

2026年中国物理学会高能物理分会学术年会



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

SCEP磁单极子探测阵列读出 触发算法研究

曹喆，叶昌庆，刘贝戈，林箐，赵雷
中国科学技术大学 & 深空探测实验室

2026-07-17

广东广州



I. 研究背景与问题

II. 触发算法

III. FPGA 实现与验证

IV. 总结

研究意义

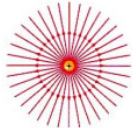


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- 磁单极子是指仅带有北极或者南极的基本粒子，所携带磁荷量遵循量子化条件： $g = ng_D = n \frac{\hbar c}{2e}$
- 搜寻磁单极子是当今物理学和宇宙天文学普遍公认的重大前沿交叉科学问题，并入选中国科协2023年十大重大科学问题
- 解释电荷量子化
- 为传统的maxwell方程组引入新的对称性
- 解释宇宙暴胀理论
- 被多种理论预言

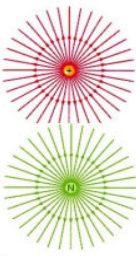
maxwell方程组中电与磁的不对称性

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho_e$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$
$$-\nabla \times \mathbf{E} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_e$$





$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho_e$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 4\pi\rho_m$$
$$-\nabla \times \mathbf{E} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_m$$
$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_e$$





