

Design Guide: TIDA-010267

具有 90dB 动态范围、实现较低 PI 的单芯片脉搏血氧仪参考设计



说明

该参考设计展示了 MSPM0L1306 在低成本单芯片脉搏血氧仪设计中的模拟功能。MSPM0L1306 内的运算放大器 (OPA) 具有零漂移、低噪声, 可用作跨阻放大器 (TIA) 和电流控制驱动器。这款集成式高速模数转换器 (ADC) 提供了过采样功能, 并且实现了高水平的动态范围。此设计采用 GUI 来直观地呈现光体积描记器 (PPG) 波形以及心率 (以每分钟心跳 (BPM) 为单位) 和外周血氧饱和度 (%SpO₂) 的生命体征测量值。

资源

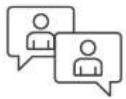
TIDA-010267	设计文件夹
MSPM0L1306	产品文件夹
MSPM0-SDK	设计与开发
GUI	GUI 库

特性

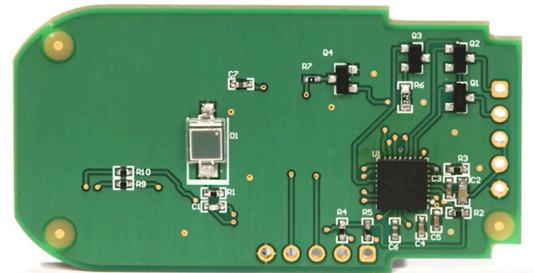
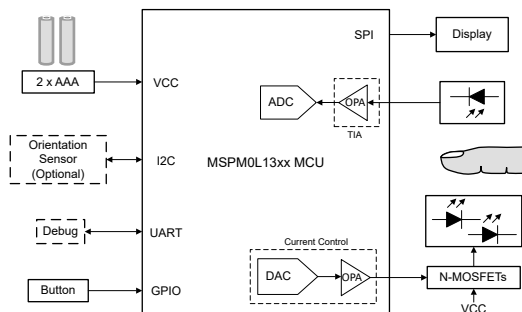
- 可实现 30BPM 至 240BPM 的心率范围和 0.1% 至 20% 的灌注指数 (PI) 范围, 具有多种脉冲强度和更高的可靠性
- 通过过采样, 内部 12 位 ADC 可实现 90dB 动态范围
- 标准显示分辨率为 1BPM 和 1% SpO₂, 以提供准确的生命特征读数
- 在器件关断期间具有超低 (< 83nA) 关断电流, 从而延长电池寿命

应用

- 临床脉搏血氧仪
- 多参数患者监护



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

脉搏血氧仪是一种用于监测血氧饱和度和脉搏率的医疗仪器。该仪器测量的血氧水平和心率可用于监测用户的健康状况，还可帮助医生快速诊断病因和病情。因此，该仪器广泛用于医院和家庭。

脉搏血氧仪是一种无创设备，用于监测脉搏率和血液的外围血氧饱和度 (% SpO₂)。

在脉搏血氧仪中，血液氧合程度 (SpO₂) 是通过测量身体组织衰减的光强度来计算的。SpO₂ 定义为氧合血红蛋白 (HbO₂) 水平与总血红蛋白 (氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白 (Hb)) 水平的比率，具体详见 [方程式 1](#)。

$$\text{SpO}_2 = \frac{\text{HbO}_2}{\text{HbO}_2 + \text{Hb}} \quad (1)$$

一般而言，HbO₂ 和 Hb 对不同波长的光具有不同的反应。Hb 吸收的红光比红外 (IR) 光多，而 HbO₂ 吸收更多红外光。如 [图 1-1](#) 所示，当通过手指交替驱动红色和红外发光二极管 (LED) 时，穿过手指而未被吸收的光 (使用光电二极管作为检测元件) 与血液中的 Hb 和 HbO₂ 浓度相关。

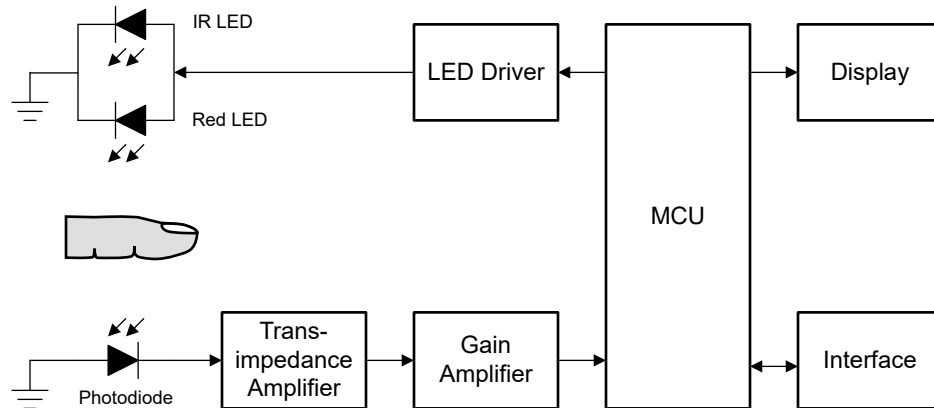


图 1-1. 脉搏血氧仪的方框图

这里使用了两种不同波长的光；每种光交替点亮并进行测量。通过使用两种不同波长，可以降低测量的数学复杂性。

$$R = \frac{\log(I_{ac})_{\lambda_1}}{\log(I_{ac})_{\lambda_2}} \quad \text{SpO}_2 \propto R \quad (2)$$

