

文章编号: 1007-4627(2008)04-0368-07

^{252}Cf 源驱动噪声测量信号分析及其时域计算机模拟*

裴慧霞¹, 王银峰², 魏彪³

(1 周口师范学院物理与电子工程系, 河南 周口 466001;

2 重庆大学数理学院, 重庆 400030;

3 重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)

摘要: ^{252}Cf 源驱动噪声测量是指 Rossi- α 和随机脉冲中子同时测量, 这种方法能测量与次临界中子增殖因子相关的量。简述了 ^{252}Cf 源驱动噪声测量的原理、特点, 并对该方法测量结果做了简单分析, 并给出了该测量方法的时域计算机模拟。

关键词: 源; 噪声测量; 计算机模拟

中图分类号: TL4 **文献标识码:** A

1 引言

^{252}Cf 源驱动噪声分析方法是一种多用途测量工具, 已经应用于测量反应堆的初始载荷、反应堆燃料成分质量的鉴定、燃料处理、燃料再处理、燃料储存、反应堆的零功率测试、过程监控及核武器鉴别等。 ^{252}Cf 源驱动噪声分析方法是指 Rossi- α 和随机脉冲中子同时测量, 这种方法能测量和次临界中子增殖因子相关的量。次临界源噪声测量代替 Rossi- α 测量, 可以得到其他的信息, 如谱密度比和相干函数等。次临界源噪声测量相对于其他次临界测量方法的优点是它不需要测定缓发临界。由于从这种测量得到的众多时间和频率信号各具有独特的性质, 这种方法得到了广泛的应用。测量可得到下列参数: 平均探测器的计数率、探测器的重度、探测器自相关、探测器之间的互相关、探测器的自功率谱密度及探测器间的互功率谱密度、相干函数、谱密度比率。本文简述了 ^{252}Cf 源驱动噪声测量的原理、特点, 并对该方法测量结果做了简单分析, 并给出了该测量方法的时域计算机模拟。

2 ^{252}Cf 源驱动噪声分析测量的物理基础

^{252}Cf 源驱动噪声分析测量是由随机脉冲中子

测量法和 Rossi- α 测量法结合发展而成的^[1]。 ^{252}Cf 源驱动噪声分析测量系统的模型如图 1 所示。 ^{252}Cf 源是用来激发裂变原料的, 利用两个或更多的探测器探测裂变系统被激发后发射的中子和 γ 射线。 ^{252}Cf 源被放在一个电离室内, 并且每一个自发裂变事件将会提供一个脉冲。指定源电离室为探测器 #1, 辐射探测器为 #2, #3 等。来自源和探测器的脉冲通过 Block 采集数据, 一般 Block 长度为 512 或者 1 024。源和探测器信号是互相关联的, 通过这些信号可以得到各种时间和频率分析参数。源与探测器的互相关相当于脉冲中子测量, 而自相关相当于单个探测器 Rossi- α 测量。两个探测器间的互相关相当于两个探测器 Rossi- α 测量。通过相关函数的快速傅里叶变换 (FFT) 可以得到频率分析参数^[2]。

三通道输入系统如上所述, 通过数据处理可获得以下信号: (a) 时间信号 (1) 3 个自相关函数, $R_{11}(t)$, $R_{22}(t)$ 和 $R_{33}(t)$; (2) 3 个互相关函数, $R_{12}(t)$, $R_{13}(t)$ 和 $R_{23}(t)$ 。(b) 频率信号 (1) 3 个自功率谱密度 APSDs, $G_{11}(\omega)$, $G_{22}(\omega)$ 和 $G_{33}(\omega)$; (2) 3 个互功率谱密度 APSDs, $G_{12}(\omega)$, $G_{13}(\omega)$ 和 $G_{23}(\omega)$; (3) 3 个相干函数, γ_{12}^2 , γ_{13}^2 和 γ_{23}^2 , 这里 $\gamma_{ij}^2 = |G_{ij}|^2 / G_{ii}G_{jj}$; (4) 1 个谱密度比, $G_{12}^*G_{13} / G_{11}G_{23}$, * 是复共轭。

