

# 低资源消耗型多电压阈值采样的能量表征方法

汪飞, 周嘉雯, 蔡超\*

(华中科技大学 生命科学与技术学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 准确获取脉冲能量信息在原子能核技术领域至关重要, 现有脉冲能量表征方法中, 多电压阈值 (multiple voltage thresholds, MVT) 采样方法通过引入脉冲信号的先验信息, 结合过阈值时间信息, 可在不对脉冲信号进行额外硬件处理的情况下完成波形重建进而获得能量信息, 其具有较高的计数率, 目前已成功应用于石油测井、医疗成像等领域。然而现有的 MVT 采样方法在时间采样的实现过程中, 每路阈值均需一路独立的时间数字转换 (time-to-digital converter, TDC) 单元; 而一路 TDC 所需要的硬件资源较多, 在多通道场景下其带来的功耗和成本为系统的搭建引入挑战。为此, 本文提出了一种低资源消耗型能量表征方法 REMVT (resource efficient MVT)。REMVT 利用不同阈值被触发的时间不同, 且有严格的先后顺序这一特点, 将时间信息通过一条 TDC 链记录, 不同阈值对应的触发信号被连到一个组合电路。该组合电路消耗极少的硬件资源, 能在每个触发信号到来时将信号电平翻转。通过这种方式, 不同阈值下的触发时间与信号的边沿一一对应。通过解调这些信号边沿的间隔即可完成波形重建或能量表征。通过这种时间复用链技术, 极大降低资源的消耗, 如在 4/8 阈值的配置中, 资源消耗将降低 75%/87.5%。另外, 这种时间复用链技术降低了原来采用多链时的差异性, 使得时间测量的抖动减小, 因而波形重建的效果更优。相比 MVT, 该技术在使用更少资源的条件下将脉冲能量表征误差在 20.5% 内的事件占比由 72% 提升至 79%; 通过该技术, 在正电子发射断层成像场景中进行了测试, 获得了 13.2% @ 511 keV 的能量分辨率, 与高采样率通用示波器的能量表征结果相比, 仅 1.1% 的差距。此外, 本文提出了一种针对 REMVT 的事件检测与脉冲堆叠还原算法。该算法充分利用脉冲信号的先验信息, 即不同阈值被触发的先后顺序与时间间隔来完成对脉冲事件的可靠检测与堆叠事件的准确还原。实验结果表明, 93% 的脉冲堆叠事件被完整还原。

**关键词:** PET; 能量表征; 多电压阈值采样

中图分类号: TL82

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)11-2393-09

doi: 10.7538/yzk.2023.youxian.0878

## Energy Characterization Method of Resource-efficient Multiple Voltage Thresholds Sampling

WANG Fei, ZHOU Jiawen, CAI Chao\*

(College of Life Science & Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Accurate acquisition of pulse energy is very important in the field of atomic energy technology. In the existing energy characterization methods, the multiple voltage thresholds (MVT) sampling method introduces prior information of pulse signals and combines it with trigger times from multiple reference voltages to achieve direct energy characterization, without any pulse shaping

收稿日期: 2023-12-15; 修回日期: 2024-03-21

基金项目: 国家自然科学基金 (6220011218); 湖北省自然科学基金 (2022CFB034)

\* 通信作者: 蔡超

techniques. It involves no extra hardware components and has high count rate, rendering it applicable for a range of applications, including oil detection, medical imaging, etc. However, in conventional MVT sampling process, to record trigger times from one reference voltage threshold would consume one time-to-digital converters (TDC) unit. Since a TDC unit is not resource friendly, it would be notable challenging to apply this strategy in a multi-channel scenario, due to the increased power and cost. To address this, a resource-efficient multiple voltage thresholds (REMVT) sampling method was proposed. REMVT harnesses the fact that trigger times from each reference voltage appear sequentially and at a particular order, making it possible to record all of them using only a single TDC unit. To achieve this, the trigger signaling from each reference threshold voltage was routed together and fed to a combinatorial logic circuit. This logic circuit consumes few resources and can alter signal levels if an effective signaling arrive. By this means, the trigger times from each reference voltage were sequentially mapped to different edges. Deciphering interval between these edges would generate sufficient information for pulse reconstruction and hence energy characterization. This “TDC chain reuse” technique significantly reduces resource consumption. For example, in a configuration with 4/8 thresholds, resource consumption is reduced by 75%/87.5%. Additionally, this chain reuse technique reduces measurement variations from using multiple chains, leading to fewer jitters in time measurement and, consequently, better energy characterization performance. With REMVT, the energy characterization errors of 79% pulses are within 20.5%. While with MVT, this value reduces to 72%. Using this REMVT, an energy resolution of 13.2% for 511 keV can be obtained under practical experiment conditions, which is only 1.1% worse than the results obtained from a general high-speed oscilloscope. In addition, a new event detection and pileup event recovery algorithm was proposed in this paper. This algorithm fully exploits the prior information of pulses, namely the sequential order of each trigger time and the respective interval among them, to accomplish reliable event detection and accurate pileup event recovery. Results demonstrate that 93% pileup events can be identified and recovered.

