

多通道数据采集(DAQ)系统的性能优化： 关于输入建立时间的不为人知的故事

作者：Joseph Leandro Peje

共享



摘要

在多通道多路复用数据采集系统中，增加每个ADC的通道数量可改善系统的整体成本、面积和效率。现代逐次逼近寄存器模数转换器(SAR ADC)具有高吞吐量和高效能，使得系统设计人员能够实现比以往更高的通道密度。本文将说明多路复用器输入端的建立瞬变（由多路复用器输出端的大尺度开关瞬变引起）导致需要较长采集时间，使得多通道数据采集系统的整体吞吐量显著降低。然后，本文将着重阐述使输入建立时间最小化以及提高数据吞吐量和系统效率所需的设计权衡。

什么是多通道DAQ？如何衡量多通道DAQ的性能？

多通道数据采集(DAQ)系统是一个与多路输入（通常是传感器）接口的完整信号链子系统，其主要功能是将输入端的模拟信号转换为处理单元可以理解的数字数据。多通道DAQ系统的主要组成部分有模拟前端子系统（缓冲器、开关元件和信号调理模块）、模数转换器(ADC)及数字接口。对于高速精密转换器，开关元件（通常是多路复用器）放置在ADC驱动器和转换器本身之前，以利用现代

ADC的先进性能。SAR ADC兼具高速度和高精度性能，是这些应用最常用的ADC类型。

用于工业和医疗应用的高通道密度精密DAQ系统致力于将最多的通道压缩到尽可能小的区域中。通过如下手段，多路复用DAQ系统一般可以实现高密度、高吞吐量和良好的能效：

1. 使用高速精密SAR ADC
2. 每个通道使用最低采样速率
3. 最大程度提高SAR ADC转换器利用率，其中：

$$\text{SAR ADC 转换器利用率} = \frac{n \times \text{每通道采样速率}}{\text{SAR ADC 采样速率}} \times 100\% \quad (1)$$

n为通道数。对每个转换器而言，多通道数据采集系统的总吞吐量由下式给出：

$$\text{总吞吐量} = (\text{SAR ADC 转换器利用率} \times \text{SAR ADC 采样速率}) \times \text{分辨率} \quad (2)$$

这表明多通道DAQ系统的总吞吐量不仅取决于SAR ADC的速度和分辨率，还取决于此转换器的利用情况。

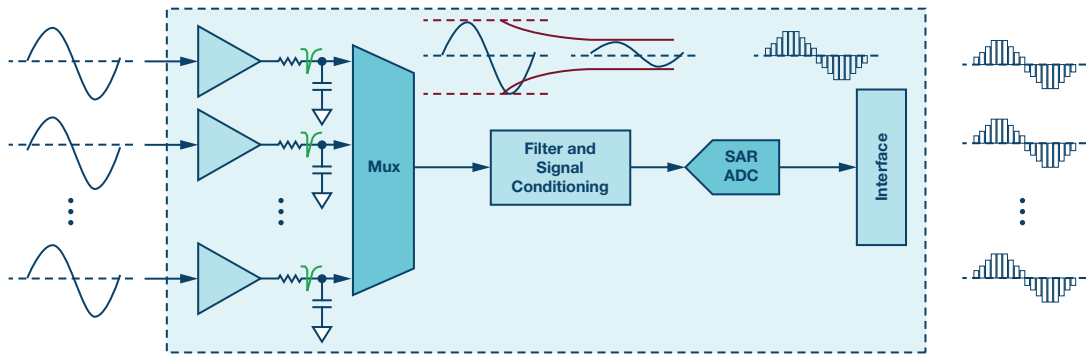


图1. 典型的基于SAR ADC的多路复用数据采集系统框图

延迟如何影响多通道DAQ系统的性能?