Dirac's
quantisation condition



Schwinger's
dyons



t'Hooft's
GUT monopoles



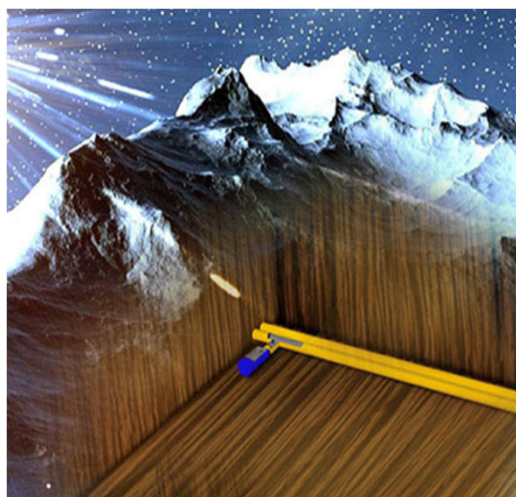
量子化条件，量子场论以及大一统理论都预言了磁单极子的存在

研究现状



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

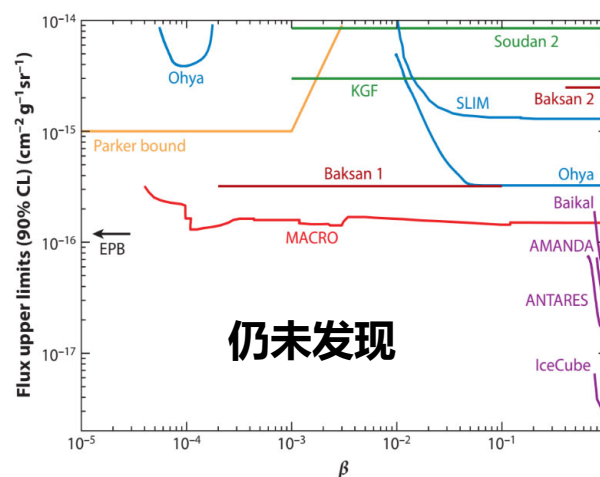
深地实验



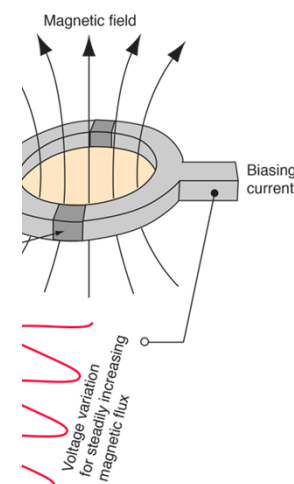
MACRO、IceCube

能量沉积

优点：探测面积大，高灵敏度
缺点：需要低本底
无法提取信号特征



超导线圈



感应信号

优点：超高信噪比
缺点：需要超导温度
探测面积小

SCEP新型符合探测方案

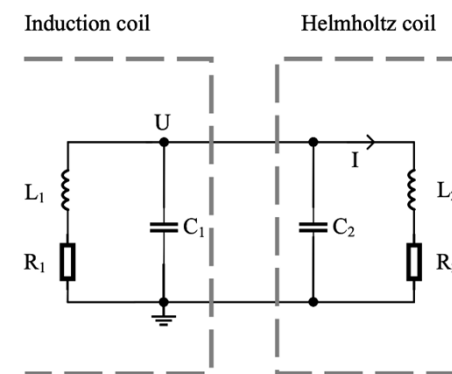
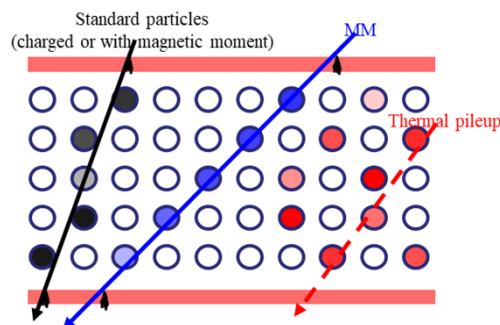
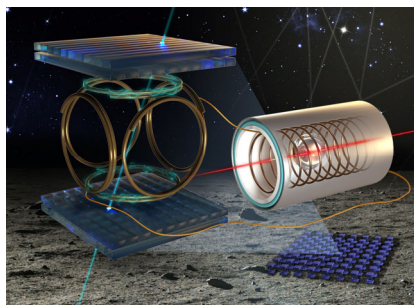


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

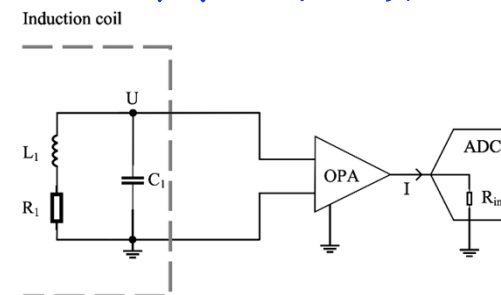
SCEP: Search for Cosmic Exotic Particles

为兼顾磁单极子感应信号的直接探测与大面积覆盖，SCEP合作组提出了由室温感应线圈和塑料闪烁体组成的多层符合探测阵列

- 采用室温感应线圈，但是不可避免的引入了线圈热噪声和读出噪声
- 两种读出方案：
 - 原子磁力仪读出：采用量子精密探测，具有更低噪声；
 - 直接电压读出：结构简单、易集成适合大面积部署，噪声相较更高
- 塑料闪烁体进行符合探测可以抑制感应探测热噪声误触发



原子磁力仪读出



直接电压读出

C. Ye et al., Phys. Rev. D 111, 023020 (2025).

大面积阵列的触发需求与挑战



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

需要L1 触发以减少数据存储和传输的压力，使得工程具备可行性

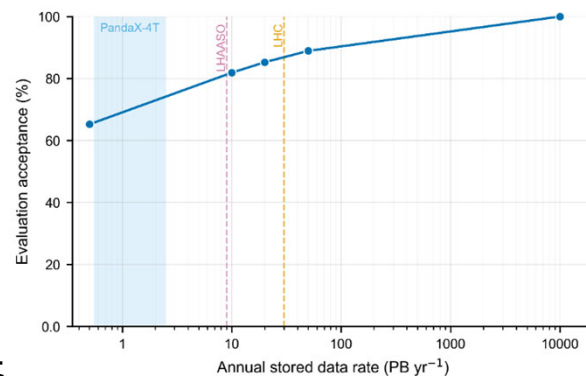
- 为了达到现有磁单极子探测通量界限，SCEP预估需要曝光量： $\mathcal{O}(10^4) \text{ m}^2 \cdot \text{year}$
- 此曝光量下，若完整记录全部波形，将带来极高数据存储： $\mathcal{O}(10) \text{ EB/year}$
- 需要触发判选存储，筛除噪声误触发的同时，尽量保留稀有的磁单极子信号，当数据压缩率
达到 10^{-3} 时，年存储量可降至 $\sim 10 \text{ PB/year}$ ，与LHAASO的年存储规模相当

挑战：

- 信号被噪声淹没，信号甄别困难→最优滤波与阈值判决为最优决策
- 待检出波形特征随机，信号波形随速度和轨迹变化→多模板匹配覆盖不同信号形态
- 要求实时处理，无探测死时间→在FPGA中并行实现

