

数字化核能谱获取中信号处理方法的研究

张软玉, 陈世国, 罗小兵, 王 鹏, 李泰华

(四川大学 物理科学与技术学院 辐射物理及技术教育部重点实验室, 四川 成都 610064)

摘要:介绍了将核辐射能量信号离散化后进行数字极零识别及补偿、基线扣除、低通滤波、脉冲成形和幅度分析等一系列数字化信号的处理方法, 将长尾指数衰减信号成形为梯形波或三角波信号。用所述方法对实测波形进行离线处理后的结果表明, 所获能谱的能量分辨率好于模拟式多道系统的测量结果。

关键词:数字信号处理; 能量分辨率; 计数率

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)03-0252-04

Study on the Method of Digital Signals Processing for Acquiring Nuclear Energy Spectrum

ZHANG Ruan-yu, CHEN Shi-guo, LUO Xiao-bing, WANG Peng, LI Tai-hua

(Key Laboratory for Radiation Physics and Technology of Education Ministry,
Physics Science and Technology College, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: A method of digital nuclear radiation energy signals processing was developed. It includes polar-zero identifier and compensation, baseline subtraction, low-pass filter, pulse shaping and amplitude analyses. The method can convert a signal with long exponential attenuating tail to a trapezoidal or triangular pulse. Processing the signal in off-line, the preliminary experimental tests show the potential advantages of these techniques in high resolution spectroscopy.

Key words: digital signal processing; energy resolution; counting rate

能量分辨率是核能谱测量系统性能的主要指标之一。影响能量分辨率的因素^[1]有核探测器的固有能量分辨率、脉冲堆积(峰堆积、尾堆积)、电子学噪声和弹道亏损。其中的第1项因素由探测器性质决定,而后3项则可通过对核辐射能量信号的处理最大程度地减小其影响。在模拟方式能谱测量系统中,由电子线路完成对输入信号的极零相消、脉冲幅度放大和成形、

基线恢复以及堆积判弃等功能,然后送给多道分析器(MCA)进行能谱获取和分析。数字化测量系统具有功能灵活、结构紧凑、对被测对象和测量环境的适应性强、抗干扰能力强等优点,其取代模拟测量系统已成为主要发展趋势。本文介绍1种用数字信号处理法对核辐射能量信号进行处理和能谱获取的方法。该数字化处理方法包括极零识别及补偿、基线扣除、低通滤

收稿日期:2003-09-17;修回日期:2003-10-24

作者简介:张软玉(1969—),女,山东掖县人,博士研究生,核测控技术专业

波、脉冲成形和脉冲幅度分析。

1 信号数字化处理方法

1.1 实现功能

由核探测器输出的信号经电阻反馈式前置放大器后,得到了一个具有很快的上升沿(约500 ns)和较长尾部(30~50 μs)的指数衰减信号,同时在该信号上还叠加有以白噪声为主的噪声成分^[2]。将该信号送给高速数据采集卡得到数字化核辐射能量信号。随后对采样信号进行以下几步处理:1)通过极零识别对模拟系统参数进行估计,作为后续数字化信号处理的基

础;2)对每个信号进行基线扣除,减小由于基线漂移对信号幅度的影响;3)通过极零补偿将长尾双指数衰减信号成形为短尾单指数衰减信号;4)采用多点平滑法进行低通滤波;5)通过特定的FIR(finity impulse response)滤波器,将信号成形为一脉宽和平顶宽度均可调整的梯形波。

