

多道脉冲分析器

张轩，复旦大学核科学与技术系

摘要：本实验测量了多道脉冲分析器的理想输出曲线、微分非线性性和积分非线性性。对于微分非线性性的测量，我们采用了滑移脉冲法。相比于原定使用 512 个滑移脉冲测量 512 道多道脉冲分析器的微分非线性性，我们特别使用了更加密集的 2048 个滑移脉冲进行了测量，发现测得的微分非线性性显著降低。同时我们详细的分析了滑移脉冲法的原理和误差情况，得出需要使用足够密集（脉冲数远大于有效道数）的滑移脉冲 DNL 测量值才可靠的结论。

关键词：多道脉冲分析器；ADC；积分非线性性；微分非线性性；滑移脉冲法

一、引言

多道脉冲分析器是在能谱测量中常用的仪器，用于测量入射射线的能量分布。本实验的主要目的是测量多道脉冲分析器的微分非线性性和积分非线性性，以评估其性能。

滑移脉冲法是一种便捷的测量 ADC 微分非线性性的方法，相比于对于每一道（一共有上百上千道）的阈值进行测量，这种方法非常方便快捷。我们分析了这种方法的原理和误差情况（见第2.3节和第5.4节），指出了这种方法的优缺点。

实验中，我们使用精密脉冲发生器产生一系列的脉冲幅度并且记录标定好的多道分析器显示的峰值和半高全宽，测量了多道分析器的理想输出曲线和积分非线性性。我们使用滑移脉冲法测量多道分析器的微分非线性性，我们分别使用的一周期内滑移脉冲的个数（这个数后面简称为**滑移脉冲数**或**脉冲数**）是 512 和 2048 的滑移脉冲测量了 512 道的多道分析器（EASY-MCA 多道分析器），后者测量到的微分非线性性更小且更加可靠。

二、实验原理

2.1 多道脉冲分析器简介

多道脉冲分析器的核心是一个具有一定精度的模数转换器 (ADC)。除此之外就是一些峰值提取的信号处理部分以及实现数据存储分析的计算机。多道脉冲分析器将入射波形的峰值输入到 ADC 中，将幅度转化为数字量。每一个数字量，都对应一个计数器，称为一个“道”，如图2所示，当入射幅度被转化为该数字量则计数加一。和 ADC 相连的计算机可以读取每个“道”的计数并得到一定精度的脉冲幅度分布数据。

