

核辐射监测可编程片上系统(SOPC) 技术研究进展

防化研究院核防护研究所

肖无云, xiaowuyun@sklnbcpc.cn

2022年11月11日

主要内容

- 研究背景;
- 数字核脉冲处理;
- 建模与仿真;
- 片上系统开发;
- 数据处理;
- 总结与展望。



技术研究进展

研究背景

- 核辐射监测要求:

- 现场快速测量
- 多种信息感知
 - 探测: 有无核辐射/放射性;
 - 防护: 剂量/剂量率;
 - 分析: 放射性核素种类、活度;
 - 处置: 定位、分布范围、效果评价...
- 辐射场/源复杂
- 苛刻环境

便携、低功耗、智能化

多功能

高灵敏、宽量程

高可靠、环境适应性

研究背景

• 现状

- 多种类型：袖珍、手持、车载、机载、固定式、实验室用等；
- 功能单一：报警仪、辐射仪、剂量仪、沾染检查仪、谱仪、计数器、成像仪等；
- 性能一般，信息化、智能化程度较低；
- 研制、生产、使用、维护、升级、退役等全寿期管理成本高；
- 不利于现场、快速、高质量完成监测任务。

研究背景

• 解决方案

- 模拟电路数字化：缩小体积重量，提高性能；
- 片上系统集成：多功能一体化、芯片化；
- 平台化设计：提高兼容性、适应性；
- 方法升级：计数到谱分析及多参数测量，
信号/数据处理新技术等；
- 从单点到网络化。

研究背景

- 目标



研究背景

- 技术手段

- 新型核辐射探测器;
- ASIC;
- 数字核脉冲处理;
- 系统仿真设计;
- FPGA及其开发技术;
- 核信息复原等。

数字核脉冲处理

• 模拟电路数字化

- 延迟线→寄存器/FIFO;
- 放大器→乘法器/移位寄存器;
- 积分电路→累加;
- 微分电路→差分;
- 电阻电容网络→数字滤波器;
- 准高斯成形→梯形成形。

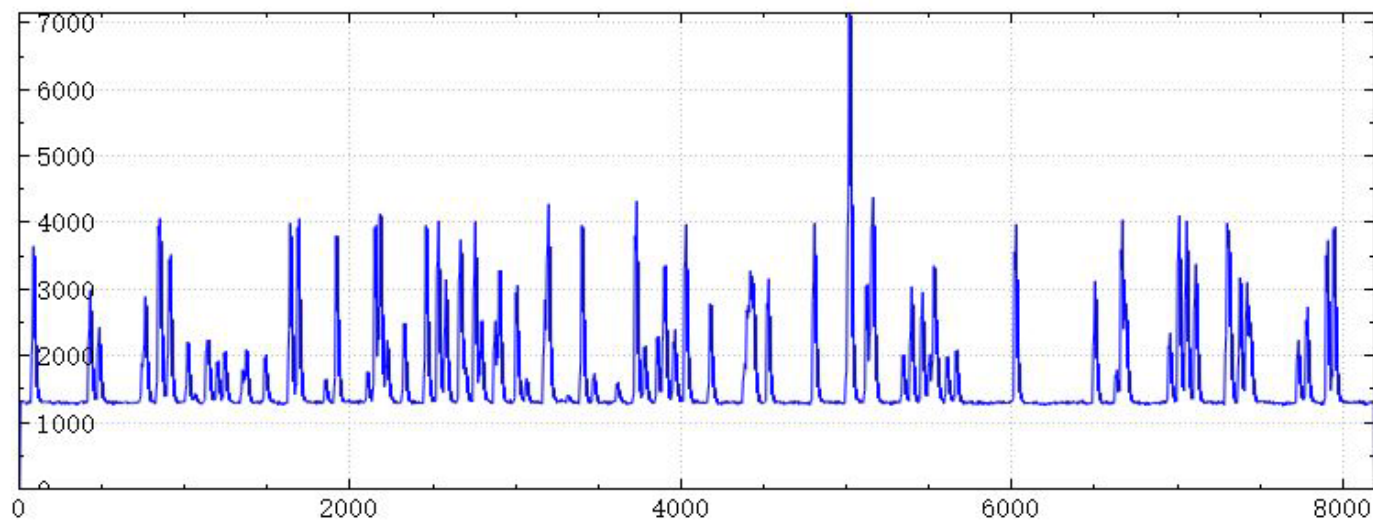
对电路依赖降低。

- 处理能力更强;
- 脉冲窄, 通过率高;
- 无温漂, 性能稳定可靠;
- 体积小, 功耗低;
- 易于多功能集成;
- 设计、调试、使用方便;
- 可扩展、可移植性强;
- 易于升级, 可远程维护。

数字核脉冲处理

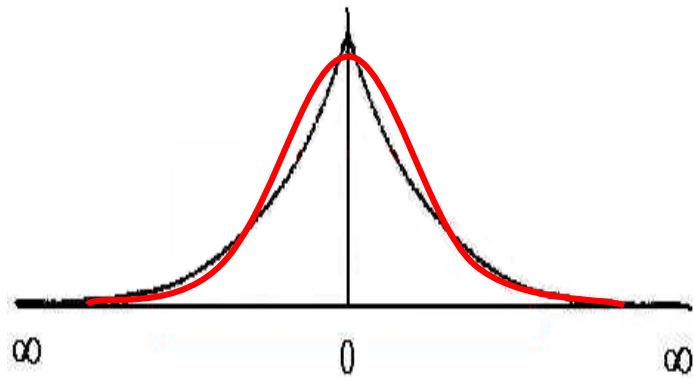
- 一对矛盾

测量精度	处理速度
幅度分辨率	脉冲通过率
信噪比	脉冲宽度
频域滤波	时域成形

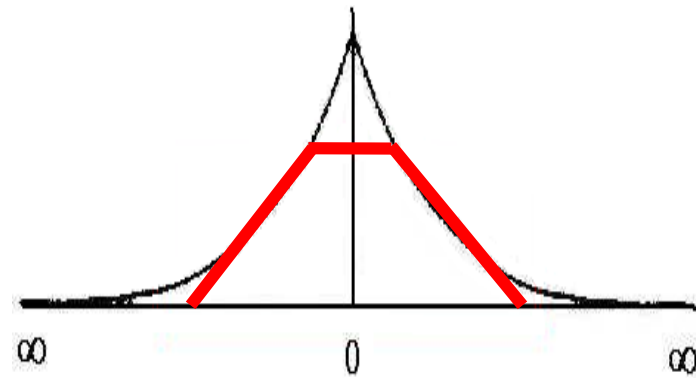
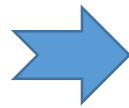


数字核脉冲处理

- 从高斯成形到梯形成形



1967, V. Radeka;
SNR最大化;
阻容网络。

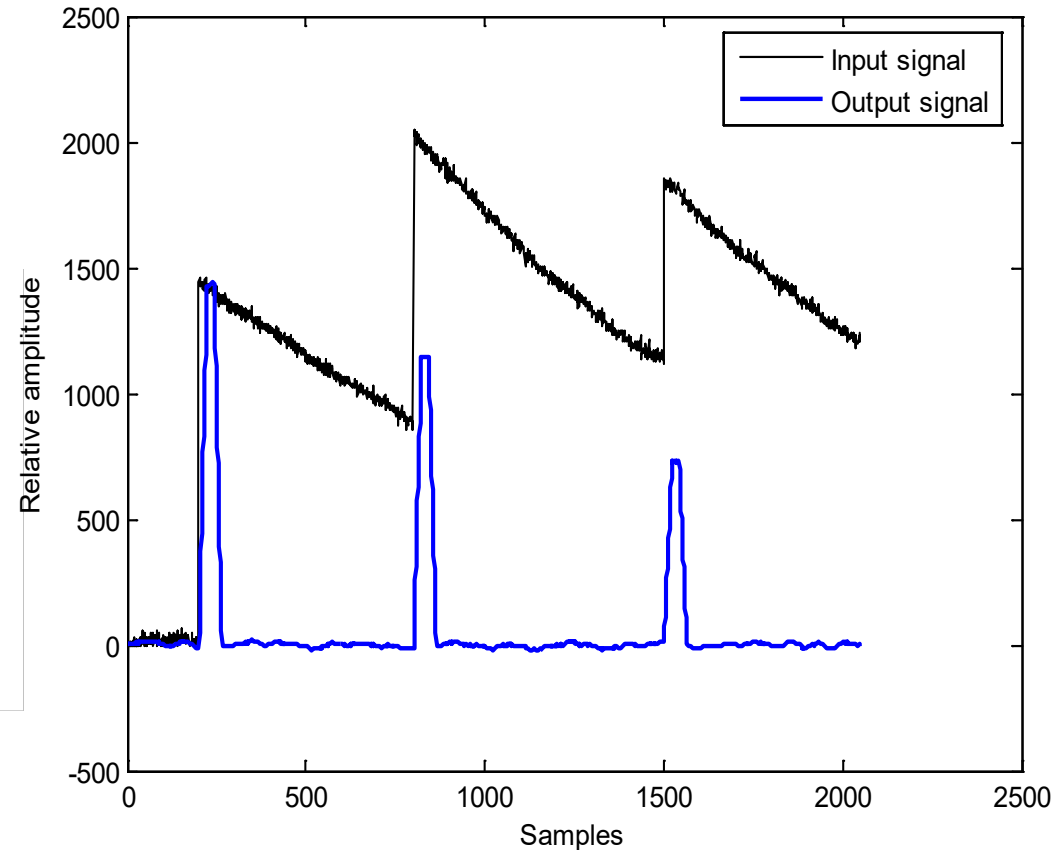
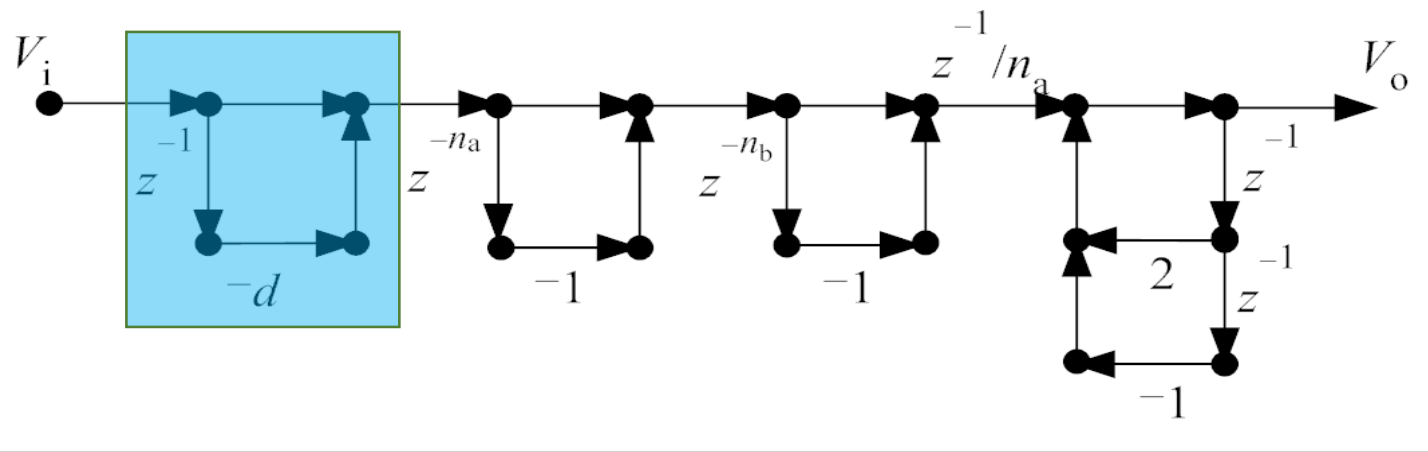


1993, V. Jordanov;
SNR准最佳;
脉宽窄, 脉冲通过率高;
有平顶, 弹道亏损免疫;
数字滤波。

时频域综合约束下的准最佳

数字核脉冲处理

- 基于FPGA的设计实现

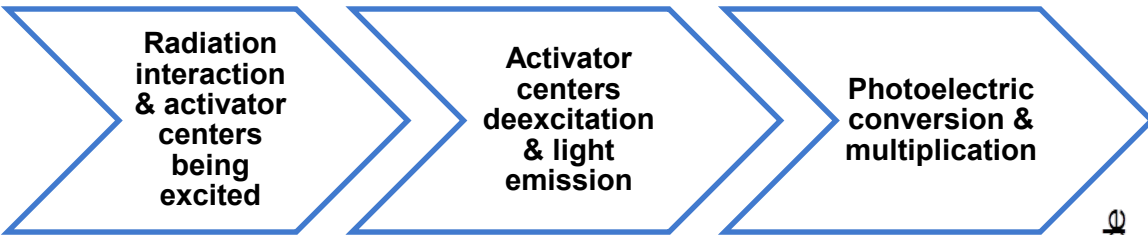


肖无云等, 数字化多道脉冲幅度分析中的梯形成形算法, 清华大学学报, 2005

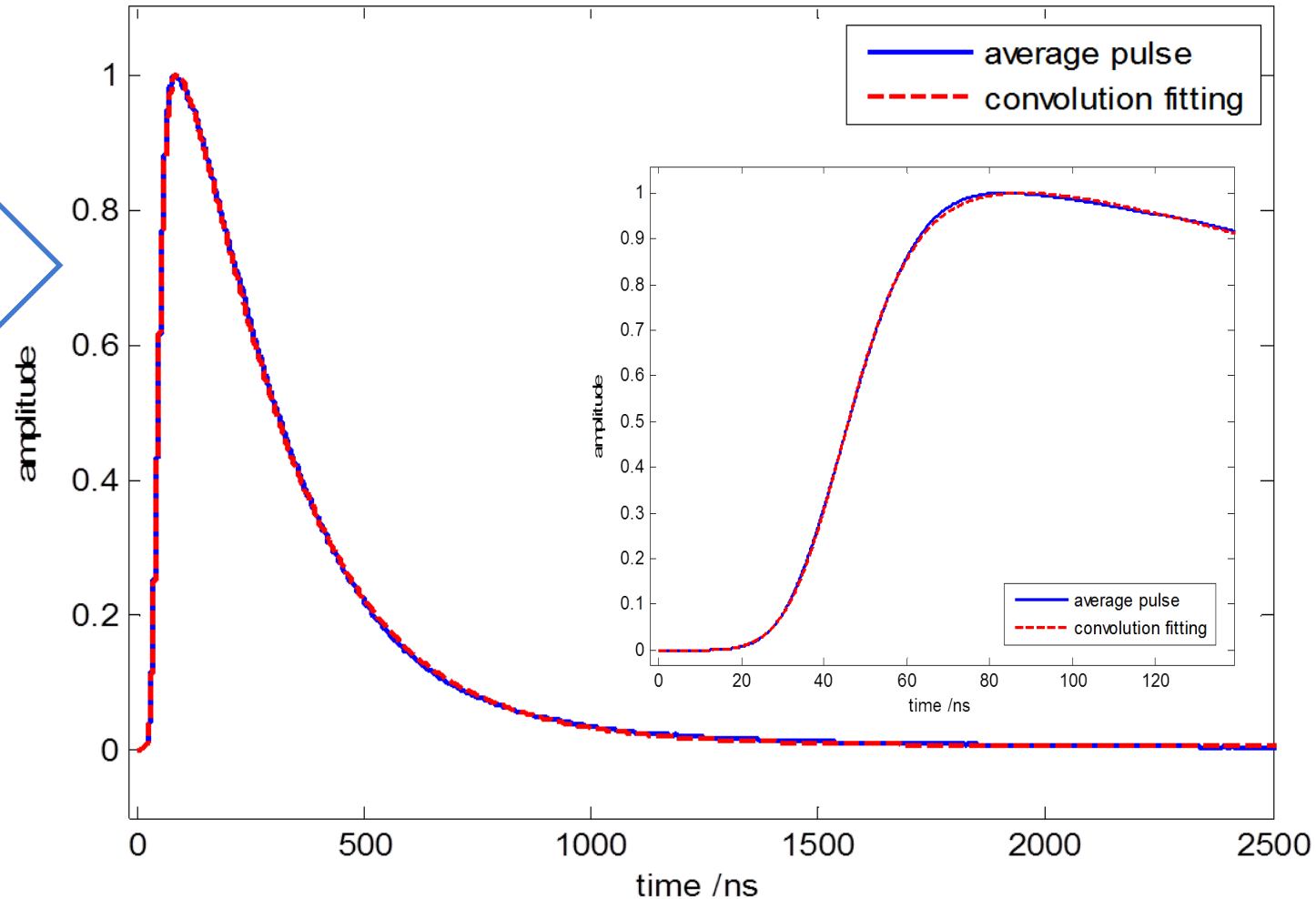
肖无云等, 基于FPGA的数字化核脉冲幅度分析器, 核电子学与探测技术, 2008

数字核脉冲处理

• 闪烁脉冲卷积模型

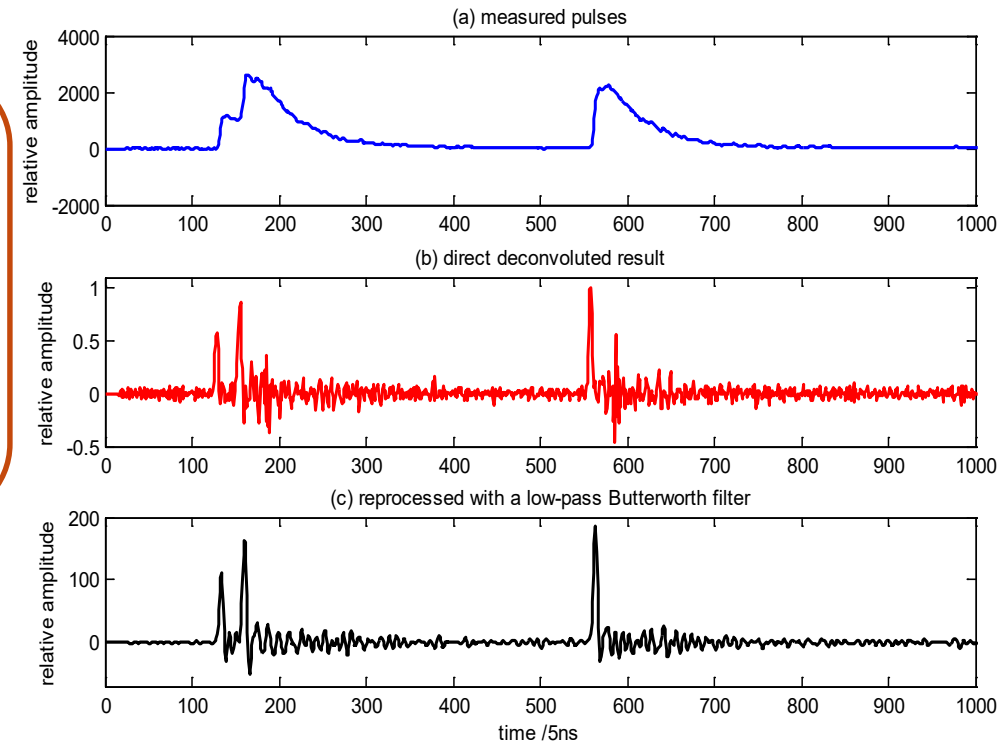
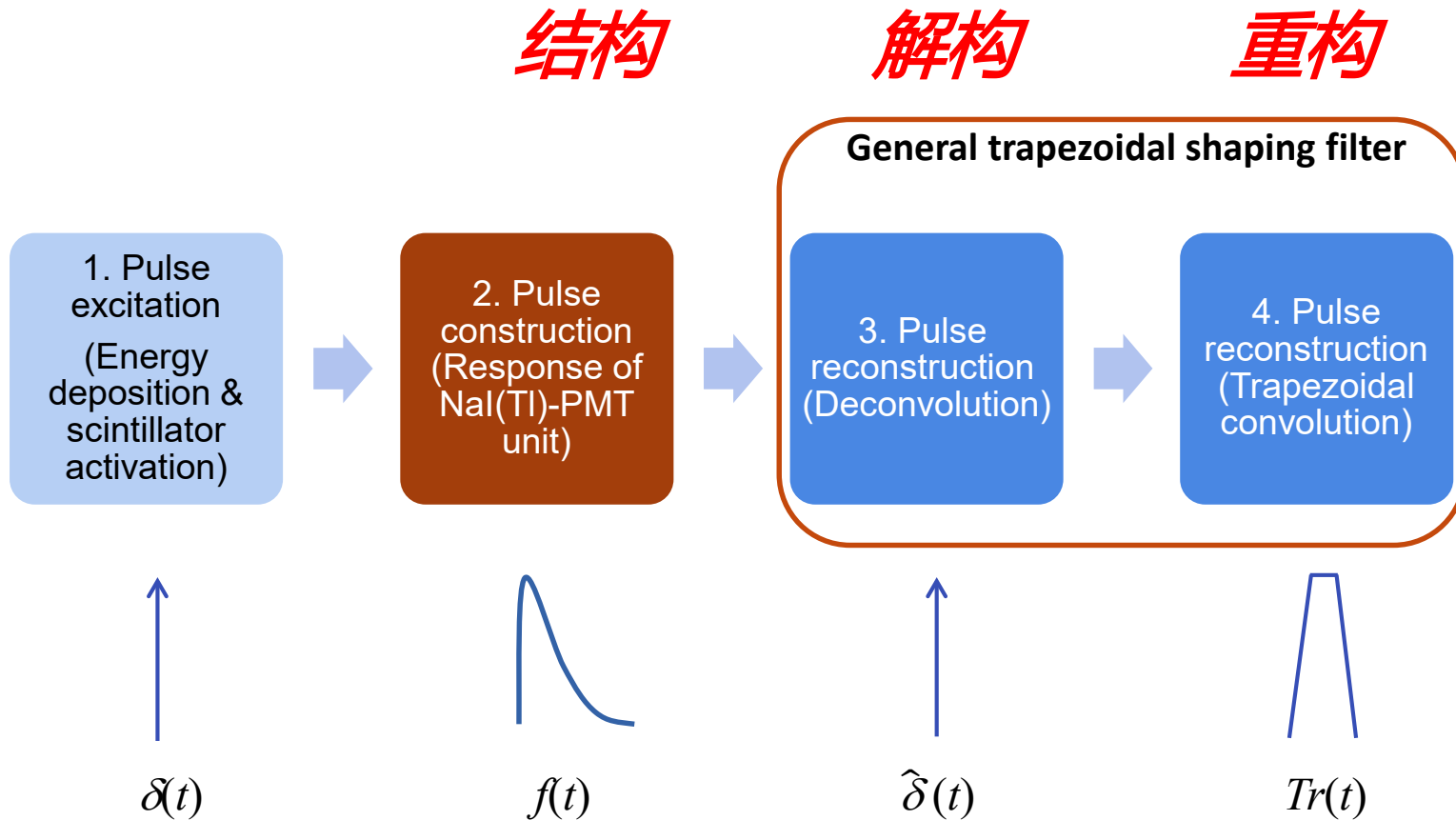


$$R(t) = H \cdot e^{-t^2/2\sigma^2} * \sum_{i=1}^M \eta_i \cdot e^{-t/\tau_i} * \sum_{j=1}^N \kappa_j \cdot e^{-t/\lambda_j}$$