上述数字信号的处理过程示于图1。

谱获取过程中还需实现脉冲堆积判弃、假峰识别、漏计数修正等算法,其实现方法详情参见文献^[3]。

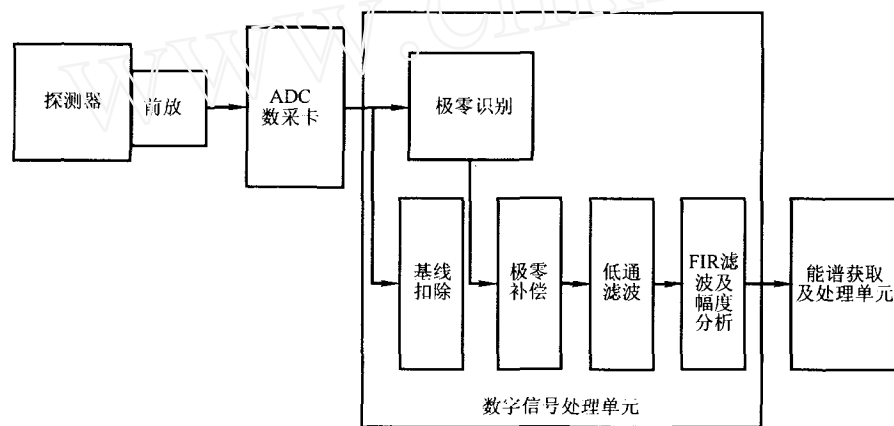


图1 数字化核辐射能量信号处理功能框图

Fig.1 Function diagram of processing the digital nuclear radiation energy signal

1.2 极零识别和极零补偿

由探测器经电阻反馈式前放输出的信号可表示为:

$$V_i(t) = U(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (1)$$

式中:τ₁和τ₂分别为核探测器输出信号的慢指数部分和快指数部分的时间常数;U为信号幅度。

将式(1)幅度归一化后再进行Z变换得:

$$V_i(Z) = \frac{A_1}{(1 - p_1 Z^{-1})} + \frac{A_2}{(1 - p_2 Z^{-1})} \quad (2)$$

式中:p₁=e^{-T/τ₁}, p₂=e^{-T/τ₂}, T为Z变换的采样周期;A₁和A₂分别为两项中的增益因子。

在此,采用Steiglitz-McBride算法(简称S-M算法)进行极零参数估计^[4]。用S-M算法对以白噪声为主的线性时不变系统进行参数估计具有较高的精度^[5]。

在极零补偿时,构造一如式(3)所示的IIR

(infinity impulse response)滤波器,消去信号原来的极点p₁和p₂,并为其补充新极点p,将信号成形为短尾单指数衰减信号,从而减少脉冲堆积提高能量分辨率,有:

$$H(Z) = \frac{(1 - p_1 Z^{-1})(1 - p_2 Z^{-1})}{(1 - p Z^{-1})} \quad (3)$$

式中:p=e^{-T/τ},τ为成形后信号衰减时间常数。

在进行长时间连续测量时,需跟踪系统极零点的漂移,对极零补偿参数进行实时修正。

1.3 低通滤波

为了滤除信号中叠加的高频噪声,采用最小二乘移动平滑法对信号进行低通滤波,有:

$$\bar{y}_m = N^{-1} \left(\sum_{j=-k}^{-1} C_{k,j} \bar{y}_{m+j} + \sum_{j=0}^k C_{k,j} \bar{y}_{m+j} \right) \quad (4)$$

式中:ȳ为被滤波后的采样数据,其下标为数据序号;N为归一化因子,(2k+1)为平滑点数;C

为每点的权重因子。

当平滑点数 $W = 2k + 1$ 时, 式(4)中的 $C_{k,j}/N_k$ 可由下式计算^[6]:

$$\frac{C_{k,j}}{N_k} = \frac{1}{W} \left[1 + \frac{15}{W^2 - 4} \left(\frac{W^2 - 1}{12} - j^2 \right) \right] \quad (5)$$

1.4 基线的估计及扣除

核事件的发生具有时间随机性, 信号与信号之间总可能出现相隔时间相对较长的情况。在无核事件发生时, 可对基线数据进行采样, 并用式(6)所示的 IIR 滤波器处理基线数据。经式(6)处理后的基线值由式(7)表示, 有:

$$H_B(Z) = \frac{\frac{1}{N}}{1 - \frac{N-1}{N}Z^{-1}} \quad (6)$$

$$\bar{B}_n = \frac{N-1}{N} \bar{B}_{n-1} + \frac{1}{N} B_n \quad (7)$$

式(6)中的 $1/N$ 为靠近信号的基线数据的权重因子。式(7)中的 B_n 为第 n 个基线采样数据, \bar{B}_n 为经式(6)滤波后的第 n 点基线值。当核辐射能量信号到来时, 则从信号数据中减去由式(7)所得最靠近信号的基线值。

