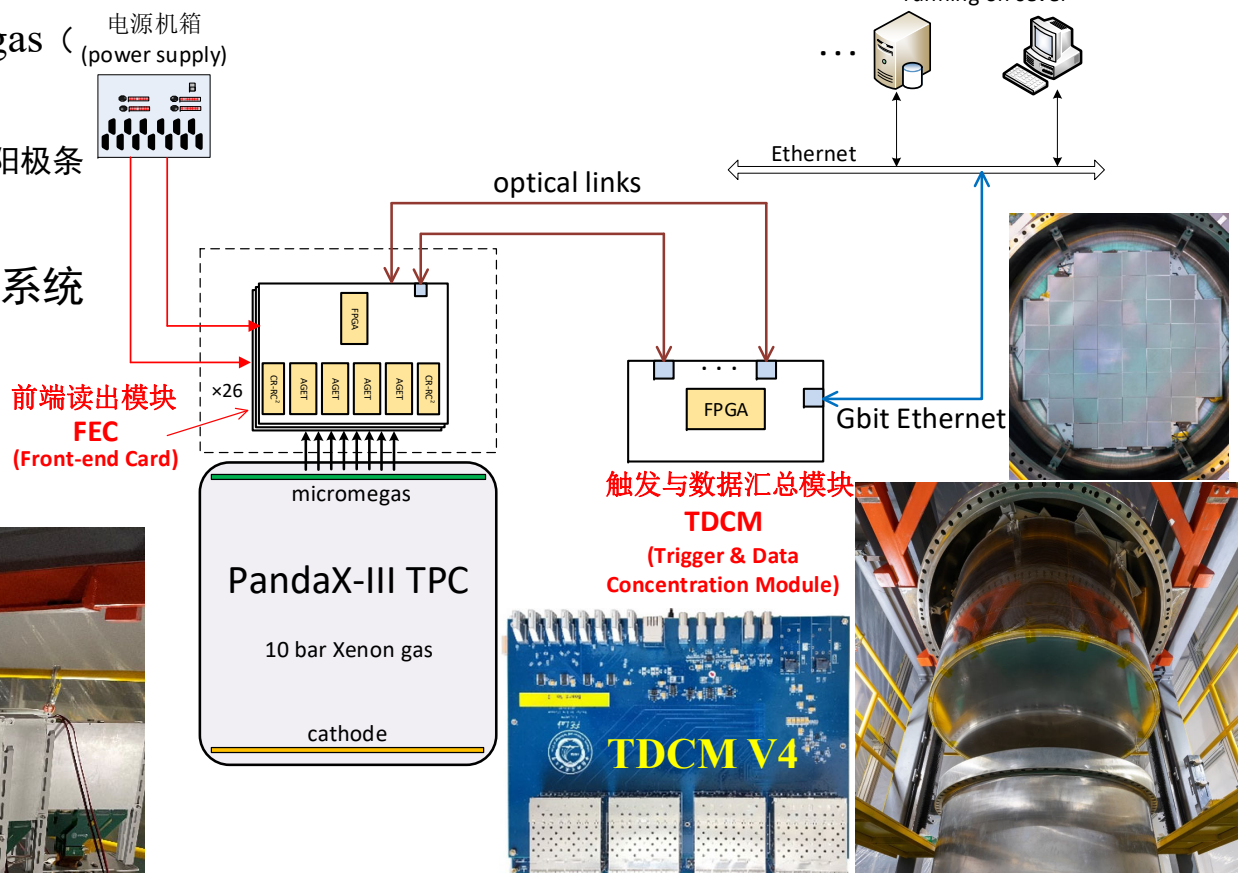
● 52块热压接工艺Micromegas (电源机箱 (power supply))

原计划CERN提供)

- 20cm×20cm: 128路平行阳极条
- 总通道数: 6656

● 全链路自主研发数据采集系统

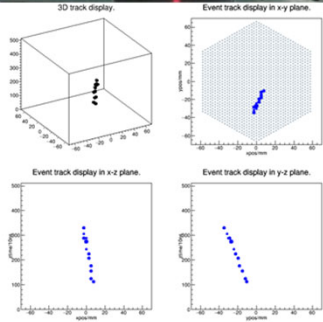
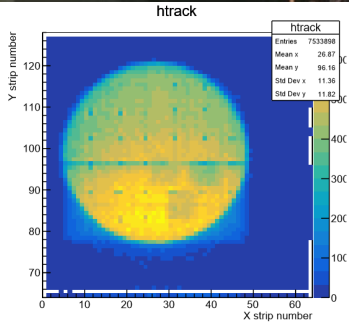
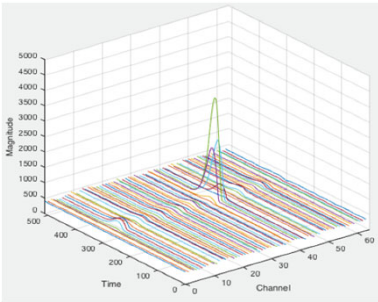
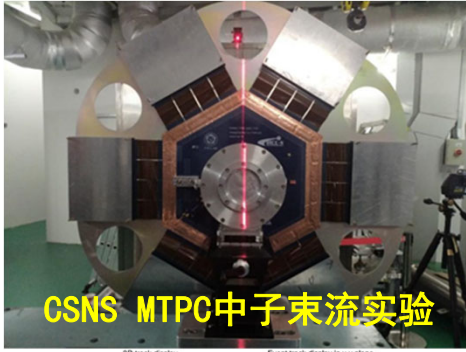
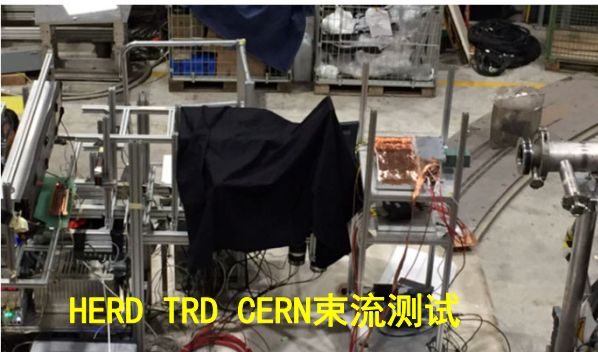
- 26块FEC, 噪声<10fC
- 1块TDCM (原计划Saclay提供)



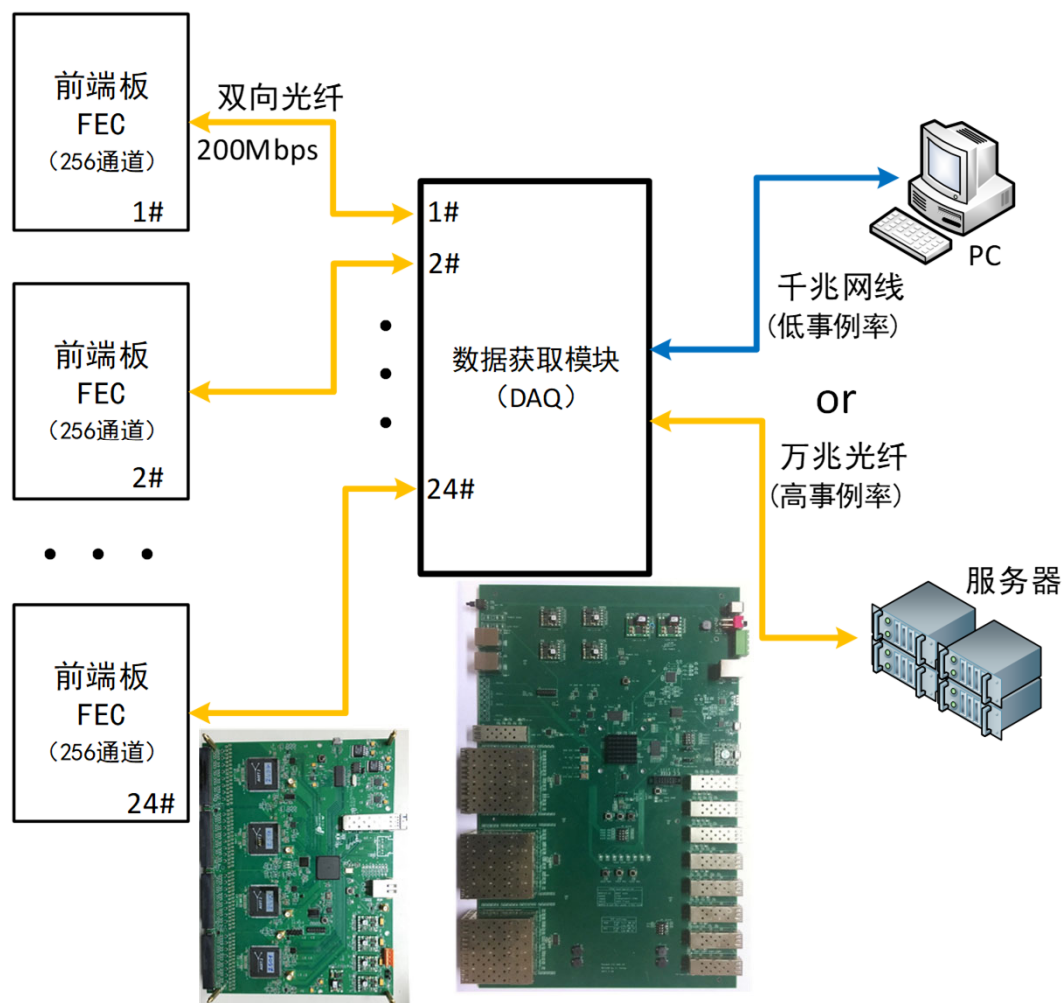
微结构气体探测器读出电子学需求

应用单位	读出通道数	探测器类型	应用背景
上海交通大学	1024	MicroMegas TPC	PandaX III原型探测器联调
中国散裂中子源	1536	阻性MicroMegas	中子束流监测、核数据测量MTPC
中国科学院大学	512	THGEM	探测器研发
高能物理研究所	512	GEM等	探测器研发
广西大学	512	THGEM	宇宙线系统研制（HERD项目合作）
原子能科学研究院	256	MicroMegas	探测器测试和研究
中科院近物所	256	GEM	TPC探测器研发、CEE预研

.....



针对AGET芯片的通用可扩展读出电子学



➤ 系统构成:

- 前端读出板 (FEC)
- 数据获取板 (DAQ)
- 数据获取软件 (+ 计算机)

➤ 探测器-FEC连接

- 采用80pin 高密度连接器

➤ FEC-DAQ连接

- 单芯双向光纤

➤ 单个FEC可支持256个通道

➤ FEC数量可灵活配置

➤ 单个DAQ可支持多达24个FEC(6144路)

➤ DAQ到计算机: 通过千兆以太网连接

➤ 多个DAQ可并行工作以扩展系统规模

科技部重点研发计划 “基于惰性气体探测器的直接暗物质探测实验” (2016YFA0400303) 资助研究

内 容

-  核 电 子 学 特 点
-  信 号 处 理 过 程
-  新 需 求 新 研 究
-  核 电 子 学 应 用

北京正负电子对撞机(BEPC)

11 countries, 52 institutions, 351 authors



Leptons Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	ν_e e- neutrino	ν_μ μ - neutrino	ν_τ τ - neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
I II III Three Generations of Matter			

BES III TOF读出电子学

- TOF探测器组成

- 桶部 TOF： 双层

- 塑料闪烁体——BC404

- 88×2

- PMT——R5924

- $88 \times 2 \times 2 = 352$

- 端盖TOF： 单层

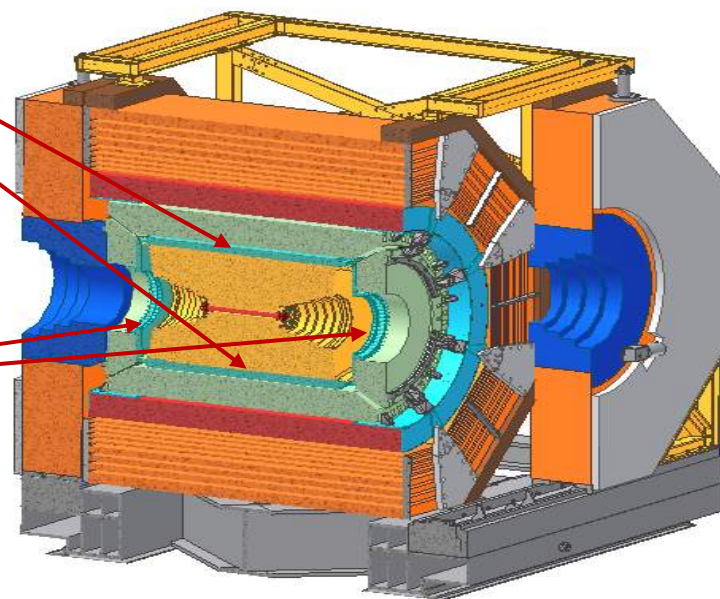
- 塑料闪烁体——BC404

- 48×2

- PMT——R5924

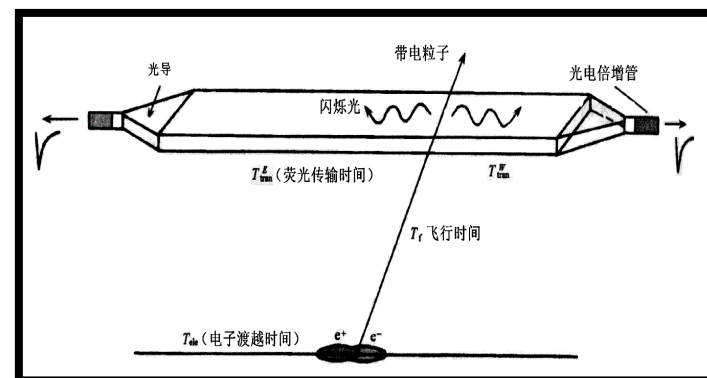
- $48 \times 2 = 96$

读出电子学通道数： $352 + 96 = 448$



BESIII TOF读出电子学的基本指标

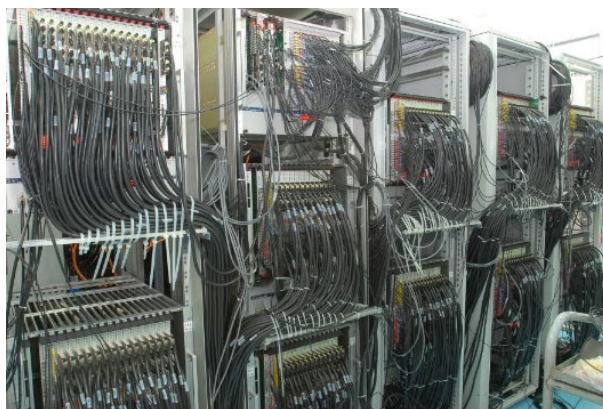
- 时间测量
 - 动态范围： $0 \sim 60 \text{ ns}$
 - 电子学分辨： $\sigma_t \leq 25 \text{ ps}$
- 电荷测量
 - 动态范围： $200 \text{ mV} \sim 4 \text{ V}$
 - 电子学分辨： $\sigma_q \leq 10 \text{ mV}$
- 串扰： $< 1\%$
- 积分非线性： $< 2\%$
- 读出平台： 满足VME总线CBLT读出数据



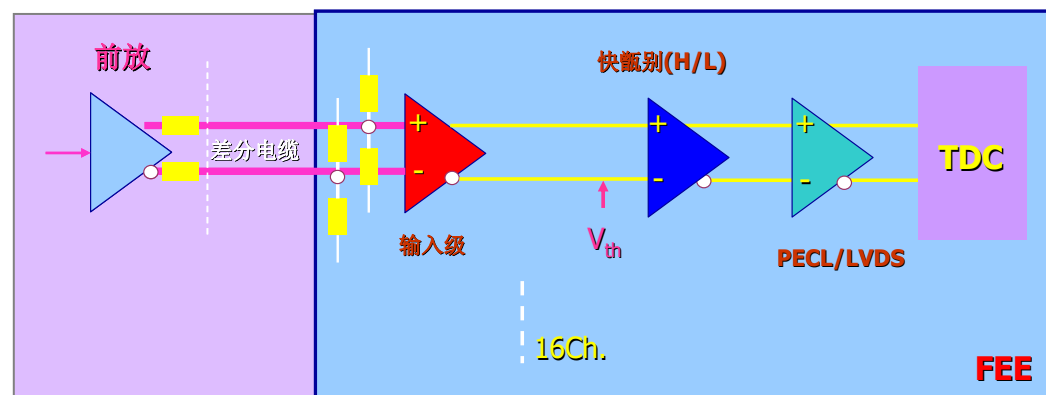
BESIII TOF读出电子学设计原则

- 采用其它实验成功技术和新型专用ASIC，减少分立元件使用
- 低噪声前端电路设计
- 时间、电荷数字化尽量统一，减少模块种类
- 提高电子学系统密度
- 抗干扰设计：系统间电隔离、系统内差分传输
- 充分考虑信号完整性
- 低功耗
- 采用稳定的工业领域通讯、网络技术

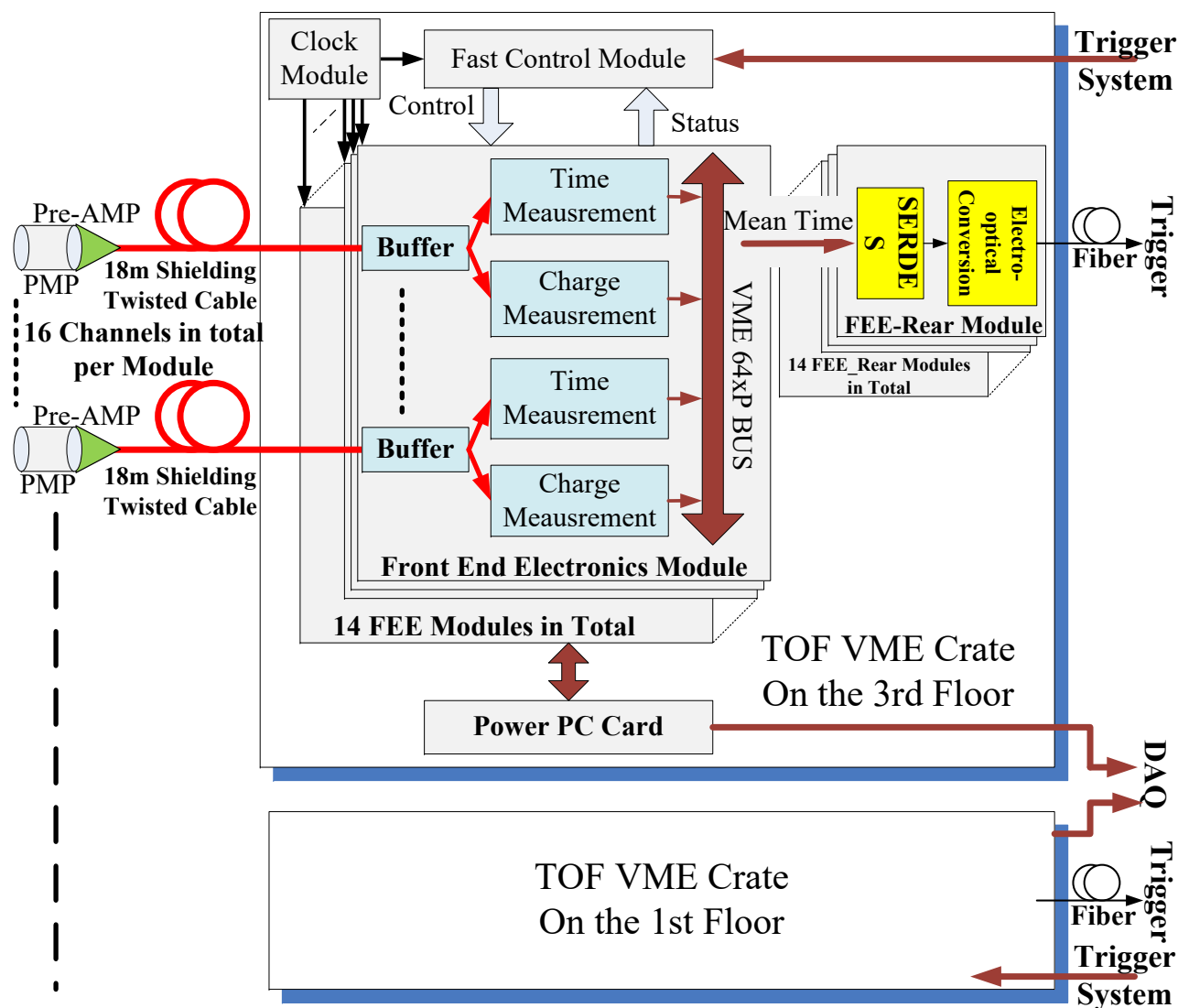
BESIII TOF读出电子学整体考虑



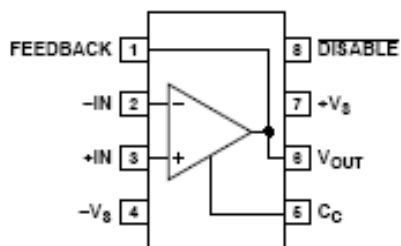
- 硬件平台：VME64xP (9U)
- 信号链的全差分处理
 - 前置放大
 - 长距离传输（18米差分电缆）
 - FEE输入缓冲放大
 - PECL-LVDS电平转换
- 时间、电荷量数字化统一
 - 借鉴BELLE实验经验
 - 双阈定时甄别+HPTDC
 - 非门控的QTC+TDC
- 逻辑电路采用FPGA



BES III TOF读出电子学

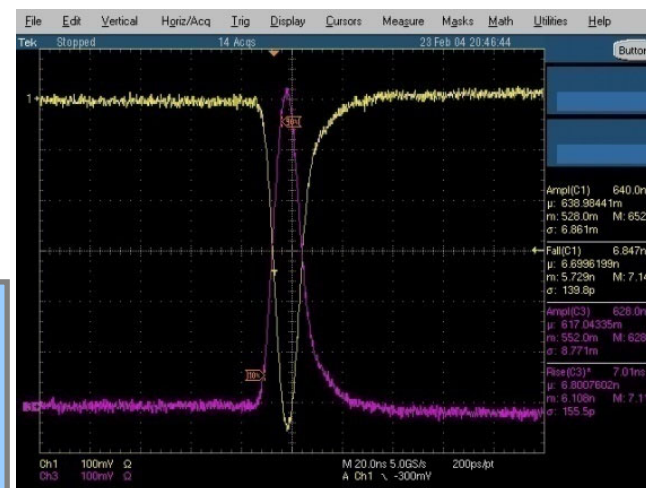
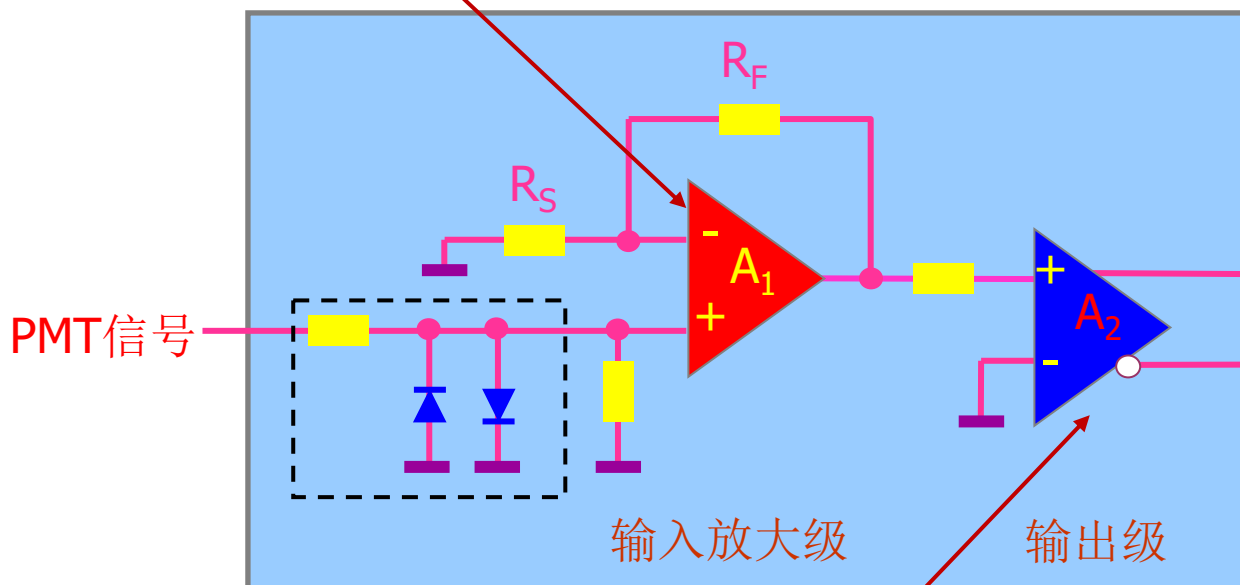


BESIII TOF快前放（电压放大）

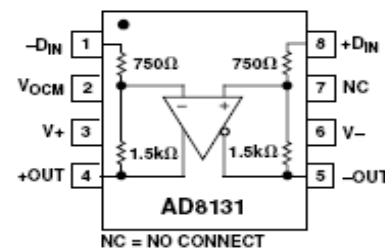


AD8099:

- 具有极低噪声 ($0.95 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) 和失真 ($-92 \text{ dBc}@10\text{MHz}$) 的电压反馈型集成运放
- 摆率: $1350 \text{ V}/\mu\text{s}$, 增益带宽乘积: 3.8 GHz , 在增益为+10时, 仍有 550 MHz 的带宽



输出差分信号



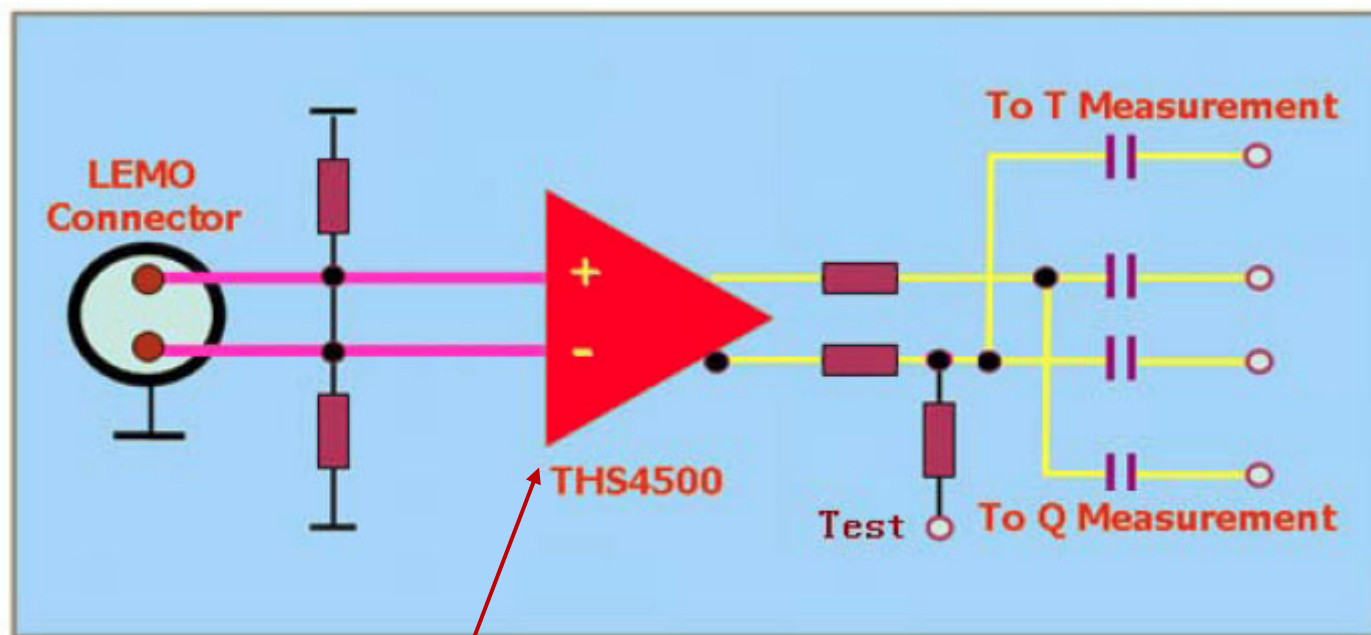
AD8131:

- 增益固定为2倍的全差分高速放大器, 具有 $2000 \text{ V}/\mu\text{s}$ 的输出信号摆率和 400 MHz 的全功率带宽
- 适合于长信号传输线的驱动, 具有几乎为零的输出阻抗, 而且还具有较大的输出动态范围

前置放大器输出电缆与阻抗匹配



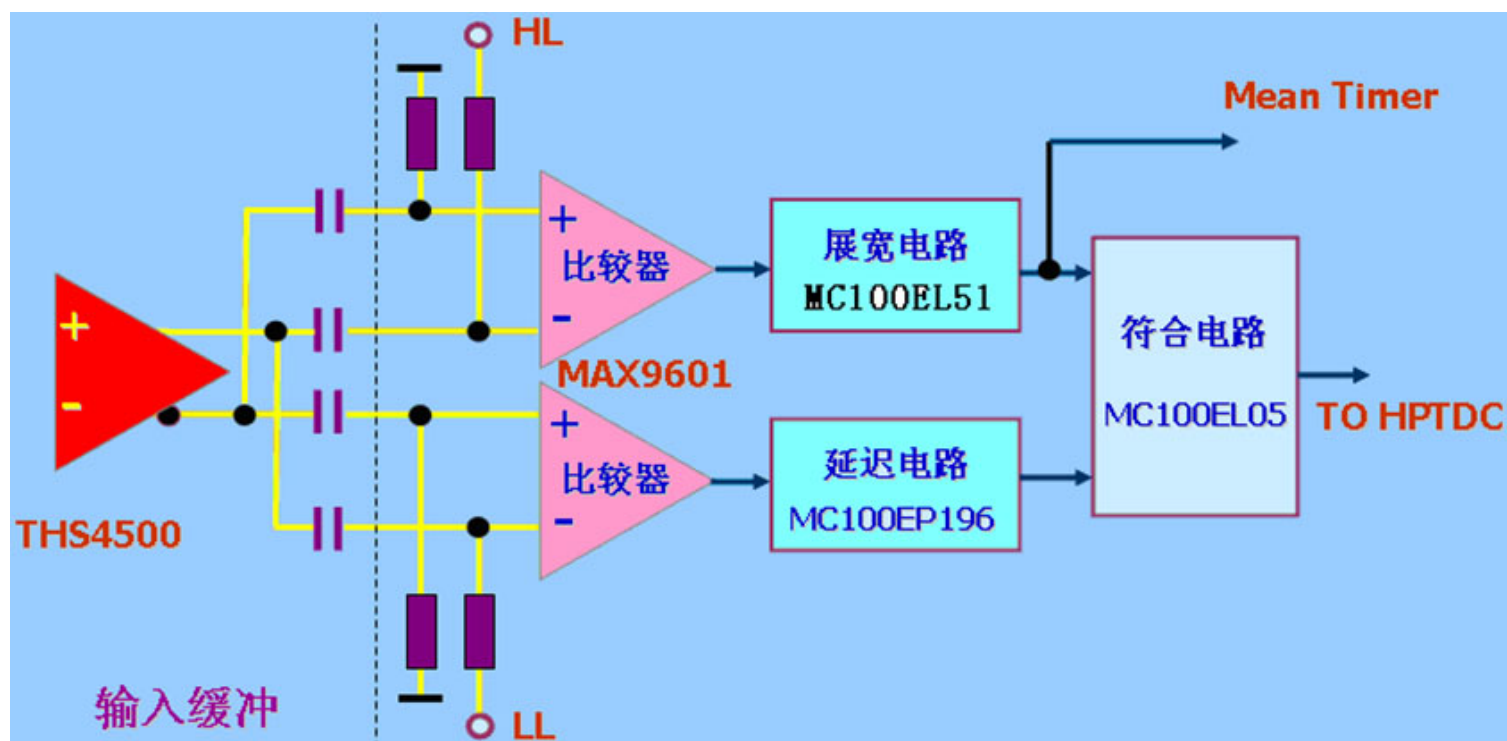
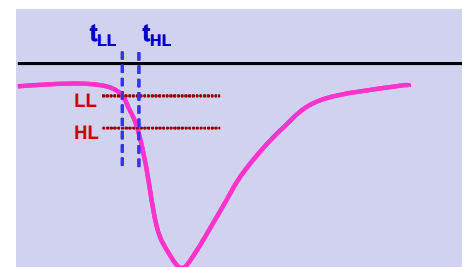
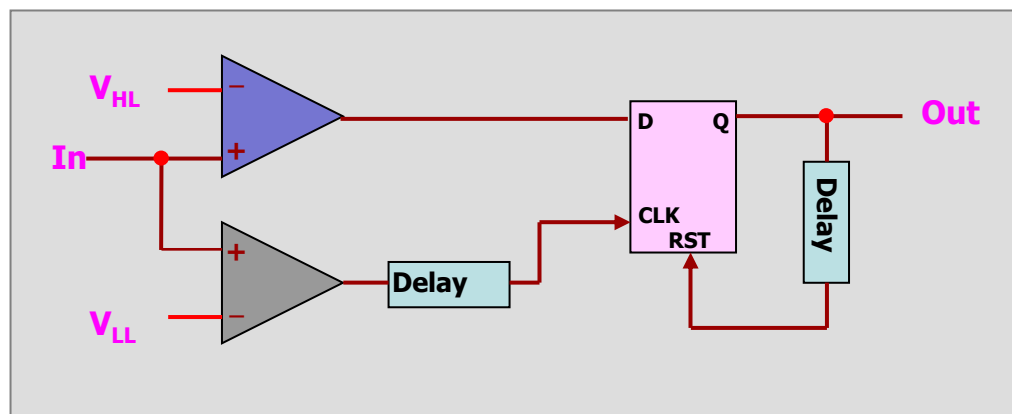
输入缓冲