技术路线

信号建模→最优滤波→多模板匹配→模板库建立→FPGA实时实现



数据压缩率定义为触发后保存的数据量与原始数据量之比

目录



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

I. 研究背景与问题

II. 触发算法

III. FPGA 实现与验证

IV. 总结

感应信号与参数空间



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

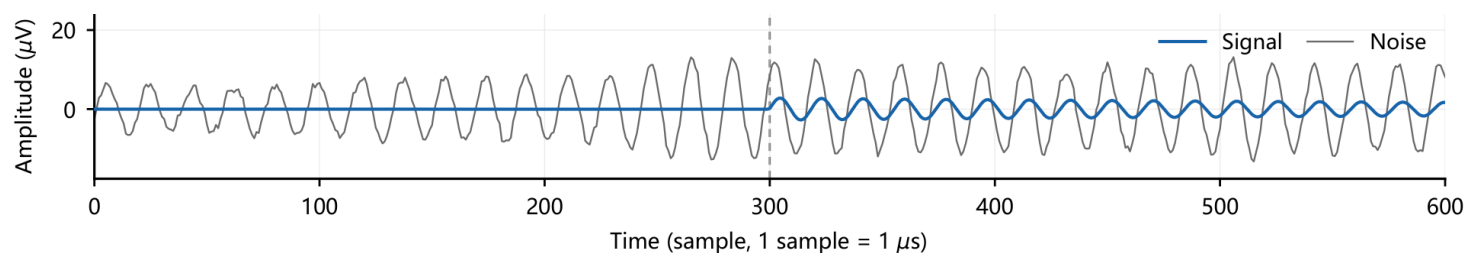
感应信号

- 经读出电路整形后的感应信号波形由参数 γ 决定

$$\gamma = (v, \rho_0, \theta, \phi)$$

其中 v 为速度, ρ_0 为径向偏移, θ 和 ϕ 分别为入射极角与方位角

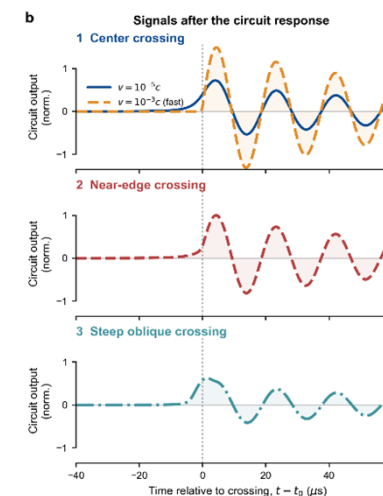
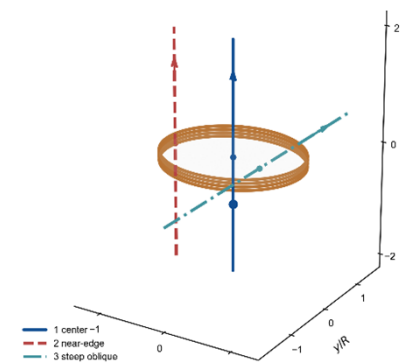
- 信号波形淹没在噪声背景中, 无法直接进行有效甄别



参数空间

- 待检测信号 γ 未知, 全部允许的参数组合构成参数空间 Γ
- 磁单极子速度缺乏可靠先验, 在 $v \in [10^{-5}c, 10^{-1}c]$ 内采用对数均匀采样
- 轨迹参数 (ρ_0, θ, ϕ) 由各向同性的轨迹和线圈的几何关系得到