在有建立延迟的情况下，ADC的实际采样和转换周期会增加一项 t_d ，导致转换器的实际最大采样速率由下式给出：

$$SR_{ADC, actual, max} = \frac{1 \text{ 样本}}{T_{ADC} + t_d} \quad (3)$$

其中 T_{ADC} 是ADC每个样本的采样周期（大多数ADC数据手册通常都会提供，更常见的形式是SARADC采样速率的倒数，以“秒/样本”为单位）。对于非零延迟 t_d ，多通道DAQ系统的实际最大采样速率总是小于转换器采样速率，导致转换器利用率始终低于100%。由此可以明白，采样和转换周期上增加的任何延迟都会降低转换器的利用率。当与前面关于总吞吐量的表达式联系起来时，多通道DAQ可以容纳的最大通道数量就会减少。总之，任何建立延迟都会降低多通道DAQ系统的通道密度和/或总吞吐量。

什么是多路复用器输入切换毛刺和输入建立时间?

当多路复用器从一路输入切换到另一路输入时，输出仍然有前一输入通道的记忆，其表现形式为多路复用器的输出负载电容和寄生漏极电容中存储的电荷。这对于高容性负载（例如ADC驱动器和ADC本身）更为明显，因为这些存储的电荷没有低阻抗路径可以走。甚至可以说这些电荷被困住了，原因是输出为容性，并且现代多路复用器采用先开后合(BBM)机制，故多路复用器具有高阻抗。只有切换到下一路输入，这些电荷才能被释放电。

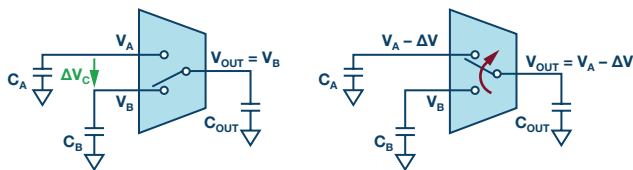


图2. 切换前状态 (左), 切换后, 发生电荷共享, 迅速引起电压下降 ΔV (右)

切换后，输入电容 C_A 将并联到输出电容 C_{OUT} 。然而， C_A 和 C_{OUT} 最初可能处于不同的电位，这将导致 C_A 和 C_{OUT} 之间发生电荷共享。对于超高带宽多路复用器，电荷共享几乎立即发生，导致多路复用器输入端出现高频毛刺。此毛刺的幅度 ΔV 由下式给出：

$$\Delta V = \Delta V_C \left(\frac{1}{\frac{C_A}{C_{OUT}} + 1} \right) \quad (4)$$

其中 ΔV_C 是切换之前电容电压的差值。多路复用器输入侧发生的瞬态毛刺现象就是通常所说的反冲，其对于具有高容性负载（例如ADC、容性DAC和采样电路等）的开关应用更为普遍。这个话题在MT-088中已做简要说明。转换器要产生有效数据，毛刺必须稳定在输出的1 LSB以内，而输入稳定在1 LSB以内（并保持在该范围内！）所需的时间就是输入建立时间(t_s)。 t_s 是前面描述的延迟 t_d 的组成部分，它对此项的贡献可能是最大的。

当ADC不像现在这样快时，这些毛刺及相应的输入建立时间微不足道，可以忽略不计。但是，随着ADC速度的提高，转换器采样周期变得越来越短，接近输入建立时间的量级。如前所述，当ADC周期 T_{ADC} 等于输入建立时间 t_s （事实上是 t_d ）时，转换器利用率大大降低至50%。这意味着我们只使用了转换器的一半能力！需要重申输入建立时间的重要性，它应与精密转换器的当前技术同步发展，为提高多通道DAQ系统的性能铺平道路。

如何最大程度缩短输入建立时间?

为使开关毛刺最小化，通常在缓冲放大器和多路复用器之间使用一个RC滤波器（参见CN-0292），称之为缓冲器网络。图3显示了一个双通道多路复用模拟前端子系统的信号链子系统及其相应的开关时序图。

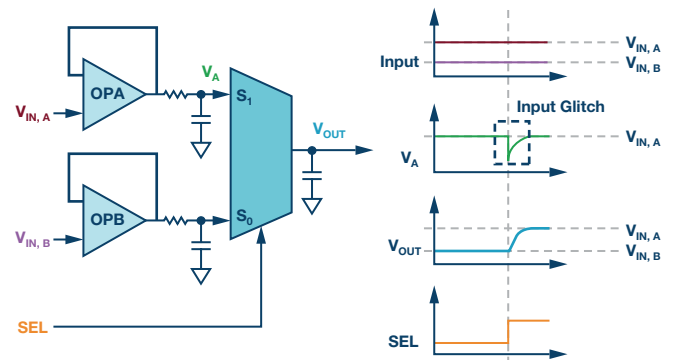


图3. 多通道DAQ系统的双通道多路复用模拟前端子系统及相应的时序图

缓冲器RC作为主导极点，假设多路复用器相对于放大器和缓冲器RC具有非常高的带宽，那么输入毛刺和建立瞬变可近似为具有一阶（指数）响应。为了进一步分析输入毛刺，图4详细显示了输入毛刺瞬态响应。

