

高精度数字化定时方法研究^{*}

孔誉谦¹⁾ 吴鸿毅^{2)3)†} 张广鑫^{1)‡}

1) (中山大学中法核工程与技术学院, 珠海 519082)

2) (中国原子能科学研究院, 核数据全国重点实验室, 北京 102413)

3) (北京大学, 核物理与核技术全国重点实验室, 北京, 100871)

随着核物理与核探测技术的发展, 传统模拟电子学获取系统难以满足大规模探测阵列的需求。数字化获取系统凭借其低单通道成本、小死时间及参数灵活可调等优势, 正得到日益广泛的应用。然而, 高精度时间测量仍是其关键技术瓶颈, 尤其在测量寿命短于采样时间间隔时, 需依赖插值算法重建采样点间的信号, 其精度易受相位差、采样率、波形形状、定时方法及插值参数等因素制约。本文通过模拟仿真, 系统研究了数字化恒比定时方法在不同参数下的精度变化。结果清晰地揭示了相位差对定时精度的显著影响, 并证实提高采样率可有效抑制该影响。研究发现, 为实现最优定时精度, 输入信号的上升沿时间并非越短越好, 而是存在一个最佳区间。通过采用统一的恒比定时方法处理不同上升沿速率的信号, 发现在不同采样率下, 当上升沿涵盖 4 至 6 个采样点时, 可获得最佳的定时精度。本研究对数字化快时间测量系统的优化设计具有指导意义。

关键词: 快时间定时; 伽马谱学; 恒比定时; 数字化获取; 溴化镭;

PACS: 07.05.Hd, 07.05.Kf, 29.30.Kv, 29.40.Mc

1 引言

原子核激发态寿命是探究原子核波函数特性的敏感探针, 特别适用于揭示那些占比虽小却至关重要的组态信息。系统测量不同核素中相似组态的能级寿命, 对于深入理解原子核的集体运动、形状演化及新“幻数”等关键核物理问题具有重要意义^[1-9]。

^{*} 国家自然科学基金青年项目 (12405144); 广东省自然科学基金面上项目 (2025A1515012112) 资助的课题。

[†] 通信作者. E-mail: wuhongyi@pku.edu.cn (通信作者)

[‡] 通信作者. E-mail: zhanggx37@mail.sysu.edu.cn (通信作者)

第一作者. E-mail: kongyq5@mail2.sysu.edu.cn (第一作者)

基于溴化镧 (LaBr_3) 探测器的 γ 射线的快时间测量技术, 通过直接测量级联 γ 射线并提取其时间标记, 为获取能级寿命信息提供了有效手段^[10-17]。在传统模拟电子学系统中, LaBr_3 探测器输出的快信号通常输入至恒比定时器 (CFD), 以提取与幅度无关的定时信号, 继而通过时间-幅度转换器 (TAC) 和模数转换器 (ADC) 分别获取时间和能量信息^[13,18]。然而, 面对大规模 LaBr_3 探测阵列, 模拟电子学系统线路日趋复杂, 不仅增大了系统死时间, 还可能引入额外噪声, 从而限制系统的定时精度^[13,19]。

近年来, 数字化获取系统因其电子学结构简洁、参数易于调整、死时间小等突出优点, 在核物理实验中应用愈发广泛^[20-26], 尤其适用于大规模快时间探测阵列^[27]。然而, 数字化定时方法面临采样率不足的固有挑战: 例如, 1 GHz 采样率对应的 1 ns 采样间隔, 通常远大于 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器优于 400 ps 的定时精度。因此, 数字化定时精度会受到信号相对于采样时钟相位差的显著影响。

在数字化系统中, 采样时钟与输入信号通常不相关, 它们的相对相位是完全随机的。为了获得高于采样周期的定时精度, 必须利用过零点附近的两个或多个采样点进行插值。这种插值会引入误差, 该误差是相位的函数。

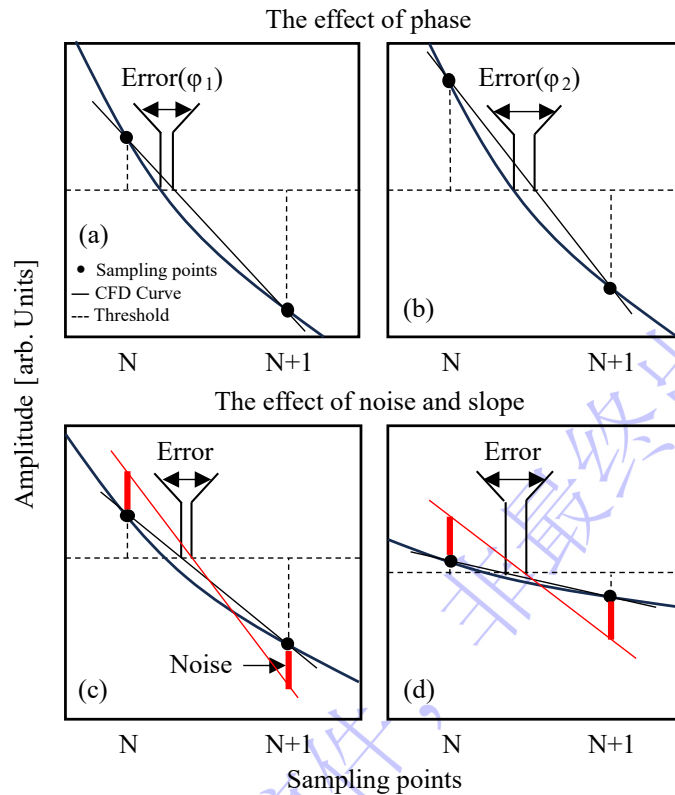


图 1: (网络版彩色) 定时精度受到噪声和相位 (a)-(b), 斜率/噪声 (c)-(d) 的影响。

Fig. 1: (Color online) Timing accuracy is affected by noise and phase (a)-(b), as well as slope/noise (c)-(d).