* 收稿日期: 2008-02-26; 修改日期: 2008-08-04

* 基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(2002-16)

作者简介: 裴慧霞(1981-), 女(汉族), 河南鄢陵人, 助教, 从事核技术及应用、无损检测技术及应用研究;

E-mail: peihx1981@163.com

这些频率信号是时间信号的转换。相干函数、谱密度比是无量纲的。

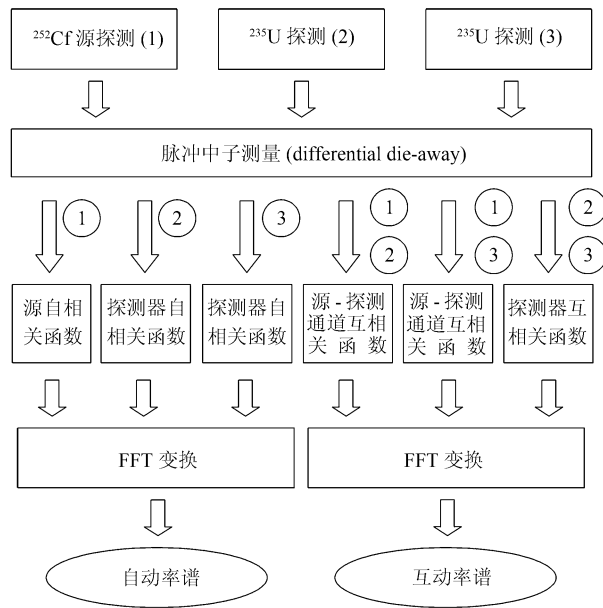


图1 系统的测量模型

如图2所示,源可以看作对一个线性系统的输入,它的输出可以被图中探测器测量。为简单起见,探测器自身的传递函数可以忽略不计。对图中的探测器来说,系统有两个背景噪声源 $n_2(t)$ 和 $n_3(t)$ 。方块图可以用来决定探测器的自相关和互相关。因为单个自发裂变事件之间是不相关的^[3, 4]。 ^{252}Cf 源自发裂变可以看作一个泊松过程。泊松过程的自相关是一个零位延迟的 δ 函数。因此,源的自相关如下:

$$R_{11}(\tau) = A\delta(\tau), \quad (1)$$

其中, A 是与 ^{252}Cf 自发裂变率成比例的常数。线性系统探测器的输出 $o(t)$ 与源输入 $i_S(t)$ 相关,通过卷积公式得出:

$$o(t) = \int h(t')i_S(t-t')dt' + n(t), \quad (2)$$

其中, $h(t)$ 是系统的脉冲响应函数。探测器输出的自相关函数由公式(1)可得:

$$R_{22}(\tau) = \iint h(t)h(t')R_{SS}(\tau-t'+t)dt dt' + R_{n_2 n_2}(\tau), \quad (3)$$

其中, R_{SS} 是除去意外相关外的噪声源自相关,噪声源 R_{SS} 包括 ^{252}Cf 源、裂变源、固有自发裂变源的噪声影响; $R_{n_2 n_2}(\tau)$ 由背景探测器计数。探测器响

应的自相关相当于单个探测器Rossi- α 的测量^[5]。

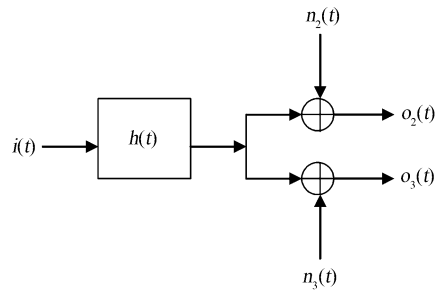


图2 单输入多输出系统

源与探测器之间的互相关由单输入与多输出的系统测定。探测器1与探测器2之间的互相关由下式给出:

$$R_{12}(\tau) = \int h(t)R_{11}(\tau-t)dt, \quad (4)$$

其中, R_{11} 是源自相关函数,也是狄拉克 δ 函数。而且源与探测器之间的意外相关已经被排除。因此,源与探测器之间的互相关是一固定时期的系统脉冲响应。 ^{252}Cf 源与探测器之间的互相关是一随机脉冲中子测量,而且可以用来决定瞬发中子衰变常数 α 。这种互相关仅依赖于诱发裂变率、固有裂变源,并且独立于背景辐射。