数字核脉冲处理

• 核脉冲反演+梯形成形

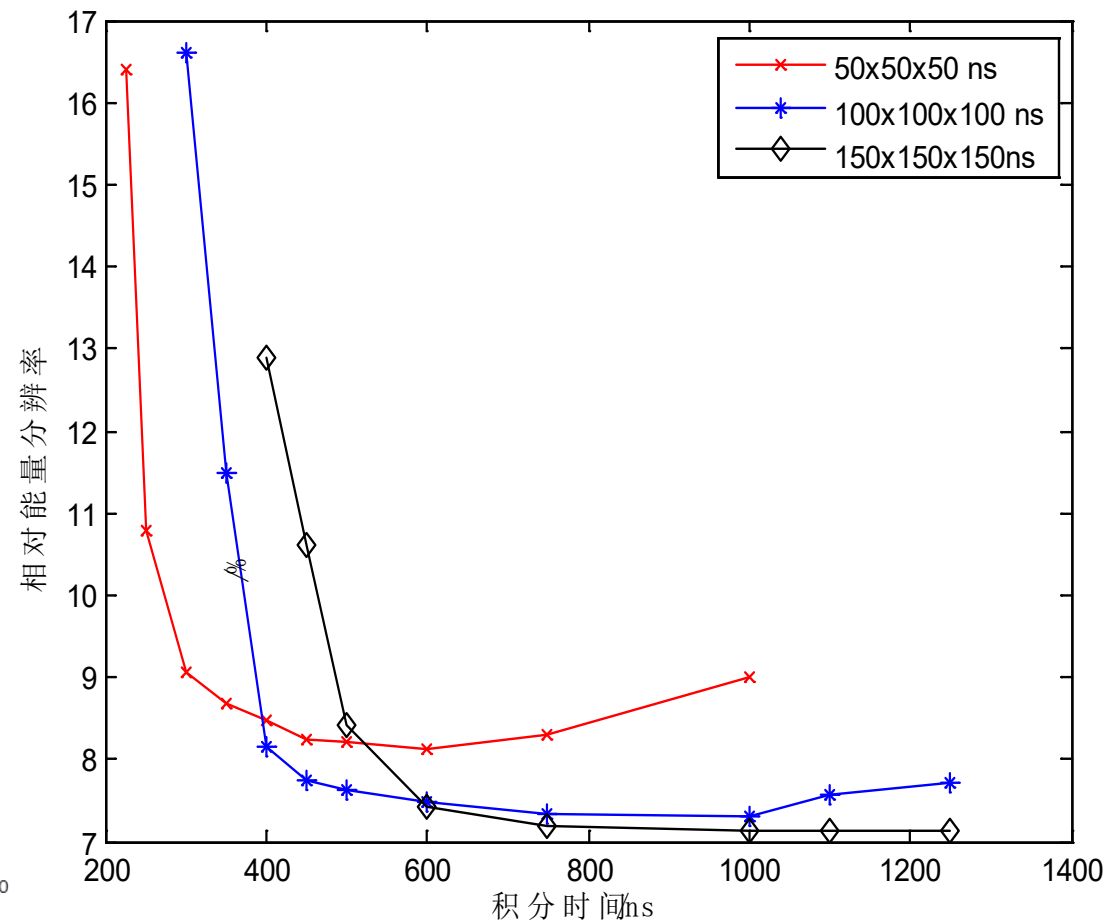
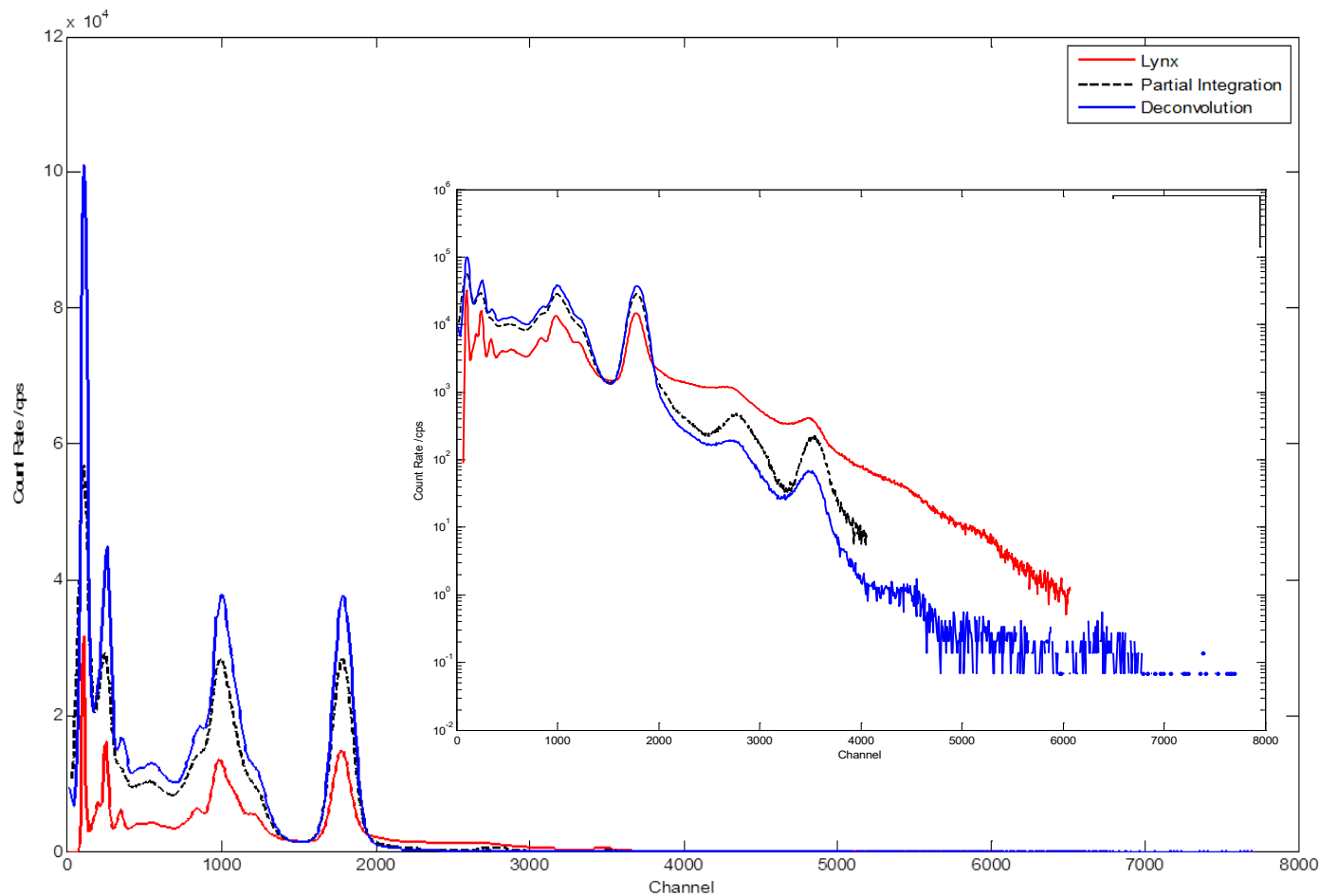


Wuyun Xiao, et al. Model-Based Pulse Deconvolution Method for NaI(Tl) Detectors, NIMA 769, 2015

张羽中等. 双指数衰减法反演NaI(Tl)探测器信号脉冲, 核电子学与探测技术, 38(6), 2018

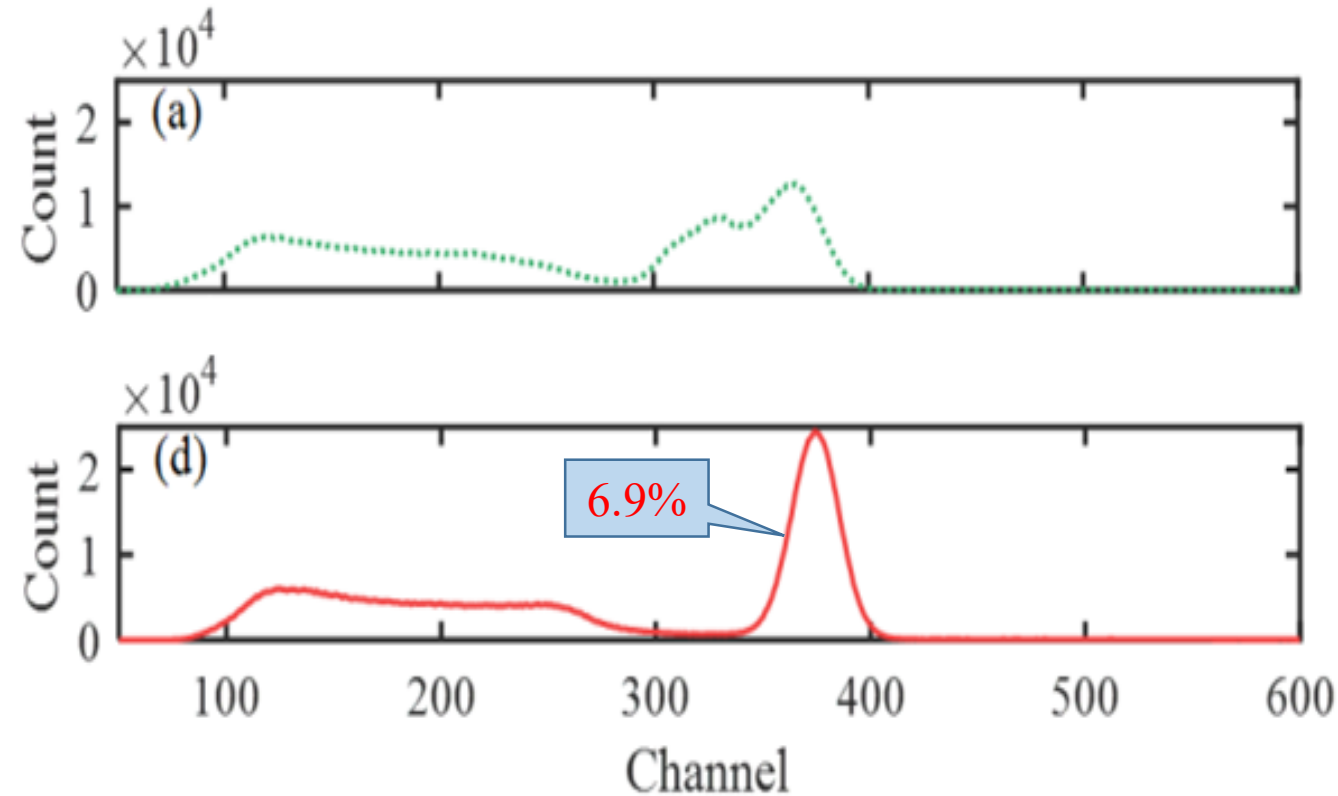
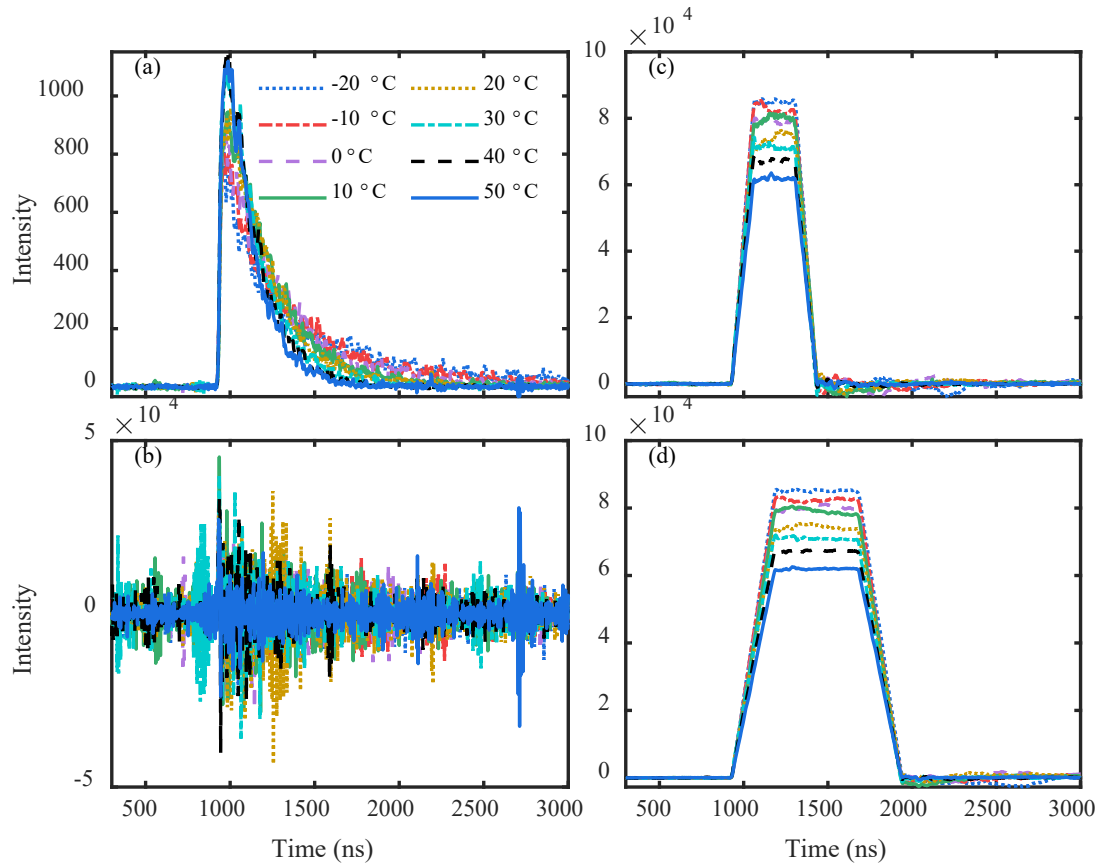
数字核脉冲处理

• 反演闪烁谱仪



数字核脉冲处理

• 核脉冲反演校正温度效应



数字核脉冲处理

• 基线估计与恢复

$$\min: \overline{v^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} \pi(a^2 + \frac{b^2}{\omega^2}) |H(\omega)|^2 df,$$

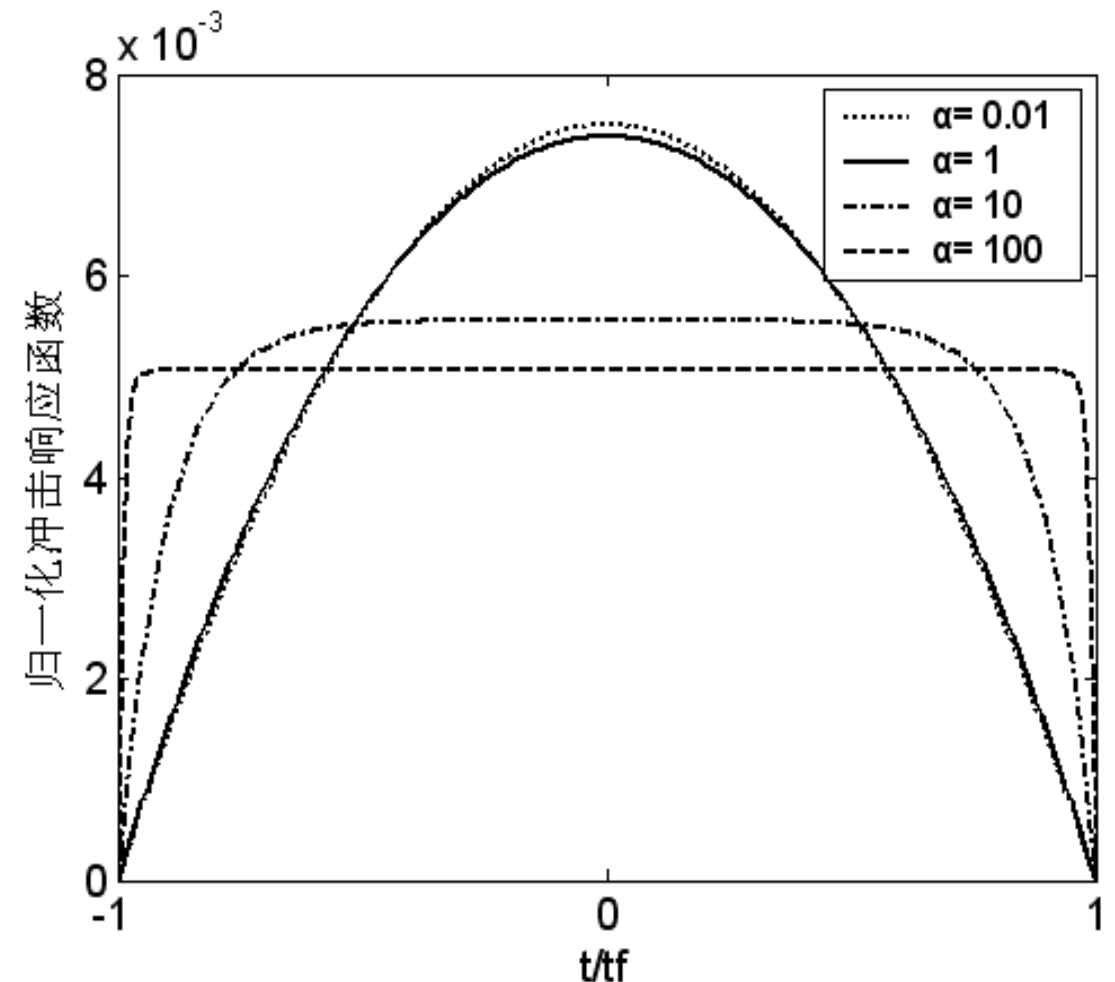
$$\text{s.t.: } \int_{-t_f}^{+t_f} h(t) dt = 1,$$