其中

- λ_1 和 λ_2 表示使用的两种不同波长的光

测量结果包含直流和交流分量。假定直流分量是身体组织、静脉和毛细血管中血液以及动脉中非脉动（无周期性变化）血液吸收和散射光所导致的。交流分量是动脉中脉动（具有周期性变化）血液吸收光所导致的。

实际上， SpO_2 和 R 之间的关系并非 [方程式 2](#) 所示的线性关系。因此，请使用查找表来获得正确读数。

R 以及 SpO_2 的可靠性取决于在信号输入上实现良好动态范围的能力。动态范围 (DR) 通过使用 [方程式 3](#) 来根据有效位数 (ENOB) 计算得出。

$$DR = 20 \times \log_{10}(2^{ENOB}) \quad (3)$$

2 系统概述

2.1 方框图

MSPM0 脉搏血氧仪设计使用各种模拟和数字外设将高性能、低成本脉搏血氧仪设计集成到单个芯片中，如 [图 2-1](#) 所示。

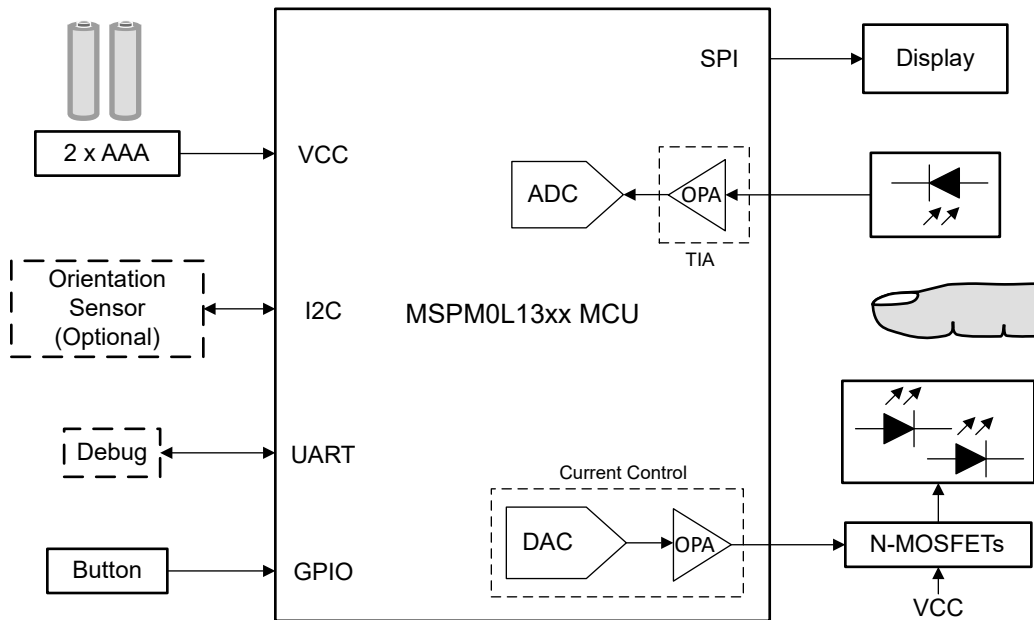


图 2-1. TIDA-010267 脉搏血氧仪方框图

2.2 设计注意事项

图 2-2 展示了 MSPM0L1306 上使用的模拟块，以及这些块如何与 LED 和光电二极管器件交互。

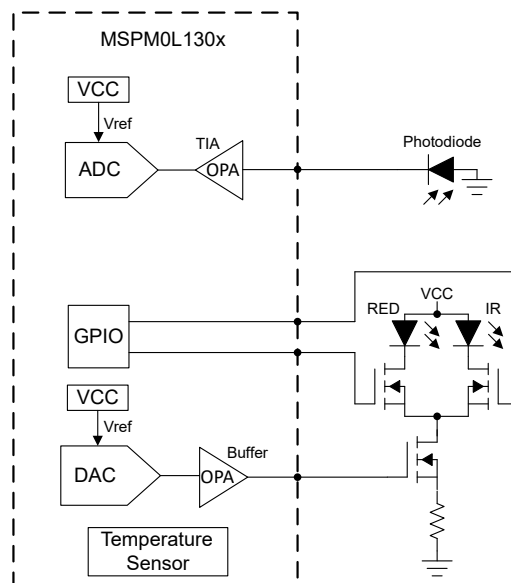


图 2-2. TIDA-010267 脉搏血氧仪模拟前端

2.2.1 光电二极管、TIA 和 ADC

在 TIDA-010267 中，以纳安级电流形式存在的光电二极管信号会被转换为电压并被放大，以适应 MSPM0L1306 的 ADC 范围。这可通过使用集成式 OPA 的低输入偏置电流实现，从而允许设计将 OPA 用作 TIA，如图 2-5 所示。通过使用 MSPM0L1306 电压输入作为高速 ADC 的基准，转换器可以更快地进行采样，从而实现过采样并缩短 LED 导通时间。样本之间的内部电压监控功能使 MSPM0L1306 能够量化输入信号的电平并相应地调整参数。此外，还可以实现内部温度检测等其他功能。