对于一阶假设，误差 V_{ERROR} 的表达式是一个关于时间的递减指数函数。 V_{ERROR} 的初始值（切换时的值）为毛刺幅度 ΔV ，其将以缓冲器RC值决定的速率衰减。 V_{ERROR} 稳定在1 LSB以内所需的时间被定义为输入建立时间。

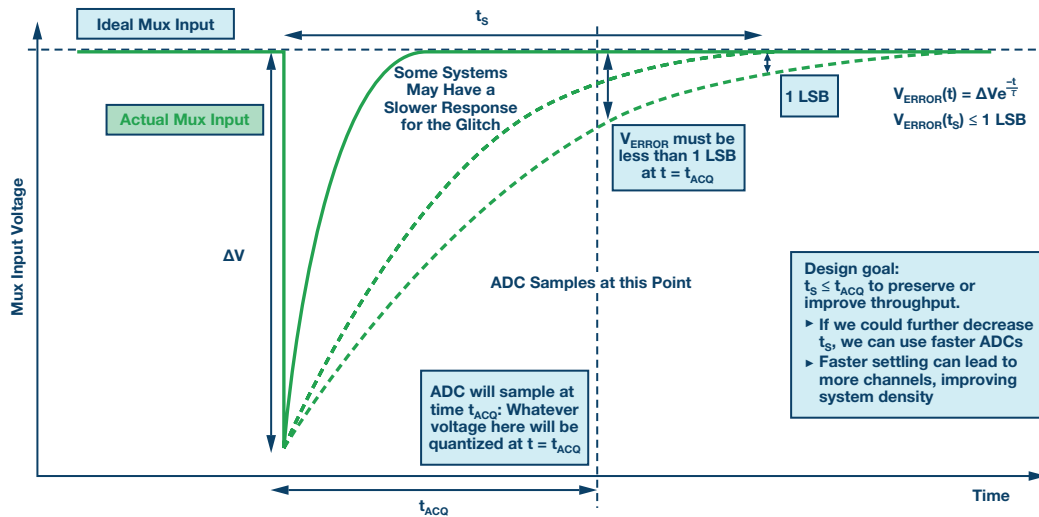


图4. 分析切换期间的多路复用器输入毛刺: 时序定义和设计目标

另一方面, 转换器以周期 t_{ACQ} 采样(也称为采集时间)。在 t_{ACQ} 过去后的ADC转换阶段, 转换器将量化任何可用的采样数据。如果 V_{ERROR} 衰减速度过慢, 导致其未稳定在某一值(1 LSB到几个LSB)以内, 就会产生问题。这将导致当前样本被前一模拟输入破坏, 引起ADC通道之间的串扰。考虑到输入建立时间, 必须确保输入建立时间小于转换器采集时间, 以使误差最小。而且, 进一步减小 t_s 还为使用更快转换器以提高系统总吞吐量和密度提供了机会。

利用我们的数学技能, 当 ΔV_c 为满量程输入范围且 V_{ERROR} 达到至少1 LSB(多路复用器输出在目标电平的1 LSB以内)时, 可以推出最差情况下的最快输入建立时间表表达式。多通道DAQ系统设计人员将拥有两个设计抓手: 缓冲器时间常数和 C_A/C_{OUT} 比率, 从而得出输入建立时间的表达式:

$$t_s \left(\tau, \frac{C_A}{C_{OUT}} \right) = \tau \times \eta \left(\frac{C_A}{C_{OUT}} \right) \quad (5)$$

$$\eta \left(\frac{C_A}{C_{OUT}} \right) = -\ln \left[\frac{LSB}{\Delta V_C} \times \left(\frac{C_A}{C_{OUT}} + 1 \right) \right]$$