THS4500:

- 差分放大器
- 电压负反馈，大信号带宽（220MHz）

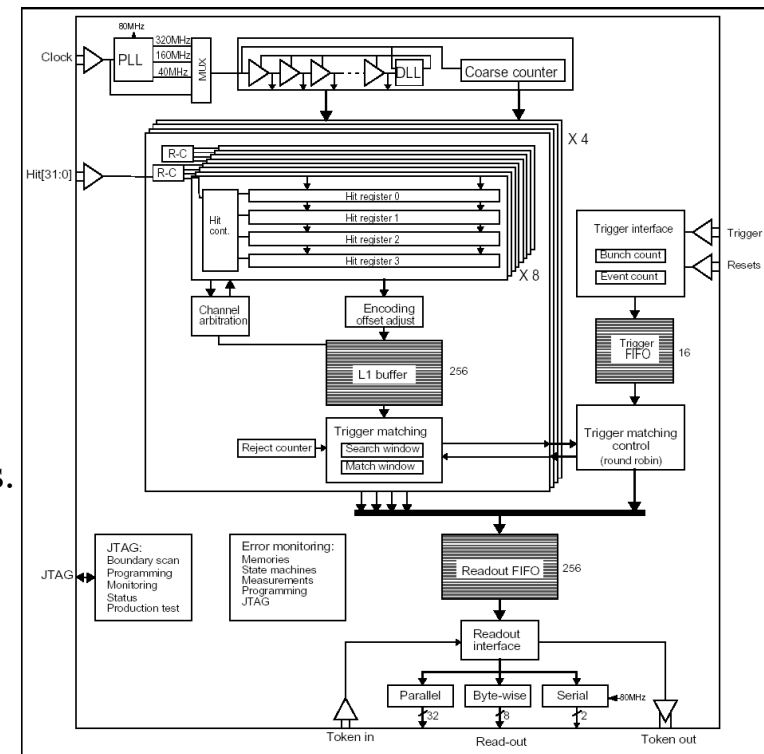
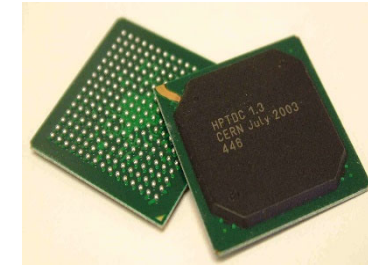
双阈甄别



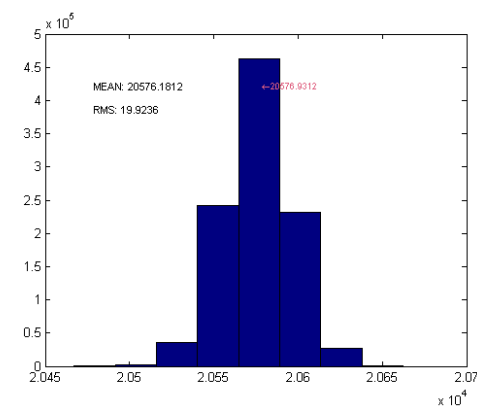
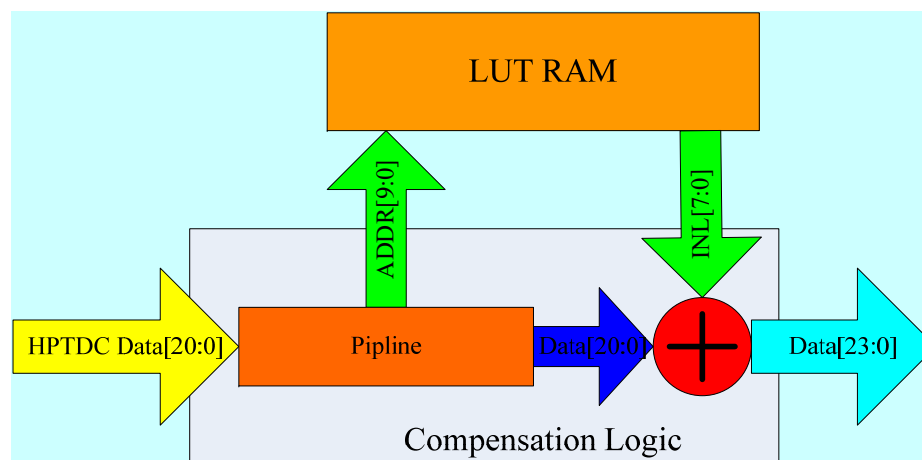
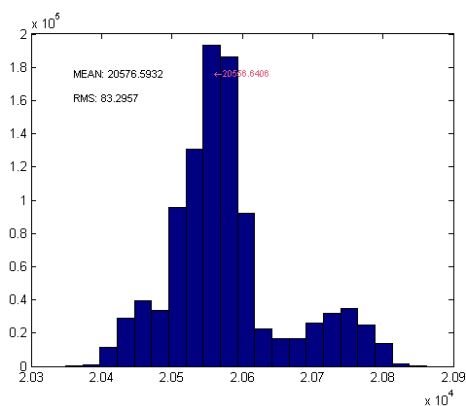
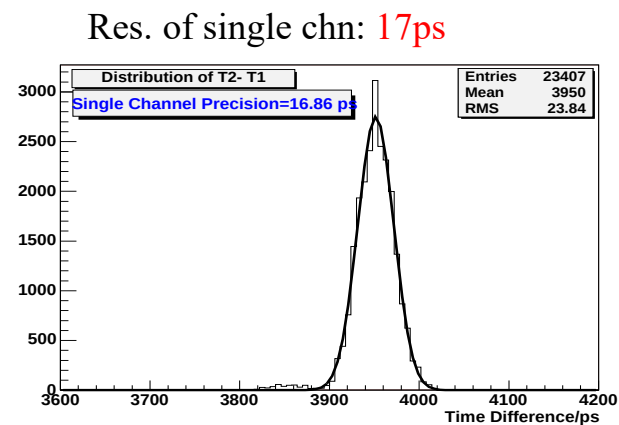
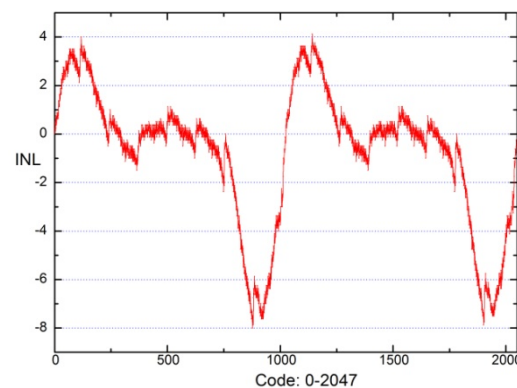
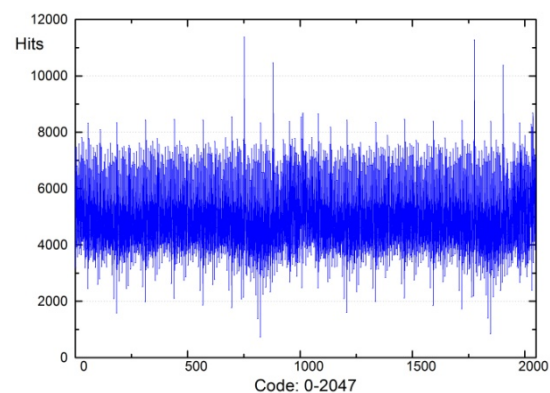
HPTDC芯片

- Number of channels: / 8
 - Clock frequency: 40 MHz external
40MHz / 80MHz / 160 MHz / 320 MHz internal
 - Resolution:

781 ps	(261ps RMS)	low resolution mode
195 ps	(64 ps RMS)	medium resolution mode
98 ps	(48 ps RMS)	high resolution mode
24 ps	(40 ps RMS)	very high resolution mode
	(8 channels)	
24 ps	(17 ps RMS Corrected)	
 - Dynamic range: 102 us
 - Double pulse resolution: 5 - 10 ns depending on mode
 - Hit rate: Core logic at 40 MHz, Not R-C mode
Max. 2 MHz per channel, all 32 channels used
Max. 4 MHz per channel, 16 channels used.
 - Event buffer size: 4 x 256
 - Read-out buffer size: 256
 - Trigger buffer size: 16
 - Power consumption: 300mW-1500 mW depending on modes.
 - Hit inputs: LVDS or LVTTL
 - L1 buffer problem has been (is) a painful experience
 - (too) many different users
-
- The block diagram illustrates the ATLAS L1 trigger system architecture. It shows a central processing unit receiving a 32-bit hit input (Hit[31:0]) from a Hit Input Register (R-C). This register is connected to a Hit Counter (Hi cont.) which outputs to a Channel Arbitration block. The Channel Arbitration block also receives input from a Reject counter. The Hit Counter is connected to a Hit Input Register (R-C) which is also connected to a Hit Input Register (R-C). The Hit Counter is connected to a Hit Input Register (R-C) which is also connected to a Hit Input Register (R-C). The Hit Counter is connected to a Hit Input Register (R-C) which is also connected to a Hit Input Register (R-C).



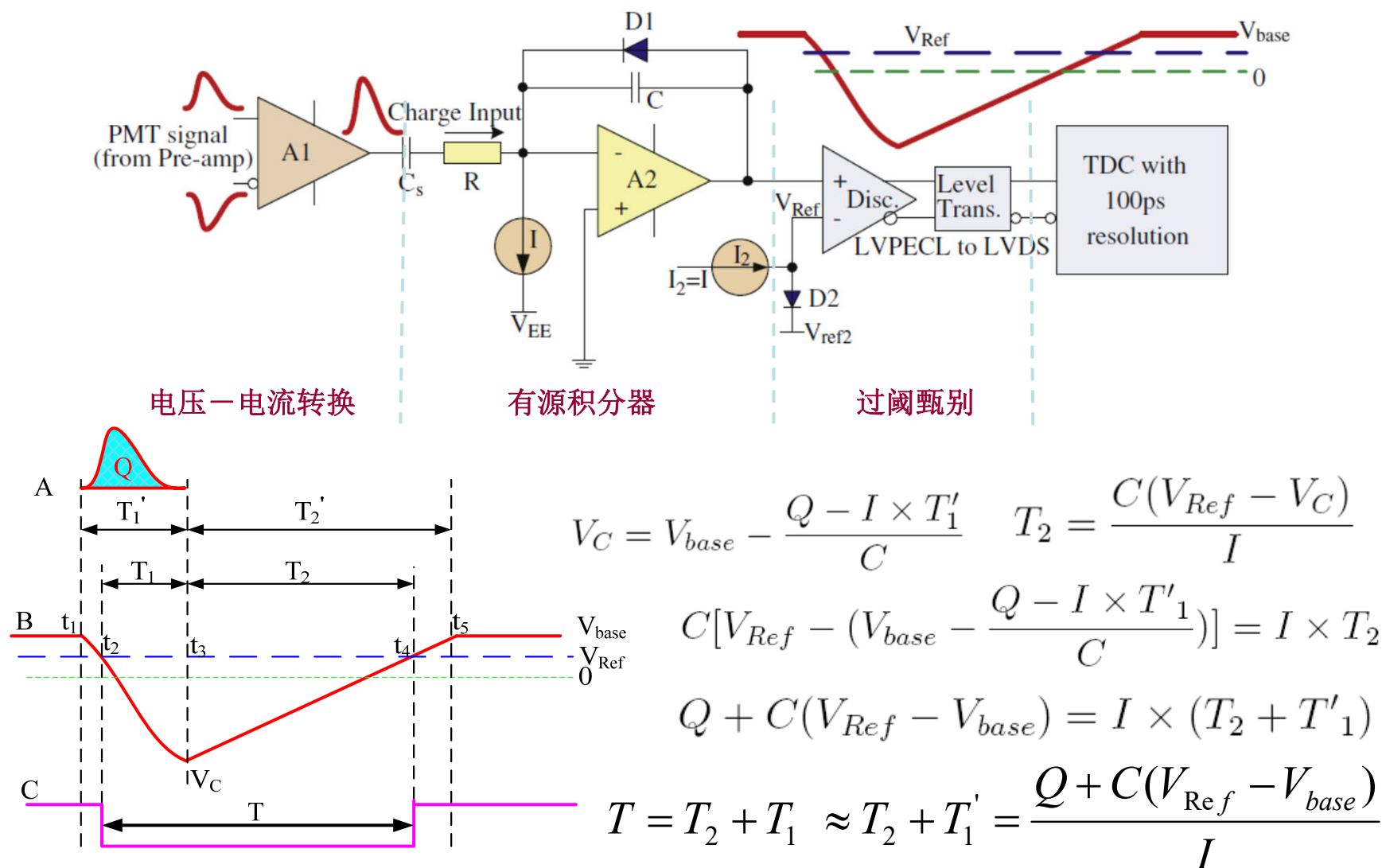
甚高精度下的微分非线性和积分非线性



Liu Shubin, Feng Changqing, Yan Han, etc. Nuclear Science and Techniques, 21 (2010) 49–53

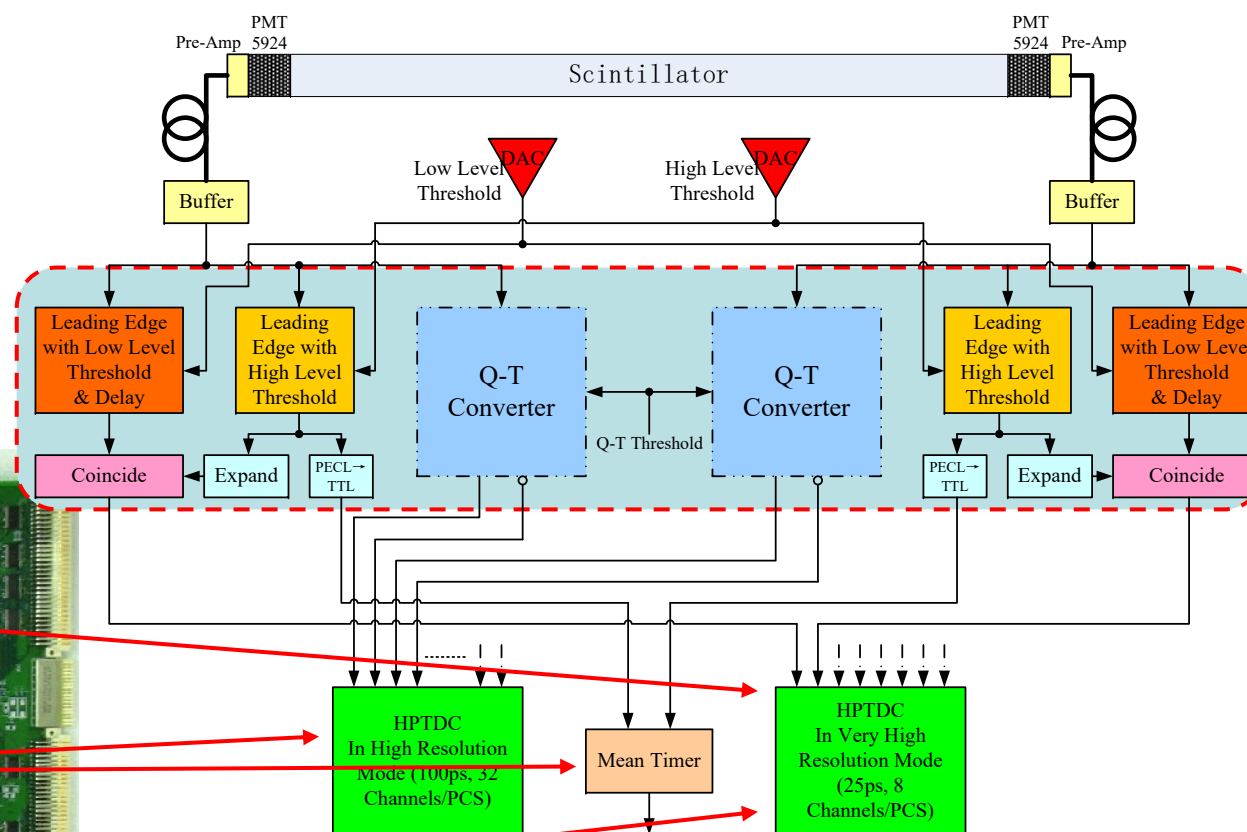
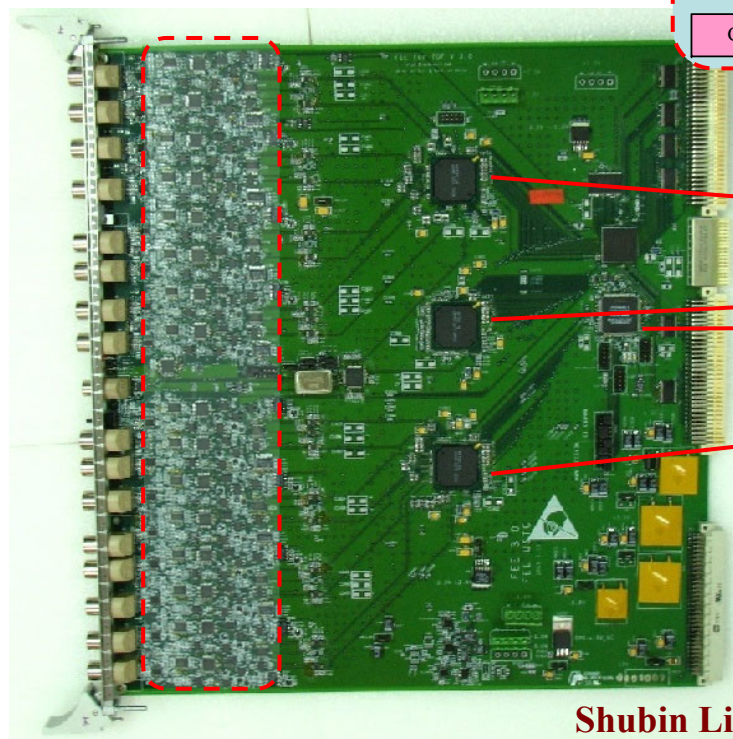
电荷测量 (QTC)

S.B. Liu, C.Q. Feng, L.F. Kang, etc. NIM A 621 (2010) 513–518



BESIII桶部TOF FEE

- VME 9U 插件
- 16通道/插件

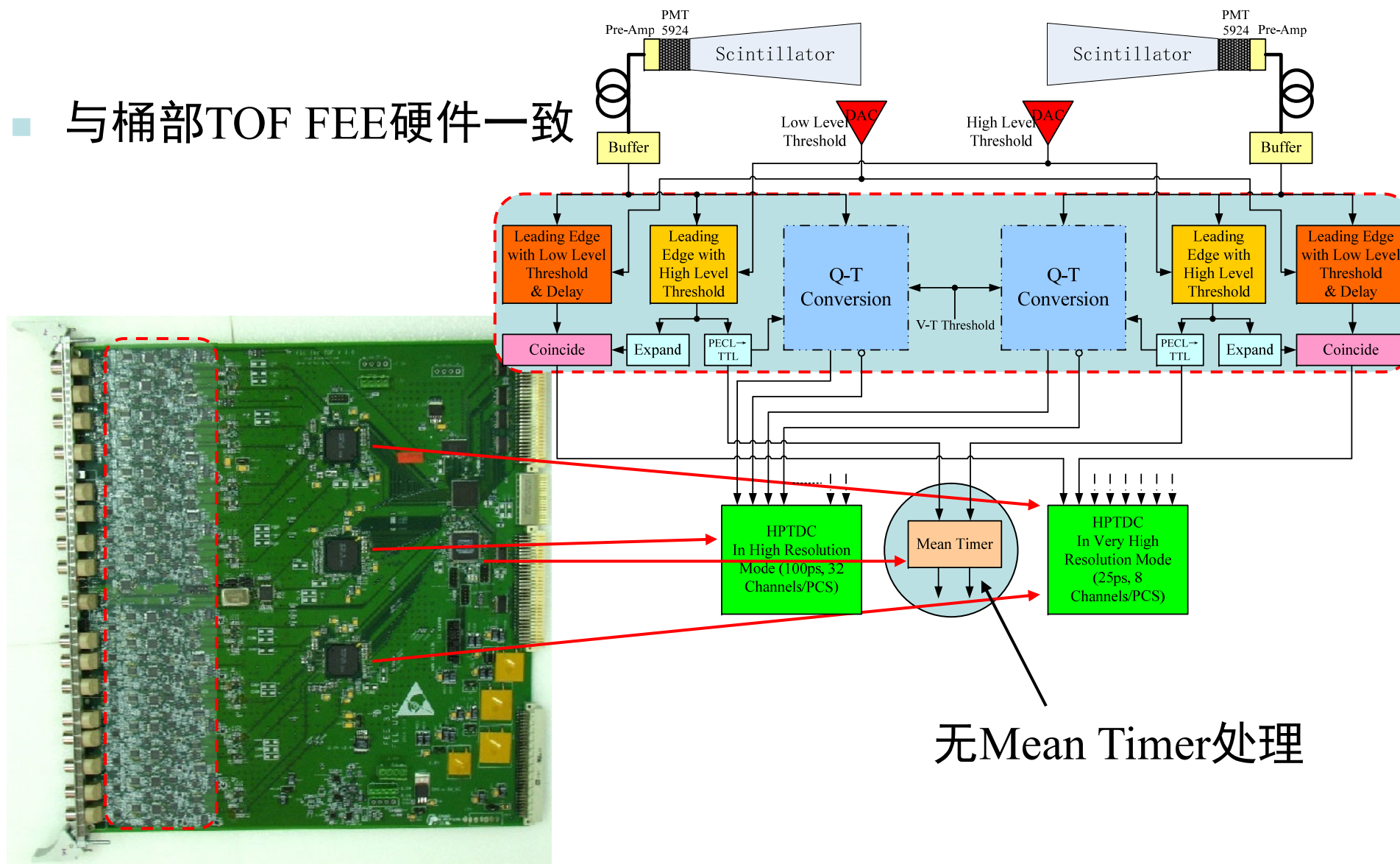


- 双阈甄别的前沿定时
- 2片HPTDC实现25 ps时间测量
- 1片HPTDC对非门控积分的QTC做电荷测量

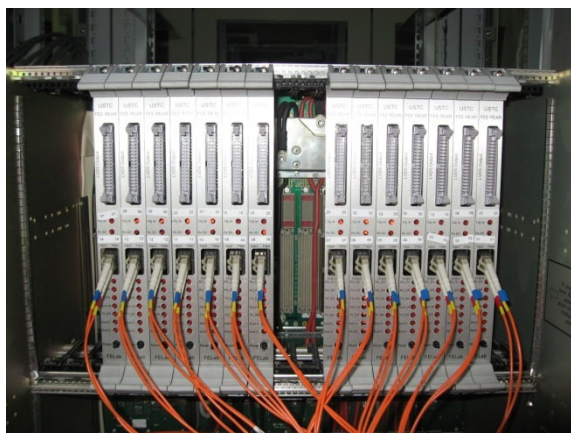
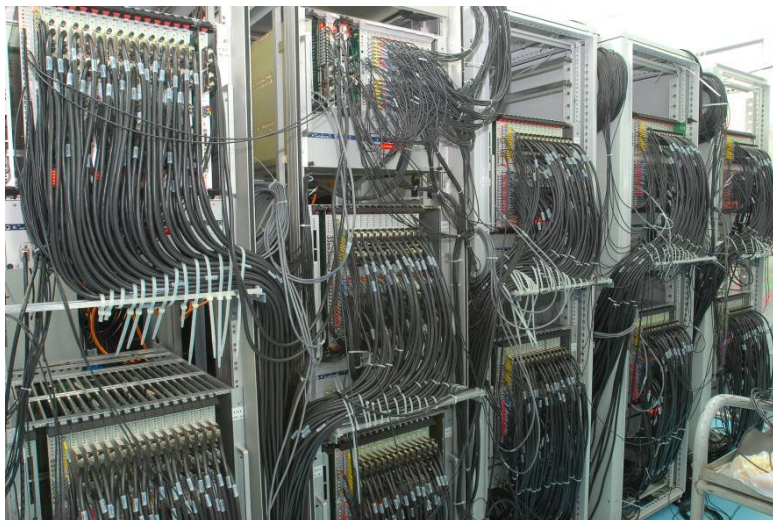
Shubin Liu, Changqing Feng, Qi An, etc. IEEE TNS, VOL.57, NO.2(2010), 419-427

BESIII端盖TOF FEE

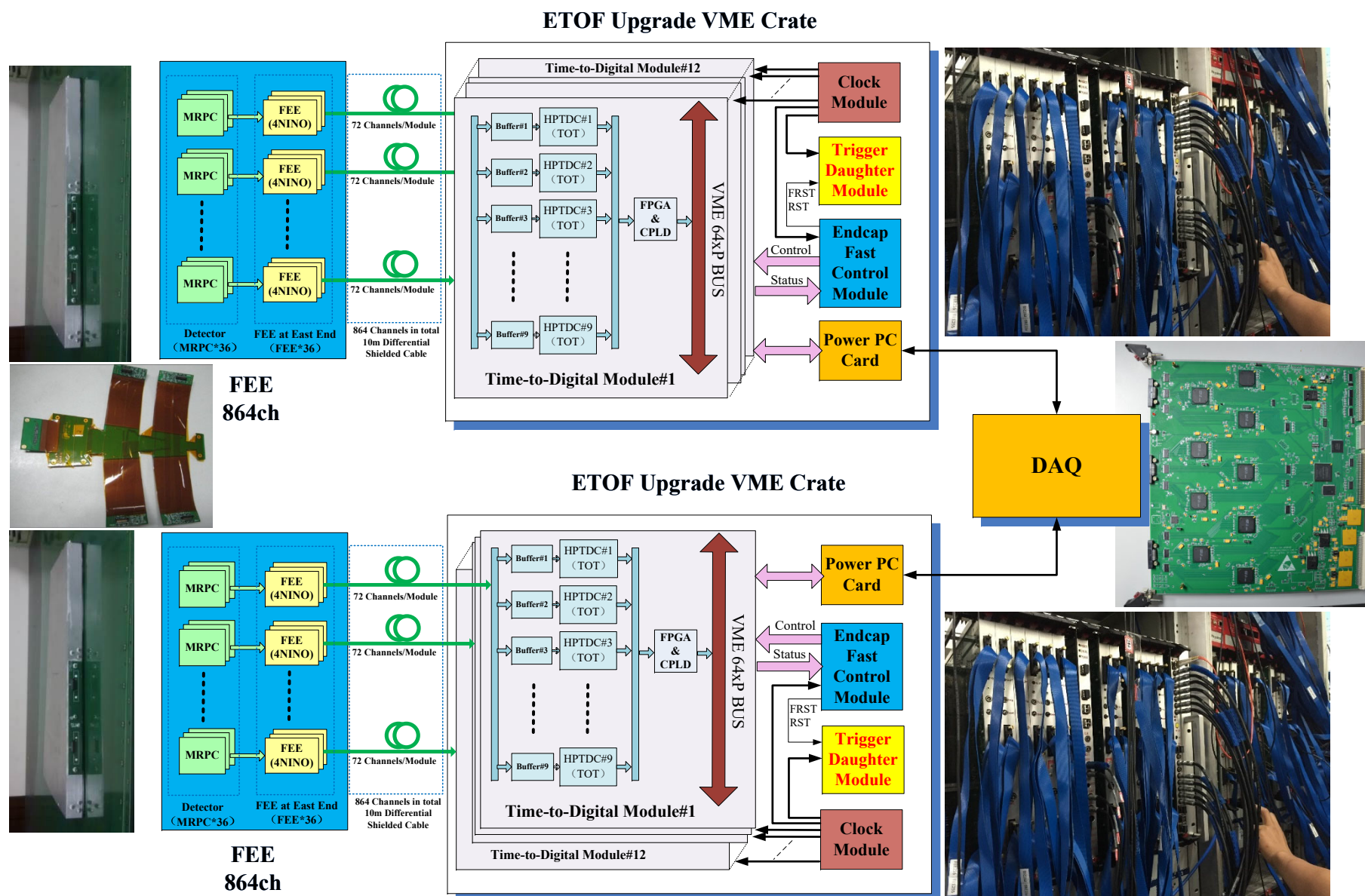
- 与桶部TOF FEE硬件一致



BES III 读出电子学系统



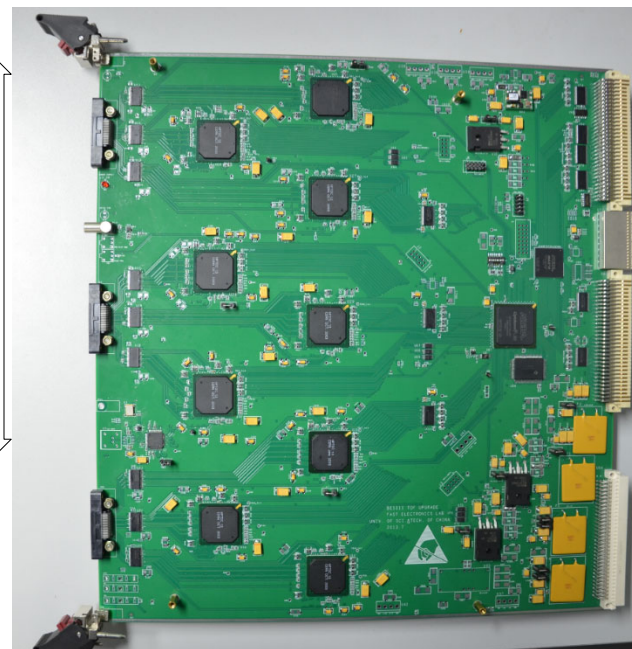
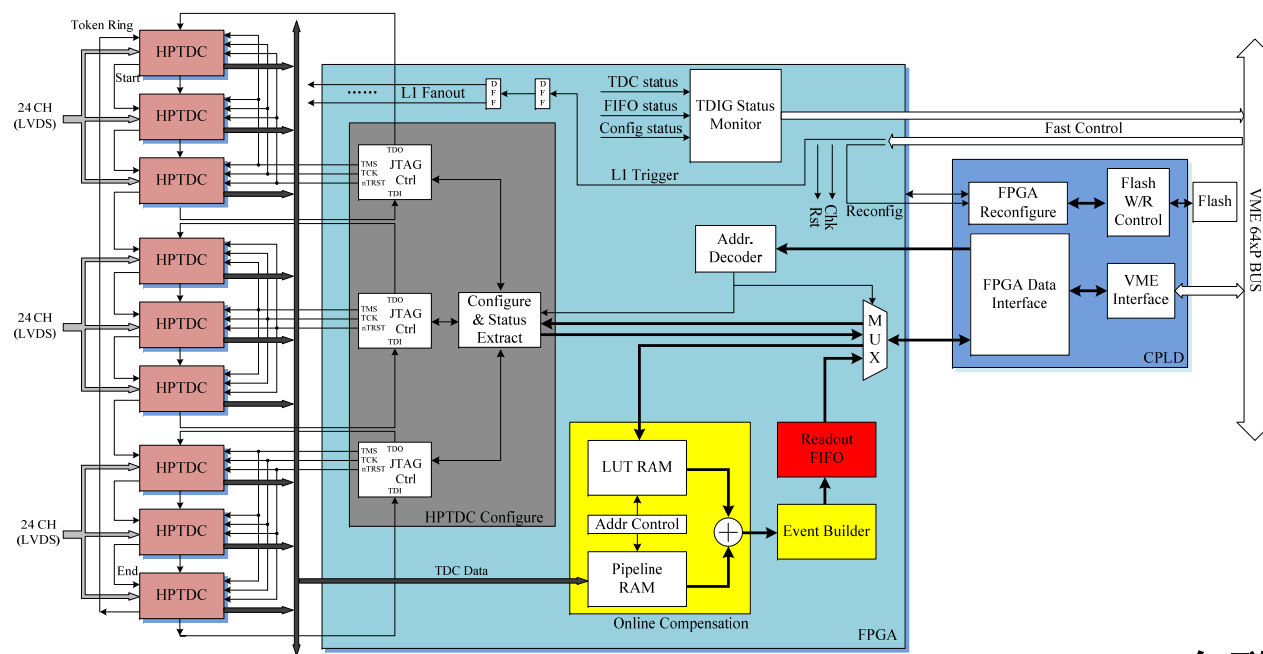
BES III ETOF升级读出电子学



时间数字化插件 (TDIG)

- 24块9U VME插件（TDIG）：
 - 每块接收72路每块接收来自FEE的72路LVDS信号（3个MRPC探测器）
 - 信号前、后沿进行高精度时间测量（TOT测量技术）
 - 支持对触发及快控制信号的处理
 - 通过VME总线以CBLT的方式将数据读出
 - 通过多次宇宙线试验、加速器束流实验
 - 2016年验收
- 测试结果表明：
电子学时间测量
好于设计指标25%**