泛函变分

$$h(t) = 0, \quad |t| \geq t_f.$$

$$h(t) = \frac{1 - \cosh(t/t_c) / \cosh(\alpha)}{2[t_f - t_c \tanh(\alpha)]}, \quad |t| \leq t_f$$

$$\alpha = \tau_f / \tau_c$$



建模与仿真

• 技术基础

- 核辐射与介质相互作用机制及截面已掌握，MC软件成熟；
- 探测器及核电子学模型与参数清楚；
- SIMULINK建模仿真工具强大。



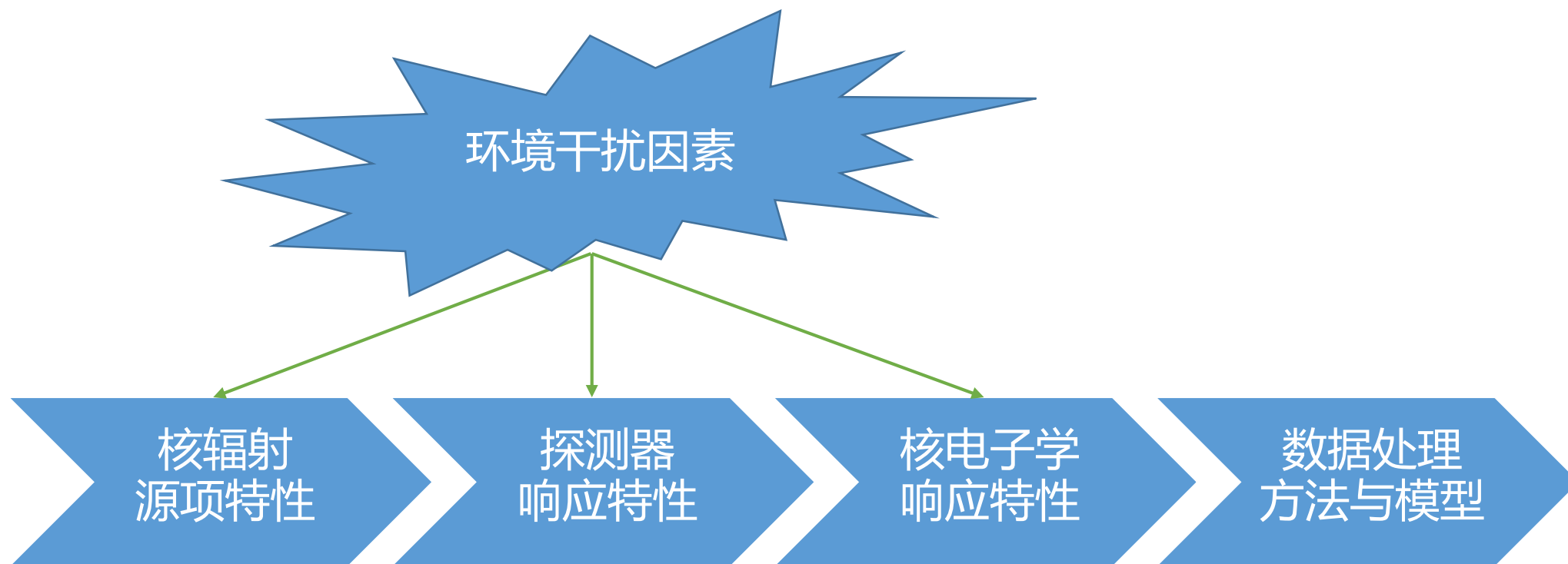
建模与仿真

- 计算机仿真优点

- 无需探测器、核电子学等硬件，廉价；
- 灵活、便捷地调整模型与参数；
- 直观、动态地看运行结果；
- 高效地研究理论、方法、算法；
- 系统、深入理解掌握核探测过程；
- 特别适合教学演示。

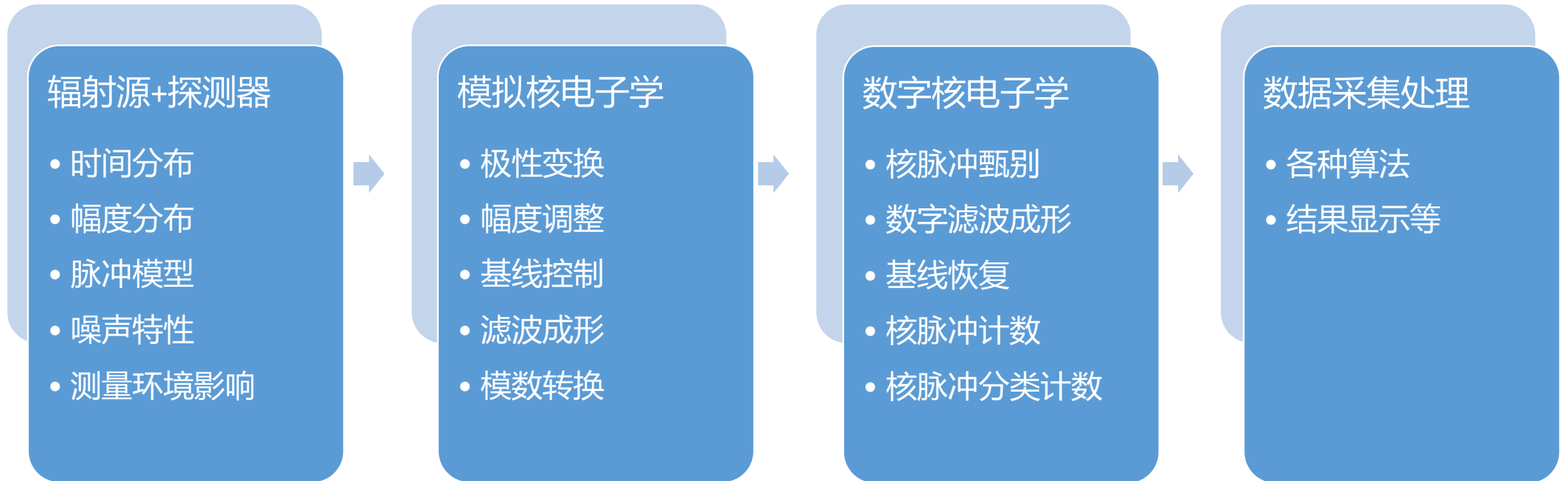
建模与仿真

- 核探测系统建模



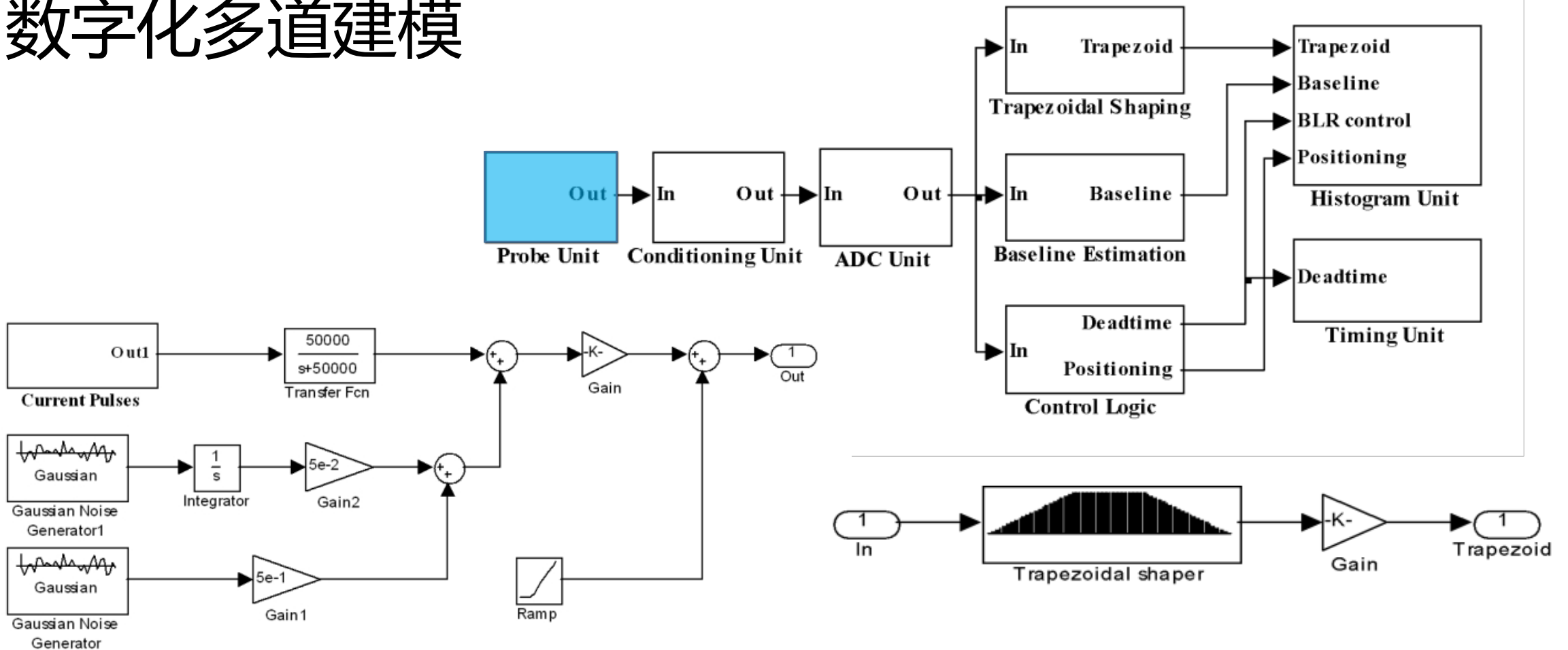
建模与仿真

• 核探测系统建模



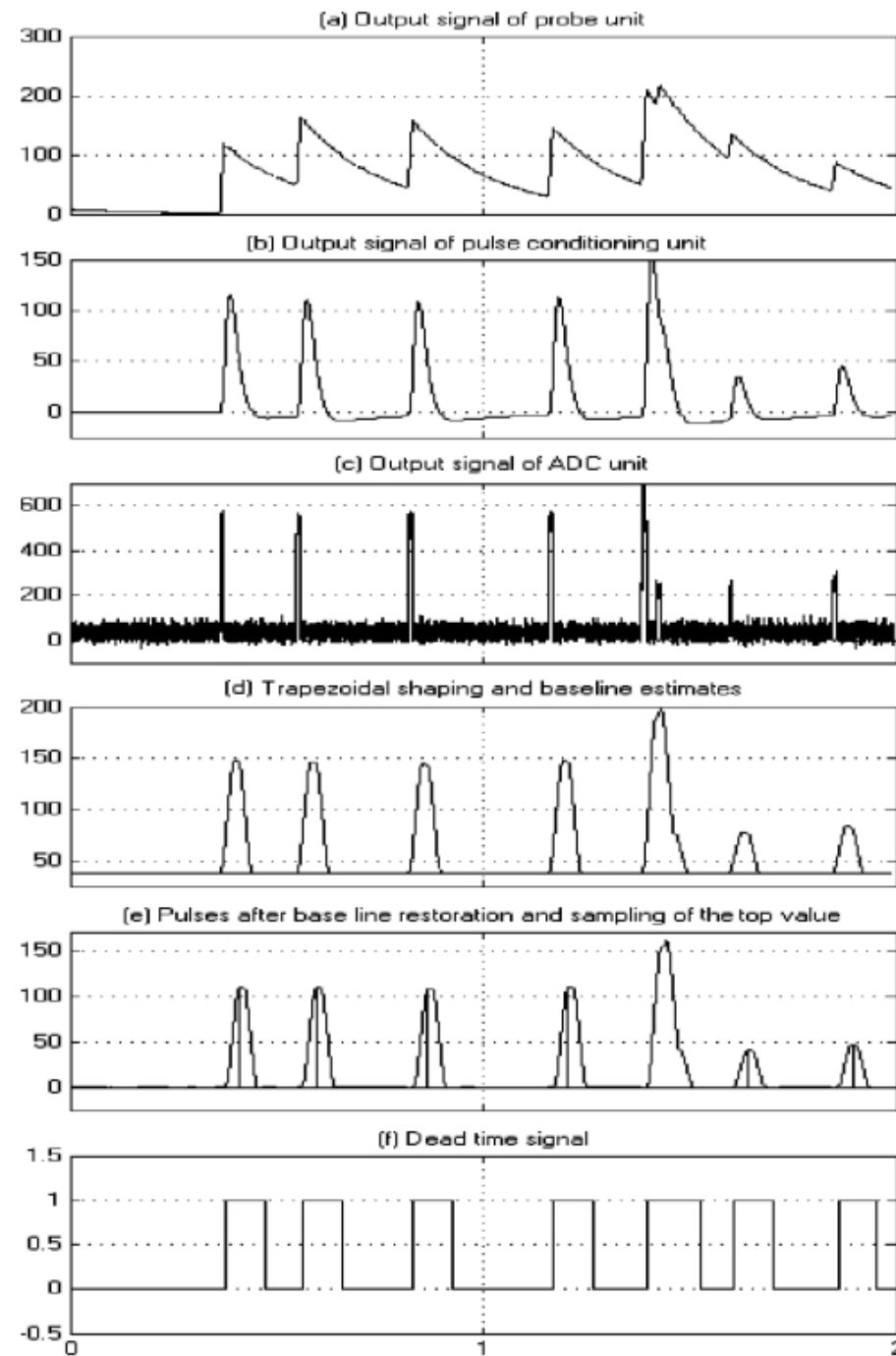
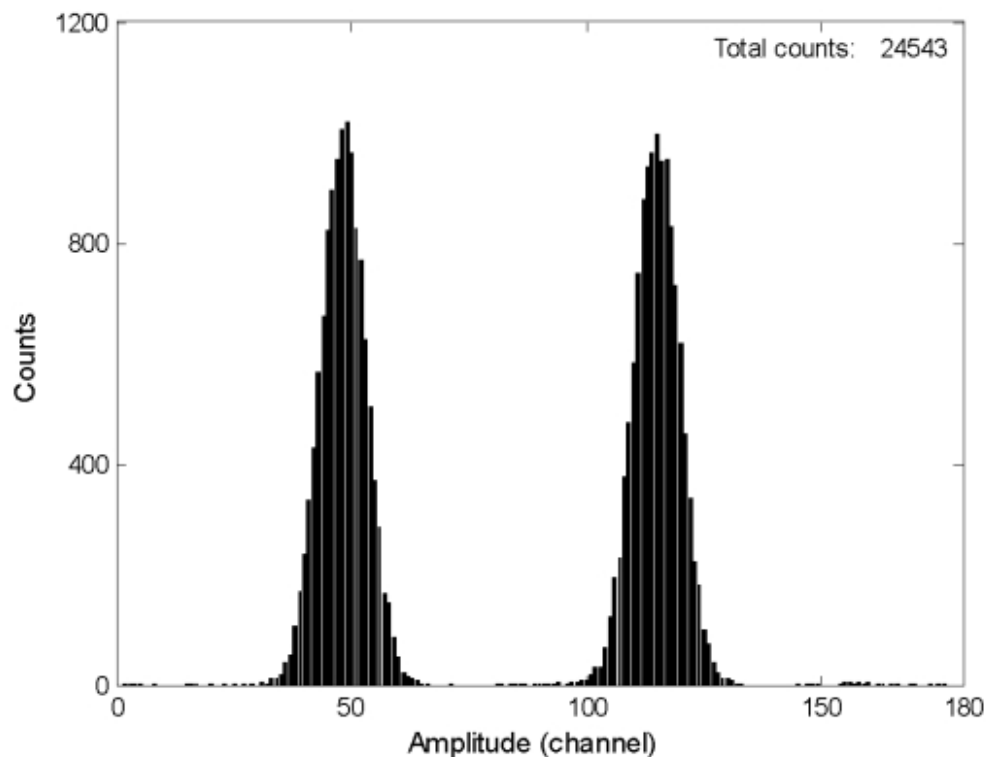
建模与仿真

• 数字化多道建模



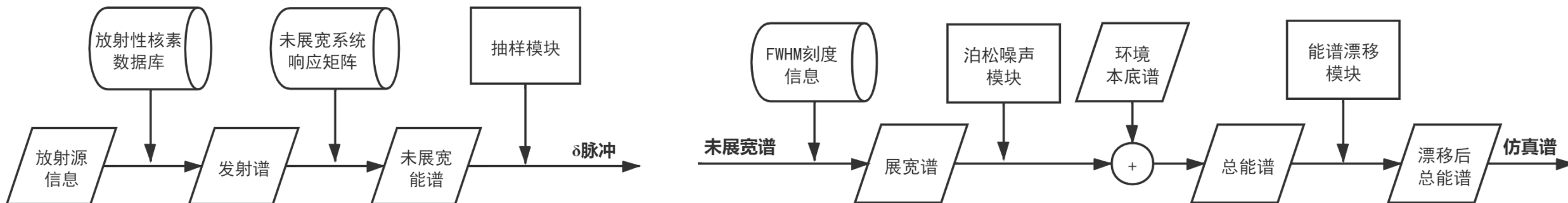
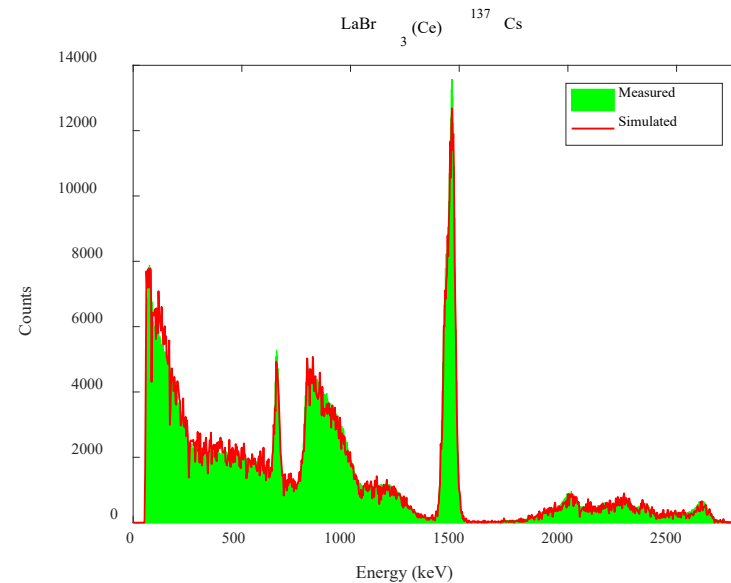
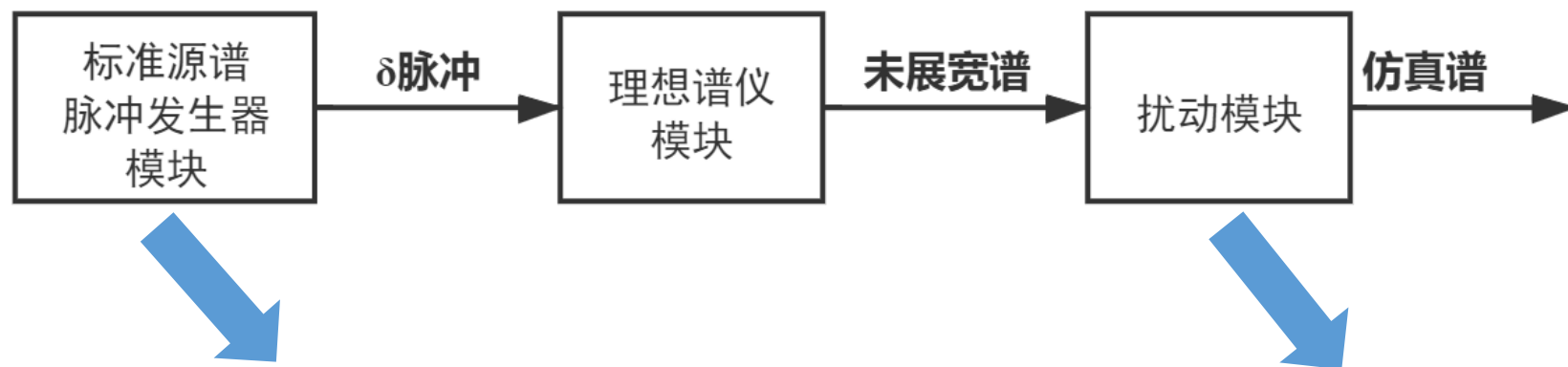
建模与仿真