这里可以看出, 输入建立时间是缓冲器时间常数 τ 和 V_{ERROR} 稳定在1 LSB以内所需的时间常数数量 η 的线性函数。减少输入建立时间的最直接方法是使用时间常数较小的缓冲器网络, 这很有意义, 因为较快的(高带宽)缓冲器网络会降低时间常数。然而, 这种方法将带来一组不同的涉及噪声和负载的权衡。另一方面, η 项最小化也可以达成类似的结果。

η 是缓冲器电容(C_A)与输出电容(C_{OUT})之比的函数。如果1 LSB等于满量程输入范围除以2的 $N-1$ 次方(N 为位数), 并且最差情况下 ΔV_c 等于满量程输入范围, 则该表达式可以进一步简化。

$$\eta \left(\frac{C_A}{C_{OUT}} \right) = -\ln \left[\frac{1}{2^{N-1}} \times \left(\frac{C_A}{C_{OUT}} + 1 \right) \right] \quad (6)$$

公式6可能不那么直观, 很难可视化, 所以仅利用10位、14位、18位和20位分辨率的半对数图来说明可能更好, 如图5所示。

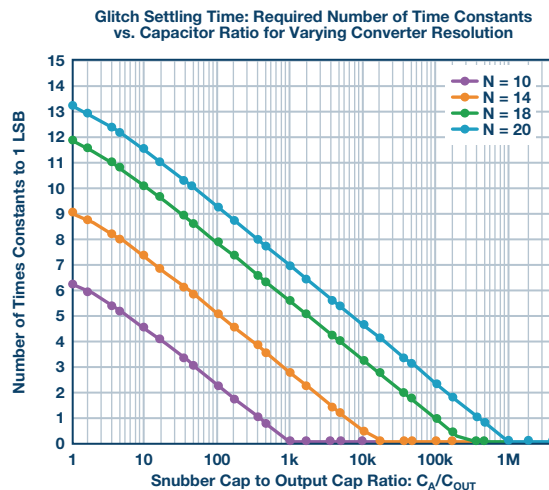


图5. 建立至1 LSB所需时间常数的图形

可以看出, C_A/C_{OUT} 值越高, 则建立时间越短; 电容比非常高时, 建立时间甚至接近0。 C_{OUT} 实质上是多路复用器的漏极电容和后续各级的输入电容, 因此只有 C_A 保持比较灵活的自由度。对于10位分辨率, 要使建立时间为0, C_A 须比 C_{OUT} 大至少1000倍; 对于20位系统, 至少要比 C_{OUT} 大1,000,000倍! 举例来说, 对于10位和20位系统, 为使建立时间为0, 100 pF的典型负载分别需要100 nF和100 μ F的缓冲器电容。

总之，输入建立时间最小化可以通过两种方法实现：

1. 对缓冲器网络使用高带宽
2. 相对于 C_{OUT} ，使用较高的 C_A 值。

高带宽和大缓冲器电容可最大限度地减少输入建立时间，所以使用最高带宽和最大电容就行了

非也！必须考虑RC负载效应和放大器的驱动能力！为了研究缓冲器网络对缓冲放大器的负载影响，应在频域分析模拟前端子系统。

由于我们将输入毛刺建立在一阶响应的思想上，所以缓冲器网络极点应该就是最主要的贡献者。换句话说，缓冲器带宽应该小于缓冲放大器和多路复用器的带宽，以避免多极点交互，确保一阶近似成立。

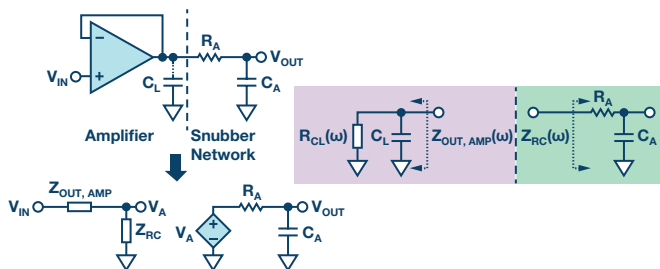


图6. 缓冲和缓冲器等效电路(左)与放大器和缓冲器网络的等效阻抗(右)

