

J.D. Crutchfield, Justin Yin, and Colin Hice

摘要

从基础的安全传感器到完全交互的摄像系统，运动检测在许多电池供电的楼宇自动化应用中都很重要。这些系统依赖于精确的低功耗运动检测功能，能够使性能强大的处理器和无线电在不需要时保持关闭状态，从而最大限度延长电池寿命。此设计使用模拟被动红外 (PIR) 运动传感器和 MSPM0L1306 提供一种低功耗、高性能且极具成本优势的运动检测解决方案。MSPM0L1306 具有集成运算放大器 (OPA) 和数模转换器 (DAC)。OPA 集成在 MSPM0 内部，可以提供 PIR 传感器的整个信号链。OPA 可由软件进行配置，让您轻松调节信号链以实现更高的灵敏度和更宽的范围，提供数字反馈环路，并优化低功耗性能。本应用手册将介绍采用 MSPM0L1306 的超低功耗、高性能 PIR 设计原理和测试结果。

本文档中提到的演示代码可在 [MSPM0 SDK](#) 中找到。

内容

1 PIR 设计说明.....	2
1.1 PIR 传感器.....	2
1.2 PIR 信号链.....	5
2 硬件及原理图.....	7
2.1 MSPM0L1306.....	7
2.2 MSPM0 PIR Boosterpack.....	8
3 软件.....	9
3.1 软件架构.....	10
3.2 软件流程图.....	11
3.3 数据处理.....	12
4 结果.....	15
4.1 功率曲线和电流消耗.....	15
4.2 检测性能.....	16
5 总结.....	18
6 参考.....	18

插图清单

图 1-1. 红外照片.....	2
图 1-2. PIR 运动传感器图示.....	3
图 1-3. PIR 传感器输出信号.....	4
图 1-4. 传统 PIR 信号链.....	5
图 1-5. 传统信号链与无电容器信号链的比较.....	5
图 1-6. 无电容器信号链.....	6
图 1-7. 集成到 MSPM0L1306 中的 PIR 信号链.....	6
图 2-1. MSPM0 Launchpad 和 PIR Boosterpack.....	8
图 2-2. M0L PIR Boosterpack 原理图.....	9
图 3-1. 软件架构.....	10
图 3-2. 软件流程图.....	11
图 3-3. PIR 传感器信号随时间的漂移.....	12
图 3-4. 放大的 PIR 传感器信号.....	13
图 3-5. PIR 信号尖峰.....	13
图 3-6. PIR 信号纹波/噪声.....	14

图 4-1. MSPM0L13xx PIR 演示软件的功率曲线.....	15
图 4-2. MSPM0 PIR 运动测试设置示例.....	16
图 4-3. 成人位于 5 米 (16.4 英尺) 处, 速度 1m/s.....	17
图 4-4. 成人位于 9 米 (29.5 英尺) 处, 速度 1m/s.....	17
图 4-5. 成人位于 36.5 英尺 (11.1 米) 处, 速度 1m/s.....	18

商标

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere.
所有商标均为其各自所有者的财产。

1 PIR 设计说明

1.1 PIR 传感器

可以使用多种不同类型的传感器来检测基本运动，但过去十年最常见的解决方案可能是使用 PIR 传感器。PIR 传感器基于维恩位移定律；根据该定律，不同温度下的黑体辐射曲线将在与温度成反比的不同波长下达到峰值。基本上，如果观察红外频谱，可以看到，不同温度下的物体会辐射不同水平的能量。图 1-1 展示了在使用红外摄像头拍摄的图像中看到的結果。

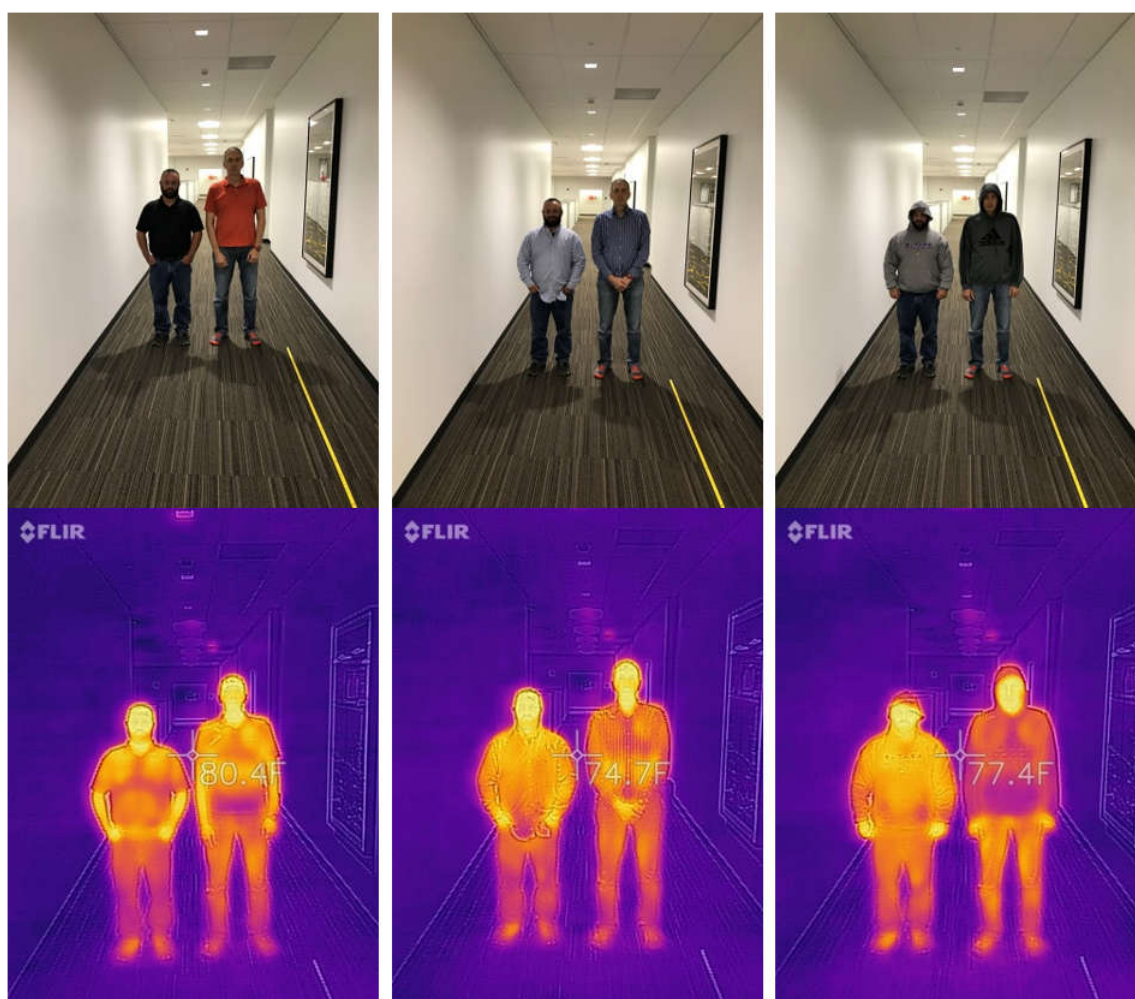


图 1-1. 红外照片

PIR 运动检测器是用于检测人或动物的一般运动的无源传感器。PIR 运动检测器不会产生上面红外图像中显示的所有像素，通常只包含两个检测元件，如图 1-2 所示。这两个检测元件在位置上会相互偏移，因此它们的视场 (FoV) 略有不同。每个传感器都会对自身 FoV 中的一般温度变化做出响应。只有两个传感器虽然听起来可能很有限，但分析这两个传感器元件产生的组合信号可以提供大量有价值的信息。

