

Rahul Kulkarni and Michael Saul

引言

数字控制环路是一种闭环控制系统，它使用数字信号和算法来调节实验室仪器（例如电源、源测量单元和电子负载）的输出。仪器中数字控制环路的主要目标是，在负载条件或输入电压发生变化时保持稳定的输出电压或电流。可以根据负载调整控制算法，尽可能缩短仪器输出的稳定时间。

数字控制环路

仪器中的典型数字控制环路包括以下元件，如图 1 中所示：

1. 测量单元：该元件测量仪器的输出电压和/或电流，并将测量值转换为可由控制器处理的数字信号。
2. 控制器：控制器接收仪器输出的数字测量结果，并计算误差信号，即测得的输出与参考信号之间的差异。然后，由控制算法对误差信号进行处理，以便确定需要应用于仪器的控制输入。
3. 控制算法：该元件处理错误信号，以便确定应用于仪器的控制输入。该控制算法可以基于简单的比例积分微分 (PID) 控制器，或更复杂的控制算法（如线性或非线性控制器）。
4. 数模转换器 (DAC)：DAC 负责将数字控制信号转换为可应用于仪器的模拟信号。

在数字控制环路中，仪器的输出被反馈回测量单元，而控制输入应用于仪器，来校正与所需输出的任何偏差。这种闭环配置允许仪器持续调节输出，来保持稳定的电压或电流，尽管负载条件或输入电压会发生变化。

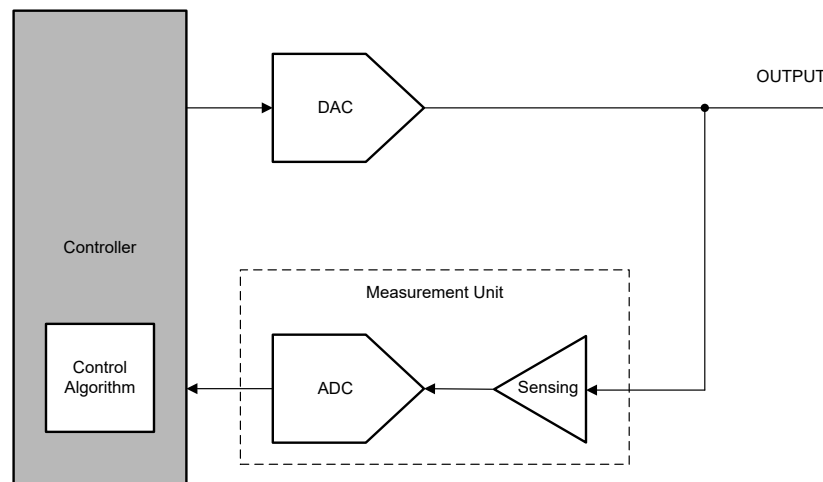


图 1. 数字控制环路方框图

稳定时间或响应时间取决于控制算法调整 DAC 输入来补偿输出电压变化的速度。调整输出电压的总延迟包括以下几部分：

1. 测量单元测量输出信号所需的时间
2. 控制算法为 DAC 生成新设置所需的时间
3. DAC 输出稳定至所需精度所需的时间

低延迟 ADC（模数转换器）用于数字控制环路，以便准确快速地测量系统输出信号。通过将测得的模拟信号高速转换为数字值，ADC 有助于尽可能减少输入信号与控制器响应之间的延迟。这在需要快速准确检测的应用中至关

重要，例如高速数据通信系统或机械系统的精密控制。低延迟 ADC 允许系统快速准确地响应输入信号的变化，从而有助于提高控制环路性能。

基于逐次逼近寄存器 (SAR) 架构的 ADC 用于在测量单元中实现低延迟。[ADS9218](#) 是一款 18 位 10-MSPS ADC，可将模拟信号转换为以 100ns 为单位的数值。控制器必须从 ADC 读取数值，此通信会增加 100ns 的时间。控制器可以在 200ns 内从基于 [ADS9218](#) 的测量单元获取一个数值，这个数值中包含模数转换和通信所需的时间。