• 数字化多道仿真



建模与仿真

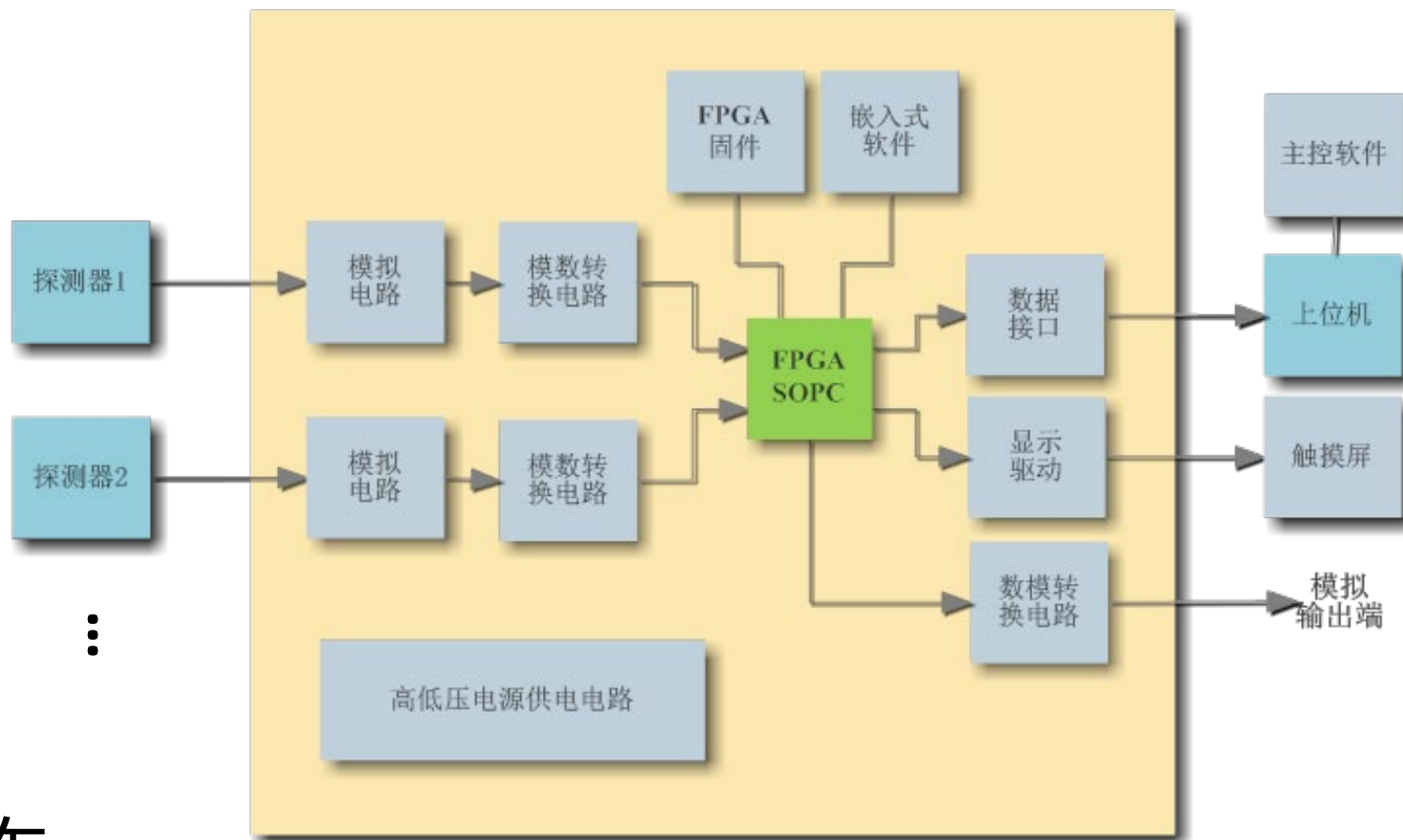
• 溴化镧谱仪系统建模与仿真



数字系统开发

• 硬件平台架构

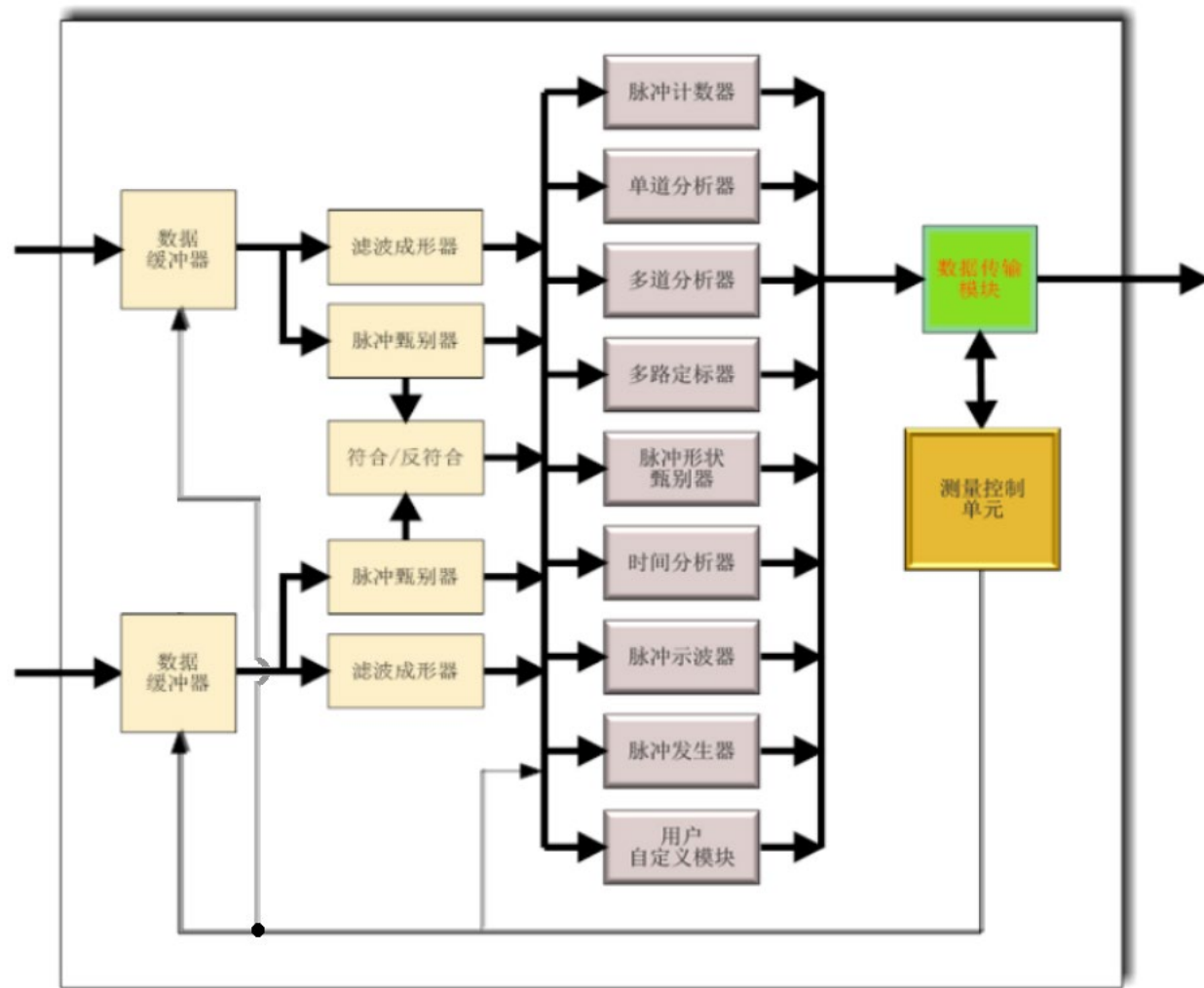
- 并行四通道;
- 高低压电源;
- 多种ADC可选;
- SOPC型FPGA;
- 固件可编程;
- 软件开放;
- 可联机也可独立工作。