考虑一个双通道的时间差测量 ΔT , 每个通道的定时时刻都包含一个与自身信号相位相关的插值误差

Error(φ)。因此，实际测得的时间差为：

$$\Delta T_{\text{measured}} = (T_{\text{stop}} - T_{\text{start}}) + [\text{Error}(\varphi_{\text{stop}}) - \text{Error}(\varphi_{\text{start}})]. \quad (1)$$

当两信号的真实时间差为采样周期 T_s 的整数倍时， $\varphi_{\text{start}} = \varphi_{\text{stop}}$ ，两个误差相互抵消，总插值误差为零；当时间差为 T_s 的半整数倍时，两信号的相位差最大，误差差异也达到极值，从而导致最差的定时精度，并在时间差谱上可能产生特征性的双峰结构。其原理亦如图1 (a)-(b) 所示。同时，图1(c)-(d) 展示了噪声和幅度对定时精度的影响。

此外，与模拟定时类似，数字化定时精度亦受噪声影响。在模拟电子学中，通常要求信号上升沿尽可能快；但在数字化获取中，受限于采样率，过短的上升沿会导致采样点不足，插值误差大，反而损害定时精度。

已有诸多研究致力于提升数字化定时性能。例如，在正电子发射断层成像中，文献 [28] 利用 5 GHz 采样率的数字化示波器处理 LaBr_3 信号，获得了优于 300 ps 的定时精度，但所用晶体尺寸较小 (\varnothing 13 mm \times 13 mm)。文献 [29] 则利用 100 MHz 采集卡分析 LYSO 晶体信号，采用最大斜率外推法 (MRI) 和初始斜率外推法 (IRI)，定时精度约为 700 ps。

2014 年，文献 [30] 比较了模拟与数字化方法在 γ 谱学中的应用，使用 4 GHz 采样率对 \varnothing 1.5 英寸 \times 2 英寸 LaBr_3 晶体信号进行处理，数字化方法获得了 375 ps 的定时精度，略逊于模拟方法的 240 ps。同年，文献 [31] 在中子飞行时间测量中应用数字化定时，并讨论了相位差影响，最终定时精度约为 500 ps。2015 年，文献 [32] 采用三次多项式插值法处理 BaF_2 和液闪探测器信号，在 500 MHz 和 200 MHz 采样率下，最佳定时精度达 700 ps 左右。文献 [33] 则首次清晰揭示了相位差对 LaBr_3 定时精度的影响，甚至在时间差谱上观察到双峰结构。2018 年，文献 [34] 系统比较了不同探测器的时间性能，并通过选择上升沿斜率大的数据提升了定时精度。2019 年，文献 [35] 和 [36] 分别采用遗传算法和自协方差分析法，将 LaBr_3 的定时精度提升至 136 ± 1 ps 和 155 ± 3 ps，但算法复杂性在一定程度上限制了其广泛应用。

综上所述，尽管国际上在数字化定时精度研究方面已取得显著进展，但关于相位差影响的系统性分析、信号上升沿长度的最优选择等关键问题，仍缺乏明确结论。本文旨在通过模拟仿真方法，系统研究不同参数（尤其是相位差和信号上升沿）对数字化恒比定时精度的影响，以期优化数字化定时系统提供理论依据。

本文通过模拟仿真的方法，测试不同参数下，数字化恒比定时的精度变化，重点在于探究相位差和原始信号上升沿对数字化定时精度的影响。本文第 2 节介绍模拟原理，包括脉冲信号的模拟产生和采样，以及数字化恒比定时方法。第 3 节展示模拟结果的讨论。第 4 节汇总本工作的结论，并对未来可以进一步

开展的工作做出展望。

2 模拟原理

本章详细介绍模拟信号的生成与采样、数字化定时方法实现以及定时精度的评估流程。

2.1 脉冲生成和采样

本研究采用以下公式模拟探测器输出的快时间脉冲信号：

$$y(t) = A \left(e^{-\frac{t-t_0}{t_d}} - e^{-\frac{t-t_0}{t_r}} \right), \quad (2)$$

其中，参数 A 为信号幅度， t_r 与 t_d 分别控制信号的上升时间和衰减时间， t_0 为信号触发时刻。

该公式生成的典型波形如图2 (a) 黑色曲线所示。基于此连续波形，可按用户设定的频率进行离散采样，图2 (a) 中的红色 “*” 标示了 250 MHz 采样率 ($T_s = 4$ ns) 下的采样点。为模拟实际系统的噪声，在每个采样点的幅度上叠加了一个高斯分布随机数，高斯分布随机数的中心值为 0，标准差为 σ_{noise} 。通过调整表1所列的各项参数，可灵活生成不同形状的信号并以不同频率进行采样，从而满足系统研究的需要。

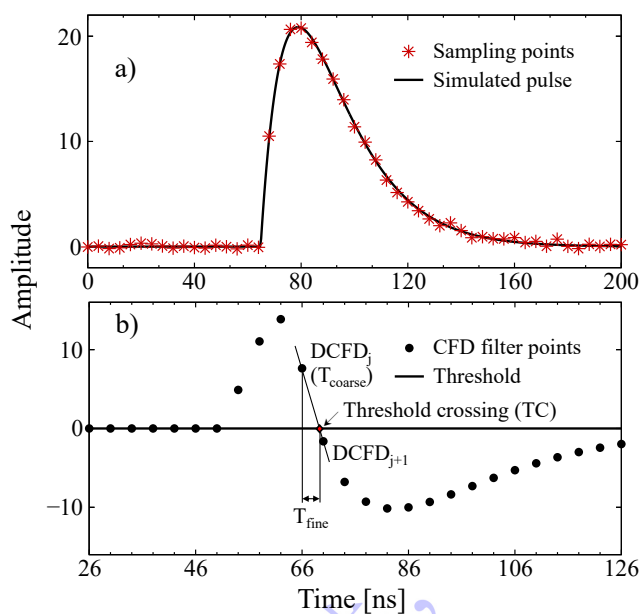


图 2: (网络版彩色) 采样波形与定时原理。(a) 一种连续波形和其 250MHz 采样波形;(b) 模拟 CFD 的数字化实施示意图。

Fig. 2: (Color online) Sampling waveform and timing principle. (a) A continuous waveform and its 250 MHz sampled waveform; (b) Schematic diagram of the digital implementation of analog CFD.

