

用于多丝漂移室读出的扇入延迟前端电子学

程文静 张 钊 易 晗 吕黎明 肖志刚

(清华大学 物理系 北京 100084)

摘要 多丝漂移室阵列是设计中的低温高密核物质测量谱仪(Cooling storage ring External-target Experiment, CEE)上的前角带电粒子径迹探测器, 信号读出的一种备选方案是采用传统前置放大器和采样幅度数字转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)来完成信号的放大和获取, 该方案结构较简单, 成本适中, 而且可以处理单根丝上的多重点火信号。为了进一步降低电子学的通道数目, 而又不显著影响探测器的性能, 研制了一种扇入延迟电路, 将漂移室上不同的多根丝信号进行扇入延迟处理, 合成为一路信号后再输入到采样 ADC 的单个通道进行波形采样和数字化。实际的测试结果表明, 该电路对信号处理产生的信号能量展宽好于 1%, 时间晃动好于 500 ps, 对应的位置分辨好于 25 μm , 满足漂移室径迹探测器阵列对位置分辨小于 300 μm 的要求。

关键词 多丝漂移室, Flash-ADC, 扇入延迟, 时间分辨, 能量分辨

中图分类号 O571.6, TL8

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.040403

Development of a fan-in and delay module for MWDC based on Flash-ADC acquisition scheme

CHENG Wenjing ZHANG Zhao YI Han LYU Liming XIAO Zhigang

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Background: Multi Wire Drift Chamber (MWDC) array is the tracking detector at Cooling storage ring External-target Experiment (CEE) under design at Heavy Ion Research Facility at Lanzhou-Cooling Storage Ring (HIRFL-CSR). The physical goal of CEE aims at the studies of the equation of state of nuclear matter at low temperature but high baryon density. The MWDC array needs a large amount of front end electronics followed by a scalable data acquisition system, which are all costly. **Purpose:** The aim is to design a readout scheme which can lower the cost but keep the performance of the array rarely degraded, and to test the system and demonstrate the feasibility of the design. **Methods:** Based on the Flash Analog-to-Digital Converter (ADC) acquisition scheme, a fan-in and delay module has been designed in order to record three signals from X, U and V sense wires simultaneously in each Flash-ADC channel. **Results:** By this means the total number of channels for MWDC is reduced by 60%. The performance of this fan-in and delay module is tested with a MWDC detector using ^{55}Fe X-ray source. The amplitude signal and the timing signal are smeared by less than 1% and 500 ps, respectively. **Conclusion:** Both specifications show that the fan-in and delay module can be used in MWDC with the event rate ranging in 1–10 kHz.

Key words MWDC, Flash-ADC, Fan-in and delay, Time resolution, Energy resolution

国家重点基础研究发展计划(973)项目(No.2014CB845405、No.2015CB856903)、国家自然科学基金(No.U1332207)资助

第一作者: 程文静, 女, 1989 年出生, 2012 年毕业于中山大学, 现为硕士研究生, 主要从事多丝漂移室探测器读出电子学领域的研究

通信作者: 肖志刚, E-mail: xiaozg@tsinghua.edu.cn

Supported from the National Basic Research Program of China (973) Project (No.2014CB845405, No.2015CB856903), Natural Science Foundation of China (No.U1332207)

First author: CHENG Wenjing, female, born in 1989, graduated from Sun Yat-Sen University in 2012, master student, focusing on the readout electronics of multi-wire drift chamber

Corresponding author: XIAO Zhigang, E-mail: xiaozg@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2016-01-18, 修回日期: 2016-03-03

非对称核物质状态方程对理解强相互作用系统的相结构至关重要,同时对研究天体物理和奇异核引起的核反应动力学过程具有重要的科学意义^[1-3]。尽管对这一领域的理论和实验都做了很多重要工作,但人们对于非对称核物质状态方程中对称能的密度依赖行为仍然知之甚少,尤其是在高于饱和密度的区域,对称能随核子密度的变化趋势至今尚无定论,不同的观测量或者对数据进行不同的输运模型分析,给出了不一致的结论^[4-6]。世界范围内对高重子数密度核物质状态方程和强相互作用相关的研究越来越深入,中高能重离子碰撞实验是探索这一领域的重要手段。当入射的重离子单核能量在几十 MeV 到 1 GeV 之间时,同位旋分馏效应比较大,更有利于开展相关核物质状态方程的研究。国际上众多大型实验室,如美国 FRIB (Facility for Rare Isotope Beams)、德国 FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research)、日本 RIBF (Radioactive Isotope Beam Factory)和韩国将要新建的 RAON 设备等,都在寻找合适的实验观测量,并拟建相应的大型探测装置进行亚 $\text{GeV}\cdot\text{u}^{-1}$ 能区的重离子碰撞实验^[7-10]。