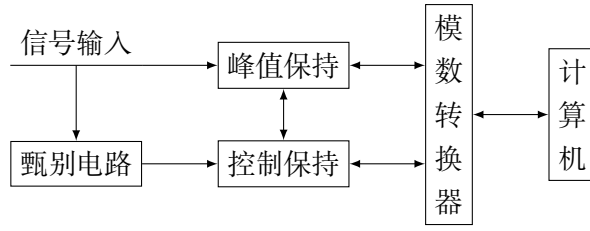


图 1 多道脉冲分析器原理框图

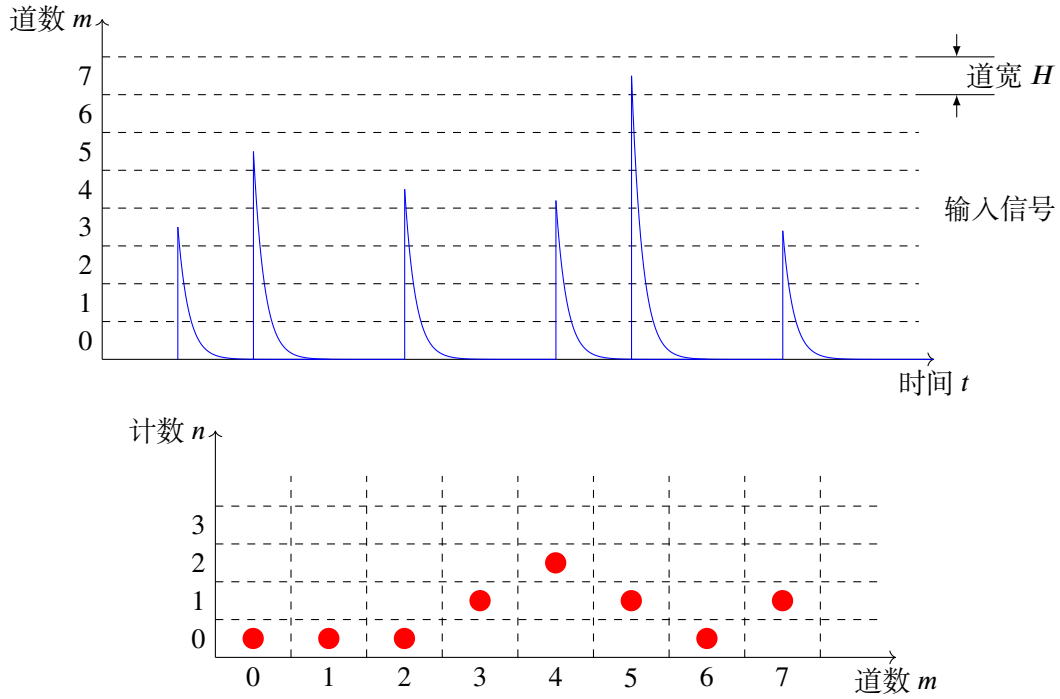


图 2 多道脉冲分析器工作示意图

2.2 多道脉冲分析器的微分非线性性和积分非线性性

多道脉冲的非线性项通过微分非线性性和积分非线性性来衡量，如图3所示
微分非线性通过道宽不一致性来衡量

$$\text{微分非线性性} = \frac{\max\{|h_i - \bar{h}|\}}{\bar{h}} \quad (1)$$

其中 \bar{h} 是平均道宽。

积分非线性性反映的是实际曲线和理想曲线的最大偏差，通常使用下面的式子衡量

$$\text{积分非线性性} = \frac{\max |\Delta A_i|}{\max |A_i|} = \frac{\max |\Delta m_i|}{\max |m_i|} \quad (2)$$