a Three monopole trajectories through one pickup coil



最优滤波



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

最优滤波与阈值判决在高斯噪声下等价似然比检验为最优决策

最优滤波核

对于参数为 γ 的信号 s_γ ，噪声协方差矩阵为 C ，最优滤波核为：

$$h_\gamma = a_\gamma C^{-1} s_\gamma$$

其中 a_γ 为归一化系数，使滤波输出噪声方差为 1

逐窗滤波

将滤波核沿连续采样波形逐点滑动：

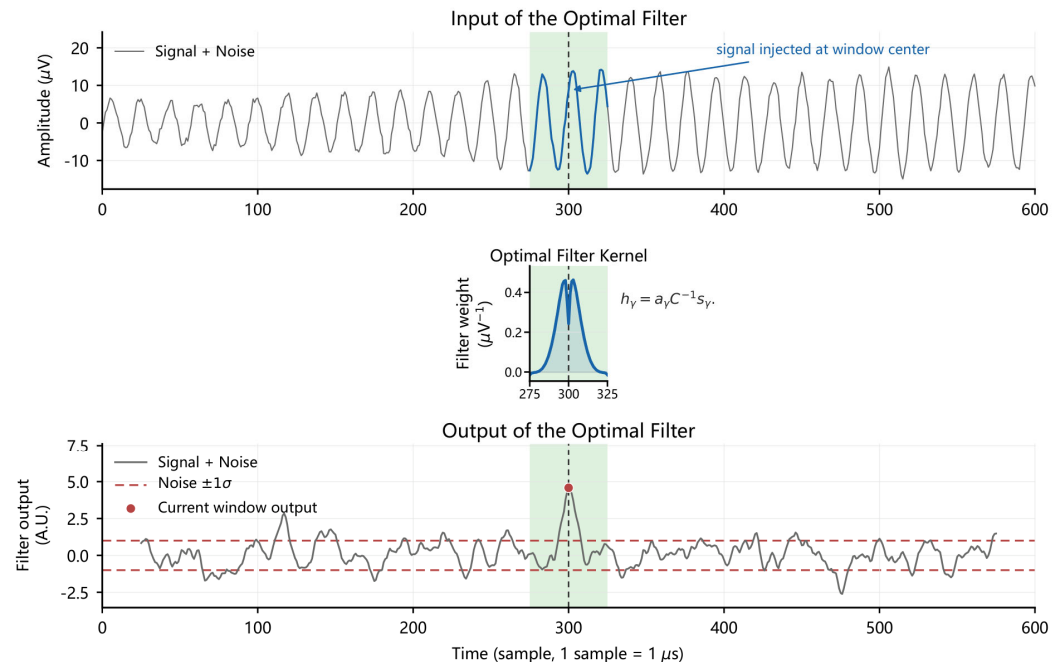
$$y_\gamma[k] = h_\gamma^T x_k$$

其中 x_k 表示第 k 个滑动窗口内的采样数据

输出信噪比

信号和最优滤波核匹配时，输出在注入时刻形成峰值。定义信噪比为

$$\text{SNR}(\gamma; \gamma) = (h_\gamma^T s_\gamma)^2$$



模板失配



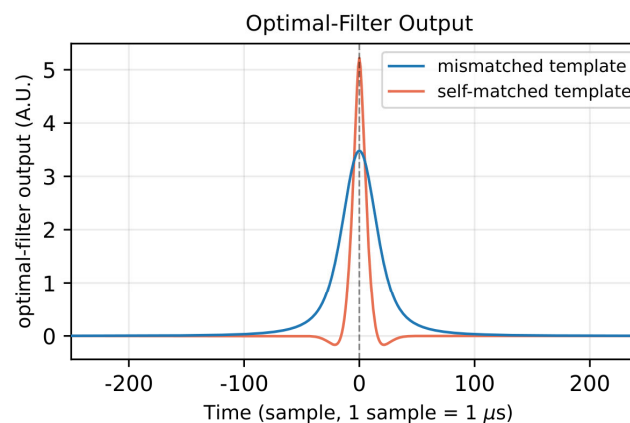
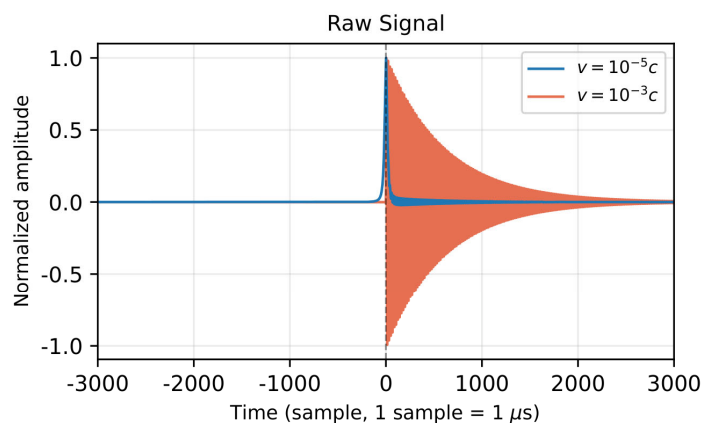
真实信号参数未知，不匹配的最优滤波可能产生显著失配并降低输出SNR