始建于本世纪初的国家大科学装置,兰州重离子加速器冷却存储环(Heavy Ion Research Facility in Lanzhou-Cooling Storage Ring, HIRFL-CSR)^[11]能够提供 $0.5\text{--}1\text{ GeV}\cdot\text{u}^{-1}$ 的重离子束流。已有实验和基于输运模型的模拟计算皆表明,由于该能区的重离子碰撞所形成的热密核体系具有最大的时空体积,碰撞系统的核阻止本领最大,因此这一能区的观测量对高密区对称能具有最灵敏的依赖^[12-14]。为此,国内同行提出,在 HIRFL-CSR 平台上,可以考虑建造一个通用的核物质性质测量谱仪,即“低温高密核物质探测谱仪”(CSR External-target Experiment, CEE)^[15-18]。图 1 给出该谱仪的概念性设计。在靶区的下游端,是一个大的二级磁铁,磁铁内部放置一个大体积时间投影室(Time Projection Chamber, TPC),两端分别放置一层多气隙电阻板室(Multi-Gap Resistive Plate Chambers, MRPC)探测器。

为获得较高的粒子鉴别能力和大的探测面积,CEE 的实验终端选用多丝漂移室(Multi Wire Drift Chamber, MWDC)作为带电粒子径迹探测器^[19],由带电粒子穿过漂移室所产生的电子从击中点飞行到阳极丝的漂移时间和电子的漂移速度,可以确定入射粒子在漂移室中的位置,从而实现带电粒子在漂移室中的飞行径迹重建。每块漂移室有三层信号丝层,信号丝与竖直方向分别成 0° 、 30° 、 -30° ,分别记为 X、U、V。每层丝平面内,信号丝之间的间距都是 10 mm。漂移室的具体结构可见文献^[19],

漂移室的读出电子学采用 Sampling-ADC (Analog-to-Digital Converter)。本文介绍一种用于降低使用的 Sampling-ADC 通道数的扇入延迟前端电子学的电路设计和功能测试。

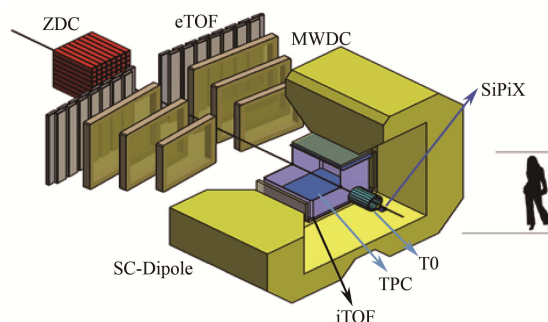


图 1 CEE 的概念性设计图
Fig.1 Conceptual design of CEE.

1 扇入延迟前端电子学的电路设计

1.1 整体设计

Flash-ADC 是一种高采样率的采样 ADC,实验中用的 CAEN V1720 型号的 Flash-ADC,采样频率是 250 MHz,可以将输入信号波形不做任何处理以 4 ns 的采样间隔完整地收集存储。漂移室探测器直接输出的丝信号幅度小,所以在用 Flash-ADC 收集前需要经过放大处理。扇入延迟前端电子学包含两个独立的功能性电路部分:一个是用于对漂移室丝信号进行放大处理的前置放大器电路;另一个是将前放的三路输出信号进行扇入延迟整合成一路信号用于直接输入到 Flash-ADC 一个通道的扇入延迟电路。前置放大器电路和扇入延迟电路可以单独实现各自的模块功能,分开设计有利于电路调试和单独应用于不同实验。图 2 虚线框是扇入延迟前端电子学的原理框图,漂移室的 X、U、V 三路丝信号先经过前置放大器放大处理,输出信号第一路不经过延迟芯片,第二路经过一块延迟芯片,第三路连续通过两块延迟芯片,然后三路信号一起输入到后面的跟随电路单元扇出成单路完整的信号,直接送到 Flash-ADC 的一个通道里面实现对三路信号的同时采样存储。