快速稳定 DAC 通常用于数字控制环路，来尽可能缩短稳定时间，并实现更精确的控制响应。通过将数字控制信号快速转换为模拟输出信号，DAC 有助于减少控制输入和控制器输出响应之间的延迟，使控制器能够更快地响应目标输出电压的变化和来自测量单元的反馈。

测量单元的精度会影响仪器输出的精度。测量精度取决于测量单元中误差的热漂移和工作温度范围。测量中的偏移和增益误差可在仪器加电后使用校准电路进行校准，以便提高精度。[ADS9218](#) 的 18 位分辨率可实现高精度，如[表 1](#) 中所示。

表 1. [ADS9218](#) 在各种工作条件下的测量精度

条件	INL (ppm)	偏移量误差 (ppm)	增益误差 (ppm)	TUE (ppm)	精度
25°C 时为 TUE	3.81	7.63	1	8.58	0.0009%
校准后 25°C 时的 TUE	3.81	0	0	3.81	0.0003%
校准后 25°C $\pm$ 5°C 时的 TUE	3.81	5	5	8.03	0.0008%
校准后 25°C $\pm$ 25°C 时的 TUE	3.81	25	25	35.56	0.0036%

仪器的输出电压可能会根据外部负载快速变化。因此，测量单元必须具有宽带宽，才能准确捕获快速变化的信号。测量单元的采样率和模拟输入带宽需要足够高，才能避免欠采样或衰减信号，这些情况可能导致测量中出现明显误差。[ADS9218](#) 具有 90MHz 模拟输入带宽，能够以低失真捕获快速变化的瞬态。[图 2](#) 中的电路展示了一个高性能宽带宽电路，该电路使用 [THS4541](#) 和 [ADS9218](#) 同步测量两个输入。当控制算法同时需要电压和电流值时，需要同时测量两个输入。

