

如何为宽带的精密信号链设计可编程增益仪表放大器

Maithil Pachchigar, 系统应用工程师

John Neeko Garlitos, 产品应用工程师

摘要

本文旨在帮助硬件设计人员设计宽带可编程增益仪表放大器(PGIA)，从选择现成的分立式组件到性能评估，以及如何节省时间和减少设计迭代次数。展示的PGIA架构经过优化，可以全速驱动基于高精度逐次逼近寄存器(SAR)架构的ADC。本文还展示了PGIA在各种增益选项下驱动宽带信号链的精密性能。

简介

精密数据采集子系统通常由高性能的分立式线性信号链模块组成，用于测量和保护、调节和获取，或者合成和驱动。硬件设计人员在开发这些数据采集信号链时，通常需要高输入阻抗，以直接连接多种传感器。在这种情况下，通常需要利用可编程增益使电路适应不同的输入信号幅度——单极性或双极性和单端或差分信号，具有可变共模电压。大多数PGIA传统上由单端输出组成，该输出不能直接全速驱动基于全差分、高精度SAR架构的ADC，需要至少一个信号调理或驱动级放大器。随着大家越来越注重通过系统软件和应用来提供与众不同的系统解决方案，整个行业不断迅速发展变化。但是，受紧张的研发预算和上市时间限制，用于构建模拟电路并制作原型来验证其功能的时间也越来越少。这样就增加了硬件开发资源的压力，需要进一步减少设计迭代。本文着重介绍在设计分立式宽带全差分PGIA时要注意的重要方面，并展示PGIA在驱动高速信号链μModule®数据采集解决方案时的精密性能。

PGIA设计描述

图1显示分立式宽带全差分PGIA简化电路的框图。有关此PGIA电路的关键规格和设计要求，请参见表1。

表1. PGIA设计限制和关键规格

PGIA规范	设计要求	备注
输出共模	2.048 V	固定
差分输出至ADC	8.192 V p-p	固定
增益：单端或差分	2、10、64、128	可编程
电源+V _S /-V _S	+15 V/-15 V、-6 V/-2 V	可以使用单个5 V电源为FDA供电（权衡取舍：3 dB至4 dB SNR下降）
带宽	>50 MHz	需要以15 MSPS驱动SAR ADC
噪声	<2 nV/√Hz	需要实现高于85 dB的SNR
失调电压漂移	≤2 μV/°C	总体低漂移可以降低系统的校准负担
CMRR	>90 dB（所有增益）	
信号链规格		
μModule全差分	16位/18位	
μModule采样速率	15 MSPS	必要时，可以使用更低的采样速率
SNR(100 kHz)	G = 2时>85 dB， G = 128时>73 dB	设计目标
THD(100 kHz)	G = 2时<-105 dB， G = 128时<-70 dB	设计目标