1.2 前置放大器电路

前置放大器沿袭技术成熟应用于漂移室探测器的电压-电流灵敏前置放大器电路,输入信号经过多路共基放大器和共集电极放大器完成放大,后由射极输出提供正反极性的输出信号,具有输出脉冲宽度窄、计数率高和定时比较准确的优点。每块前置

放大器电路板上 8 个相同的放大单元可以提供 8 路信号的放大处理, 工作电压是 $\pm 6\text{ V}$ 。图 3 是单路前置放大器的电路原理框图。

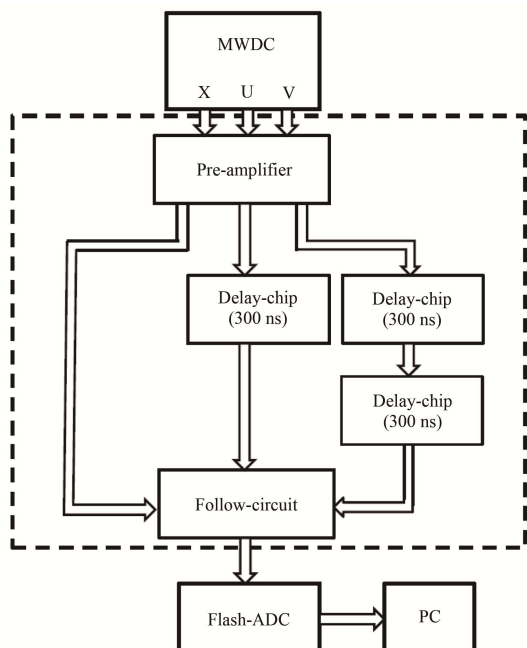


图 2 扇入延迟模块框图

Fig.2 Block diagram of fan-in and delay module.

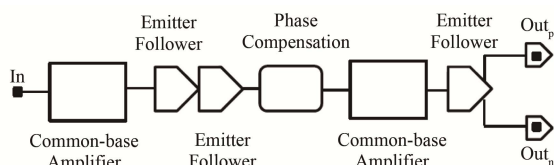


图 3 前置放大器的原理框图

Fig.3 Principle diagram of pre-amplifier.

1.3 扇入延迟电路

漂移室输出信号具有快的上升沿和相近的下降沿, 90%幅度的信号宽度远小于 300 ns。Flash-ADC 每个通道对信号的采样宽度可以设定至 1 024 ns。所以扇入延迟电路的设计原理是尝试将漂移室三根丝上的输出信号分别延迟 0 ns、300 ns、600 ns 后扇出合成单路信号后进行采样获取, 然后在数据分析时分别截取 Flash-ADC 记录的完整波形中的 0–300 ns、300–600 ns、600–900 ns 的区间分别进行分析处理。延迟器带来的延迟时间晃动将在漂移室时间零点修正时消除。

时间分辨直接决定了带电粒子径迹重建的位置分辨, 是漂移室探测器非常重要的性能。扇入延迟电路上使用的延迟芯片需要实现精确 300 ns 的延迟功能。2214-300BC4 是 DATA DELAY DEVICES 公

司生产的 300 ns 的延迟芯片, 每块芯片有 24 个管脚, 可以实现延迟时间间隔为 15 ns、延迟时间从 15–300 ns 均等时间的延迟功能。我们实验中扇入延迟电路的设计中选用的是延迟 300 ns 的输出管脚。每块扇入延迟电路板上设计有 4 个相同的单元, 可以对 12 路输入信号分别进行延迟处理输出 4 个扇入延迟后的单路信号。电路板的工作电压是 $\pm 12\text{ V}$ 。图 4 是单路扇入延迟电路的原理框图。

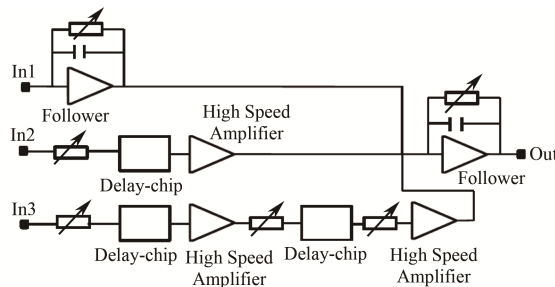


图 4 扇入延迟电路板原理框图

Fig.4 Principle diagram of fan-in and delay circuit.

