

文章编号: 1001-4322(2009)11-1719-05

# 一种<sup>252</sup>Cf 裂变中子源的中子、 γ 射线飞行时间谱测量新方法\*

任 勇<sup>1</sup>, 魏 彪<sup>2</sup>, 米德伶<sup>2</sup>, 冯 鹏<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 针对<sup>252</sup>Cf 快中子、γ 射线的飞行时间谱测量要求, 提出并建立一种基于高速数据采集卡的新型测量系统。采用 1 GHz 高速 A/D 转换单元和现场可编程门阵列高速处理单元, 进行脉冲时间序列的在线检测, 时间精度为 1 ns。使用相关函数法, 通过 PC 机的数据处理、互相关函数计算和数值统计等实现中子、γ 射线飞行时间谱的测量。实验结果表明, 该系统可以获得<sup>252</sup>Cf 自发裂变中子源的中子、γ 射线飞行时间谱, 与经典的飞行时间谱测量方法相比较, 其图谱表达及数值结果有着很高的吻合度。

**关键词:** <sup>252</sup>Cf 中子源; 飞行时间谱; 脉冲序列; 纳秒精度; 相关函数

**中图分类号:** TL811; TP274

**文献标志码:** A

<sup>252</sup>Cf 每自发裂变一次, 放射出约 4 个快中子并伴随 6 个 γ 光子(也即 γ 射线), 通常作为自发裂变中子源, 广泛应用于实验室主动核物理参数测量研究中<sup>[1]</sup>。飞行时间(TOF)谱测量的目的就是要测定中子、γ 射线飞行时间的分布数据, 它是精确测量快中子能谱的有效方法; 同时, 还可以验证<sup>252</sup>Cf 随机脉冲源方法 λ 测量系统的定时性能、检验核探测系统的时间响应特性和对 n-γ 分辨系统的分辨效果进行检验<sup>[2]</sup>。目前, 在实际<sup>252</sup>Cf 自发裂变中子源的飞行时间谱测量任务中, 主要方法是通过时-幅变换器再加多道脉冲分析器进行测量<sup>[2-3]</sup>。本文提出并建立了一种新型的飞行时间谱测量方法, 其主要思想是基于高速数据采集卡和相关函数法, 用以精确测得中子、γ 射线的飞行时间谱。

## 1 中子、γ 射线飞行时间谱测量的基本原理

γ 射线在空气中的飞行速度为光速(30 cm/ns), 在飞行距离一定的情况下, 所用的飞行时间是相同的; 而中子飞行时间的长短与它的能量有关, 能量高的中子飞行时间短, 能量低的中子飞行时间长, 总体都比 γ 射线飞行速度低。与测量带电粒子或 γ 射线的能量不同, 中子的能量至今还没有一种方法进行直接测量, 但人们可以测量中子的速度。如果知道了中子的速度  $v$ , 在非相对论近似的情况下, 则可根据  $E = mv^2/2$  得到中子的能量, 因为中子的静止质量  $m$  是精确知道的。中子的速度  $v$  是通过测量中子穿过一定的距离  $l$  所需的时间  $t$  来得到的, 中子能量  $E = mv^2/2 = m(l/t)^2/2$  或  $t = l(m/2E)^{1/2}$ 。因此, 欲得到中子的飞行时间, 需精确给出中子的起飞时刻和到达时刻, 到达时刻是由中子探测器给出的, 起飞时刻则是由伴随中子产生的带电粒子或 γ 射线给出。

由此可知, 对于<sup>252</sup>Cf 自发裂变中子源的中子、γ 射线飞行时间谱测量, 其基本原理是:<sup>252</sup>Cf 快电离室是一种具有特殊定时功能的电离室, 它利用<sup>252</sup>Cf 一次裂变同时产生裂变碎片和瞬发中子的特性, 由电离室本身探测裂变碎片, 给出准确的裂变定时信号, 相当于给出中子和 γ 射线放出(起飞)时刻的信号。另外, 采用液体闪烁探测器探测<sup>252</sup>Cf 裂变产生的中子、γ 射线信号, 将<sup>252</sup>Cf 镀片中心与液体闪烁体灵敏区中心相隔一定距离摆放, 由<sup>252</sup>Cf 裂变放出的一部分中子、γ 射线飞行一段距离后被闪烁探头探测, 获得中子、γ 射线到达时刻的信号, 从而实现<sup>252</sup>Cf 自发裂变中子源的中子能谱测定。