表 1: 参数及其含义

Table 1: Parameters and their meanings

| Parameter | Meaning |
|------------------|---|
| A | Amplitude |
| t_r | Signal rise time |
| t_d | Signal decay time |
| t_0 | User-defined signal start time |
| Δt_0 | User-defined time difference between two signals |
| f | Timing fraction (%) |
| t_{delay} | Delay time |
| σ_{in} | Standard deviation of the user-defined input time difference distribution |
| σ_{out} | Standard deviation of the output time difference distribution |
| σ_{noise} | Standard deviation of noise |

2.2 数字恒比定时方法

恒比定时 (CFD) 旨在提取与脉冲信号幅度无关的定时信息。在传统模拟电子学中, CFD 将原始信号分为两路: 一路进行衰减, 另一路进行延迟, 然后将两路信号相减, 如公式3所示:

$$CFD(t) = f \cdot w(t) - w(t - t_{delay}) \quad (3)$$

其中, $w(t)$ 为原始信号, $CFD(t)$ 为生成的双极性信号, 其过零点即为定时点。

在本研究的数字化实现中, 基于离散采样点, 采用类似的恒比定时原理^[27,37-39], 其数学表达式转换为:

$$DCFD[i] = f \cdot w_s[i] - w_s[i - t_{delay}] \quad (4)$$

其中, $DCFD[i]$ 为数字双极性信号, $w_s[i]$ 为第 i 个采样点, t_{delay} 为延迟时间, 在数字化系统中通常取为采样周期 T_s 的整数倍, 即 $n_{delay} = t_{delay}/T_s$, 以方便计算。

在实际处理中, 通过 DCFD 双极性信号过零点前后的两个采样点进行线性插值, 以获得比采样周期

更精确的定时时刻 TC ，如图2 (b) 所示。 TC 由两部分构成：

$$TC = T_{\text{coarse}} + T_{\text{fine}} \quad (5)$$

其中， T_{coarse} 是过零前最后一个采样点 $\text{DCFD}[j]$ 的时间戳 (time stamp)，而 T_{fine} 通过线性插值计算得到：

$$T_{\text{fine}} = \frac{\text{DCFD}[j]}{\text{DCFD}[j] - \text{DCFD}[j+1]} \cdot T_s \quad (6)$$

为评估定时精度，本研究重复生成两个模拟脉冲信号，其输入时间差 Δt_0 服从标准差为 σ_{in} 的高斯分布。对每一对信号进行采样并应用上述数字化恒比定时方法，得到输出时间差分布，其标准差记为 σ_{out} 。 σ_{out} 越接近 σ_{in} ，表明定时精度越好。通过连续调节两信号间的相对相位（时间差）、采样率、波形形状（特别是上升沿长度）以及恒比定时参数 (f, t_{delay})，即可系统研究这些因素对数字化定时精度的影响。

3 模拟结果和讨论

本章分为两个小节，分别探讨相位差、信号上升沿长度与恒比定时参数对数字化定时精度的影响。

3.1 相位差对数字化恒比定时精度的影响

如第2.2所述，数字化定时精度受限于插值算法对采样点间信号形态的描述能力。任何形式的插值都难以完全避免相位差的影响（图1 (a)-(b)）。

本研究中，两个模拟脉冲信号的波形参数设置为 $t_r = 13 \text{ ns}$ ，为随机选取， $t_d = 60 \text{ ns}$ ，以便与后续模拟保持一致；输入时间差 Δt_0 服从 $\sigma_{in} = 100 \text{ ps}$ 的高斯分布。数字化采样率为 250 MHz ($T_s = 4 \text{ ns}$)；恒比定时参数设定为 $f = 25\%$ ， $t_{delay} = 12 \text{ ns}$ 。模拟结果如图3所示。当两信号时间差为 T_s 整数倍时（图3 (a)），输出时间差分布的标准差 $\sigma_{out} = 104 \pm 1 \text{ ps}$ ，与 $\sigma_{in} = 100 \text{ ps}$ 非常接近；而当时间差为 T_s 半整数倍时（图3 (b)），定时精度显著恶化， $\sigma_{out} = 319 \pm 1 \text{ ps}$ ，且时间差分布呈现明显的双峰结构。该结果与文献 [33] 中的结果一致。

提高采样率可有效抑制相位差的影响。如图3 (c)-(d) 所示，当采样率提升至 500 MHz ($T_s = 2 \text{ ns}$) 而其他参数保持不变时，无论两信号时间差为 T_s 的整数倍或半整数倍， σ_{out} 均降至 103 ps 以下。这表明，在对 $\sigma_{in} = 100 \text{ ps}$ （对应本征时间分辨约 235.5 ps ）的信号时，采样率大于 500 MHz 是必要的。进一步的模拟表明，对于 $\sigma_{in} = 10 \text{ ps}$ 的极高精度需求，采样周期需达到 1 ns 方能有效抑制相位差的影响。