1.4 阻抗匹配与能量补偿

能量和时间信息是信号分析中最重要的部分。漂移室输出的原始信号经过前置放大器的放大处理后通过扇入延迟电路时会存在信号展宽和幅度损失的问题。同时, 扇入延迟电路和前置放大器之间的阻抗匹配也会对信号的输出波形造成一定的影响。解决方法是通过在延迟芯片的输入端和输出端分别放置包含有电阻、电容、电位器和高速度运算放大器组成的电路单元, 用于调节阻抗匹配和补偿信号的相位和幅度损失。

用脉冲发生器模拟漂移室的信号对延迟扇入电路上的各个电位器分别进行调节, 实现阻抗匹配并保证三个通道的放大倍数基本相等。将调节好电路参数的扇入延迟电路板和前放电路板一起装入用来屏蔽噪声干扰的铝盒内组成扇入延迟前端电子学。图 5 是分别用脉冲发生器信号和用 ^{55}Fe 放射源测试漂移室产生的信号输入到扇入延迟模块后, 经 Flash-ADC 采样得到的单个事例的信号波形。其中信号发生器输入脉冲信号的上升时间沿和下降时间沿经过调整后与真实 MWDC 信号一致。由图 5 可见, 对于信号发生器信号和真实的漂移室信号, 扇入延迟模块与前置放大器匹配良好, 三路信号正常完成扇入操作。在第三个信号的结尾处, 信号偶见轻微下冲, 这不会对信号的能量信息带来显著影响。

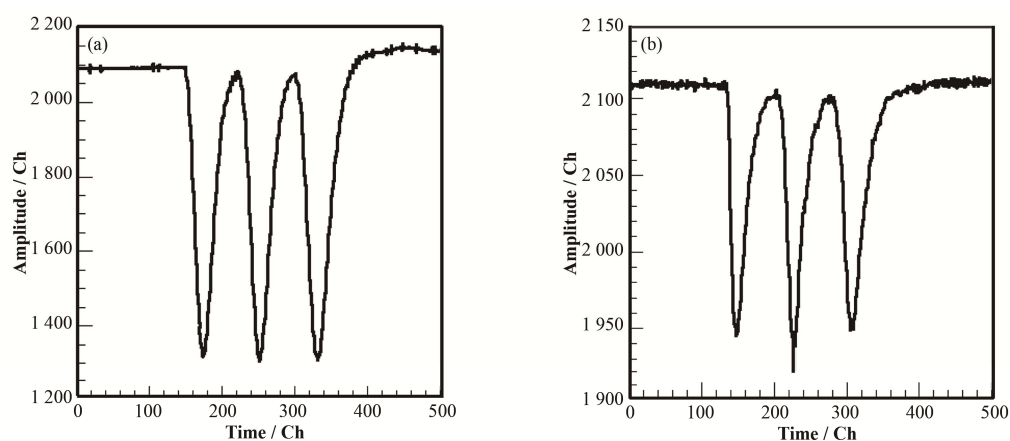


图 5 扇入延迟功能模块的输出波形
Fig.5 Output waveform of fan-in and delay module.