2.2.2 LED 驱动

AFE 方框图 (图 2-2) 展示了每个 LED 的电源由 MOSFET 管理并通过 MSPM0L1306 的 GPIO 引脚进行控制。这两个 MOSFET 分别控制 LED 的打开和关闭状态。TIDA-010267 使用波长为 660nm (红色) 和 940nm (红外) 的单件式 LED。由于 MSPM0L1306 的内部 8 位 DAC 和 OPA 电压跟随器输出到通用 MOSFET (可确定流经 LED 的电流)，因此可实现 LED 亮度控制。由于可以通过内部 ADC 连接和内部电压基准定期监测电池电压，因此可以可靠地将 DAC 的电压输出衰减到已知电平并确定要流经 LED 的电流。

2.2.3 电源

TIDA-010267 由直接连接到 MSPM0L1306 的 2 节 AAA 电池供电。MSPM0L1306 低至 1.62V 的宽电源电压范围让器件能够在更长的电池寿命内工作，因为 AAA 电池的电压往往会随着使用而下降。MSPM0L1306 上集成的 LED 驱动设置还通过电池为 LED 供电，从而可在应用中实现通过 MCU 的电流控制来对电池供电的 LED 进行亮度控制。凭借这种电源和可控功能的灵活性，该器件无需外部电源 IC 即可正常运行，从而降低了成本并减少了芯片数量。

2.2.4 显示、方向和通信功能

图 2-3 和图 2-4 展示了脉搏血氧仪的可选特性接线和布板空间。具有集成驱动器的显示屏可以通过 4 线 SPI 连接到 MSPM0L1306 的 SPI 端口 0，以实现简单集成。此外，MSPM0L1306 的 I2C 端口 0 可用于集成方向传感器，以便设备用户可以轻松地确定显示屏的方向。此外，MSPM0L1306 上的通用异步接收器发送器 (UART) 端口 1 可用于通信，以接收和解释传输到 TI POX GUI 或其他串行数据兼容软件的串行数据。最后，TIDA-010267 允许通过 10 引脚 SWD 配置进行 MCU 编程，以简化使用 TI 资源进行的调试和测试。