**Key words:** PET; energy characterization; multiple voltage thresholds sampling

对脉冲能量信息的准确获取,在原子能核技术的相关领域有广泛的应用需求。如在基于中子法的石油探井中,需完成对核素的能谱测量从而估计石油的含量<sup>[1-2]</sup>。在质子刀治疗中,通过对特定能量伽马射线的跟踪,能对质子的放疗位置进行精确引导<sup>[3]</sup>。在正电子发射断层成像(positron emission tomography, PET)中对脉冲能量信息的精确采样,不仅能剔除杂散射线对PET成像带来的干扰,进而提高成像质量<sup>[4-7]</sup>;同时也能完成晶体间与晶体外部粒子的散射校正,因而极大地提升探测器的灵敏度<sup>[8]</sup>。

理论上最准确的方法是直接测量脉冲电荷量,门控积分法是测量脉冲电荷量的一种等效方法。该方法直接在模拟域积分,积分峰值反映原始脉冲的面积,因而通过测量积分电路的峰值,即

可得到脉冲的能量,该方法主要由积分电路与峰值采样电路两部分组成。积分电路的输出波形相比原始脉冲进行了展宽处理,所以脉冲的持续时间更长,这意味着采集峰值所需的采样率要求更低,可使用更高位比特的ADC进行采集,所以脉冲能量表征的精度得到了提升。该方法精度高、动态测量范围大,因而广泛应用于对能量分辨率测量精度要求较高的场景。然而该方法对波形进行了展宽处理,导致电路的死时间过长,因而计数率不足,导致PET探测器的探测效率不够。

采用高带宽高速模数转换器件是最简单、最直接、精度非常高的数字化方法<sup>[9-10]</sup>。该方法首先采集到原始脉冲的波形,再通过数值积分计算波形的面积,通过面积反映脉冲包含的电荷量。尽管该方法灵活性好、精度高,但由于在PET系统

中,闪烁脉冲通常带宽高、持续时间短,因而所需模数转换器件的采样率与带宽要求非常高;且传统的高速 ADC 一般功耗大、成本高。如临床 PET、全身 PET 这种需成千上万能量表征通道的系统,直接采用高速数模转换器件的方案在成本与功耗上根本行不通。尽管通道复用技术可降低 ADC 的数量,但这些技术不仅会对能量信息造成损失,同时也会影响时间性能。

过电压阈值时间测量法认为脉冲的能量与其峰值呈比例,而峰值又与脉冲的宽度关联<sup>[11-12]</sup>。因此该方法通过精确测量脉冲宽度的时间信息反推脉冲的能量,脉冲宽度的时间信息则通过时间数字转换器(time-to-digital converter, TDC)获得。然而,原始闪烁脉冲的高度与时间宽度并非线性关系,因此在转换的过程中通常需对脉冲进行整形处理。整形一方面会改变脉冲携带的信息,另一方面会损失一定的计数率。另外,整形处理后的脉冲高度与时间宽度也难以保证严格的线性关系,因此该方法的能量分辨率有限。最后,该方法的动态测量范围也有限。

多电压阈值(multiple voltage thresholds, MVT)采样方法是一种基于先验信息的非均匀采样方法<sup>[13]</sup>。该方法在获取过电压阈值时间信息的基础上引入先验信息,将非均匀采样的问题降维成优化问题,极大降低了针对高速信号采样的复杂度。该方法采集输入信号触发预设的若干个电压信号的时间信息,结合波形的先验信息,优化求解出波形的数学表达。由于未对波形进行任何处理,因此该方法计数率较高,尤其是针对一些需整形的电路而言,如电荷积分法<sup>[14-15]</sup>。现有方法中,为采集触发电压信号的时间信息,采用时间数字转换单元;每 1 对过阈值甄别信号使用了 1 个 TDC 通道,当电压信号的数量增多时,资源消耗将成倍增加。为此,本文提出低资源消耗型能量表征技术 REMVT(resource efficient MVT),REMVT 通过 1 个 TDC 单元记录多个电压信号的触发时间,将资源的消耗降低到原来的  $1/N$ ,  $N$  为所需要的电压信号的数量;另外,由于时间测量共用 1 个单元,测量结果的差异性将减少,时间采样的精度将得到提高,最终会带来能量表征精度的提升。同时介绍 REMVT 的硬件实现方案和在高计数率下的脉冲恢复算法以及 REMVT 的测试结果。

## 1 REMVT 脉冲采样原理

REMVT 通过采集多个过电压阈值的时间信息,并配合先验信息完成脉冲的重建。如在基于闪烁晶体与 PMT 或硅光电倍增管的探测器中,闪烁脉冲的波形可通过式(1)的双指数模型近似刻画<sup>[16]</sup>:

$$V(t) = ae^{-\frac{t-t_0}{t_r}}(1 - e^{-\frac{t-t_0}{t_d}}) \quad (1)$$

其中:  $t_r$  和  $t_d$  分别为脉冲的上升时间常数和衰减时间常数;  $a$  与闪烁脉冲的峰值信息相关;  $t_0$  为闪烁脉冲的起始时间。此处有 4 个未知变量,若获得了两个电压与过两个电压信号的 4 个时间信息,通过非线性优化即可完成对脉冲信号的重建。设两电压阈值为  $V_1$ 、 $V_2$ , 对应的时间信息分别为  $t_1'$ 、 $t_1''$ 、 $t_2'$ 、 $t_2''$ , 那么,通过建立如下优化目标方程即可完成对未知变量的求解。

$$(\hat{a}, \hat{t}_r, \hat{t}_d, \hat{t}_0) = \arg \min_{t_1', t_1'', t_2', t_2'', V_1, V_2} \sum_{i=1}^N [V(t_i) - V_i]^2 \quad (2)$$