其中 A_i 是输入幅度， m_i 是输出的数字信号。

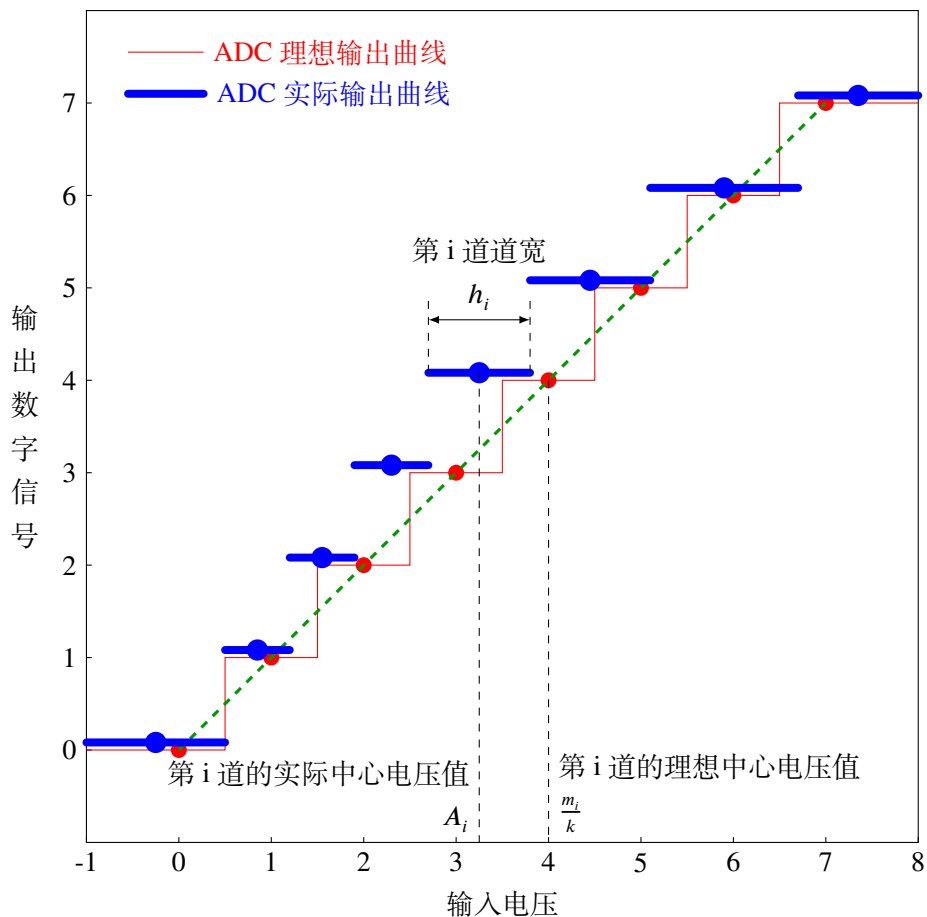


图 3 微分非线性性和积分非线性性

2.3 滑移法测量微分非线性性

本实验要测量多道脉冲分析器的微分非线性性，需要测量每一个道宽。理论上讲可以通过测量各道边界来测量，但这样比较麻烦，我们考虑利用滑移法来测量。

滑移法测量微分非线性性的思想是产生一个脉冲幅度均匀从 0 增长到 ADC 的最大幅度的脉冲序列，称为滑移脉冲序列，波形如图4所示，当然实际情况下应当采用更密集的阶梯，这只是一个示意图。

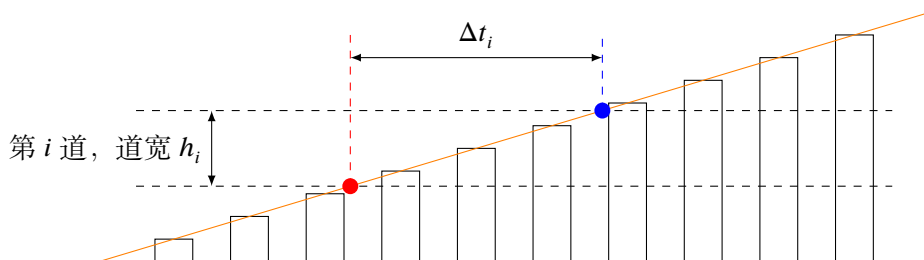


图 4 滑移脉冲序列示意图

当采用的阶梯足够密集时，道宽为 h_i 的道址所接收到的计数率就和道宽成正比。设

阶梯幅度随时间线性变化，系数为 k ，即 $U_{\text{step}} = kt$ 。则如图4所示，有

$$n_i = \frac{N_i}{T} = \frac{n \cdot \Delta t_i}{T} = \frac{n \cdot \frac{h_i}{k}}{T} = \frac{n}{kT} \cdot h_i \quad (3)$$

这里 N_i 是第 i 道的计数， n_i 是第 i 道的计数率， n 是总计数率。

这个式子表明在滑移脉冲输入的条件下第 i 道的计数率正比于道宽。若取固定的计数时间（必须为整数个滑移脉冲），则多道脉冲分析器测得的计数 N_i 本身正比于其道宽 h_i ，根据式(1)可知微分非线性性也可以如下计算