## 2 脉冲时间序列检测的硬件设计

<sup>252</sup>Cf 源自发裂变时, 其产生的中子、γ 射线需要经过前端电子学电路形成随机窄脉冲序列<sup>[4-5]</sup>。由于<sup>252</sup>Cf 快电离室采用窄间距平行极板设计, 其源强较强, 中子自发裂变率达到  $10^5 \text{ s}^{-1}$ , 通过探测自发裂变碎片, 其瞬

\* 收稿日期: 2009-02-18; 修订日期: 2009-07-07

基金项目: 国防科技基础研究基金项目

作者简介: 任 勇(1966—), 男, 副教授, 研究方向为数据采集与处理、嵌入式系统、核电子; ren Yong0801@163.com。

发中子发射时间的定时精度能达到 ns 量级<sup>[6]</sup>,经过前端电子学电路形成随机窄脉冲序列同样为 ns 量级快逻辑窄脉冲序列。因此,飞行时间测量的首要条件就是要求对裂变中子、 $\gamma$ 射线的脉冲序列的探测定时精度也达到 ns 量级;同时,要求测量是在线、高速、大容量、高度同步地进行的。时间检测是事件型随机信号分析应用中的关键环节,这个过程通常称为 TDC(时间-数字-转换)。特别是,对于 ns 级反应时间的随机事件,在 1 ns 精度范围内快速而精确地检测脉冲时间,一直以来属于事件型随机信号分析应用中的关键和难点。

为了准确、高效地捕获来源于前端的 ns 级时间精度的快反应中子、 $\gamma$ 射线发生时间序列信号,本系统首先设计了其脉冲序列信号检测的硬件系统,其关键组件为 PCI 插卡形式,并由 PC 主机控制管理的高速数据采集卡,而采集卡的核心是高速 A/D 转换单元和大容量、高性能的 FPGA 处理单元,如图 1 所示。系统工作的基本过程为:前端电子学电路产生的快逻辑窄脉冲信号进入采集卡的输入通道后,经过前置滤波电路、衰减电路、可变增益的放大电路,再经过 A/D 采样量化成 FPGA 可以处理的数字信号缓存到存储器。在 PC 主机端的计算机应用程序的交互控制管理下,进行模拟通道的阻抗匹配、放大器增益大小、偏置、采样方式、采样频率、每次采样点数、启动 ADC 及转换结束的识别等控制,并将采集到的数据通过 PC 主机的 PCI 总线接口传输到计算机内存,以供主机对数据进行存储、分析、处理、显示及打印输出等工作。为满足 1 ns 的检测精度,采集卡的 8 bits ADC 器件采用 ADC08D100<sup>[7]</sup>,采样率设为 1 GHz,高速数据采集卡按 TDC 方式采集记录信号,即通过 Xilinx Virtex-4 FPGA<sup>[8]</sup>在线处理固件对采集到的脉冲信号执行边沿检测<sup>[9-10]</sup>以得到脉冲发生时间。