- 实战中真实信号参数 γ 未知，部署最优滤波模板参数 η 一般与之不同
- 失配定义为

$$m(\gamma, \eta) = 1 - \frac{\text{SNR}(\gamma; \eta)}{\text{SNR}(\gamma; \gamma)}.$$

当 γ 与 η 相同时，失配取最小

- 示例：用 $v = 10^{-5}c$ 模板滤波 $v = 10^{-3}c$ 信号，失配高达55.6%
- 解决方法：构建多模板库，并对所有模板响应取最大值，以降低参数失配导致的SNR损失



多模板触发与接收率



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

多模板滤波

- 对逐采样点移动的窗口计算全部模板响应，取最大响应与阈值比较
- 每个过阈窗口保留对应的 L 个原始采样点。连续 W 个触发窗口合并为一个事例簇，最终保存长度为

$$L_{\text{saved}} = L + W - 1$$

固定数据压缩率下的接收率计算

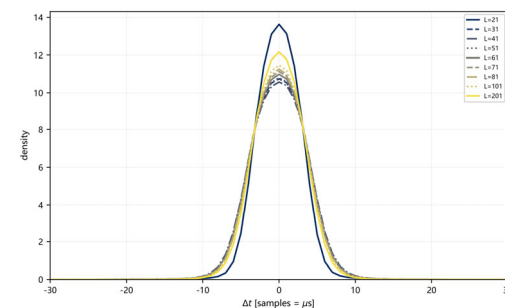
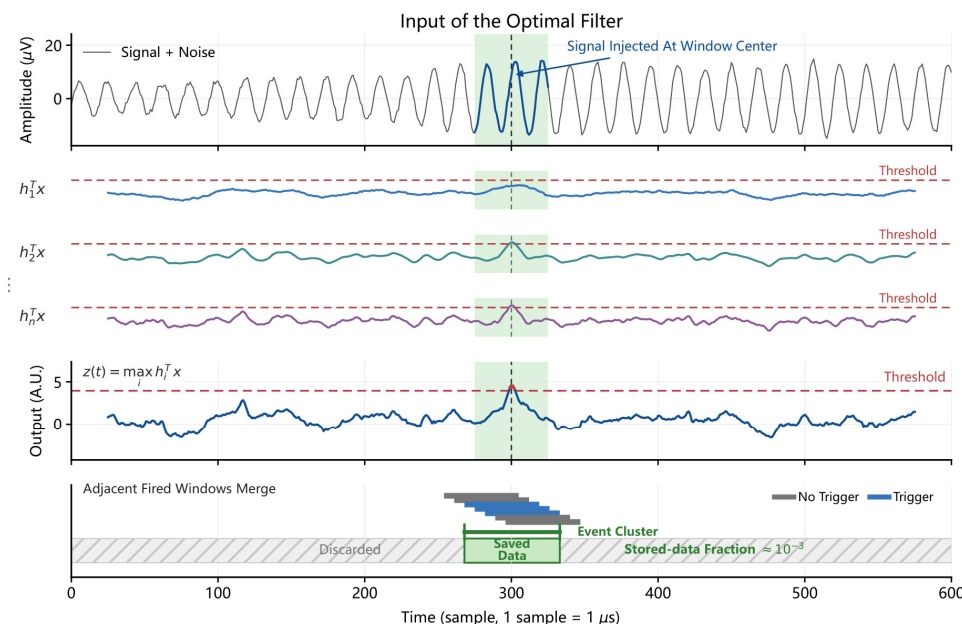
- $\mathcal{D}_-$: 由理想噪声模型生成的连续纯噪声流，共 2.01×10^8 个采样点，利用 $\mathcal{D}_-$ 标定阈值 τ ，使数据压缩率满足

$$\epsilon = \frac{\text{保存的采样点数}}{\text{原始采样点数}} = 10^{-3}$$

- $\mathcal{D}_+$: 包含 10^5 个带噪声信号事例，每个事例包含 501 个采样点。其中磁单极子信号参数从参数空间 Γ 中随机采样。将 τ 应用于 $\mathcal{D}_+$ ，若存在触发位置在信号注入位置附近 $\Delta t = |t_{\text{trig}} - t_0| \leq W_{\Delta t}$ ，则认为正确触发