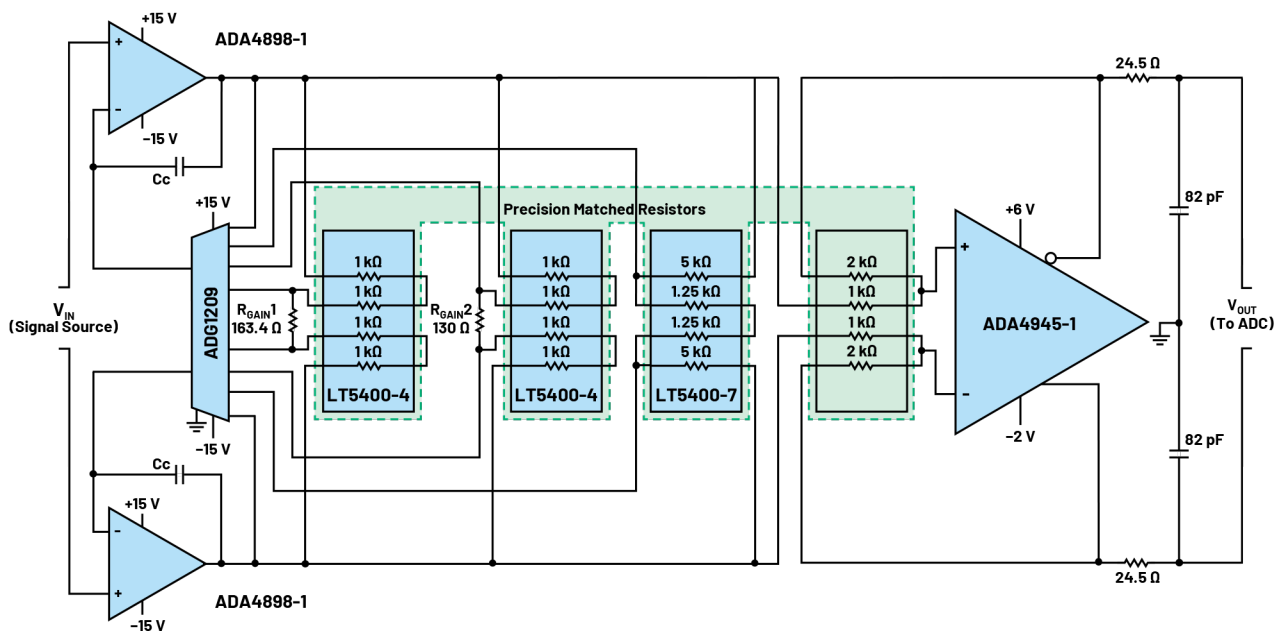


图 1. 简化的 PGIA 电路框图。

这个分立式PGIA使用以下部件构建:

- ▶ [ADA4898-1](#)低噪声高速放大器
- ▶ [LT5400](#)四通道匹配电阻网络，用作增益和反馈电阻，用于设置PGIA增益
- ▶ [ADG1209](#)低电容iCMOS™多路复用器，用于控制PGIA增益
- ▶ [ADA4945-1](#)宽带全差分放大器(FDA)

这款宽带PGIA电路选择使用这些分立式组件来满足表1中突出显示的PGIA规格，用于在驱动全差分高速信号链μModule数据采集解决方案（例如[ADAQ23875](#)和[ADAQ23878](#)）和以及ADC（例如[LTC2387-16/LTC2387-18](#)）时实现优化的交流和直流性能。

设计技巧和组件选择

这款宽带分立式PGIA解决方案能否驱动基于高速SAR架构的信号链μModule解决方案和实现优化性能，取决于放大器和FDA的关键规格（例如带宽、摆率、噪声和失真）。选择ADA4898-1和ADA4945-1是因为其增益带宽积(GBW)支持该信号链的总体带宽要求。只有驱动ADC（例如LTC2387-16/LTC2387-18）时，才需要使用ADA4945-1（FDA）。设置PGIA增益的标准取决于所选的放大器、反馈电阻和多路复用器，我们将在下一节中详细讨论。

设置PGIA增益

选择增益和反馈电阻

放大器的增益电阻和反馈电阻应该精确匹配。LT5400四通道电阻网络提供0.2 ppm/°C的匹配漂移和0.01%的电阻匹配，工作温度范围很宽，共模抑制比(CMRR)优于独立匹配电阻。FDA周围的增益电阻也需要精准匹配，以实现优化的CMRR性能。

LT5400电阻网络用于设置放大器的增益。增益计算如公式1至公式3所示。

$$V_{OUT} = I(R1 + R2 + R3 + R4) \quad (1)$$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}(R1 + R2 + R3 + R4)}{R2 + R3} \quad (2)$$