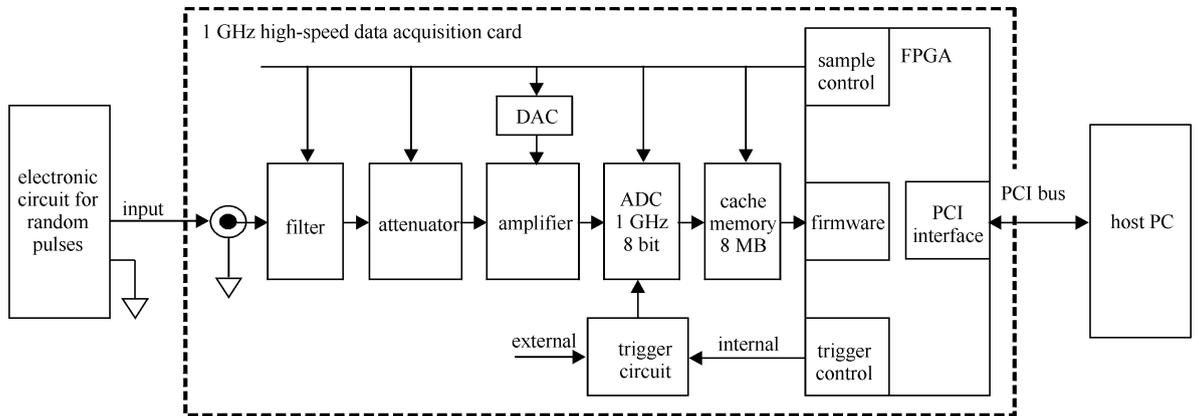


Fig. 1 Block diagram of pulse time detecting system

图 1 脉冲时间序列检测系统的原理框图

### 3 中子、 $\gamma$ 射线飞行时间谱测量系统的构成

<sup>252</sup>Cf 自发裂变中子源的中子、 $\gamma$ 射线飞行时间谱测量系统构成原理框图如图 2 所示。它包含虚线部分在内的为经典的飞行时间谱测量系统,以及粗线框在内的本文提出的飞行时间谱测量系统。系统分成 3 个部分,第 1 部分是由 <sup>252</sup>Cf 快电离室、前置放大器、快放大器、恒比定时器 I 及定时器等组成的 <sup>252</sup>Cf 裂变信号定时单元;第 2 部分由液体闪烁体 BC501、光电倍增管(PMT)和恒比定时器 II 等构成探测单元,提供中子或  $\gamma$ 射线入射到闪烁体的时间信息;第 3 部分为时间记录单元。其中,经典测量系统中的第 3 部分由时幅变换器、多道分析器等构成。当 <sup>252</sup>Cf 发生裂变时,<sup>252</sup>Cf 快电离室给出代表中子或  $\gamma$ 射线发出时刻的信号,液体闪烁体给出到达信号,通过时-幅变换器测量出飞行这段距离的时间。经过多次测量由多道分析器记录,即可得到飞行时间

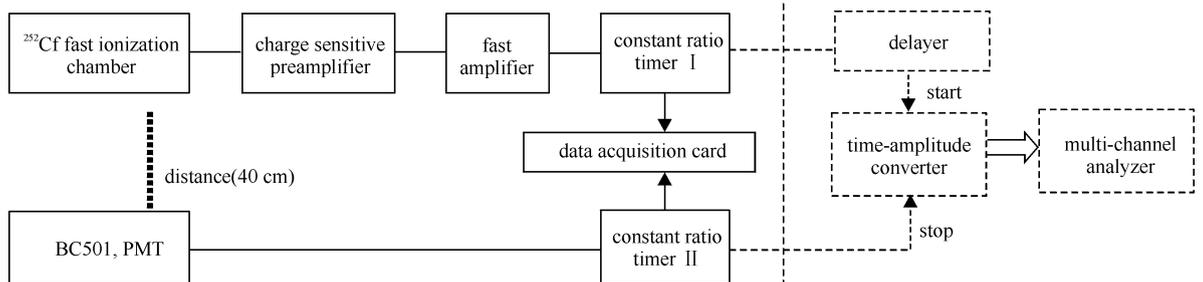


Fig. 2 Block diagram of time of flight (TOF) spectrum measurement for <sup>252</sup>Cf fast ionization chamber fission neutron and  $\gamma$  ray

图 2 <sup>252</sup>Cf 快电离室中子、 $\gamma$ 射线飞行时间谱测量框图

的幅度谱。

本文提出的<sup>252</sup>Cf 快电离室中子、 $\gamma$  射线飞行时间谱测量系统中,将图 2 虚线后面的时-幅变换器和多道分析器,撤换为图 1 所示的基于高速数据采集卡的脉冲时间序列检测系统,也即第 3 部分使用高速数据采集卡进行时间记录,在 PC 机端进行飞行时间谱测量。

#### 4 飞行时间谱测量的数据处理

新型的中子、 $\gamma$  射线飞行时间谱测量方法,是利用高速数据采集卡的脉冲时间序列检测能力,将脉冲时间序列信息传到 PC 进行数据处理和相关性分析。系统前端直接沿用传统电子学电路的快逻辑脉冲形成机制,将代表飞行开始的<sup>252</sup>Cf 快电离室通道的中子、 $\gamma$  探测器输出信号送到高速采集卡的第 1 通道,而将代表飞行停止的液体闪烁体 BC501 通道的中子、 $\gamma$  探测器输出信号送到高速采集卡的第 2 通道。在 PC 机端将采集检测得到两通道的以脉冲发生时间为记录形式的原始数据流,经过识别、还原、分块,形成按 Block 分块的时间仓轴上“0”、“1”序列,即“1”代表有中子或  $\gamma$  脉冲发生,“0”则代表没有中子或  $\gamma$  脉冲发生。