典型缓冲架构由缓冲($G = 1$)配置的精密放大器与缓冲器网络级联组成。在频域中分析，此子系统的输出取决于缓冲器输入阻抗与缓冲器输入阻抗和放大器闭环输出阻抗之和的比率。检查可知，为避免负载效应，缓冲器输入阻抗应该大于放大器闭环阻抗，如公式7所示。

$$\begin{aligned} Z_{RC} \gg Z_{OUT,AMP} \\ \frac{j\omega R_A C_A + 1}{j\omega C_A} \gg \frac{R_{CL}}{j\omega R_{CL} C_L + 1} \end{aligned} \quad (7)$$

也就是说，为避免缓冲器网络成为缓冲放大器的负载，我们应该：

1. 增大缓冲器时间常数 $R_A C_A$ ，以有效降低带宽
2. 使用较小缓冲器电容 C_A
3. 选择闭环输出阻抗非常低的放大器

前两个选项使我们清楚地了解到负载效应和输入建立时间之间的取舍。这限制了我们可以使用的缓冲器带宽和电容的大小。第三个选项引入了一个性能参数，选择适当的精密放大器时应予以考虑。还应考虑稳定性和驱动能力。

图7显示，对于具有足够带宽的精密放大器（例如-3 dB闭环带宽约为970 kHz的ADA4096-2），结果与目前进行的分析一致，但少数波形除外。对于10 kHz的缓冲器带宽，最大 C_A 产生最快的输入建立时间。而对于200 kHz的缓冲器带宽，增大 C_A 仍然会加快建立时间，直至发生负载效应。从结果中看到的欠阻尼响应应具有极小的毛刺幅度，但建立时间比较小 C_A 所产生的响应要长，尽管后者的毛刺幅度较高。这凸显了仔细研究缓冲器如何加载放大器的重要性，在为系统选择器件时务必考虑这一点。

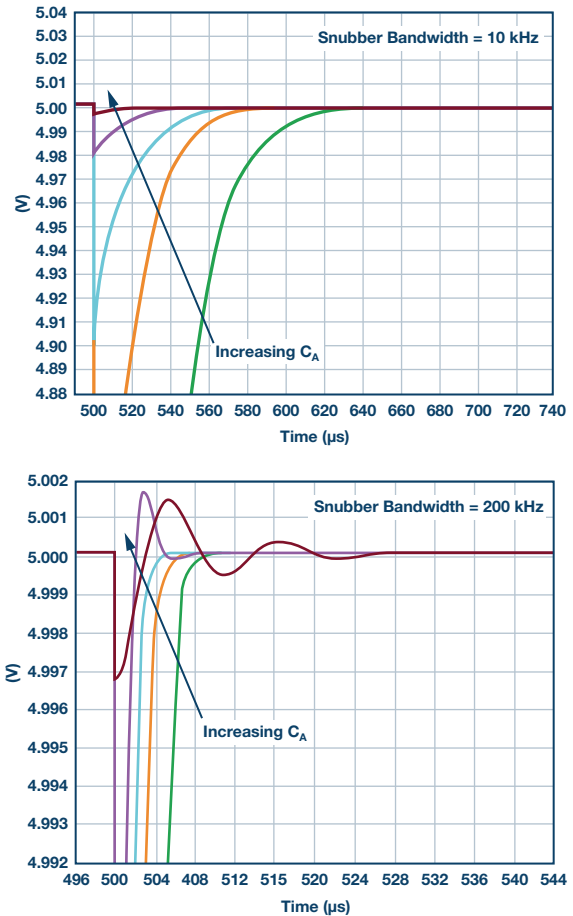


图7. 针对10 kHz(上方)和200 kHz(下方)缓冲器带宽的多路复用器输入, ADA4096-2放大器模型

如前所述，需要注意的一个放大器参数是闭环输出阻抗。运算放大器的闭环阻抗通常与其开环增益 A_v 成反比。我们还希望缓冲器网络具有高带宽以使建立时间最短，因此要求放大器的-3 dB带宽甚至大于缓冲器带宽。除了较低的噪声、失调和失调漂移外，最适合用于多路复用DAQ系统以实现最小输入建立时间的精密放大器还有两个优先特性：1)具有高带宽，2)具有非常低的闭环阻抗。然而，这些优势的得来并非没有代价，而代价的表现形式就是功耗。例如，我们可以查看图8所示的ADA4096-2和ADA4522-2的闭环阻抗。