$N \in [1, 2]$

通过优化结果  $(\hat{a}, \hat{t}_r, \hat{t}_d, \hat{t}_0)$  可完整表征采样后的脉冲波形,再利用数值积分可获得脉冲能量。实际中设定电压阈值数量一般超过 2 个,如 4 或 8 个,以提高采样信息的信息熵,进而提高脉冲能量表征的精度。

## 2 REMVT 脉冲采样电路原理

REMVT 脉冲采样电路主要包含比较器模块、数模转换模块以及时间测量单元模块,其基本电路框图如图 1 所示(以 4 阈值信号为例)。其中数模转换单元设定比较器模块的阈值电压,比较器的输出作为时间测量单元的输入。当比较器的输出信号产生电平跳变时,会在时间测量单元留下时间标记,利用这些标记即可完成对采样脉冲的恢复。在实际的电路实现中,上述采样模块

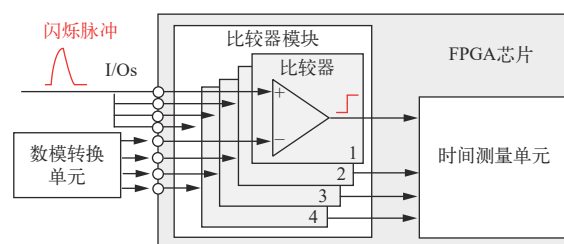


图 1 基本电路框图

Fig. 1 Basic circuit block diagram

可利用 FPGA 配合少量的外围元件,如电阻电容完成信号的采样。其中比较器模块可采用 FPGA 内部的 LVDS 实现,而时间测量单元则多采用进位链实现<sup>[17-18]</sup>。

REMT 利用脉冲波形的先验信息与过阈值的时间信息完成对高速脉冲的时域刻画,其采样过程如图 2 所示(以 4 个电压阈值为例,后文若未进行特殊声明,将均以 4 个电压阈值为例进行阐述)。

当脉冲信号到来时,在其上升沿设定的 4 个电压阈值信号按时间顺序被触发;脉冲的下降沿到来时,其触发顺序相反。图 3a 为脉冲信号触发时间信息采样的时序图,其中  $T_1 \sim T_4$  为脉冲上升沿过程中所设 4 个电压阈值  $V_{th1} \sim V_{th4}$  被触发所对应的的时间信息,  $T_5 \sim T_8$  对应脉冲下降沿。可看到这些电压信号被触发的顺序是固定的,若将这些信号触发的时间标记在一条 TDC 链中,也可恢复出每个电压阈值被触发的全局时间。如图 3a

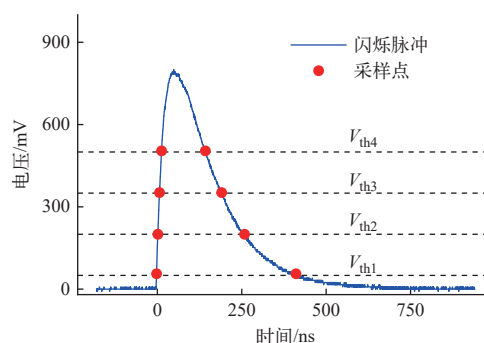
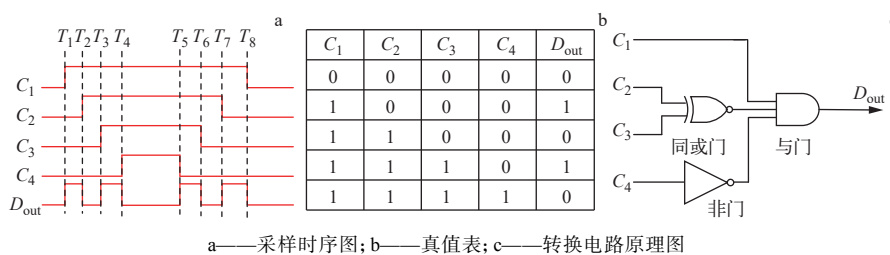


图 2 采样示意图

Fig. 2 Sampling diagram

中  $D_{out}$  对应的时间轴所示,当  $T_1$  被记录后,若  $T_2$  到达,可将 TDC 链上的触发状态进行翻转,那么只需记录  $T_1$  的全局时间,后续通过测量  $T_1 \sim T_2$  时间段内被翻转的电平的持续时间,即可得到  $T_2$  的时间,同理  $T_3 \sim T_8$  的时间可利用相同的方式得到。图 3b 给出了不同时刻条件下输入信号  $C_1 \sim C_4$  产生变化时 TDC 链上输出的状态表。根据真值表得到:



a——采样时序图; b——真值表; c——转换电路原理图

图 3 转换电路设计

Fig. 3 Conversion circuit design

$$D_{out} = C_1 \overline{C_2} \overline{C_3} \overline{C_4} + C_1 C_2 C_3 \overline{C_4} = C_1 \overline{C_4} (C_2 \odot C_3) \quad (3)$$