探测器之间的互相关由下式给出:

$$R_{23}(\tau) = \iint h(t)h(t')R_{ss}(\tau-t'+t)dt dt', \quad (5)$$

这里已排除意外相关。探测器互相关相当于两个探测器Rossi- α 的测量,不依赖背景计数^[6, 7]。

再对以上(1), (3), (4)和(5)式两端作傅里叶变换,则可得输入和输出频谱密度之间的关系。

3 ²⁵²Cf 源驱动噪声测量的典型相关函数

源探测器自相关函数如图3(A),这个函数图有3个特征:(a)在时间零点的 δ 函数;(b)一段时间无相关计数;(c)常数背景计数。由于²⁵²Cf源的单个自发裂变事件是相互独立的,这就意味着相关只能发生在时间轴的零点,因此,自相关函数是在时

间零点的 δ 函数。一段时间无相关计数是指处理源信号时的电子学死时间。以后部分区域是常数相关计数。尽管自发裂变事件是不相关的,但是如果在一个数据块里多于一个源裂变发生,将会有有一个意外相关发生^[8]。

图3(B)是探测器随机计数的自相关函数,与源自相关函数有相同的特点。探测器自相关函数在0—20 ns应该展现出指数衰减,但是由于系统采用了随机源,它没有展现出指数衰减形式。裂变系统探测器的自相关函数依赖于源诱发、固有裂变事件和背景辐射。源-探测器互相关函数 R_{12} 和 R_{13} 等,相当于脉冲中子测量,主要依赖于诱发裂变率及系统的传递率。

图3(C)是源-探测器互相关函数的一个图例。源

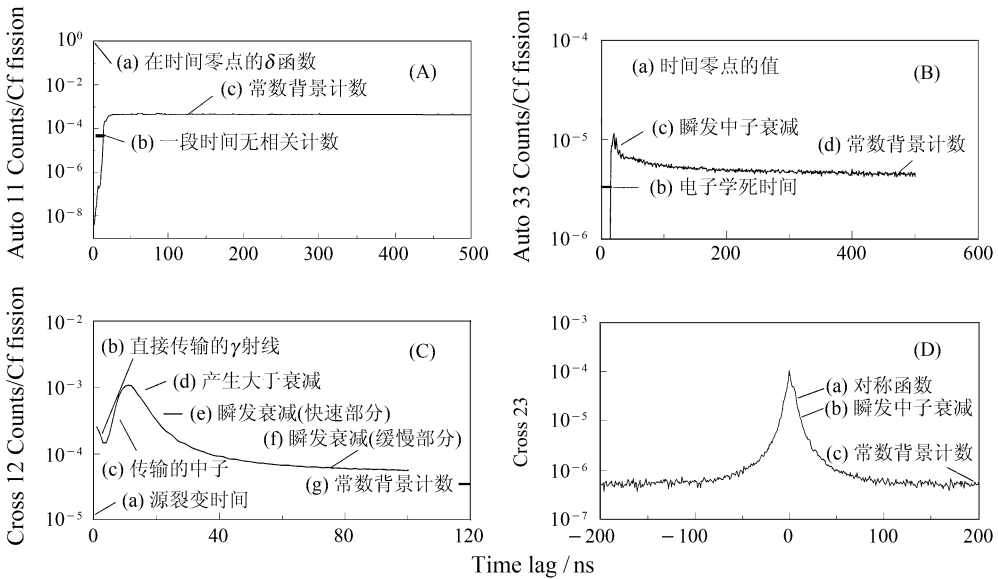


图3 (A), (B), (C)和(D)系统三通的自相关和互相关的函数

(A) 源自相关函数; (B) 探测器自相关函数; (C) 源-探测器互相关函数; (D) 探测器-探测器互相关函数。

-探测器互相关函数有两个主要组成部分:一个峰,是由于²⁵²Cf源直接传输的 γ 射线形成的;另外一个峰,是由于散射的 γ 射线、传输和散射的中子、裂变的瞬发中子和 γ 射线形成的。探测器间的互相关函数表示为 R_{23} 和 R_{24} 等,它表明两个探测器间的相关信息量。