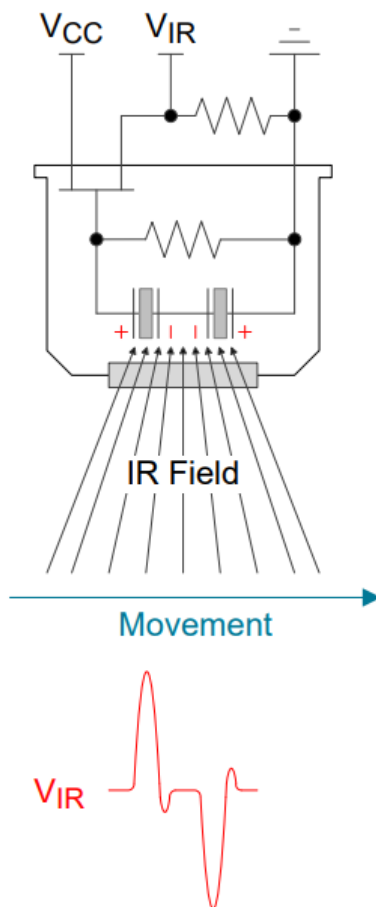


图 1-2. PIR 运动传感器图示

当人在两个视场中移动，从一个传感器元件的 FoV 经过下一个传感器元件的 FoV 时，传感器将从检测元件输出波形。此波形如图 1-3 所示。在图 1-3(a) 中可以看到，该信号的方向可以告诉我们运动的方向。在图 1-3(b) 中，信号的幅度可以指示物体的距离，甚至还可能指示人/动物的体型。最后，在 3C 中，运动速度也会影响看到的波形速度。在具体走廊中，行走的人与奔跑的人将具有不同的特征。成人与儿童或宠物的特征也不同。

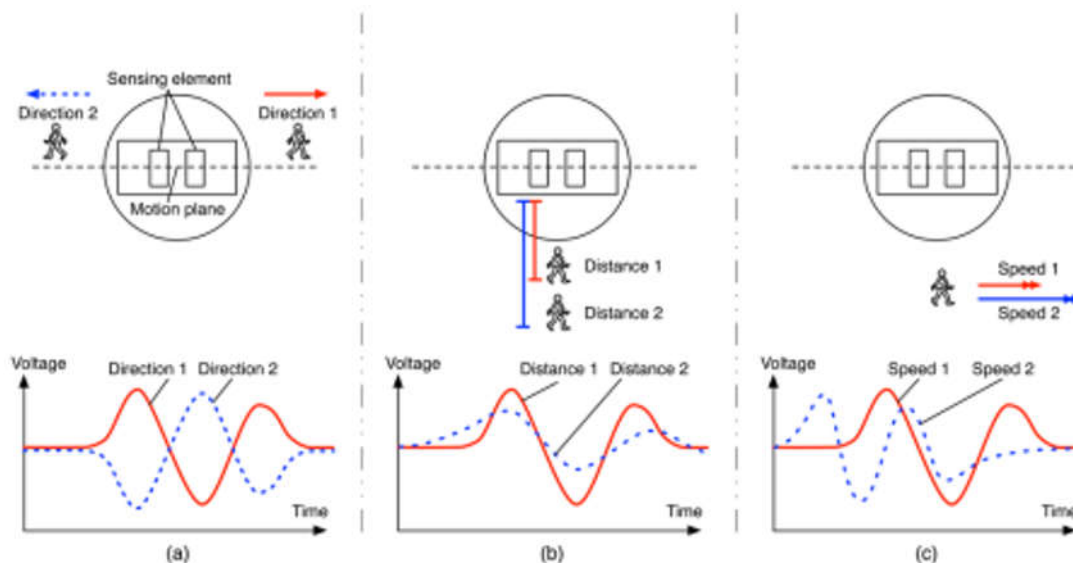


图 1-3. PIR 传感器输出信号

在为特定应用设计运动检测器时，通常会选择两个主要规格：最大范围和最小运动速度。一般来说，PIR 运动检测器会尝试检测最远 10-12 米的距离，运动频率范围通常为 0.7Hz 至 30Hz。应用所需的确切性能将影响系统在信号调节方面以及软件阈值设置中需要的灵敏度。希望检测的距离越远，信号幅度就越小，信噪比也越低。对于远处物体的运动，PIR 传感器输出端的典型信号电平为微伏级，因此需要对信号进行放大和滤波。最低速度越低，就越难缓慢滑过监控器，但系统更容易出现由环境变化引起的误触发。

通常很不希望出现误检，在电池供电的应用中更是如此。通常，PIR 运动检测会在应用处于低功耗模式时进行监控。误检将唤醒系统的其余部分或触发错误警报。在设计系统时，必须权衡该风险与上述灵敏度。过去，PIR 的信号链是根据具体用例设计的，并在硬件中采用固定的增益和带宽，这意味着其具有固定的检测距离和速度。幸运的是，使用 MSPM0L1306 可以集成信号链，因此实际可以通过软件对其进行配置，进而提供更高的灵活性，无需更改硬件的任何部分。

最后，市场上有模拟和数字两种 PIR 传感器。数字传感器集成了其信号链和检测算法。此类传感器更易于集成到应用中，但通常会增加大量成本，因此不适合低成本应用。本文档重点介绍模拟 PIR 传感器，因为这种传感器可降低总体系统成本，并可轻松与内置 OPA 集成。

1.2 PIR 信号链

1.2.1 传统运动检测信号链设计

图 1-4 展示了传统 PIR 运动检测器信号链。PIR 传感器的信号经过一系列增益带通滤波器（通常包含直流阻断电容器）馈送到一组比较器以进行低侧和高侧波形检测（用作窗口比较器）。

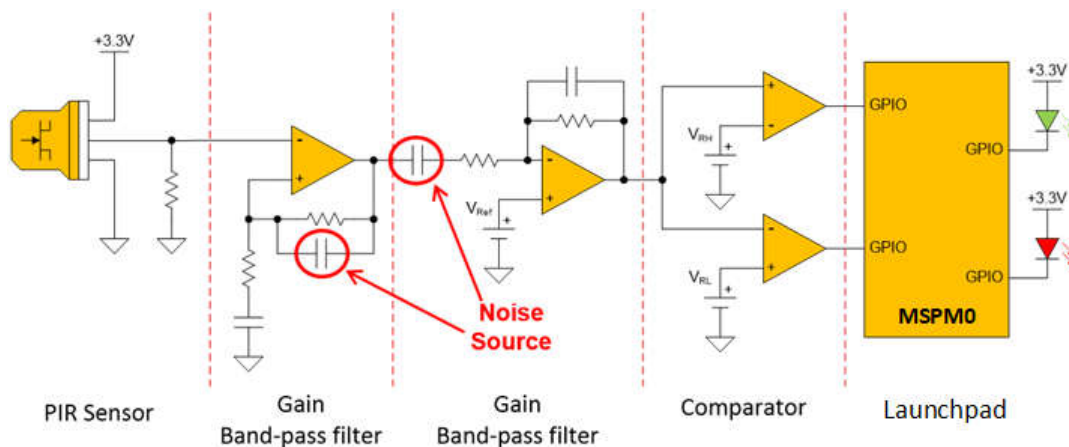


图 1-4. 传统 PIR 信号链

如简介中所述，此信号链是固定且受限的。对于带通滤波器，需专门针对特定的检测范围和运动速度来配置增益和截止频率。典型截止频率约为 0.7Hz 至 30Hz，总体信号增益可高达 1000 倍。