式(3)可用图 3c 所示的电路完成。至此,使用 1 条 TDC 链配合简单的逻辑转化单元,即可完成多个阈值触发时间的采样。另外,由于闪烁脉冲的上升沿较陡而下降沿相对较平滑,因此所采集到的时间信息在上升沿时较密集,即时间间隔小;而在下降沿时则较稀疏,时间间隔大,利用这一特征,可分辨出信号的起始点。当增加阈值数量以达到提高采样精度的目的时,采用本文的方案并不会引起资源的不足,因而非常适用于高精度脉冲采样场合。值得注意的是,当多个脉冲在时间上存在堆叠现象时,上述采样逻辑将不成立,这时需更多的处理流程。

REMT 相比于传统采样电路有如下优势:

1) 资源消耗少。以 4 个电压阈值的配置进行采样为例,采用 REMVT,电路中由于进位链数量的减少,消耗的资源降低了 75%。2) 时间采样精度更高。相比于原有的 MVT 电路结构,REMT 中进位链只有 1 条,不存在由异构链所导致更严重的非线性问题<sup>[19-21]</sup>,每个采样时间点的误差来源一致,因此由这些采样点所构建的脉冲信号的能量更接近真实值。

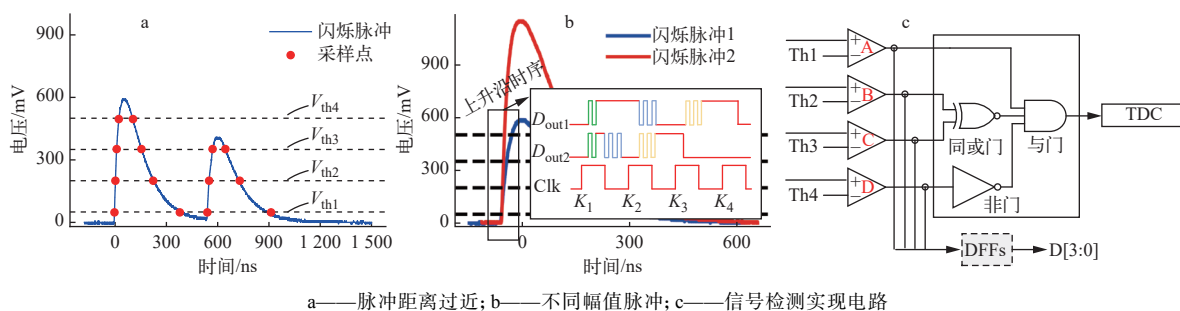
上述方案尽管极大降低了多阈值时的时间采样的资源消耗,但同时引入了新的问题:当两个脉冲在时间上隔得非常近时,前 1 个脉冲的尾部时间采样点会严重影响后 1 个脉冲的起始时间点的确认。

图 4 为干扰信号与检测电路。在图 4a 中可看到,前 1 个脉冲的结束时刻与后 1 个脉冲的起始



时刻过近时,前1个脉冲的下降沿由于信号的抖动会产生多次翻转。若后1个脉冲的起始时刻与前1个脉冲的最后1个时刻的翻转信号产生混叠,那么第2个脉冲的起始信号将会被当成噪声而滤掉。此时,第2个脉冲将无法获得有效的采样点数,这会降低系统的有效计数率;如图4b所示,

当脉冲的幅度较大时,脉冲的上升沿会更陡,这将导致在上升沿采集到的4个时间点信息非常接近,而在每个时间采样点处,由于DAC输出的不稳定性会导致在每个采样点附近均会产生多次触发的抖动。当4个采样点时间信息过分接近时,这些抖动混在一起,给准确区分带来困难。



a——脉冲距离过近; b——不同幅值脉冲; c——信号检测实现电路

图4 干扰信号与检测电路

Fig. 4 Interference signal and detection circuit

为克服这些问题,本文引入额外信息来辅助判断信号的起始点,如图4c所示,即通过记录LVDS比较器的输出状态完成信号起始点的检测。为此,在电路实现上,在LVDS比较器的输出端,引入4个D触发器来锁存比较器的状态。其中,D触发器的输入端接比较器的输出,其时钟信号为TDC的时钟信号。对于正常的单个脉冲,由于不同的阈值电压是按照顺序触发,因而D触发器的输出状态按时间顺序应为“0000”“0001”...“0011”“1111”...“0000”,即这些状态组成的16进制数值应该从小到大、最后由大变小为0。而前述的异常状态,由于有比较器输出的锁存状态作为辅助,因而可进行区分。