图3(D)是两个探测器的互相关函数。这个函数在本质上是关于时间对称的函数。在时间零点的峰主要是由于两个探测器里裂变符合 γ 射线。探测器自相关函数、源-探测器互相关函数、两个探测器间的互相关函数都是中子衰变测量,用于测量系

统裂变链瞬发中子衰变。如果意外相关比较高,瞬发衰变时间将会不明显;因此,可以采用频率分析方法来克服这种困难。自相关函数的傅里叶变换称为自功率谱密度,相应地、互相关函数的傅里叶变换称为互功率谱密度。

4 ²⁵²Cf 源驱动噪声测量信号分析计算机模拟

对于一个随机信号,相关函数往往最能完整地表征它的统计平均值。而一个随机信号的功率谱密度正是相关函数的傅里叶变换,因此可用功率谱密

度来表征它的统计平均谱特性。MATLAB对离散随机信号处理提供了强有力的支持,特别是在信号的功率谱分析方面。

4.1 ^{252}Cf 源噪声测量信号的随机序列的模拟

对于 ^{252}Cf 源噪声测量信号的分析, ^{252}Cf 为第一路测量。 ^{252}Cf 自发裂变中子源,每秒每微克将产生614 000次裂变,而 ^{252}Cf 每自发裂变一次,又将放射出约4个中子,理论上为3.7个中子。若每放射出1个中子,在源电离室上将产生1个脉冲,这样, ^{252}Cf 每秒每微克每自发裂变一次产生的中子数为614 000 $\times 4 \approx 2\,456\,000$ counts/s $\cdot \mu\text{g}$,即 2×10^6 counts/s $\cdot \mu\text{g}$ 。

堆裂变材料设置有两个通道,即第2,3路测量。一个 ^{235}U 核受到一个中子轰击,将放射出2—3个中子(平均2.5个中子),这与 ^{252}Cf 每裂变一次放射出4个中子相当。同理,若每放射出一个中子,在测量探测器上也将产生一个脉冲,这样,第2,3路信号的计数率最高也就在 10^6 s^{-1} 数量级。

可见,数据采集若以s为单位,各路测量的计数脉冲约为 10^6 counts/s量级。换句话说,数据采集若以 μs 为单位,则各路测量的计数脉冲约为几到几十个或上百个counts/ μs 。因此,以1 ns量级采集速度足以“抓住”以 μs 量级每发生一次裂变的事件。因此,依据以上分析, ^{252}Cf 源噪声测量信号分析系统可以在1 ns内决定脉冲的存在(记1)或不存在(记0),系统按Block进行采集数据,Block的长度一般为256,512或1 024。显而易见,在大多数情况下,512或1 024的Block计数为0。

核衰变是一个随机过程,其事件的随机性表现:统计在一段时间内核事件的发生次数,会发现这个数目围绕着它的平均值上下涨落,即统计涨落。在确定的一段时间内发生核衰变事件的次数可以用一个概率分布描述。根据理想模型,用泊松分布描述核统计涨落规律,公式如下:

$$p(x) = \frac{m^n}{n!} e^{-m} = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t},$$

$$n=0, 1, 2, 3, \dots; \quad \lambda > 0,$$

其中, λ 为核衰变事件的平均计数率, t 为测量的时间间隔。则 $m = \lambda t$ 为泊松分布的期望。泊松分布的方差为 $\sigma^2 = m$ 。当 m 的值比较大即泊松分布的期望比较大时,用高斯分布代替泊松分布。

MATLAB提供了一系列的函数用于生成随机序列,在此软件的工具箱中,提供了通用的随机数产生函数random和特定分布的随机数产生函数(以rnd结尾)。可以直接调用这些函数来获得所需的随机数。函数poissrnd(),功能:生成服从泊松分布的随机数。