2 测量与分析

为测试该模块与真实探测器之间的耦合,我们将前放与扇入延迟电路连接到MWDC上进行测试。测试放射源选用 ^{55}Fe ,由于5.9 keV射线能量较低,不能同时点火X、U、V丝,因此为了能测电路性能,我们将同一根丝上的信号经前放放大后同时输入到扇入延迟电路板同一个单元的三个输入端口。实验中漂移室的工作气体是由85% Ar加15% CO_2 组成的混合气体。 ^{55}Fe 5.9 keV的X射线与Ar原子之间发生光电效应引起能量损失,在漂移室探测器中主要留下5.33 keV的全能峰和少部分由2.70 keV光电子形成的逃逸峰^[10]。测试中, ^{55}Fe 源放置在对准MWDC的一根信号丝的位置,用ORTEC 660高压插件给漂移室加上1660 V的正高压,将对准的信号丝上的输出信号输入到扇入延迟功能模块,输出信号经过CAEN N625扇出成多路相同信号,一路经过ORTEC公司生产的CF8000和GG8020处理成NIM (Nuclear instrument module)信号送到Flash-ADC的触发(trigger)端口作触发;另一路信号直接送入到Flash-ADC进行收集后存入计算机硬盘,用root程序对数据进行时间分辨和能量分辨的分析。图6为测试原理框图。

2.1 ^{55}Fe 全能峰能量分辨率

延迟芯片和相应电路单元会对信号产生延迟展宽等影响,从而影响信号的能量分辨率和时间分辨率。我们首先考察经过扇入延迟操作之后,探测器测量到的射线能量分辨率。探测器的固有能量分辨率的半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)= $2.355 \times (\sigma/\text{Mean})$,式中: σ 和Mean分别

表示全能峰的标准差和峰值位置。对于漂移室探测器或者类似的气体探测器,用 ^{55}Fe 5.9 keV的X射线测量得到的FWHM一般在23%左右。对扇入延迟模块三个通道的输出能谱做全能峰能量分辨的高斯拟合,结果如图7所示,扇入延迟功能模块的FWHM在25%左右,和该类探测器的典型能量分辨是一致的,这表明该扇入延迟电路模块对能量分辨的影响并不显著,表1列出了三路全能峰的分辨结果。

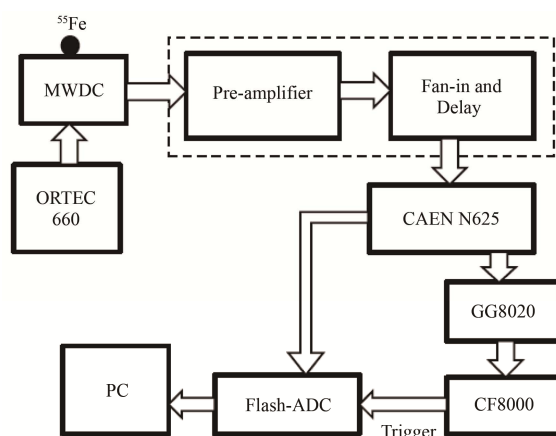


图 6 测试原理框图
Fig.6 Principle diagram of the test.

表 1 扇入延迟功能模块各个通道的能量分辨统计
Table 1 Energy resolution from each channel of the fan-in and delay module.

通道号 Channel	标准偏差 σ	中心值 Mean	能量分辨率 Energy resolution / %
1	430.3	4 103	24.7
2	480.1	4 598	24.6
3	561.5	5 345	24.7

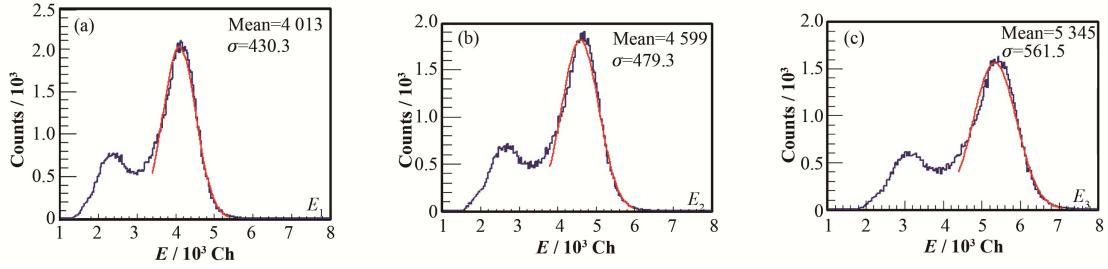


图7 三个通道的⁵⁵Fe能谱
Fig.7 Energy spectra of ⁵⁵Fe from three channels.

