



概述

此 TI 设计使用德州仪器 (TI) 的纳米级功率运算放大器和 SimpleLink™ 多标准 2.4GHz 无线微控制器 (MCU) 平台，展示了一款超低功耗运动检测器，极大地延长了电池寿命且无需接线。

资源

TIDA-01398

设计文件夹

TLV8544

产品文件夹

CC2650

产品文件夹



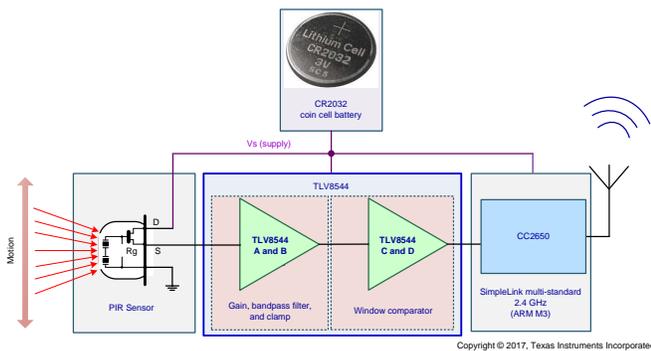
咨询我们的 E2E 专家

特性

- 通过使用纳米级功率模拟实现超低功耗设计，从而依靠单节 CR2032 纽扣电池实现长达 10 年的电池寿命
- 2.16μA 的低关断电流（PIR 传感器在关断模式下保持工作状态）
- 由于处理器工作电流和无线电传输电流较低，因此可实现超低的工作状态电流（1.57mA，持续 56.66ms）
- 针对运动情况的中断驱动型蓝牙无线通信，可节省更多电量
- 移动灵敏度高达 30 英尺

应用

- 楼宇自动化
- 入侵检测
- 占位检测
- 运动检测
- 室内监视器
- 电池供电系统



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

1 系统概述

1.1 系统说明

许多工业和楼宇自动化系统都使用运动检测器检测是否有人从而控制不同的功能（例如照明），通过在不需要时关闭这些功能来提高效率。此外，这些系统还需要增加无线传感器节点的数量，通过消除接线来降低安装成本，并使系统在未来扩展时更加灵活。然而，大型无线网络的其中一大限制条件是电源。由于这些系统通过电池供电，定期更换电池产生的维护成本十分高昂。根据功耗和电池配置，典型的由电池供电的 PIR 运动检测器可在任意位置运行四到七年，之后需要更换电池。

适用于成本优化型系统的超低功耗无线 PIR 运动检测器 TI 设计使用德州仪器 (TI) 的纳米级功率放大器和 SimpleLink 超低功耗无线 MCU 平台，展示了一款无需接线，同时又可最大限度延长电池寿命的运动检测器电路的解决方案。

从高层级看，此 TI 设计包含一个 CR2032 纽扣电池、采用单个封装的四个纳米级功率运算放大器、一个超低功耗无线 MCU 和一个带模拟信号输出的 PIR 传感器。两个运算放大器构成一个输入阻抗较高的放大带通滤波器，因此可直接连接到传感器，而无需带负载。其他两个运算放大器构成一个窗口比较器，用于将放大的传感器输出与固定参考阈值进行比较，以便将运动信号与噪声区分开来。窗口比较器的两个输出随后用作无线 MCU 的中断，以使 MCU 能够在未检测到任何运动时以功耗最低的休眠模式工作，并且仅在检测到运动时唤醒，将消息发送回远程主机。由于模拟信号链组件的工作电流为纳安级，此 TI 设计能够使用单个 CR2032 纽扣电池实现长达 10 年的电池寿命。

本设计指南介绍了该 TI 参考设计系统的组件选择、设计理论和测试结果。本设计指南旨在引导系统工程师抢先了解集成 TI 毫微功耗模拟组件和 SimpleLink 超低功耗无线 MCU 平台的相关信息。

后续子章节介绍该 TI 设计系统中的各模块以及实现最佳相应功能的最关键特性。

1.1.1 运算放大器

在本 TI 参考设计中，需要对 PIR 传感器输出端的信号进行放大和滤波，使进入信号链后续各级的信号幅值足以提供有用的信息。还需要将经过放大和滤波的传感器输出转换为可用作 MCU 输入的数字信号。为此，我们使用了一个窗口比较器电路。