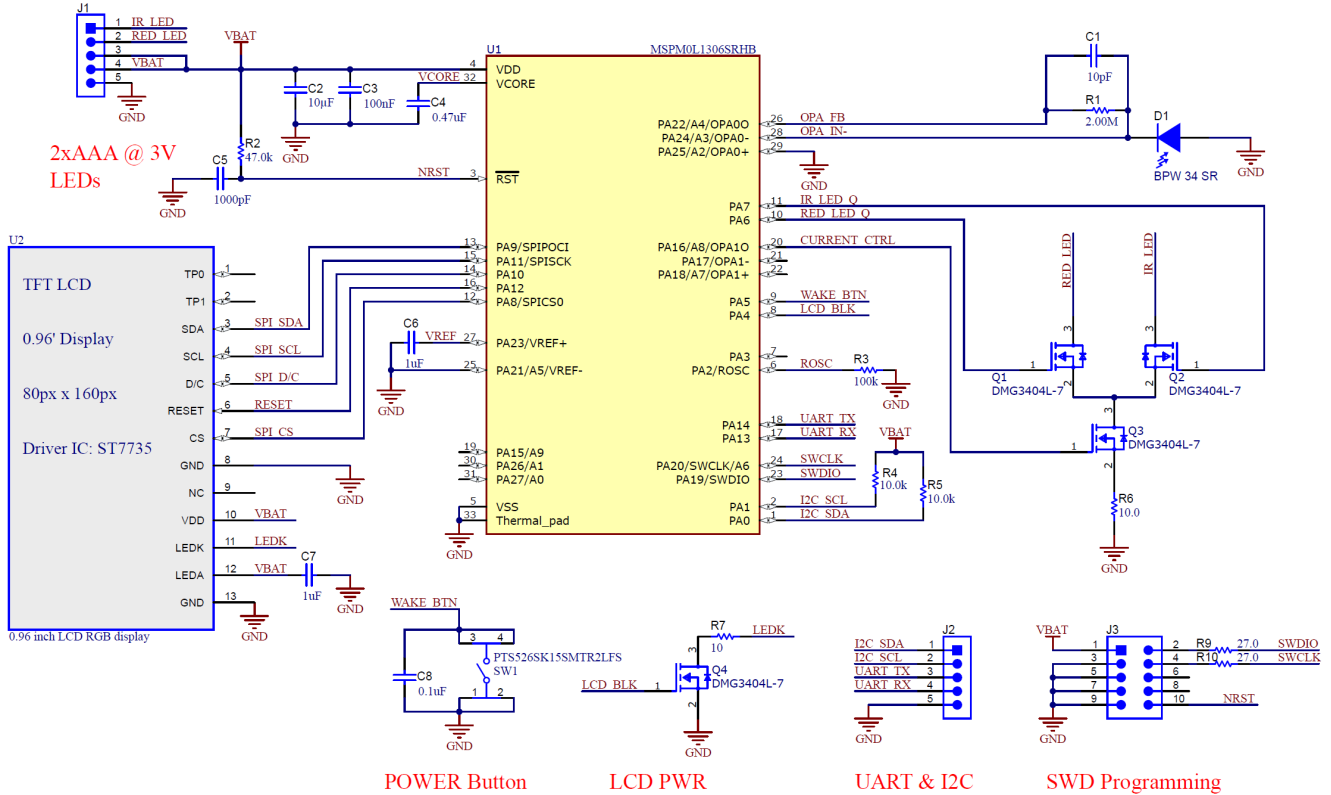


图 2-3. 脉搏血氧仪的 TIDA-010267 原理图

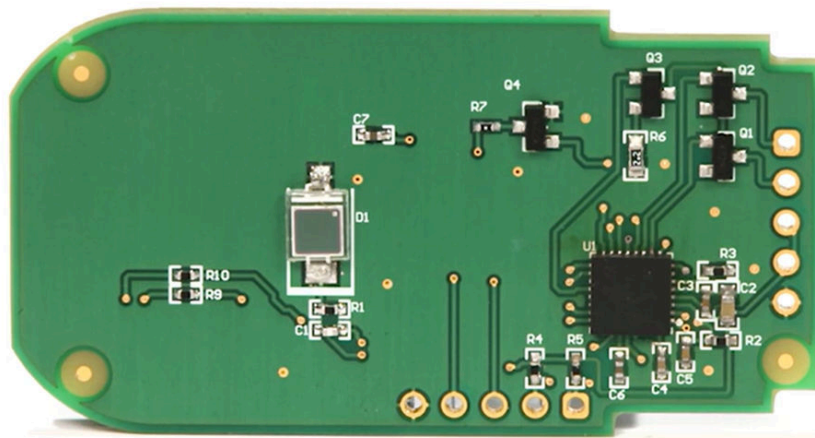


图 2-4. 脉搏血氧仪的 TIDA-010267 PCB

2.2.5 软件

2.2.5.1 时序结构

图 2-5 展示了脉搏血氧仪操作的编码时序结构。

- 为了捕获 PPG 信号的固有频率（这些频率可能会变化，但通常为个位数频率），这里以 125Hz 的频率捕获红光和红外光的光电二极管样本。
- 在两次捕获之间的 8ms 周期（由 MSPM0L1306 的 TIMG0 块（名为 T8）管理）内，图 2-5 详细展示了参与获取光电二极管样本的几个组件的运行状态。
- TIMG1 块（名为 T1）在 8ms 周期开始时运行两次，每次持续 1ms，分别表示每个红色 LED 和红外 LED 的导通时间。
- T1 和 T8 利用中断来管理每个 LED 的激活和 DAC 输出电平时序以及 256 个 ADC 样本捕获的开始时间。
- 在存储从两个 LED 捕获的 ADC 数据并收到来自 T1 的第二个中断后，MSPM0L1306 会使两个 LED 停用以节省电量并开始数据处理和计算。
- 在此期间，ADC 可以在周期重复之前切换至监控内部电压和/或发送串行数据。