2.2 延迟通道的相对能量展宽

为进一步评估信号能量分辨的变化，我们考察同一信号进入扇入延迟通道后，三路输出信号的能量关联。将没有延时的这一通道记为第一通道，延迟300 ns和600 ns的信号分别记为第二通道和第三通道。第二通道和第三通道分别与第一通道信号的关联散点图如图8所示，直线拟合散点分布发现，第二路通道和第三路通道对信号的放大功能分别是第一路通道的1.10和1.28倍。这一倍数可以通过调节扇入延迟板上的电阻器加以微调，不对能量测量

带来影响。由图8可见，信号两两之间的关联很好。为定量给出扇入延迟电路模块对信号能量造成的弥散程度，我们以 $(E_i - E_0)/E_0$ 表征第 i ($i=1,2$)路延迟信号与原始信号比较后得到的能量相对精度，画于图9并做高斯拟合。由图9可见，扇入延迟电路带来的能量分辨率变差结果分别是0.72%和0.96%，相比于漂移室探测器本身的能量分辨，这一电路造成的信号能量展宽不会对能损测量带来影响，因而可以忽略。

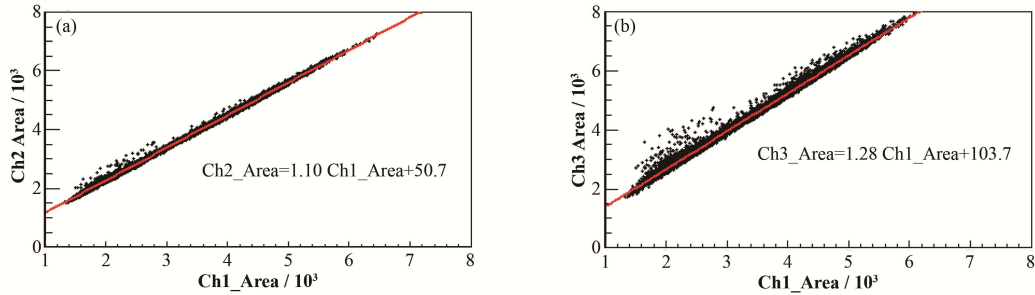


图8 延迟电路引起的放大倍数比较
Fig.8 Amplification from different delay channels.

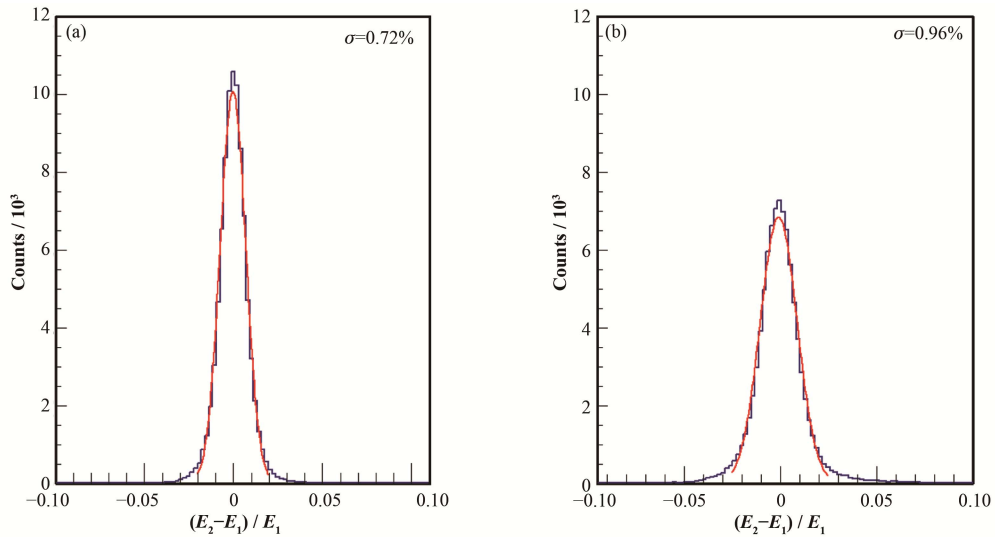


图9 延迟电路引起的能量分辨率
Fig.9 Energy resolution caused by fan-in and delay circuit.

