

选择多通道超低电流测量 IC

Eduardo Bartolome
Systems Engineer
Texas Instruments

Shriram Devi
Validation Engineer
Texas Instruments

Nagesh Surendranath
Design Engineer
Texas Instruments

引言

在较低速度 (<100kSPS) 下以高精度 (>16 位) 同时测量许多超低的电流电平 (<1 μ A) 时, 工程师可以使用两种解决方案, 即德州仪器 (TI) AFE 系列 X 射线模拟前端和 DDC 系列模数转换器 (ADC)。尽管最初设计用于医学成像应用, 但这些器件也可用于仪器仪表、体外诊断应用以及任何其他具有大量光电二极管或同时测量许多电压的应用。

在这两个器件系列中, 测量的电流都不是浮动 (分流) 的, 而是从固定的直流电平吸收或拉取 (参见图 1 和图 2), 因为输入通过放大器的反馈作用虚短至某一电压, 与分立跨阻放大器的情况一样。然而, 与通过乘以电阻 (在输入放大器的反馈中) 将电流转换为电压的跨阻放大器不同, 这两个系列都将积分器作为第一级。

这两个器件系列都将大部分所需元件集成到单个 IC 中, 从而实现从电流输入到数字输出 (两种情况下都是串行流) 的功能。此功能可以调整满量程 (输入增益) 以优化特定应用的信噪比, 甚至将相同的解决方案用于不同应用来创建平台设计。除了节省布板空间外, 这种集成水平 (具有由这些器件的数据表设置和支持的许多系统级规格) 极大地简化了量产中的设计工作和测试策略, 从而缩短了上市时间并降低了开发成本。

尽管许多应用都可以使用任一器件, 但它们之间的差异非常显著, 某一器件会更适合某一种给定的应用。在本文中, 我们将解释原因。

DDC

DDC 系列涵盖从双通道 (DDC112) 到 256 通道 (DDC2256) 器件, 其中包括 4、8、16、32、64 和 128 通道等中间版本。每个 DDC 通道都输出一个数字值, 相当于输入电流在两个瞬间 (时钟信号的两个连续边沿) 之间的积分 (电荷)。工程师可以将 DDC 等效地视为一个后接 ADC (而不是电阻) 的跨阻放大器, 其中反馈电容和积分时间 (采样率) 的组合设置了增益 (参见图 1)。

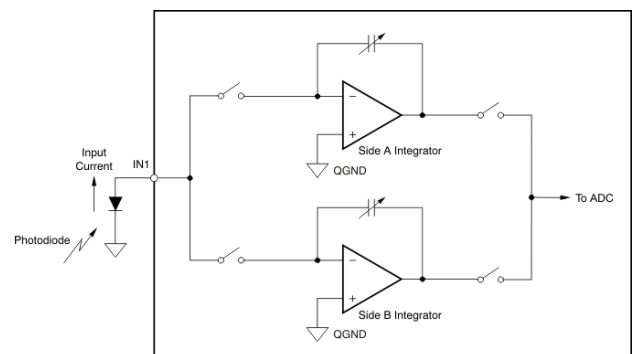


图 1. 双积分器 DDC 输入架构

在计算机断层扫描仪或荧光测量等应用中, 将电荷值作为数字器件输出具有以下优点: 通过单个读数直接提供与该时间间隔内入射到光电二极管上的光子总数成比例的值 (而不是连续采样信号并在稍后将样本相加)。在此期间, 信号不必是连续的, DDC 的输入积分器甚至可以对两个边沿之间的快速电流脉冲进行积分。实际上, 前端积分器的带宽会超出人们根据采样率认识的带宽, 大约在兆赫范围内。

对于用户更喜欢以电流为单位处理数据的应用，可将电荷结果除以积分区间（两个边沿之间的时间）来获得平均电流值。该间隔中的任何时间信息都将丢失并转换为单个平均电流样本。

根据 DDC 器件的不同，可以将采样率（积分区间的倒数）从 1SPS 调整到 100kSPS（DDC316 仅为 12 位）。大多数 DDC 比较规范的最大采样率值是每通道约 6kSPS，分辨率为 20 位。**表 1** 总结了 DDC 系列中每个器件的最高等级规格。