我们在调查过程中发现此信号链的另一个缺点是，这些直流滤波电容器实际上会成为信号链中非常大的噪声源。陶瓷表面贴装电容器通常由钛酸钡制成，而钛酸钡具有压电效应，这意味着任何噪声或振动实际上都会电容器上产生小噪声信号。处于如此低频率的钽电容器也会给信号带来噪声。在信号链中将此噪声与高达 1000 倍的增益耦合可能会返回非常差的信噪比。在图 1-5 中，PIR 传感器的信号被馈入上述信号链以及使用 MSP 并联的无电容器信号链。使用无电容器电路时，更容易看到运动信号。

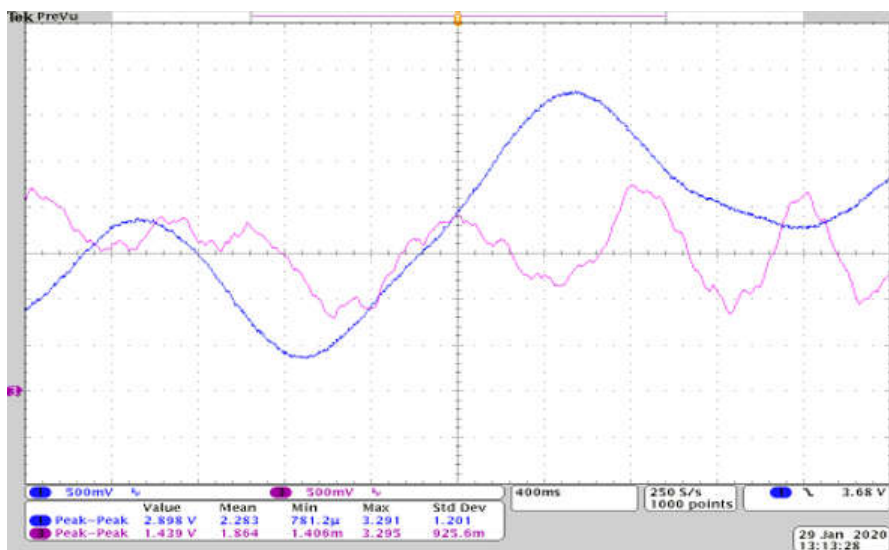


图 1-5. 传统信号链与无电容器信号链的比较

1.2.2 无电容器信号链设计

图 1-6 展示了无电容器信号链的简化版本。现在的信号链大多是纯粹的缓冲和增益级。为了取消传统电路中会给系统增加噪声的直流阻断电容器，需使用 DAC 对这些级进行偏置。信号馈送到模数转换器 (ADC)，而不是使用比较器，因此可以使 DAC 的反馈环路跟踪环境温度的变化，并支持对信号进行数字滤波。

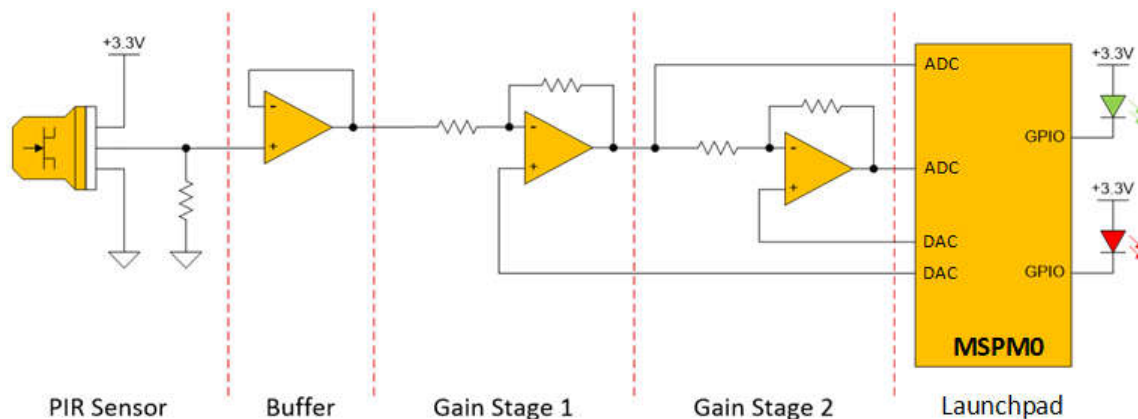


图 1-6. 无电容器信号链

MSPM0 解决方案的最大优势是整个信号链集成在 MCU 中，并可通过软件进行配置。MSPM0L1306 是一种极具成本效益的解决方案，其中包含两个运算放大器 (OPA)。每个 OPA 都是零漂移、零交叉斩波运算放大器，具有 1-32 倍的可配置增益。MSPM0L1306 还有一个 8 位基准 DAC 可用于对信号链的一级进行偏置。在第二级使用通用放大器 (GPAMP) 和计时器输出通道构建了一个 PWM DAC。图 1-7 展示了利用 MSPM0L1306 内部完整信号链改进后的 PIR 传感器接口。OPA 可以在芯片内部链接在一起，直接连接到 ADC，并且可以进行关断/下电上电以实现尽可能低的睡眠电流。

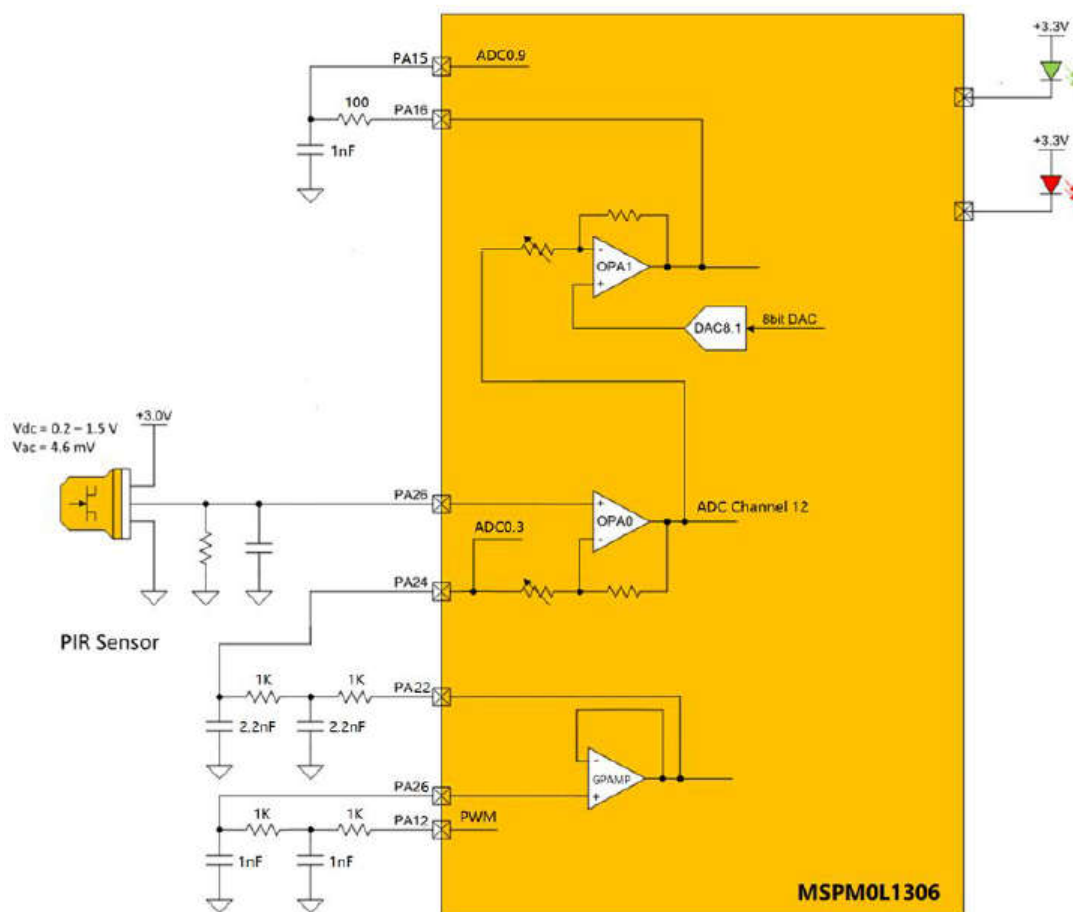


图 1-7. 集成到 MSPM0L1306 中的 PIR 信号链

2 硬件及原理图

2.1 MSPM0L1306

用于实现这种创新型 PIR 运动检测器设计的主要 MCU 为 [MSPM0L1306](#)。MSPM0L1306 属于 MSP 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。这些低成本 MCU 提供高性能模拟外设集成，支持 -40°C 至 125°C 的工作温度范围，并在 1.62V 至 3.6V 的电源电压下运行。