测试结果表明：
电子学时间测量精度~20 ps
好于设计指标25 ps



2010-2013年联合重点基金(No.10970003)资助

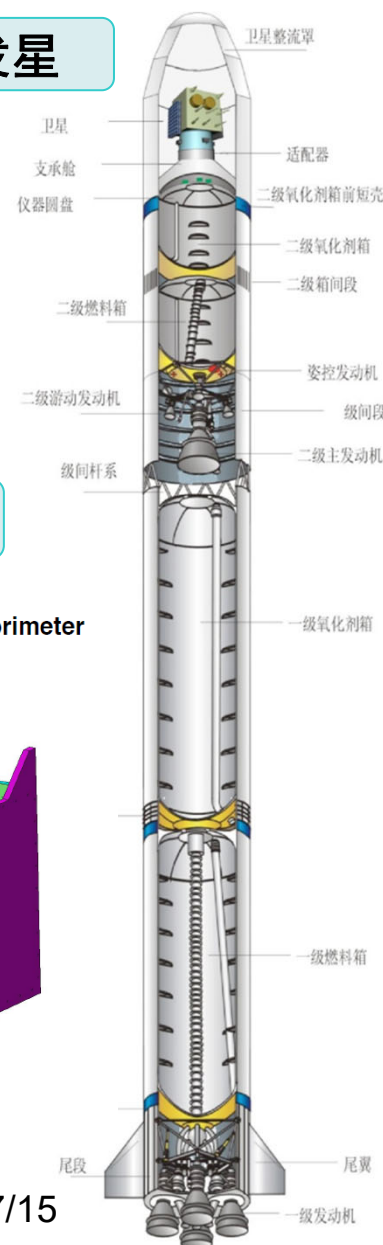
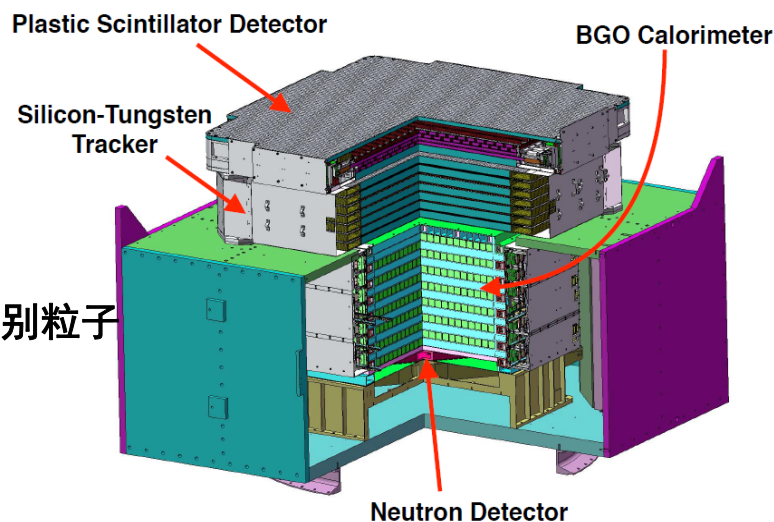
暗物质粒子探测卫星

DARk MATter PARticle EXplorer Satellite, 科学院空间战略先导专项首发星



- 塑闪探测器
 - 测量入射粒子电荷（质子——铁）
 - 中科院近代物理研究所负责
- 硅微条探测器
 - 测量入射粒子方向和电荷
 - 中科院高能物理研究所负责
- **BGO量能器**
 - **主载荷**，测量入射粒子能量、鉴别粒子
 - **中国科学技术大学负责**
- 中子探测器
 - 辅助鉴别质子
 - 中科院紫金山天文台负责

DAMPE科学载荷



2025/7/15

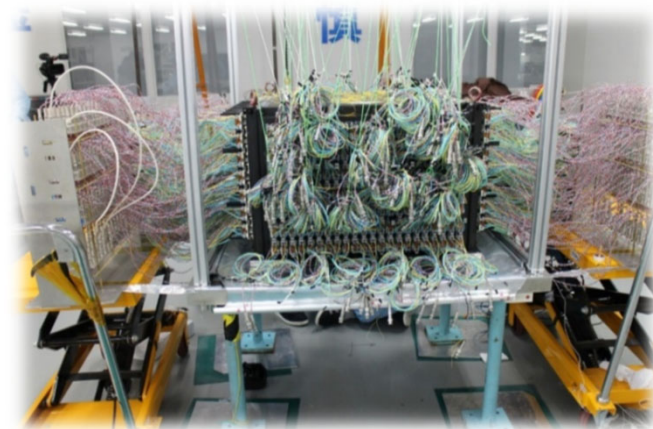
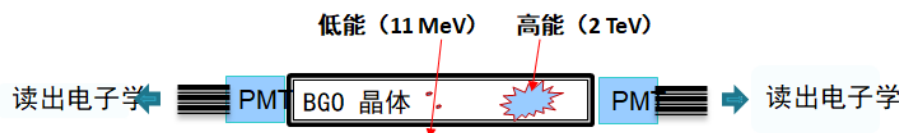
“悟空”的“火眼金睛”

暗物质粒子探测卫星的功能之核心、结构之中心、质量之“重心”

总重1.05吨（卫星总重1.85吨）

高精度测量 5 GeV – 10 TeV的电子和伽玛射线、鉴别粒子

- 14层组成（每层22根晶体）
 - 308根BGO晶体
- BGO晶体PMT双端读出
 - 616支光电倍增管
 - 3个dynode (2, 5, 8) 信号输出
 - 1848路信号电缆、16块读出电子学
 - 单个晶体测量：11.5 MeV-2 TeV
- 触发功能： 能量选择



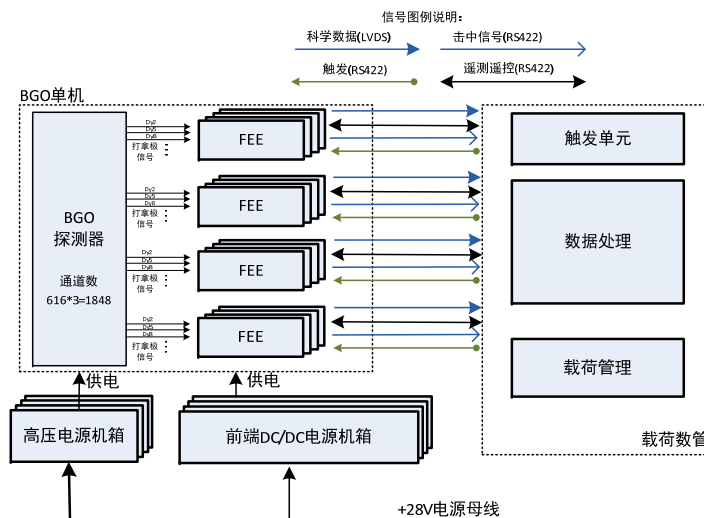
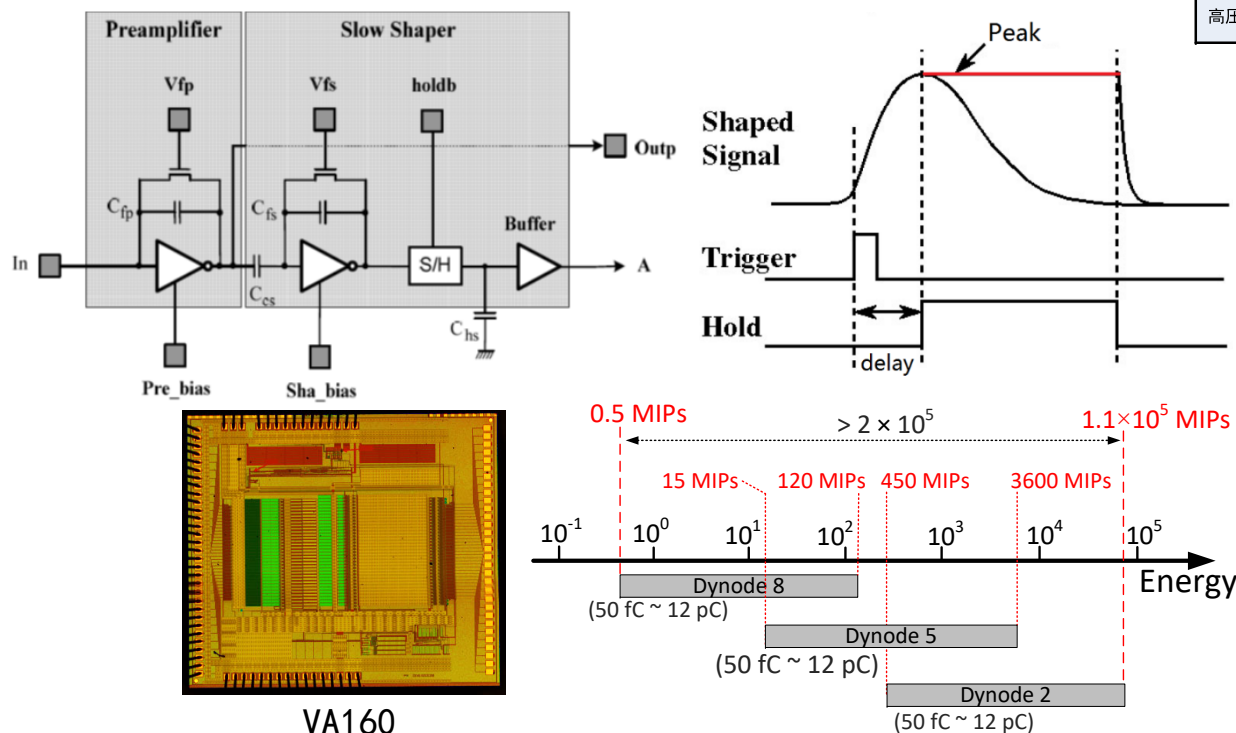
BGO量能器读出电子学

• 读出电子学设计需求

- 1848路探测器信号的高密度、高精度、低功耗读出
- 满足航天工程的**抗辐射、高可靠**要求

• 技术方案

- 技术路线：**低噪声、大动态范围电荷测量，定制ASIC**
- 配合探测器实现单根晶体20万倍大动态范围



BGO量能器读出电子学面临的挑战

- 高集成度
 - 探测器信号通道1848路
 - 读出电路及信号连接需集到探测器四周极为有限的空间内
 - 需克服不同打拿极之间的信号串扰
 - 尤其是第8到第2打拿极（信号幅度相差~1000倍）
- 低功耗
 - 单机总功耗设计指标： $< 62\text{ W}$
 - 包括探测器及读出电子学
- 空间环境中的高可靠性
 - 任务周期 > 3 年
 - 对空间辐射环境有良好的耐受能力
 - 太空环境中良好的热控设计
 - 避免材料放气所导致的高压电路低气压放电

高集成度、低功耗目标的实现

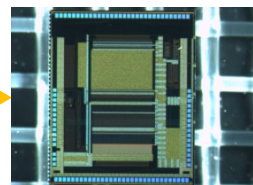
- 采用多通道、低功耗电荷测量ASIC芯片
 - 由挪威IDEAS公司根据DAMPE探测器PMT信号特点定制
 - 型号：VA160（电荷测量）、VATA160（电荷测量+触发输出）
 - 单芯片功耗小于200 mW
 - 通道数32路
- PMT 不同打拿极（2、5、8）信号分别接到不同ASIC芯片以减小串扰
- 采用高性能双绞屏蔽电缆及高密度接插件
 - 在降低串扰的同时保证高集成度及工艺上的可实施性
 - 所选电缆和接插件具有良好的力学性能和放气指标

VA160、 VATA160 ASIC

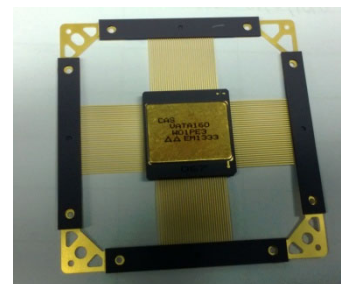
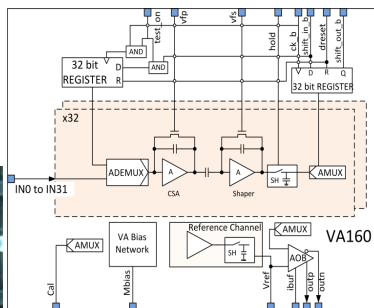


来自挪威的VA160裸硅片

挪威IDEAS提供裸硅片，
772所负责封装，空间中心完成质保筛选



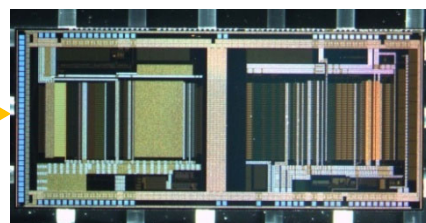
772所显微照片



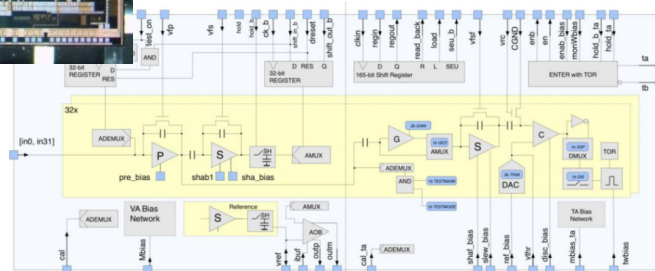
封装完成



来自挪威的VATA160 裸硅片

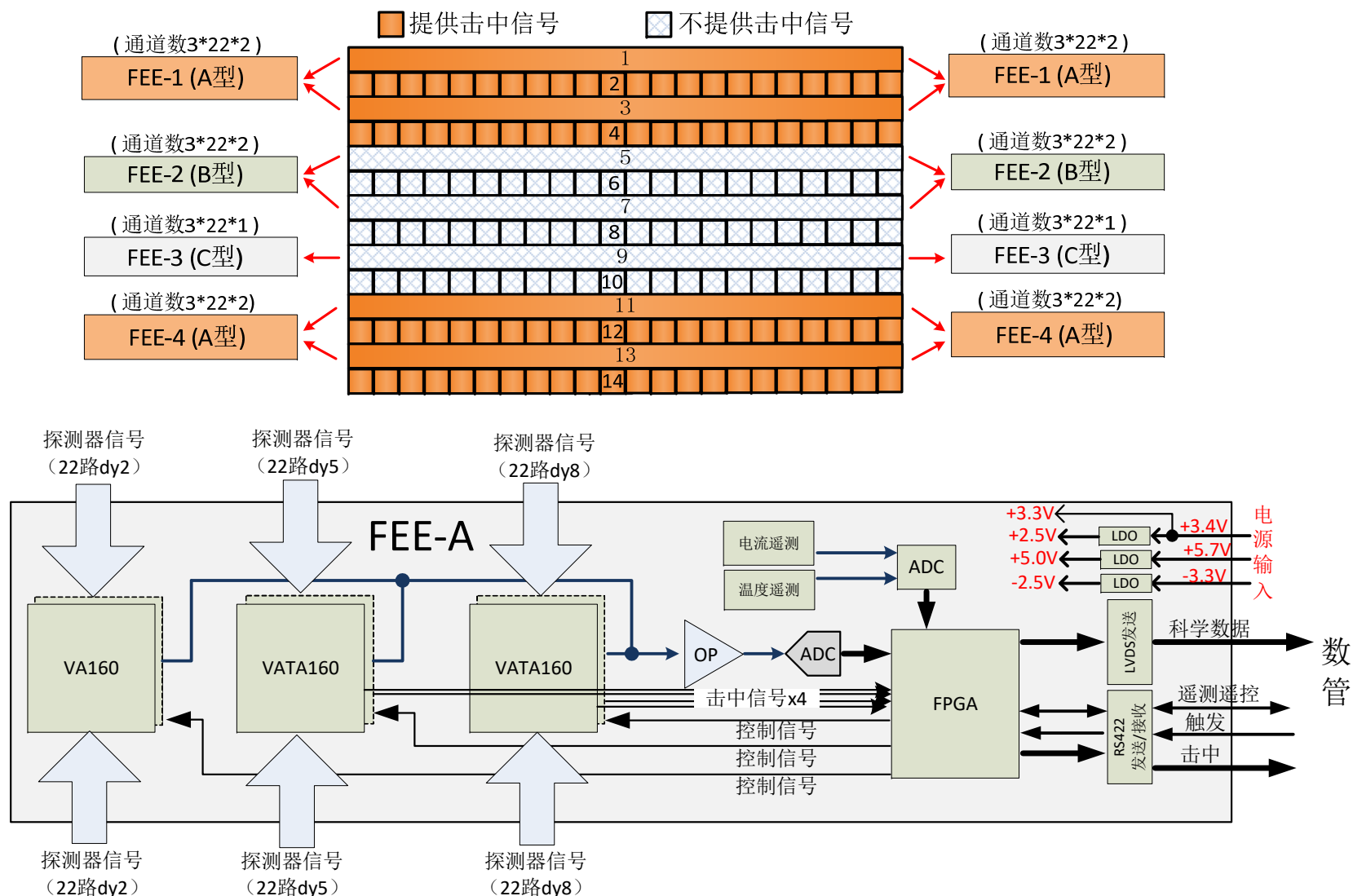


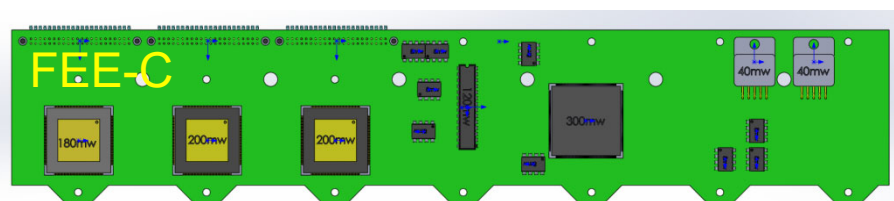
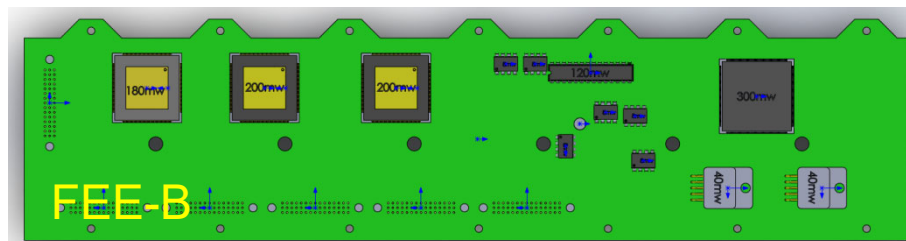
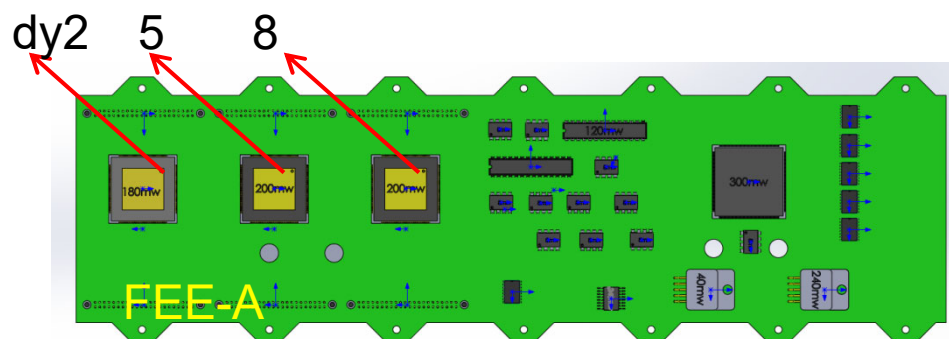
772所显微照片



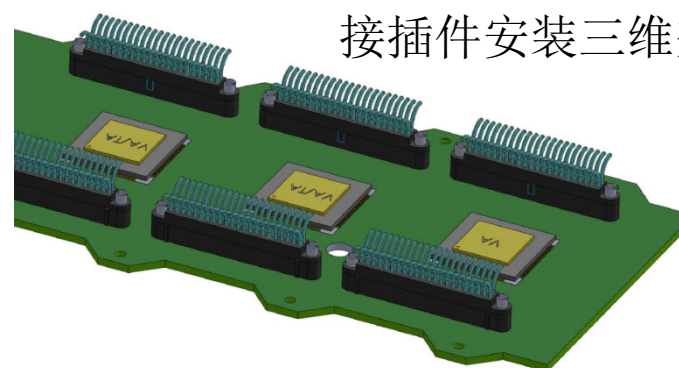
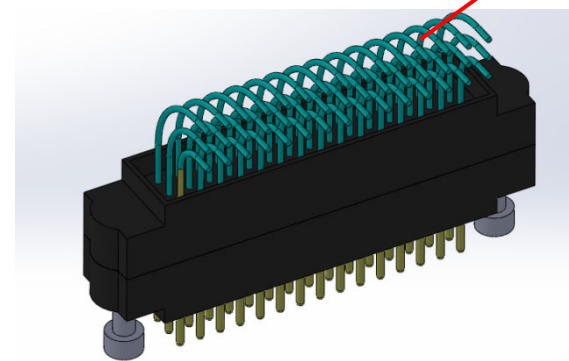
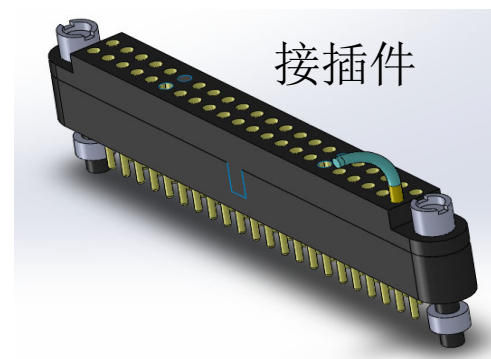
BGO FEE

BGO量能器读出电子学设计

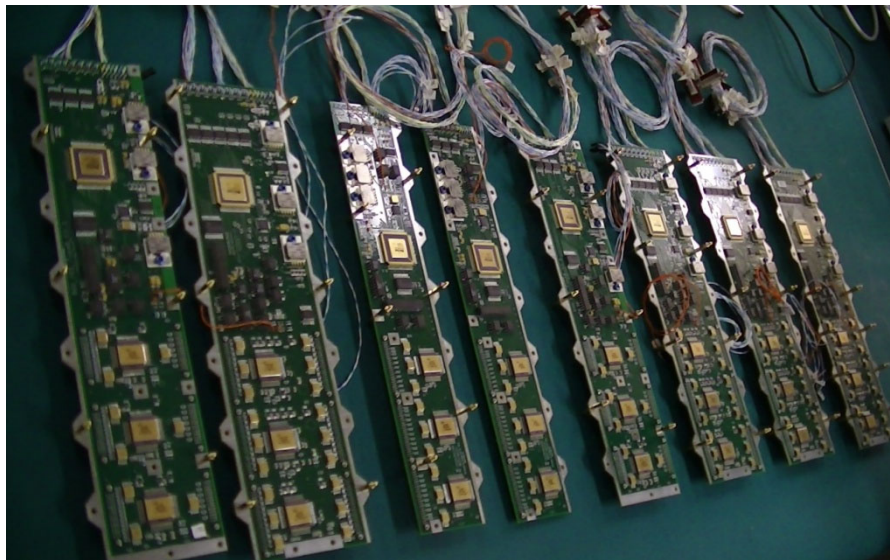
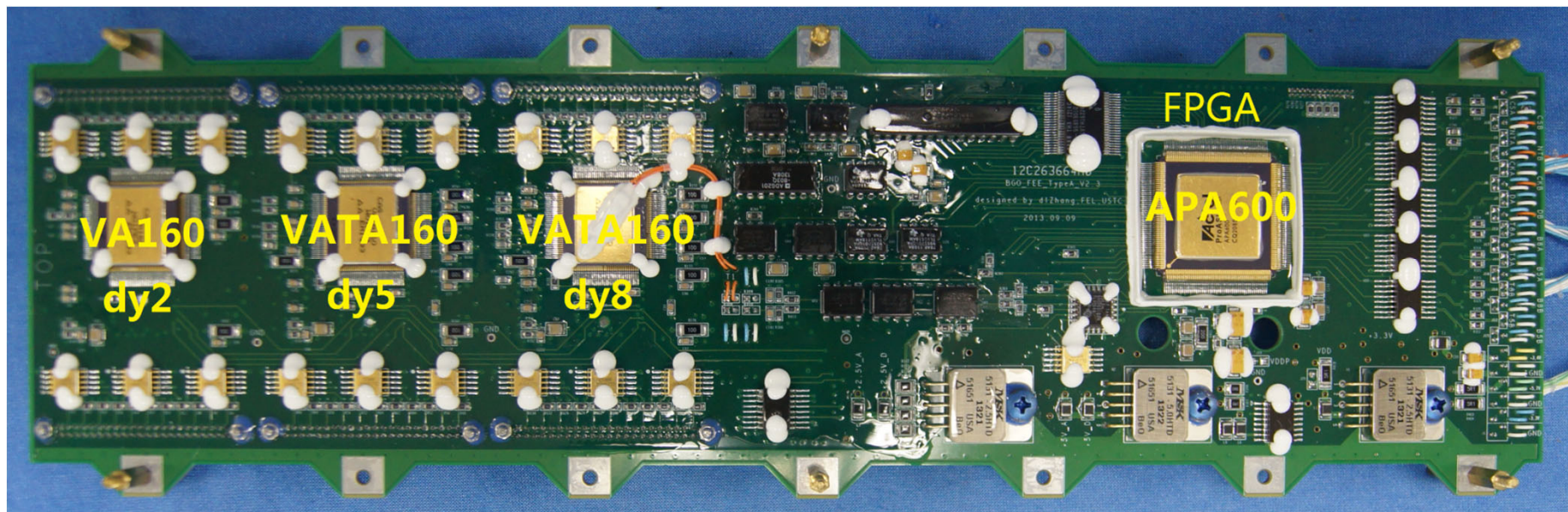




三种读出电子学板（FEE）的Solidworks模型



接插件安装三维效果图



Changqing Feng, et. al., Design of the Readout Electronics for the BGO Calorimeter of DAMPE Mission, IEEE Trans. Nucl. Sci., December, 2015

高可靠设计目标的实现

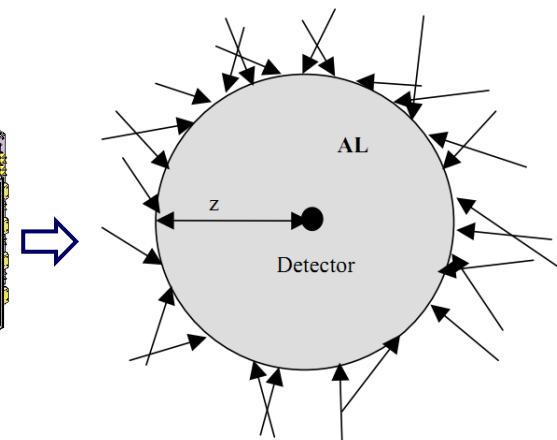
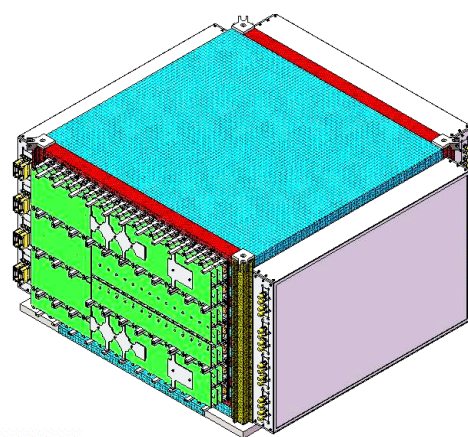
- 元器件选型
 - 尽可能采用已有成功飞行经验的器件
 - 个别未经验证的首飞器件需进行批次性考核或专项试验验证
- 可靠性设计
 - 防静电设计
 - 信号输入端设计钳位保护电路
 - 也可预防探测器放电对电子学的潜在损伤
 - 元器件使用降额（电压、电流/功耗、温度、工作频率）
 - 裕度设计及适当的冗余设计
 - EMC（电磁兼容）设计
- 抗辐射设计
 - 元器件抗辐射特性评估、辐射加固设计及实验验证
- 合理的热设计

空间环境主要辐射效应及危害

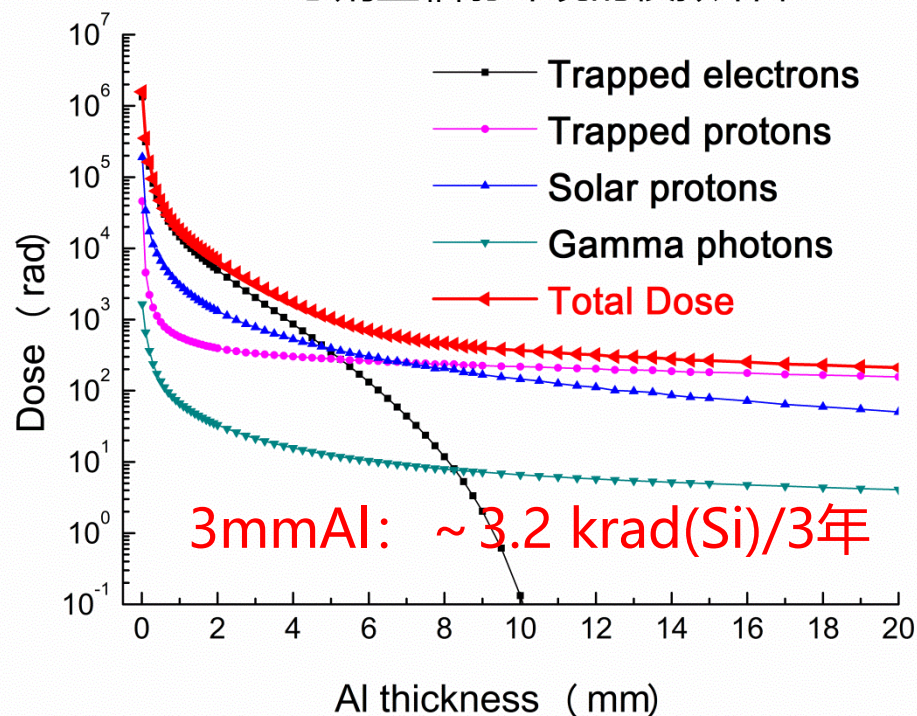
- 总剂量效应(TID)
 - 累积剂量引起器件参数的逐渐劣化甚至失效
- 单粒子效应(SEE)
 - 单个高能粒子入射到半导体器件内，导致器件工作异常的辐射效应。
 - 单粒子翻转效应 (SEU)
 - 寄存器单元，存储器单元发生位翻转 → 逻辑错误，功能出错
 - 单粒子门锁效应 (SEL)
 - 大电流 → 限流、及时断开电源，避免烧毁器件