器件名称	通道数量	最小最大通道采样率 [kSPS]	最大满量程电荷 [pC]	最大满量程电流 [μA]	功耗 [mW/通道]	位数
DDC112	2	0.001-3	1,000	3	85	20
DDC114	4	0.001-3	350	1	18	20
DDC118	8	0.001-3	350	1	18	20
DDC316	16	1-100	12	1.2	28	100kSPS 下为 12 50kSPS 下为 16
DDC232	32	0.001-6	350	2	10	20
DDC264	64	0.001-6	150	1	5.5	20
DDC1128	128	0.001-6	150	1	5.5	20
DDC2256	256	1-17	150	2.5	2	24

表 1. DDC 系列中各器件的最高等级规格

该器件的可编程满量程（交换集成电容器）使您能够优化给定应用、试验或运行的本底噪声，这对于仪器仪表应用尤为重要。增加输入增益将使本底噪声降至 $0.2fC_{rms}$ （1,250 个电子）。但是，在较低增益（较高的满量程输入）下能获得较大的动态范围，典型值约为 90dB。

电流的计算公式为电荷除以积分时间，最大电流（在线性范围内）由最大满量程电荷设置和最小积分时间计算得出。**表 1** 也列出了这些结果。典型的最大满量程电荷范围为 150pC 至 350pC，尽管 DDC112 允许使用可超过 1nC 范围的外部反馈电容器。在以电流为单位进行的计算中，最大范围约为 1μA。

X 射线 AFE 与 DDC 系列的一个主要区别是 DDC 只能测量流入输入端子的电流。也就是说，所有 DDC 都将满量程的 0.4% 左右作为离开端子的电流的裕度，用于在零电流点校准偏移。此外，还可以使用外部电阻器并通过一些相对简单的技术来测量负电流 [3]。

最后，这些器件采用引线或 Ball Grid Array (BGA) 封装，从而可通过标准组装方法进行简单处理。

X 射线 AFE ROIC

AFE 系列读出集成电路 (ROIC) 包含三个器件：AFE0064、AFE1256 和 AFE2256。

TI 最初设计的 AFE 器件用于测量薄膜晶体管平板探测器中由像素阵列（光电二极管）收集的电荷。鉴于此应用中信号的性质，这些器件针对更宽的输入带宽和远低于 $20\mu s$ 的更短积分时间（采样周期）进行了优化。相反，器件设计中的积分时间不超过几毫秒。

最大电荷设置（满量程）通常低于 DDC 系列，大约为 10pC。但它们面向的是较低的信号，因此灵敏度/本底噪声也优于 DDC，典型值约为 $0.1fC_{rms}$ （600 个电子）。对于小电荷范围，AFE 的噪声不到 DDC 的一半。

该器件的动态范围更小（本底噪声更低，但满量程更低），不需要使用 DDC 器件所需的 20+ 位转换器，因此，AFE 器件仅支持 16 位转换。

除了提高灵敏度之外，AFE 器件相比 DDC 的一个优点是，它可以处理流入或流出器件输入端的电流，而无需外部组件，甚至可以采集双极性信号。

AFE 的输入电压不是零，而是不同的电压电平（例如，AFE0064 的输入电压为 1.68V，具体取决于所选器件）。偏置传感器时必须考虑电压电平。例如，若要在试图使暗电流接近零的同时读取光电二极管，通常会使用零偏置电压（光电二极管上不施加偏置电压）。因此，如果光电二极管的一个端子连接到 AFE 输入，则另一端子应偏置到相同的非零电压。

为了进一步解释每个通道的架构（参见**图 2**），每个样本实际上分为两个由外部信号控制的阶段：一个复位/偏移采样阶段和一个信号采样阶段。这些是相关双采样器 (CDS) 的典型阶段。在面板应用中，在复位/偏移阶段，器件的输入端连接到外部（通常采用数据线），但不存在信号。目的是对来自外部或内部源的任何现有偏移或低频噪声（闪烁）进行采样或基线化。一半的 CDS 用于存储生成的积分。在信号采样阶段，外部信号连接到输入，CDS 的另一半用于存储该积分。在此期间，偏移源仍将存在；减去 CDS 中的两个样本将消除偏移，只留下感兴趣的信号。