$$\text{微分非线性性} = \frac{\max\{|N_i - \bar{N}|\}}{\bar{N}} \quad (4)$$

三、实验装置

1. MSO2202 数字示波器 1 台
2. DG4102 脉冲发生器 1 台
3. EASY-MCA 多道分析器 1 台
4. 419 精密脉冲发生器 1 台
5. CAKE611 型放大器 1 台
6. 同轴高频信号线若干

四、实验过程

4.1 测量多道分析器的积分非线性性

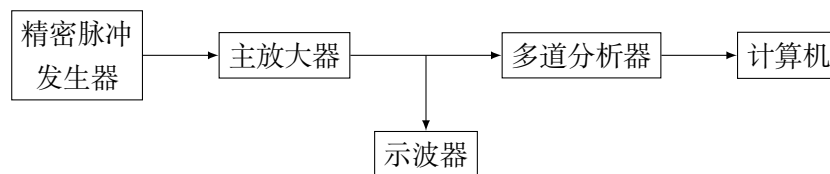


图 5 积分非线性性测量路图

Step 1: 按照图5连接好电路图；

Step 2: 将多道分析器定标，使得第 n 道对应能量为 $n \text{ keV}$ 以便测量；

Step 3: 利用精密脉冲发生器和线性放大器以及示波器产生一系列特定幅度的脉冲，将其输入到多道分析器中，对计数进行峰分析，记录峰值和半高全宽；

Step 4: 使用最小二乘法计算当前 ADC 的理想输出曲线，衡量积分非线性性。

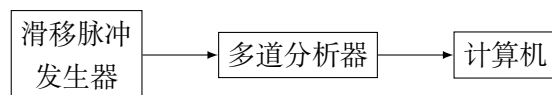


图 6 微分非线性性测量线路图

4.2 测量多道分析器的微分非线性性

- Step 1:** 利用脉冲发生器产生编辑好的滑移脉冲波形，设置周期为 10 Hz，幅度为 10 V，用示波器观察波形的正确性；
- Step 2:** 设置 EASY-MAC 的 Conversion Gain 为 512（设置道数位 512），Lower Level Disc 为 50，Upper Level Disc 设为 501；
- Step 3:** 按照图6接好线路，按下多道软件中 go 图标开始测量，直到每 Level Disc 为 501。道计数统计误差小于 2% 为止；
- Step 4:** 计算 50 ~ 501 道的积分计数，衡量微分非线性性。

五、实验结果和分析

5.1 多道分析器的工作状态的探索

在实验过程中，使用精密脉冲发生器不断产生幅度更大的脉冲，发现多道分析器的接收到的计数截止到 476 道，当幅度超过 476 道范围是，更高的道址不会产生计数，尽管 Upper Level Disc 已经设置到高于 476。这是在实验前没有预料到的，所以在后续的微分非线性性中，我们集中处理道数为 50 ~ 450 范围内的非线性性。

5.2 ADC 理想输出曲线和积分非线性性的测量

我们使用精密脉冲发生器、线性放大器以及示波器产生了一系列峰值的脉冲，输入到多道脉冲分析器中，使用定标好的（能量数值和道数一致）多道读取测量到的道址和半高全宽，绘制道址-幅度曲线并进行带误差的线性拟合。拟合的结果如图所示

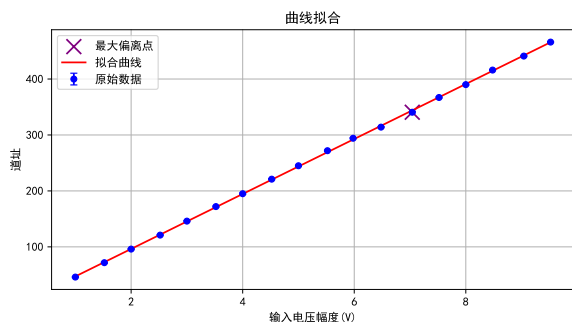


图 7 道址-幅度曲线

表 1 幅度-道址拟合

拟合参数	拟合结果
斜率 k/V^{-1}	49.13 ± 0.14
截距 b	-2.0 ± 0.8
决定系数 R^2	0.99986

将线性拟合的曲线作为 ADC 的理想输出曲线，则 ADC 的积分非线性性就是最大残差和最大道址 476 的比值。最大残差发生在输入幅度为 7.04 V 时， $\max \Delta N = 3.25$ ，积分非线性性为 0.683%。