DAMPE卫星轨道辐射环境的模拟计算

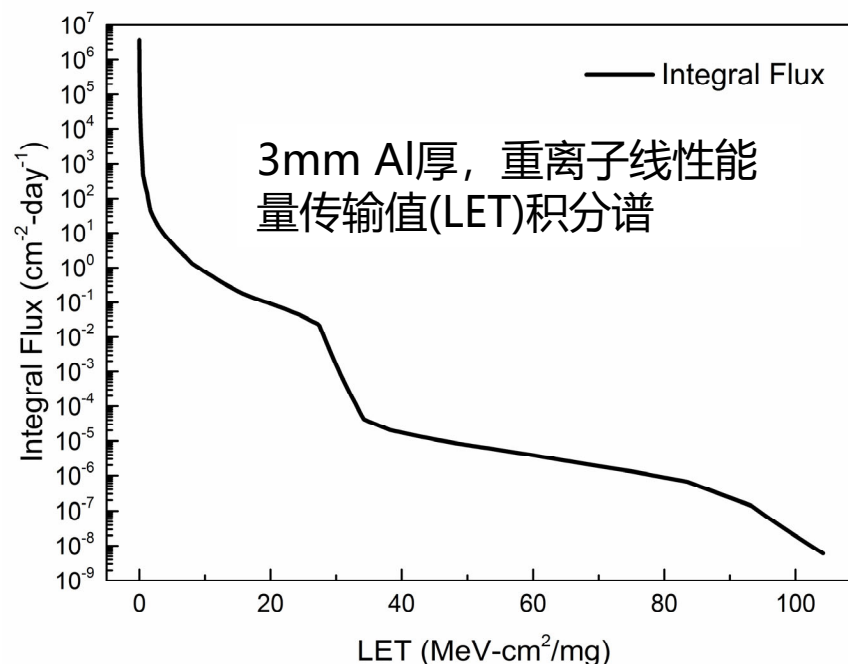
- 轨道参数：高500公里、倾角 97°
- 设计寿命：3年以上



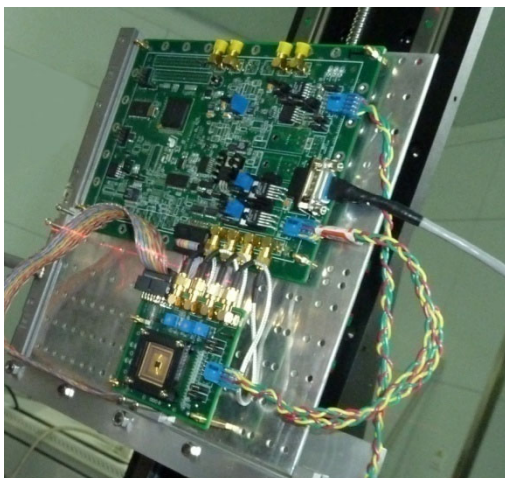
总剂量辐射环境的模拟结果



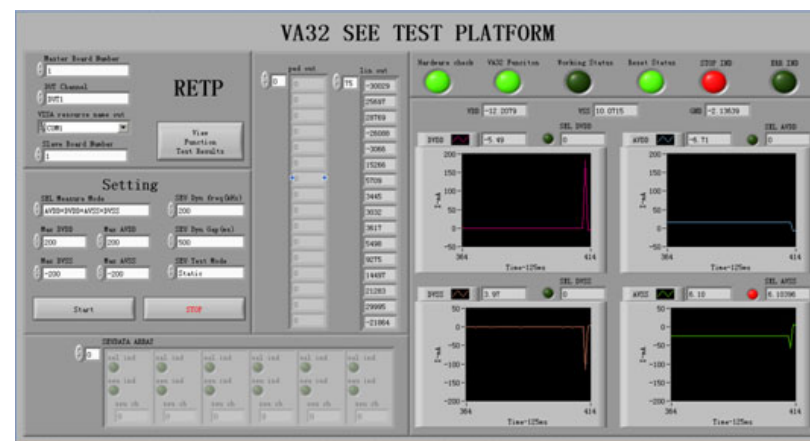
单粒子辐射环境的模拟结果



总剂量辐照实验



辐照测试接口电路



辐照测试监测软件

中国计量院的 ^{60}Co 辐照间



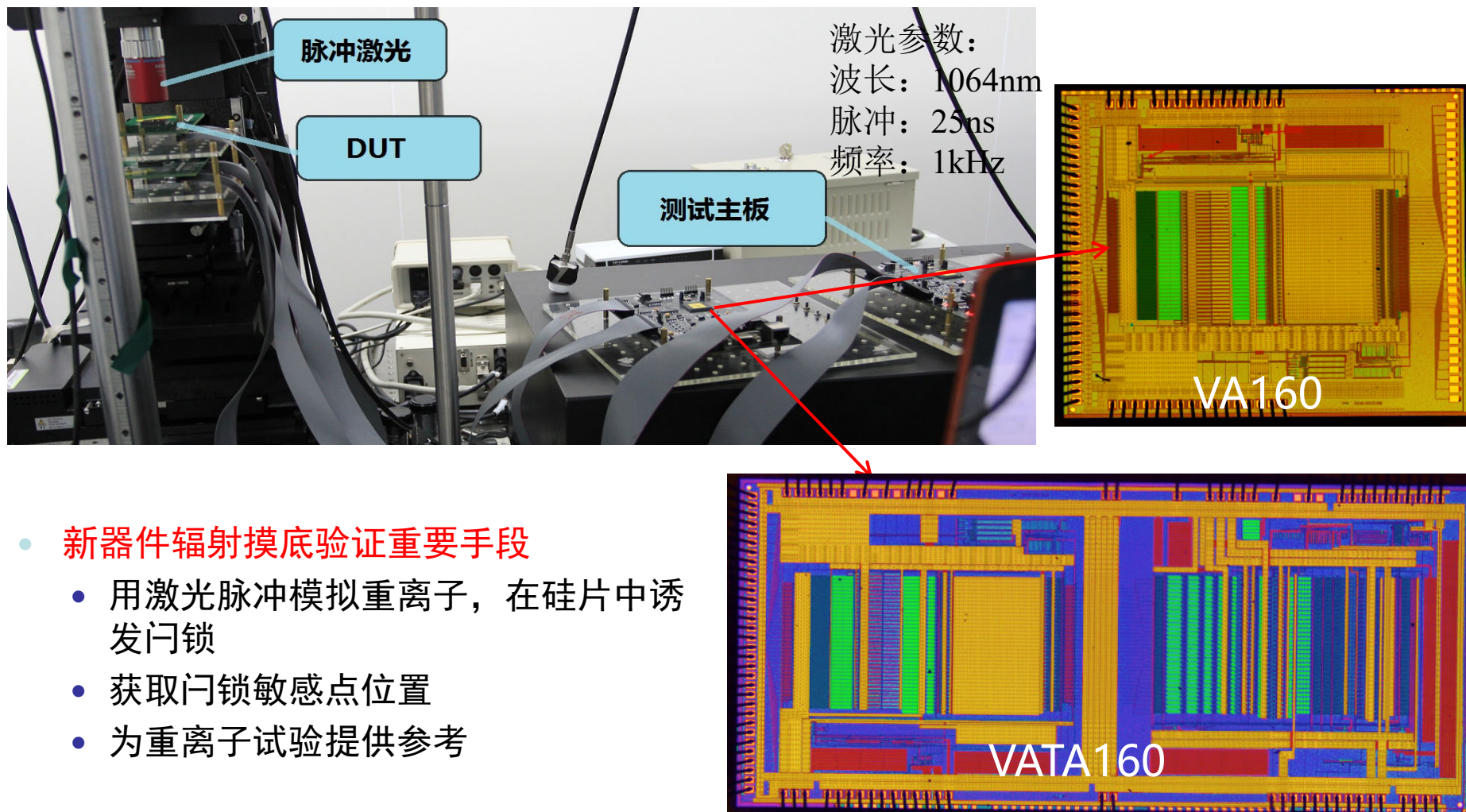
中科大的 ^{60}Co 辐照间



测试结果: >20 Krad, 达到设计指标

激光模拟单粒子效应评估

- 在中科院空间中心开展多次激光单粒子效应实验



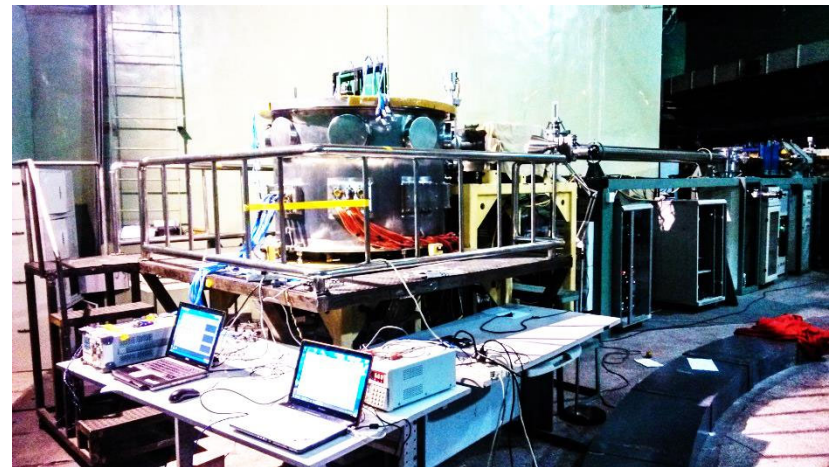
- 新器件辐射摸底验证重要手段
 - 用激光脉冲模拟重离子，在硅片中诱发闩锁
 - 获取闩锁敏感点位置
 - 为重离子试验提供参考

重离子加速器束流试验

- ASIC、FPGA器件的单粒子门锁性能评估

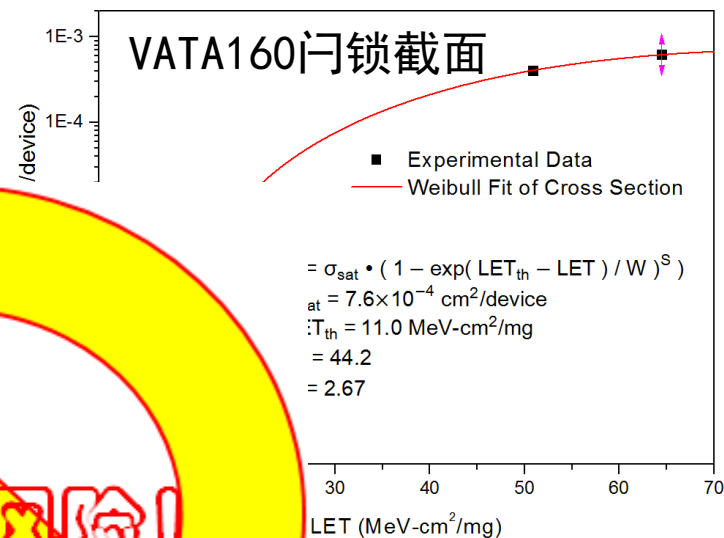
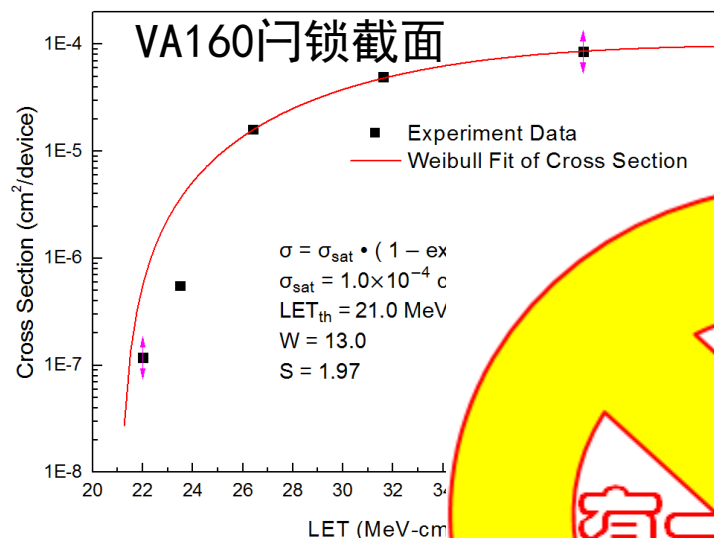


兰州重离子加速器 (HIRFL) -TR5



北京串列加速器 (HI-13)

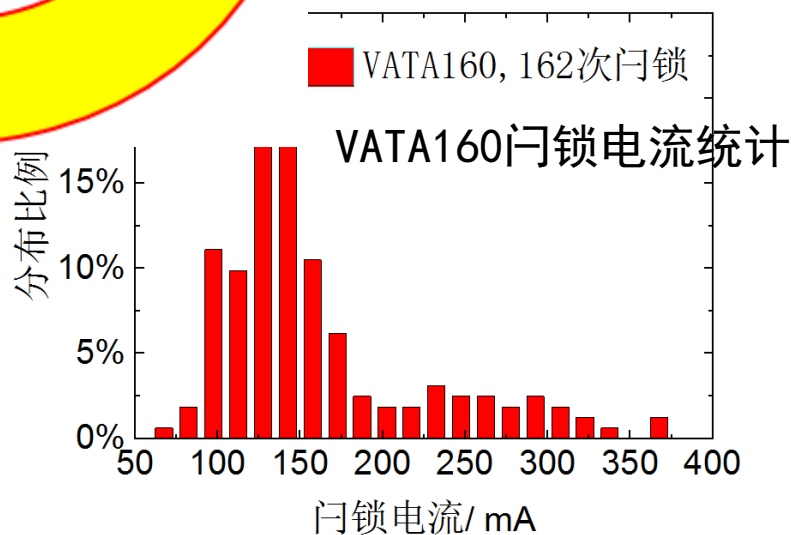
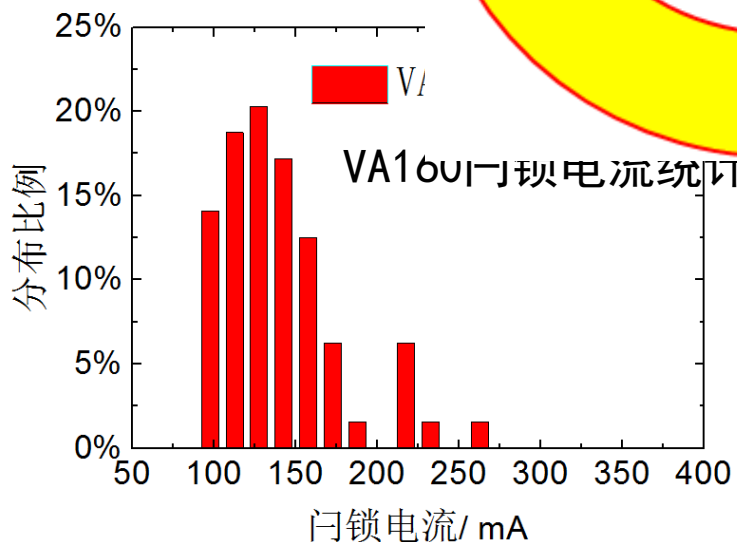
单粒子门锁 (SEL) 性能测试结果



有一定风险!

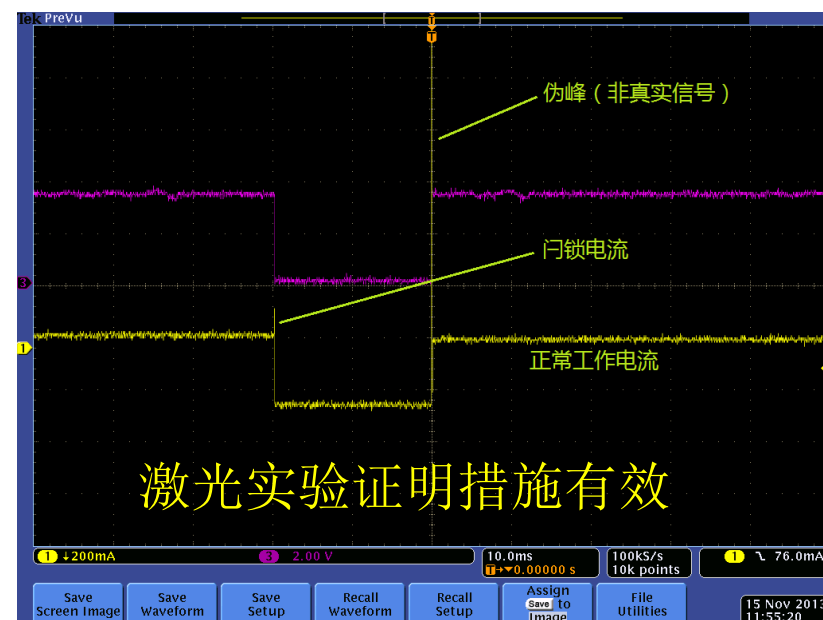
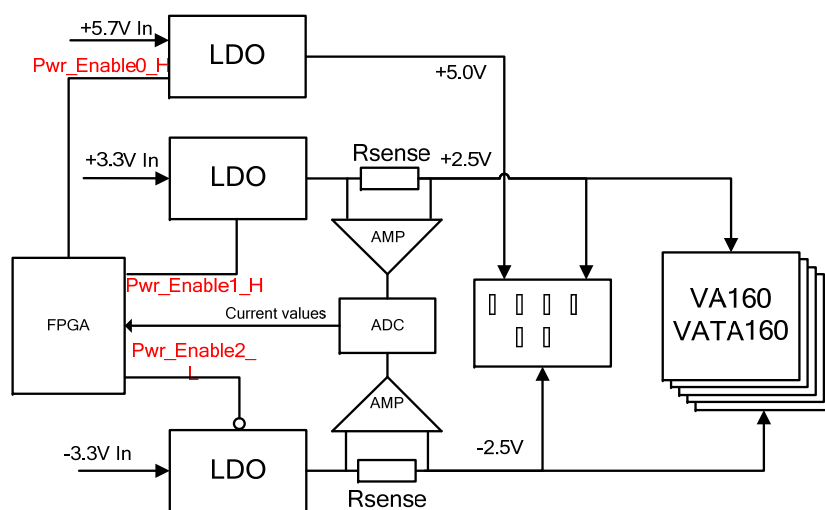
SEL几率 $7.5 \times 10^{-5}/\text{dev}$
3年全部VA160累计SE

$10^{-4}/\text{device/day}$
60累计SEL次数约4~5



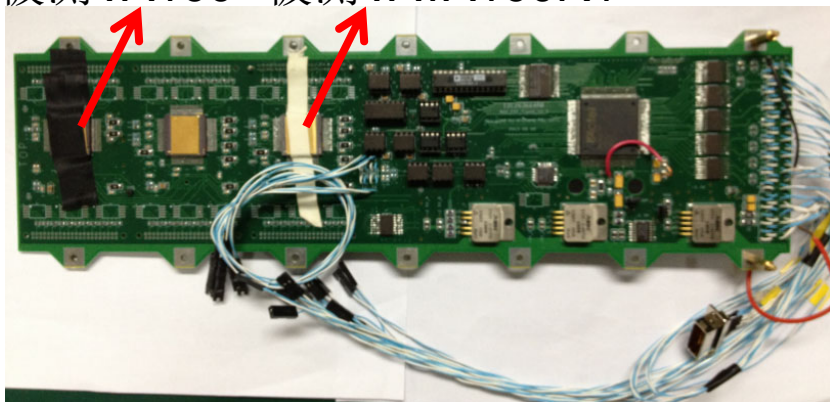
ASIC器件SEL设计加固措施及验证

- 在轨周期性检测ASIC工作电流
- 发现SEL，立即由FPGA控制局部自动断电

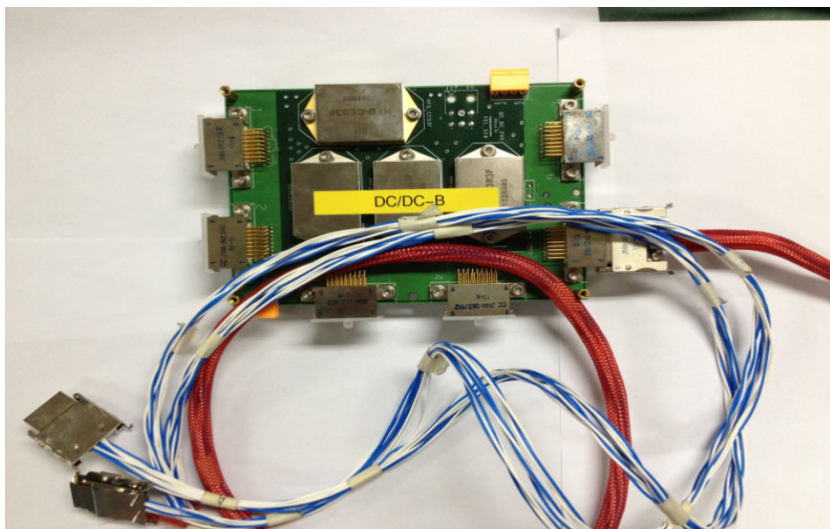


SEL保护措施的激光实验验证

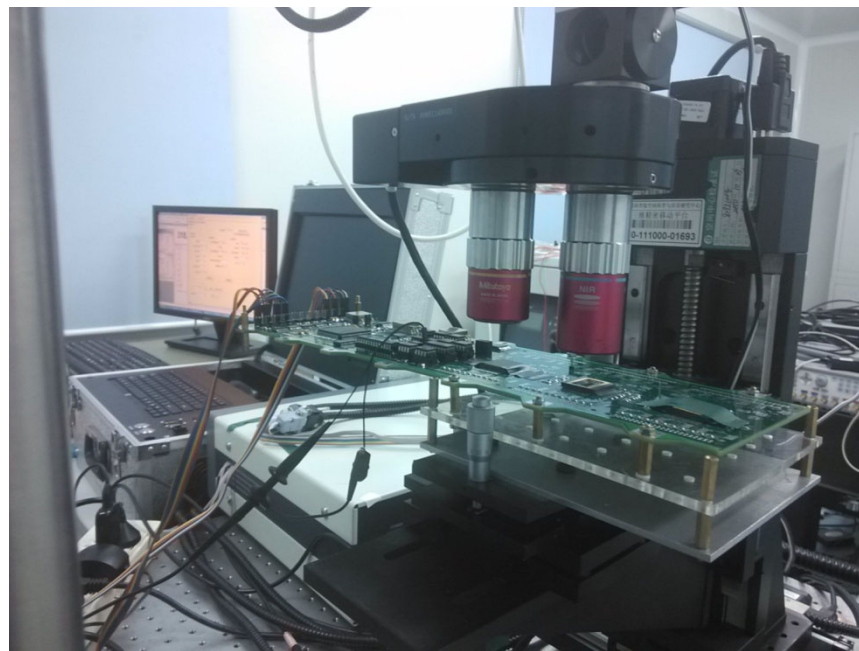
被测VA160 被测VATA160R1



被测FEE-A电路模块（鉴定件版本）



实验中的DC-DC电源模块及2米供电线缆
(线缆的线规、长度与装星状态一致)



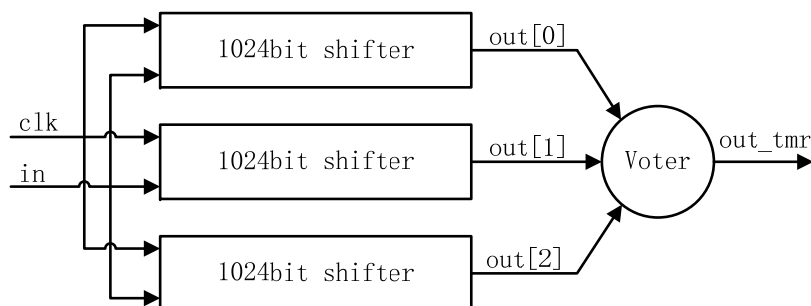
激光实验现场

摸底试验：2013年10月14日

正式试验：2013年11月15日

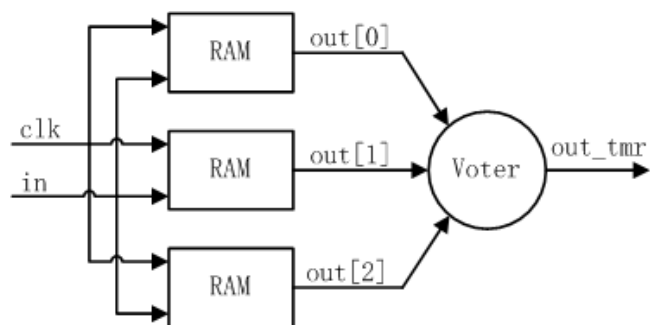
地点：空间中心空间环境特殊效应实验室

FPGA单粒子翻转加固措施及重离子实验验证



	1→0	0→1	总SEU
out[0]	142	129	271
out[1]	137	127	264
out[2]	118	126	244
out_tmr	1	0	1

寄存器 TMR加固效果 **779: 1**



RAM名称	数量	Block RAM数量	SEU
256×8 RAM	4	4	823
TMR 256×8RAM	2	6	14
512×8 RAM	2	4	804
TMR 512×8RAM	1	3	9

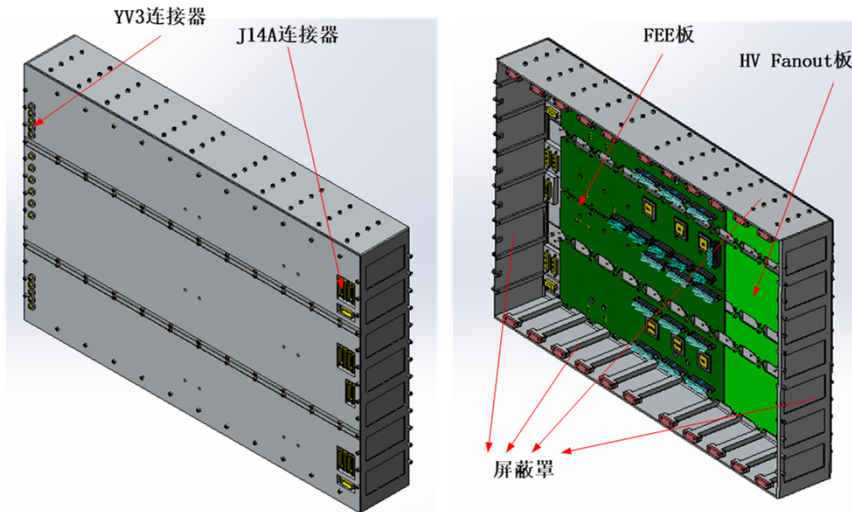
RAM TMR加固效果 **1830: 23**

重离子束流试验结果表明：加固措施效果显著！

热设计的必要性

- 温度过高，可导致电子元器件的可靠性下降、性能的漂移、甚至影响其正常功能
- BGO探测器（晶体、PMT）对温度敏感
 - 总温度系数约-1%/°C
- 卫星载荷设备在太空环境中散热困难
 - 无空气对流，辐射换热效果极为有限，主要依赖直接的热传导

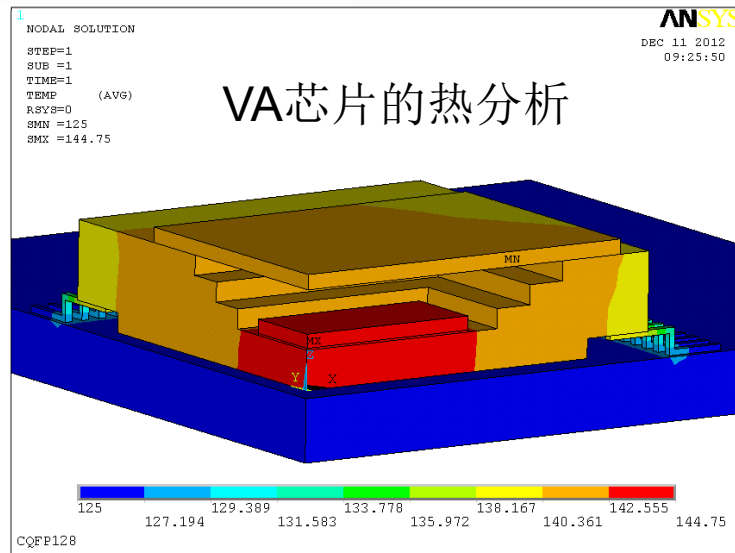
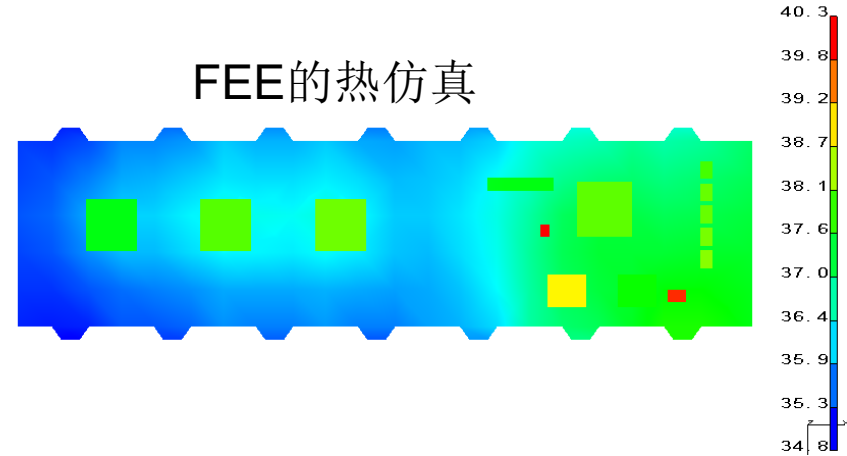
热设计及仿真



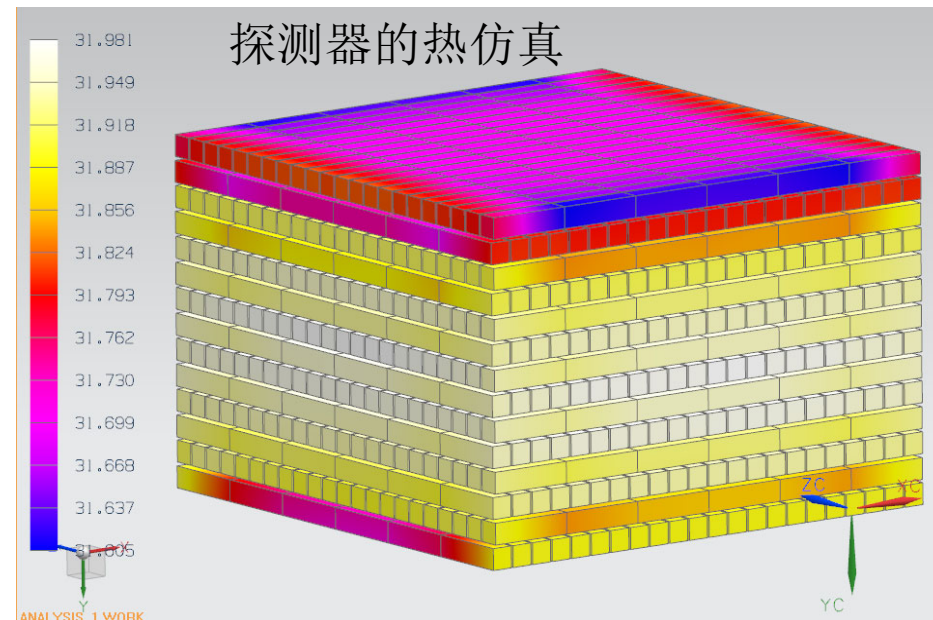
RESULTS: 12- 12- HV&FEE & SHIELD CONDUCTANCE COMMON
TEMPERATURE - MAG MIN: 34.8 MAX: 40.3

VALUE OPTION: ACTUAL
SHELL SURFACE: TOP

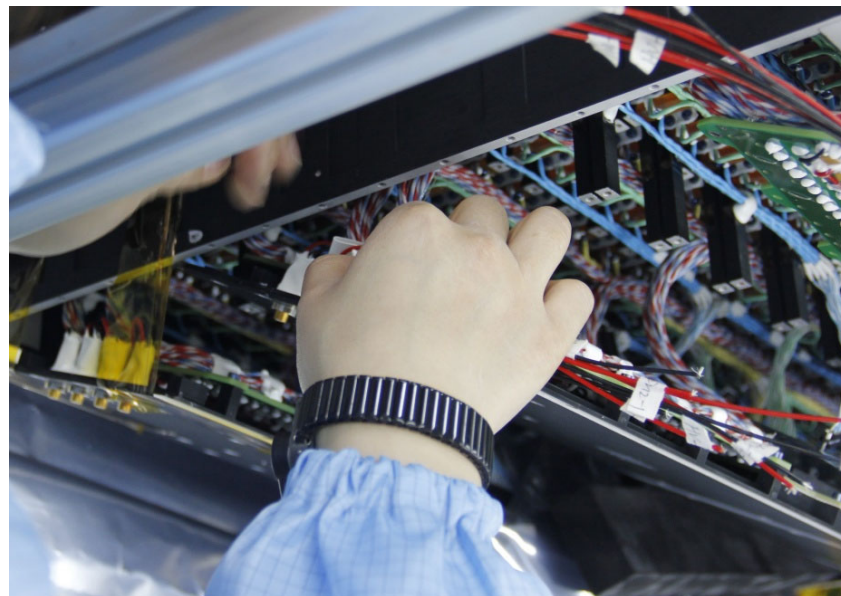
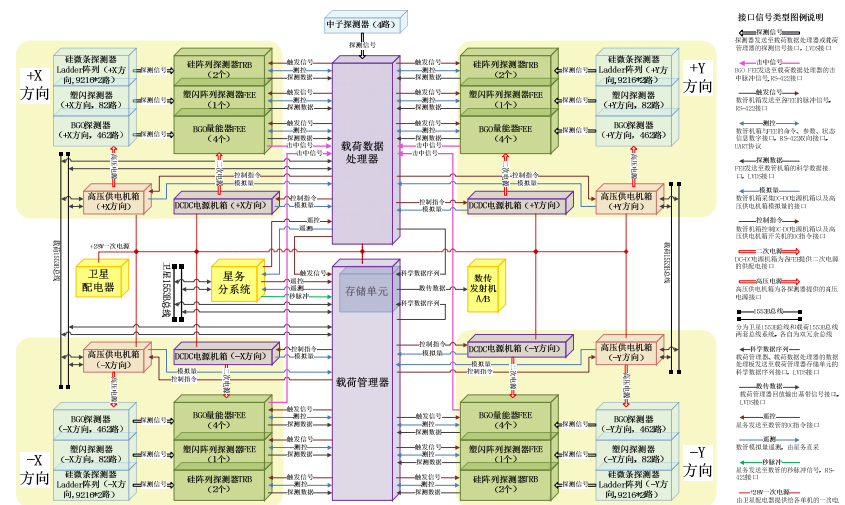
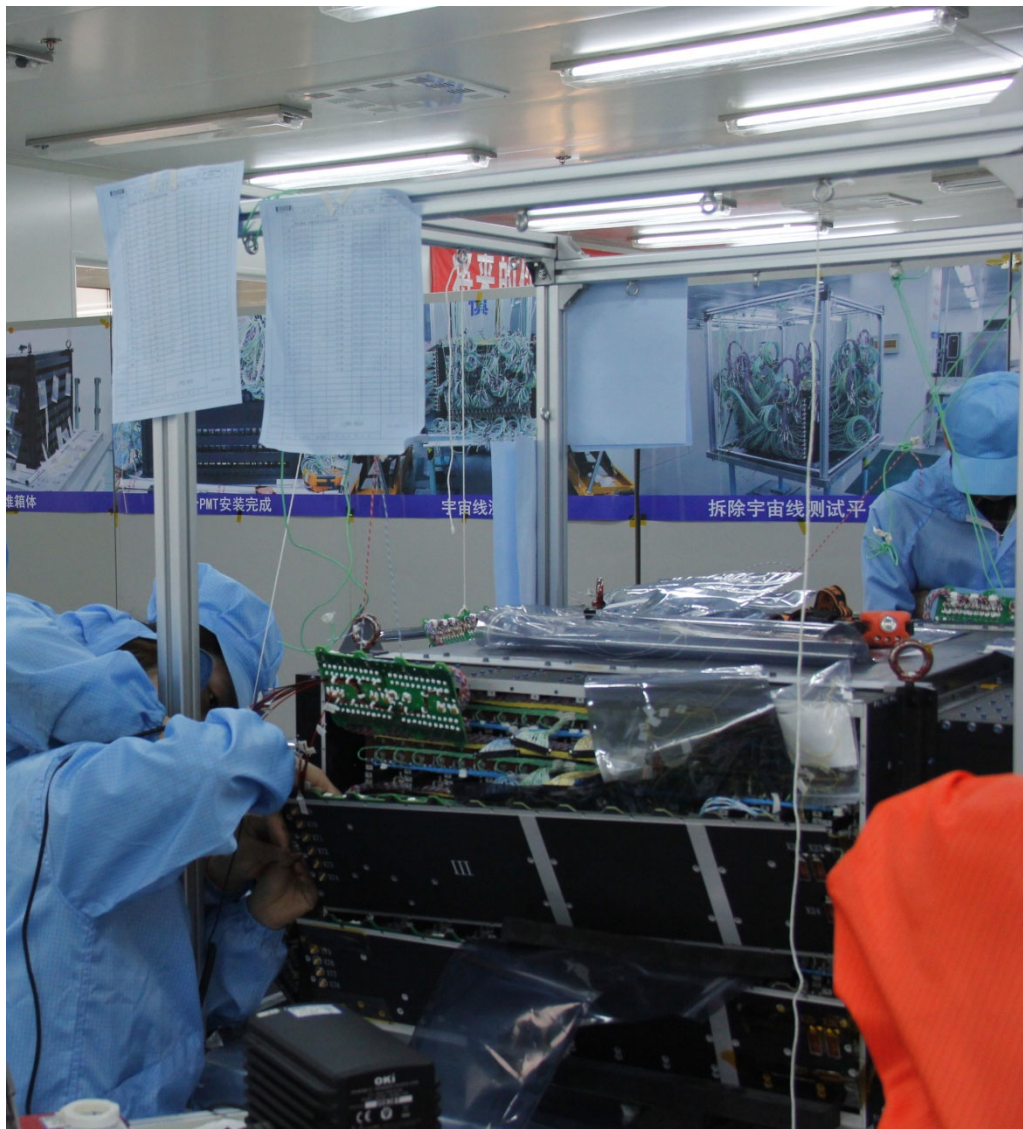
FEE的热仿真