4.2 相关函数估计

以自相关函数估计为例,分析相关函数估计法。

$$R(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n+m),$$

如果观察值的点数 N 为有限值,则 $R(m)$ 估计值的一种方法是

$$\hat{R}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_N(n)x_N(n+m).$$

由于 $x(n)$ 只有 N 个观察值,因此,对于每一个固定的延迟 m ,可以利用的数据只有 $N-1-|m|$ 个,且在 $0-N-1$ 的范围内, $x_N(n) = x(n)$,所以在实际计算 $\hat{R}(m)$ 时,上式变为

$$\hat{R}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x(n)x(n+m), \quad (6)$$

长度为 $2N-1$,它是以 $m=0$ 为偶对称的。

现在讨论 $\hat{R}(m)$ 对 $R(m)$ 估计的质量。

(1) 偏差

$$\text{bia}[\hat{R}(m)] = E\{\hat{R}(m)\} - R(m),$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } E\{\hat{R}(m)\} &= E\left\{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x(n)x(n+m)\right\} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} E\{x(n)x(n+m)\} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} R(m). \end{aligned}$$

$$\text{可得到 } E\{\hat{R}(m)\} = \frac{N-|m|}{N} R(m), \quad (7)$$

$$\text{所以偏差 } \text{bia}[\hat{R}(m)] = -\frac{|m|}{N} R(m). \quad (8)$$

分析(7),(8)式,可以看出: $\hat{R}(m)$ 是对 $R(m)$ 的渐进无偏估计;对于一个固定的 N ,只有当 $|m| \ll N$ 时, $\hat{R}(m)$ 的均值才接近于真值 $R(m)$;由式(7)可以看出, $\hat{R}(m)$ 的均值是真值 $R(m)$ 和一三角窗函数

的乘积。由于它对 $R(m)$ 的加权,致使 $\hat{R}(m)$ 产生了偏差。

(2) 方差

$$\begin{aligned} \text{var} [\hat{R}(m)] &= E\{[\hat{R}(m) - E\{\hat{R}(m)\}]^2\} \\ &= E\{\hat{R}^2(m)\} - [E\{\hat{R}(m)\}]^2, \end{aligned}$$

$$\text{其中 } [E\{\hat{R}(m)\}]^2 = \left[\frac{N-|m|}{N} R(m) \right]^2,$$

$$\begin{aligned} E\{\hat{R}^2(m)\} &= E\left\{ \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x(n)x(n+m) \times \right. \\ &\quad \left. \sum_{k=0}^{N-1-|m|} x(k)x(k+m) \right\} \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_n \sum_k E\{x(n)x(k) \times \\ &\quad x(n+m)x(k+m)\}, \end{aligned}$$

这里要计算随机信号 $x(n)$ 的四阶矩。假定 $x(n)$ 是零均值的高斯随机信号,则有

$$\begin{aligned} \text{var} [\hat{R}(m)] &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} \sum_{k=0}^{N-1-|m|} [R^2(n-k) + \\ &\quad R^2(m) + R(n-k-m)R(k-n-m)], \end{aligned}$$

令 $n-k=i$,可把上式的双求和变成单求和,即

$$\begin{aligned} \text{var} [\hat{R}(m)] &= \frac{1}{N} \sum_{i=-(N-1-|m|)}^{N-1-|m|} \left[1 - \frac{|m|+|i|}{N} \right] \times \\ &\quad [R^2(i) + R(i+m)R(i-m)], \end{aligned} \quad (9)$$

对固定的延迟 $|m|$, $\hat{R}(m)$ 是 $R(m)$ 渐近一致估计。

(3) 自相关函数的快速计算

利用(6)式计算 $\hat{R}(m)$ 时,如果 m 和 N 都比较大,则需要的乘法次数太多,因此应用受到了限制。这时,可以利用FFT来实现对 $\hat{R}(m)$ 的快速计算。