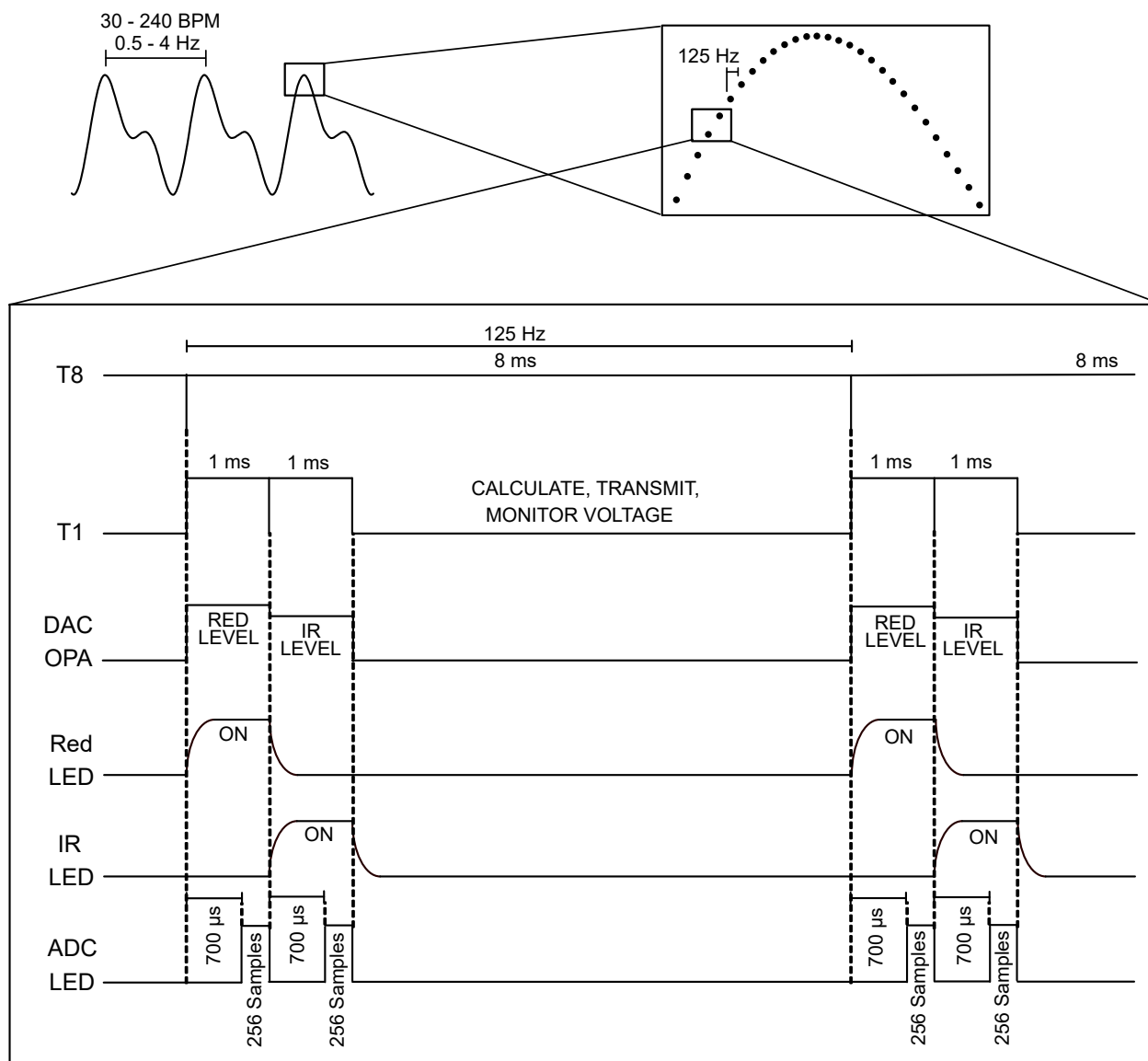


图 2-5. TIDA-010267 时序图

2.2.5.2 过采样和数字滤波可扩大动态范围

TIDA-010267 参考设计的主要特性在于出色的动态范围，这可以通过数字过采样和滤波来实现。MSPM0L1306 的高速 12 位 ADC 可以根据用户的选择进行过采样，从而将位数增加到 16。这样一来，设计就可以利用更高的 ENOB，从而扩大动态范围。为了进一步提高 ADC 信号的 ENOB，本设计中使用了幅度可调的移动平均 FIR 滤波器来滤除环境噪声。由于 PPG 信号在如此低的频率下工作，因此这些扩大动态范围的方法非常有效。节 3 中详细介绍了过采样对动态范围的影响。

2.2.5.3 计算生命体征

由于过采样数据包含直流和交流信号组合，因此采用了能够隔离直流信号的简单数字低通 IIR 滤波器。该滤波器将其输入与其上一个输出值之间的差值的一小部分添加到其上一个输出值中以形成新的输出值。输入发生阶跃变化时，输出会在一段时间内动更正为与输入相同。变化率由用户确定的可编程系数控制。TIDA-010267 使用通过实验确定的系数。检测 PPG 交流信号中波峰和波谷的算法用于记录信号峰值之间的周期，从而记录心跳的周期。这些相同的检测与直流隔离一起用于计算 R 并最终计算血氧饱和度 (%SpO₂)。

2.3 重点产品

2.3.1 MSPM0L1306

MSPM0L130x 微控制器 (MCU) 属于高度集成的超低功耗 32 位 MSPM0 MCU 系列，该系列基于增强型 Arm® Cortex®-M0+ 内核平台，工作频率最高可达 32MHz。这些成本优化型 MCU 提供高性能模拟外设集成，支持 -40°C 至 125°C 的扩展工作温度范围，并在 1.62V 至 3.6V 的电源电压下运行。MSPM0L130x 器件提供高达 64KB 且具有高达 4KB SRAM 的嵌入式闪存程序存储器。这些 MCU 包含精度高达 ±1.2% 的高速片上振荡器，无需外部晶体。其他特性包括 3 通道 DMA、16 位和 32 位 CRC 加速器，以及各种高性能模拟外设，例如一个具有可配置内部电压基准的 12 位 1.68MSPS ADC、一个具有内置基准 DAC 的高速比较器、两个具有可编程增益的零漂移零交叉运算放大器、一个通用放大器和一个片上温度传感器。这些器件还提供智能数字外设，例如四个 16 位通用计时器、一个窗口化看门狗计时器和各种通信外设 (包括两个 UART、一个 SPI 和两个 I2C)。这些通信外设为 LIN、IrDA、DALI、Manchester、Smart Card、SMBus 和 PMBus 提供协议支持。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

TIDA-010267 的关键性能在 TI 实验室进行了测试。本节说明了使用的设备、测试过程和结果。

3.1 硬件要求

表 3-1. TIDA-010267 硬件要求

设备	说明
TIDA-010267	带 LED 的夹式装配演示
TI XDS110 JTAG 调试探针	用于编程 MSPM0L1306 的调试探针
FTDI TTL-234X-3V3	具有 +3.3V 信号电平的 USB 转 UART 电缆
2.5V 基准电压	ADC 范围内用于测试 ADC 性能的直流信号



图 3-1. TIDA-010267 用于测试的装配演示

3.2 软件要求

3.2.1 TI GUI

从 TI 开发人员专区库访问 [TI 脉搏血氧仪演示 GUI](#)。

通过选择“Pulse Oximeter Demo GUI”，将打开一个新选项卡，其中显示了有关 TIDA-010267 的信息，该 GUI 中还有一个附加选项卡，可用于访问数据图和生命体征。

3.2.2 CCS 项目

TI 脉搏血氧仪演示 CCS 工程可通过以下方法使用：通过 *Project* 选项卡 导航到最新的 MSPM0 SDK 文件夹（文件路径 `mspm0_sdk_1_10_00_05\examples\nortos\LP_MSPM0L1306\demos`），然后选择 *Import CCS Projects*。