使用LT5400时，通过设置R1 = R4和R2 = R3，增益为：

$$Gain = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \quad (3)$$

放大器的增益和FDA（固定增益为2）构成了PGIA的总增益，如表2所示。

LT5400系列提供多种电阻选项，如表2所示。可以使用单位增益配置的放大器来旁路ADG1209多路复用器，所以在本例中，总PGIA设置为2。

表2. LT5400电阻选项和等效增益

器件	R2 = R3 (kΩ)	R1 = R4 (kΩ)	R _{GAIN} (Ω)	ADA4898-1 增益(V/V)	总PGIA 增益(V/V)
LT5400-4	1	1	N/A	2	4
LT5400-6	1	5	N/A	6	12
LT5400-7	1.25	5	N/A	5	10
LT5400-8	1	9	N/A	10	20
LT5400-4	1	1	130	31.77	63.54
LT5400-4	1	1	63.4	64.09	128.18

要将增益设置为高于20，需要在两个ADA4898-1放大器的反相输入端之间添加一个外部精密匹配的增益电阻(R_{GAIN})，并使用LT5400-4作为反馈电阻来实现目标增益64和128，如图2所示。

要计算 R_{GAIN} 值, 请参考公式4至8。

$$V_{OUT} = I(R1 + R2 + R3 + R4 + R_{GAIN}) \quad (4)$$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}(R1 + R2 + R3 + R4 + R_{GAIN})}{R_{GAIN}} \quad (5)$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \left(1 + \frac{4k}{R_{GAIN}} \right) \quad (6)$$

$$Gain = 1 + \frac{4k}{R_{GAIN}} \quad (7)$$

要实现所需的增益, R_{GAIN} 的值应为:

$$R_{GAIN} = \frac{4k}{Gain - 1} \quad (8)$$

选择多路复用器

使用多路复用器, 通过选择LT5400四通道电阻网络可控制该PGIA电路的多个增益。为这个宽带分立式PGIA设计选择多路复用器时, 应考虑多路复用器的多个重要参数, 例如导通电阻(R_{ON})、导通电容(C_{ON})和关断电容(C_{OFF})。在这个宽带PGIA设计中, 建议使用ADG1209多路复用器。在放大器的反馈路径中添加补偿电容(C_c), 会尽可能减小增益频响的高频尖峰(提高放大器的稳定性), 并降低多路复用器导通/关断电容的影响。 C_c 与 R_{ON} 、反馈电阻和增益电阻会构成一个极点, 该极点将会补偿反馈环路增益中寄生电容产生的零点的影响。应优化 C_c 值, 以实现所需的闭环响应。当ADA4898-1电路中使用更高的反馈电阻值时, 因为其高输入电容(ADA4898-1的输入共模电容为2.5pF, 差模电容为3.2pF), 在闭环增益的频响中会出现更高的尖峰。为了避免这个问题, 在ADA4898-1中一个更高的反馈电阻需要并联一个反馈电容。如图2所示, 此处选择了ADA4898-1数据手册中推荐的优化 C_c 值2.7 pF。使用更小的 C_c 时, 使增益频响的尖峰更高, 但是如果使用的 C_c 过大, 则会影响闭环增益的增益平坦度。