探测器的热仿真



BGO量能器总装



与国际水平对比

项目	实验类型	接收度 (m ² Sr)	量能器 辐射长度	量能器 能量分辨率 @100GeV	发射时间
PAMELA	卫星	0.002	17	12%	2006.6
AMS-02	空间站	0.05	17	2%	2011.5
CALET	空间站	0.1	28	2%	2015.8
Fermi-LAT	卫星	2.4	8.6	8.5%	2008.6
DAMPE BGO	卫星	0.3	32	1%	2015.12

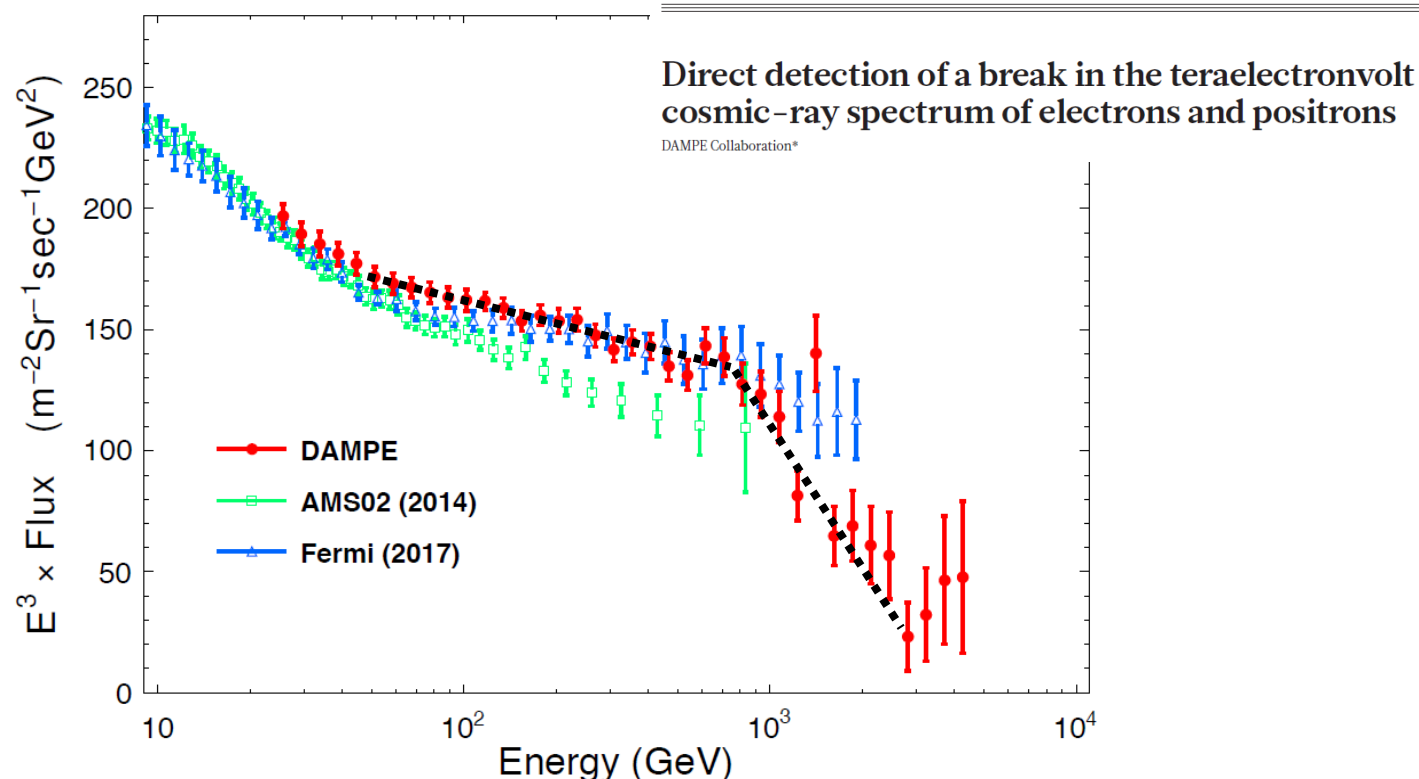
- DAMPE = FERMI+AMS+CALET
 - 探测器电荷分辨：与AMS相当
 - 角分辨：与FERMI相当，比CALET好2倍
 - 能量分辨：比FERMI高10倍，比AMS高3倍
 - 本底水平：比FERMI好100倍，比CALET高30倍，比AMS高5倍

DAMPE具有最高的观测能段，最高的能量分辨率，最强的本底抑制水平！

“悟空”的电子宇宙射线能谱

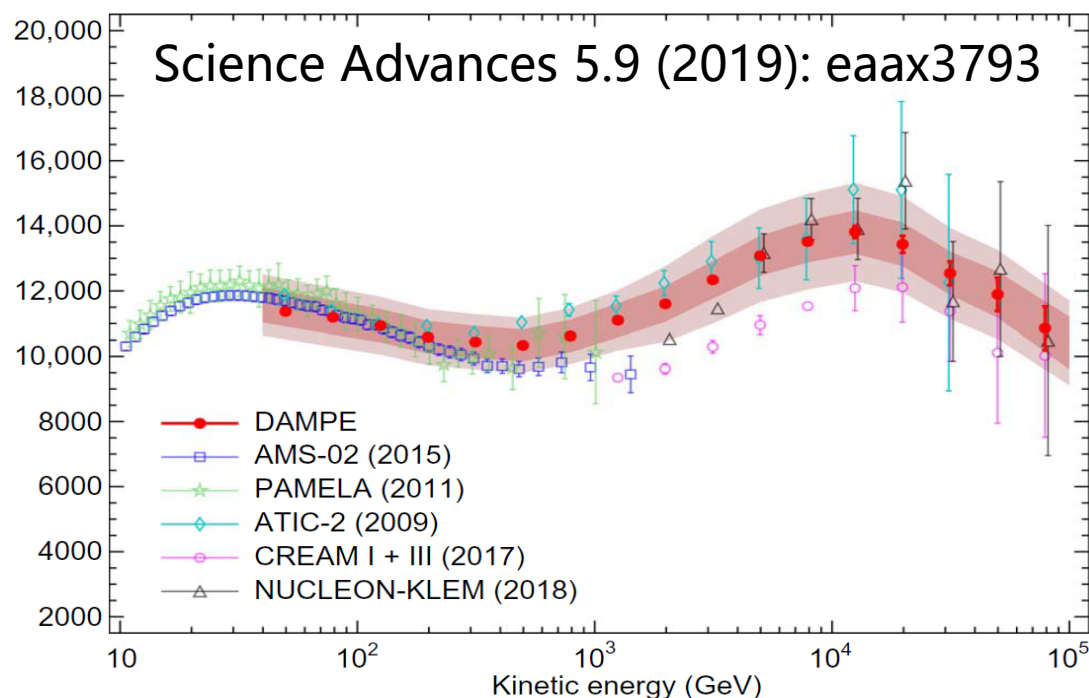
LETTER

doi:10.1038/nature24475



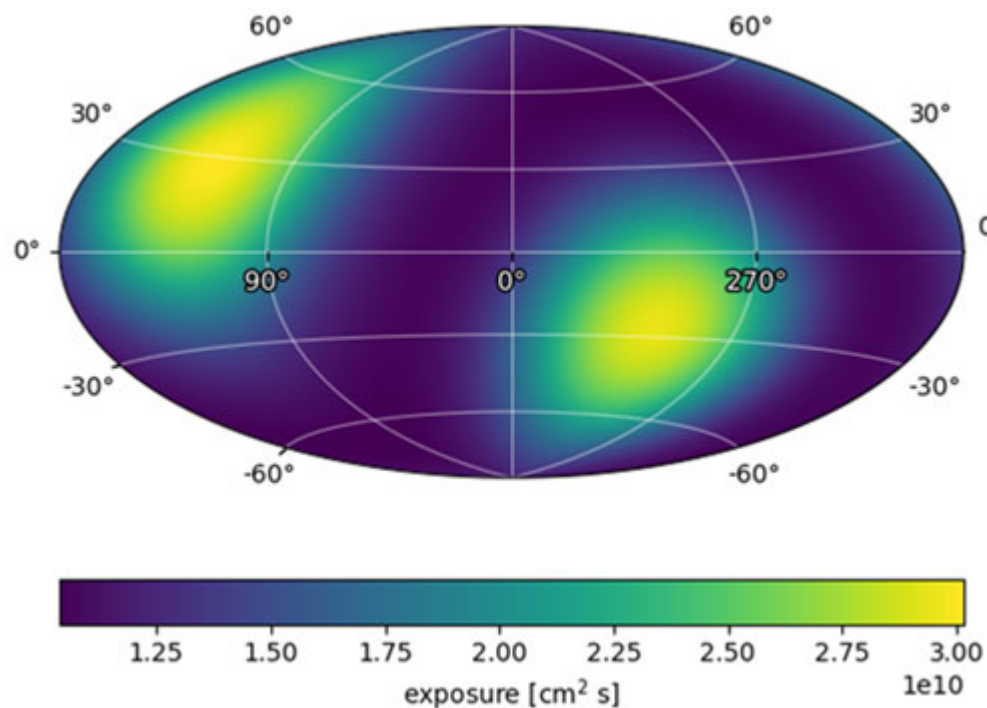
- (1) 悟空号的能量测量范围比其它空间项目显著提高，开辟了空间探测新窗口
- (2) 悟空号测量到的TeV电子的“纯净”度最高，能谱的准确性高
- (3) 悟空号首次直接测量到了能谱在~1 TeV处的拐折，可望澄清是否部分能量在1 TeV以下的电子宇宙射线来自于暗物质湮灭

“悟空” 的宇宙射线质子微分能谱



- 首次在轨完成了 40 GeV - 100 TeV的质子谱线观测
- 显示在几百 GeV开始变硬，与PAMELA、AMS-02结果相符
- 显著地观测到在大约13.6 TeV 的位置谱线变软的现象

“悟空”号伽马光子科学数据

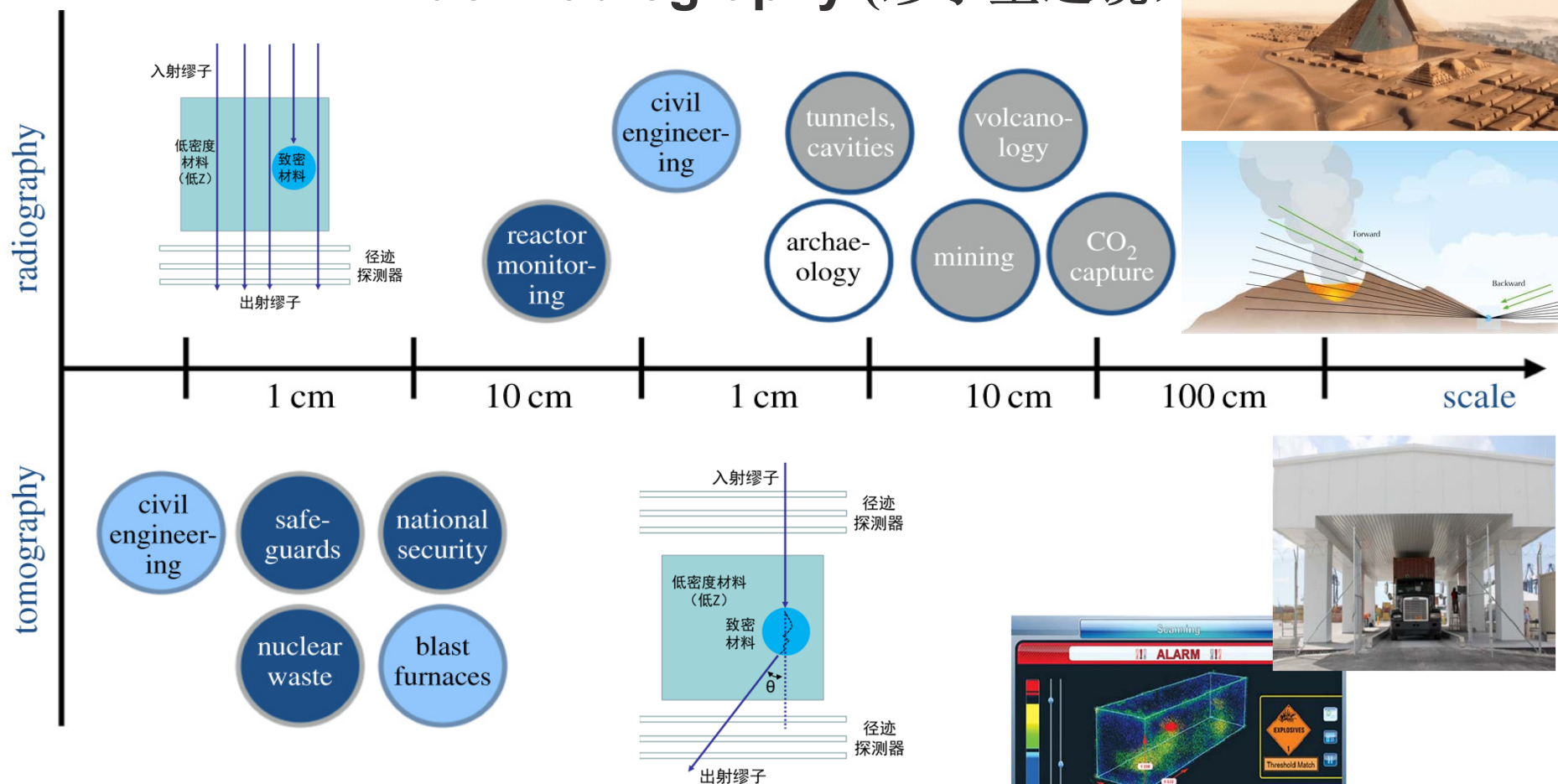


- 2021年9月7日，公开发布“悟空”号暗物质粒子探测卫星首批伽马光子科学数据
- 2016年1月1日-2018年12月31日的伽马光子科学数据（共计99864个事例）

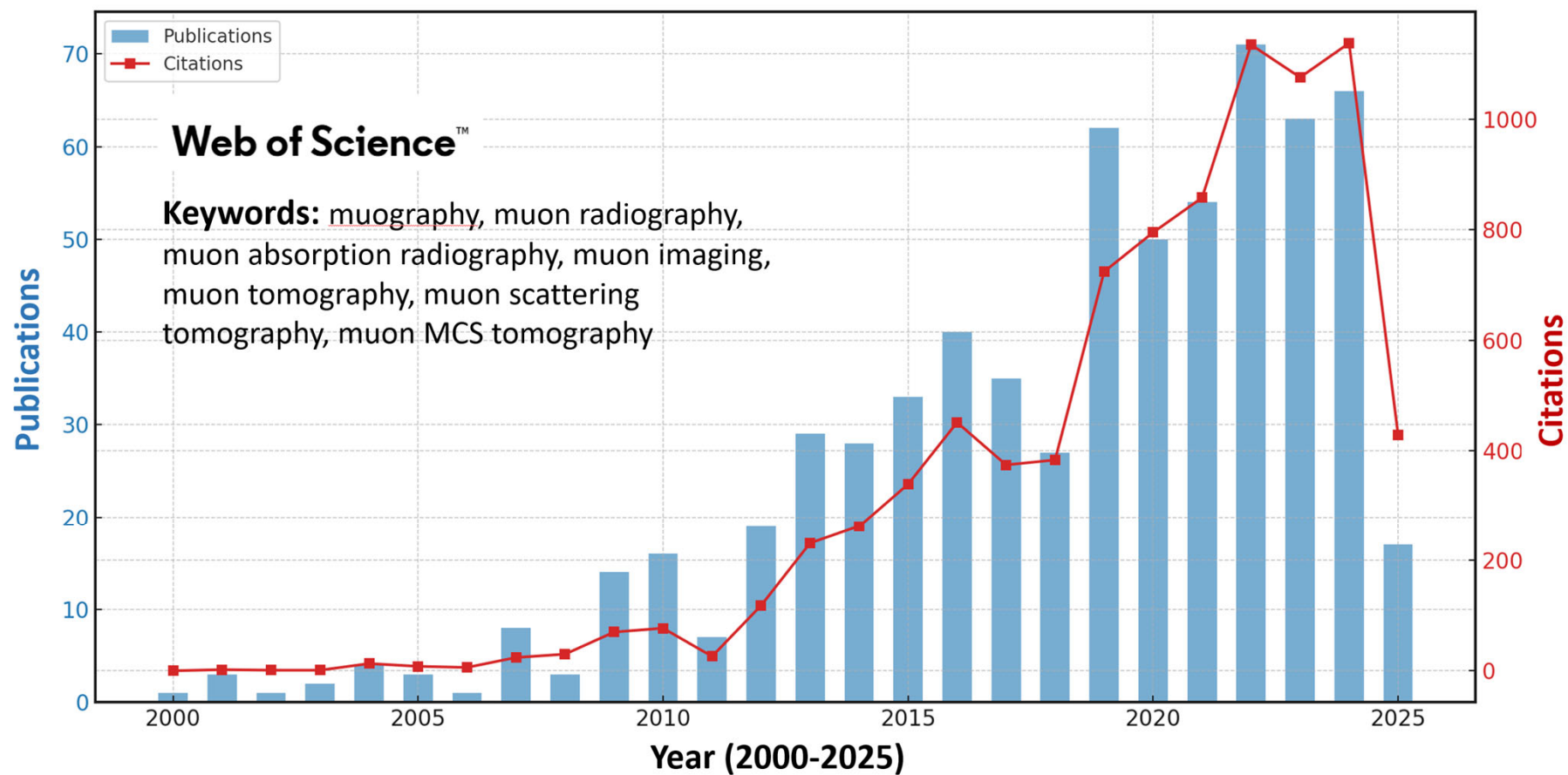
宇宙线 μ 子成像

➤ 宇宙线 μ 子能量分布广、穿透力强、天然可得

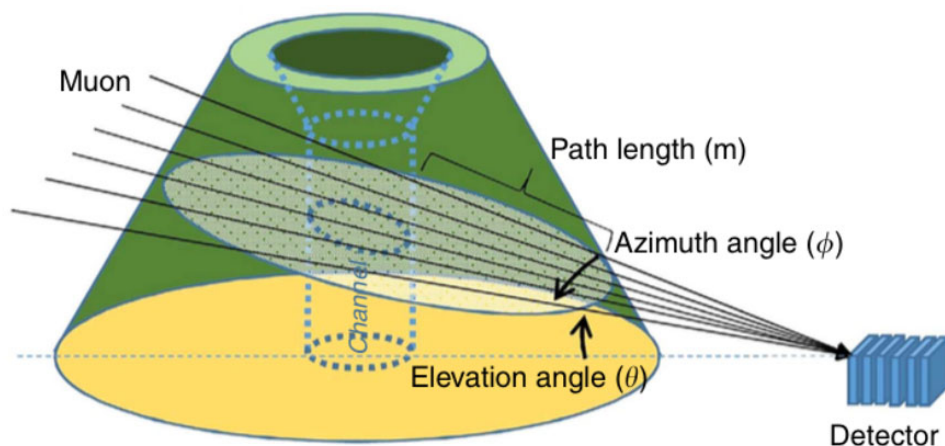
Muography Muon tomography (缪子CT)
Muon radiography (缪子望远镜)



宇宙线 μ 子成像



μ子透射成像原理



$$-dE/dx = a + bE, \quad x = \int_L \rho(\epsilon) d\epsilon.$$

缪子能量
不透明度
密度

- 缪子穿过物体时的能量损失（对应计数损失）与物体密度相关



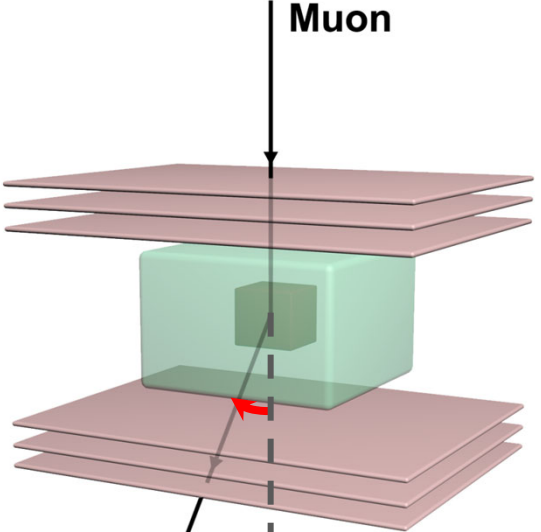
Nature 2017, Nature Communications 2023

μ子散射成像原理

美国Decision Sciences公司技术验证

- 缪子穿过物体散射角的分布与物质原子序数及密度相关

Muon



散射角的分布宽度

$$\theta_{MS} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} Q \sqrt{\frac{x}{X_0}} (1 + 0.038 \ln(x/X_0))$$

修正因子

原子序数

辐射长度

相对论速度

缪子动量

辐射长度

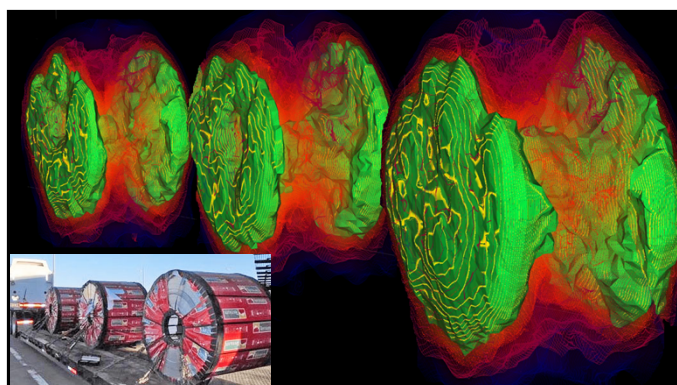
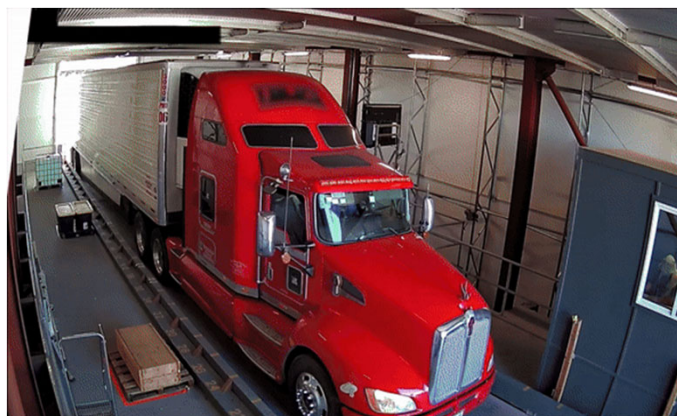
$$X_0 \approx \frac{716.4 \text{ g/cm}^2}{\rho} \frac{A}{Z(Z+1) \log(287/\sqrt{Z})}$$

辐射长度

密度

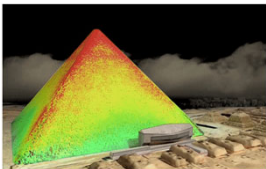
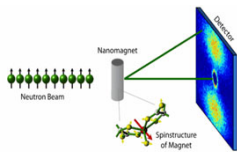
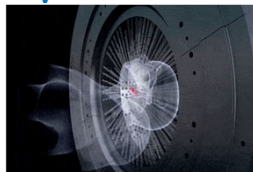
质量数

原子序数

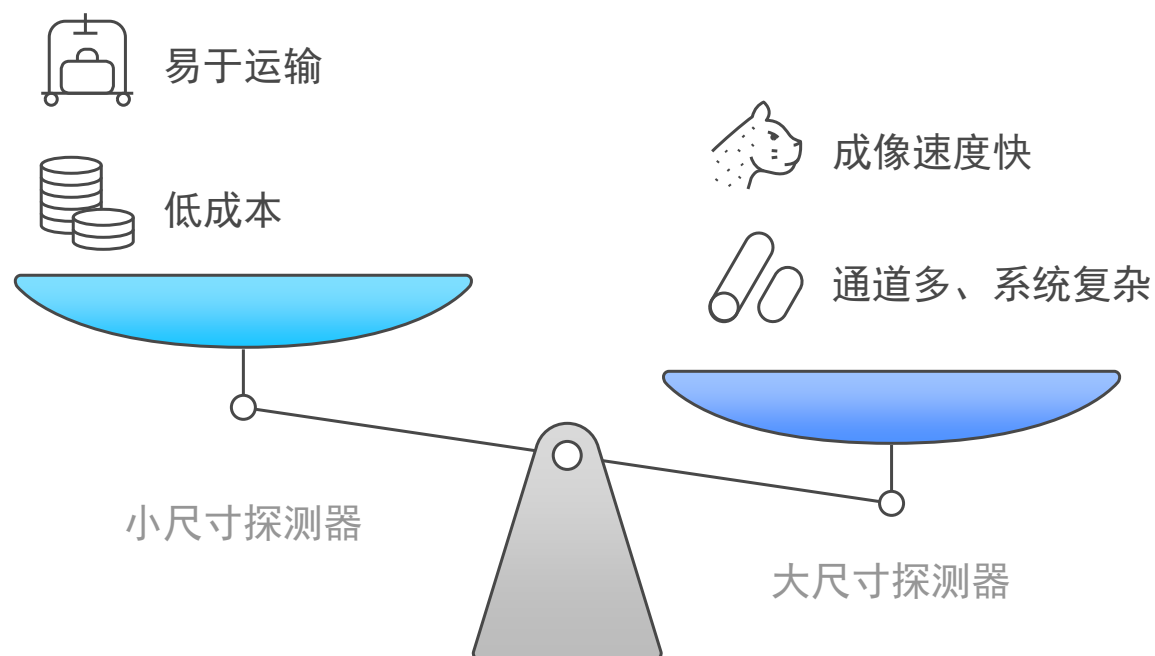


- 成像精度与速度：
 - min: 判断是否存在
 - h: 大致轮廓
 - day: 精细密度

μ 子成像技术优势

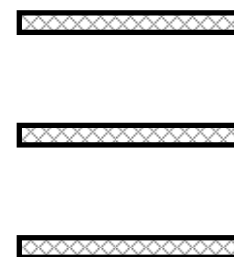
成像特点	μ子成像 	中子成像 	X射线成像 	γ射线成像 
高穿透能力	✓	✓	✗	✗
无需辐射防护	✓	✗	✗	✗
定位隐藏空洞能力	✓	✗	✓	✓
无辐射损伤	✓	✗	✗	✗
快速测量	✗	✓	✓	✓

μ 子成像对探测器和电子学的要求



➤ 宇宙线缪子通量 ϕ 较低: $\sim 10^4/\text{m}^2/\text{min}$

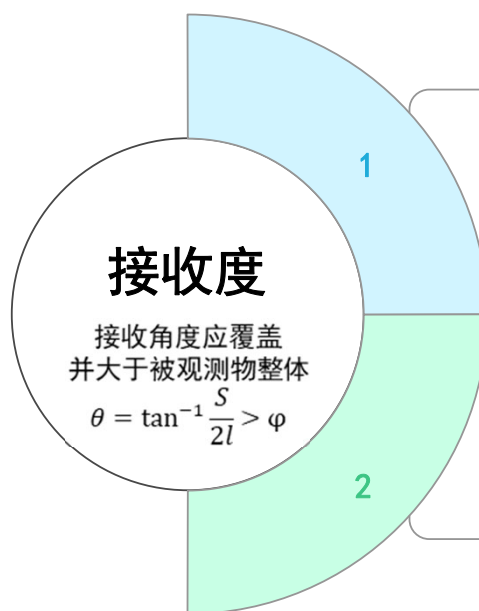
- $N = A \cdot \phi \cdot \varepsilon$
- 统计误差 $\Delta N/N = 1/\sqrt{N}$
- 成像时间 $T \propto 1/N$



探测器面积和阵列层间距

$$\Delta x_{\text{voxel}} \approx \frac{\sqrt{\pi} L \sigma_{\text{position}}}{2l}$$

高空间分辨能力提出了对探测器
位置分辨和层间距的要求

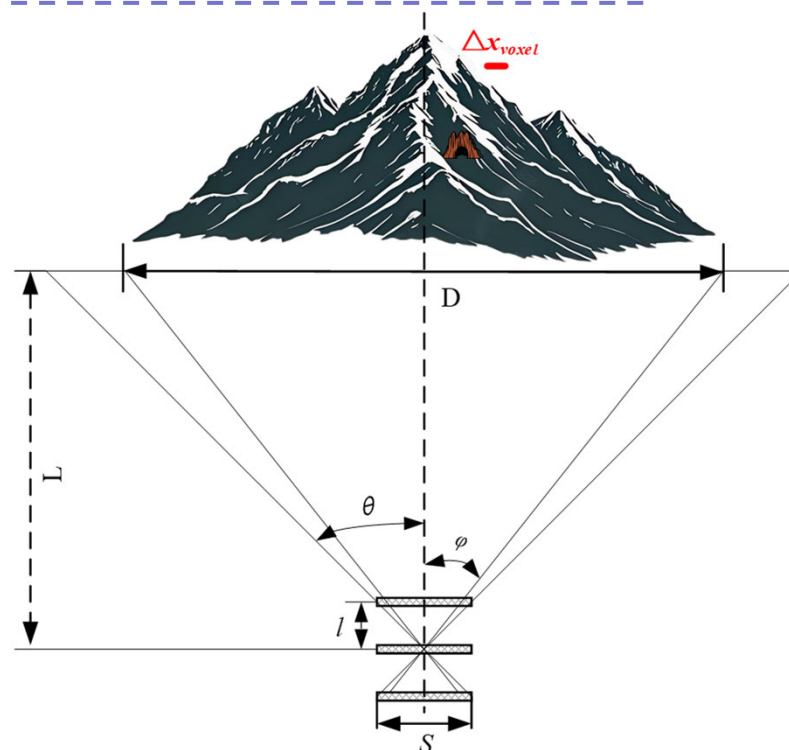


探测器面积

- 探测器边长直接影响接收角度
- 大探测器面积也提高计数率
- 大面积可以减少数据采集时间

阵列层间距

- 减小层间距能增大接收度
- 同时优化装置紧凑性
- 但对探测器分辨率提出更高需求



当接收角度刚好覆盖被测物体时

$$\frac{D}{L} = \frac{S}{l}$$

$$\Delta x_{\text{voxel}} \approx \frac{\sqrt{\pi} D \sigma_{\text{position}}}{2S}$$

对探测器面积的要求

探测器角分辨率和位置分辨率

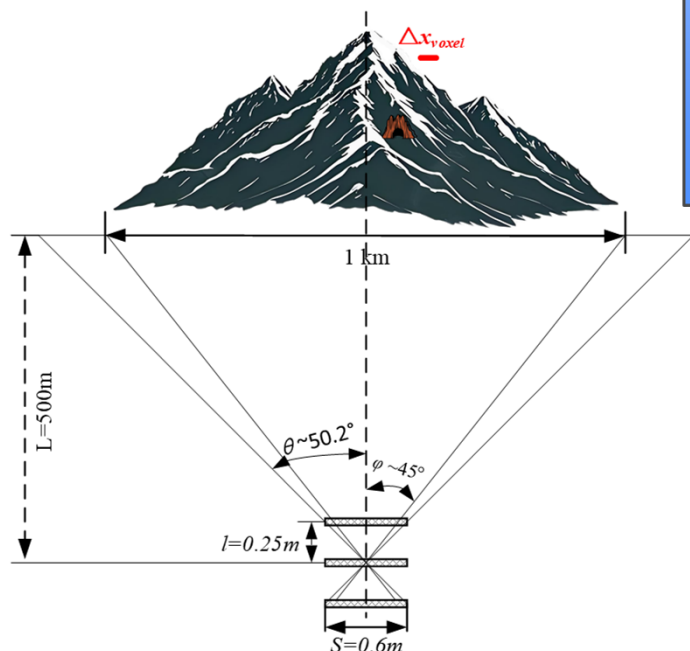
统计误差 $\delta = \Delta N / N = 1 / \sqrt{N}$

$$\delta \leq 5\% \Rightarrow N \geq 400$$

$$N \approx nTS\Delta\Omega$$

1 m²面积理想探测器约需
40天数据采集时间

$$\sigma_{\theta} \leq \frac{\Delta x_{\text{voxel}}}{L} = \frac{1}{500} = 2 \text{ mrad}$$