若两信号发生的时间间隔太短, 期间不足以采到足够的基线数据, 则将两信号看作同一批信号, 用相同的基线值对其进行处理。

1.5 脉冲成形及幅度分析

经过上述处理后的信号可以下式表示:

$$V(t) = e^{-t/\tau} \quad (8)$$

此时, 信号频带上仍叠加有噪声。根据最优滤波理论及消除弹道亏损的要求, 希望信号被成形为梯形波^[7], 且使信号幅度处在一便于分析的数量范围内。为此, 构造了一个如式(9)所示的 FIR 滤波器^[8]。将式(9)所示 FIR 滤波器与式(8)所示信号进行卷积运算得到式(10)所示结果。

$$h(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ A(\tau + t) & (0 \leq t < \tau) \\ A\tau & (\tau \leq t < \tau + \Delta T) \\ A(-\tau + \tau + \Delta T) & (\tau + \Delta T \leq t \leq 2\tau + \Delta T) \\ 0 & (t > 2\tau + \Delta T) \end{cases} \quad (9)$$

$$V_o(t) = V(t)h(t) =$$

$$\begin{cases} 0 & (t < 0) \\ A\tau t & (0 \leq t < \tau) \\ A\tau^2 & (\tau \leq t < \tau + \Delta T) \\ A(2\tau^2 + \tau\Delta T - \tau t) & (\tau + \Delta T \leq t \leq 2\tau + \Delta T) \\ 0 & (t > 2\tau + \Delta T) \end{cases} \quad (10)$$

式(9)和(10)中的 ΔT 为梯形的平顶宽度, 成形后波形的总宽度为 $2\tau + \Delta T$, 幅度为 $A\tau^2$, A 为幅度线性增益。 τ 的大小在极零补偿时确定。若取 $\Delta T = 0$, 则可得到三角波。

2 实验结果

2.1 波形处理

用正比计数管后接电阻反馈式电荷灵敏前置放大器探测 ^{55}Fe 源的 X 射线信号, 利用 40 MHz、10 bit ADC 快速数据采集卡对前放输出信号进行采样, 再用本数字处理方法对所采信号进行离线分析处理。所得结果示于图 2、3。

在实现基线扣除算法时, 取 $N = 64$; 实现低通滤波时, 取 $W = 7$; 当选取极零补偿时间常数为 $\tau = 3 \mu\text{s}$ 、梯形平顶宽度 $\Delta T = 0.33 \tau$ 时, 可得到图 2 所示梯形波; 当选取 $\tau = 0.5 \mu\text{s}$ 、 $\Delta T = 0$ 时, 可得到图 3 所示三角波。其中, 图 2

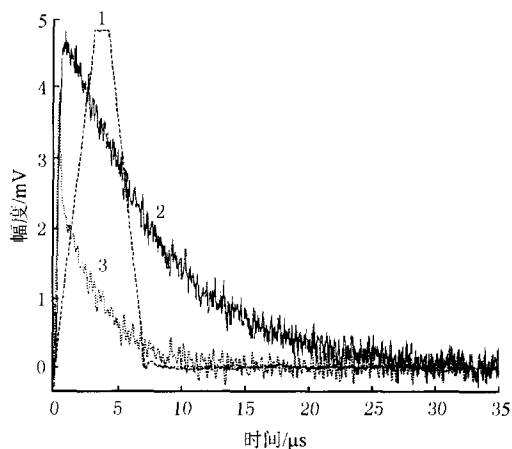


图 2 输入信号、经极零补偿后的单指数信号及成形后的梯形波的波形比较

Fig. 2 Difference among the input signal, the P/Z compensated signal and the final output trapezoid signal