5.3 微分非线性性的测量

如之前第5.1节所说，我们测量的是 50 ~ 450 道（包括两端）的微分非线性性。

采用滑移脉冲法测量 ADC 的非线性性。当采用滑移脉冲数（一个阶梯脉冲中的脉冲数目）为 512 时，我们测量了两次，结果其中一次的结果如图8所示

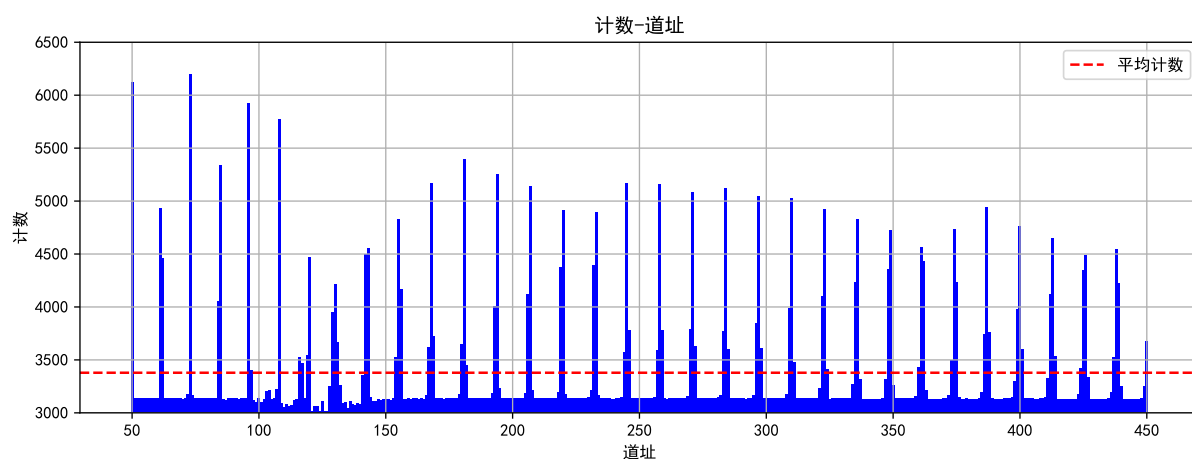


图 8 512 滑移脉冲数测量 DNL

计算出两次测量的微分非线性性为：82.2%, 83.4%。

此后我又使用滑移脉冲数为 2048 的滑移脉冲测量了多道分析器的微分非线性性，同样进行了两次测量，结果其中一次的结果如图9所示

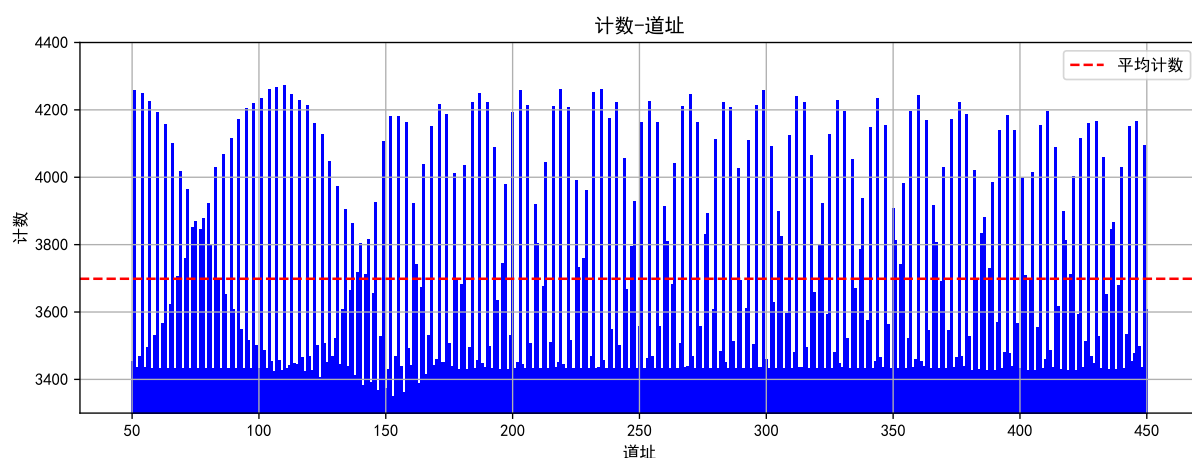


图 9 2048 滑移脉冲数测量 DNL

计算出两次测量的微分非线性性为：15.5%, 15.5%。

不难发现采用滑移脉冲数为 512 时，图中存在周期出现的尖峰，且峰值远高于均值，导致测得的微分非线性性非常大。当采用更高的滑移脉冲数 2048 时，峰变得更钝，微分非线性性变小。相关原因将在下一节 5.4 进行讨论。

5.4 使用滑移脉冲测量理想 ADC 的微分非线性性的分析