如图4a所示的堆叠现象,尽管前1个脉冲与后1个脉冲通过时间的密度难以区分,但当结束对第1个脉冲的采样后,触发器锁存的状态变为0,因而可将两个脉冲分开。值得注意的是,由于比较器输出的状态直接被锁存,较输入TDC所经历的电路延迟要小,因而在相同的时钟条件下,触发器的状态要超前于TDC的输出状态。那么实际情况下,通常采用“0001”作为输入信号的起始点。那么,判定时间序列是否属于1个脉冲的基本原则为:以D锁存的状态上跳沿作为信号的起始点,以D为状态,“0000”作为信号的结束;在此起始与结束点间,检验TDC输出时间序列是

否前半部分间隔短而后半部分较长。整个信号的检测流程如下。

**Data:** 状态寄存器集合  $\{D_1, D_2, \dots, D_M\}$ , TDC 时间序列  $\{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ 。

**Result:** 有效脉冲时间序列  $\{t_k, t_{k+1}, \dots, t_q\}$ 。

1) 检测信号的起始点  $P_s$ : 在起始点满足  $D_s = 0000, D_{s+1} - D_s > 0, 1 \leq s < M$ 。

2) 检测信号的结束点  $P_e$ : 在结束点满足  $D_e = 0000, D_{e-1} \neq 0000$ 。

3) 对  $P_s$  与  $P_e$  间的时间序列进行清洗: 利用 50 ns 窗口对时间序列进行聚类, 每个类中取类中心作为该类的时间值。

4) 对分类后的时间序列  $\{t'_1, t'_2, \dots, t'_p\}$  进行校验:  $\forall m \in [1, \lfloor \frac{q}{2} \rfloor - 1], k \in [\lfloor \frac{q}{2} \rfloor, q - 1]$ , 有  $|t'_p - t'_{p+1}| < |t'_k - t'_{k+1}|$

上述方案存在假设: 即当同一信号经过  $C_1 \sim C_4$  4条链路到达TDC的输入端口时, 链路对信号造成的延时相等。然而实际情况下, 信号经不同链路到达TDC的输入端口时, 延迟差别高达 ns 级。该问题的产生主要源于FPGA内部逻辑资源的分布位置固定。对FPGA的再编程, 只是改变了其内部资源的连接方式, 进而造成不同的逻辑行为, 但并没有改变这些资源的结构。这就造成  $C_1 \sim C_4$  4条信号链上, 由于异或、与门、非门的位置不同, 而信号链长差别较大。为将不同输入端口上由于传输线引入的延迟调整得同步, 本文引入了可变

延迟单元,以 Xilinx FPGA 平台为例,即 IDELAYE3 资源,以对不同输入口的延迟进行调整,使其保持同步。

### 3 结果

#### 3.1 实现

本文利用 Xilinx Zynq UltraScale+MPSoC ZCU104 (EK-U1-ZCU104-G) FPGA 开发板结合 LTC2664 DAC 芯片实现了 REMVT,如图 5 所示。该开发板使用了型号为 XCZU7EV-2FFVC1156 的 16 nm 工艺 FPGA 芯片,最高时钟为 400 MHz,内部共包含 28 800 个逻辑资源。该 FPGA 通过 SPI 接口控制 LTC2664,输出 4 路电压阈值供 LVDS 接口,以实现通过对不同阈值电压时间信息的采样。其中,LVDS 的 N 端接 LTC2664 设置的阈值电压,P 端为信号输入端。LVDS 的一路输出与图 3c 所示的转换电路连接,最后通过 TDC 模块采集时间信息;LVDS 的另一路输出到一个 D 触发器,用于记录 LVDS 的触发状态,以完成对堆叠事件的还原;TDC 与 D 触发器共用 400 MHz 的系统时钟,该系统时钟由内部的 FPGA 内部的 MMCM 模块提供。

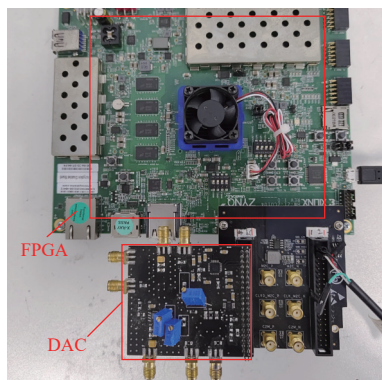


图 5 硬件实现图

Fig. 5 Hardware implementation

实验中 TDC 模块采用两级结构,将测量输入的时间间隔  $\Delta t$  分成时钟  $T$  的整数部分  $N$  与时钟的小数部分  $T_m$ ,  $\Delta T = NT + T_m$ 。其中  $N$  通过计数完成,而  $T_m$  则利用进位链测量。资源消耗列于表 1。本次实现的单条进位链包含 128 个 CARRY8 单元,它们在 FPGA 内部连成一条线,单个 CARRY8 的延时约 28 ps。通过记录 CARRY8 被触发的个数即可得到更精细的时间信息。采用传统的

MVT 方法进行时间测量时,由于 1 个阈值对应 1 条 TDC 链,所以采集 1 路脉冲信号需共消耗至少 512 个 CARRY8(占总数的 1.8%)和 512 个 D 触发器(占总数的 0.11%),以及 512 个 CLB(占总数的 0.45%)。因此,在 ZCU104 上最多仅能实现 58 路信号的能量信号采集;而相比之下,采用 REMVT 后,由于单路信号仅消耗 128 个 CARRY8(占总数的 0.45%),128 个 D 触发器(占总数的 0.03%),以及 128 个 CLB(占总数的 0.45%),因而可采样的通道数量得到了极大提升。