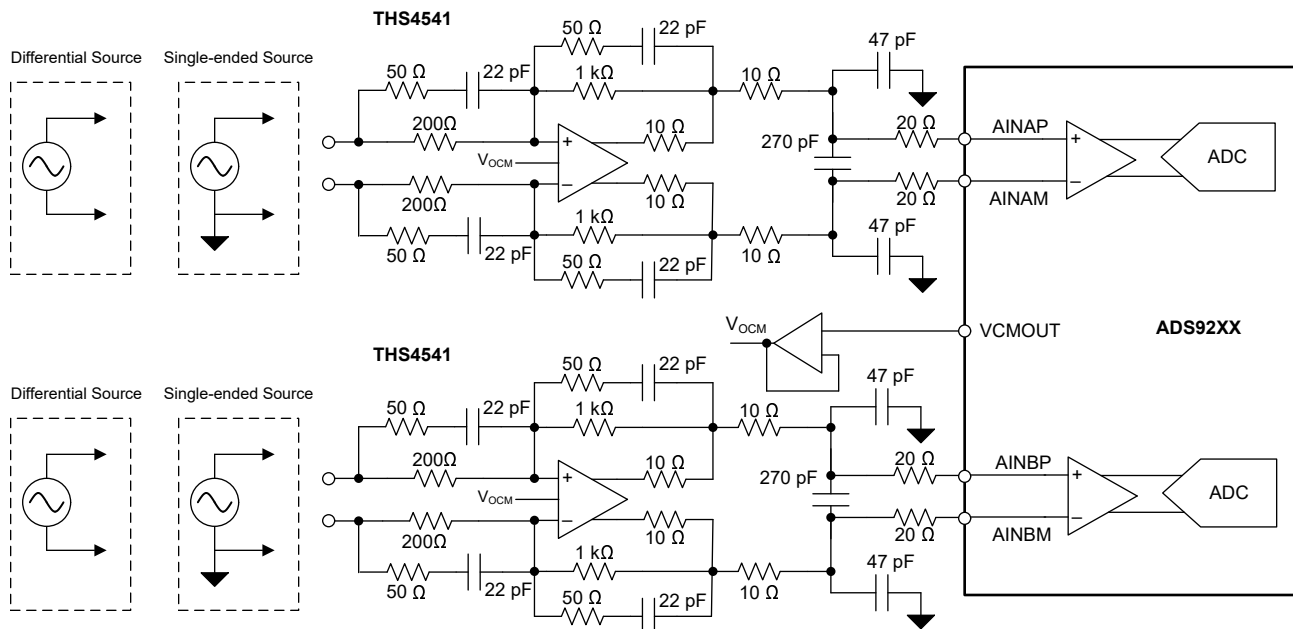


图 2. 适用于高达 1MHz 的满量程输入的低延迟宽带信号链

图 2 中的电路在满量程 1MHz 信号输入下可实现 -104dB 失真。低失真测量可为各种输入信号频率提供来自测量单元的线性输出，如图 3 和图 4 中所示。

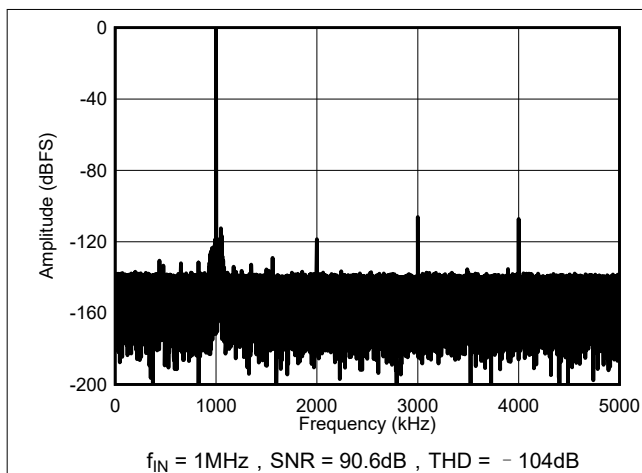


图 3. 每通道 10MSPS 时的典型 FFT : ADS9218

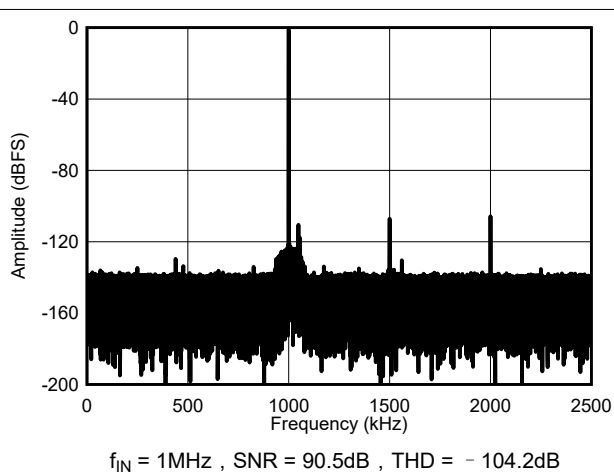


图 4. 每通道 5MSPS 时的典型 FFT : ADS9217

图 5 中的电路显示一个低延迟测量单元的低功耗信号链，满量程信号带宽高达 300kHz。图 6 和图 7 展示了在满量程 100kHz 正弦波输入下进行的低失真和低噪声测量。