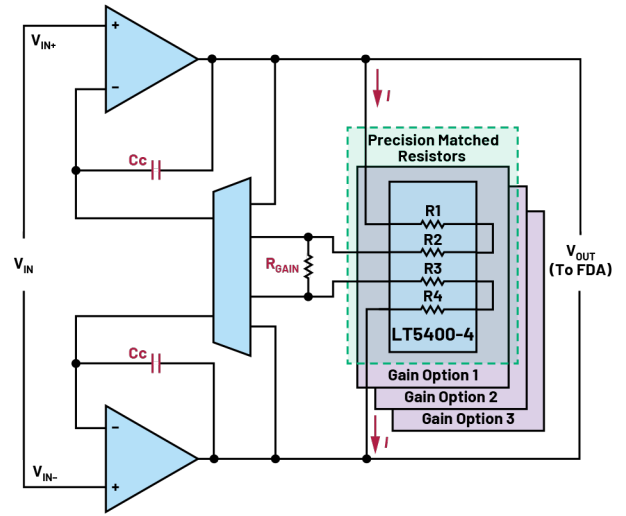


图2. 多路复用器、LT5400 和 R_{GAIN} 电阻设置 PGIA 增益。

PGIA电源

图3显示用于评估该分立式宽带PGIA设计性能的评估板。

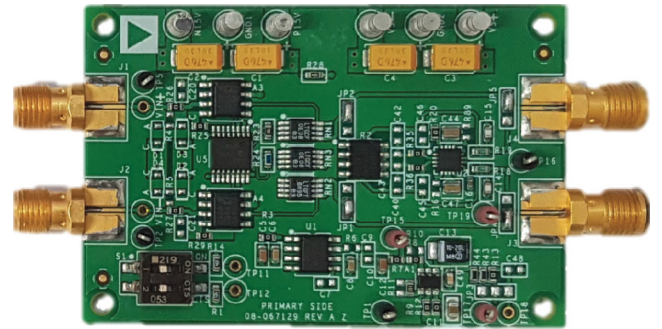


图3. 分立式宽带 PGIA 评估板。

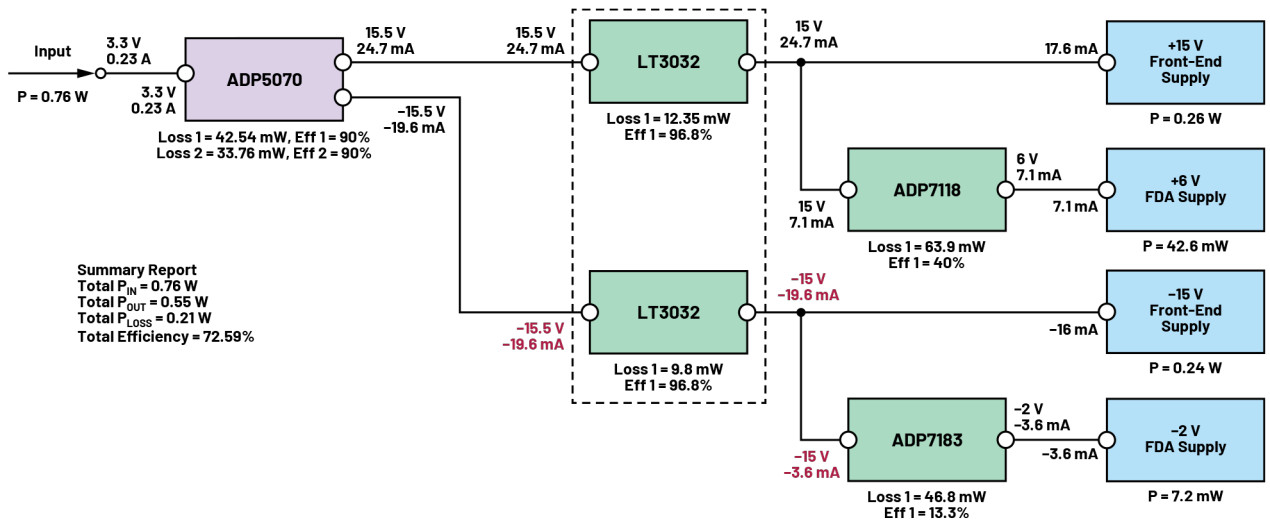


图4. 推荐的电源树。

由两个高速ADA4898-1放大器和一个ADG1209多路复用器构成的PGIA前端需要使用±15 V电源来驱动，而ADA4945-1 FDA需要使用6 V和2 V电源轨来实现优化信号链性能。虽然此板需要使用台式电源，但是针对该PGIA电路，我们更推荐LTpowerPlanner®电源轨的树形结构设计，它同样展示了每个电源轨的负载电流，可参考图4。

PGIA性能

带宽

图5显示在不同的增益设置下，闭环增益与频率的关系图。当PGIA增益从2增大到128，其带宽会降低，而其折合到输出端(RTO)的噪声会增大；因此，信噪比(SNR)会降低。