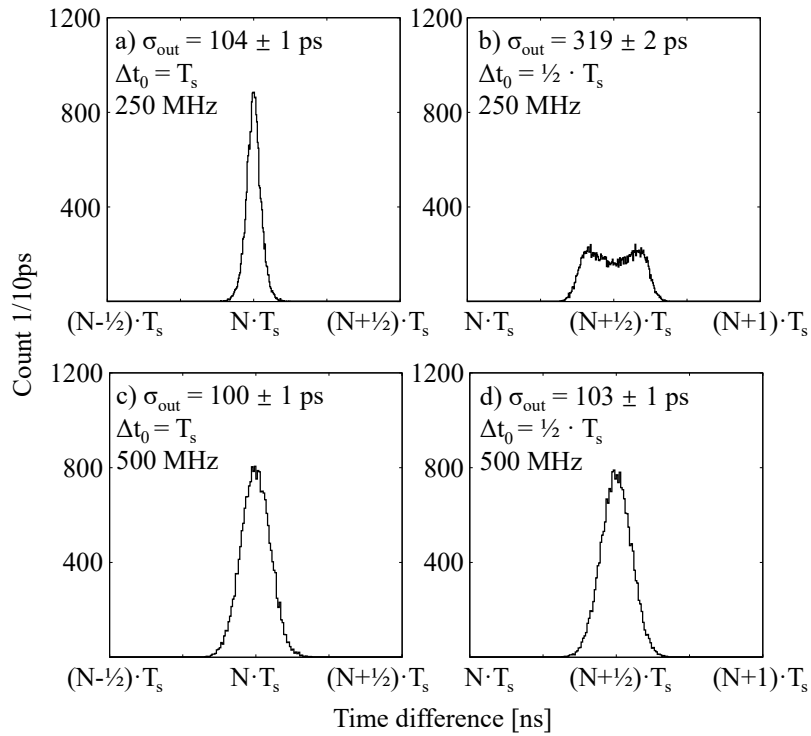


图 3: 相位差对数字化恒比定时精度的影响, σ_{out} 的计算基于统计学中的标准差.

Fig. 3 The effect of phase difference on the timing accuracy of CFD, the calculation of σ_{out} is based on the standard deviation in statistics.

3.2 脉冲信号上升沿与定时参数对定时精度的影响

在模拟电子学中, 信号上升沿越快, 定时精度通常越高。然而, 在数字化定时中, 过快的上升沿在有限采样率下会导致上升沿采样点过少, 反而可能损害定时精度。

为定量研究数字化定时中对信号上升沿长度的需求, 在模拟中固定 $\sigma_{in} = 100$ ps, 衰减时间常数 t_d 不变, 令上升沿参数 $t_r = \alpha \cdot T_s$ (α 为正整数), 通过改变 α 来系统调整上升沿长度。

图4(a)-(f) 展示了在 100 MHz 采样率下, 对不同上升沿信号 ($\alpha = 1, 3, 4, 5, 6, 8$) 进行恒比定时参数 (f 与 t_{delay}) 扫描的结果。三维图中高度越低表示 σ_{out} 越小, 定时精度越好。对比这些结果, 可得出以下结论:

(1) 对于任意形状的脉冲信号, 均存在一个较优的恒比定时参数范围, 在此范围内可获得最佳定时精度。该发现与文献 [37] 中基于实验数据的结论相符, 印证了本模拟的可靠性。

(2) 对比图4(a)-(f) 可发现, 当脉冲信号上升沿过短 ($\alpha = 1$) 或过长 ($\alpha = 8$), 最优定时参数范围变窄, 且所能达到的最佳定时精度也较差。

图5(a)-(f) 进一步展示了在 1 GHz 采样率、 $\sigma_{in} = 10$ ps 条件下, 不同上升沿信号的定时精度模拟结

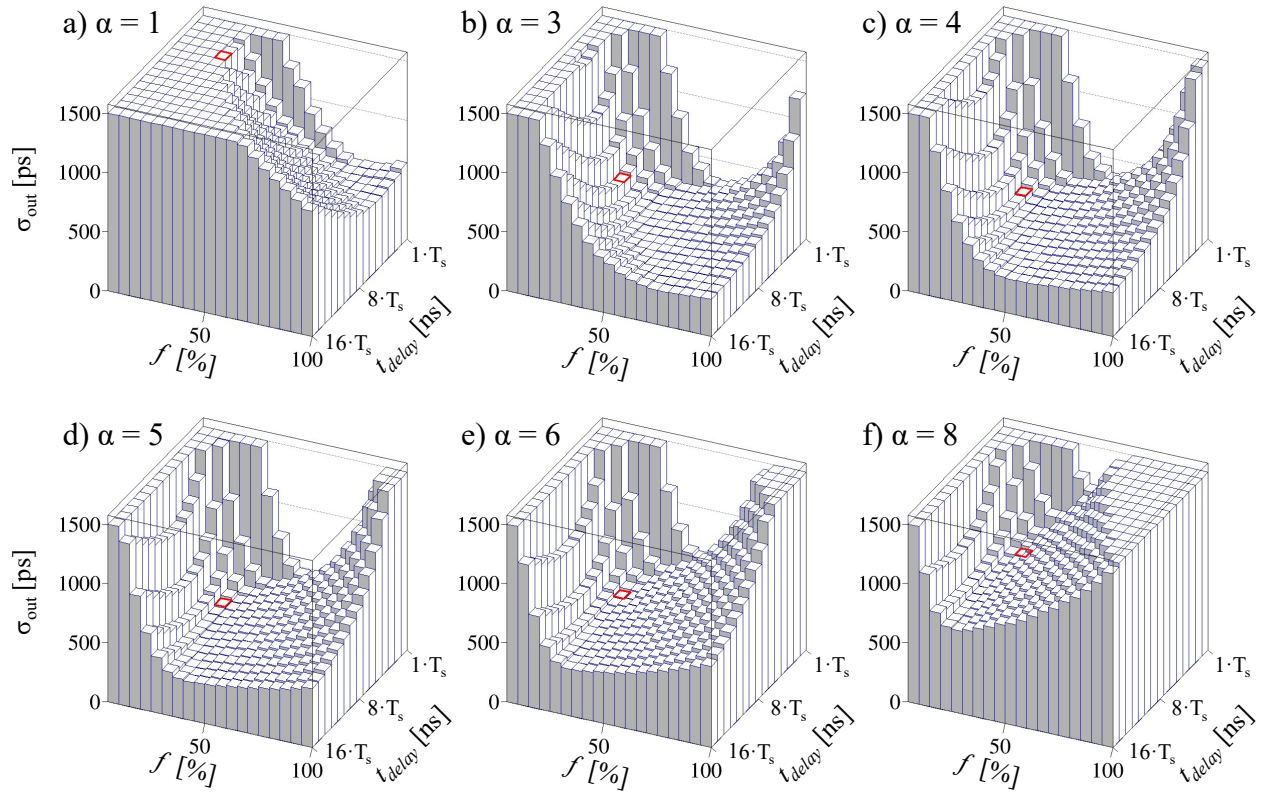


图 4: (网络版彩色)100 MHz 采样率, 对不同上升沿的脉冲信号, 不同定时参数扫描定时精度的结果, 子图 (a)-(f) 中的红色方框为实验中常用的定时参数组合: $t_{delay} = 5 \cdot T_s$, $f=25\%$.