对于远处物体的运动而言，PIR 传感器输出端的典型信号电平为微伏级，因此需要进行放大。首先，需要通过滤波功能在输入到达窗口比较器之前限制系统的噪声带宽。其次，滤波功能还可设置系统能够检测到的运动所对应的最小和最大速度限值。

为了在成本优化型系统中实现极长的电池寿命，此 TI 设计采用四路运算放大器 TLV8544，因为每个放大器的电流消耗都较低，为 500nA（典型值）。TLV8544 非常适合此 TI 设计的其他因素包括其输入电压偏移和输入偏置电流均较低，因此可在输入和输出端使用高值电阻器，并实现轨至轨运行。此外，TLV8544 还集成了 EMI 保护以降低对无用射频 (RF) 信号的敏感度，这对于采用高阻抗节点的低功耗设计十分有用。TLV8544 的前两个放大器级可实现有源滤波器功能。TLV8544 的其余放大器用于构建窗口比较器。

1.1.2 超低功耗无线 MCU

在本 TI 参考设计中，需要将传感器信息传送到某中央位置进行处理。不过，由于功耗始终是电池供电应用需要关注的问题，因此无线电和处理器必须是低功耗的。此外，终端设备系统所需的无线协议是选择无线电设备的重要考虑因素。

TI 的 SimpleLink 超低功耗无线 MCU 平台兼具低功耗特点与无线电和 MCU 功能，可极大延长传感器终端节点的电池寿命。此外，CC2650 是一款支持多种标准的器件，并且具有 Bluetooth®、ZigBee®、6LoWPAN 和 ZigBee RF4CE 软件栈支持。此 TI 设计选择了蓝牙协议，但最终硬件也支持其他协议。

1.1.3 纽扣电池

该参考设计采用 CR2032 锂离子纽扣电池作为电源。选择 CR2032 纽扣电池作为电源是因为这类电池普遍适用，尤其在小外形尺寸系统（如传感器终端节点）中的使用更为普遍。

锂离子 CR2032 纽扣电池的电压特性也非常理想。输出电压在整个放电周期内保持相对平稳，直到电池基本耗尽。电池电量耗尽时，输出电压下降相对较快。

锂离子电池的温度特性同样优于碱性电池，尤其在低温条件下的优势明显。这种优势是由于锂离子电池中的非水电解质导电性能优于碱性电池中常见的水电解质。不过，CR2032 纽扣电池仍然是工作温度范围的限制因素；所有集成电路和其他电子元件都比电池的额定工作温度范围更宽。因此，本 TI 参考设计系统指定的工作温度范围为 -30°C 至 60°C。只要采用合适的防风雨外壳，该 TI 参考设计系统对室内外环境均适用。

电池后紧跟的是低 R_{DS_ON} P 沟道 MOSFET 和大容量电容。P 沟道 MOSFET 可防止从后面插入纽扣电池时损坏硬件，同时能够最大程度地减小正常工作时的正向压降。选择的大容量电容规格可防止压降过大，尤其在为实现无线电传输而切换到 MCU 开启状态期间更是如此。

1.1.4 PIR 传感器

此 TI 设计选用的传感器是 Murata®IRS-B210ST01 PIR 传感器。选择此传感器的原因在于它采用表面贴装的封装形式并且可提供模拟输出，因此本 TI 参考设计中的低功耗电路可以节省占用面积。

尽管本 TI 参考设计收集的测试结果都是针对特定部件编号的 PIR 传感器，但在采用本 TI 参考设计中演示的技术和电路设计时，使用任何适用的类似 PIR 传感器都有望得出相似的结果。