关于滑移脉冲测量 ADC 的微分非线性性。当滑移脉冲数仅仅略大于有效道数时，根据鸽笼原理，不难想象出多出来的少部分脉冲将零星的分布在少数几个有效道数中，使得大部分道数在一周期内的计数是 1 而这少部分的计数是 2，即便 ADC 具有绝对理想的微分非线性性，这也会使得微分非线性性测量结果非常大。

我们前面使用滑移脉冲数为 512 的滑移脉冲测量实际只有 476 个有效道的多道分析器（多道分析器的核心就是 ADC）就是这种情况，同时也不难发现在使用更加密集的脉冲数 2048 后，测得的微分非线性性得到改善。

这一定程度上和脉冲数和 ADC 的道数的互质性有关，如果进行系统性的定量讨论，将会涉及到繁杂的数论而且对于实际应用的意义不大，因为这才只涉及道理想 ADC 的情况。

所以我使用计算机进一步探讨这个过程，我模拟了使用不同的滑移脉冲数测量理想 8 道 ADC 中间 4 道的微分非线性性，得到的结果如下图 10 所示。相关代码我放在了 Github 上，这是其超链接：<https://github.com/Xuanyiyiren/Fudan-TCPH-fandamantal-experement/tree/main/Experement8>。有兴趣的同学可以进一步探索更多道 ADC 的结果，此程序的结果可以作为测量微分非线性性应当采取的滑移脉冲数的参考值。