2.3 时间分辨

我们预期第二通道和第三通道的延迟时间是确定的 300 ns 和 600 ns, 同时希望这一时间延迟不会造成第二通道和第三通道的信号定时性能变差。然而, 当延迟芯片工作后, 其精度以及对信号上升沿的拉长对延迟通道的输出信号可能会造成影响。为了评估这一影响, 同样地, 我们将第二路的定时时间(T_2 : 300 ns)和第三路信号的定时时间(T_3 : 600 ns)与 T_1 分别作差值, 得到第二路和第三路的定时信息中由延迟电路引起的定时晃动, 结果如图 10 所示。

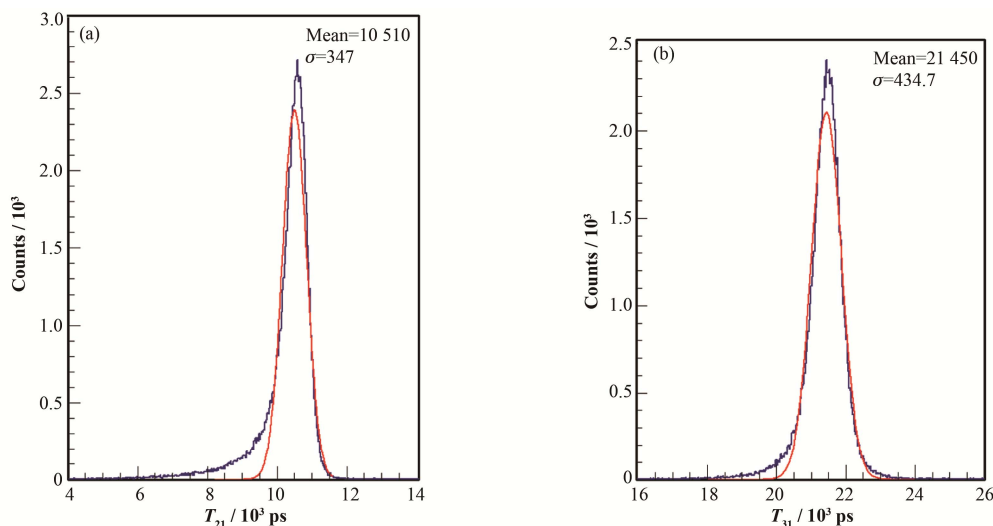


图 10 由延迟通道造成的延迟时间和时间分辨
Fig.10 Delay time and time resolution from channel 2 and channel 3.

3 结语

基于 Flash-ADC 的 MWDC 读出电子学框架, 我们研制了一个扇入延迟功能模块, 将同一位置的 X、U、V 丝上的信号做不同延迟再扇入至同一 Flash-ADC 通道。用 ^{55}Fe 全能峰对漂移室照射进行测试, 得到的全能峰能量分辨率约为 25%, 与气体探测器的典型能量分辨率相符。不同通道的信号关联测试表明幅度信号弥散小于 1%。确定了第二通道和第三通道的实际延迟时间分别是 310.51 ns 和 621.45 ns, 由延迟电路引起的时间分辨小于 500 ps, 对应于 25 μm 的漂移距离分辨。上述测试结果表明, 扇入延迟模块对能量分析和时间分析带来的不确定度不会对漂移室的定位性能和能损测量造成明显影响, 但这一设计会降低 MWDC 阵列的事件率上限。在 1–10 kHz 的事件率条件下, 这一电路板可以满足 MWDC 阵列的需求。

经过修正后得到第二通道的延迟时间实际为 310.51 ns, 时间晃动是 347 ps; 第三通道相对第一通道的延迟时间实际为 621.45 ns, 时间晃动是 434.7 ps。由于绝对的时间延迟, 最终可以通过漂移时间零点刻度加以消除, 而对于 500 ps 的时间晃动, 以 $5 \text{ cm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 的电子漂移速度计算, 该时间晃动对应于约 25 μm 的击中位置分辨, 远小于漂移室 300 μm 左右的径迹重建残差。因此, 这一性能也可以满足 CEE 的要求。