(6)式也可以写成

$$\hat{R}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_N(n)x_N(n+m).$$

对 $\hat{R}(m)$ 求傅里叶变换,得

$$\begin{aligned} \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} \hat{R}(m) e^{-j\omega m} \\ = \frac{1}{N} \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x_N(n)x_N(n+m) e^{-j\omega m} \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_N(n) \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} x_N(n+m) e^{-j\omega m},$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} \hat{R}(m) e^{-j\omega m} \\ = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{2N-1} x_{2N}(n) e^{j\omega n} \sum_{l=0}^{2N-1} x_{2N}(n) e^{-j\omega l} \\ = \frac{1}{N} |X_{2N}(e^{j\omega})|^2, \end{aligned}$$

式中 $|X_{2N}(e^{j\omega})|^2$ 是有限长信号 $x_{2N}(n)$ 的能量谱,除以 N 后即为功率谱。这说明, $\hat{R}(m)$ 和 $x_{2N}(n)$ 的功率谱是一对傅里叶变换。 $X_{2N}(e^{j\omega})$ 可用FFT计算。FFT计算自相关函数的一般步骤为:(1)对 $x_N(n)$ 补 N 个零,得 $x_{2N}(n)$,对 $x_{2N}(n)$ 做离散傅里叶变换(DFT)得到 $X_{2N}(k)$, $k=0, 1, \dots, 2N-1$;(2)求 $X_{2N}(k)$ 的幅平方,然后除以 N ,可以得到 $|X_{2N}(k)|^2/N$;(3)对 $|X_{2N}(k)|^2/N$ 做逆变换,得 $\hat{R}_0(m)$ 。

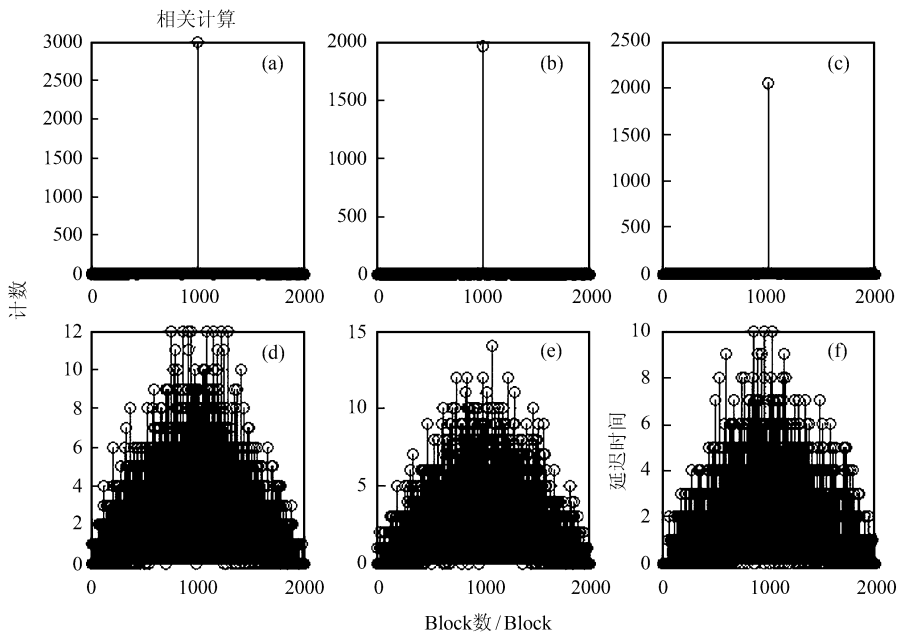
$\hat{R}_0(m)$ 并不简单地等于 $\hat{R}(m)$,而是等于将 $\hat{R}(m)$ 中 $-(N-1) \leq m < 0$ 的部分向右平移 $2N$ 点后形成的新序列。由DFT的理论可以道知, $\hat{R}(m)$ 和 $\hat{R}_0(m)$ 的功率谱是一样的^[9]。

5 ²⁵²Cf 源驱动噪声测量信号分析计算机模拟结果

用MATLAB提供的服从泊松分布的随机数(每个Block产生的平均脉冲数,源通道取3,探测器通道取2),模拟源通道和探测器通道的信号。利用MATLAB对模拟的核噪声随机序列做相关函数的快速计算。²⁵²Cf源驱动噪声测量信号分析时域计算机模拟结果如图4所示。