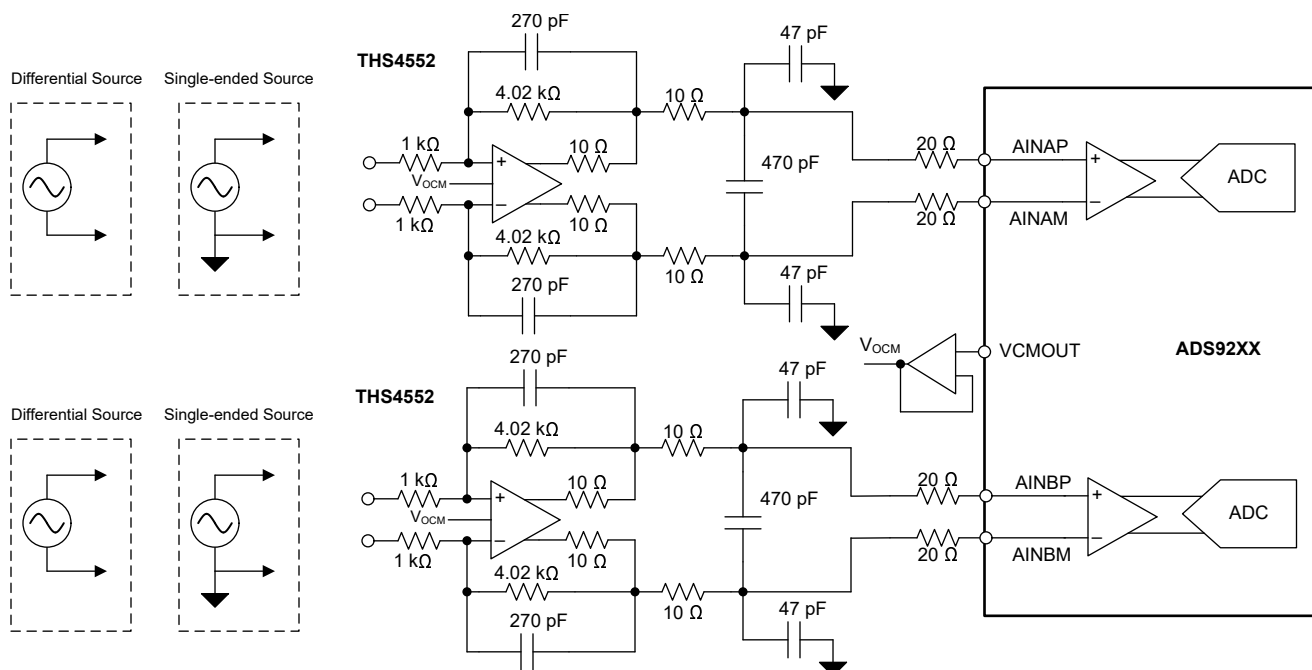


图 5. 满量程输入高达 300kHz 的低延迟低功耗信号链

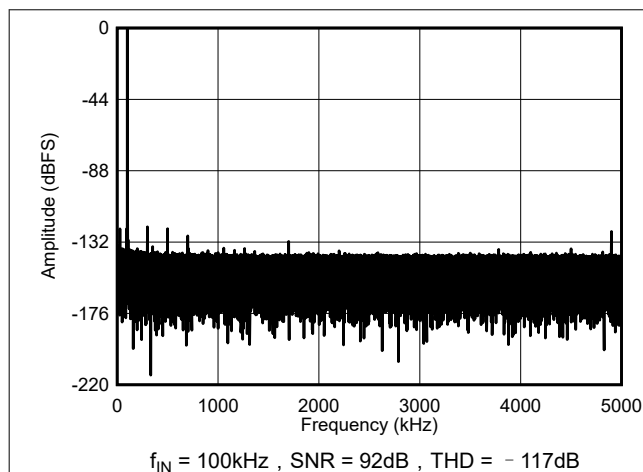


图 6. 每通道 10MSPS 时的典型 FFT : ADS9218

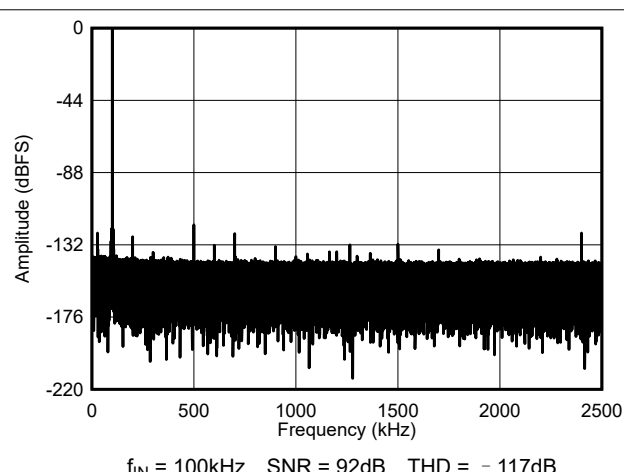


图 7. 每通道 5MSPS 时的典型 FFT : ADS9217

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司