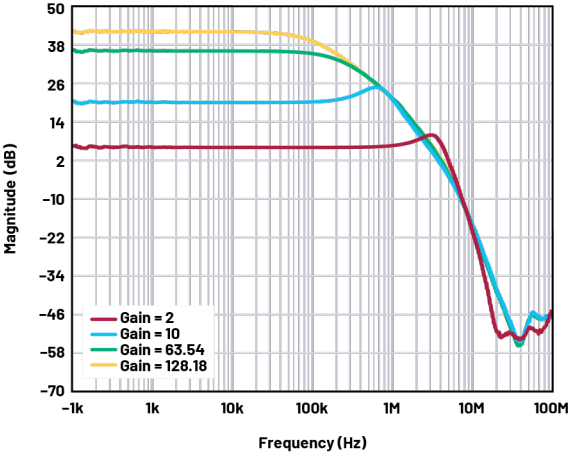


图 5. 带宽与频率的关系。

CMRR

图6显示在不同的PGIA增益设置下，CMRR与频率的关系图。

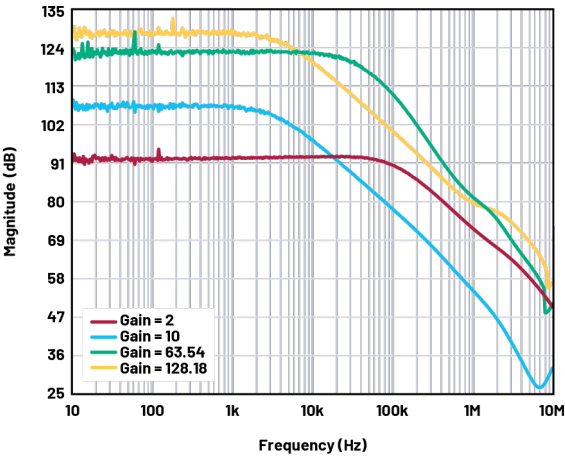


图 6. CMRR 与频率的关系。

失真

Audio Precision® (APX555)信号分析仪用于测试PGIA板（图4）的失真性能，通过对不同的增益设置施加不同的输入电压，将其输出设置为8.192 V p-p。图7显示分立式宽带PGIA的总谐波失真(THD)与频率性能之间的关系。

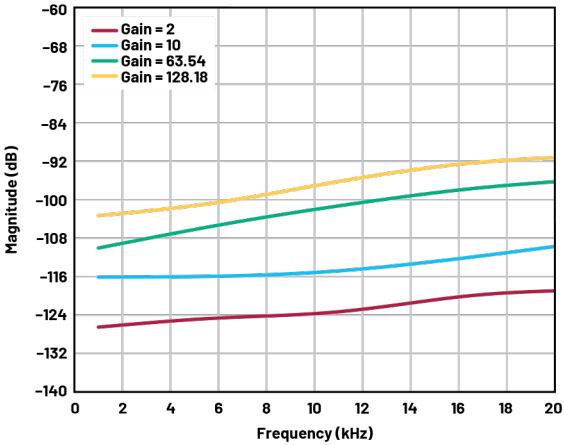


图 7. PGIA THD 与频率的关系。

关键规格汇总

表3列出了使用分立式PGIA评估板（图4）在测试台上测得的关键PGIA规格，例如带宽、摆率、漂移和失真。

表3. 独立的PGIA的关键规格

PGIA增益(V/V)	-3 dB带宽(MHz)	摆率(V/μs)	漂移(μV/°C)	THD (dB), F _{in} = 1 kHz
2	47.7	77	0.06	-126.5
10	12.99	72	1.18	-116.11
63.54	2.15	10	0.042	-110.04
128.18	0.98	N/A	0.026	-103.32

驱动信号链的PGIA μModule解决方案

图8显示选定的多路复用器作为两个低噪声、高速放大器ADA4898-1的增益输入端与LT5400精密电阻网络并联构成的宽带PGIA可以驱动有15MSPS采样速率的ADAQ23875信号链uModule。ADAQ23875包含内部全差分放大器；因此，应旁路宽带分立式PGIA评估板（图4）中的FDA模块。Audio Precision (APx555)信号源用于评估SNR和THD，在本例中，输入幅度设置为约-0.5 dBFS。