该 CCS 工程让用户可以根据演示所需的规格和功能修改参数。

3.2.3 模拟工程师计算器

要下载该计算器，请访问 [TI 模拟工程师计算器](#)。

该计算器具有多种适用于 ADC 和 OPA 的模拟仿真和数据分析工具，并让用户能够对数据和参数进行实验，以满足设计需求。*Data Convertors* 下的数据分析工具套件用于绘制具有 TIA OPA 输入的 ADC 性能图。

3.3 测试设置

图 3-2 展示了控制代码参数并显示串行数据所需的 UART 和调试连接。

XDS1100 调试探针可使用 10 引脚 JTAG 连接器连接到 PCB 上的适配器。请注意图 3-2 中所示的方向。

使用黑色、橙色和黄色导线以及 UART 转 USB 电缆建立 UART 连接。

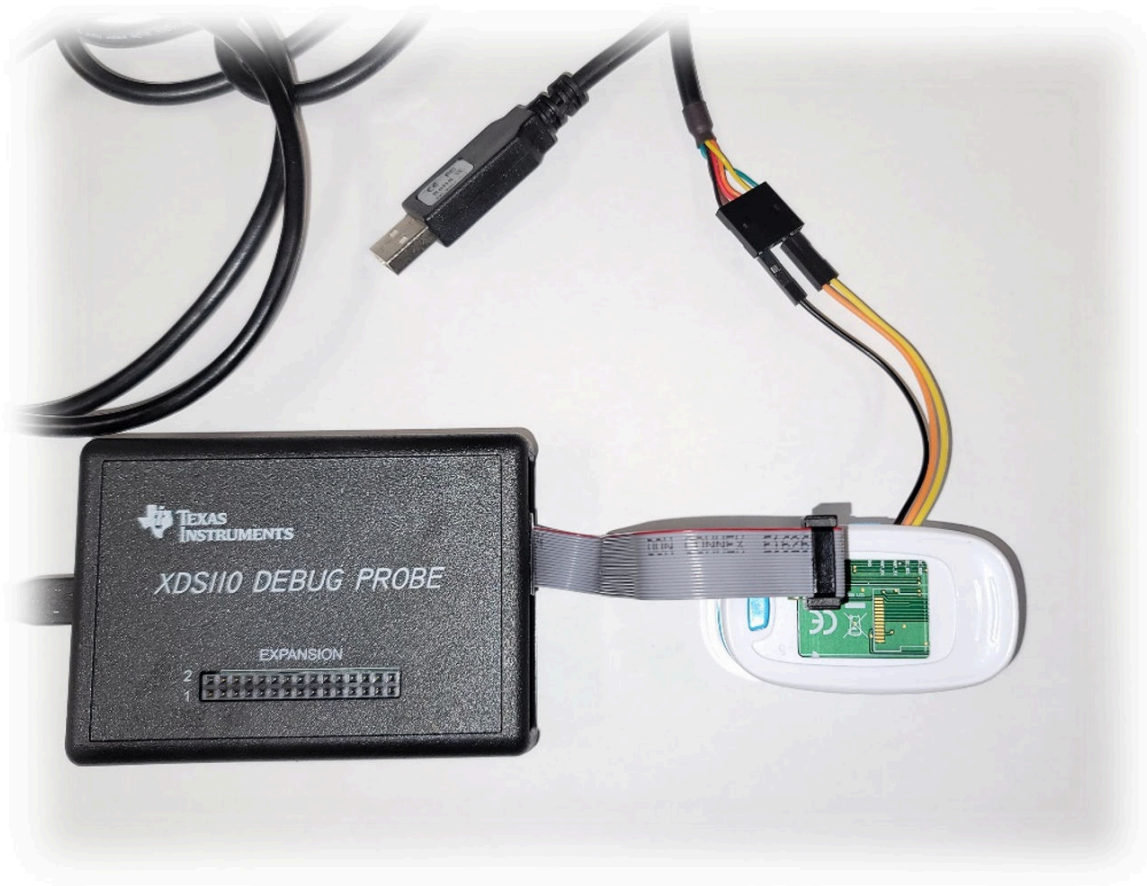


图 3-2. TIDA-010267 用于测试的脉搏血氧仪演示连接

3.4 测试结果

将脉搏血氧仪演示连接至计算机并运行 GUI 图形时，会生成图 3-3。图上显示了清晰的信号，并准确地显示了用户的 99% SpO₂ 和 62BPM。

该软件中包含以下图形选项：

- 过采样波形图：展示了过采样到 16 位时 ADC 的满标量程，以表明直流和交流分量。
- 红外波形图：展示了 IR 信号交流分量的放大视角，以强调高清晰度
- 红色波形图：展示了 IR 信号交流分量的放大视角，以强调高清晰度