$$A = \frac{\text{正确触发事例数}}{\text{总事例数}}$$

$W_{\Delta t}$ 为 Δt 分布的 95% 分位数



不同窗长下的触发时间偏差 Δt 分布

模板库建立



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

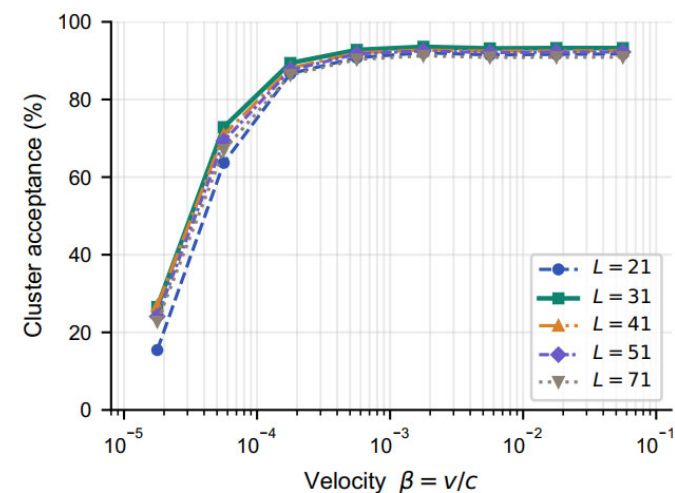
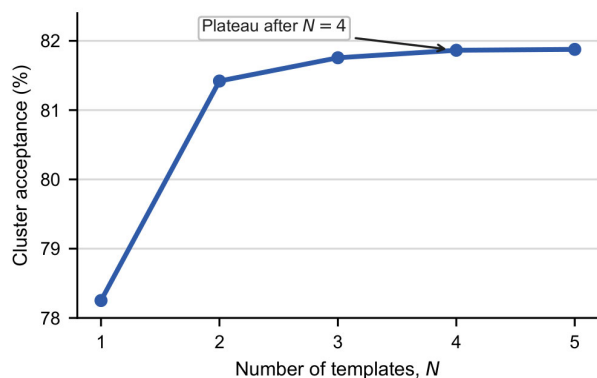
模板数目优化

- 增加模板可提高信号检出的概率，但同时也会提高噪声误检的概率，**因此存在最优模板数目**
- 扫描参数空间，按接收率 greedy 加入模板

窗长优化

- 减小窗长会降低单次触发的数据保存量，在固定数据压缩率下允许更多误触发或更低阈值，从而提高信号接收率；但窗长过短会截断波形并损失 SNR，反而降低信号接收率，**因此存在最优窗长**