数字系统开发

- FPGA固件架构

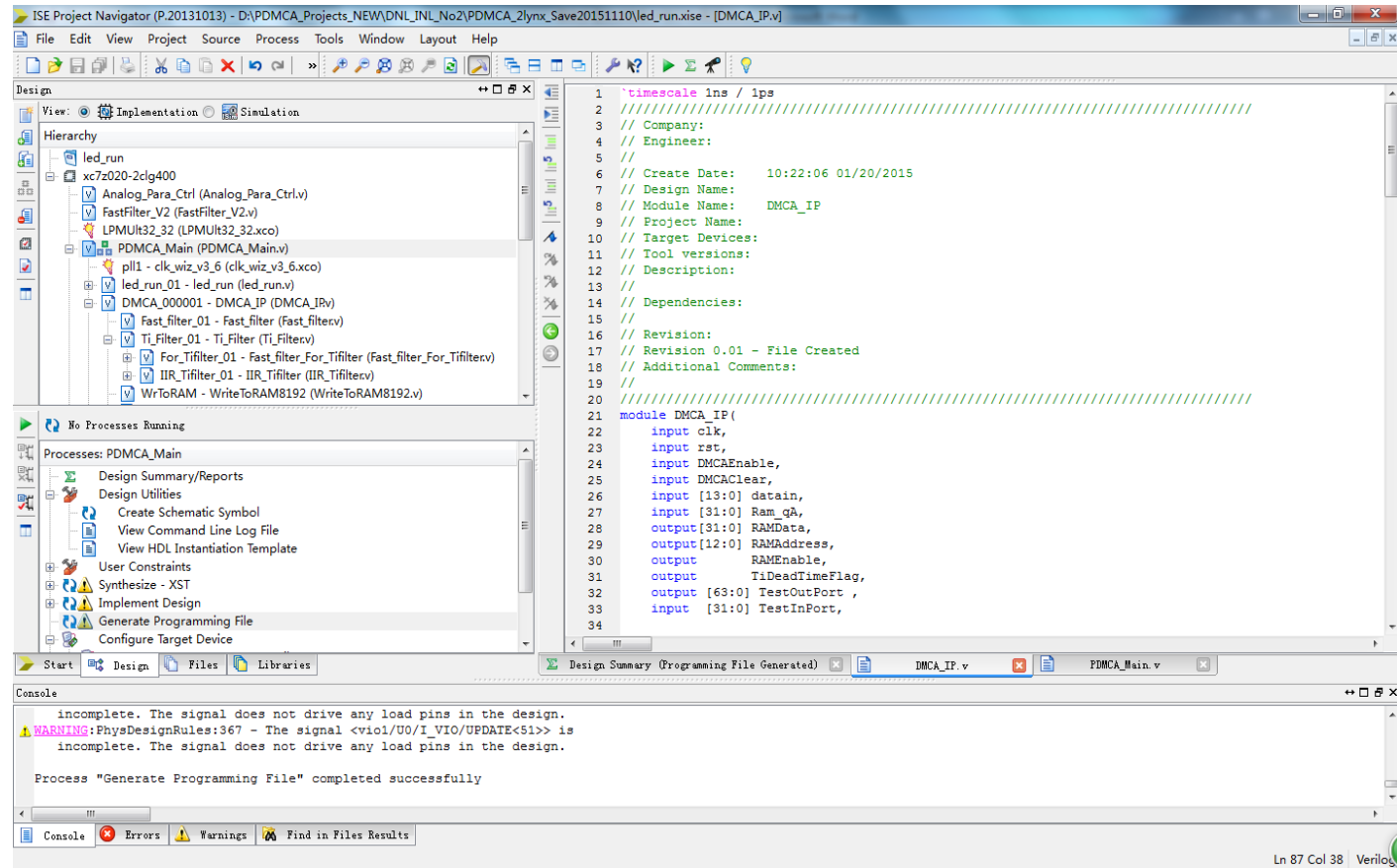
- 信号处理IP核库;
- 内部总线;
- 片上软/硬微处理器。



数字系统开发

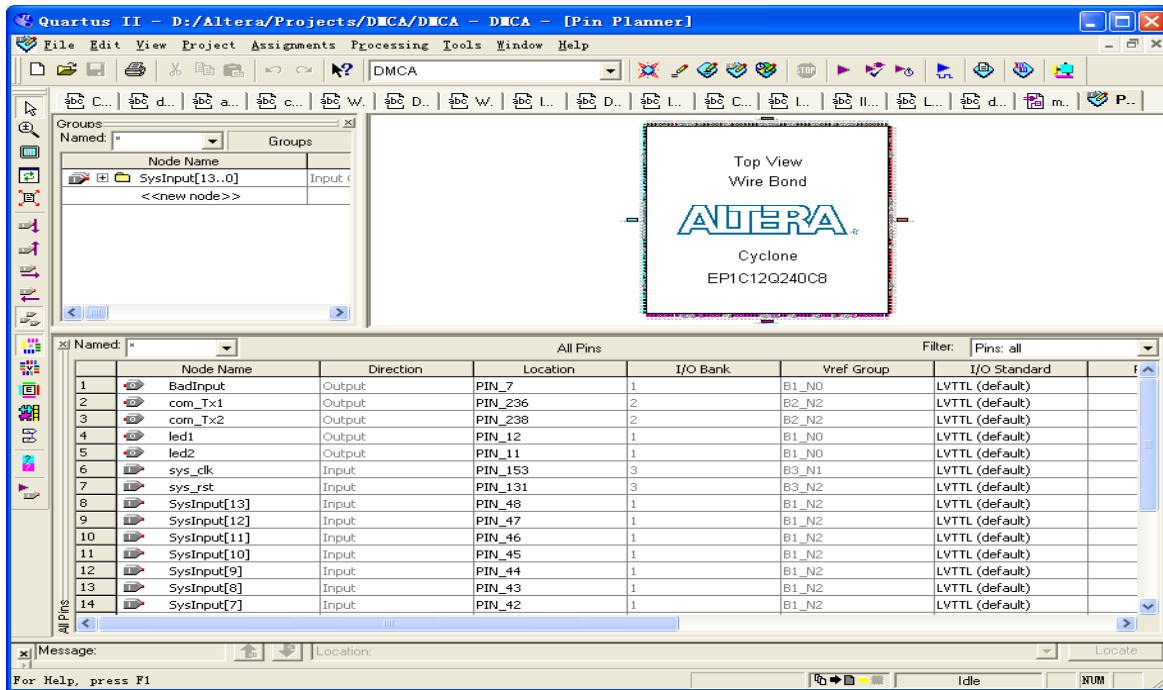
- FPGA硬件描述

- EDA工具：Quartus/ISE;
- 顶层：原理图输入;
- 模块：Verilog或VHDL;
- 标准化封装;
- 参数化调用;
- 全局时钟驱动。

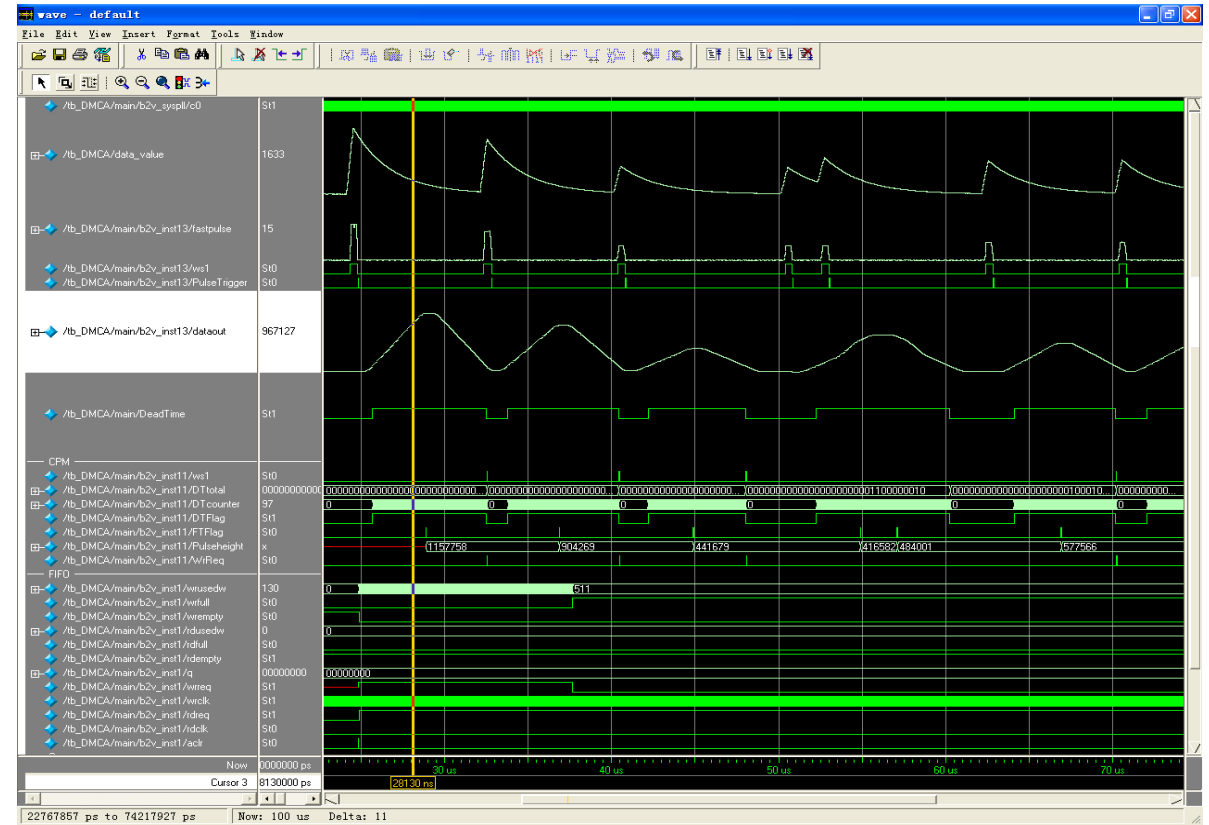


数字系统开发

• 器件适配

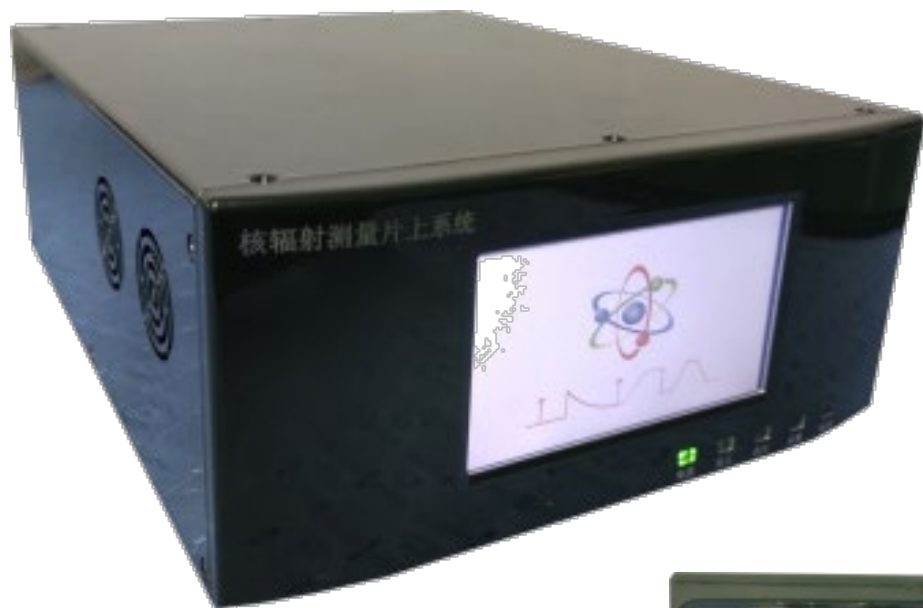


• 功能仿真



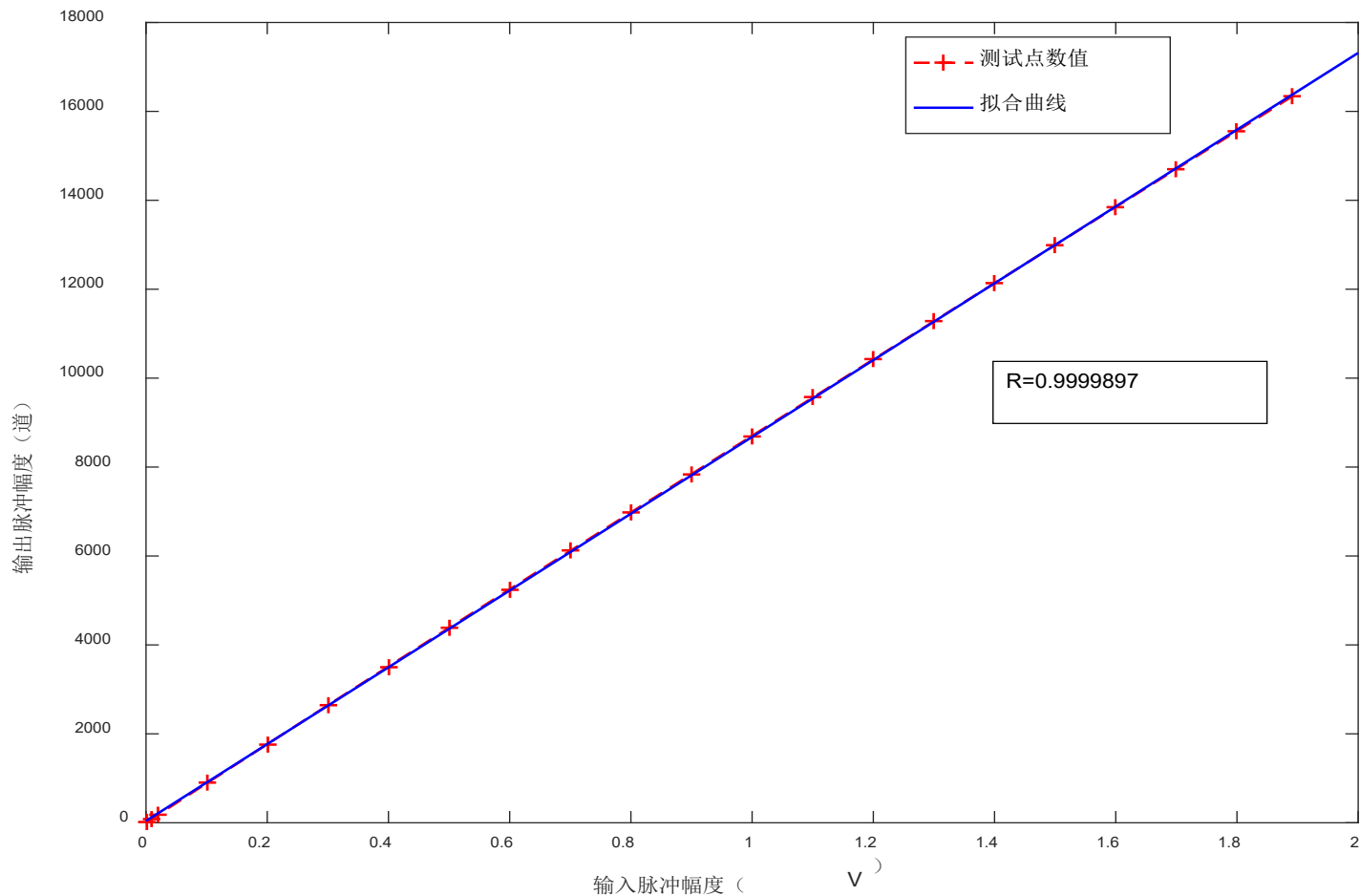
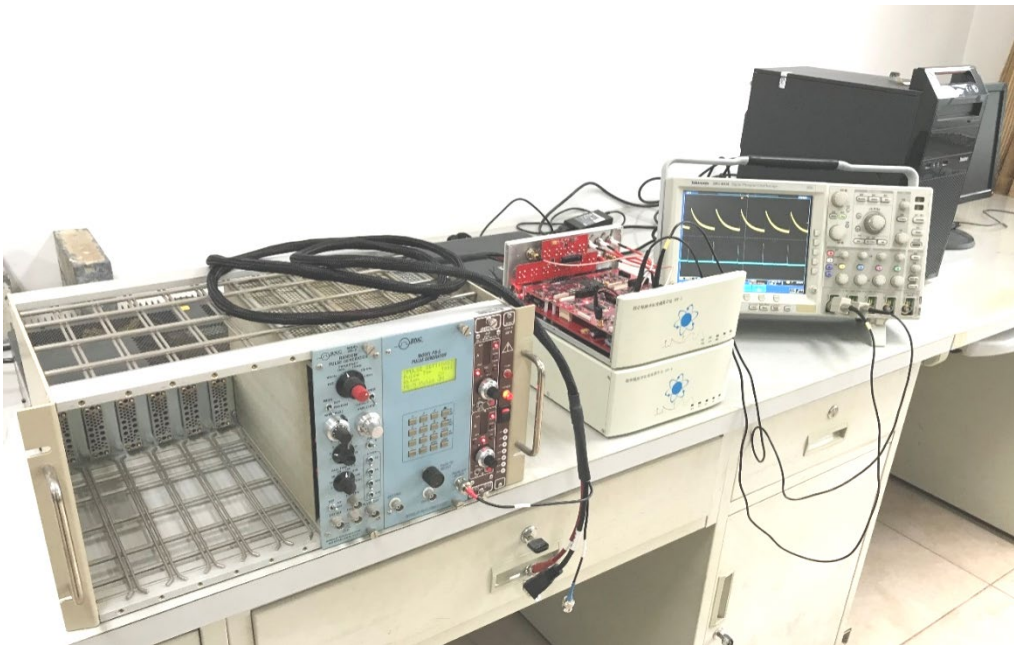
数字系统开发

- 主机外观与内部结构



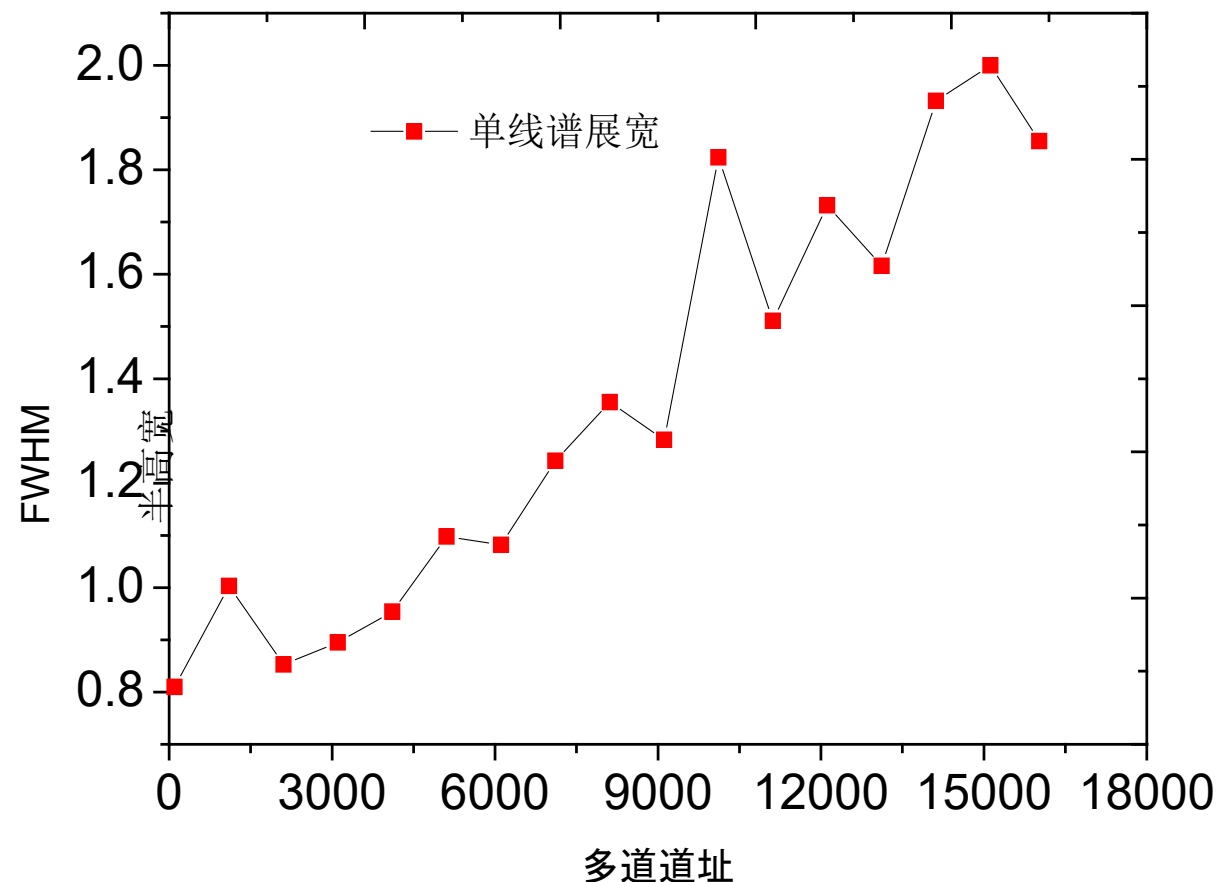
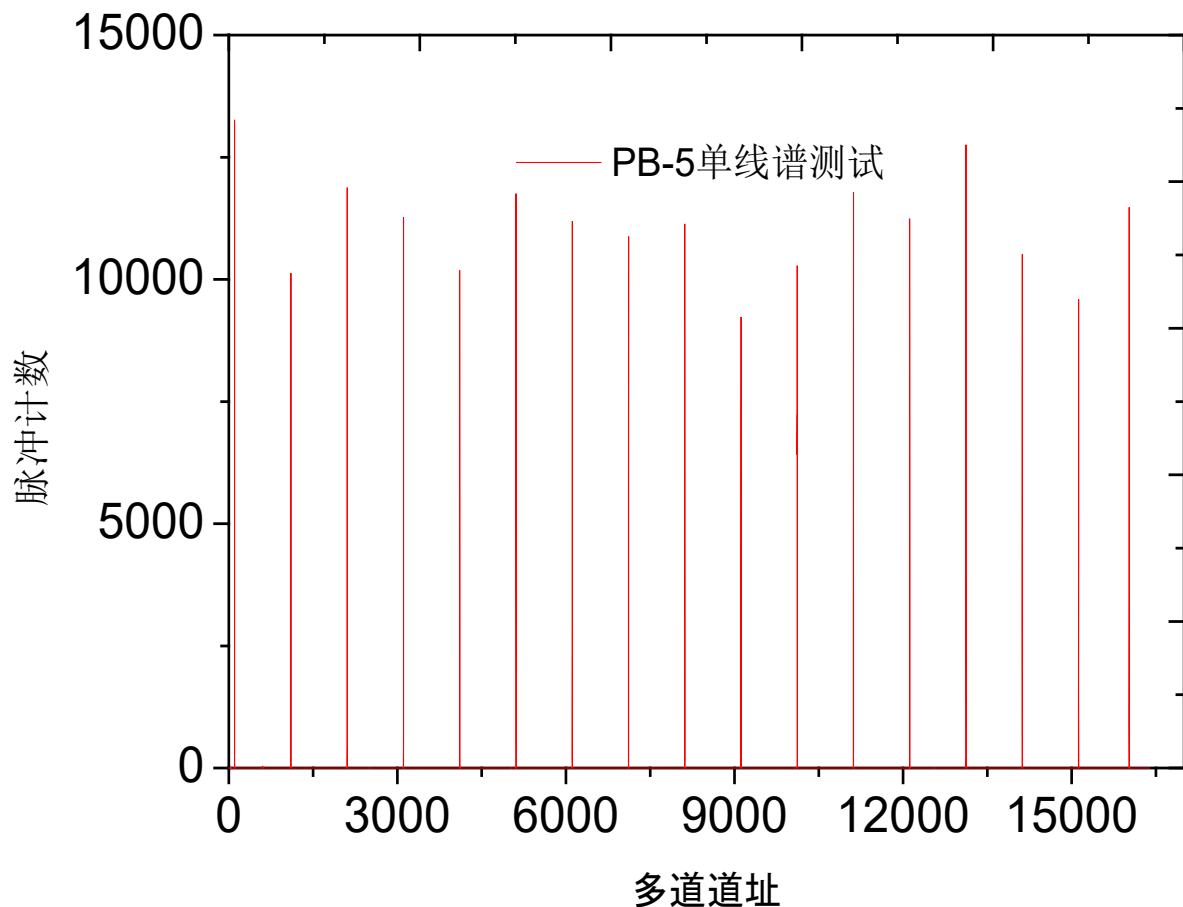
数字系统开发

• 性能测试：输入输出线性



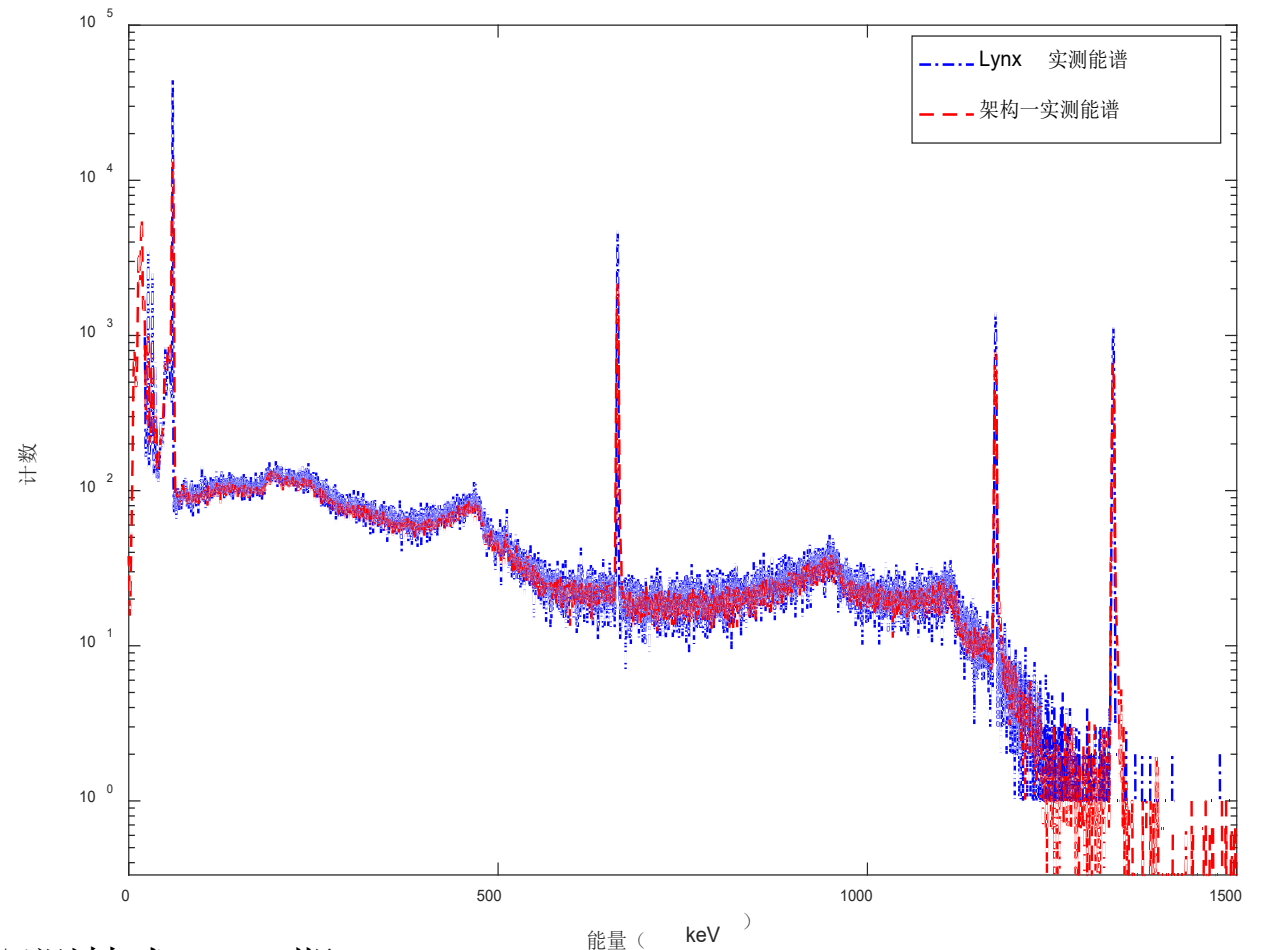
数字系统开发

• 性能测试：单脉冲展宽



数字系统开发

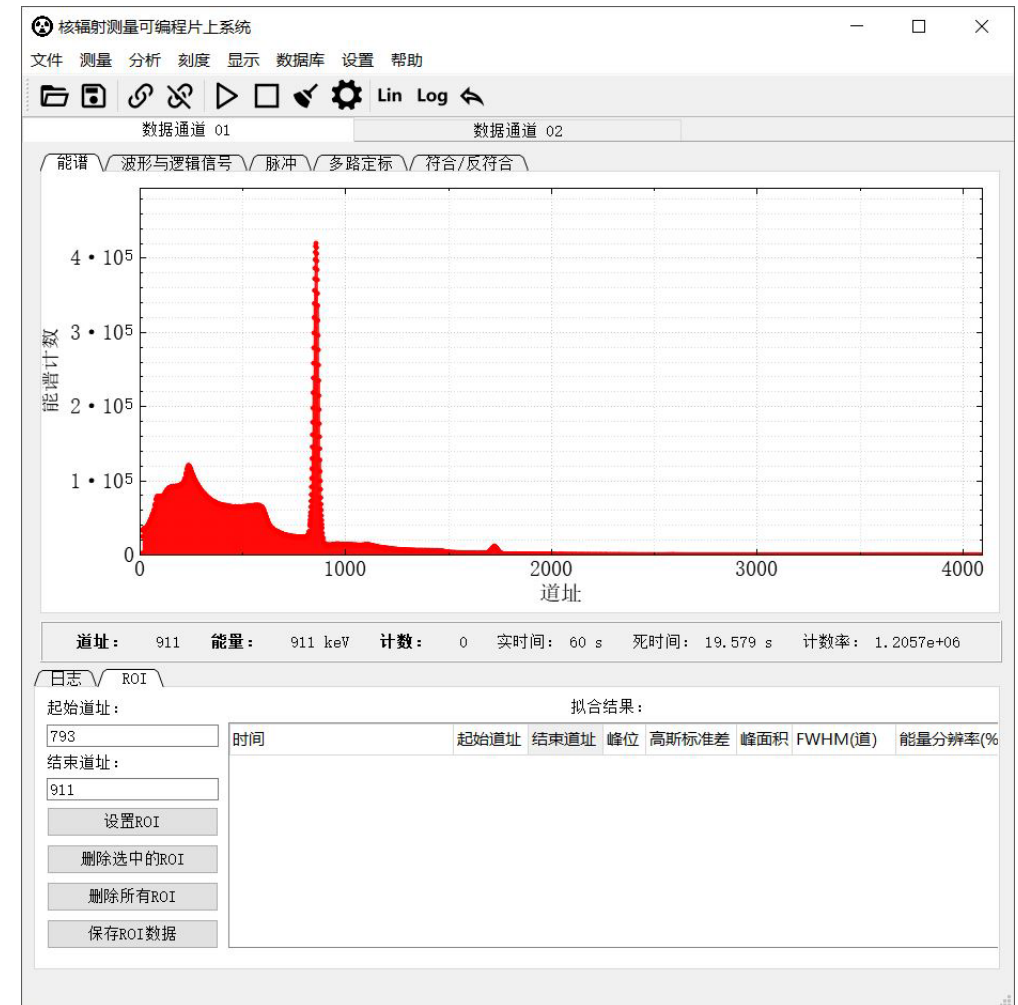
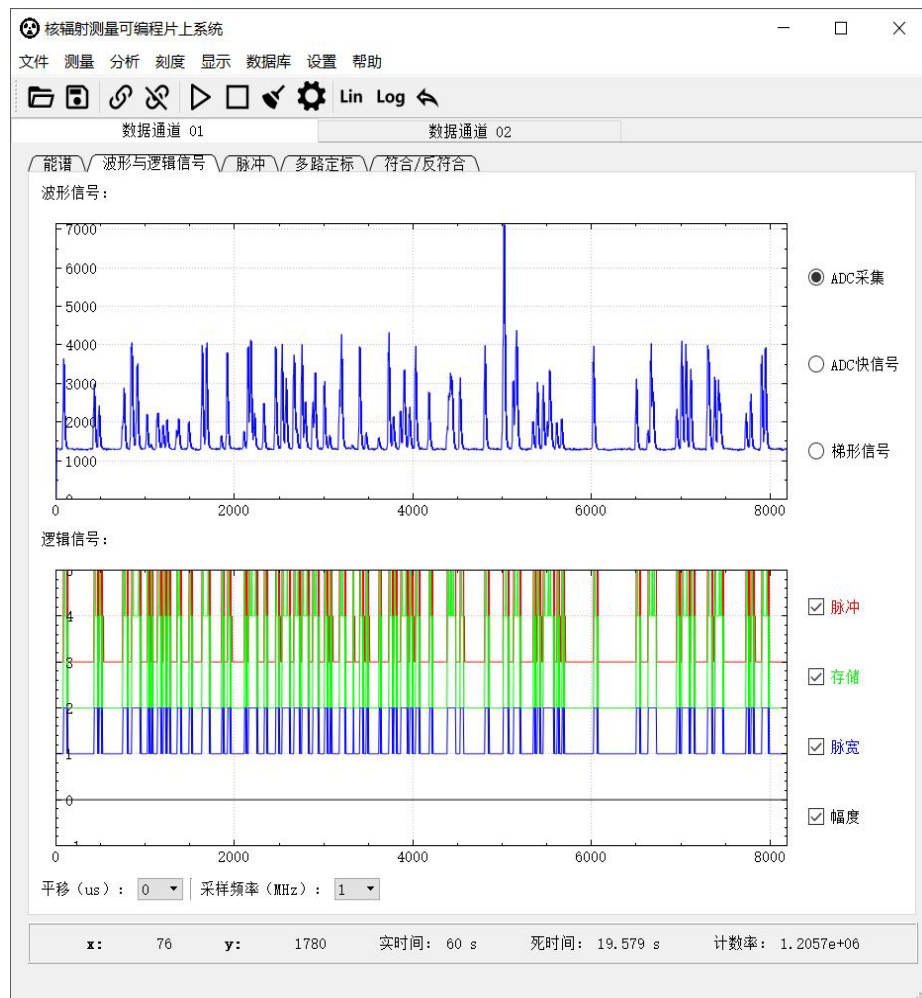
- 主要性能：HPGe能谱测量