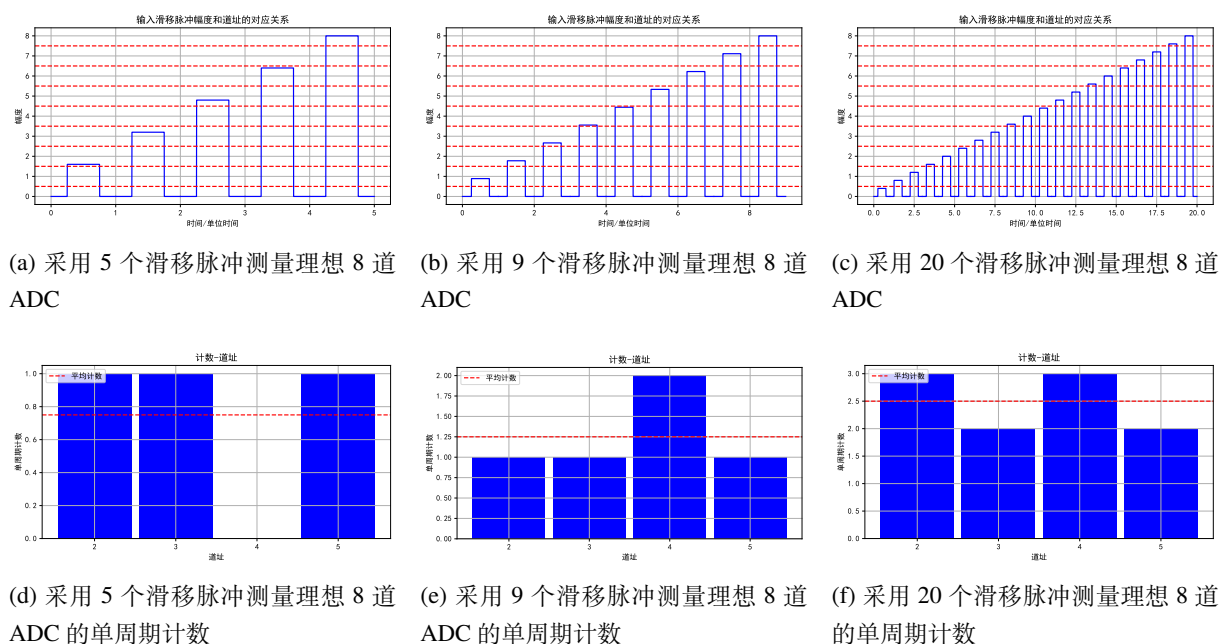


图 10 不同的滑移脉冲数测量理想 8 道 ADC 的微分非线性性

采用 5、9、20 个滑移脉冲测量得到的微分非线性性如表 2 所示

表 2 不同滑移脉冲数测量微分非线性性

	5 个滑移脉冲	9 个滑移脉冲	20 个滑移脉冲
所测微分非线性性	100%	60%	20%

看上去测量的结果随着脉冲数的增加逐渐趋近于理想值。
如果采用 8 的倍数进行测量，将会得到 0 的微分非线性性，如图11所示

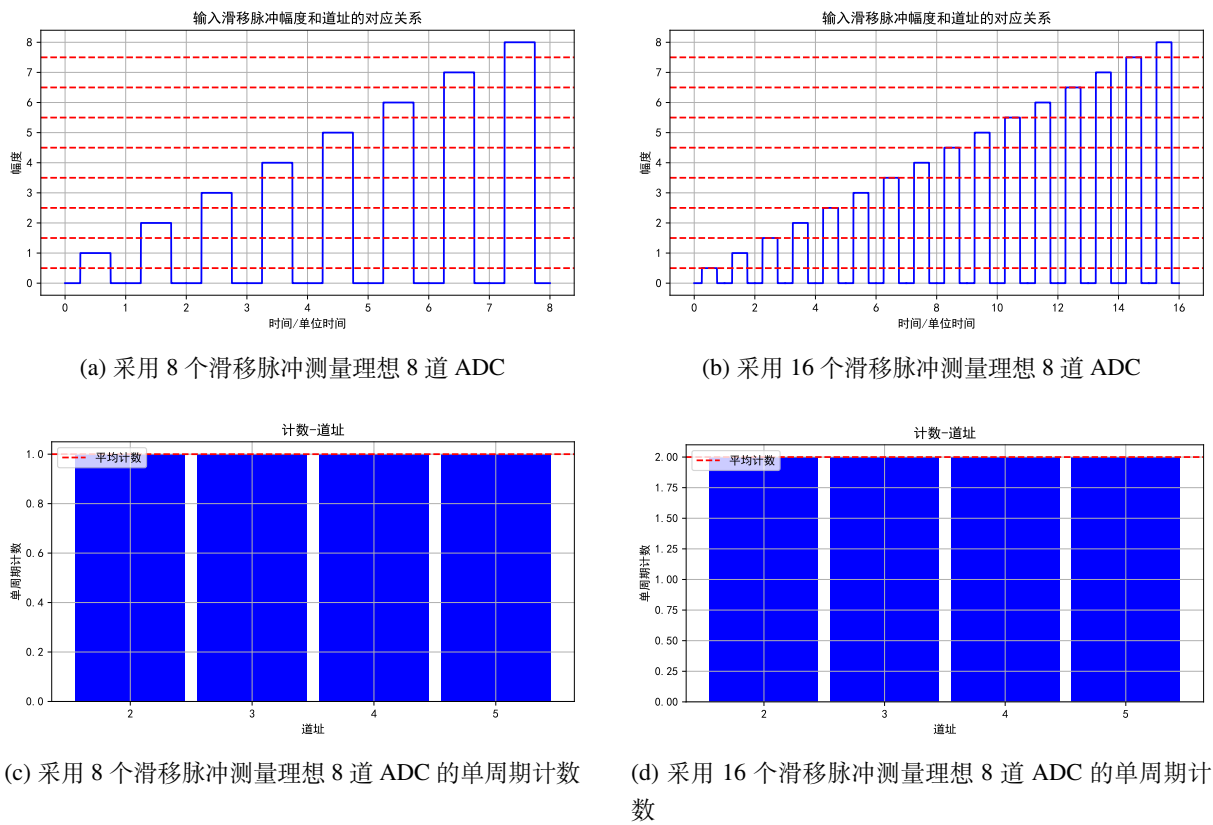


图 11 8 倍数个滑移脉冲数测量理想 8 道 ADC 的微分非线性性

这意味着如果在脉冲数接近总道数的情况下，测量的微分非线性性的误差非常大。某些脉冲数可能给出非常接近理想 ADC 的微分非线性性，某些脉冲数可能会将理想 ADC 的微分非线性性测得一个非常大的数。正如我在第2.3中提到的，只有到滑移脉冲幅度分布远比道数阈值分布更加密集的情况下，测得的计数才能很好的反应道宽。

下面图12是脉冲数从 5 到 200 条件下模拟测得 DNL 的结果
这可以印证我们上面的说法，同时我们发现随着脉冲数的增加，测量的结果才逐渐趋于真实值。但同时也发现，即便是对仅仅 8 道理想 ADC 的微分非线性性的测量，要保证测量的 DNL 在 10% 以下，所需要的脉冲数也接近 50。采用接近 200 的脉冲数所测得 DNL 接近 3%。