MSPM0L134x 和 MSPM0L130x 器件提供高达 64KB 的嵌入式闪存程序存储器 and 高达 4KB 的 SRAM。这些 MCU 包含精度高达 $\pm 1.2\%$ 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（包括两个通用异步接收器/发送器 (UART)、一个串行外设接口 (SPI) 和两个互连集成电路 (I2C)）。这些通信外设为 LIN、IrDA、DALI、Manchester、Smart Card、SMBus 和 PMBus 提供协议支持。

- 内核
 - Arm 32 位 Cortex-M0+ CPU，频率高达 32MHz
- 存储器
 - 高达 64KB 的闪存
 - 高达 4KB 的 SRAM
- 高性能模拟外设
 - 一个 12 位 1.68Msps 模数转换器 (ADC)
 - 两个零漂移、零交叉斩波运算放大器 (OPA)
 - 集成可编程增益级 (1-32x)
 - 一个通用放大器 (GPAMP)
 - 一个具有 8 位基准 DAC 的高速比较器 (COMP)
 - ADC、OPA、COMP 和 DAC 之间的可编程模拟连接
- 经优化的低功耗模式
 - 运行：71 μ A/MHz (CoreMark)
 - 待机：32kHz 16 位计时器运行、SRAM/寄存器完全保留且 32MHz 时钟唤醒时间为 3.2 μ s 的情况下为 1.0 μ A
 - 关断：61nA，具有 IO 唤醒能力
- 时钟系统
 - 精度为 $\pm 1.2\%$ 的内部 4MHz 至 32MHz 振荡器 (SYSOSC)

MSPM0L134x 和 MSPM0L130x MCU 配套了强大的硬件和软件生态系统，包括 [Launchpad 开发套件](#)、MSPM0 软件开发套件 (SDK)，后者作为 [TI Resource Explorer](#) 的一部分提供。MSPM0 MCU 还有各种在线配套资料、[MSPM0 Academy](#) 培训，以及通过 [TI E2E™ 支持论坛](#) 提供的在线支持。

2.2 MSPM0 PIR Boosterpack

MSPM0 PIR Boosterpack 不可订购，但下面提供了原理图。图 2-1 展示了 MSPM0L Launchpad 上的 PIR Boosterpack。

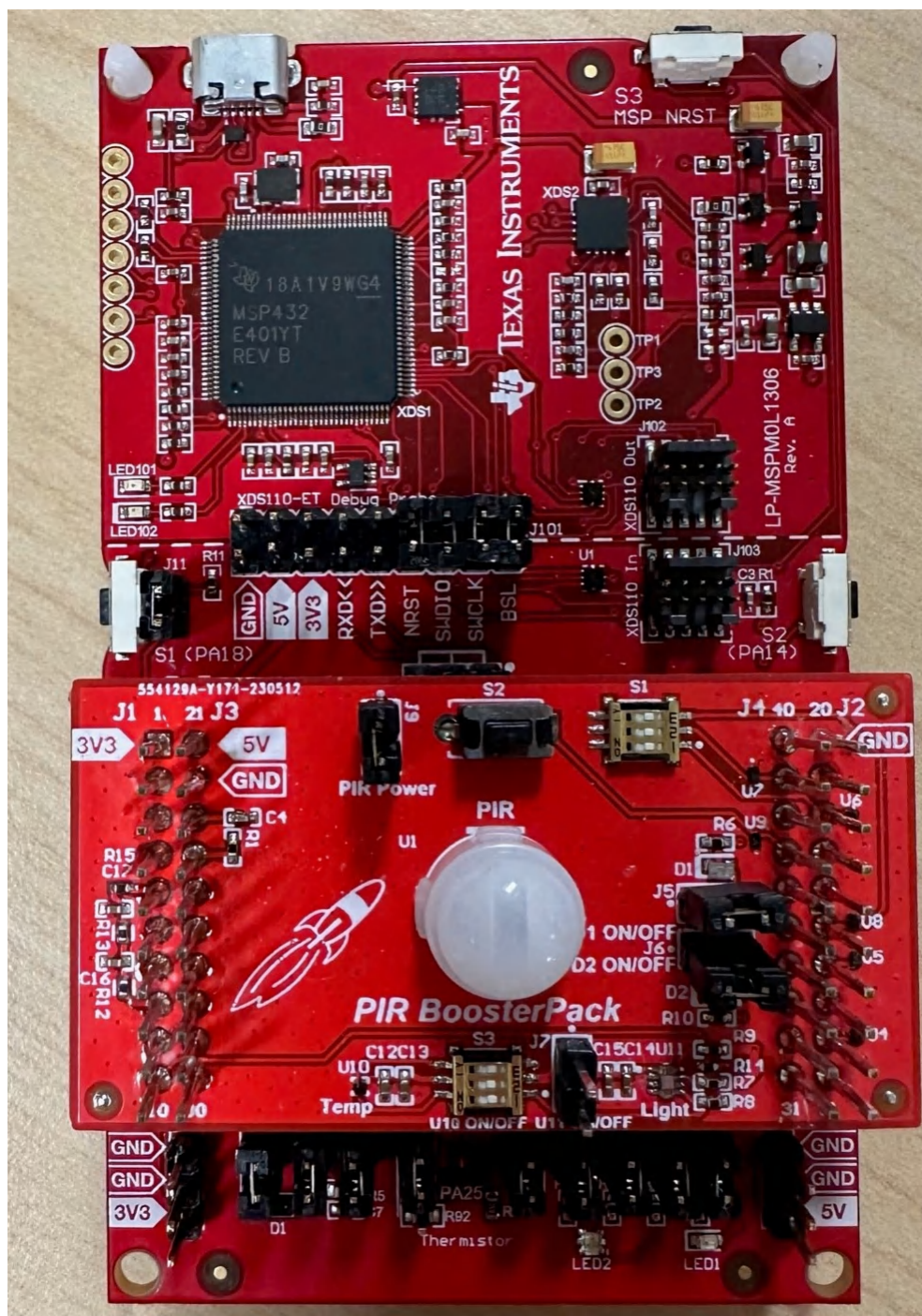


图 2-1. MSPM0 Launchpad 和 PIR Boosterpack

图 2-2 展示了作为概念验证构建的原型板原理图，并提供了本文档中的性能数据示例。



软件是 **MSPM0 PIR** 运动检测器中功能强大的组成部分。如前所述，软件将控制模拟信号链和反馈环路。此外，还会通过 **ADC** 对信号进行采样，因此能够将数字滤波器技术应用于检测和反馈环路。本应用手册包含 **PIR** 运动检测演示的源代码。该演示软件旨在加快采用 **MSPM0L1306 MCU** 的 **PIR** 解决方案的开发，但该软件只是完整系统的一部分，仅用作参考。