Fig. 4: (Color online) Results of timing accuracy scans for pulse signals with different rising edge and timing parameters at 100 MHz sampling rate. The red boxes in Subfigures (a)–(f) represent the timing parameter combinations commonly used in experiments: $t_{delay} = 5 \cdot T_s$, $f=25\%$.

果。提高采样率后, 最优定时参数范围有所拓宽, 但结论不变: 信号上升沿过长或过短均不利于获得最佳定时精度。

这一现象的原因是: 上升沿过短会导致可用于插值的采样点不足, 难以准确还原脉冲信号上升沿的非线性特性, 增大与相位相关的插值误差; 上升沿过长则信号斜率降低, 信噪比变差, 二者均会损害定时精度 (图1(c)-(d) 所示)。因此在数字化定时中信号上升沿涵盖 4-6 个采样点定时精度达到最优。

图6(a)-(b) 综合展示了不同采样率下, 定时精度 (以 σ_{out} 表征) 随上升沿采样点数 (近似正比于 α) 的变化趋势。为贴近实际应用, 图中固定采用常用的恒比定时参数 ($t_{delay} = 5 \cdot T_s$, $f = 25\%$, 即4和5各子图的红色方框处)。结果表明, 无论采样率为 100 MHz、250 MHz、500 MHz 还是 1 GHz, 最佳的定时精度均出现在信号上升沿涵盖约 4 至 6 个采样点 (即 $\alpha \approx 4\sim 6$, 对应图6 (a)-(b) 阴影区域) 的区间内。这再次印证了该结论由脉冲信号上升沿的非线性特征与噪声的普遍存在所决定, 具有必然性。因此, 为实现

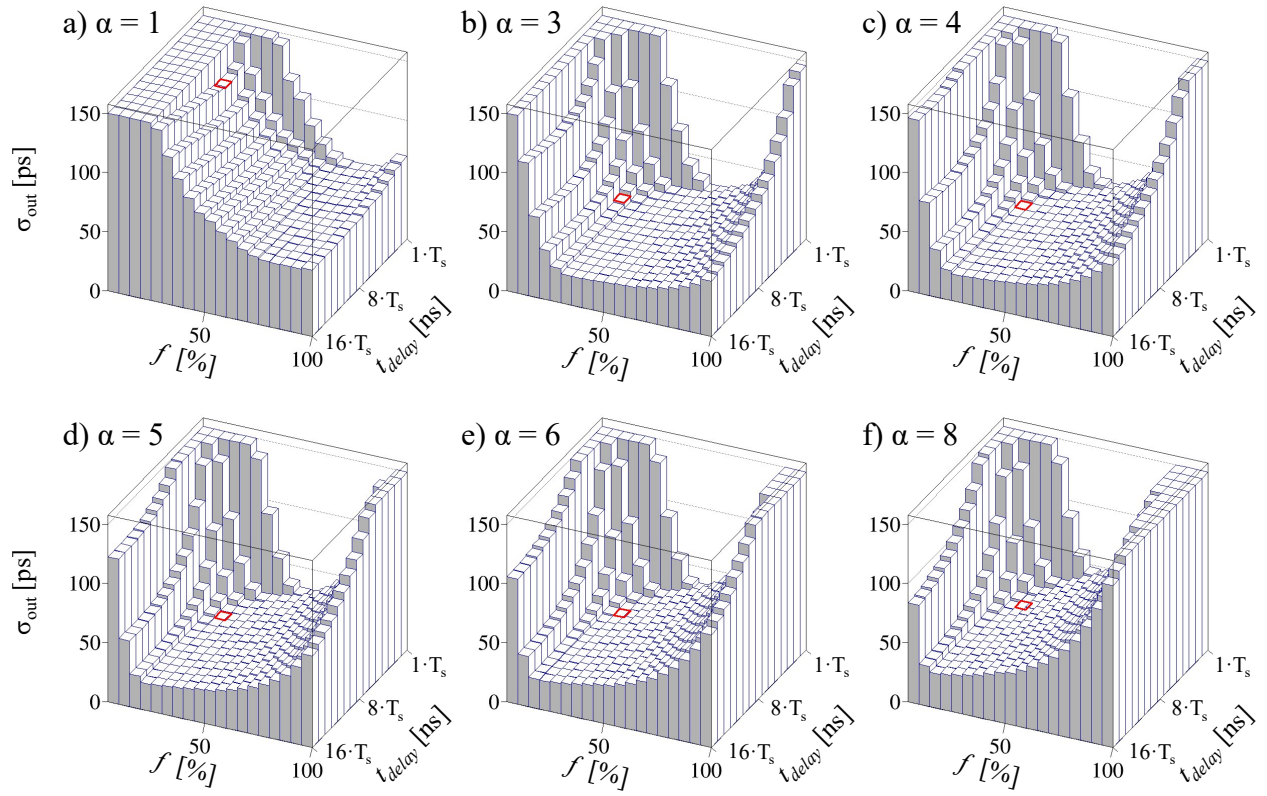


图 5: (网络版彩色)1 GHz 采样率, 对不同上升沿的脉冲信号, 不同定时参数扫描定时精度的结果, 子图 (a)-(f) 中的红色方框为实验中常用的定时参数组合: $t_{delay} = 5 \cdot T_s$, $f=25\%$.