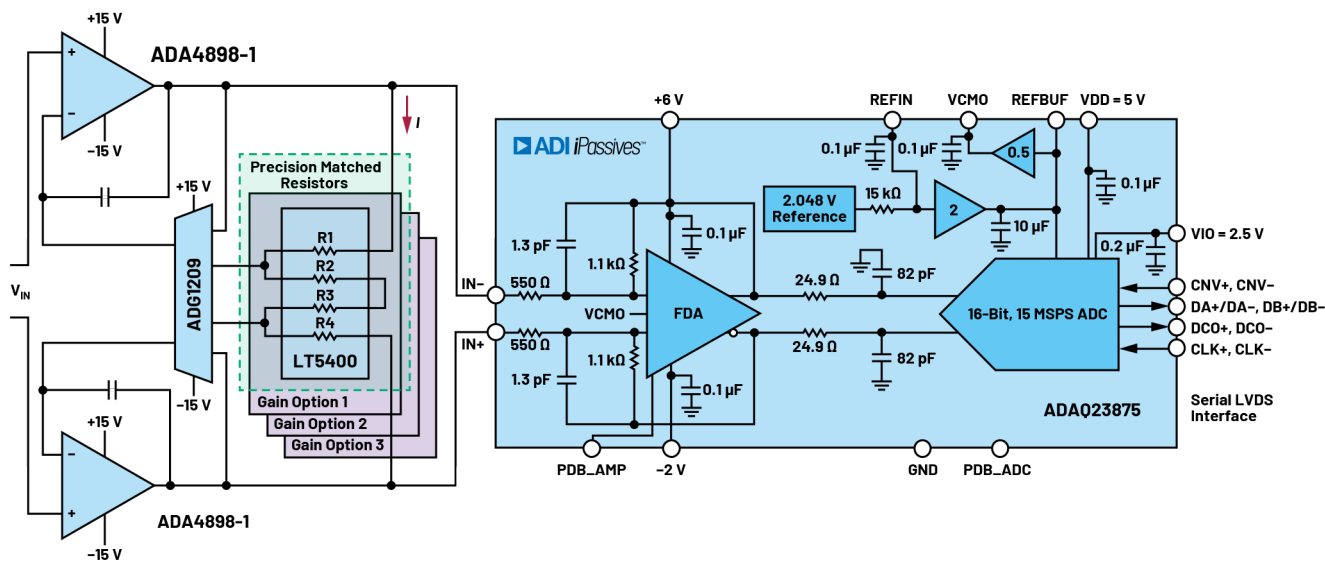


图 8. 驱动 ADAQ23875 的分立式 PGA 的简化信号链。

完整信号链性能

噪声

有关完整信号链（图8）在特定输入范围或增益设置下的动态范围和折合到输入端(RTI)的噪声，请参考表4。

表4. PGA驱动ADAQ23875时的动态范围和RTI噪声

PGA增益(V/V)	输入范围(V p-p)	动态范围(dB)	RTI噪声(μ V rms)
2	4.096	87.68	59.85
10	0.819	79.39	31.05
63.54	0.129	78.85	5.20
128.18	0.064	76.83	3.25

使用ADA4898-1放大器时，驱动ADAQ23875的分立式PGA的SNR性能与频率的关系图如图9所示。PGA增益增大时，整个动态范围或SNR会降低，这是由于单个电阻、放大器和 μ Module解决方案本身的噪声引起的。

ADAQ23878的高精度性能与高采样速率相结合，可降低噪声并支持过采样，以实现极低RMS噪声并在宽带内检测小幅度信号。换句话说，对快速瞬变和小信号电平进行数字化处理时，15 MSPS的采样速率大大放宽了抗混叠滤波器要求并充分提高了带宽。过采样是指以比两倍信号带宽（满足奈奎斯特标准所必需）快得多的速度进行采样。例如，对ADAQ23875进行4倍过采样可额外提供1位分辨率，或增加6 dB的动态范围，换言之，由于此过采样而实现的动态范围改进定义为： $\Delta\text{DR} = 10 \times \log_{10}(\text{OSR})$ ，单位dB。ADAQ23875的典型动态范围在15 MSPS时为91 dB，对于4.096 V基准电压源，其输