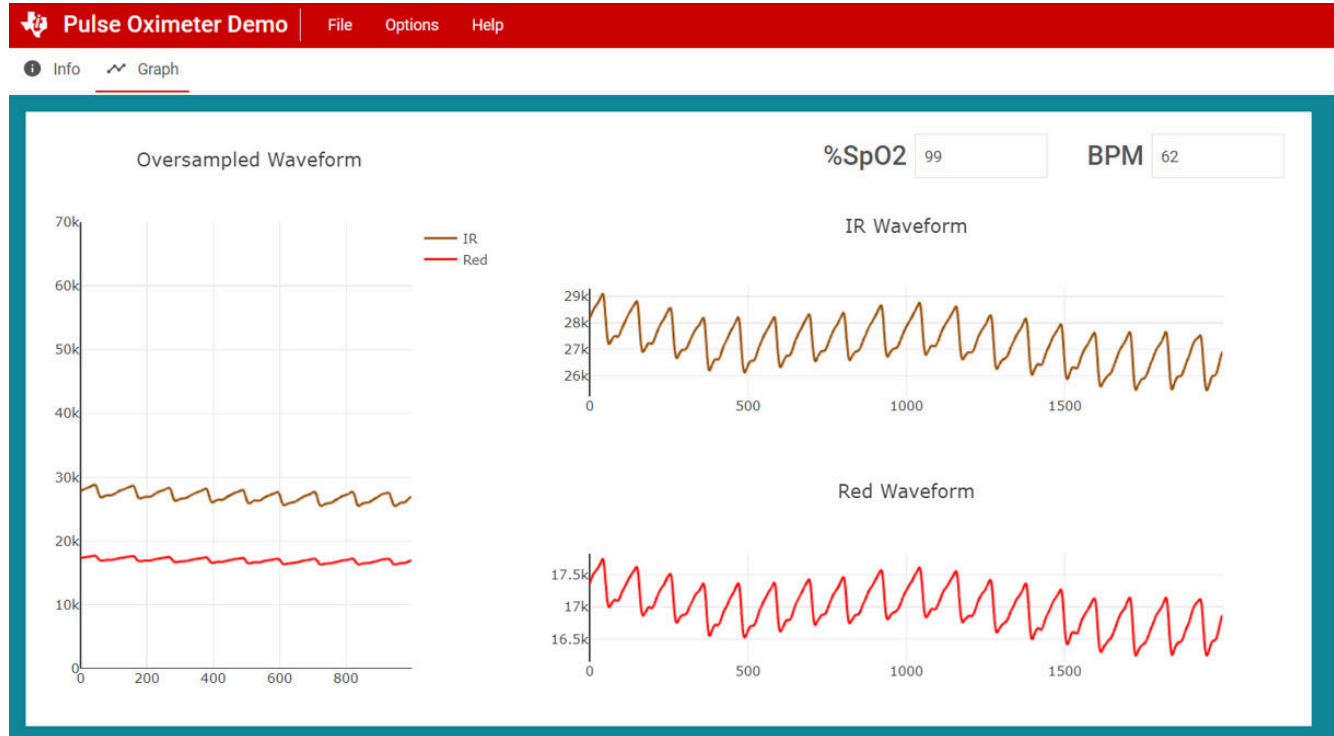


图 3-3. TIDA-010267 用于测试和显示的脉搏血氧仪演示 GUI

将 2.5V 电压基准连接到 OPA + ADC 输入以进行测试，使用户能够连续采集数据以在计算机上进行分析，并生成图 3-4 和图 3-5。在大于 90dB 的动态范围下，实现了 15.3 位 ENOB，分别以低噪声本底和低偏差直方图形式显示。