Fig. 5: (Color online) Results of timing accuracy scans for pulse signals with different rising edge and timing parameters at 1 GHz sampling rate. The red boxes in Subfigures (a)–(f) represent the timing parameter combinations commonly used in experiments: $t_{delay} = 5 \cdot T_s$, $f=25\%$.

最佳数字化定时效果, 输入采集模块的信号上升沿应设计为覆盖 4~6 个采样点。

4 总结与展望

本研究通过模拟仿真, 实现了核脉冲信号的生成、采样及基于数字化恒比定时的处理, 系统分析了相位差、信号上升沿长度及定时参数对定时精度的影响, 获得了与传统模拟电子学不同的认知, 对快时间测量实验中探测器的选型与系统调试具有参考价值。

主要结论如下:

相位差对数字化定时精度具有系统性影响。当两信号时间差为采样周期半整数倍时, 定时精度最差; 为整数倍时, 影响最小。提高采样率可有效抑制相位差的影响。在数字化定时中, 信号上升沿时间并非越短越好。模拟结果表明, 当上升沿覆盖 4 至 6 个采样点时, 定时精度最优。这为前端电子学 (如前置放大

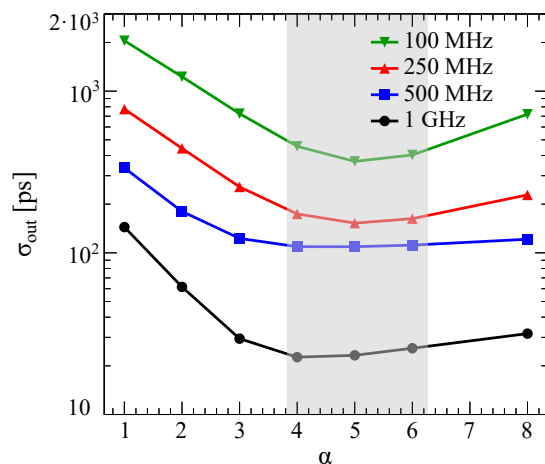


图 6: (网络版彩色) 不同采样率下, 不同波形的定时参数扫描结果, 其中 100, 250, 500 MHz 采样率对应的 $\sigma_{in} = 100$ ps, 1 GHz 采样率时 $\sigma_{in} = 10$ ps.

Fig. 6: (Color Online) Results of timing parameter scan for different waveforms at various sampling rates, where $\sigma_{in} = 100$ ps corresponds to 100, 250, and 500 MHz sampling rates, and $\sigma_{in} = 10$ ps corresponds to 1 GHz sampling rate.

器、低通滤波器等) 的设计提供了关键依据。

本工作仍存在一定局限性, 例如所采用的模拟波形与真实脉冲信号可能存在差异, 尚未考虑采样过程中的量化噪声等。后续研究将从以下几方面展开: 优化脉冲波形模型以更贴近实测信号; 在模拟中引入量化噪声进行更全面的误差分析; 探索和发展新型的数字化定时算法 (如基于波形拟合或机器学习的方法), 以期最终建立一套高效、可靠的高精度数字化定时方案。

参考文献

- [1] Casten R 2000 *Nuclear Structure from a Simple Perspective*. Oxford science publications (Oxford University Press)
- [2] Krane K S 1988 *Introductory nuclear physics* (New York, NY: Wiley)
- [3] Raman S, Nestor C W J, Tikkanen P 2001 *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **78** 1
- [4] Motobayashi T, Ikeda Y, Ieki K, Inoue M, Iwasa N, Kikuchi T, Kurokawa M, Moriya S, Ogawa S, Murakami H, Shimoura S, Yanagisawa Y, Nakamura T, Watanabe Y, Ishihara M, Teranishi T, Okuno

- H, Casten R 1995 *Phys. Lett. B* **346** 9
- [5] Goldkuhle A, Fransen C, Blazhev A, Beckers M, Birkenbach B, Braunroth T, Clément E, Dewald A, Dudouet J, Eberth J, Hess H, Jacquot B, Jolie J, Kim Y H, Lemasson A, Lenzi S M, Li H J, Litzinger J, Michelagnoli C, Müller-Gatermann C, Nara Singh B S, Pérez-Vidal R M, Ralet D, Reiter P, Vogt A, Warr N, Zell K O, Ataç A, Barrientos D, Barthe-Dejean C, Benzoni G, Boston A J, Boston H C, Bourgault P, Burrows I, Cacitti J, Cederwall B, Ciemala M, Cullen D M, De France G, Domingo-Pardo C, Foucher J L, Fremont G, Gadea A, Gangnant P, González V, Goupil J, Henrich C, Houarner C, Jean M, Judson D S, Korichi A, Kortén W, Labiche M, Lefevre A, Legéard L, Legrue F, Leoni S, Ljungvall J, Maj A, Maugeais C, Ménager L, Ménard N, Menegazzo R, Mengoni D, Million B, Muñoz H, Napoli D R, Navin A, Nyberg J, Ozille M, Podolyak Z, Pullia A, Raine B, Recchia F, Ropert J, Saillant F, Salsac M D, Sanchis E, Schmitt C, Simpson J, Spitaels C, Stezowski O, Theisen C, Toulemonde M, Tripon M, Valiente Dobón J J, Voltolini G, Zielńska M, AGATA Collaboration 2019 *Phys. Rev. C* **100** 054317
- [6] Turturică A, Delaroche J P, Dupuis M, Girod M, Libert J, Căta Danil G, Pascu S, Mihai C, Borcea R, Boromiza M, Bucurescu D, Clisu C, Coman A, Costache C, Florea N M, Ionescu A, Lică R, Mărginean N M, Mărginean R, Mihai R E, Mitu A, Niță C R, Stan L, Știru I, Toma S, Turturică G V, Ujeniuc S 2025 *Phys. Rev. C* **111** 044305
- [7] Henderson J, Chester A, Ball G C, Caballero-Folch R, Domingo T, Drake T E, Evitts L J, Hackman G, Hallam S, Garnsworthy A B, Moukaddam M, Ruotsalainen P, Smallcombe J, Smith J K, Starosta K, Svensson C E, Williams J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 062701
- [8] Browne F, Bruce A, Sumikama T, Nishizuka I, Nishimura S, Doornenbal P, Lorusso G, Söderström P A, Watanabe H, Daido R, Patel Z, Rice S, Sinclair L, Wu J, Xu Z, Yagi A, Baba H, Chiga N, Carroll R, Didierjean F, Fang Y, Fukuda N, Gey G, Ideguchi E, Inabe N, Isobe T, Kameda D, Kojouharov I, Kurz N, Kubo T, Lalkovski S, Li Z, Lozeva R, Nishibata H, Odahara A, Podolyák Z, Regan P, Roberts O, Sakurai H, Schaffner H, Simpson G, Suzuki H, Takeda H, Tanaka M, Taprogge J, Werner V, Wieland O 2017 *Phys. Rev. C* **96** 054323
- [9] Régis J M, Jolie J, Saed-Samii N, Warr N, Pfeiffer M, Blanc A, Jentschel M, Köster U, Mutti P, Soldner T, Simpson G S, Drouet F, Vancraeynest A, de France G, Clément E, Stezowski O, Ur C A,