入对地短路。例如，当ADAQ23875进行256倍过采样时，这对应于29.297 kHz的信号带宽和接近111 dB的动态范围（对于不同的增益选项），因此可以精确检测出 μ V级别的小信号。为了适应所执行的测量，可以应用额外的过采样来权衡噪声和带宽。

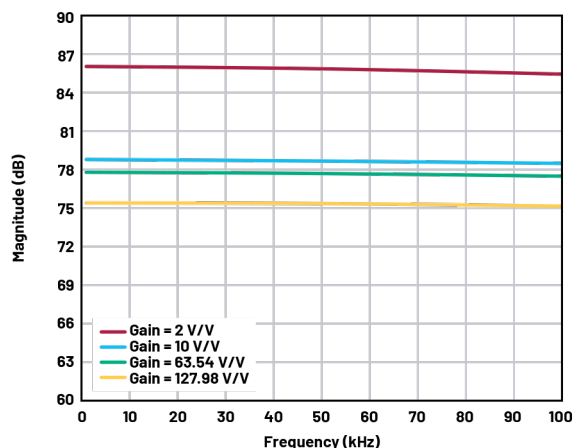


图 9. 使用 PGA 驱动 ADAQ23875 时，SNR 与频率的关系。

失真

图10和图11显示使用分立式PGA驱动ADAQ23875时，信号链（高达100 kHz，从100 kHz至1 MHz）的THD性能。由于ADA4898-1的带宽和摆率开始下降，THD会随着PGA增益和输入信号频率增大而逐渐下降。图11还显示了使用PGA驱动ADAQ23875，以及使用LTC6373和ADA945-1的组合在15 MSPS采样率下驱动LTC2387-16时，两个信号链的THD性能比较。