由于裂变中子、 $\gamma$  信号在时间轴上出现的概率服从泊松分布<sup>[11]</sup>,对这个平稳随机过程的主要处理方法是已检测到的一定数量的样本数据进行相关函数计算统计,而相关函数结果的最大特征就是能够反应随机事件之间的时间关联度,相关函数的分布状态与中子、 $\gamma$  射线飞行时间谱有着完全对应的关系。基于此,新型的测量系统将采集到的数据序列按 Block 分块,一个 Block 数据块是整个数据序列的一段,各通道均需  $10^8 \sim 10^9$  个 Block 的大数据量同步样本。每个 Block 的大小取为 1 024 个时间仓,而其中时间仓的间隔为 1 ns。

相关函数法的飞行时间谱的测量,主要考虑使用两个通道之间的互相关函数。实际数据处理时,使用离散化后的互相关函数,并且做分块处理

$$CC_{12}^i(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X^i(k) Y^i(k+\tau) \quad (1)$$

$$CC_{12}(\tau) = \sum_{i=0}^{M-1} CC_{12}^i(\tau) \quad (2)$$

式中: $N$  为 Block 的大小; $i$  为 Block 的序号数; $M$  为 Block 总数; $X^i(k)$  为通道 1 也即<sup>252</sup>Cf 快电离室探测器的第  $i$  个 Block 在  $k$  时刻的信号值,而  $Y^i(k+\tau)$  为通道 2 也即 BC501 探测器的第  $i$  个 Block 在  $k+\tau$  时刻的信号值, $\tau$  定义为时间延迟,其取值  $-(N-1) \leq \tau \leq N-1$ 。在对通过公式(1)计算所得的  $M$  个 Block 的互相关函数结果进行累加、归一化处理,就可得到反映中子、 $\gamma$  飞行时间的互相关谱数据。

#### 5 实验结果与讨论

系统构建完成后,对实际的<sup>252</sup>Cf 裂变中子源的中子、 $\gamma$  射线随机脉冲序列进行了飞行时间谱的测量实验,并将所测结果与现有的飞行时间谱测量结果进行了比较分析。变换通道 2 的 BC501 探测器与通道 1 的<sup>252</sup>Cf 源快电离室探测器之间的距离,分别使用经典的飞行谱测量系统和新建的飞行谱测量系统进行相同条件下的比对测量实验。测量时 Block 总数  $M$  为  $3 \times 10^8$  以上,时间仓大小为 1 ns。

图 3 分别为 40,30,20,10 cm 距离情况下的测得的飞行时间谱,其坐标纵轴为互相关函数  $CC_{12}$  统计结果,其坐标横轴单位为时间,宽度取为与多道分析器道宽相同的 100 ns。在互相关函数  $CC_{12}$  谱的曲线分布中出现的两个峰正是中子、 $\gamma$  射线飞行时间集中带,尖锐峰对应于经典测量法得到的  $\gamma$  峰,其后的缓变峰对应于经典测量法得到的中子飞行时间谱。多次测量后的统计平均数值分布如表 1 所示。

表 1 飞行时间谱测量的数值分布  
Table 1 Value distribution of TOF spectrum

distance /cm	$\gamma$ peak position /ns	FWHM( $\gamma$ ) /ns	neutron peak position/ns
40	22	<2	40
30	22	<2	35
20	22	<2	31
10	21	<2	29

对于测量量为时间的测量系统来说,它的定时精度是重要指标,其中  $\gamma$  峰半高宽是检验测量系统工作性能的关键参数。本试验系统中的各个部分,均已经过细致调节处于 ns 级精确定时状态,如果新加入的脉冲时间序列检测单元以及 PC 机测量计算单元处于不良或错误工作状态,会灵敏地反映在  $\gamma$  峰上。因此,用  $\gamma$  峰半高宽能准确检验整个系统的定时精度和飞行计算结果,通常要求  $\gamma$  峰半高宽为 ns 量级。从本测量系统的飞行时间谱图和表 1 的具体数值可以看出, $\gamma$  峰集中于互相关谱很窄范围内,其半高宽小于 2 ns,是十分理想的,且

优于 Mihalczko 在其  $^{252}\text{Cf}$  随机脉冲源测量系统中的飞行时间谱 2.7 ns 的  $\gamma$  峰半高宽<sup>[12]</sup>。另外,  $\gamma$  峰之后的  $^{252}\text{Cf}$  裂变中子谱为连续分布, 随着 BC501 探测器的放置距离的减小, 中子飞行谱的密集区域宽度逐渐收敛、中子峰位向  $\gamma$  峰靠近, 这也是完全符合实验理论预期的。通过大量的、反复的实验比对, 结果表明, 本文提出的飞行谱测量系统具有较好的正确性、较强的一致性和稳定性, 且与经典的使用时-幅变换器加多道分析器的飞行谱测量系统获得的  $^{252}\text{Cf}$  裂变中子飞行时间分布、 $\gamma$  射线分布结果有着 99.9% 的吻合度。