- Urban W, Regan P H, Podolyák Z, Larijani C, Townsley C, Carroll R, Wilson E, Fraile L M, Mach H, Pazyi V, Olaizola B, Vedia V, Bruce A M, Roberts O J, Smith J F, Scheck M, Kröll T, Hartig A L, Ignatov A, Ilieva S, Lalkovski S, Korten W, Marginean N, Otsuka T, Shimizu N, Togashi T, Tsunoda Y 2017 *Phys. Rev. C* **95** 054319
- [10] Nolan P J, Sharpey-Schafer J F 1979 *Rep. Prog. Phys.* **42** 1
- [11] Régis J M, Rudigier M, Jolie J, Blazhev A, Fransen C, Pascovici G, Warr N 2012 *Nucl. Instrum. Meth. A* **684** 136
- [12] Régis J M, Fraile L, Rudigier M 2025 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **141** 104152
- [13] Régis J M, Saed-Samii N, Rudigier M, Ansari S, Dannhoff M, Esmaylzadeh A, Fransen C, Gerst R B, Jolie J, Karayonchev V, Müller-Gatermann C, Stegemann S 2016 *Nucl. Instrum. Meth. A* **823** 72
- [14] Régis J M, Pascovici G, Jolie J, Rudigier M 2010 *Nucl. Instrum. Meth. A* **622** 83
- [15] Gamba E R, Bruce A M, Rudigier M 2019 *Nucl. Instrum. Meth. A* **928** 93
- [16] Régis J M, Esmaylzadeh A, Jolie J, Karayonchev V, Knafle L, Köster U, Kim Y H, Strub E 2020 *Nucl. Instrum. Meth. A* **955** 163258
- [17] Régis J M, son G S S, Blanc A, de France G, Jentschel M, Köster U, Mutti P, Pazyi V, Saed-Samii N, Soldner T, Ur C A, Urban W, Bruce A M, Drouet F, Fraile L M, Ilieva S, Jolie J, Korten W, Kröll T, Lalkovski S, Mach H, Marginean N, Pascovici G, Podolyák Z, Regan P H, Roberts O J, Smith J F, Townsley C, Vancraeynest A, Warr N 2014 *Nucl. Instrum. Meth. A* **763** 210
- [18] Mach H, Gill R, Moszyński M 1989 *Nucl. Instrum. Meth. A* **280** 49
- [19] Régis J M, Mach H, Simpson G, Jolie J, Pascovici G, Saed-Samii N, Warr N, Bruce A, Degenkolb J, Fraile L, Fransen C, Ghita D, Kisyov S, Koester U, Korgul A, Lalkovski S, Mărginean N, Mutti P, Olaizola B, Podolyak Z, Regan P, Roberts O, Rudigier M, Stroe L, Urban W, Wilmsen D 2013 *Nucl. Instrum. Meth. A* **726** 191
- [20] Lebois M, Jovančević N, Thisse D, Canavan R, Étasse D, Rudigier M, Wilson J 2020 *Nucl. Instrum. Meth. A* **960** 163580