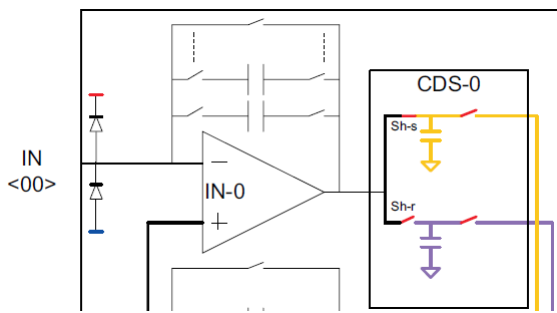


图2. X 射线 AFE 输入积分器架构

当将这种方案应用于连续电流的采样时，在复位阶段还将对一部分信号进行积分，电路稍后将从信号采样阶段获得的积分中减去该部分信号。如果信号在这两个阶段中是恒定的，则效果是易于纠正的增益误差。但如果信号发生变化，应该考虑潜在的诱导误差。

最终比较

表 2 总结了两个器件系列的差异。

	DDC 系列	AFE 系列
通道数量	2、4、8、16、32、64、128、256	64、256
电流方向	进入器件	进出器件
双极信号集成	否	是
输入直流电压	0V	非零（AFE0064 为 1.68V）
封装	TQFP、小外形 IC、BGA	TQFP、COF
满量程电荷范围	12.5pC 至 350pC、1nC	≈0.5pC 至 10pC 以上
最大满量程电流	3μA	0.5μA
输入参考噪声（电荷）	0.2fC _{rms} （1,250 个电子）	<0.096fC _{rms} （600 个电子）
输入参考噪声（电流）	0.5fA _{rms} （1SPS 下）	<96fA _{rms} （1ms 下）
最大采样率	≈5kSPS	>50kSPS
最大积分时间	1s	1ms

表 2. DDC 和 AFE 系列的差异

假设您要测量阵列中 64 个光电二极管中的每一个在 100ms 内产生的全部电荷，并且还假设最大电流为 1.2nA，那么，最大电荷为 $1.2\text{nA} \times 100\text{ms} = 120\text{pC}$ ，DDC264 可在单次积分中处理范围 3（150pC 满量程）。

查看图 3，并假设寄生检测器电容为 24pF，可得出噪声约为 $0.9\text{fC}_{\text{rms}}$ 。

如果可以使信号生成与 CDS 采样操作同步，则不会出现增益误差。例如，如果可以在进行 CDS 操作的同时打开和关闭传感器照明，则光电二极管电流将仅在信号采样阶段产生，而不是在复位/偏移阶段产生。结果将不会出现增益误差，并具有额外的优势，即任何环境光或偏移都将在复位/偏移阶段被采样并被 CDS 拒绝。

AFE0064 采用更传统的 Thin Quad Flat Package (TQFP)，而较新的版本则采用 Chip-on-Flex (COF) 封装，具体取决于平板探测器应用。与更常见的组装方法相比，这可能会带来一些复杂性。

RANGE	C _{SENSOR}								
	0 pF	10 pF	30 pF	43 pF	57 pF	100 pF	270 pF	470 pF	1000 pF
ppm of FSR, rms									
Range 0: 12.5 pC	16	20	30	37	44	71	160	270	510
Range 1: 50 pC	6.4	7.4	10	12	14	21	45	74	130
Range 2: 100 pC	5.1	5.5	7.1	8	9.1	12	25	39	71
Range 3: 150 pC	4.8	5	6	6.5	7.2	9.6	17	27	49
fC, rms									
Range 0: 12.5 pC	0.2	0.25	0.38	0.46	0.55	0.89	2	3.38	6.38
Range 1: 50 pC	0.32	0.37	0.53	0.62	0.73	1.09	2.29	3.73	6.88
Range 2: 100 pC	0.51	0.55	0.71	0.8	0.91	1.28	2.5	3.97	7.16
Range 3: 150 pC	0.72	0.75	0.9	0.98	1.08	1.45	2.67	4.14	7.36
Electrons, rms									
Range 0: 12.5 pC	1250	1560	2340	2890	3430	5540	12480	21070	39790
Range 1: 50 pC	2010	2310	3340	3910	4570	6800	14200	23300	42900
Range 2: 100 pC	3220	3440	4450	5000	5680	7990	15600	24800	44700
Range 3: 150 pC	4530	4730	5610	6120	6770	9050	16700	25800	45900

(1) Noise in Table 1 is expressed in three different units for reader convenience. The first section lists noise in units of parts per million of full-scale range; the second section shows noise as an equivalent input charge (in fC); and the third section converts noise to electrons.