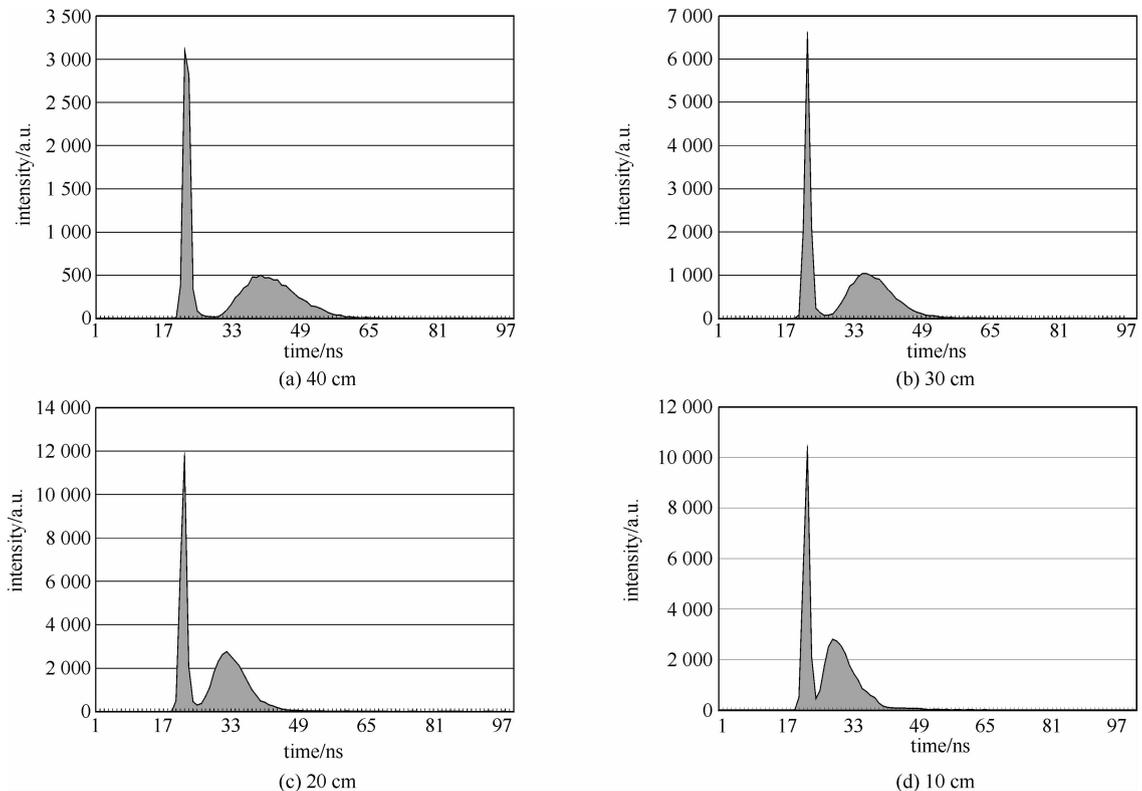


Fig. 3 Test results of TOF spectra

图 3 飞行时间谱测量结果示例

## 6 结 论

本文为  $^{252}\text{Cf}$  裂变中子源的中子、 $\gamma$  射线飞行时间谱测量提供了一种新的原理及方法, 并构建出基于高速数据采集卡和相关函数法的新型测量系统, 同样可以精确测得中子、 $\gamma$  射线的飞行时间谱。系统采用硬件、软件相结合的方式, 设计了一种利用 PC 平台、基于 1 GHz 采样率 (1 ns 定时精度) 高速数据采集卡的数据采集与处理系统, 用以替代传统测量系统中的时幅变换器和多道分析器。系统能够完成脉冲时间序列的 ns 级精确检测, 尤其运用随机信号的互相关计算分析方法获得了能够表征  $^{252}\text{Cf}$  源自裂变中子、 $\gamma$  射线飞行时间的图谱表达与数值结果。