- [21] Gerst R B, Blazhev A, Warr N, Wilson J N, Lebois M, Jovančević N, Thisse D, Canavan R, Rudigier M, Étasse D, Adamska E, Adsley P, Algora A, Babo M, Belvedere K, Benito J, Benzoni G, Boso A, Bottoni S, Bunce M, Chakma R, Cieplicka-Oryńczak N, Courtin S, Cortés M L, Davies P, Delafosse C, Fallot M, Fornal B, Fraile L M, Gjestvang D, Gottardo A, Guadilla V, Häfner G, Hauschild K, Heine M, Henrich C, Homm I, Ibrahim F, Iskra W, Ivanov P, Jazrawi S, Korgul A, Koseoglou P, Kröll T, Kurtukian-Nieto T, Meur L L, Leoni S, Ljungvall J, Lopez-Martens A, Lozeva R, Matea I, Miernik K, Nemer J, Oberstedt S, Paulsen W, Piersa M, Popovitch Y, Porzio C, Qi L, Ralet D, Regan P H, Reygadas-Tello D, Rezyunkina K, Sánchez-Tembleque V, Schmitt C, Söderström P A, Sürder C, Tocabens G, Vedia V, Verney D, Wasilewska B, Wiederhold J, Yavachova M, Zeiser F, Ziliani S 2020 *Phys. Rev. C* **102** 064323
- [22] G. Häfner and R. Lozeva and A. Blazhev and R. L. Canavan and D. Etasse and J. Jolie and N. Jovancevic and R.-B. Gerst and T. Kröll and M. Lebois and P. H. Regan and M. Rudigier and D. Thisse and N. Warr and J. N. Wilson and the N-SI-109 collaboration 2020 *J. Phys. Conf. Ser.* p012135
- [23] Rudigier M, Walker P, Canavan R, Podolyák Z, Regan P, Söderström P A, Lebois M, Wilson J, Jovancevic N, Blazhev A, Benito J, Bottoni S, Brunet M, Cieplicka-Orynczak N, Courtin S, Doherty D, Fraile L, Hadynska-Klek K, Heine M, Iskra L, Jolie J, Karayonchev V, Kennington A, Koseoglou P, Lotay G, Lorusso G, Nakhostin M, Nita C, Oberstedt S, Qi L, Régis J M, Sánchez-Tembleque V, Shearman R, Witt W, Vedia V, Zell K 2020 *Phys. Lett. B* **801** 135140
- [24] Wu H, Li Z, Tan H, Hua H, Li J, Hennig W, Warburton W, Luo D, Wang X, Li X, Zhang S, Xu C, Chen Z, Wu C, Jin Y, Lin J, Jiang D, Ye Y 2020 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **975** 164200
- [25] Luo D W, Wu H Y, Li Z H, Xu C, Hua H, Li X Q, Wang X, Zhang S Q, Chen Z Q, Wu C G, Jin Y, Lin J 2021 *Nucl. Sci. Tech.* **32** 79
- [26] Wu H, Li Z, Venaruzzo M, Colombini L, Luo D, Hua H, Nishimura S, Abba A, Venturini Y, Tintori C, Bianchini M 2026 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **1085** 171315
- [27] Wu H, Li Z, Wu J, Hua H, Wang X, Li X, Xu C 2021 *Chin. Sci. Bull.* **66** 3553
- [28] Joly B, Montarou G, Lecoq J, Bohner G, Crouau M, Brossard M, Vert P E 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 63

- [29] Hu W, Choi Y, Jo Hong K, Kang J, Ho Jung J, Suk Huh Y, Keong Lim H, Su Kim S, Jun Min B, Kim B T 2010 *Nucl. Instrum. Meth. A* **622** 219
- [30] Nakhostin M, Podolyak Z, Regan P H 2014 *J. Instrum.* **9** C12049
- [31] Paulauskas S, Madurga M, Grzywacz R, Miller D, Padgett S, Tan H 2014 *Nucl. Instrum. Meth. A* **737** 22
- [32] Modamio V, Valiente-Dobón J, Jaworski G, Hüyük T, Triossi A, Egea J, Di Nitto A, Söderström P A, Agramunt Ros J, de Angelis G, de France G, Erduran M, Ertürk S, Gadea A, González V, Kownacki J, Moszynski M, Nyberg J, Palacz M, Sanchis E, Wadsworth R 2015 *Nucl. Instrum. Meth. A* **775** 71
- [33] Prokop C, Liddick S, Larson N, Suchyta S, Tompkins J 2015 *Nucl. Instrum. Meth. A* **792** 81
- [34] Singh K, Siwal D 2018 *Nucl. Instrum. Meth. A* **886** 61
- [35] Sanchez-Tembleque V, Vedia V, Fraile L, Ritt S, Udias J 2019 *Nucl. Instrum. Meth. A* **927** 54
- [36] Simpson G, Curtoni S, Dauvergne D, Gallin-Martel M L, Marcatilli S, Thiamova G 2019 *Nucl. Instrum. Meth. A* **940** 50
- [37] Harter A, Weinert M, Knafla L, Régis J M, Esmaylzadeh A, Ley M, Jolie J 2023 *Nucl. Instrum. Meth. A* **1053** 168356
- [38] XIA LLC 2019 *XIA Pixie-16 User's Manual*. XIA LLC, Berkeley, California, 3rd edn. Available from XIA LLC
- [39] CAEN Electronic Instrumentation 2016 *DPP-PSD: Digital Pulse Processing for Pulse Shape Discrimination*. CAEN, rev. 8 edn. Available at <https://www.caen.it/products/dpp-psd/>, see p. 16

Study on High-Precision Digital Timing Methods*

KONG Yuqian¹⁾ WU Hongyi^{2)3)†} ZHANG Guangxin^{1)‡}

1) (*Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China*)

2) (*National Key Laboratory of Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

3) (*State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract

With the development of nuclear physics and detection technology, traditional analog data-acquisition (ADAQ) systems struggle to meet the demands of large-scale detection arrays. At the same time, digital data-acquisition (DDAQ) is widely employed due to the low per-channel cost, small dead time, and flexible parameter setting. However, high-precision time measurements remain a critical technical bottleneck for DDAQ, particularly when the desired resolution is smaller than the time interval between neighboring samples. Interpolated algorithms between adjacent samples must be used in order to get a better timing resolution. However, such Interpolated time information is significantly affected by the phase of signal, sampling rate, intrinsic pulse shape, discrimination parameters, and so on. The current work aims at quantifying the impacts of each aforementioned parameters on the timing precision in DDAQ. In this simulation work, the pulses are generated with different parameters, digitalized by an adjustable sampling

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 12405144), the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(Grant Nos. 2025A1515012112)

† Corresponding author. E-mail: wuhongyi@pku.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhanggx37@mail.sysu.edu.cn

The First Author. E-mail: kongyq5@mail2.sysu.edu.cn

rate, and then processed by a Digital Constant-Fraction discrimination (DCFD) algorithm. By modifying different parameters such as signal phase, pulse shape, and discrimination parameters, their impacts on timing precision have been investigated. The results conclusively confirm the strong influence of signal phase on the time accuracy in DDAQ. On the other side, if one wants the best time resolution, the rising time of nuclear pulses can neither be too short nor too long, namely, with 4–6 samples on the leading edge would be the best choice.

Keywords: Fast-timing; Gamma-ray spectroscopy; Constant-Fraction discrimination; Digital data-acquisition; LaBr_3 ;

录用稿件，非最终出版稿