图3. 噪声与 C_{sensor}

器件上的低频噪声还有一个额外的噪声因子，它随着积分时间的增加而更加明显（参见图4）。由于这种效应，噪声实际上将接近 9ppm 的满量程范围 (150pC)，或 1.35fC_{rms}。

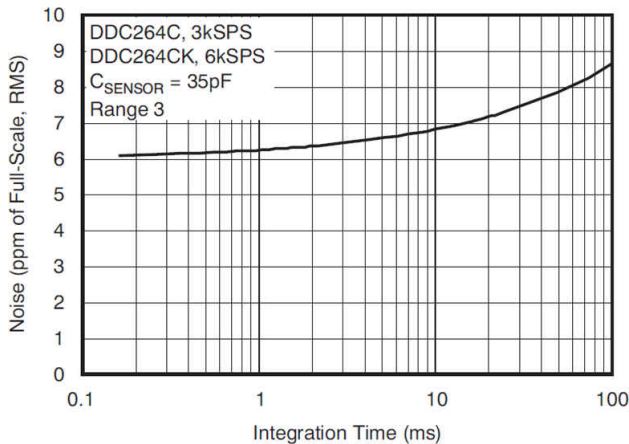


图4. 噪声与积分时间

相比之下，AFE0064 无法在单个积分区间内处理 100ms 间隔；它会饱和。解决方案是在更短的时间内进行积分并将它们累加在一起。可能存在许多的积分区间，但在此示例中，我们将跳过优化练习并选择针对 5ms 进行积分，这将导致最大电荷为 6pC，因此我们选择了范围 6 (7.2pC)。单个样本的噪声约为 2,040 个电子 (0.3fC_{rms})，请参见图5。在 100ms 等效区间内将 20 个连续样本相加后的噪声将为 $\sqrt{20} \times 0.3fC_{rms} = 1.34fC_{rms}$ ，结果与 DDC 非常相似。

NOISE VS CHANNEL NUMBER IN RANGE 6

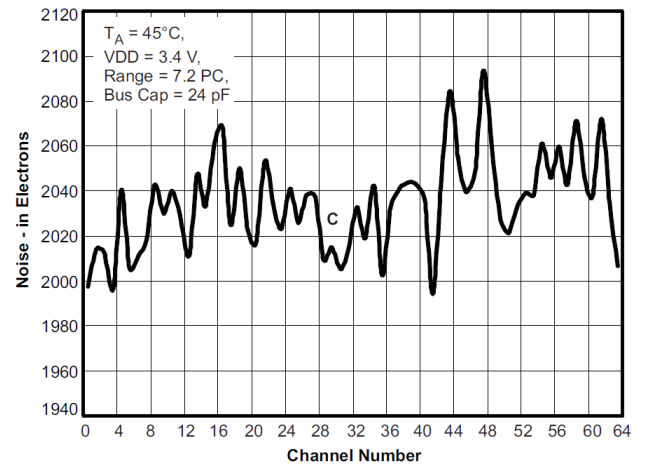


图5. 噪声与通道数量

结论

对于不能牺牲灵敏度和高采样速度的应用而言，AFE 器件可能是理想选择。尽管如此，DDC 可以通过在更长的时间段内进行积分测量来提高灵敏度（在当前条件下优于 AFE 器件）。尽管 AFE 器件可以通过更快的采样提供部分补偿（即，将同一周期划分为更小的区间进行更快地采样，并在最后进行相加），但 DDC 器件也适用于具有较大电荷的应用。

在两种器件中进行选择时，还要考虑其他非性能相关的实际限制因素。例如 AFE 器件大多采用 COF 封装，或者 DDC 难以测量流出器件的电流。

相关网站

1. Bartolome, Eduardo. **Introduction to Medical Imaging**. (Nov. 17, 2013). Accessed Nov. 24, 2021 [Online Video].
2. Todsén, Jim. 1998. **在 DDC112 上使用外部积分电容器** Burr-Brown 应用简报, 德州仪器 (TI) 文献编号 SBAA027, 1998 年 9 月。
3. Todsén, Jim. 1999 年. **为 DDC112 创建双极性输入范围**。 Burr-Brown 应用简报, 德州仪器 (TI) 文献编号 SBAA034, 1999 年 10 月。

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司