数字系统开发

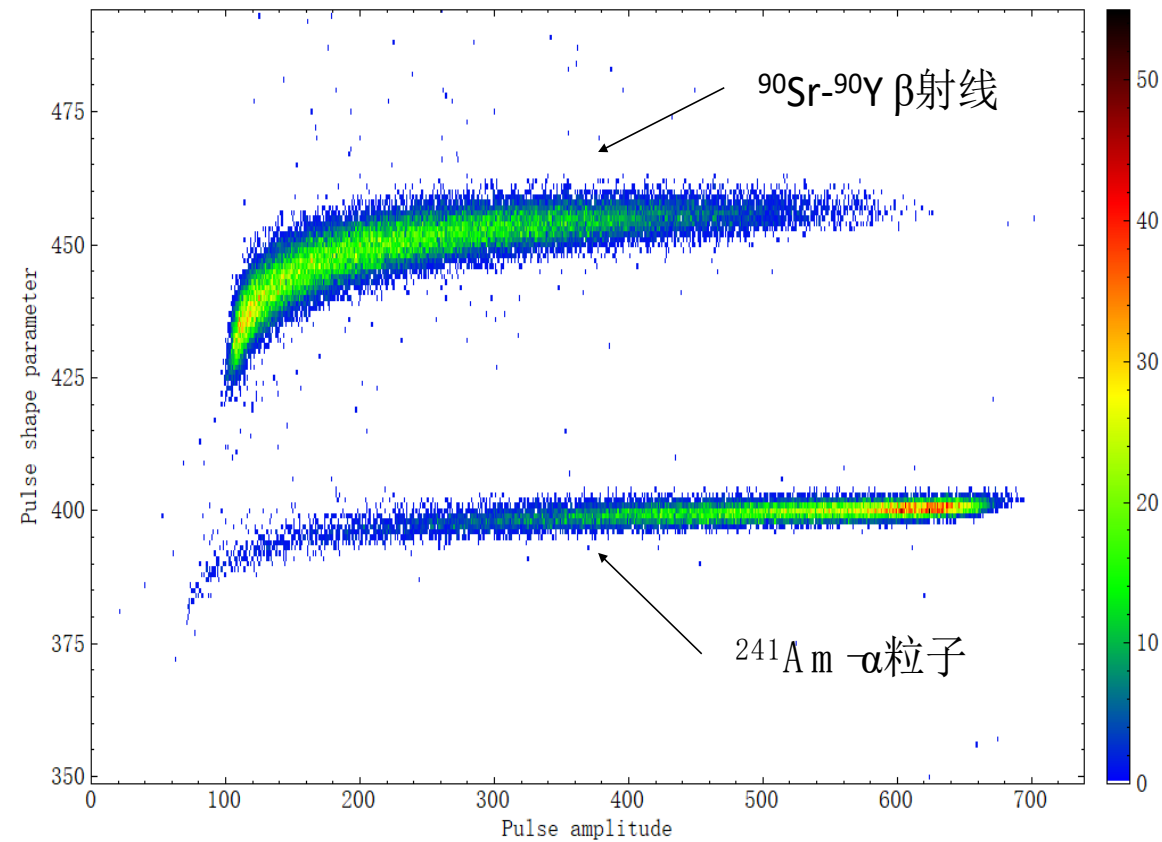
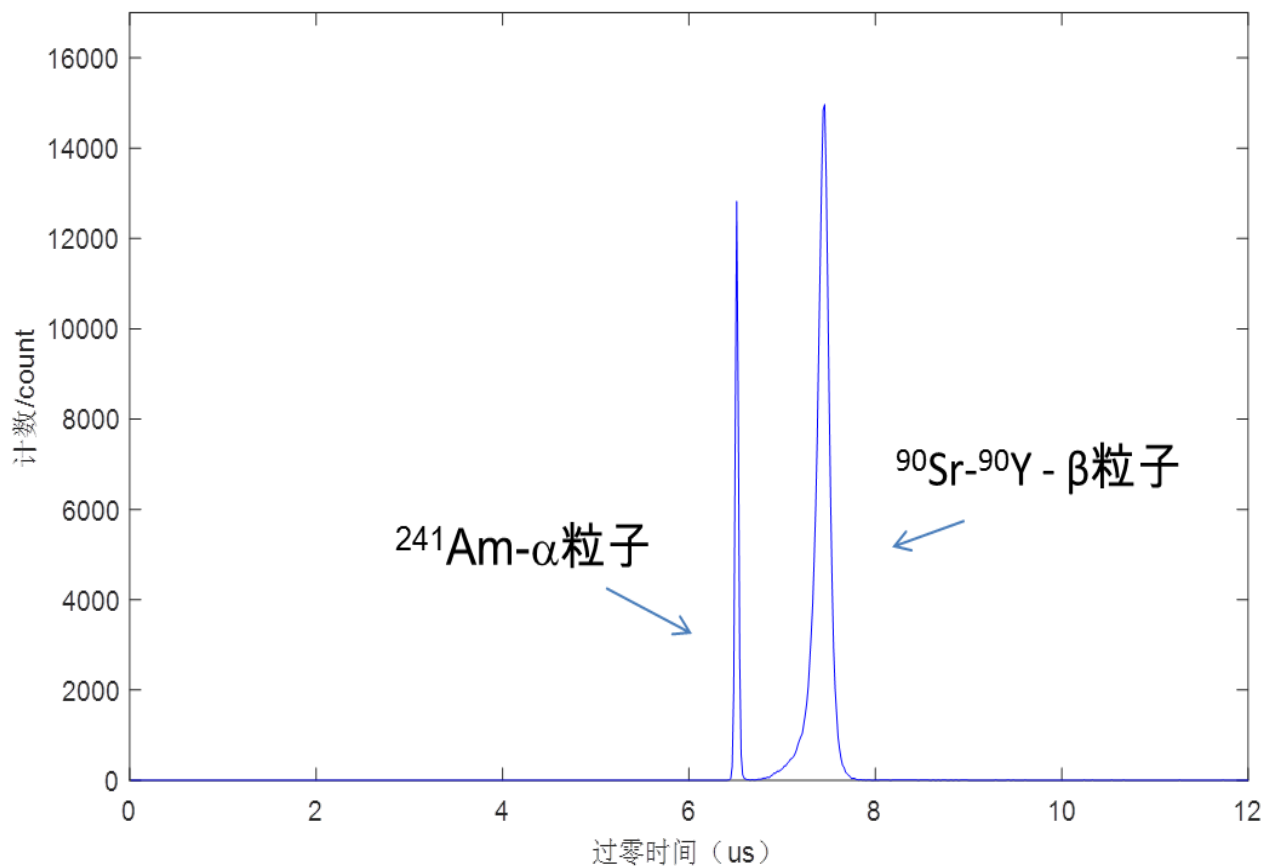
• 主要性能：核脉冲通过率

1.2 Mcps 下分辨率 3.2%



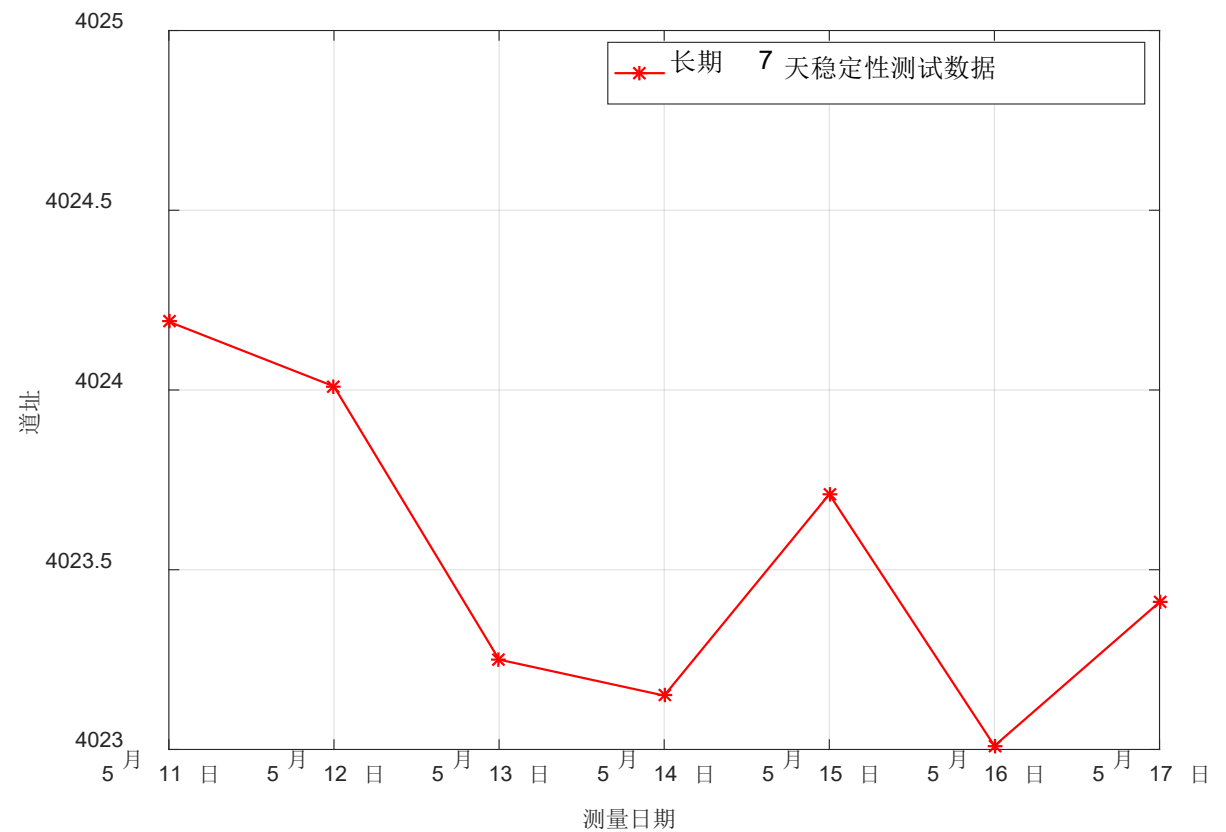
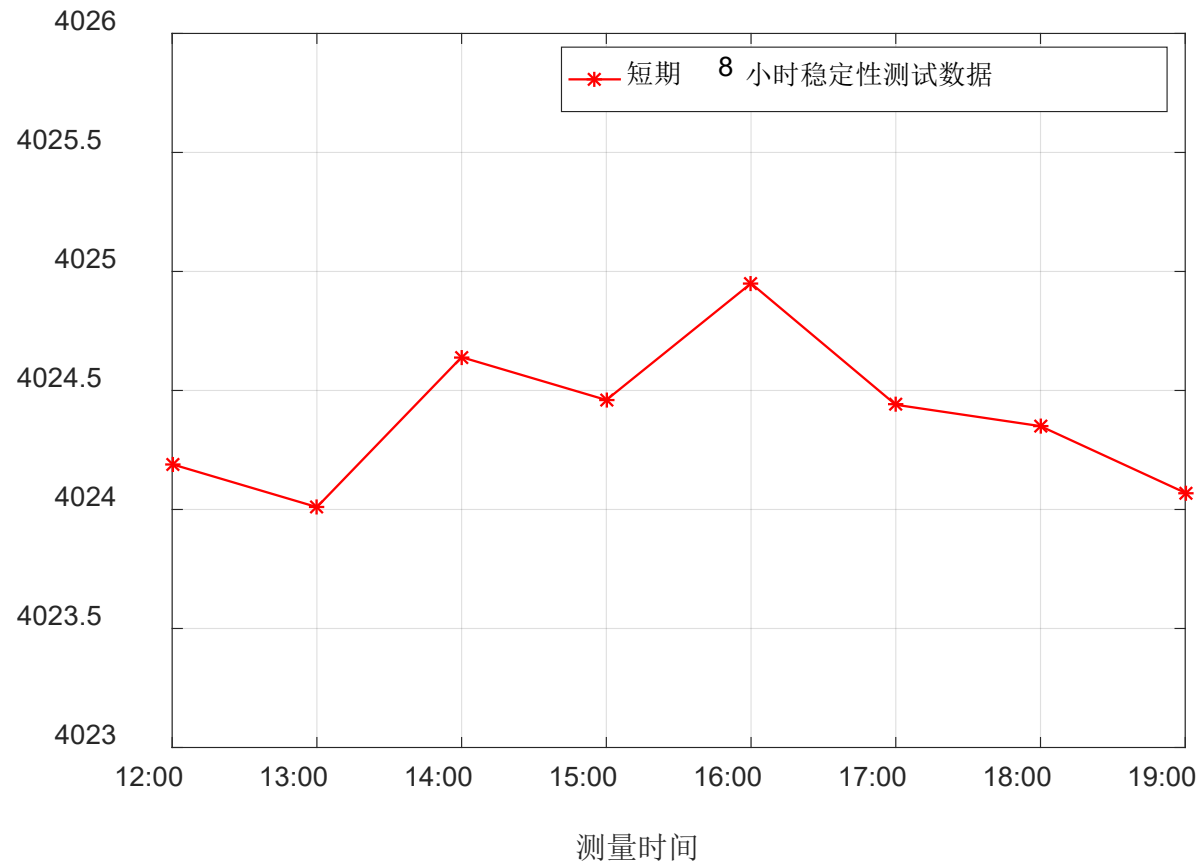
数字系统开发

- 主要性能： PSD+PHA多参数粒子分辨



数字系统开发

• 主要性能：稳定性



数据处理

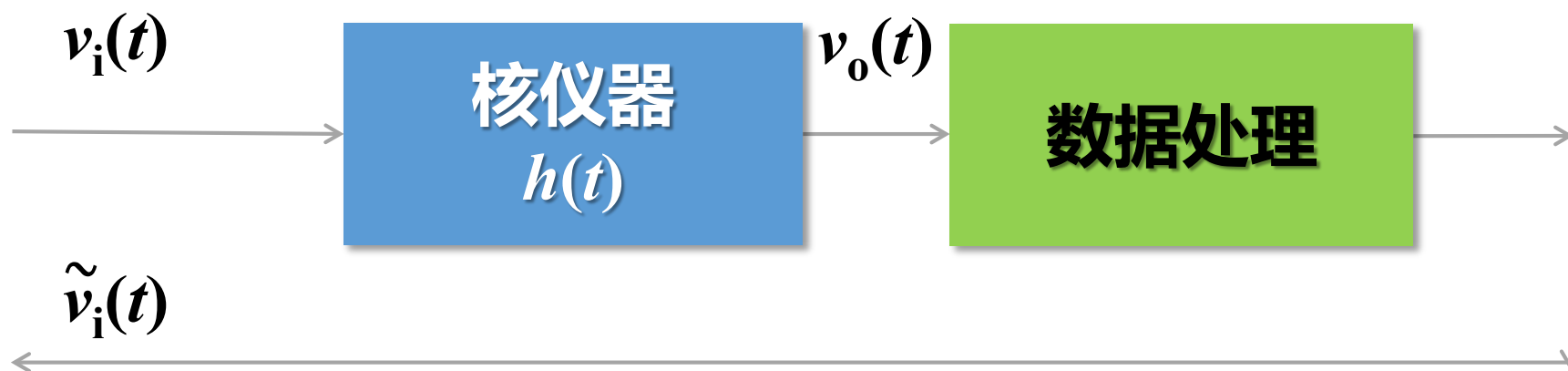
- 简单数据处理

- 获取并利用的信息很有限;
- 系统响应标定较简单;
- 数据处理与测量过程的协调关系较松散;
- 性能不高, 难以考虑复杂影响因素;
- 实例: 从计数率到剂量率: $\dot{D} = f\dot{n}$ 。

数据处理

- 信息复原：充分利用测量数据，最优估计辐射量

第I类Fredholm积分方程：
$$v_o(t) = \int_{-\infty}^t h(t-t') \cdot v_i(t') dt'$$



数据处理

- 基于信息视角的系统设计

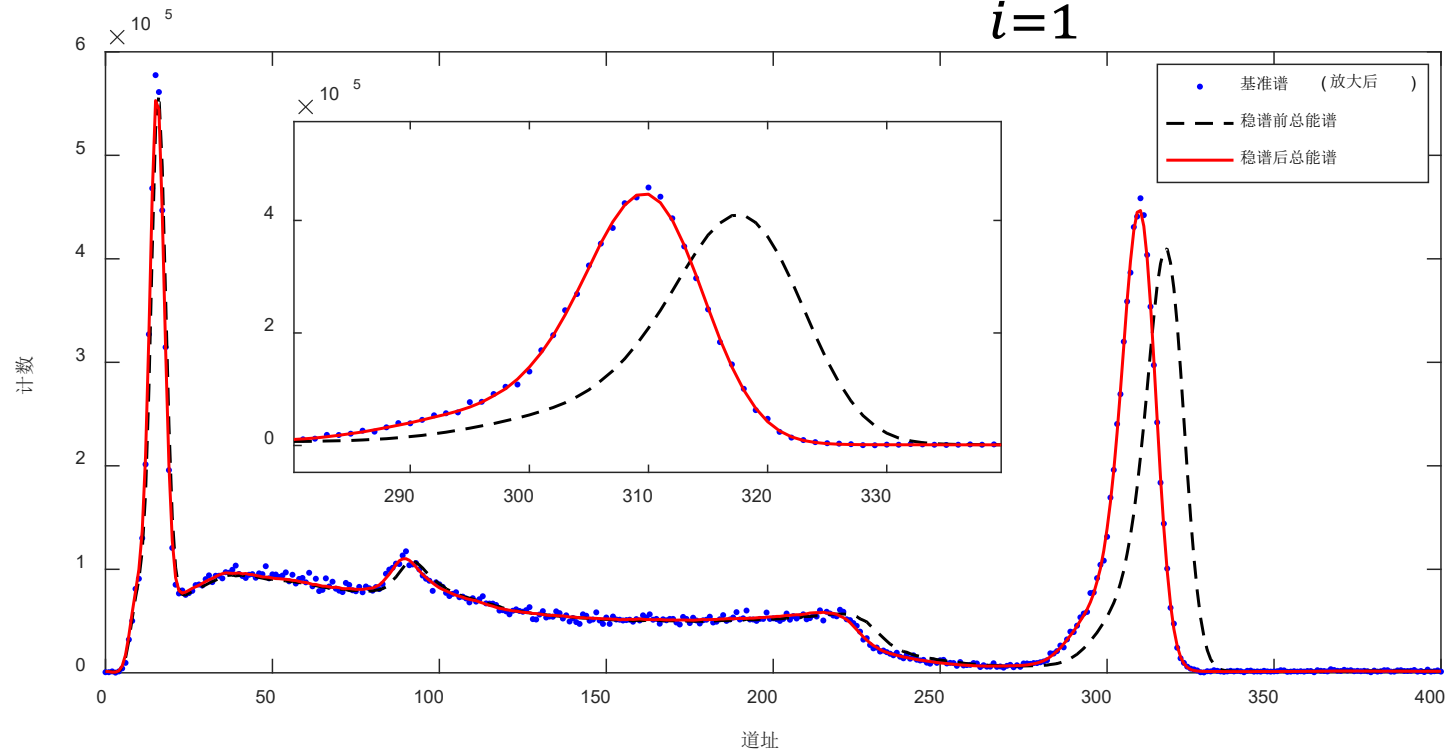
- 硬件：尽可能**稳定**地获取**全部**有用信息，降低不利干扰；
- 刻度：尽可能准确确定**系统响应**特性；
- 先验：尽可能掌握并利用**数学物理约束**条件；
- 软件：根据测量结果、系统响应及先验知识，通过最优化算法实现**信息复原**。