角分辨率

综合透射与散射系统的需求，应优于1 mrad



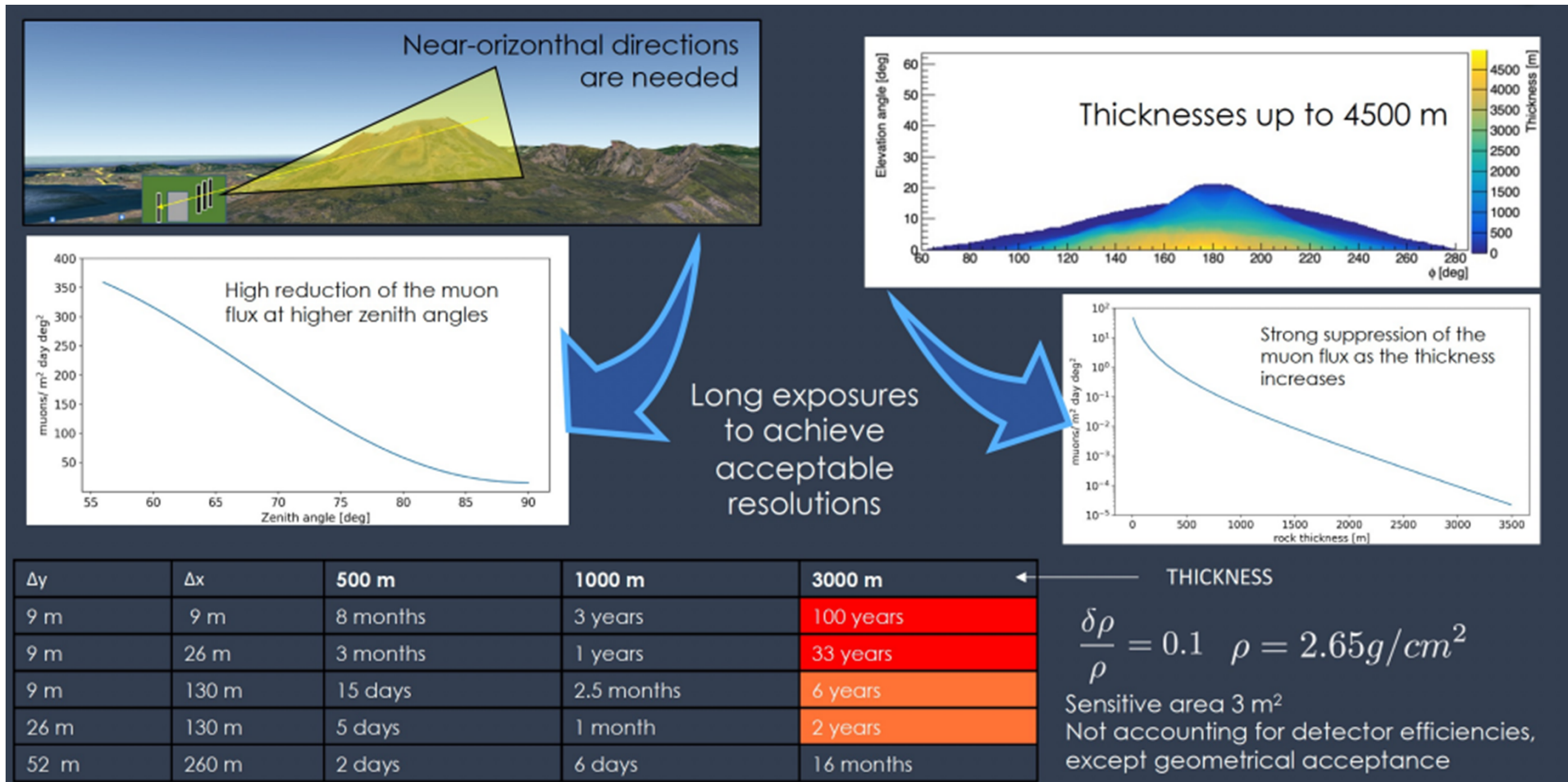
位置分辨率

角分辨率与探测器层间距，决定探测器位置分辨，应优于250 μm

$$\sigma_{\text{position}} \leq l \cdot \tan(\sigma_{\theta}) = 250 \mu\text{m}$$

材料	平均 原子序数	辐射长度X ₀		不同动量下的缪子散射角(mrad)		
		g/cm ²	cm	0.5GeV/c	3GeV/c	20GeV/c
空气(Air)	7.3	36.7	28000	0.29	0.05	0.01
水(H ₂ O)	7.5	36.1	36.1	8.01	1.31	0.20
水泥(Crt)	11.1	24.6	10.7	14.7	2.40	0.36
铝(Al)	13	24.0	8.9	16.1	2.63	0.39
铁(Fe)	26	13.8	1.75	36.4	5.94	0.89
铅(Pb)	82	6.40	0.56	64.3	10.5	1.57
铀(U)	92	6.10	0.32	85.0	13.9	2.08

The MURAVES experiment: measurement feasibility



Credit: D'Errico et al., "Study of the Vesuvius Great Cone with Muon Radiography," Muography2021, Ghent, 2021

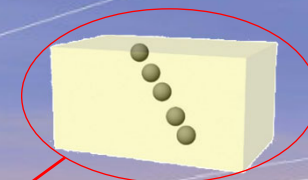
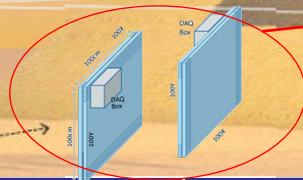
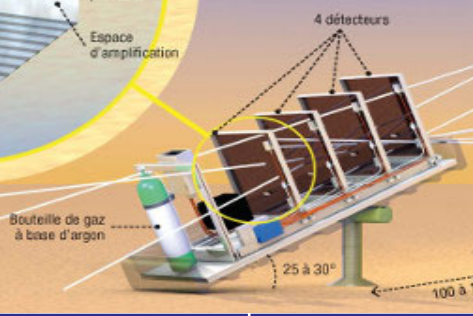
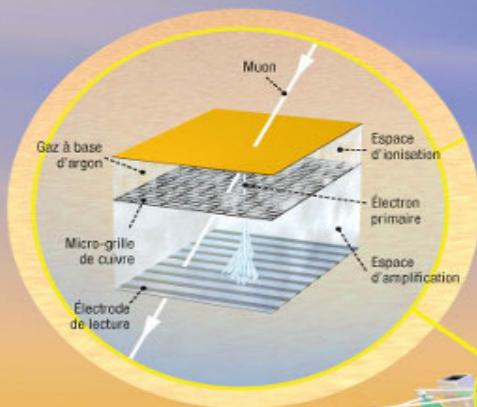
胡夫金字塔参数

尺寸 230m×230 m ×139 m

Grand Gallery 8.6m×46.7m×2.1m

King's chamber 5.24m×10.48m×5.3m

Queen's chamber 5.7m×5.2m×6.1m

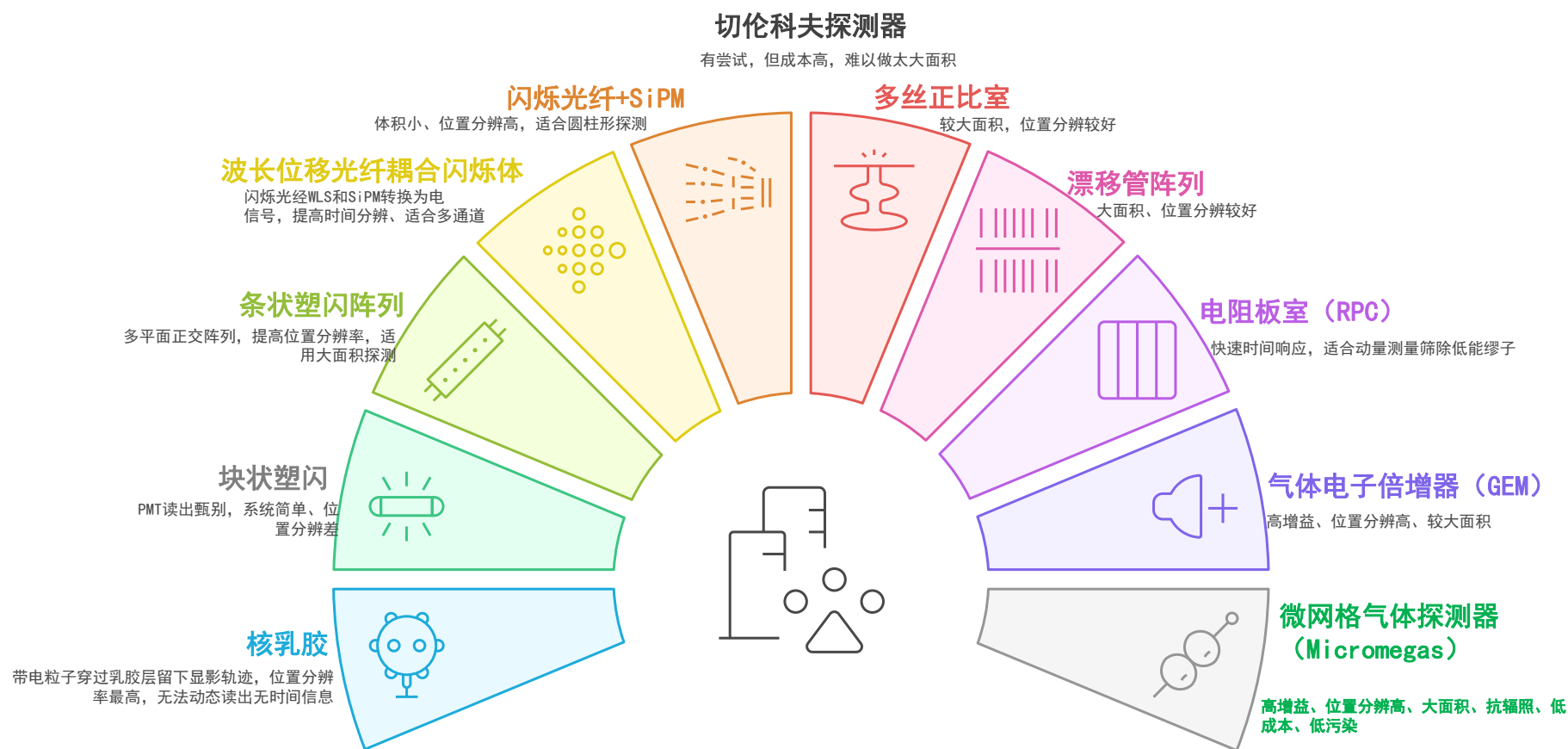


探测器	塑料闪烁体	Micromegas	核乳胶室
尺寸 (m ²)	1.2×1.2	0.5×0.5	0.45
空间分辨 (mm)	10	0.4	0.001
角分辨 (mrad)	7 - 10	0.8 - 4	1.8
角接收度 (°)	34 -45	45	接近4π
测量时长 (月)	3 - 5	3	8
缪子总计数 (百万)	4 - 6	88	10.6

μ 子成像探测技术

➤ 探测器选择应综合考虑：

□ 探测器面积、位置分辨、数据读出难易程度、可维护性、成本等



μ子成像探测技术

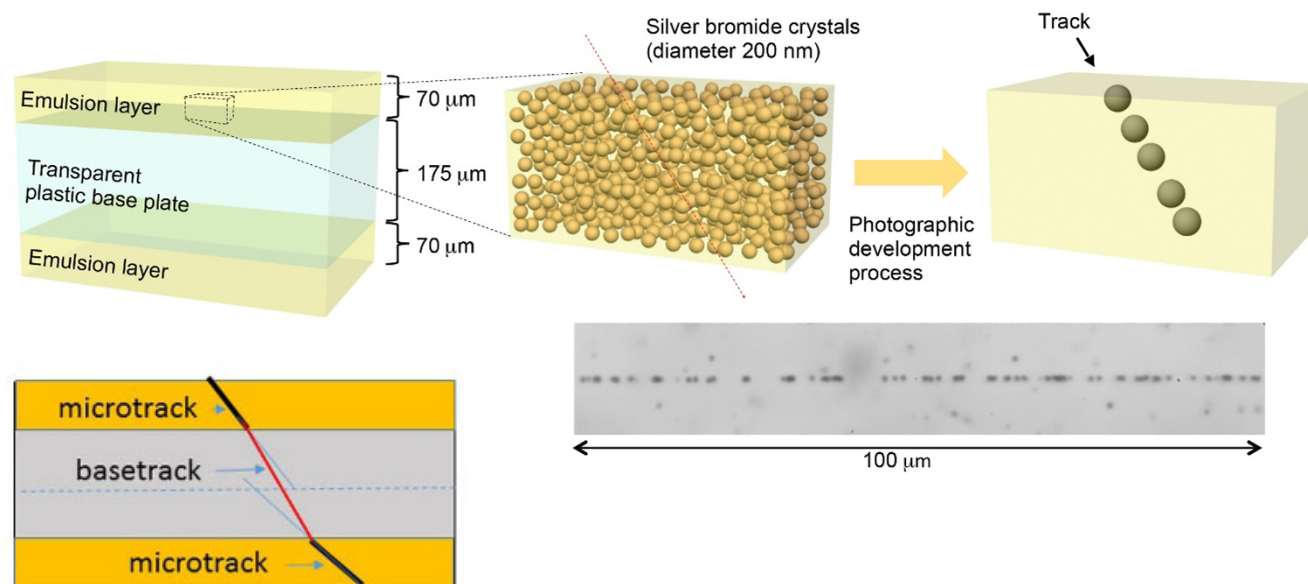
	类型	面积	角分辨率	结构	信号读取	价格	适用技术	应用领域
闪烁体	方形条	1-4 m ²	>10 mrad	简易	简易	低	AM	A,G,V
	三角形条	1-2 m ²	<10 mrad	简易	简易	中	AM	A,AT,G,GT,V
	闪烁光纤	1-2 m ²	~0.1 mrad	中等	复杂	高	SM	AT,GT,N
气体	正比计数器	1-4 m ²	~10 mrad	简易	简易	低	AM	A,G,V
	多丝器	>4 m ²	<1 mrad	中等	简易	中	SM	AT,GT,N
	漂移室	>4 m ²	~0.1 mrad	复杂	复杂	高	SM	AT,GT,H,N
	平板电离室	>10 m ²	~0.1 mrad	简易	中等	低	SM	AT,GT,H,N
	Micromegas	<1 m ²	<10 mrad	简易	简易	低	AM SM	AT,GT,N
	(M)RPC	<1 m ²	<10 mrad	简易	简易	中	AM SM	AT,GT,N
核乳胶	核乳胶	<1 m ²	<10 mrad	简易	复杂	低	AM	A,AT,G,GT,M,V

AM=透射成像, SM=散射成像;

A=考古学, AT=建筑学, G=地质学, GT=岩土工程, H=国土安全M=矿业, N=核废料, V=火山

[*Atmospheric muons as an imaging tool. Reviews in Physics 5\(2020\) 100038*](#)

核乳胶探测器



Credit: Morishima et al., Nature 552, 386–390 (2017)



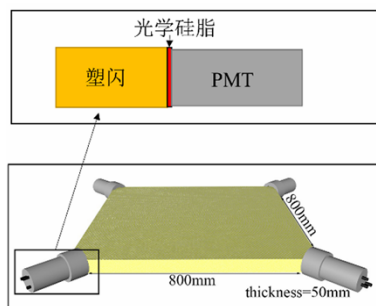
- 数据读出

- 曝光、显影、目视扫描
(自动显微镜分析)

- 典型参数

- 有效面积: $0.3\text{m} \times 0.25\text{m}$
- 位置分辨: $1\mu\text{m}$
- 角分辨: 1.8 mrad

塑料闪烁体（块状）

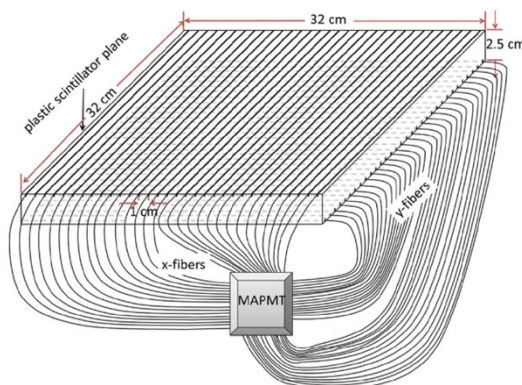


Credit: 何列, 南华大学硕士论文, 2024

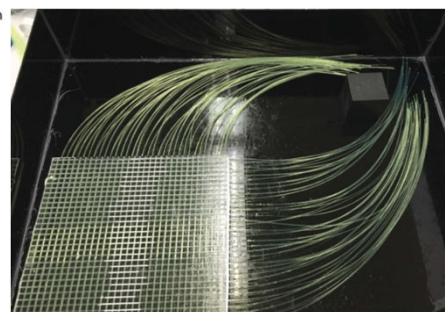


• 典型参数

- 有效面积: $m \times m$
- 位置分辨: 数十mm

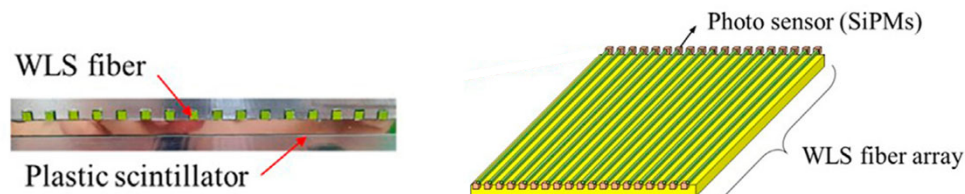


Credit: Liao et al., Nuclear Technology 205, 736–747 (2018)



• 数据读出

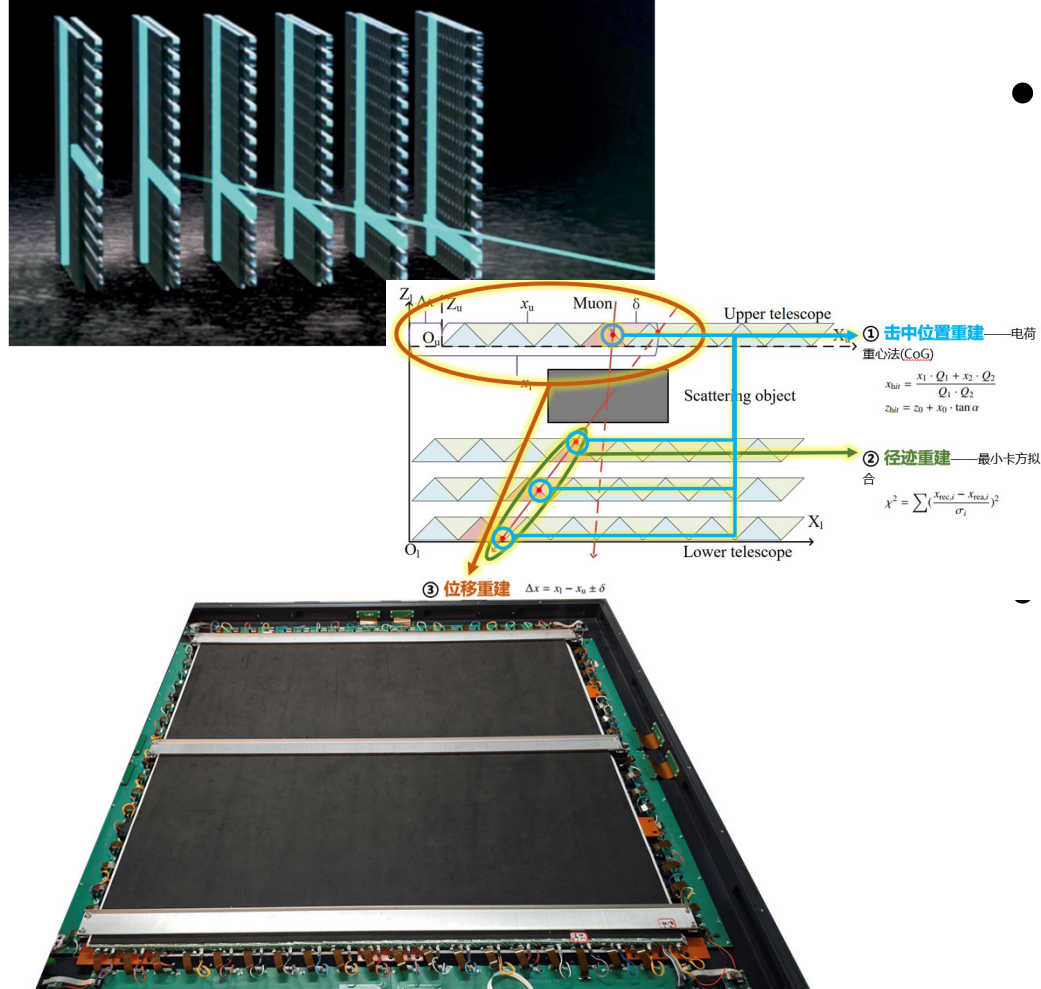
- 四角PMT定位
 - 信号到达时间差
- 波长位移光纤阵列
 - XY阵列
 - 双端读出时间差



Credit: Park, Nuclear Engineering and Technology 55, 1009–1014 (2023)

条状塑料闪烁体阵列

Credit: Tanaka et al., Nat. Rev. Methods Primers 3, 1–17 (2023)



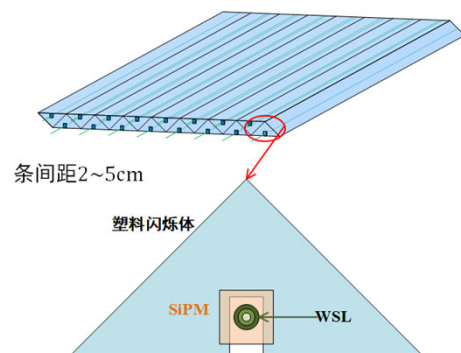
• 典型参数

- 矩形截面、三角截面
- 有效面积：1 m × 1 m
- 位置分辨：~1 mm

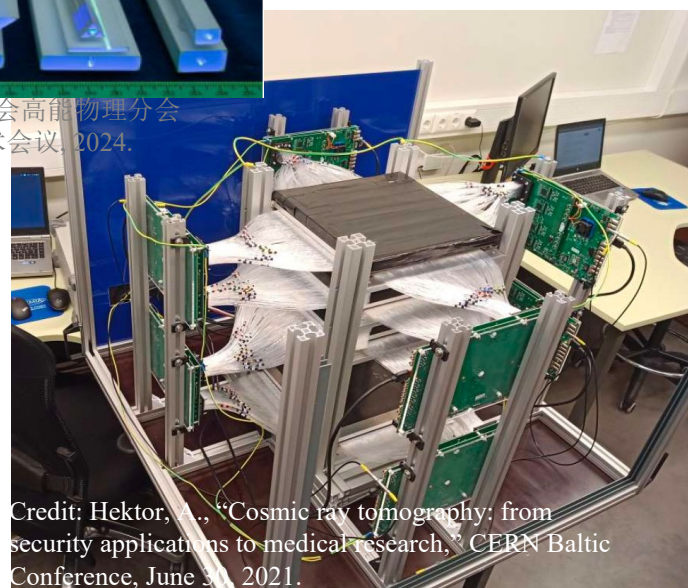
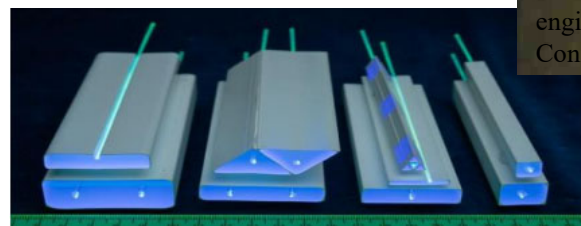
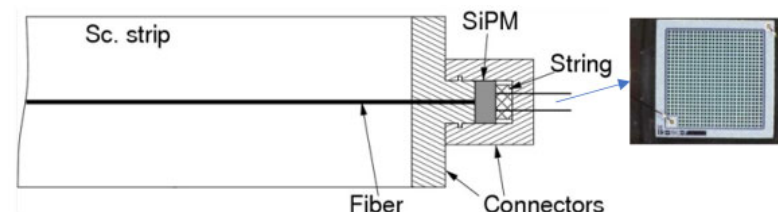
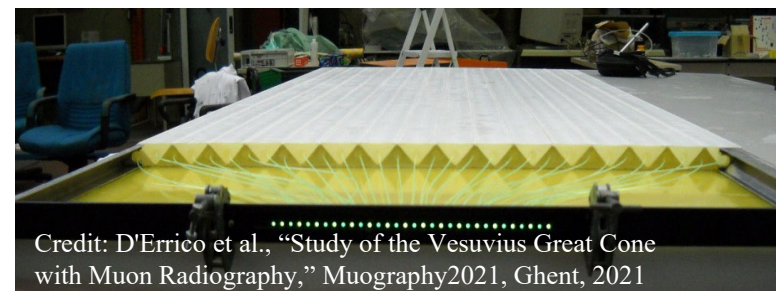
– 信号读出

- SiPM单端/双端读出
 - 数百上千通道
- 电荷重心定位

条状塑料闪烁体+波长位移光纤



位置分辨2~3 mm



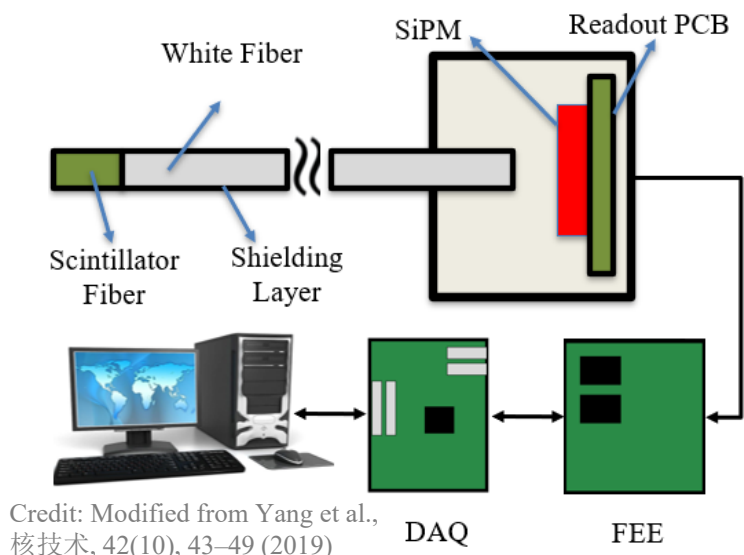
• 典型参数

- 有效面积: $1\text{ m} \times 1\text{ m}$
- 位置分辨: $\sim 1.5\text{ mm}$
- 时间分辨率: $\sim 1\text{ ns}$
- 探测效率: 大于95%

• 信号读出

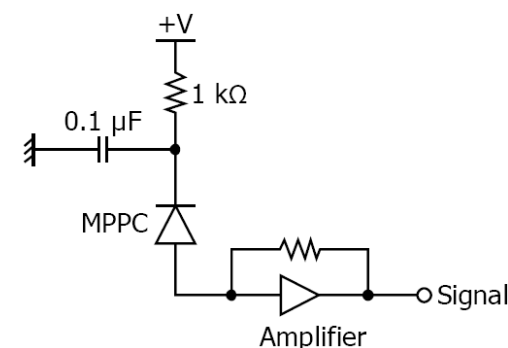
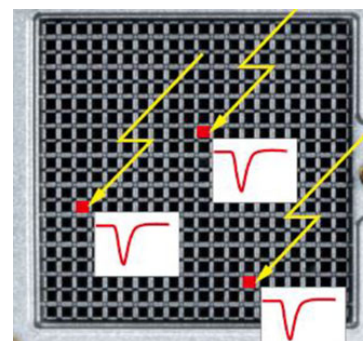
- SiPM单端/双端读出
 - 数百上千通道
- 多通道阵列读出与位置重建

闪烁光纤阵列



- 典型参数

- 有效面积：数平方米
- 位置分辨： ~ 0.4 mm
- 时间分辨率： ~ 1 ns
- 探测效率：大于95%

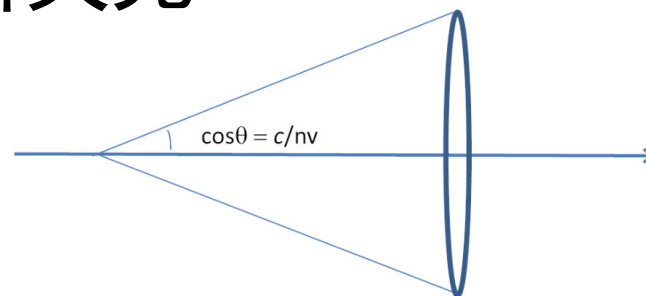


- 信号读出

- SiPM单端/双端读出
 - 数百上千通道
 - 电荷重心法
- 多通道阵列读出与位置重建算法

切伦科夫探测器

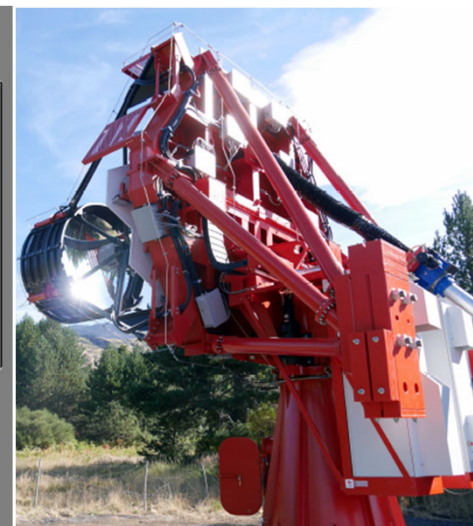
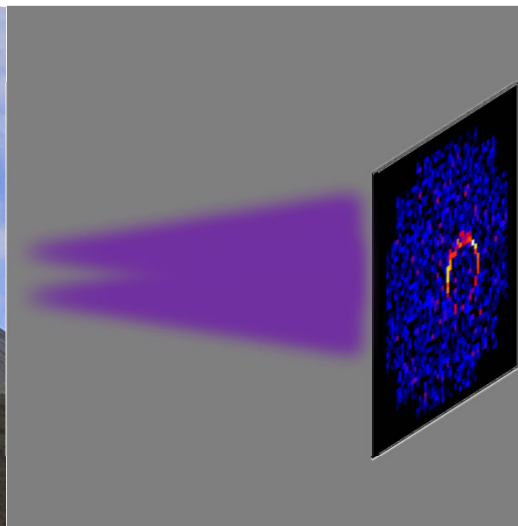
- 利用宇宙线缪子产生切伦科夫光确定方向
- 典型参数
 - 有效面积：50 cm × 50cm



Muons crossing the SE crater at Mt Etna



Muon Cherenkov ring



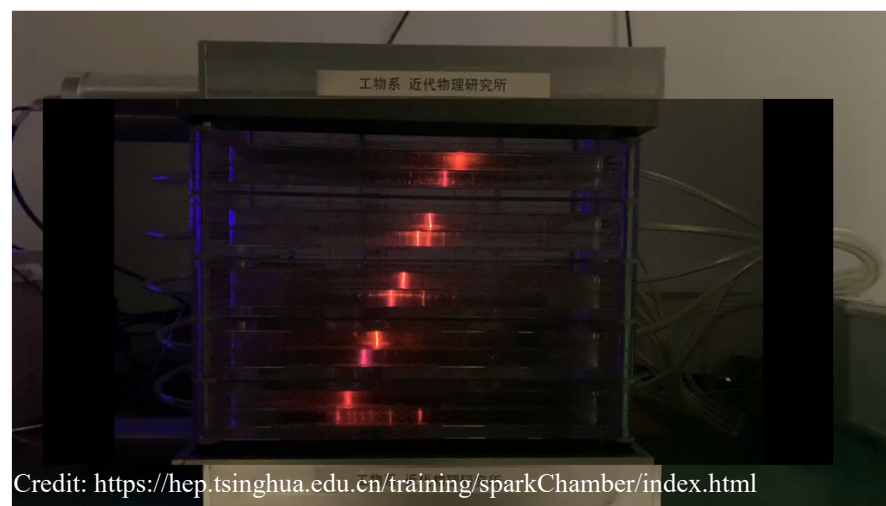
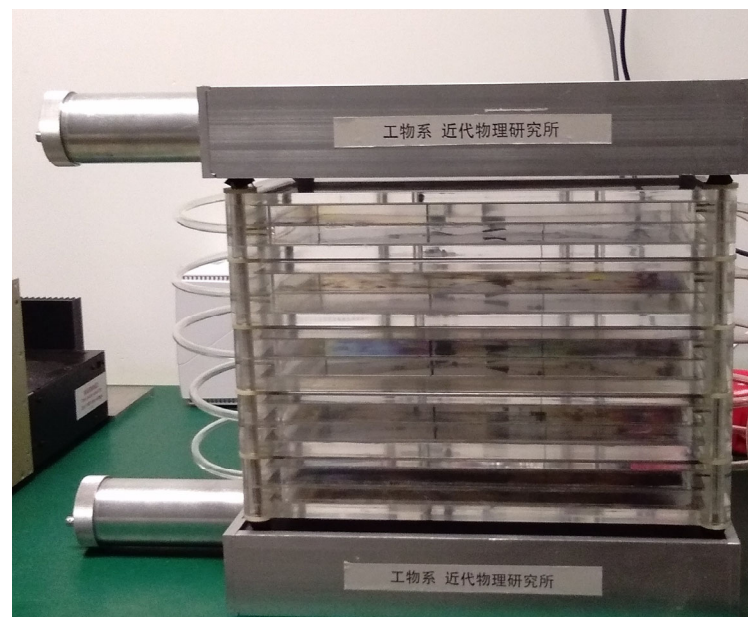
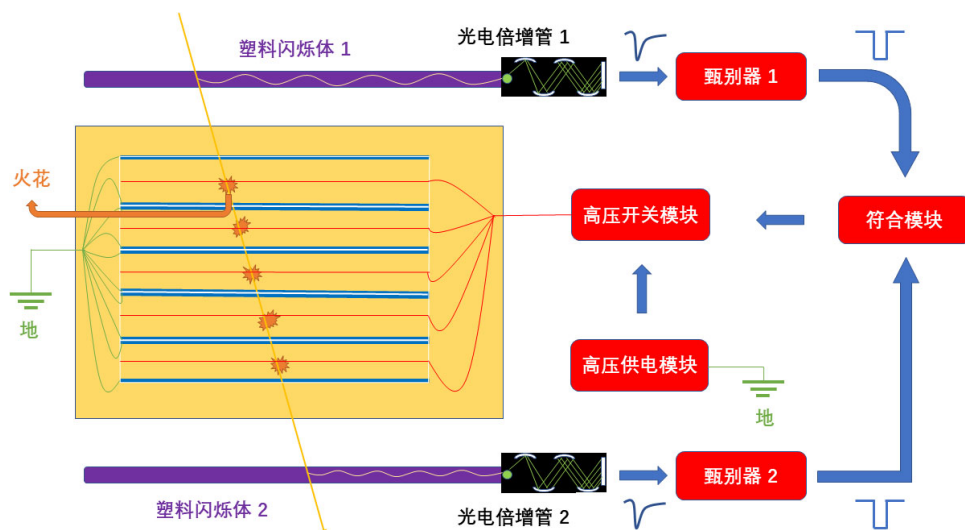
Credit: “Looking inside volcanoes with the Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes,” presented at RICH 2016, Siena, Italy, September 2016.