综合各速度， $N = 4, L = 31$ 最优，不同速度的平均接收率达到 81.86%



目录



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

I. 研究背景与问题

II. 触发算法

III. FPGA 实现与验证

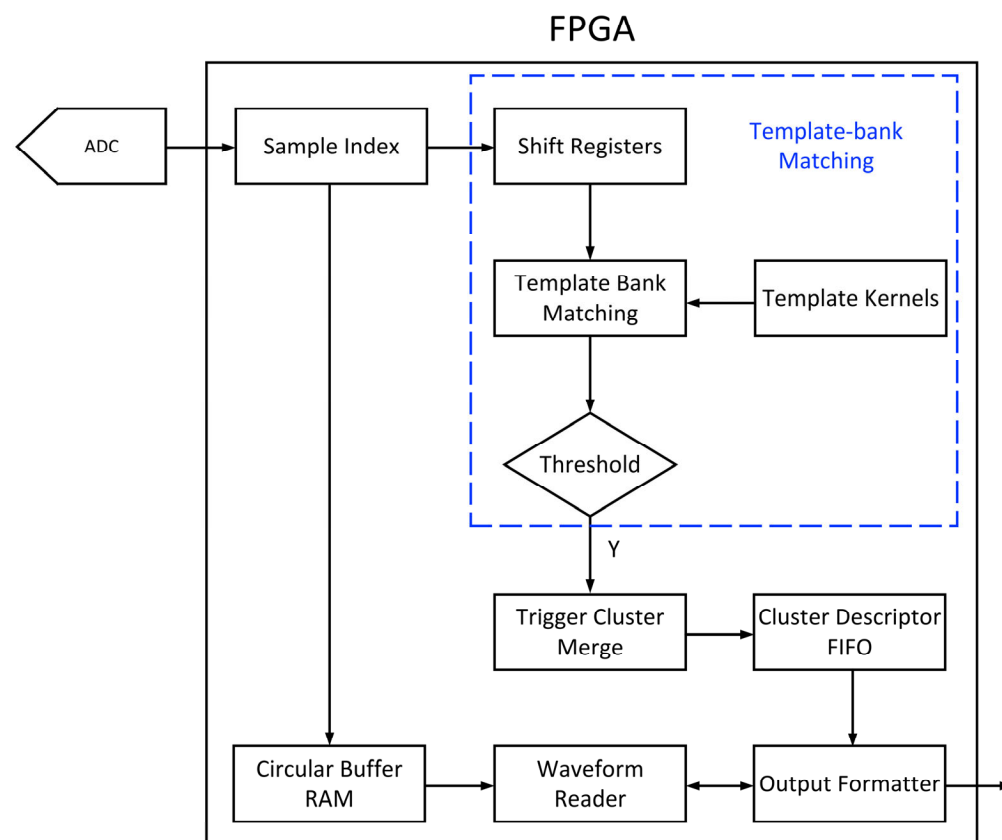
IV. 总结

FPGA 在线触发架构



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- 为了保证信号采集的准确性, SCEP 实际 ADC 采样率为 1 Msps, 位数为 20 bits
- 波形缓存: 环形 RAM 持续缓存原始波形
- 移位寄存器保存最新待滤波的 31 个样本点
- 模板库匹配算出各模板分数, 取最高分与阈值比较
- 记录保存区间、峰位、峰值分数等数据
- 回读原始样本, 打包准备输出



FPGA 实现模板库匹配

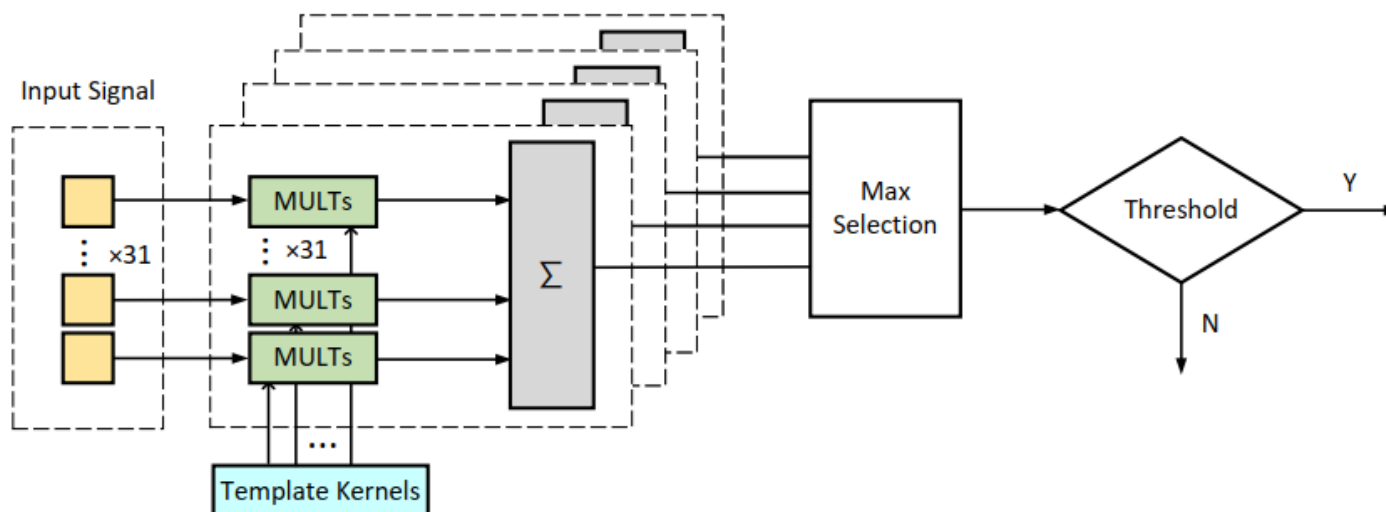


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- 主要计算量来自模板库匹配：

$$\rho_Y = \sum_i h_{Y,i} x_i$$

- 采用并行数据通路：每个模板通道将 31 样本窗与 31 个系数核相乘并求和；4 个通道，对应模板库的 4 个模板
- 各通道输出送最大选择单元，选出的最大值与阈值比较后产生在线触发判决