数据处理

• 最优化软稳谱

$$k_n = S(t_n) / S(t_0);$$

$$k_{\text{opt}} = \arg_k \min \left\{ \sum_{i=1}^N \omega_n [Si(t_n) - Si(t_0)]^2 \right\}$$



数据处理

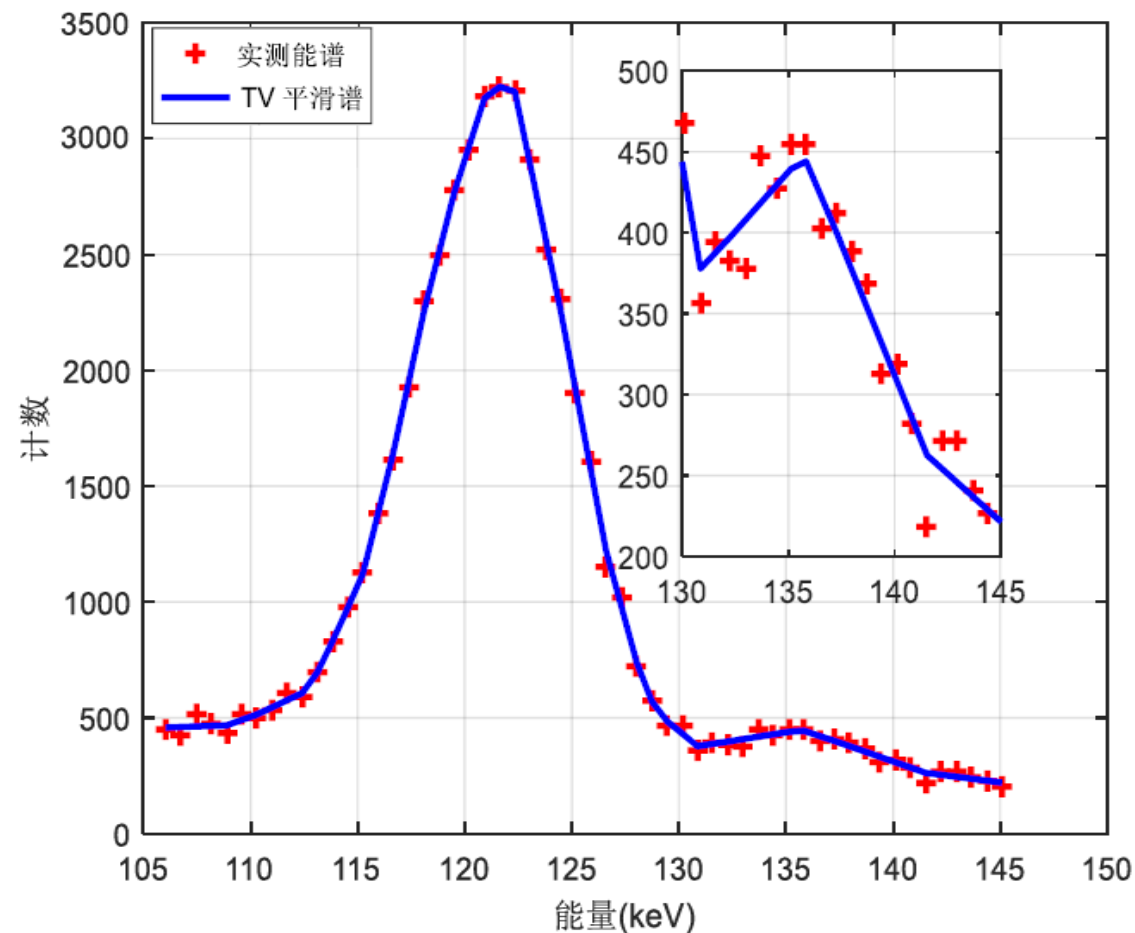
• 全变差正则化平滑 γ 能谱

$$b = Ax + n$$

$$\min: f(x) = \frac{1}{2} \|Ax - b\|_2^2 + \lambda \cdot \sum_{i=1}^{N-2} |x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i|$$

$$\text{s.t.: } x \geq 0$$

调节 λ ，平衡相似性和连续性。

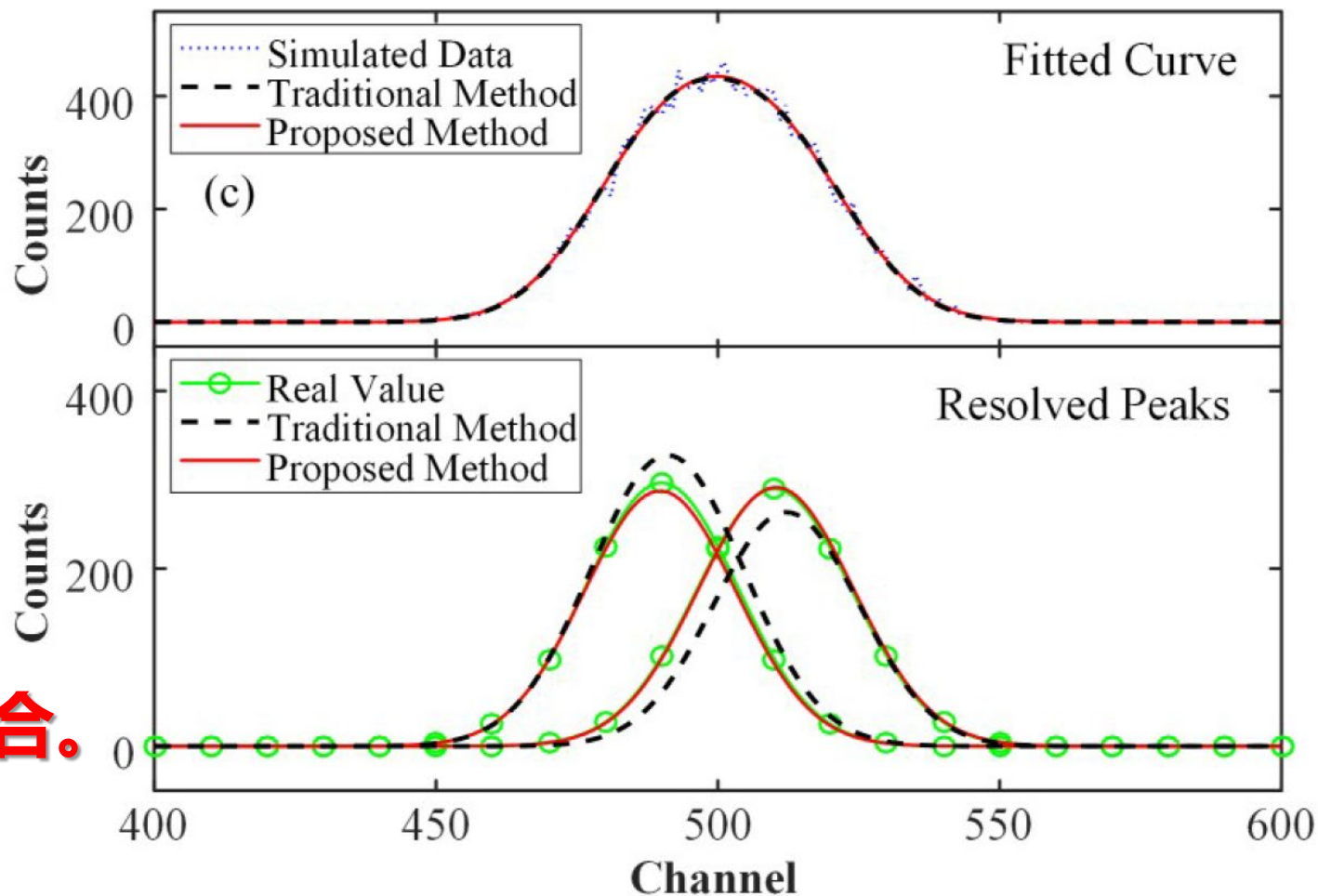


数据处理

• 重峰解析

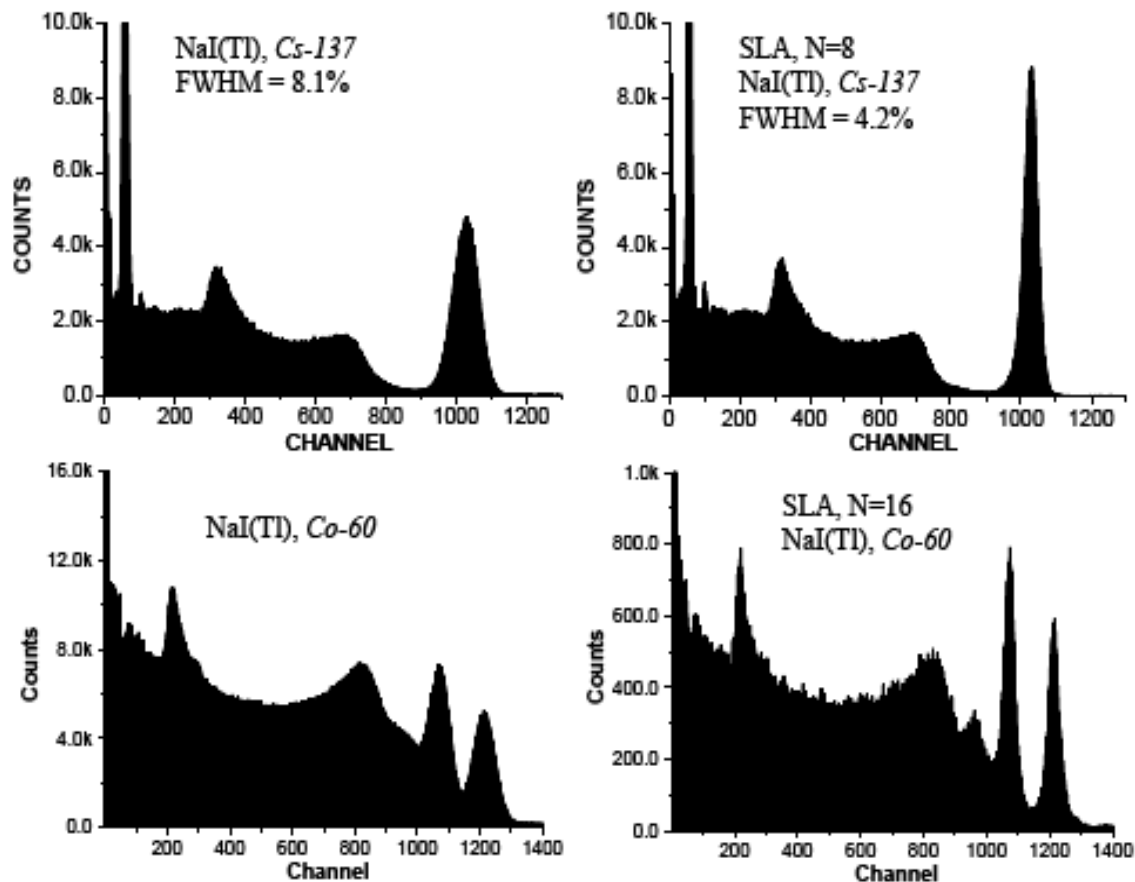
$$\begin{cases} \min_{\theta} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [w_i (S_i - f(\theta, i))]^2 \\ \text{s.t. } \sigma_j = \frac{F(u_j)}{2\sqrt{2\ln 2}} \end{cases}$$

以物理先验为约束，避免过拟合。

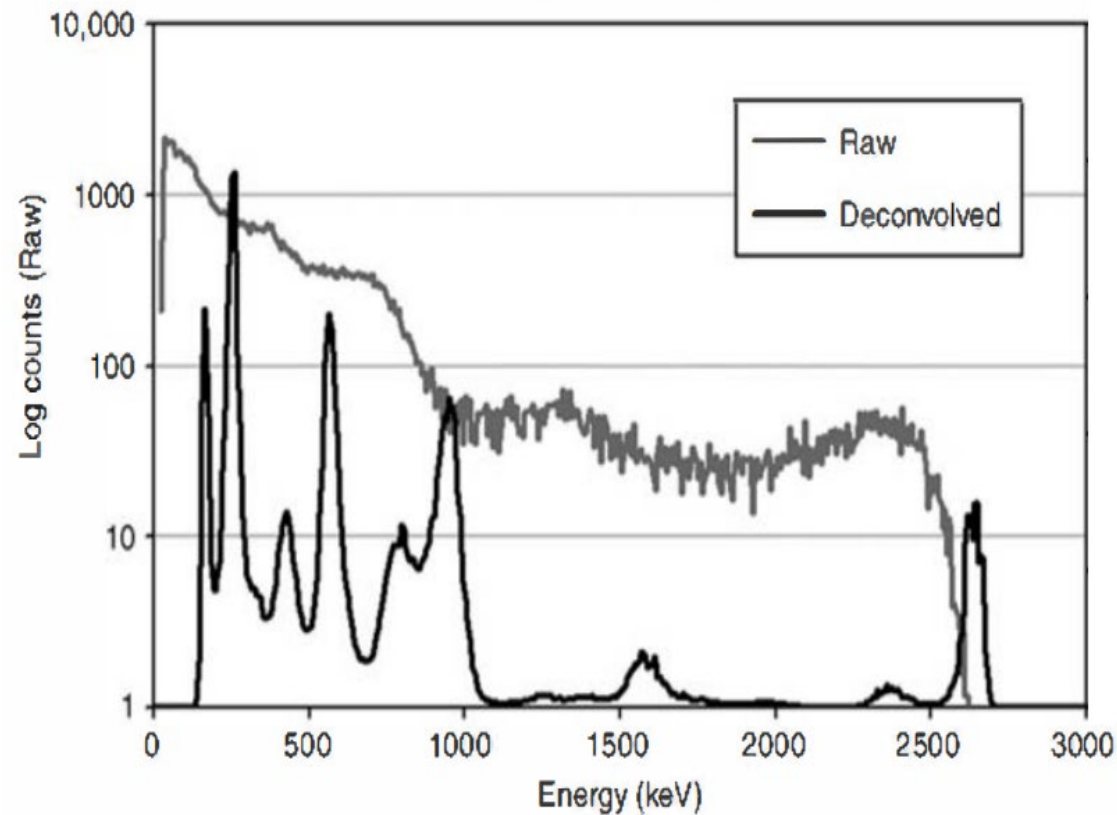


数据处理

• 分辨率增强与能谱反卷积



Th-232 spectrum using PVT



C. Burt, et al. IEEE. Nucl. Sci. Symp. N02-369, 1186(2008).

Jordanvov, Seeded Localized Averaging, 2005

数据处理

• 非负约束最优化反演

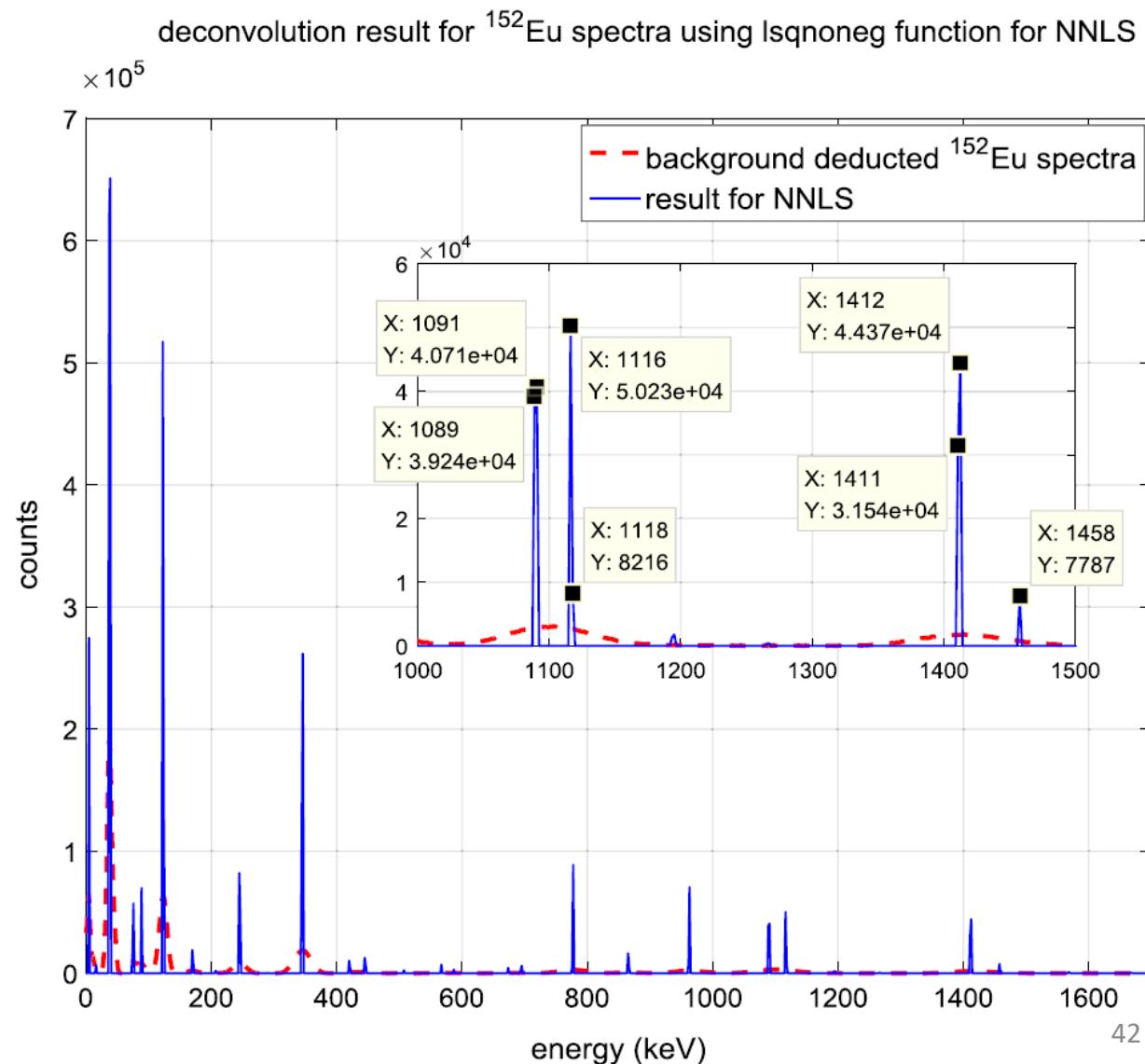
$$b = Ax + n$$

$$\begin{aligned} \min: f(x) &= \frac{1}{2} \|Ax - b\|_2^2 \\ &= (-A^T b)^T x + \frac{1}{2} x^T (A^T A) x + \frac{1}{2} b^T b \end{aligned}$$

$$\text{s.t.: } x \geq 0$$

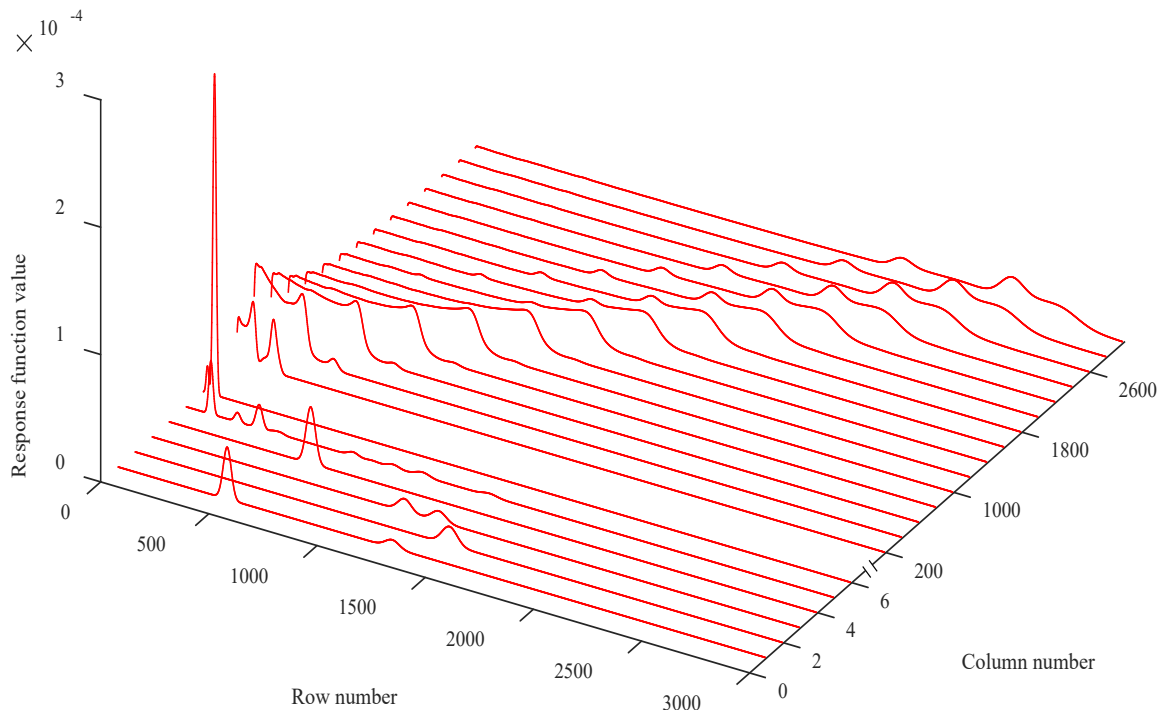
非负约束

Jinglun Li, et al. Nonnegative constraint quadratic program technique to enhance the resolution of γ spectra, NIMA 887, 2018