火花室

- 典型参数

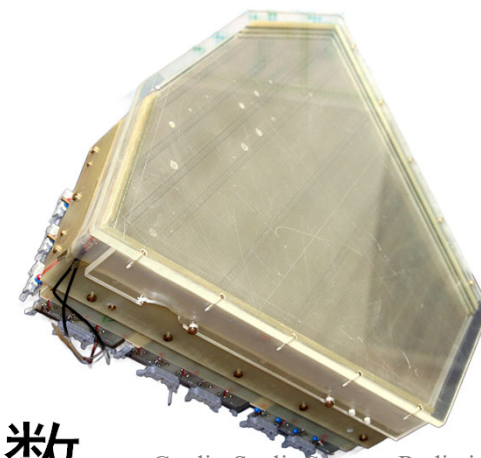
- 有效面积：数十cm × 数十cm

- 位置分辨：毫米量级



Credit: <https://hep.tsinghua.edu.cn/training/sparkChamber/index.html>

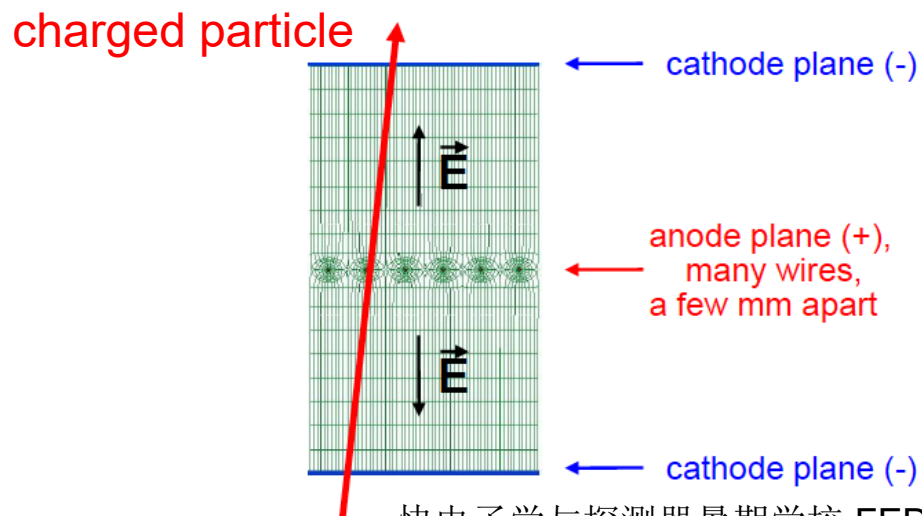
多丝正比室



Credit: Sauli, Gaseous Radiation Detectors, Cambridge Univ. Press, 2014

- 典型参数

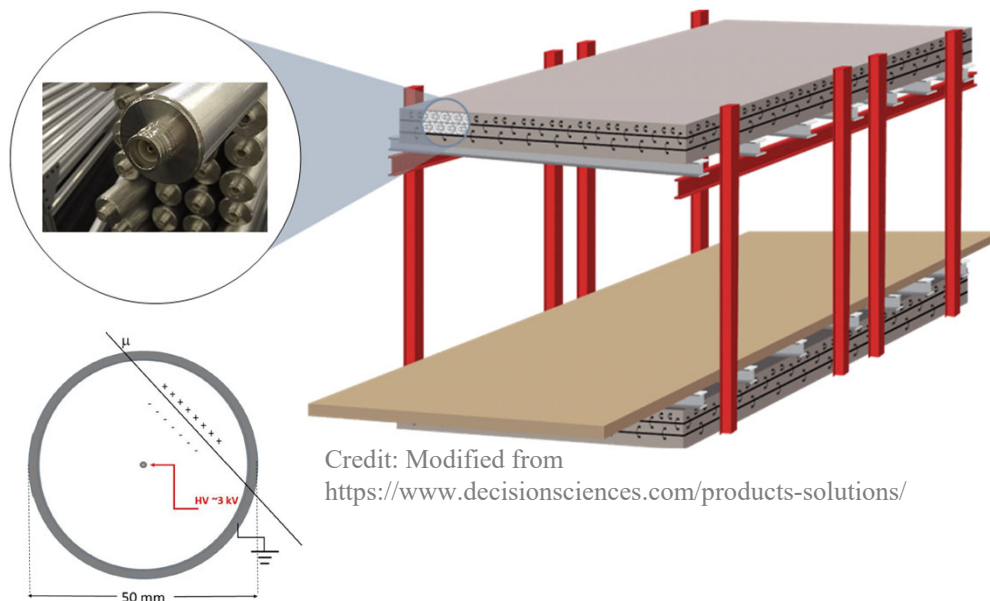
- 有效面积：数十cm × 数十cm
- 位置分辨：~300 μm



- 信号读出

- 阳极丝读出
 - 数千~万通道
- 电荷重心定位

漂移管阵列



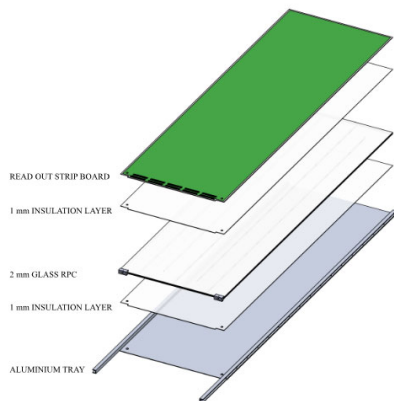
Credit: Modified from
<https://www.decisionsciences.com/products-solutions/>



Credit: Fermilab, "Cosmic-muon detector technology earns R&D 100 Award for Fermilab and its partners," 2019.

- 典型参数
 - 有效面积：数平方米
 - 位置分辨： $\sim 300 \mu\text{m}$
- 信号读出
 - 阳极丝感应读出
 - 通过电子漂移时间位置测量
 - 多层阵列实现高精度位置测量

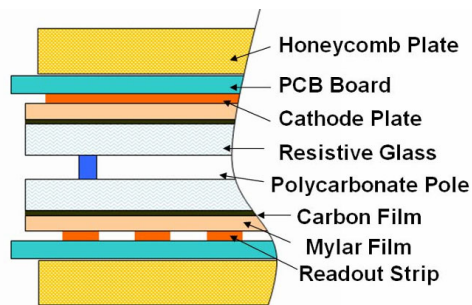
电阻板室 (RPC)



Credit: Baesso et al., JINST 9, C10041 (2014)

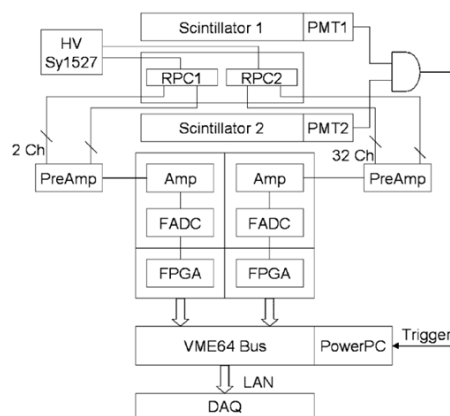


玻璃RPC结构示意图



Credit: 叶瑾, 清华大学博士论文, 2009

清华RPC探测系统示意图



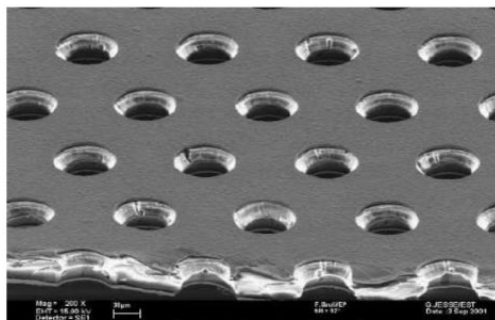
• 典型参数

- 有效面积: 数十cm × 数十cm
- 位置分辨: $\sim 500 \mu\text{m}$
- 时间分辨: ns量级
- 探测效率: 大于95%

信号读出

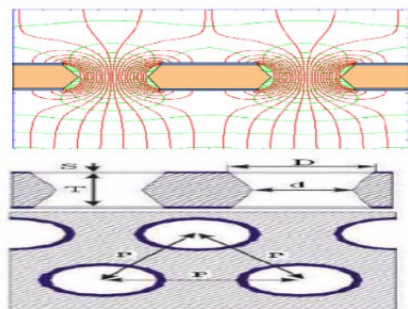
- 二维条读出
- 电荷重心定位

气体电子倍增器 (GEM)



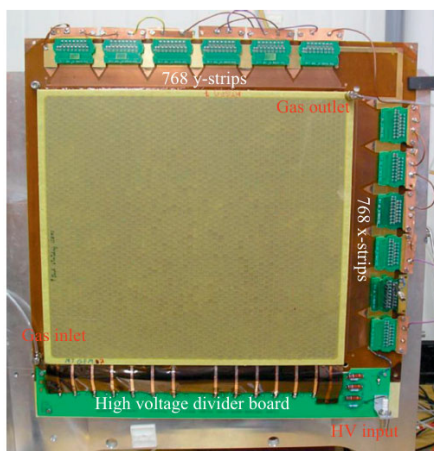
Credit: Sauli, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 805, 2–24 (2016)

GEM膜的结构示意图



• 典型参数

- 有效面积: 数十cm × 数十cm
- 位置分辨: $\sim 100 \mu\text{m}$
- 探测效率: 大于95%
- 能量分辨: $\sim 20\%$ (^{55}Fe)



Triple-GEM Detector

Credit: Gnanvo et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 652, 16–20 (2011)



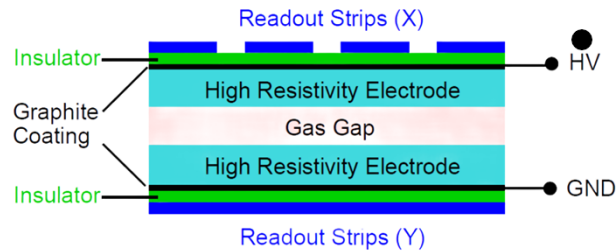
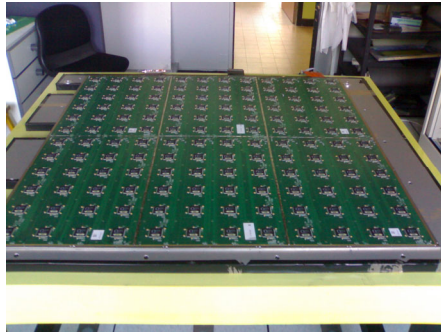
Cylindrical GEM Detector

Credit: Watts et al., IEEE NSS Conf. Rec., 919–924 (2008)

• 信号读出

- 二维条读出
 - 数千~万通道
 - 可编码压缩
- 电荷重心定位

GRPC

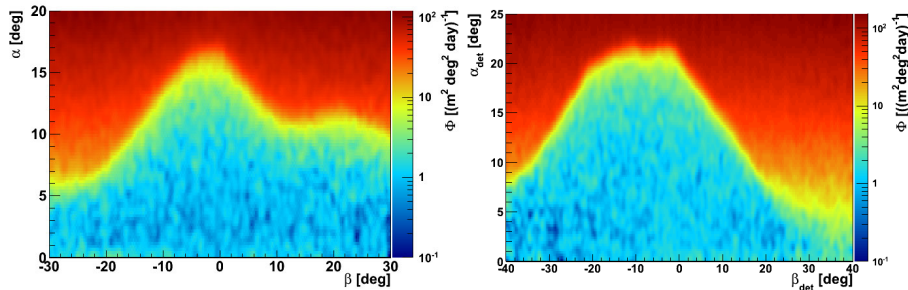


典型参数

- 有效面积: $1\text{ m} \times 1\text{ m}$
- 位置分辨: 数mm

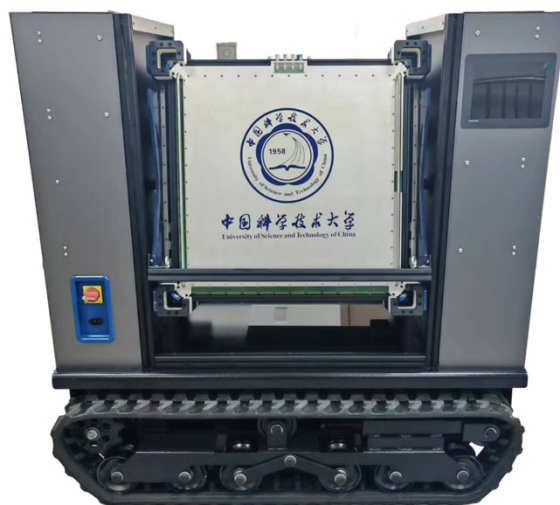
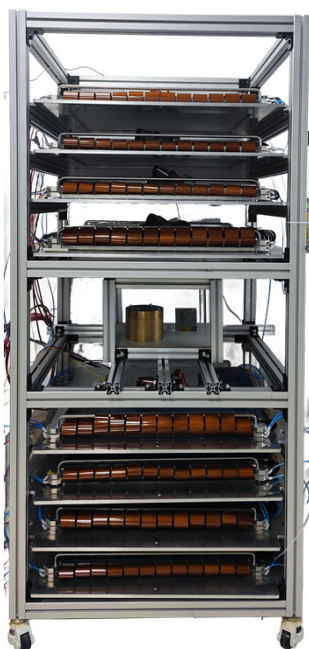
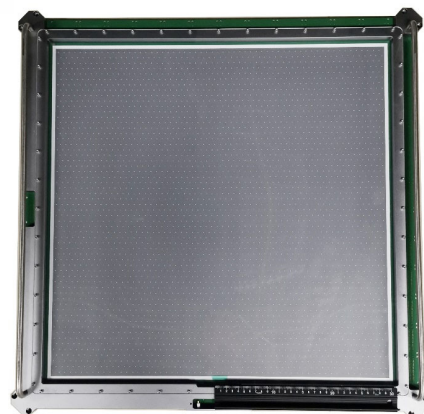
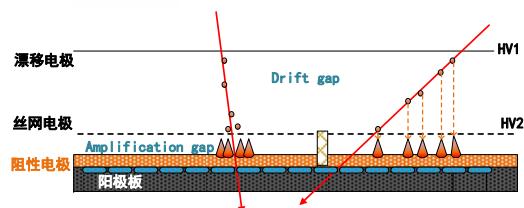
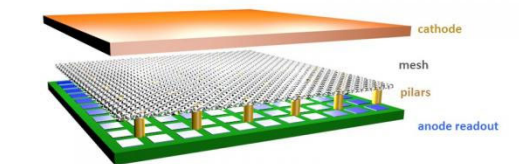
• 信号&数据读出

- Pad读出
- 过阈甄别器



Credit: I. Laktineh, "Development of large GRPC with a very fine segmentation readout," presented at the CALICE Collaboration Meeting, Lyon, France, Nov. 2011

微网气体探测器 (Micromegas)



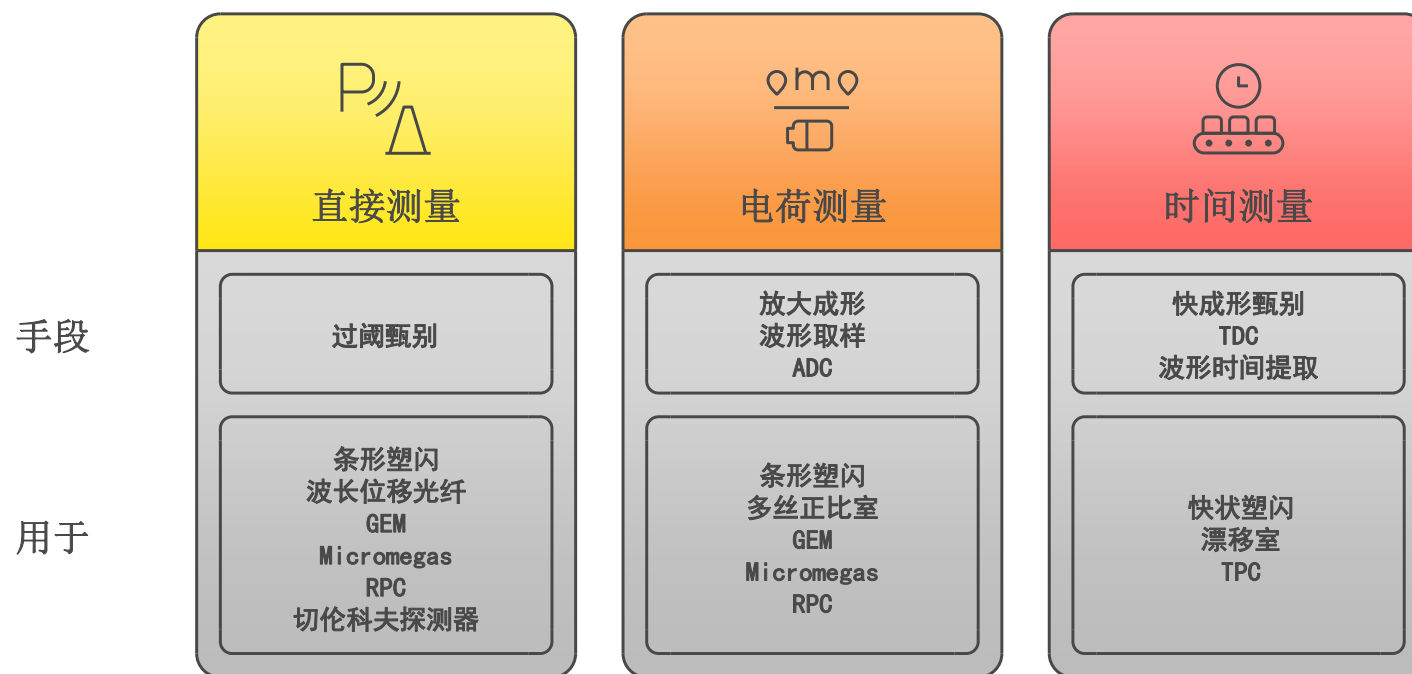
- 典型参数

- 有效面积：数十cm × 数十cm
- 位置分辨：~100 μm

- 信号读出

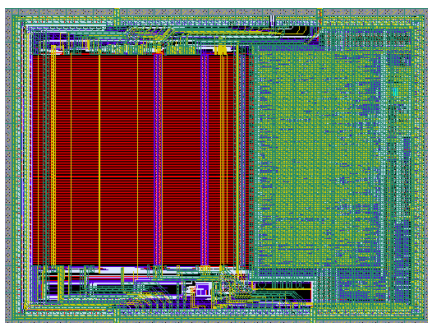
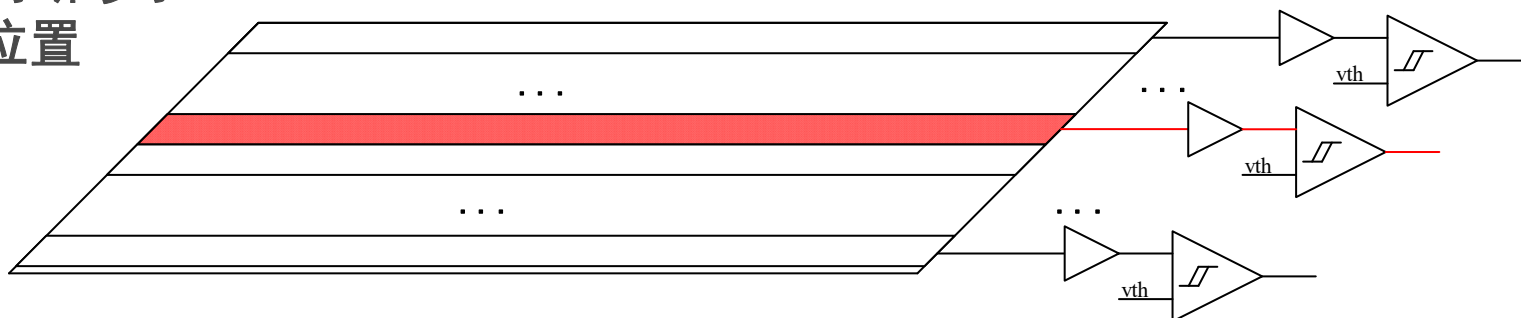
- 二维条读出
 - 数千~万通道
 - 可编码压缩
- 电荷重心定位
- Micro-TPC方法定位

缪子成像中的核电子学

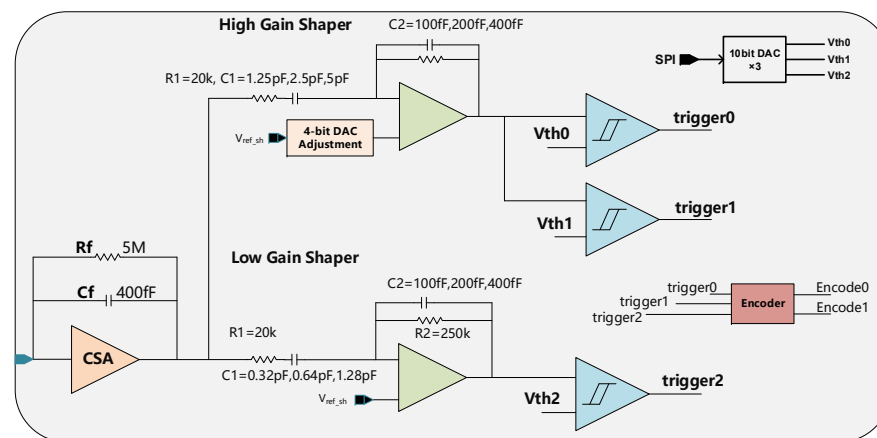


过阈甄别

通过比较器判断缪子
击中探测器位置



Credit: F. Dulucq et al 2017 JINST 12 C02038

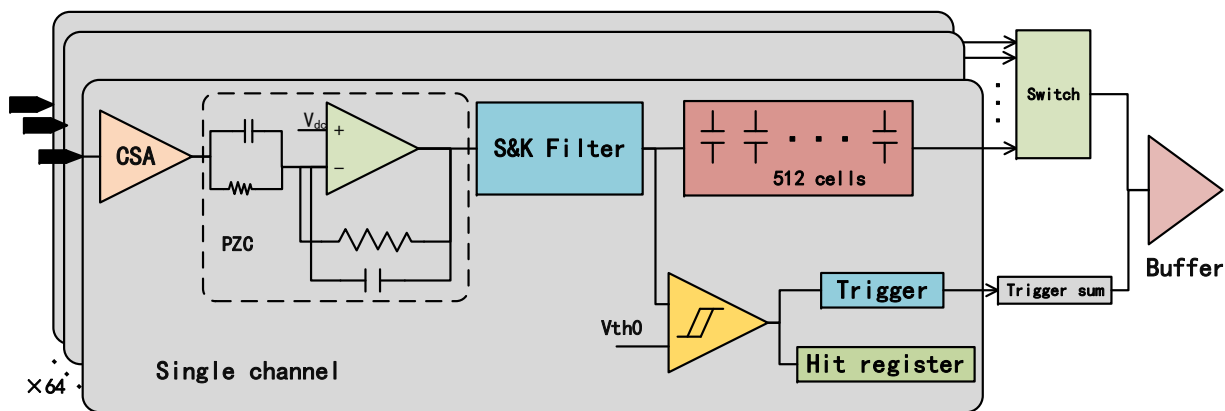
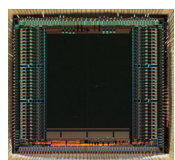
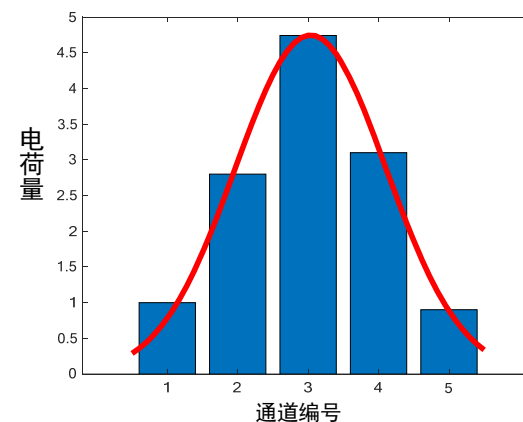
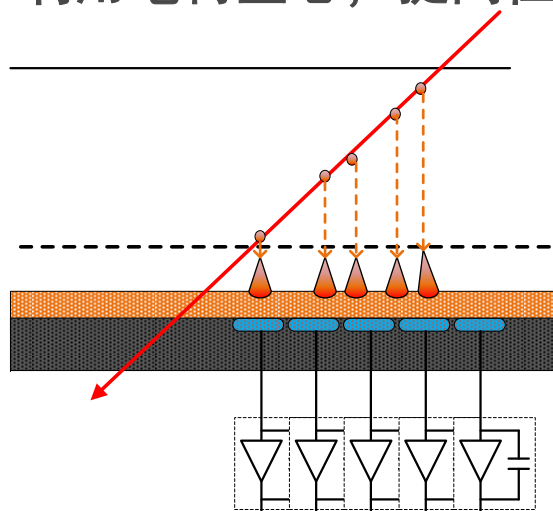


利用过阈甄别芯片（多姆山成像中读出GRPC探测器）

电荷测量

通过测量不同位置电荷量，利用电荷重心，提高位置测量精度

- 当探测器的读出单元足够精细时，电荷扩散会在不同的读出条上产生信号
- 信号的加权平均能提高定位精度

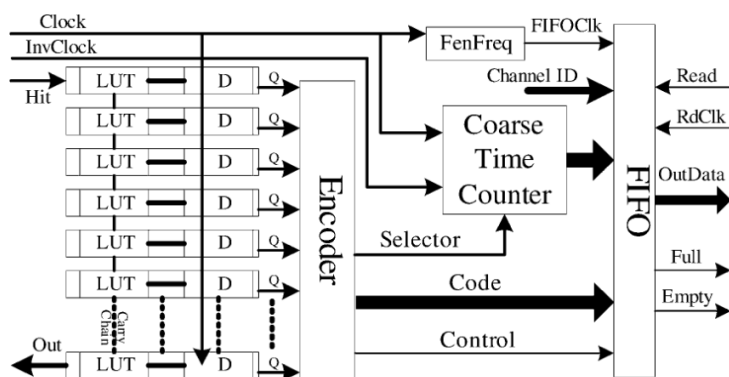
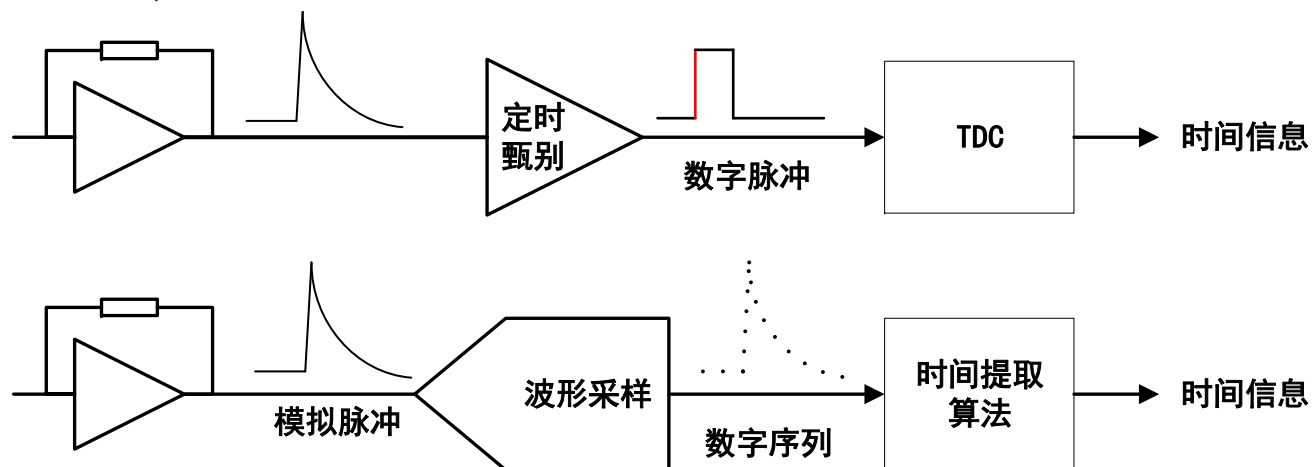


电荷灵敏+波形读出芯片，用于高分辨MPGD读出

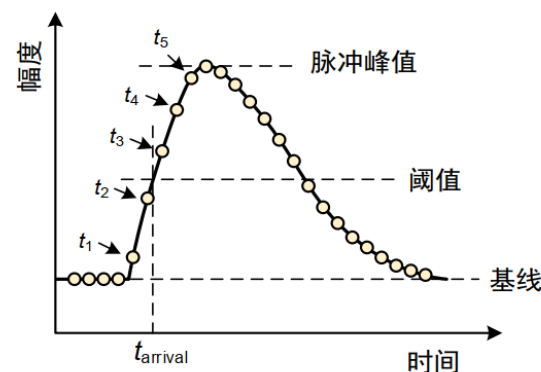
时间测量

通过测量不同读出单元的时间，重建缪子径迹/击中位置

- 甄别电路+TDC
- 波形数字化+时间提取



TDC@FPGA工作原理



基于波形数字化实现高精度时间测量的基本原理

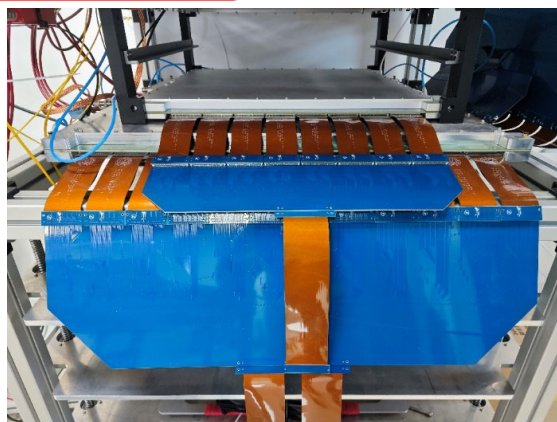
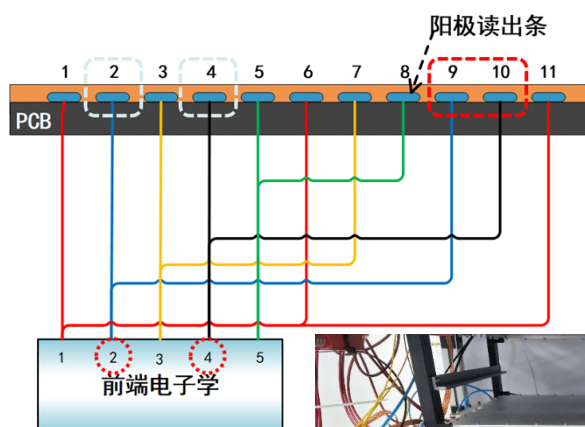
缪子成像中的核电子学