1——输出信号; 2——输入信号; 3——单指数信号

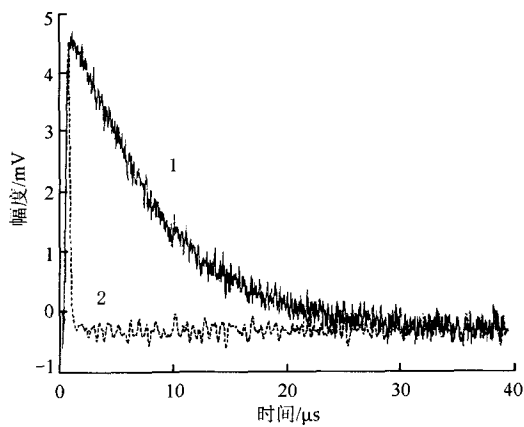


图3 输入信号及成形后的三角波的波形比较

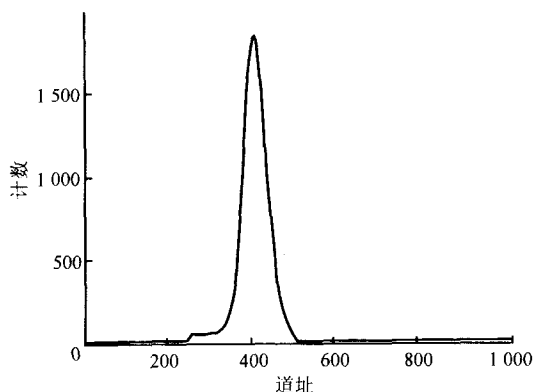
Fig. 3 Difference between the input signal and the output triangle

1——输入信号;2——输出信号

所示梯形波具有较好的信噪比,而图3所示三角波脉宽较窄,可有效消除脉冲堆积。在进行谱获取时,可将图3和2中所示的快、慢信号结合,进行堆积判弃和漏计数修正^[3]。

2.2 能谱获取

仍采用2.1中所述实验装置进行连续采样,将获得的数据进行离线处理,得到图4所示能谱。用以实验的计数率约为 $8\ 000\ \text{s}^{-1}$ 。用数字信号处理方法所获取的能谱的能量分辨率为15.4%。在用同样的探测器、前置放大器和相同计数率的情况下,模拟式MCA系统得到的谱分辨率为17.1%。这一结果表明,在改善能量分辨上,数字化谱仪比模拟式谱仪更优越。

图4 经数字化处理后获取的⁵⁵Fe源能谱Fig. 4 X-ray spectrum of ⁵⁵Fe by digital processing

3 结论

本文介绍的对核辐射能量信号进行数字化处理的思路为数字化谱仪的实现提供了1种方法。在该方法中,用软件实现了极零补偿、基线扣除、脉冲成形及脉冲幅度分析等一系列数字信号处理算法,有效减小了测量中因基线漂移、电子学噪声和弹道亏损等因素对系统能量分辨率的影响,与模拟式MCA相比,所获取能谱的分辨率得到了改善。另外,在应用所述方法时,可通过简单调节软件参数,自由改变梯形脉冲的上升时间及平顶宽度,从而适用于对不同能量和强度射线的测量。

参考文献:

- [1] Nicholson PW. Nuclear Electronics[M]. London: A Wiley-Interscience Publication, 1974. 88~95.
- [2] Goulding FS. Pulse-shaping in Low-noise Nuclear Amplifiers: A Physical Approach to Noise Analysis [J]. Nucl Instrum Method, 1972, 100:493~504.
- [3] Anon. User's Manual Digital X-ray Processor [Z]. [s. l.]:[s. n.], 2002. 337~345.
- [4] Cousseau JE, Paulo SR, Diniz New Adaptive IIR Filtering Algorithms Based on the Steiglitz-McBride Method [J]. IEEE Trans Sig Proc, 1997, 45(5):1 367~1 371.
- [5] Torsten SP. The Steiglitz-McBride Identification Algorithm Revisited-convergence Analysis and Accuracy Aspects[J]. IEEE AC, 1981, 26(3):712~717.
- [6] Sterlinski S. General Formula for Calculation of Savitzky and Golay's Filter Weights and Some Features of This Filters[J]. Nucl Instrum Method, 1975, 124:285~287.
- [7] Koeman H. Discussion on Optimum Filtering in Nuclear Radiation Spectrometers[J]. Nucl Instrum Method, 1975, 123:161~167.
- [8] Jordanov VT, Knol GF. Digital Synthesis of Pulse Shapes in Real Time for High Resolution Radiation Spectroscopy[J]. Nucl Instrum Method, 1994, A:337~345.