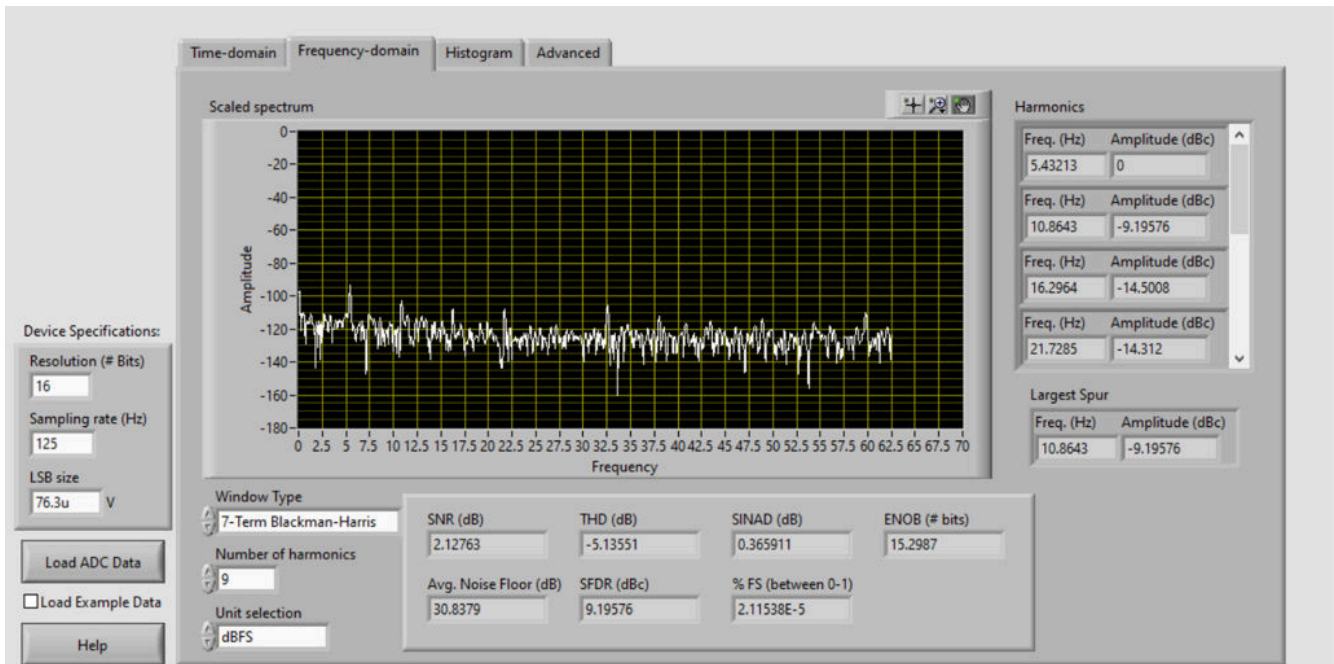


图 3-4. MSPM0L1306 16 位过采样频域噪声图

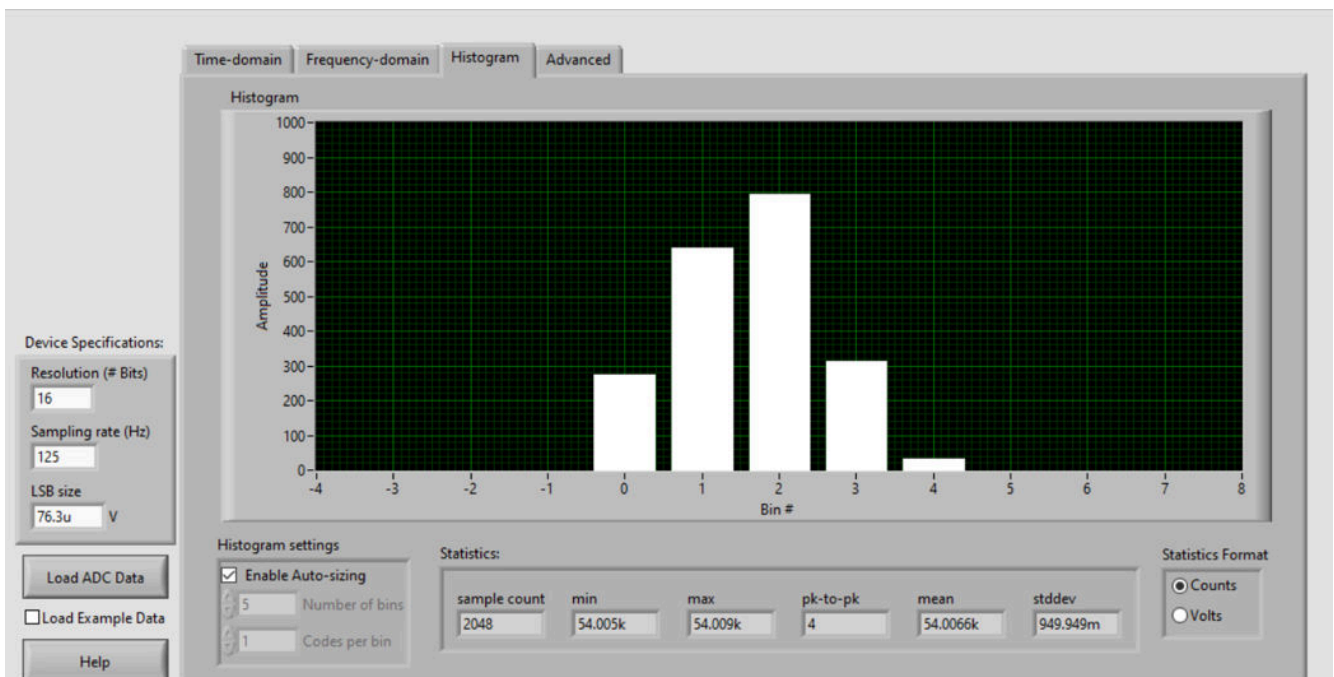


图 3-5. MSPM0L1306 16 位过采样频域噪声直方图

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010267](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010267](#) 中的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

Code Composer Studio™

Code Composer Studio 是适用于 TI 微控制器和处理器的集成开发环境 (IDE)。Code Composer Studio 包含一整套用于开发和调试嵌入式应用的工具。Code Composer Studio 可在 Microsoft® Windows®、Linux® 和 macOS® 桌面上进行下载。此外，可以通过访问 [TI 开发人员专区](#) 来在云中使用该产品。

软件

[TIDA-010267- MSPM0L130x-FW](#)

借助这一可下载的固件，[TIDA-010267](#) 参考设计上的板载 MSPM0L1306 允许使用集成模拟块实现单芯片低成本脉搏血氧仪设计，以演示 PPG 波形和生命体征测量。

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[MSPM0L130x 混合信号微控制器](#) 数据表
2. 德州仪器 (TI)，[采用 Arm® Cortex®-M0+ MCU 的低成本脉搏血氧仪和血压计](#) 视频
3. 德州仪器 (TI)，[使用高度集成的低成本 MSPM0 MCU 简化脉搏血氧仪设计](#) 应用简报
4. 德州仪器 (TI)，[基于 MSP430FR2355 的单芯片脉搏血氧仪设计](#) 应用报告

4.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的 [使用条款](#)。

4.5 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

Microsoft® and Windows® are registered trademarks of Microsoft Corporation.

Linux® is a registered trademark of Linus Torvalds.

macOS® is a registered trademark of Apple Inc.

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司