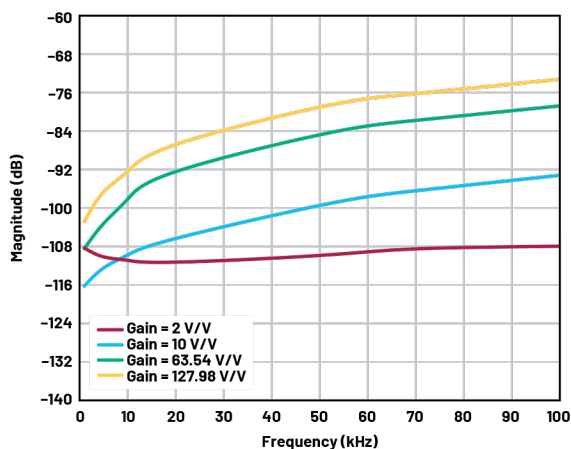


图 10. 使用 PGIA 驱动 ADAQ23875 时，THD 与频率的关系。

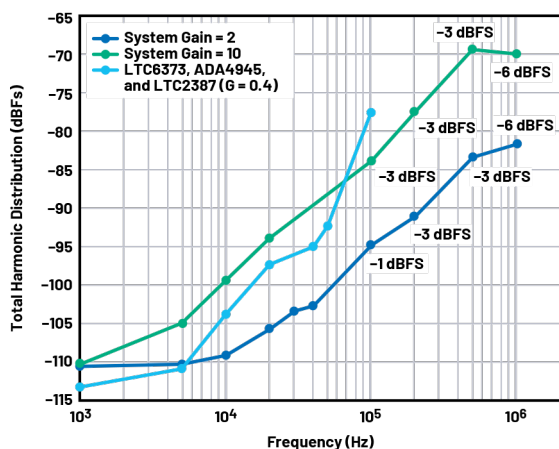


图 11. PGIA 驱动 ADAQ23875 以及 LTC6373 + ADA4945-1 驱动 LTC2387-16 时，THD 信号链的性能比较。

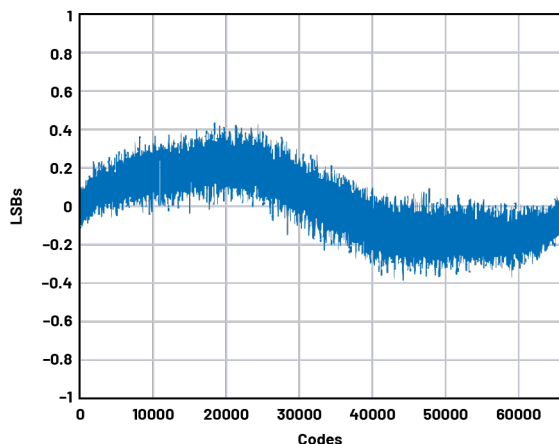


图 12. 驱动 ADAQ23875 的 PGIA (G=2) 的 INL 图。

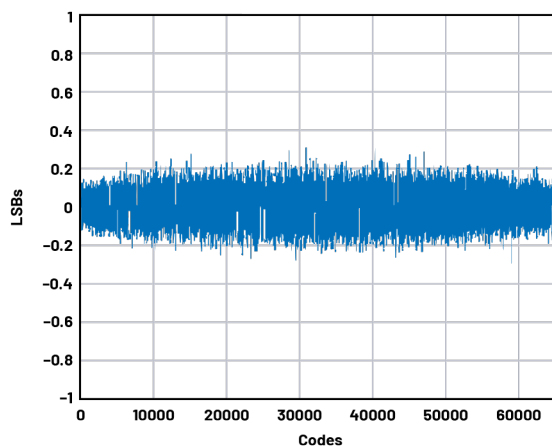


图 13. 驱动 ADAQ23875 的 PGIA (G=2) 的 DNL 图。

积分非线性(INL)和差分非线性(DNL)

使用 PGIA 驱动 ADAQ23875 时，必须保持信号链的整体直流精度，这一点也很重要。图 12 和图 13 显示 PGIA 增益为 2 时，典型的 INL 和 DNL 性能。对于所有其他增益设置，INL 和 DNL 一般都保持在 ± 0.5 LSB 以内。

结论

本文介绍使用 ADA4898-1 放大器、ADG1209 多路复用器和 LT5400 精密匹配电阻构建分立式宽带 PGIA 的设计。该设计在几十毫伏到 10V 的单端/差分信号输入范围内，同时驱动 16 位 15 MSPS 采样率的 ADAQ23875 信号链 μ Module 的解决方案可实现高精度测量。与使用市面上可用的单片式 PGIA 相比，完整的信号链可提供更好的整体精密性能。这款宽带宽信号链专为特定客户群定制，旨在构建用于自动化测试设备、电源监控和分析仪的测试仪表。

参考资料

Pachchigar, Maithil. “[利用过采样提高 SAR ADC 的动态范围](#)。” ADI 公司，2015 年 6 月。

“[CN-0560：高精度、宽带宽电流测量信号链](#)。” ADI 公司，2022 年 6 月。



作者简介

Maithil Pachchigar是ADI公司麻萨诸塞州威明顿市工业和多市场事业部的系统应用工程师。自2010年加入ADI公司以来，他致力于仪器仪表、工业和医疗健康行业的精密信号链解决方案工作和客户支持。自2005年以来，Maithil一直在半导体行业工作，并已独立及合作发表多篇技术文章。Maithil获印度S.V.国家技术学院电子工程学学士学位、圣何塞州立大学的电气工程硕士学位，以及硅谷大学MBA学位。



作者简介

John Neeko Garlitos是ADI公司的信号链 μ Module解决方案产品应用工程师。他从事信号链 μ Module开发和参考电路方面的工作。他于2017年开始在ADI菲律宾GT公司工作。他拥有菲律宾科技大学沙鄢分校电子工程学士学位以及菲律宾迪里曼大学电子工程硕士学位。