## 参考文献:

- [1] 丁大钊, 叶春堂, 赵志祥, 等. 中子物理学——原理、方法与应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2001. (Ding Dazhao, Ye Chuntang, Zhao Zhixiang, et al. Neutron physics—principle, method and application. Beijing: Atomic Energy Press, 2001)
- [2] 张翼, 李建胜, 金宇, 等.  $^{252}\text{Cf}$  快电离室裂变中子、 $\gamma$  飞行时间谱测量[J]. 核动力工程, 2008, **29**(5): 91-93. (Zhang Yi, Li Jiansheng, Jin Yu, et al. Measurement of  $^{252}\text{Cf}$  fast ionization chamber fission neutron and  $\gamma$  ray TOF spectrum. *Nuclear Power Engineering*, 2008, **29**(5): 91-93)
- [3] 敖奇, 魏义祥, 文向阳. 基于 DSP 的数字化多道脉冲幅度分析器设计[J]. 核技术, 2007, **30**(6): 532-535. (Ao Qi, Wei Yixiang, Wen Xiangyang. Design of digital multi-channel pulse height analyzer. *Nuclear Techniques*, 2007, **30**(6): 532-535)
- [4] 纪帆, 隋展, 李锋, 等. 时域延时多脉冲迭加平滑过程的分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(3): 579-583. (Ji Fan, Sui Zhan, Li Feng, et al. Analysis of pulse smoothing by multi-pulse interference in time domain. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(3): 579-583)
- [5] 王庆峰, 高国强, 刘庆想, 等. 脉冲形成网络的设计与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(4): 531-535. (Wang Qingfeng, Gao Guoqiang, Liu Qingxiang, et al. Design and Experimental study of pulse forming network. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(4): 531-535)
- [6] 周浩军, 宋凌莉, 李建胜, 等.  $^{252}\text{Cf}$  快电离室在核物理参数测量研究中的应用[J]. 核动力工程, 2007, **28**(S1): 23-26. (Zhou Haojun, Song

- Lingli, Li Jiansheng, et al. Application of <sup>252</sup>Cf ionization chamber in nuclear physics parameter measurements. *Nuclear Power Engineering*, 2007, **28**(S1): 23-26)
- [7] National Semiconductor. ADC08D1000 data sheet[EB/OL]. <http://www.national.com>.
- [8] Xilinx. Virtex-4 platform FPGAs data sheet[EB/OL]. <http://www.xilinx.com>.
- [9] 员天佑, 谢阅. 基于 FPGA 的随机脉冲快速捕捉系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2007, **15**(3): 381-383. (Yuan Tianyou, Xie Yue. Design of random pulse signal acquisition system based on FPGA. *Computer Measurement and Control*, 2007, **15**(3): 381-383)
- [10] 包杰, 张东旭. 一种简单高效的前沿检测时间估计算法及其应用[J]. 重庆邮电学院学报: 自然科学版, 2006, (1): 79-81. (Bao Jie, Zhang Dongxu. A simple effective algorithm of time estimation of leading edge detection and its applications. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2006, (1): 79-81)
- [11] 李鹏宇, 薛志华, 刘松秋, 等. 核随机脉冲快速测量及统计特性研究[J]. 核电子学与探测技术, 2006, **26**(6): 886-888. (Li Pengyu, Xue Zhihua, Liu Songqiu, et al. Fast measurement for the statistical distribution of nuclear random pulse. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2006, **26**(6): 886-888)
- [12] Mihalcz J T. The use of californium-252 as a randomly pulsed neutron source for prompt-neutron decay measurements[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1974, **53**: 393-396.

## TOF spectrum measurement of <sup>252</sup>Cf source fission neutron and gamma ray

Ren Yong<sup>1</sup>, Wei Biao<sup>2</sup>, Mi Deling<sup>2</sup>, Feng Peng<sup>2</sup>

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Optoelectronics Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** For the measurement of flight time spectrum for <sup>252</sup>Cf fast neutron and gamma ray, a new measuring system based on high-speed data acquisition card is put forward and constructed. The data acquisition card uses high speed A/D converting unit (1 GHz) and high speed processing unit. It can accomplish on-line time detecting of pulse sequence at 1 ns precision. The measurement of flight time spectrum is done by correlation function. Through data processing arrangement and cross correlation function calculation designed on PC, flight time spectra of <sup>252</sup>Cf Source fission neutron and gamma ray can be obtained. The results agree with those from the classical measuring system in a degree of 99.9%, which consists of time-amplitude converter and multi-channel analyzer.

**Key words:** <sup>252</sup>Cf neutron source; time of flight spectrum; pulse sequence; nanosecond precision; correlation function