Micromegas读出电子学

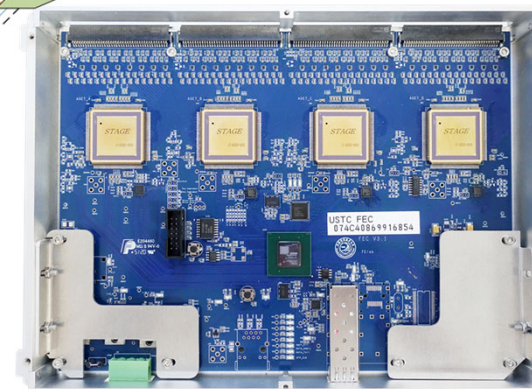
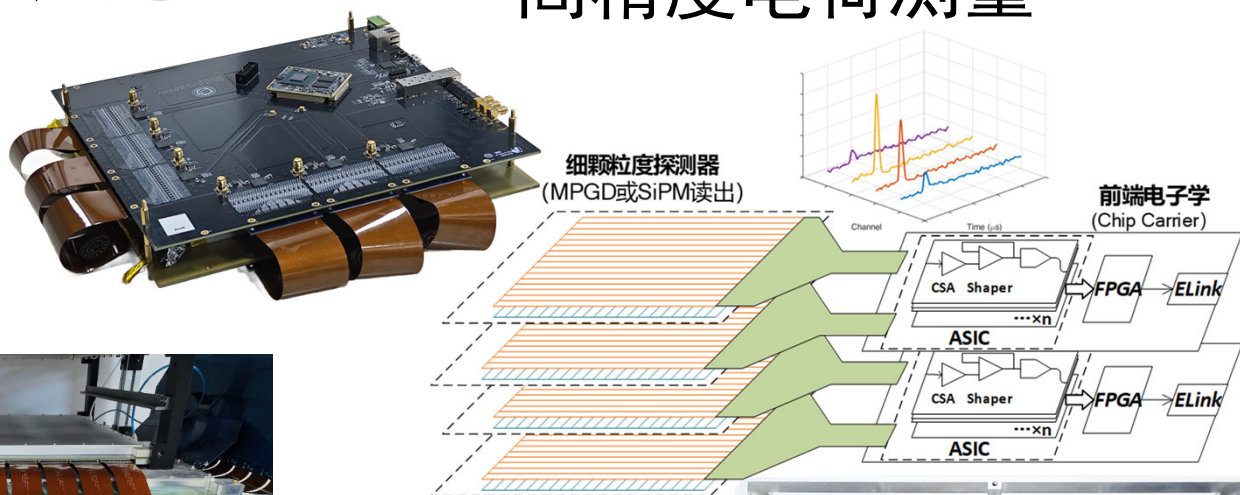
- 通道复用方案

- 利用特定映射关系减少读出电子学通道



- 前端电子学

- 高集成度
- 高精度电荷测量



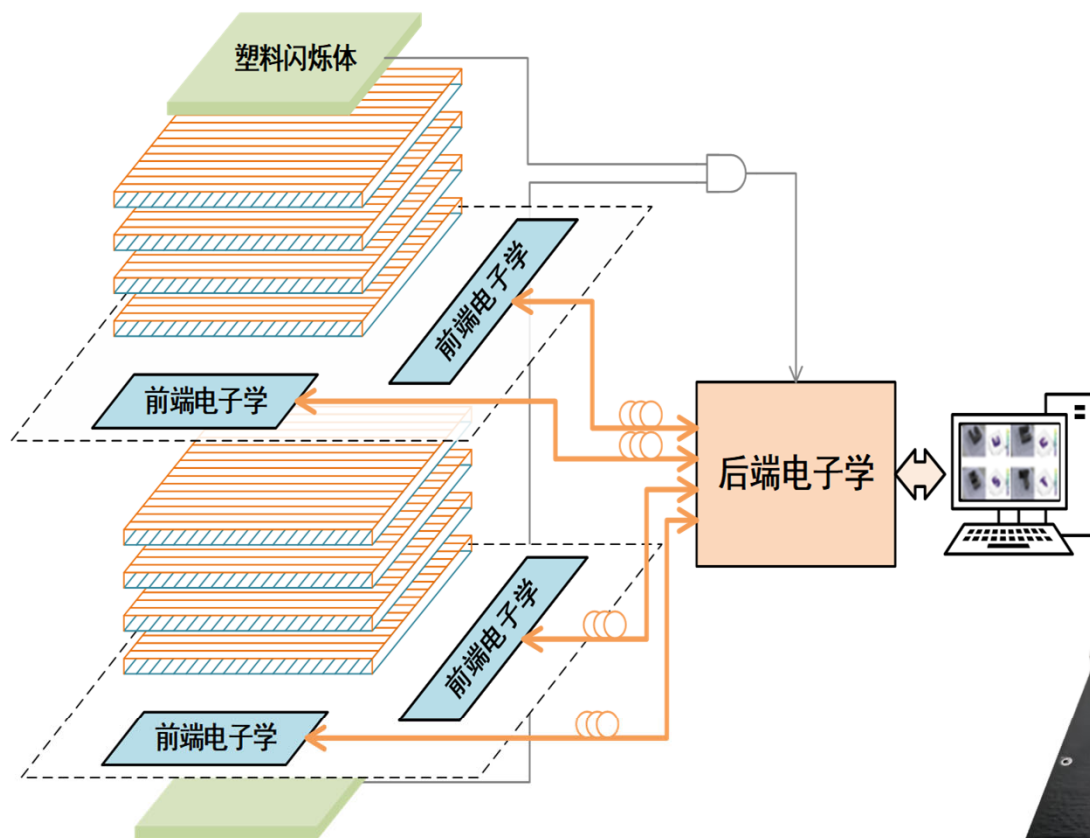
Shubin Liu, Siyuan Ma, Binxiang Qi, etc. An Extensible Induced Position Encoding Readout Method for Micropattern Gas Detectors, IEEE TNS, 2018

Yu Wang, Shubin Liu, Hao Zhuang, et al., A High Compression Ratio Channel Multiplexing Method for Micro-pattern Gaseous Detectors, IEEE TNS, 2025

2025/7/15

186

Micromegas读出电子学



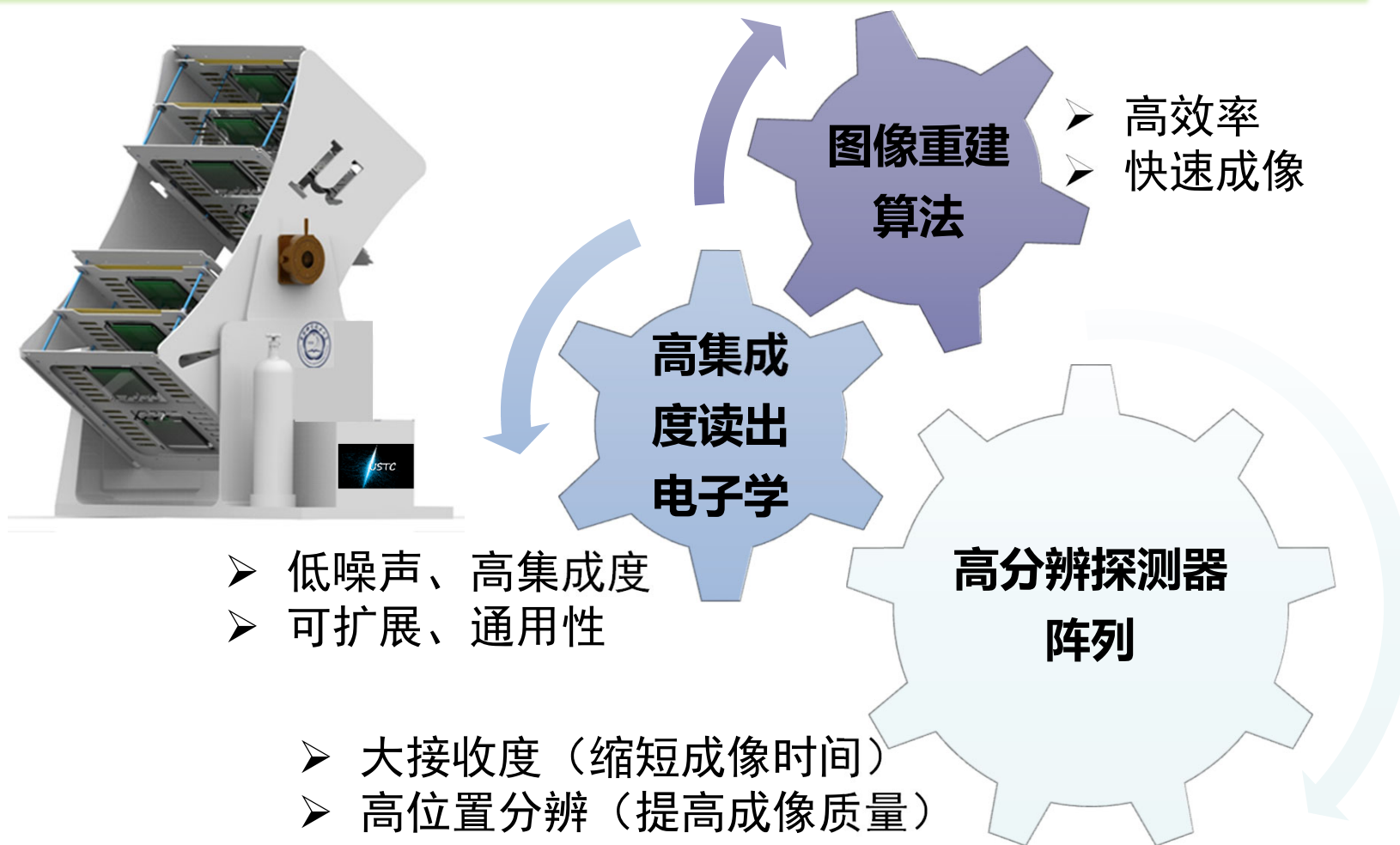
- 可扩展读出架构

- 通过光纤实现前后端电子学互联
- 利用时分复用实现数据、触发和命令分发



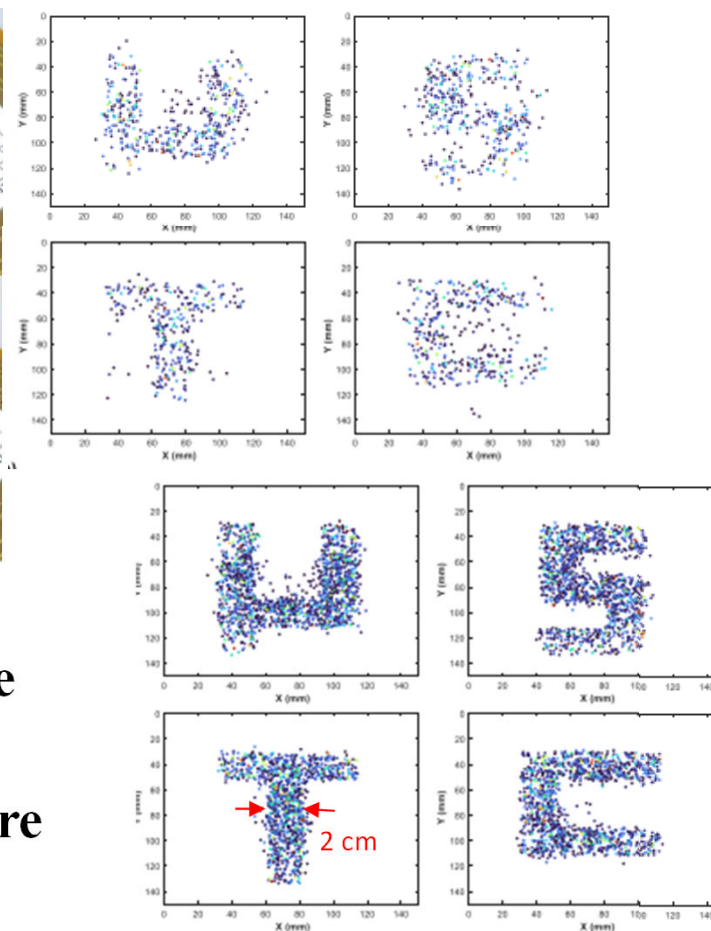
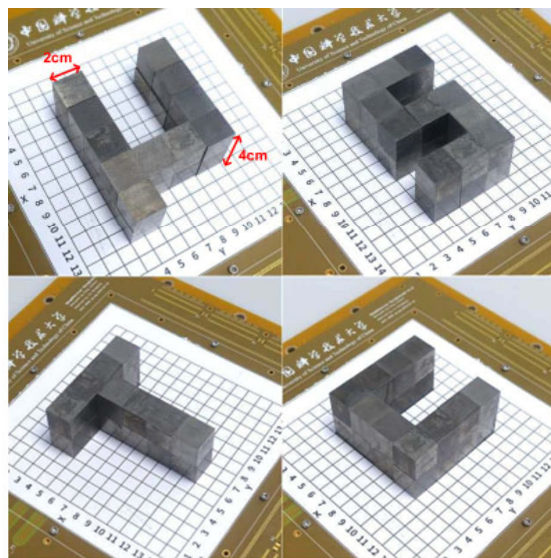
高分辨缪子成像装置 (μ STC)

μ Scattering tomography & Transmission imaging facility



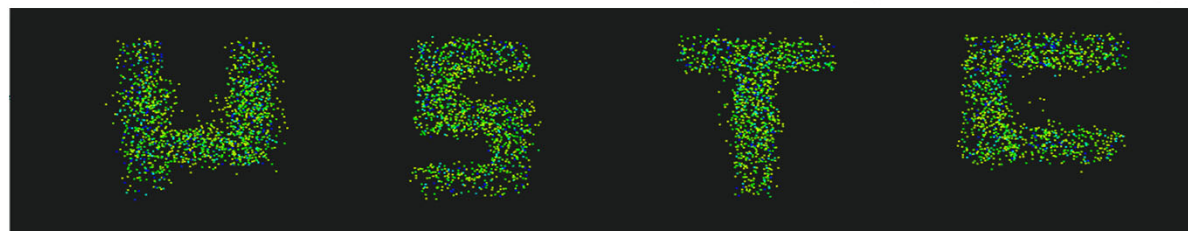
国家杰出青年科学基金 (No.12025504) 资助

μ STC 散射成像验证

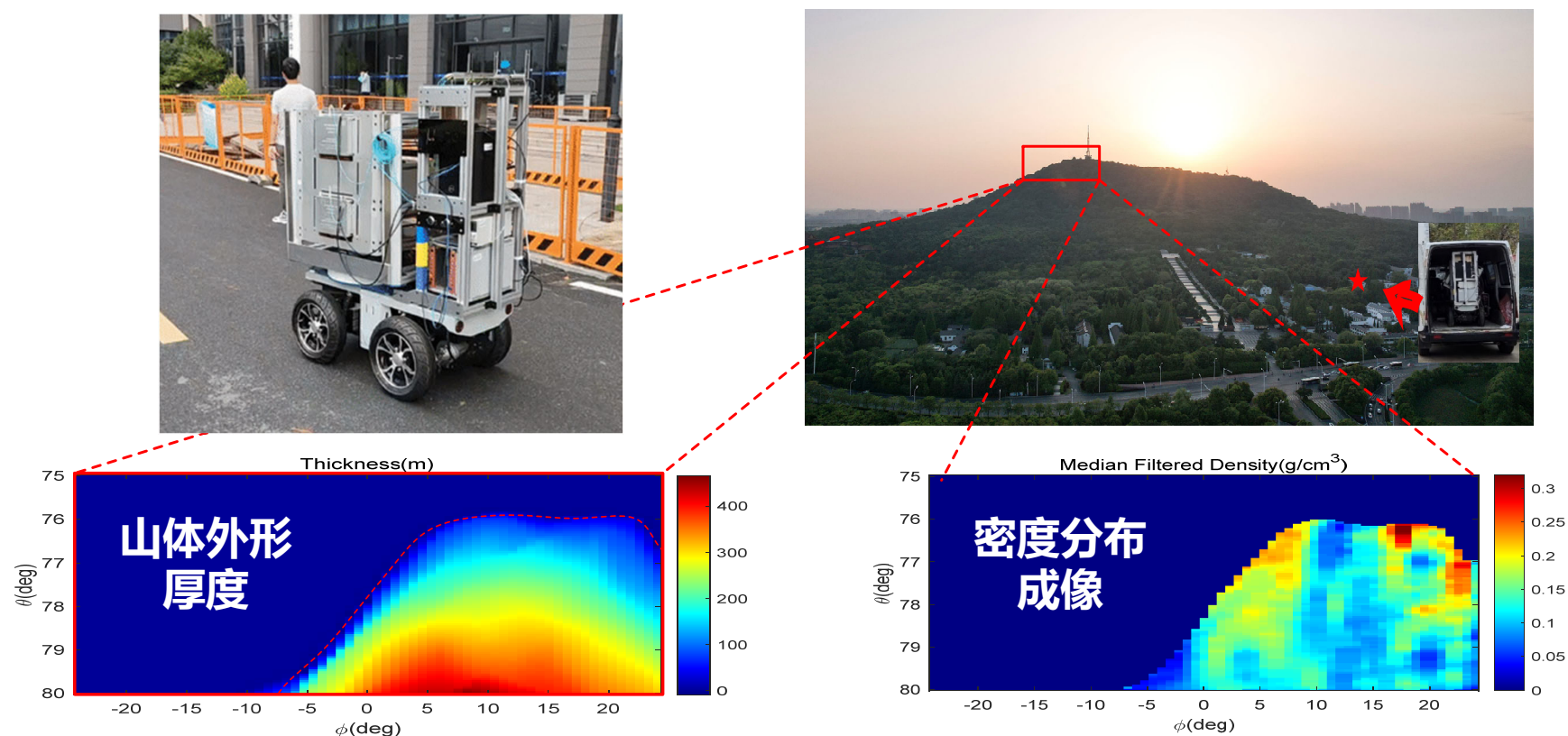


4-hour exposure

24-hour exposure



古火山透射成像验证



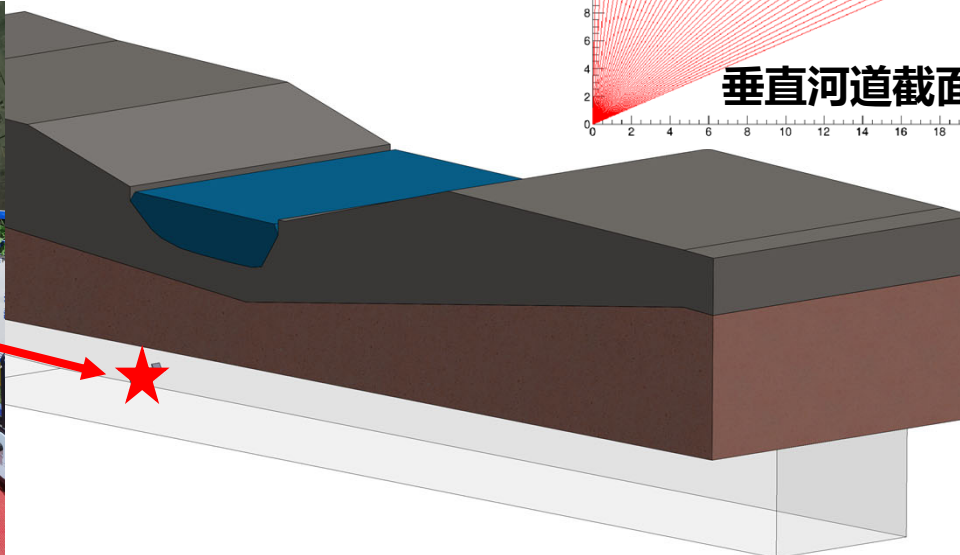
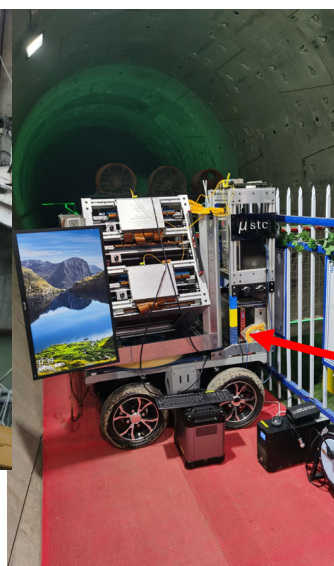
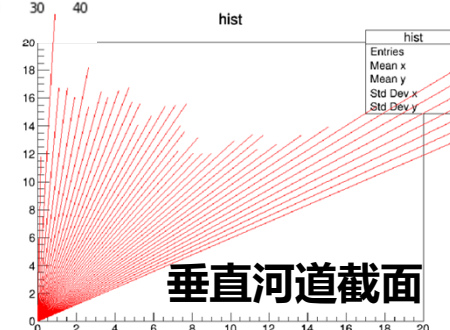
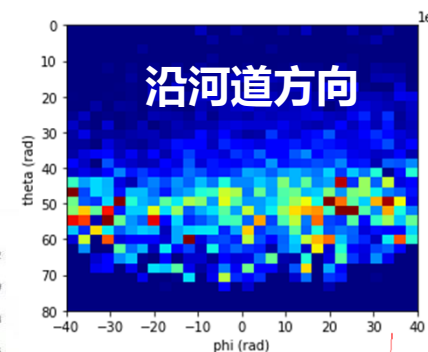
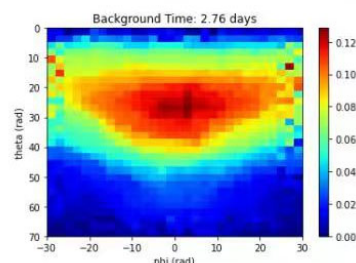
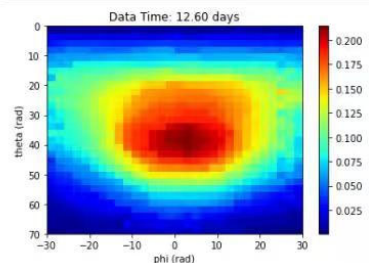
The path length of a muon through an object

The density distribution after median filtering

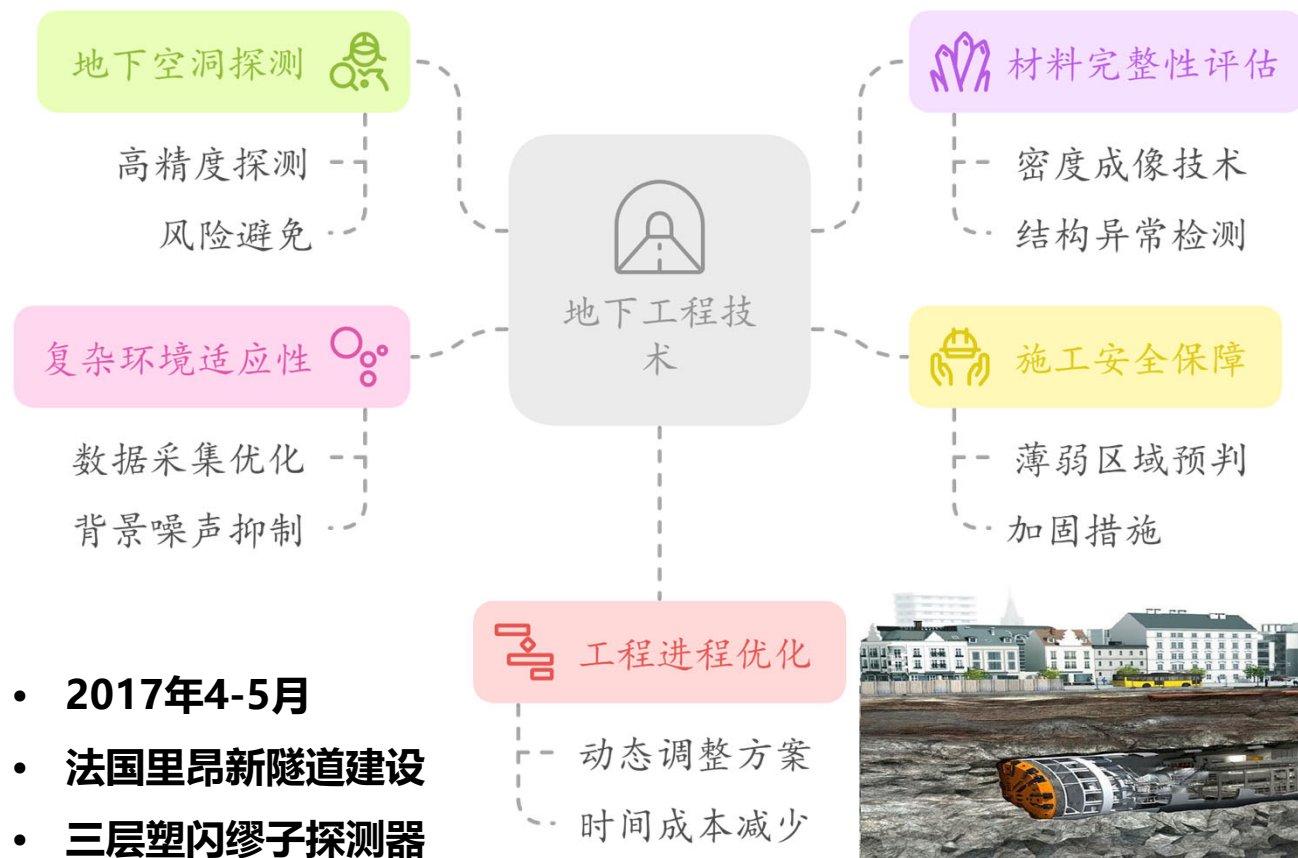
Yu Wang, Zhiyong Zhang, Shubin Liu, et al., A High Spatial Resolution Muon Tomography Prototype System Based on Micromegas Detector, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 69, no. 1, pp. 78-85, Jan. 2022

地铁隧道透射成像验证

- 2022年10月15日-11月6日
 - 合肥地铁3号线施工路段，下穿潭冲河位置
 - 缪子装置样机倾斜30度角，指向河道位置



隧道盾构机运行安全预警&三维地质图像伴随生成



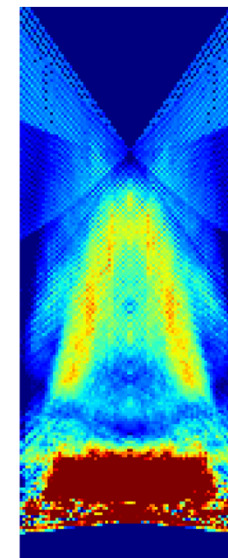
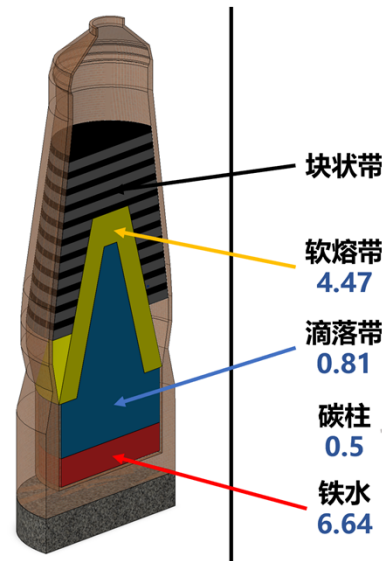
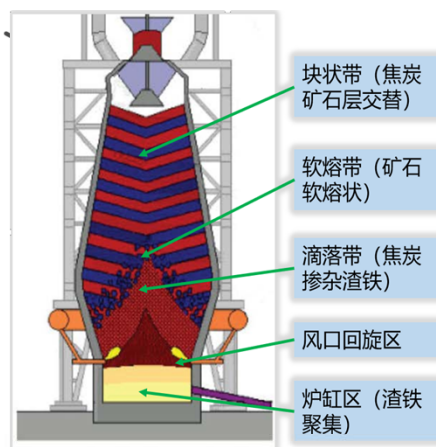
Credit: Leone et al., iScience, 112496 (2025)

在产高炉三维成像



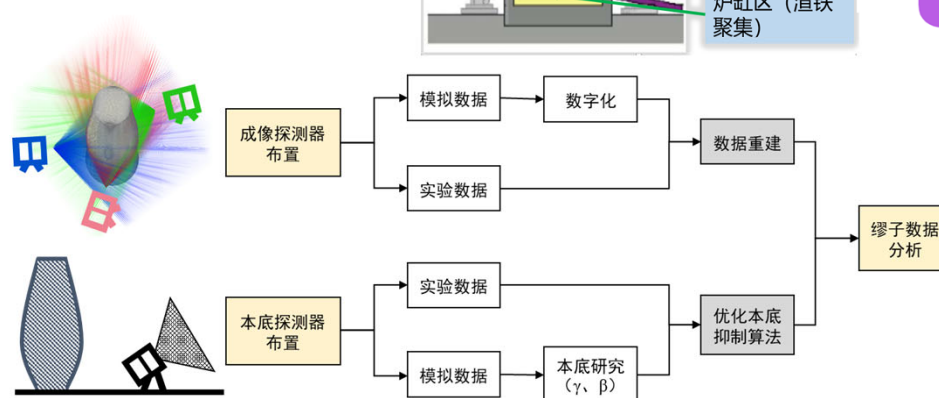
合理布置炉料分布和形状

炉料分布
气流分布
风口回旋区



准确判断炉缸被侵蚀损耗程度

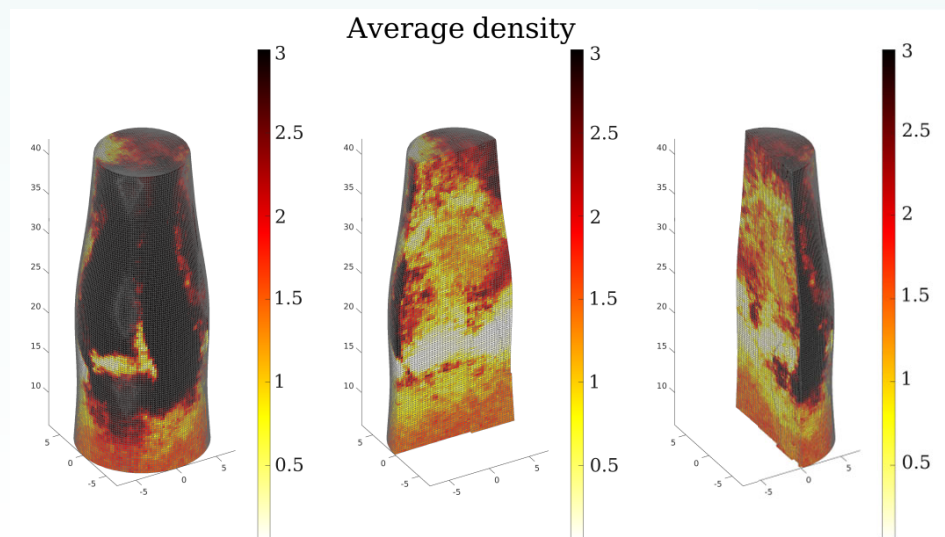
炉衬厚度
侵蚀检测
合理规划



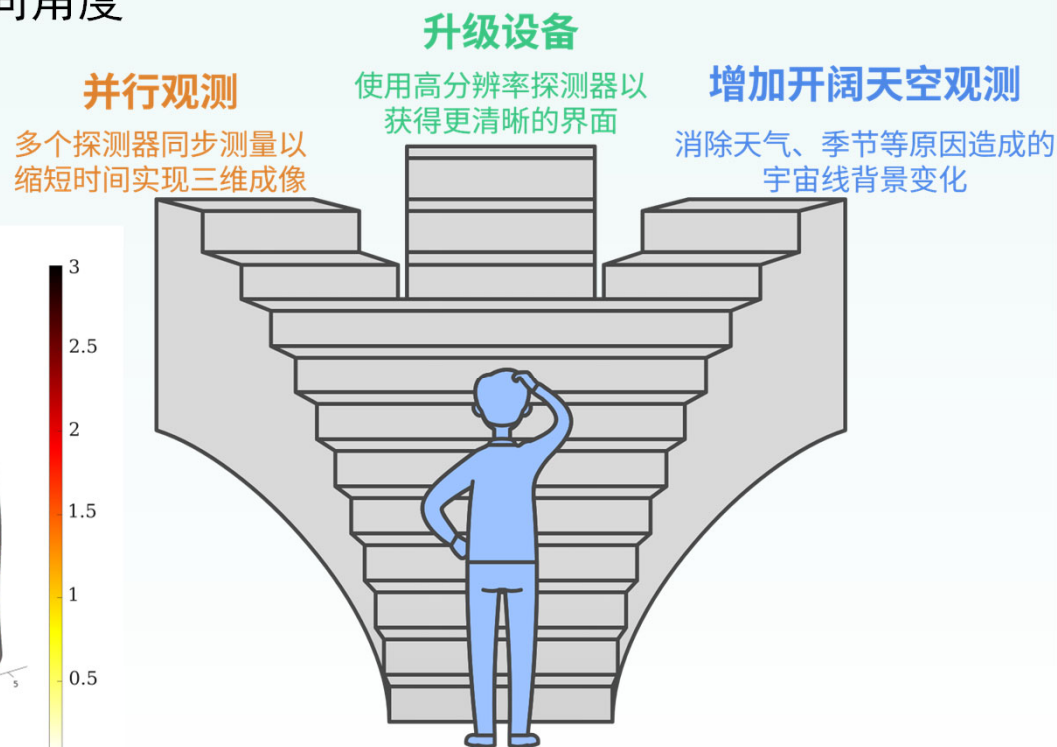
国外开展的研究

欧洲煤铁基金支持下开展了仿真
法国团队对不来梅工厂高炉“三维”成像

- 单台塑闪探测器装置先后测量三个不同角度
- 前后总计耗时近半年
- 软熔带与滴落带之间的界面并不清晰



Credit: Cohu et al., JINST 18, P07004 (2023)



核电子学

立足基础，追求卓越