以脉冲形式,按照泊松分布公式,生成测试数据 X ,包含2 000个Block,每个Block长度为1 024。式中 m 是泊松分布的平均值,实际测试时 $m = \lambda \times t$, λ 为中子计数率 1×10^6 neutrons/s, t 是采样间隔1 ns。因此 $m = 1 \times 10^6 \times 1 \times 10^{-9} = 0.001$ 。

时域计算机模拟结果的分析工作做得还不太完善,还需进行深入的频谱分析,这将是下一步我们即将开展的工作。

图4 ^{252}Cf 源驱动噪声测量的时域模拟

(a) 通道自相关；(b) 通道自相关；(c) 通道自相关；(d) 通道互相关；(e) 通道互相关；(f) 通道互相关。

6 结论

总之，用单输入多输出系统描述 ^{252}Cf 源驱动噪声分析测量，可以得到测量参数与系统传递函数之间的关系。也描述了一些噪声测量参数与Rossi- α 测量的关系和测量参数的性质。探测器自相关相当于单个探测器Rossi- α 的测量，探测器之间的互相关相当于两个探测器Rossi- α 的测量。源-探测器互相关相当于随机脉冲中子测量。通过功率谱密度分析，能够获得频谱分析的参数。由这些参数可以“反演”如裂变堆内或裂变燃料的反应性等情况，因为裂变中子 (^{252}Cf 源)对裂变链 (^{235}U 系统)的依存关系就是各种频域和时域测量反应性的基础。而且信号的一些参数独立于探测器效率，不需要接近缓发中子临界的校准。因为测量参数与系统传递函数直接相关，它们对裂变系统的变化敏感。测量参数对裂变系统变化的高敏感性使得这种方法对检测过程很有吸引力。

参考文献 (References)

- [1] Luo Zhanglin, Luo Anren. Experimental Reactor Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1987, 119—147; 189—194; 208—224(in Chinese).
(罗璋琳, 罗安仁著. 实验反应堆物理. 北京: 原子能出版社, 1987, 119—147; 189—194; 208—224.)
- [2] Orndoff J D. Nucl Sci Eng, 1957, **2**: 450.
- [3] Mihalcz J T. Nucl Sci Eng, 1970, **53**: 393.
- [4] Mihalcz J T, Damiano B, Valentine T E, *et al.* Journal of Nuclear Materials Management, 1997, **25**(3): 64.
- [5] Chiles M M, Mihalcz J T, Fowler C E. IEEE Trans Nucl Sci, 1993, **40**: 816.
- [6] Mihalcz J T, Nucl Sci Eng, 1971, **46**: 147.
- [7] Mihalcz J T, King W T, Blakeman E D. Nucl Sci Eng, 1987, **95**: 1.
- [8] Mihalcz J T, Mullens J A, Mattingly J K. Nucl Instr and Meth, 2000, **450**: 531.
- [9] Hu Guangshu. Digital Signal Processing. Beijing: Tsinghua University Press, 2003, 496—517(in Chinese).
(胡广书. 数字信号处理. 北京: 清华大学出版社, 2003, 496—517.)

Signature Analysis and Time Domain Computer Simulation of ^{252}Cf Source-driven Noise Measurements*

PEI Hui-xia^{1, 1)}, WANG Yin-feng², WEI Biao³

(1 *Physics & Electronics Engineering, Zhoukou Normal University, Zhoukou 4660012, Henan, China;*

2 College of Mathematics & Physics, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

3 College of Opto-Electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Source-driven noise measurements are simultaneous Rossi- α and randomly pulsed neutron measurements that provide measured quantities that can be related to the subcritical neutron multiplication factor. A brief theory and characteristic description of ^{252}Cf source-driven noise measurements is given as well as a brief analysis and time domain computer simulation of source-driven noise measurement results.

Key words: source; noise measurement; computer simulation

* **Received date:** 26 Feb. 2008; **Revised date:** 4 Aug. 2008

* **Foundation item:** Chongqing City Natural Science Fund Project(2002-16)

1) E-mail: peihx1981@163.com