当然这只是理想 ADC 的测量情况，对于非理想 ADC，测量结果将更加复杂。我的建议是尽可能采用足够密集的滑移脉冲。但这样可能会扫描时间过长，因为你需要保证

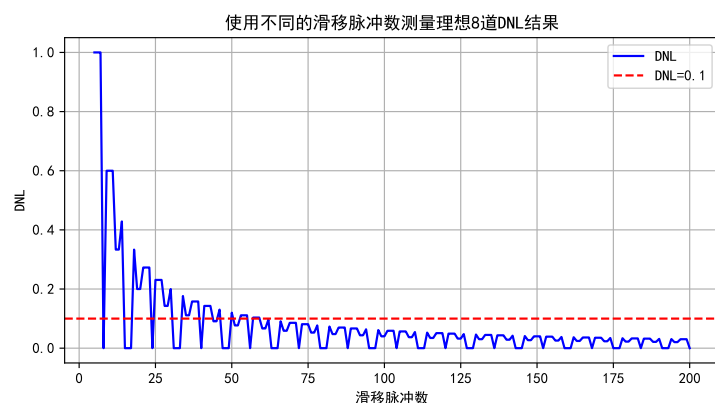


图 12 512 滑移脉冲数测量 DNL

每一个脉冲占有的时间是固定的，且至少要大于 ADC 的死时间。或许滑移脉冲法本来就是一种较为便捷但精度较低的方法，如果需要足够高的 DNL 测量精度，可能更好的方法是使用精密脉冲发生器和示波器取捕捉每一个阈值。

六、实验结论

1. 利用精密脉冲发生器标定了本实验台多道分析器的理想曲线 $N = kA + d$ ，其中 $k = 49.13 \pm 0.14$, $d = -2.0 \pm 0.8$ ；
2. 利用精密脉冲发生器测得本实验台多道分析器的积分非线性为 0.683%；
3. 使用 2048 道滑移脉冲测得本实验台多道分析器的微分非线性为 15.5%，相较于使用 512 道滑移脉冲的测量结果 82.2% 更加精确；
4. 分析了滑移脉冲数对理想 ADC 微分非线性性的测量值的影响，当滑移脉冲数接近 ADC 有效道数时，测量结果波动非常大且不准确。当滑移脉冲数远大于 ADC 有效道数时，测量结果更加接近理想值 0%。