表 1 资源消耗表

Table 1 Resource consumption table

| 资源名称  | 消耗的数量          |                |                | 功率/W  | 最大通道数 |
|-------|----------------|----------------|----------------|-------|-------|
|       | DFF            | CARRY8         | CLB            |       |       |
| REMVT | 128<br>(0.03%) | 128<br>(0.45%) | 128<br>(0.45%) | 0.019 | 225   |
| MVT   | 512<br>(0.11%) | 512<br>(1.8%)  | 512<br>(1.8%)  | 0.058 | 58    |

#### 3.2 实验结果

**3.2.1 模块化验证** 为验证实现方案的可行性,首先进行了功能级仿真。实验中,LTC2664 输出的 4 路阈值电压分别为 200、250、300、350 mV,实验中利用 100 MHz RIGOL DG4162 信号发生器模拟脉冲宽度为 400 ns 的  $\gamma$  信号作为输入,信号幅值为 500 mV。实验中将信号输入 REMVT 采样电路以获取采样时间信息,为进行对比,同时也实现 4 路电压阈值的传统 MVT 采样电路。实验中通过 FPGA 内部的逻辑分析仪 ILA 模块抓取不同 TDC 线路上的采样波形。理论上,针对传统 MVT 而言,每路 LVDS 比较器输出所连接的 TDC 链路上均能观察到 1 个窄脉冲的波形,阈值电压越高,脉冲的宽度越窄。在传统的 MVT 阈值电压被触发的边沿,REMVT 对应的 TDC 链上将会产生信号的翻转。实际采样得到的脉冲波形如图 6 所示,可看到,仿真的理论波形与实际波形一致,验证了方案的可行性。

**3.2.2 脉冲还原性能** 为验证脉冲还原算法的性能,本文在高计数条件下进行验证。实验的设置如图 7 所示,实验中采用 2 mL、10 mCi 的  $^{18}\text{F}$  作放射源,利用硅酸钪晶体 ( $\text{Ce:Lu}_{2(1-x)}\text{Y}_{2x}\text{SiO}_5$ ,LYSO) 与硅光电倍增管 (SiPM) 组成的探头对其射线进行检测,其中 LYSO 的尺寸为 20 mm×4 mm×4 mm,

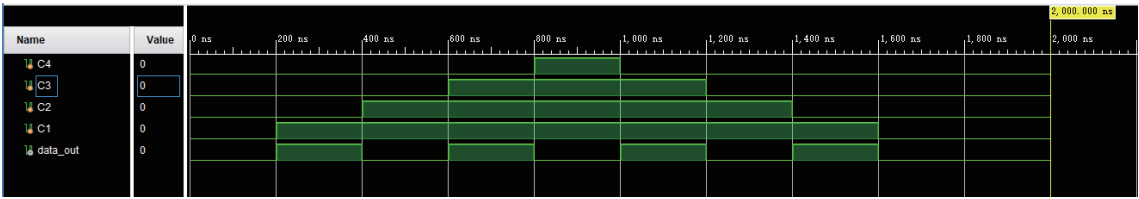


图 6 功能性仿真验证波形  
Fig. 6 Functional simulation

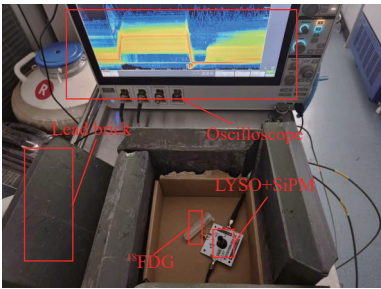


图 7 脉冲重建实验设置  
Fig. 7 Experiment settings for pulse reconstruction

SiPM 为 FJ40035<sup>[22]</sup>, 探头距源约 2 cm, 以增加脉冲堆叠的可能性。实验中采集 SiPM 的慢输出闪烁脉冲, 为便于与真实信号作比较, 首先利用 MSO54

示波器(500 MHz 带宽, 6.25 GS/s 采样率)记录大量的闪烁脉冲然后进行离线分析。实验中认定, 两脉冲交叉部分的最低电压信号若大于 10 mV, 则判定为堆叠事件。图 8 示出了几种典型的脉冲堆叠事件, 在传统的采样中, 这些事件会当作异常采样而被丢弃, 但 REMVT 通过对采样点的分析, 可将堆叠脉冲还原。

实验中的还原算法认定, 当采集到的脉冲信号点数足够完成式(2)中的优化过程时, 即采样点数至少有 4 个, 如上升沿 1 个, 下降沿 3 个, 即认定脉冲可恢复。根据表 2 给出的统计规律, 本文所提出的脉冲恢复算法, 其恢复比率高达 93%。