参考文献

- 1 Li B A, Chen L W, Ko C M. Recent progress and new challenges in isospin physics with heavy-ion reactions[J]. Physics Reports, 2008, **464**: 113–281. DOI: 10.1016/j.physrep.2008.04.005
- 2 Danielewicz P, Lacey R, Lynch W G. Determination of the equation of state of dense matter[J]. Science, 2002, **298**: 1952–1956. DOI: 10.1126/science.1078070
- 3 Lattimer J M, Parkash M. The physics of neutron stars[J]. Science, 2004, **304**: 536–542. DOI: 10.1126/science.1090720
- 4 Xiao Z G, Li B A, Chen L W, et al. Circumstantial evidence for a soft nuclear symmetry energy at suprasaturation densities[J]. Physical Review Letters, 2009, **102**: 062502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.062502
- 5 Feng Z Q, Jin G M. Probing high-density behavior of symmetry energy from pion emission in heavy-ion

- collisions[J]. Physics Letters B, 2010, **683**: 140–144. DOI: 10.1016/j.physletb.2009.12.006
- 6 Xie W J, Su J, Zhu L, *et al.* Symmetry energy and pion production in the Boltzmann-Langevin approach[J]. Physics Letters B, 2013, **718**: 1510–1514. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.12.021
- 7 Russotto P, Cozma M D, Leifels Y, *et al.* Flow probe of symmetry energy in relativistic heavy-ion reactions[J]. European Physical Journal A, 2014, **50**(2): 1–20. DOI: 10.1140/epja/i2014-14038-5
- 8 Kobayashi T, Chiga N, Isobe T, *et al.* SAMURAI spectrometer for RI beam experiments[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics B, 2013, **317**: 294–304. DOI: 10.1016/j.nimb.2013.05.089
- 9 Shane R, McIntosh A B, Isobe T, *et al.* S π RIT: a time-projection chamber for symmetry-energy studies[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics A, 2015, **784**: 513–517. DOI: 10.1016/j.nima.2015.01.026
- 10 Hong B, Ahn J K, Go Y, *et al.* Plan for nuclear symmetry energy experiments using the LAMPS system at the RIB facility RAON in Korea[J]. European Physical Journal A, 2014, **50**(2): 1–11. DOI: 10.1140/epja/i2014-14049-2
- 11 Zhan W L, Xu H S, Sun Z Y, *et al.* Present status of HIRFL in Lanzhou[J]. International Journal of Modern Physics E, 2006, **15**: 1941–1956. DOI: 10.1142/S0218301306005526
- 12 Reisdorf W, Andronic A, Gobbi A, *et al.* Nuclear stopping from 0.09 A to 1.93 A GeV and its correlation to flow[J]. Physical Review Letters, 2004, **92**: 232301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.232301
- 13 Fu F, Xiao Z G, Zhang Y P, *et al.* Nuclear stopping and compression in heavy-ion collisions at intermediate energies[J]. Physics Letters B, 2008, **666**: 359–363. DOI: 10.1016/j.physletb.2008.07.063
- 14 Zhang M, Xiao Z G, Li B A, *et al.* Systematic study of the π^-/π^+ ratio in heavy-ion collisions with the same neutron/proton ratio but different masses[J]. Physical Review C, 2009, **80**: 034616. DOI: 10.1103/PhysRevC.80.034616
- 15 Xiao Z G, Chen L W. Nuclear matter at a HIRFL-CSR energy regime[J]. Journal of Physics G, 2009, **36**: 064040. DOI: 10.1088/0954-3899/36/6/064040
- 16 Lu C G, Duan L M, Xu H S, *et al.* Test and simulation of a MICROMEGAS detector[J]. Chinese Physics C, 2011, **35**: 1033–1036. DOI: 10.1088/1674-1137/35/11/010
- 17 Ji C S, Shao M, Zhang H, *et al.* Prospects for searching the $\eta \rightarrow e^+e^-$ rare decay at the CSR[J]. Chinese Physics C, 2013, **37**: 046201. DOI: 10.1088/1674-1137/37/4/046201
- 18 Xiao Z G, Yong G C, Chen L W, *et al.* Probing nuclear symmetry energy at high densities using pion, kaon, eta and photon productions in heavy-ion collisions[J]. European Physical Journal A, 2014, **50**(2): 1–10. DOI: 10.1140/epja/i2014-14037-6
- 19 Yi H, Zhang Z, Xiao Z G, *et al.* Prototype studies on the forward MWDC tracking array of external target experiment at HIRFL-CSR[J]. Chinese Physics C, 2014, **38**(12): 39–43. DOI: 10.1088/1674-1137/38/12/126002