3.1 软件架构

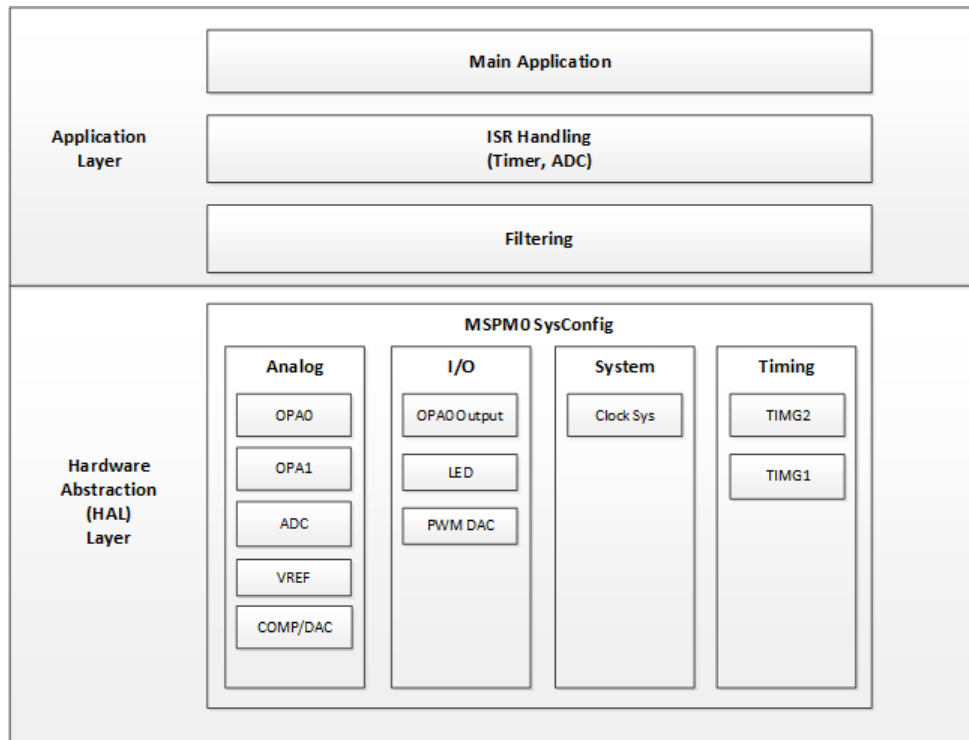


图 3-1. 软件架构

该软件的架构分为两层：

- 应用层使用默认配置实现主要功能，并处理数据的初始化和处理。
- HAL 层提供硬件抽象以连接 MSPM0L1306 的不同外设。HAL 中的外设由 SysConfig 进行配置和初始化，旨在实现易于定制的解决方案。

3.2 软件流程图

图 3-2 展示了软件总体行为的流程图。演示软件唤醒并每秒执行该完整循环 20 次。测量大约需要 90μs，简单的数据处理还需要 40-60μs。在另外 99.5% 的时间内，模拟关闭，MSPM0 在待机模式下休眠，消耗的电约为 1uA。功率曲线一节对该流程图进行了更深入的说明。

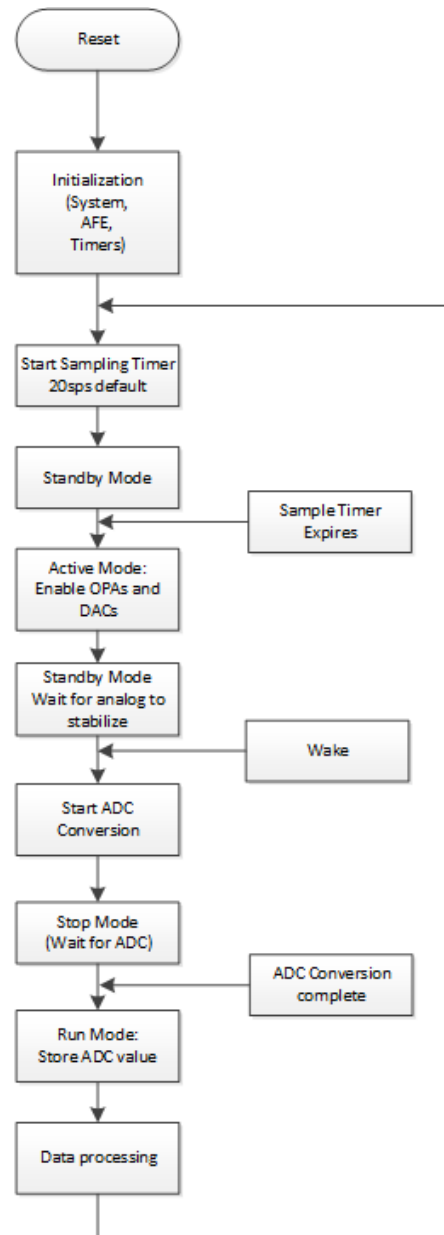


图 3-2. 软件流程图

3.3 数据处理

3.3.1 数字信号调节

3.3.2 使用低通滤波器处理温漂

图 3-3 所示为随着环境温度和 PIR 传感器体温波动，PIR 信号随时间变化的情况。此处不存在运动检测事件，只有信号漂移。在软件中会对采集的数据样本应用数字低通移动平均滤波器。基于这个移动平均滤波器可对 DAC 进行调整以补偿随着时间推移的这种基线趋势，这样会消除信号的大部分直流分量。如此，便可通过 MSPM0 的 12 位 ADC 实现更高的动态范围，因为它会主动对信号链的环境温度进行补偿，使信号始终处于 ADC 测量范围内的中间位置。软件可以使用 ADC 的读数和当前 DAC 补偿值来确定绝对数字输出代码。

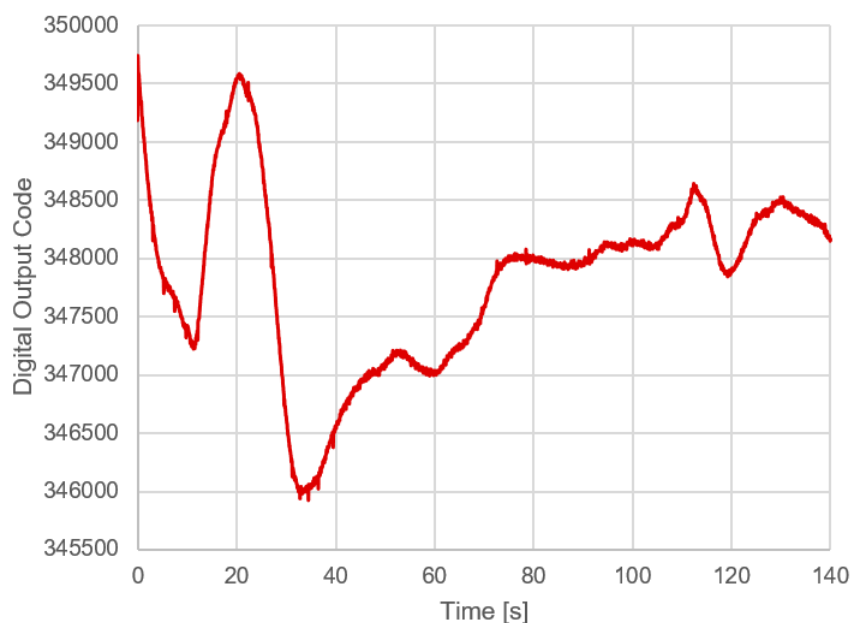


图 3-3. PIR 传感器信号随时间的漂移

3.3.3 尖峰和噪声

如果放大数据波形，您将看到信号仍然有很大的噪声。能消除的噪声越多，信噪比就越好。信号链经过改进以降低噪声，但由于您使用 **ADC** 对信号进行采样，因此可以对信号执行额外的数据处理。对于软件来说，此噪声分为两种不同类型：尖峰和纹波。