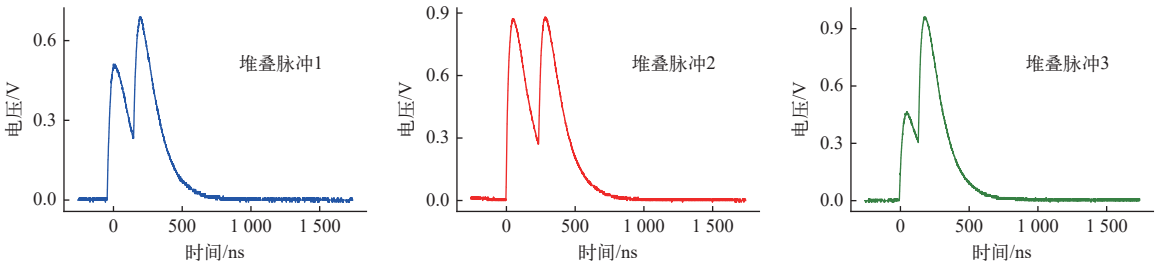


图 8 脉冲堆叠现象  
Fig. 8 Pileup events

表 2 堆叠还原统计  
Table 2 Pileup events restore statistics

| 采样脉冲数量 | 堆叠数量 | 还原数量 | 恢复率/% |
|--------|------|------|-------|
| 5 000  | 506  | 472  | 93    |

**3.2.3 能量表征性能** 实验中模块的配置与脉冲还原性能实验相同。实验中, 采用一钠源<sup>22</sup>Na 作为放射源, 实验设置如图 9 所示。实验中除采用 REMVT 对慢脉冲进行采集外, 还利用 MSO54 示波器对波形进行记录, 目的是将由 REMVT 表征后的脉冲能量与示波器所提供的相对的真实值进行对比。图 10a 展示了 REMVT 与传统 MVT 采样

方法在单个波形重建过程中的效果对比图, 从图中的结果可看到, 由 REMVT 重建得到的波形更接近示波器直接采集到的信号。图 10b、c 则比较了 REMVT 与 MVT 在不同区间下能量表征误差, 从图中可看到, 针对不同能量的脉冲, REMVT 的能量表征误差总小于 MVT, 虽然最大能量表征误差两者相差不大, 均在 22% 以内; 但 REMVT 能将 79% 的能量表征误差控制在 20.5% 内, 而 MVT 则仅 72%。图 10d 为 REMVT、传统 MVT 以及利用示波器直接采样得到的能谱图, 其中, 能量分辨率分别为 13.2%、13.5%、12.6%。可发现 REMVT 与示波器采集得到的能谱图非常接近, 仅 1.1% 的

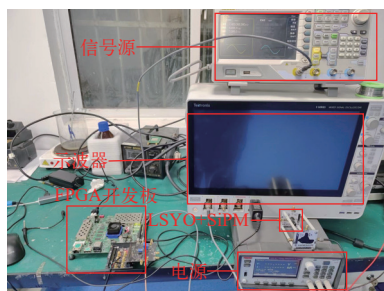
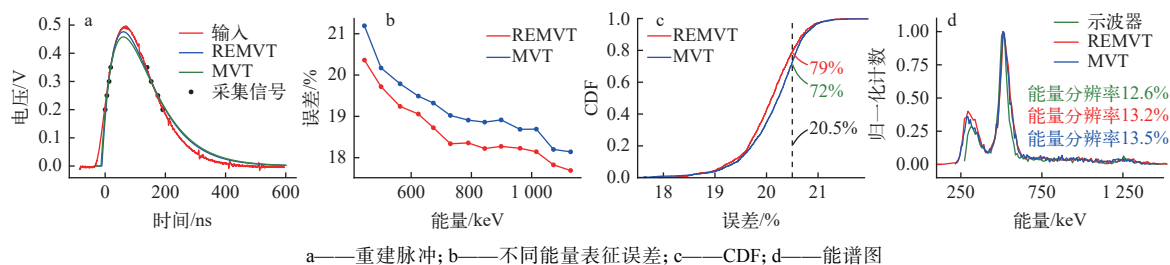


图9 能谱测量实验设置

Fig. 9 Setup for energy spectrum measurement

差距,较传统 MVT 得到的结果还要小。REMVT 并没有因为减少 75% 的资源而牺牲性能。在小能量区域,与示波器得到的能谱有些差异,这主要是



a——重建脉冲;b——不同能量表征误差;c——CDF;d——能谱图

图10 脉冲重建结果

Fig. 10 Pulse reconstruction results

#### 4 结论

本文提出了一种资源消耗较极低的直接能量表征技术 REMVT。REMVT 本质上是利用时间与先验信息完成对脉冲信号的采样。为降低采样过程中的资源消耗,REMVT 提出了一种时间链的复用技术,将多路信号的到达时间戳通过不同的翻转状态刻录到单条时间链上,以达到极大降低资源消耗的目的。相比于传统 MVT 方法,REMVT 在典型的 4 路阈值配置中,将资源消耗降低了 75%;阈值的数量越多,资源的消耗相对越少。同时,为应对脉冲堆叠问题,本文提出一种直接恢复算法,在增加少量触发器的基础上,可将 93% 的堆叠脉冲恢复出来。最后,仿真与实验结果均证明了本文提出的 REMVT 的可行性与有效性,相比传统方法,其能量表征误差得到了减小;可实现 13.2% 的 511 keV 的能量分辨率,相较专用示波器,仅有 1.1% 的差距。