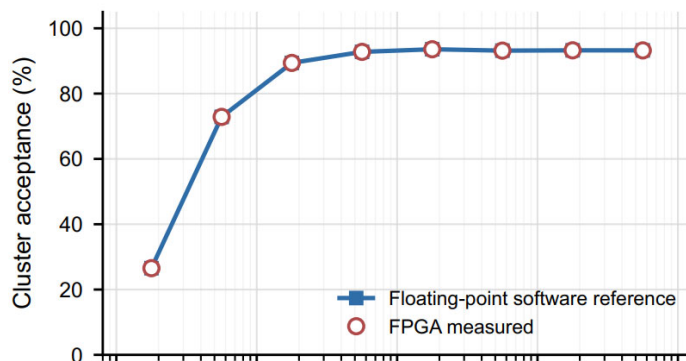
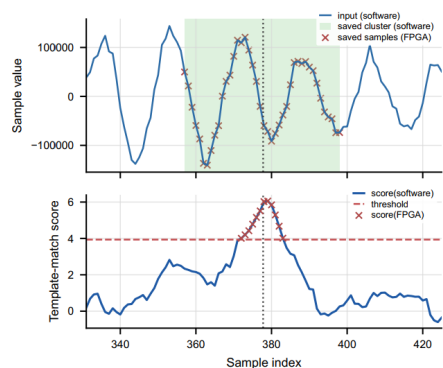
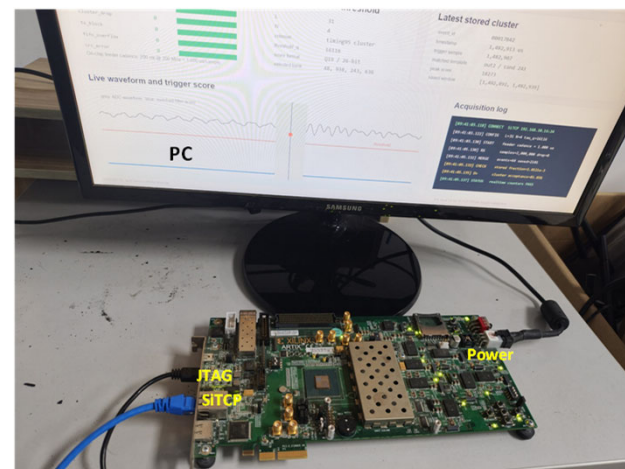


硬件和软件结果对比



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- 平台: Xilinx AC701 / XC7A200T
- 测试: PC 通过 SiTCP 下发测试波形, FPGA 按 $1\ \mu\text{s}$ 间隔送入1个采样点模拟真实 ADC 输入, 之后完成触发, 并将结果回传 PC
- 单事件验证: FPGA 输出的区间、触发窗数、峰值模板、峰值分数与软件完全一致
- D_- : 2.01×10^8 样本, 保存 203,432 样本, 数据压缩率为0.10% 与软件完全一致
- D_+ : 10^5 条含注入信号的正样本, 各个速度下的接收率与软件完全一致
- 上述长数据流触发过程中, 未发生 FIFO 溢出与数据丢失, 片上计数器确认无积压, 实时性得到验证



Metric / Resource	Value
Board / device	AC701 / XC7A200T-2FBG676C
Clock frequency	200 MHz
Slice LUT utilization	10,701 (8.00%)
Slice register utilization	16,600 (6.20%)
BRAM tile utilization	96 (26.30%)
DSP utilization	248 (33.51%)

目录



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

I. 研究背景与问题

II. 触发算法

III. FPGA 实现与验证

IV. 总结



- SCEP 大面积室温感应线圈阵列会产生 $O(10)$ EB yr⁻¹ 原始波形, L1 触发目标是将数据压缩率控制在 10^{-3}
- 本研究构建模板库最优滤波触发: 对每个滑窗计算多模板响应, 并以最大响应作为触发统计量
- 在固定数据压缩率下, 通过接收率 greedy 选择最终运行配置: $L = 31$ 、 $N = 4$, 不同速度的平均接收率达到 81.86%
- FPGA 上板验证表明, 硬件结果与软件一致

Thanks for listening!

Email: caozhe@ustc.edu.cn