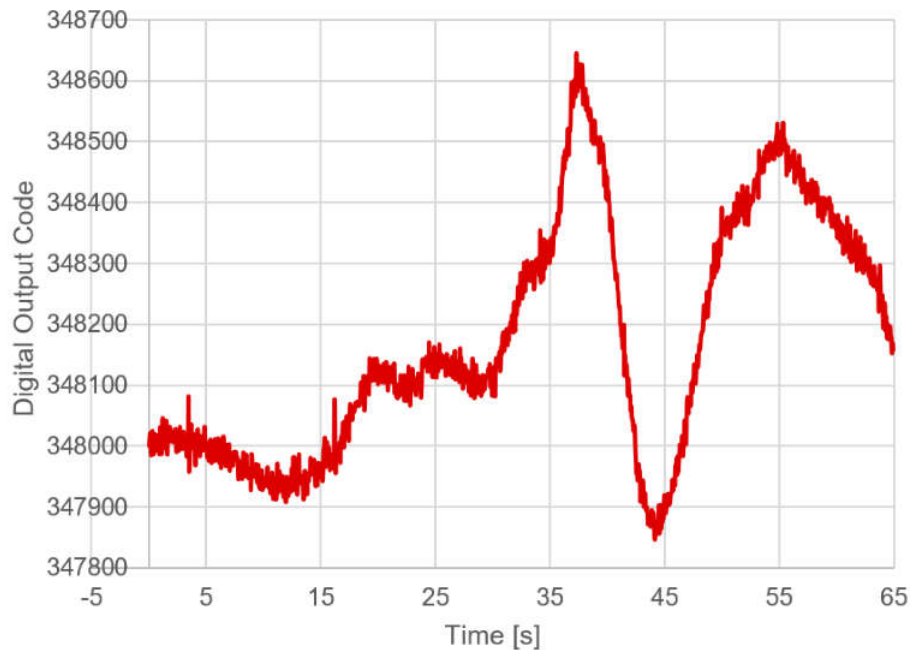


图 3-4. 放大的 PIR 传感器信号

图 3-5 展示了数据中两个相当大的随机高频尖峰。样本由“去尖峰”功能进行处理。该功能会尝试识别和消除这些尖峰并提高性能。该功能主要查看在一个窗口中捕获的最后几个样本，删除最大值和最小值，从而平滑掉数据中出现的任何极端“尖峰”。

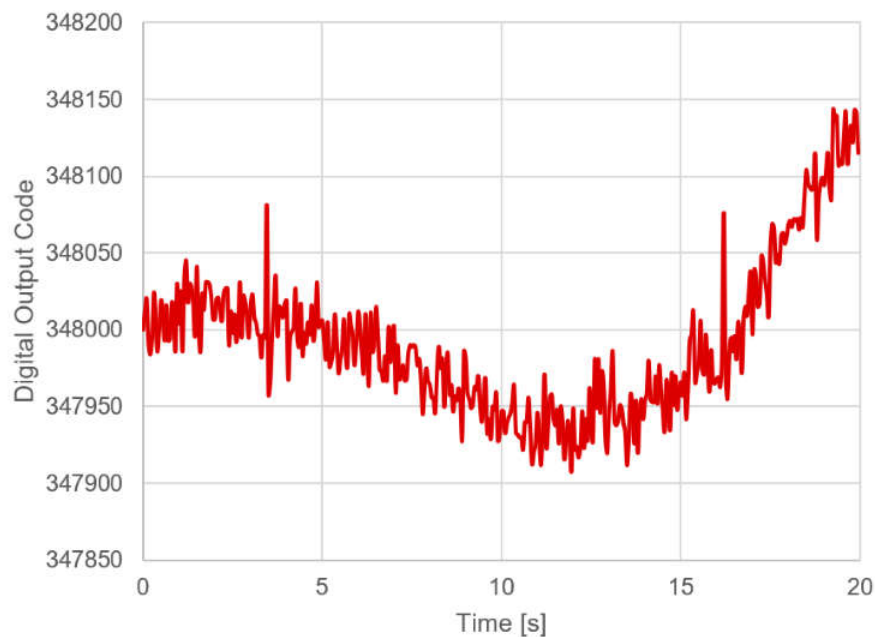


图 3-5. PIR 信号尖峰

图 3-6 所示为纹波和白噪声。有一个用于“去纹波”功能的预留空间，当前的示例软件尚未实现此功能。下面的所有数据都是在没有此功能的情况下捕获的。

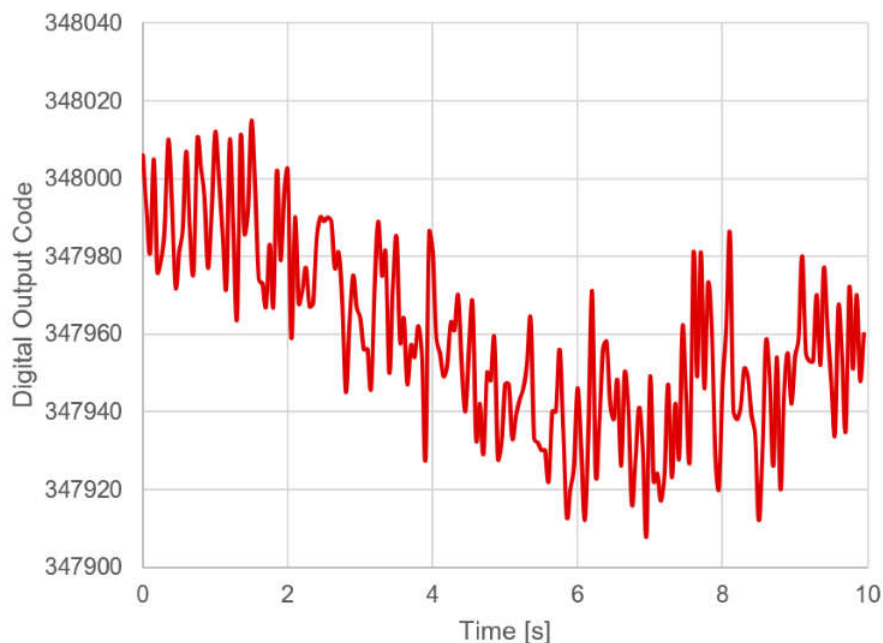


图 3-6. PIR 信号纹波/噪声

3.3.4 运动检测功能

为了检测是否存在运动，软件将经过滤波功能处理的最新样本发送给信号分析功能。此功能会在一个指数移动平均滤波器中使用先前的样本。这个滤波器用于输出基准电平。随后还有几个功能会将样本与移动平均滤波器的这一基准输出进行比较。如果这两个样本之间的差值变得足够大且足够快，则会判定已检测到运动。此处便是软件中可以调整解决方案整体行为和灵敏度的主要位置。

4 结果

4.1 功率曲线和电流消耗

系统的功率曲线最终由软件流程进行控制。图 4-1 展示了示波器上捕获的一些时序和信号，并已标注以说明在软件流程图中所处的位置。从待机状态唤醒、启用模拟、等待模拟和测量信号稳定并完成 ADC 对话需要大约 $90\ \mu\text{s}$ 。蓝线是 MSPM0L13xx 解决方案所需的 PWM DAC 的输出，节 1.2 中对此进行了讨论。黄线是来自 PIR 信号链末端的测量信号，可以看到该信号正好在 ADC 转换开始时实现稳定。测量后，模拟关闭，数据处理完成。然后，MCU 进入待机状态约 50ms。

最终，该解决方案在以 20SPS 运行时的平均测量值约为 $12\ \mu\text{A}$ 。此次功率测量涉及 MSPM0L1306、集成信号链以及 PIR 传感器的功率。