#### 参考文献:

[1] CHEN Q, ZHANG F, QIU F, et al. Quantitatively deter-

由能量表征误差的非线性问题造成的。具体地,在对小脉冲进行能量表征时,其误差大,反之则较小,图 10b 也证明了这一情形。从图中可看到,在小能量区域,其能量表征误差可超过 20%,而当脉冲能量大于 600 keV 时,其能量表征误差则在 10% 左右。这一问题通过校准的方法可得到一定的缓解,即建立一个查找表,给实际测量得到的能量值添加一定的偏移量。这一方法的使用需结合特定的场景,如在 PET 场景下这一方法并不需要,因为 PET 中关注的重点是能量 511 keV 的  $\gamma$  射线产生的闪烁脉冲。

mining gas content using pulsed neutron logging technique in closed gas reservoir[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 198: 108149.

[2] ZHANG Q, HU Y. A novel physics-based resolution improvement method for neutron-density log[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 226: 211783.

[3] PAUSCH G, BERTHOLD J, ENGHARDT W, et al. Detection systems for range monitoring in proton therapy: Needs and challenges[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2020, 954: 161227.

[4] 王培林, 李道武, 丰宝桐, 等. 正电子发射断层成像系统中数字化多通道时间数字转换研究[J]. *原子能科学技术*, 2011, 45(5): 637-640.

WANG Peilin, LI Daowu, FENG Baotong, et al. Multi-channel digitized time-to-digital converter of positron emission tomography system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2011, 45(5): 637-640 (in Chinese).

[5] 帅磊, 丰宝桐, 胡婷婷, 等. 乳腺专用 PET 连续采样电子学系统设计与性能测试[J]. *原子能科学技术*, 2011, 45(5): 628-632.

SHUAI Lei, FENG Baotong, HU Tingting, et al. Design and performance of continuous sampling module for



- positron emission mammography[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2011, 45(5): 628-632 (in Chinese).
- [6] CAI C, WANG F, CHEN X, et al. High count rate peak-based PET detector[J]. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 2023, 7(6): 597-606.
- [7] POPESCU L M, LEWITT R M, MATEJ S, et al. PET energy-based scatter estimation and image reconstruction with energy-dependent corrections[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, 51(11): 2919-2937.
- [8] SURTI S, KARP J S. Impact of event positioning algorithm on performance of a whole-body PET scanner using one-to-one coupled detectors[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2018, 63(5): 055008.
- [9] RITT S. Design and performance of the 5 GHz waveform digitizing chip DRS3[C]//2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2007: 2485-2488.
- [10] RITT S. Design and performance of the 6 GHz waveform digitizing chip DRS4[C]//2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Dresden, Germany: IEEE, 2008: 1512-1515.
- [11] KIPNIS I, COLLINS T, DeWITT J, et al. A time-over-threshold machine: The readout integrated circuit for the BABAR Silicon Vertex Tracker[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, 44(3): 289-297.
- [12] YEOM J Y, DEFENDI I, TAKAHASHI H, et al. A 12-channel CMOS preamplifier-shaper-discriminator ASIC for APD and gas counters[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(4): 2204-2208.
- [13] XIE Q, KAO C M, HSIAU Z, et al. A new approach for pulse processing in positron emission tomography[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, 52(4): 988-995.
- [14] KURASHIGE H, TANIGUCHI T, YORIBAYASHI Y. A high-resolution and high-stability charge-integration ADC for high-rate experiments[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1988, 35(3): 1018-1021.
- [15] DONG Y, LV J, CHAI J, et al. Highly sensitive MoS<sub>2</sub> photodetector based on charge integration and field-coupled effect[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(12): 6884-6889.
- [16] SHAO Y. A new timing model for calculating the intrinsic timing resolution of a scintillator detector[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2007, 52(4): 1103-1117.
- [17] FINOGEEV D, GUBER F, IZVESTNYI A, et al. Development of a 100 ps TDC based on a Kintex 7 FPGA for the high granular neutron time-of-flight detector for the BM@N experiment[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2024, 1059: 168952.
- [18] ZHAO L, HU X, LIU S, et al. The design of a 16-channel 15 ps TDC implemented in a 65 nm FPGA[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, 60(5): 3532-3536.
- [19] CHEN H, LI D D U. Multichannel, low nonlinearity time-to-digital converters based on 20 and 28 nm FPGAs[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(4): 3265-3274.
- [20] XUE Z, LIANG H, DENG F, et al. A 32-channel FPGA-based multi-phase sampling TDC for RPC detector [C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE). Shenyang, China: IEEE, 2020: 14-18.
- [21] LIU C, WANG Y. A 128-channel, 710 M samples/second, and less than 10 ps RMS resolution time-to-digital converter implemented in a kintex-7 FPGA[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, 62(3): 773-783.
- [22] Sensors J SiPM. Silicon photomultipliers (SiPM), high PDE and timing resolution sensors in a TSV package [EB/OL]. [2021-8]. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/microj-series-d.pdf>.