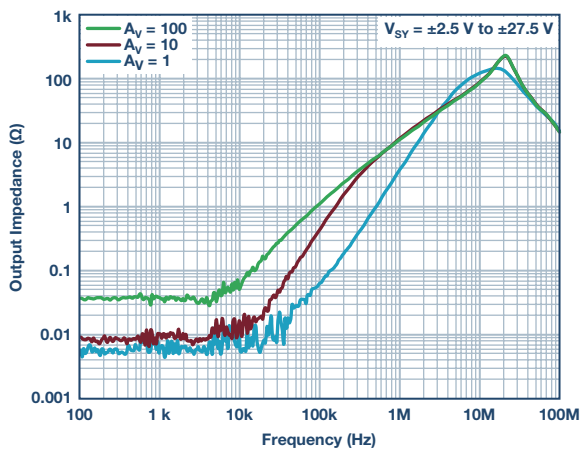


图8a. ADA4522-2数据手册中的闭环阻抗图

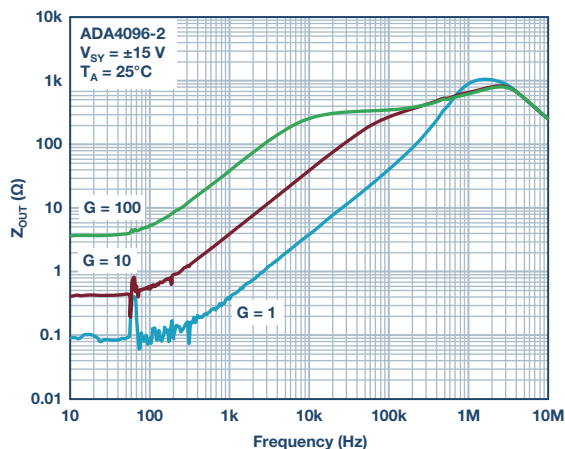


图8b. ADA4096-2数据手册中的闭环阻抗图

考虑数据手册中的闭环输出阻抗图，以及ADA4522-2的-3 dB闭环带宽为6 MHz（标称值），显然可知它是更适合该应用的驱动器。但当功耗优先时，ADA4096-2的每个放大器的电源电流为60 μA （典型值），比ADA4522-2的每放大器830 μA （典型值）更具吸引力。尽管如此，这两款精密放大器都可以使用，最终取决于应用真正需要达成的目标。

结语

我们怎么做最好？

为了最大限度地提高多通道DAQ系统的密度和吞吐量，输入建立时间应小于或等于ADC采集时间。任何额外的延迟都会降低多通道DAQ系统的性能。为使输入建立时间最小化，需要提高缓冲器网络的带宽和电容，不过选择元件值时必须小心，避免频域中发生负载效应。最后，选择最合适精密放大器需要权衡功耗、闭环输出阻抗和-3 dB带宽，按照应用的真正需求确定其优先地位。

参考文献

Corrigan, T. *应用笔记，如何计算多路复用器的建立时间和采样速率*。ADI公司，2009年。

互动式设计工具：模拟开关建立时间计算器。ADI公司。

MT-088, *模拟开关和多路复用器基本知识*。ADI公司，2009年。

致谢

Dan Burton、Vicky Wong、Peter Ohlon、Eric Carty、Rob Kiely、May Porley、Jess Espiritu、Jof Santillan、Patrice Legaspi、Peter Hurrell和Sherwin Almazan。

Joseph Leandro Peje [josephleandro.peje@analog.com]拥有菲律宾大学（位于菲律宾奎松市迪里曼）计算机工程学士学位，并正在同一所大学完成电气工程硕士学位，专攻微电子学。他目前是ADI公司模拟IC设计工程师，在菲律宾垂亚斯将军城工作，专注于精密放大器、模拟和混合信号系统验证。



Joseph Leandro Peje