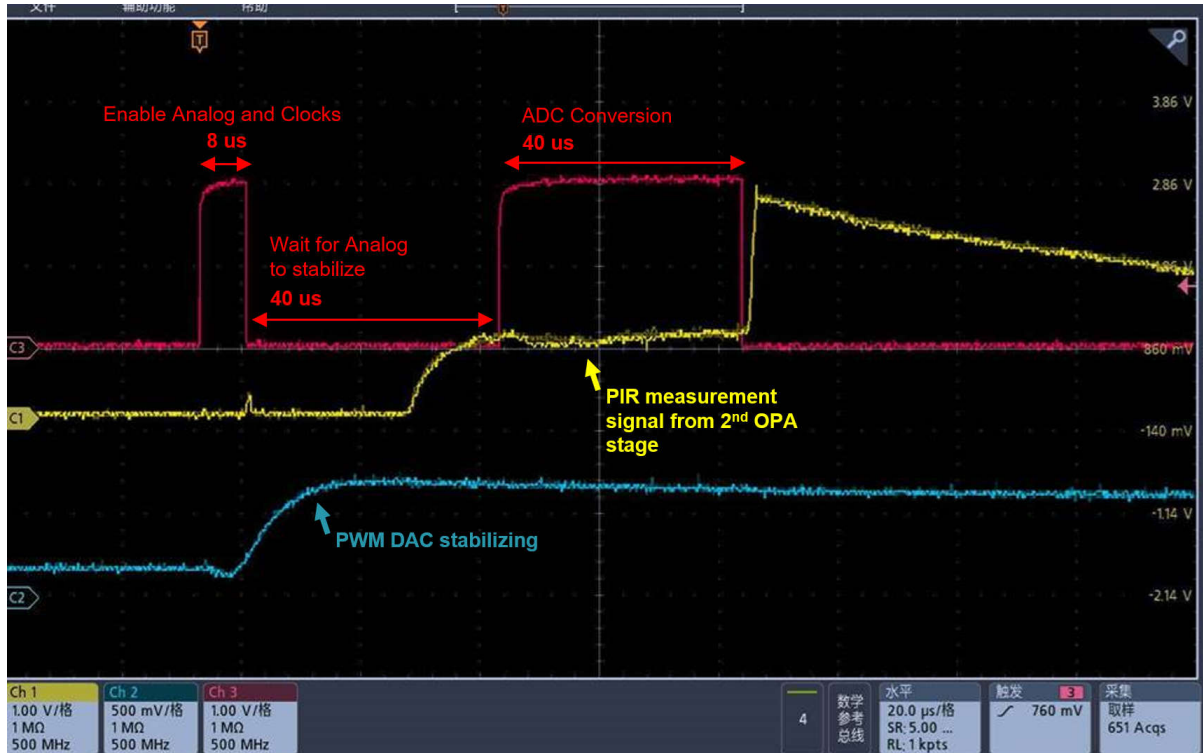


图 4-1. MSPM0L13xx PIR 演示软件的功率曲线

4.2 检测性能

为了测试 MSPM0 PIR 运动检测器的范围，该器件放置在走廊尽头的三脚架上。一个成年人将在设定距离处以大约 1m/s 速度从一侧走到另一侧，然后分析由此产生的信号绝对值。用于检测运动的数字输出代码的阈值设置为 30。运动检测器能够可靠地检测到从 5m 距离处开始的运动，并且在设定的测试条件下检测向外 9m 距离处的运动时灵敏度会降低。通过后续软件开发以及使用不同的 PIR 透镜可以进一步优化这些结果。

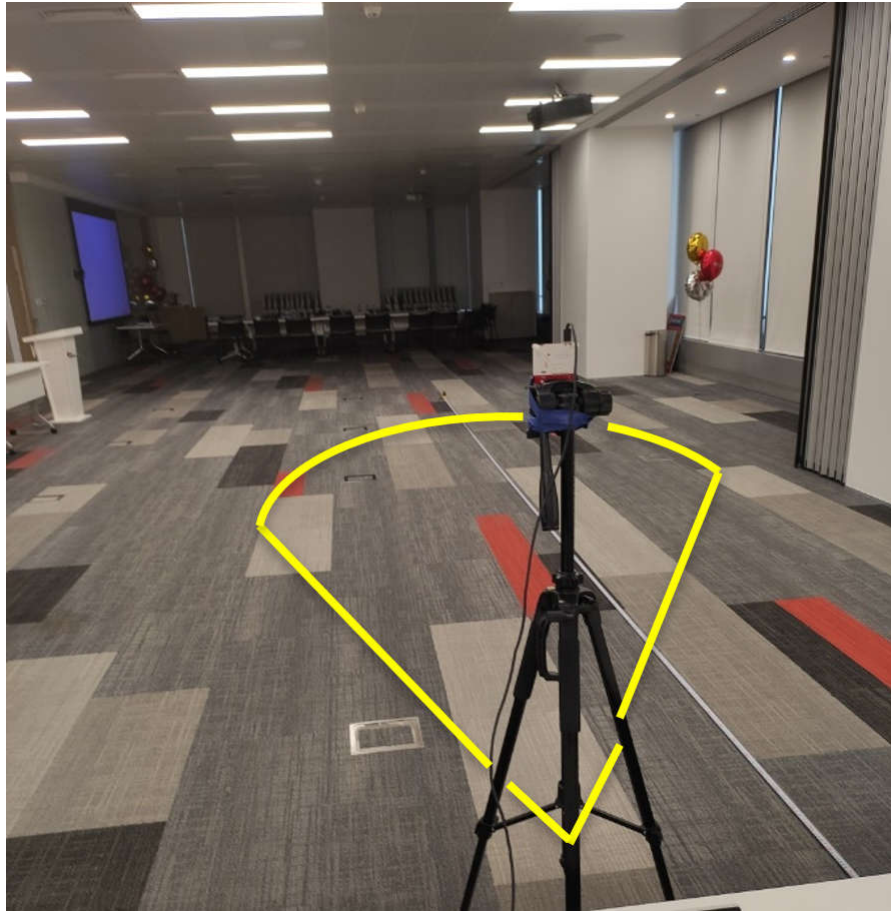


图 4-2. MSPM0 PIR 运动测试设置示例

4.2.1 距离: 5 米 (16.4 英尺)