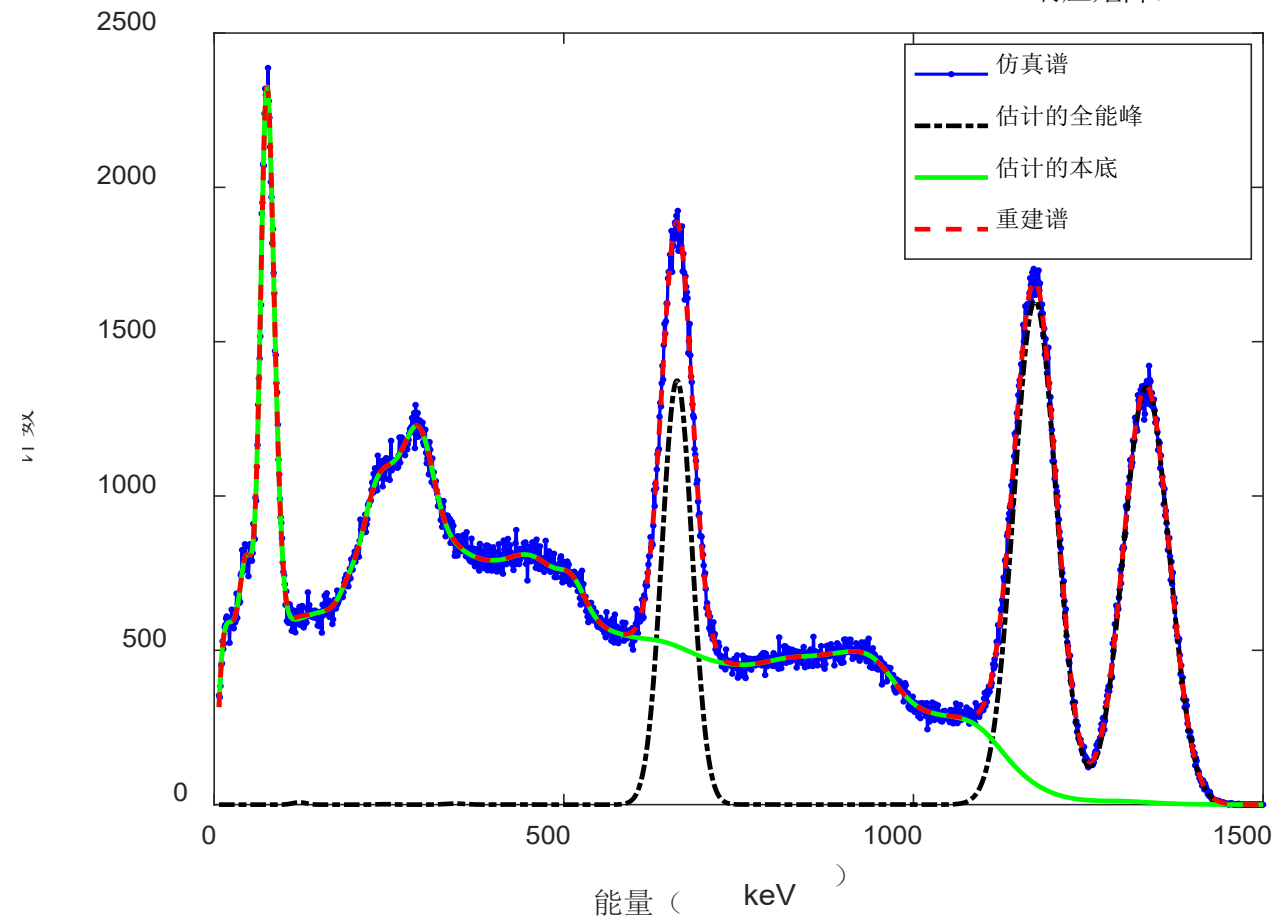
数据处理

• 康普顿连续坪估计



核系混合响应矩阵法重建结果 (

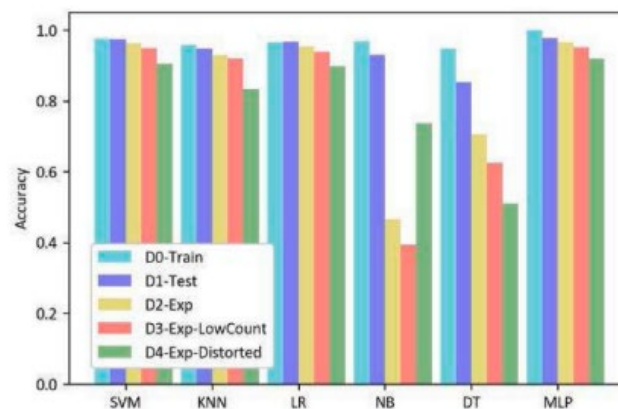
25 cm 响应矩阵)



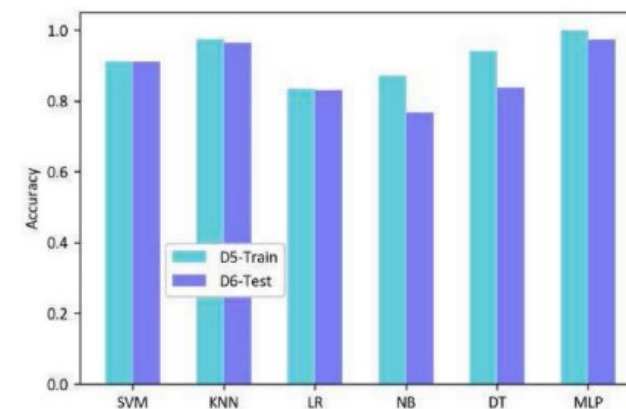
数据处理

• 机器学习识别放射性核素

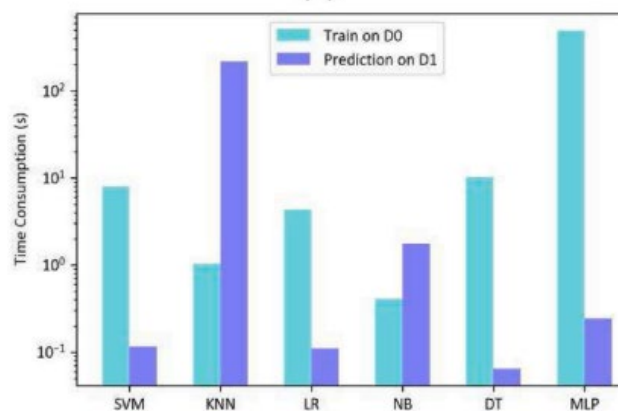
- 支持向量机(SVM);
- **k近邻(KNN);**
- 逻辑回归(LR);
- 朴素贝叶斯(NB);
- 决策树(DT);
- **多层感知机(MLP)等。**



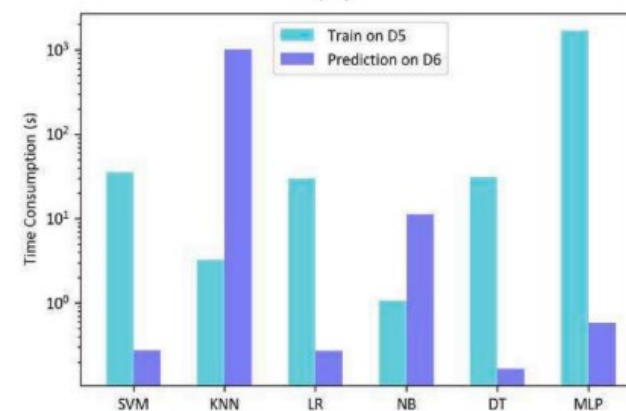
(a)



(b)



(c)



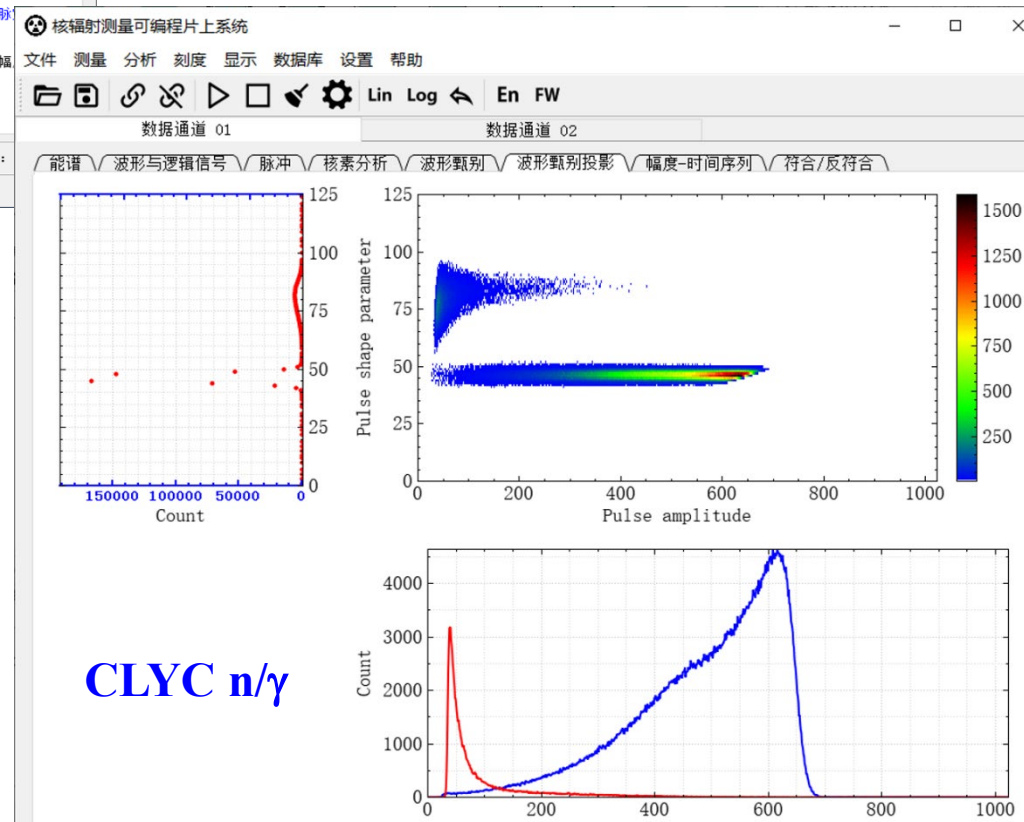
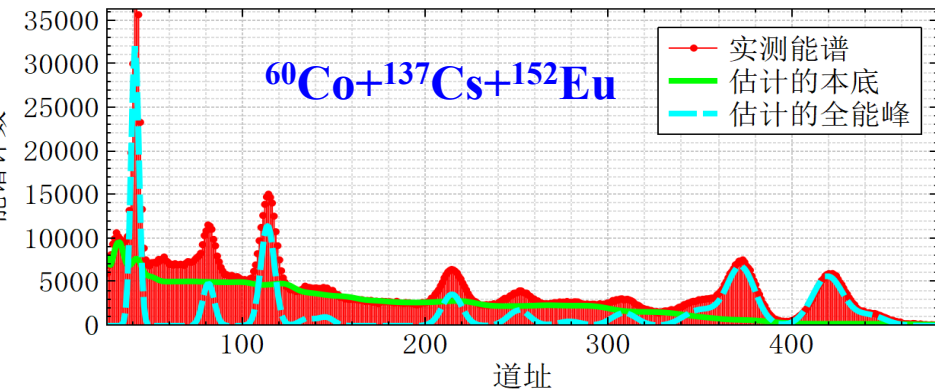
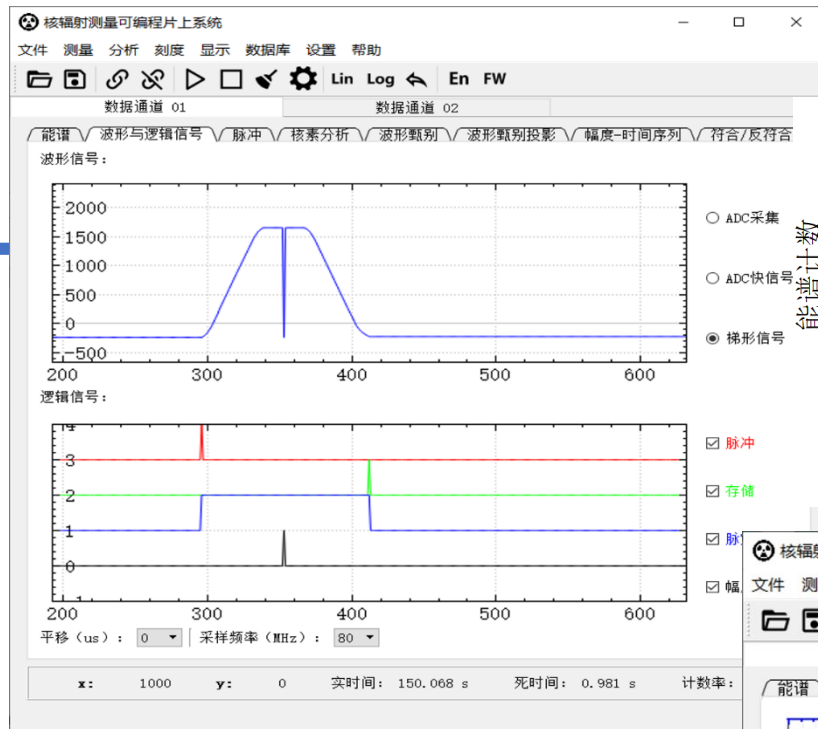
(d)

Sheng Qi, et al. Comparison of machine learning approaches for radioisotope identification using NaI(Tl) gamma-ray spectrum, Appl. Radiat. & Iso. 186, 2022

数据处理

• 上位机软件

软件功能

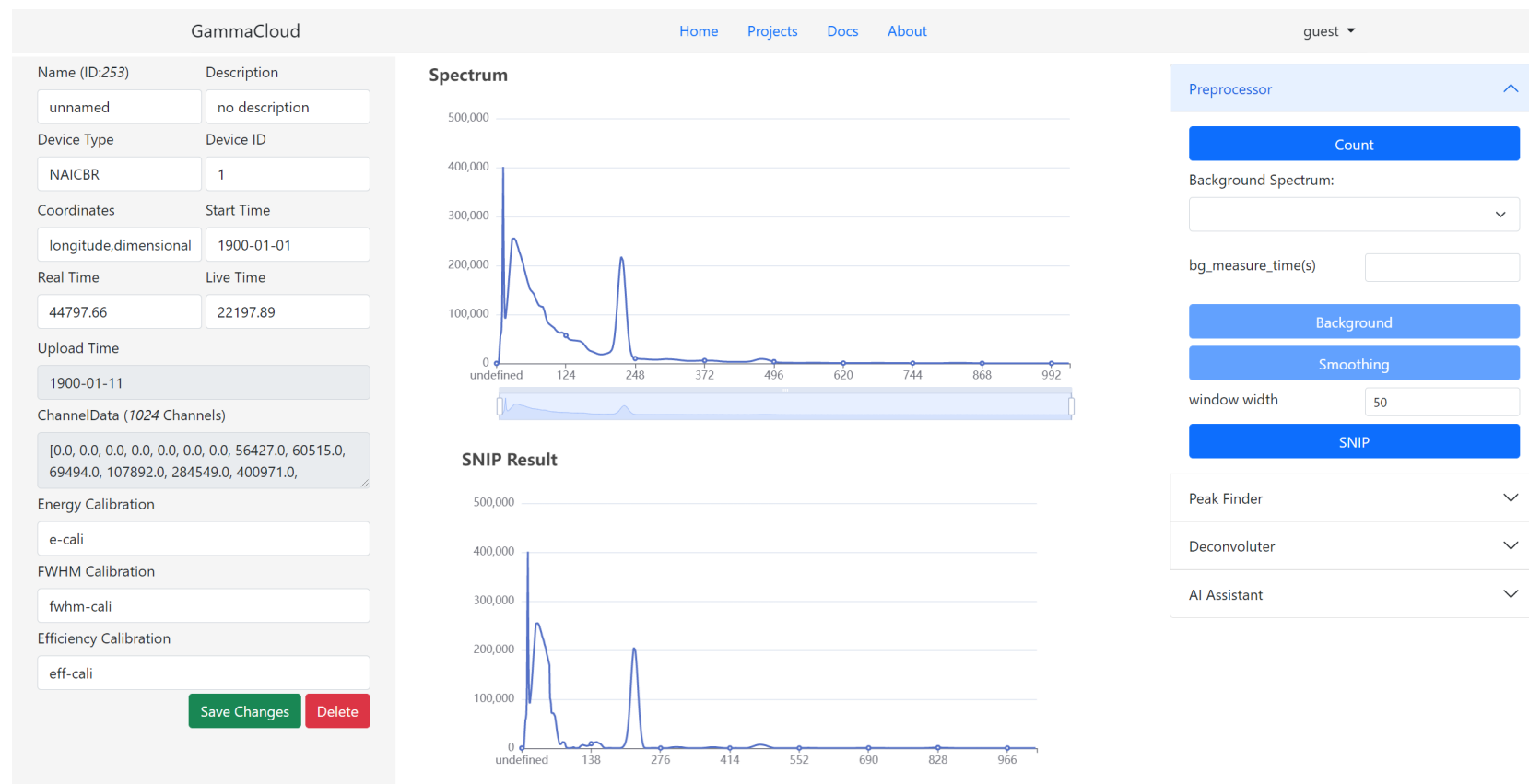


数据处理

- 云计算

- 分布式监测;
- 无线通信;
- 跨平台Web软件;
- 云端数据分析与管理。

GammaCloud软件界面



总结与展望

- SOPC平台满足高性能和一机多能需求，易于开发、使用；是核辐射监测技术发展的重要方向；
- SOPC技术特点：
 - 固件、软件取代硬件，**算法**越来越重要；
 - 作为**信息系统**，测量环节与分析环节有机协同，前者重在信息获取，后者重在信息复原。

总结与展望

- SOPC发展方向：
 - 核信息流变过程的精确模型化；
 - 多重约束下的逆求解方法；
 - 验证与提高健壮性。
- SOPC应用：
 - 多功能核辐射监测仪器研制；
 - 核探测实验教学；
 - 核生化一体化监测。

报告完毕

敬请批评指正，谢谢！