可清晰检测到运动事件，且尖峰远高于设定的软件阈值。

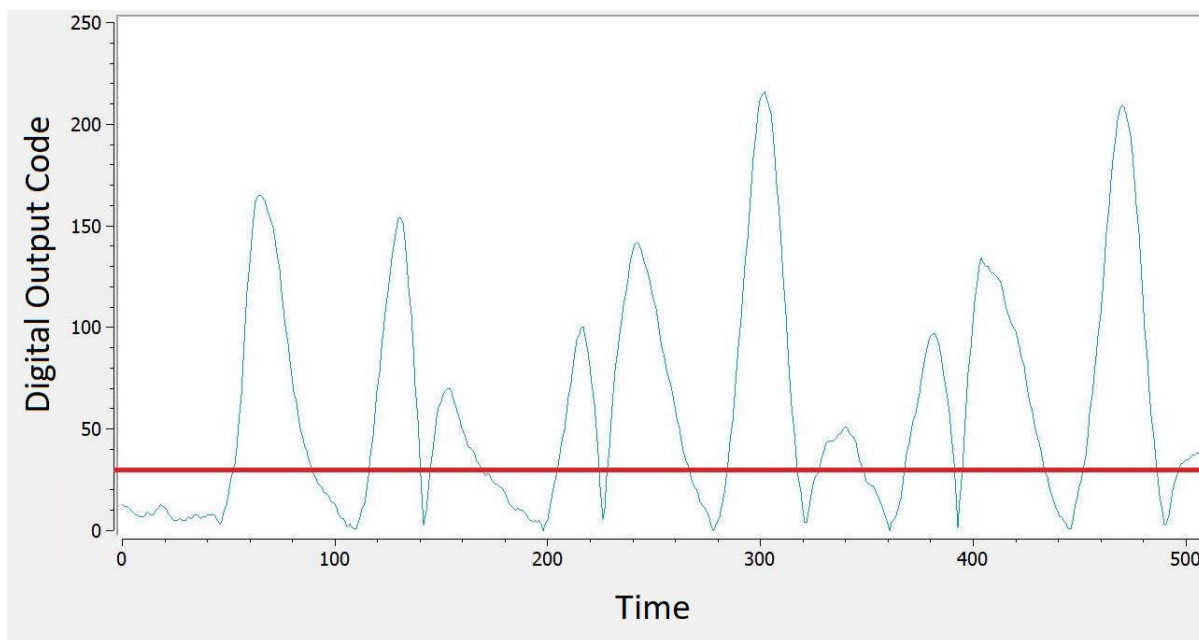


图 4-3. 成人位于 5 米 (16.4 英尺) 处，速度 1m/s

4.2.2 距离: 9 米 (29.5 英尺)

可清晰检测到运动事件，且尖峰远高于设定的软件阈值。

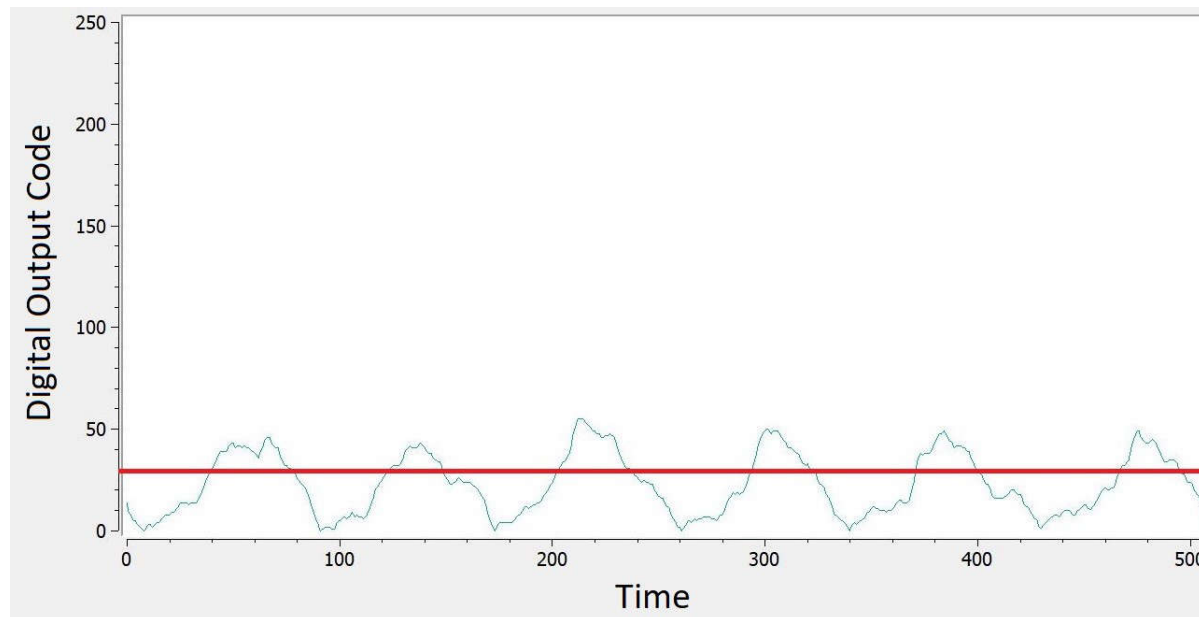


图 4-4. 成人位于 9 米 (29.5 英尺) 处，速度 1m/s

4.2.3 距离: 10 米 (32.8 英尺)

在 10m 处，运动事件几乎无法达到所需的阈值，运动检测变得断断续续。

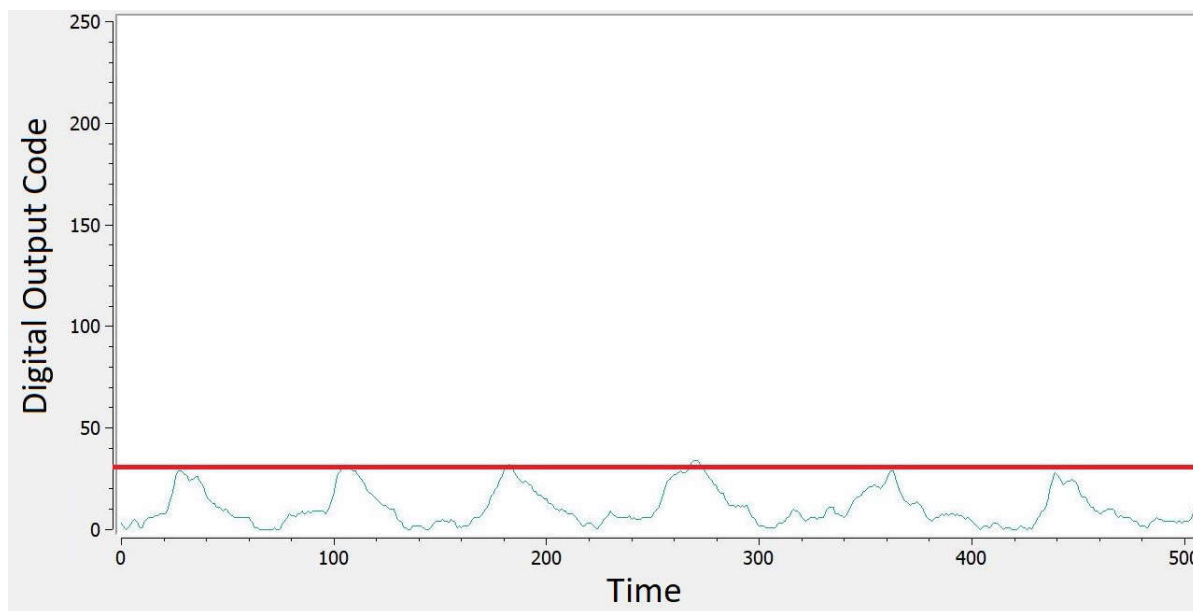


图 4-5. 成人位于 36.5 英尺 (11.1 米) 处，速度 1m/s

5 总结

PIR 运动检测器在过去十年基本保持不变，但如今终于可以利用具有先进模拟集成功能的 MSPM0L1306 等器件来实现更新的解决方案。MSPM0 PIR 运动检测器为运动检测应用提供了一种全新且极具竞争力的解决方案。集成的无电容器信号链提供出色的性能和灵活性，能够检测长达 9-10 米范围内的运动。该解决方案具有集成 OPA 和模拟 PIR 传感器，可显著节省 BOM 成本并简化电路板。最后，由软件控制的 AFE 还使该解决方案具有超低功耗，在 20SPS 时的平均电流约为 12 μ A。

要开始使用，请订购 [MSPM0L1306 Launchpad](#) 并下载[示例工程](#)。

6 参考

- 德州仪器 (TI) : [MSPM0L130x 混合信号微控制器数据表](#)
- 德州仪器 (TI) : [MSPM0 L 系列 32MHz 微控制器技术参考手册](#)
- 德州仪器 (TI) : [适用于成本优化型系统的超低功耗无线 PIR 运动检测器参考设计](#)
- [MSPM0L1306 LaunchPad™ 开发套件](#)

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