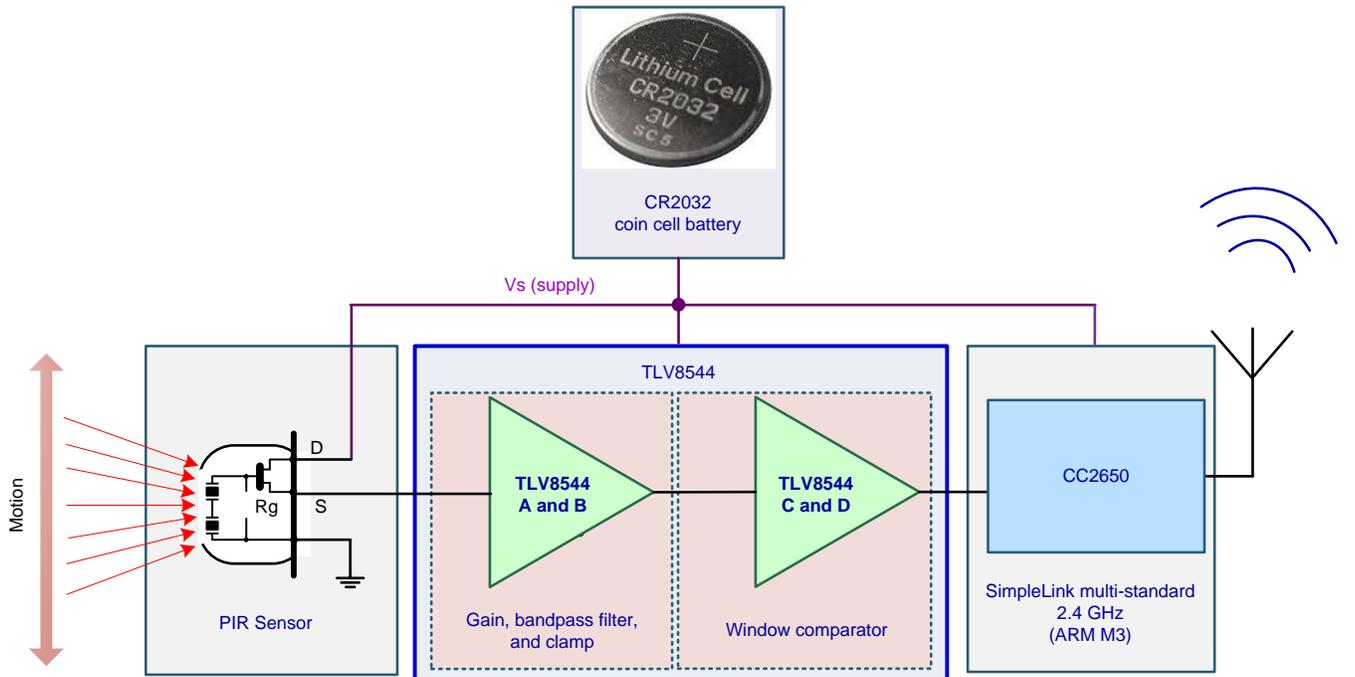
最后，对于任何 PIR 传感器，都需要在传感器之前使用一个透镜来将红外能量集中于传感器元件上，从而扩展检测范围。使用菲涅耳透镜时，可将观察区域的红外图像传送给所有传感器元件。因此，透镜的形状和尺寸决定最大检测角和观察区域。对于本 TI 参考设计，使用 Murata IML-0669 透镜，以便能够演示最大视野和检测范围。归根结底，选择哪种透镜是由应用所需的视野角度和检测范围决定的。

1.2 系统主要技术参数

表 1. 系统主要技术规范

参数	规范	详细信息
输入电源	CR2032 锂离子纽扣电池 (3.0V 标称电压)	节 1.1.3
传感器类型	PIR (热电或无源红外)	节 1.1.4
平均工作状态流耗	1.57mA	节 4.2.1
工作状态持续时间	56.66ms	节 4.2.1
平均待机状态电流消耗	3.51 μ A	节 4.2.1
待机状态持续时间	持续 1 分钟未检测到动作	2.4 节
平均关断状态电流消耗	2.16 μ A	节 4.2.1
为计算使用寿命而假定的每小时运动次数	在电池使用寿命期间的平均值是每小时 ≥ 10 (最坏情况)	节 4.2.2
预计电池寿命	> 8 年	节 4.2.2
运动感测范围	标称值为 30 英尺	节 4.2.3.1
无线电传输范围	> 54 米	节 4.2.3.2
工作温度	-30°C 至 60°C (受 CR2032 纽扣电池工作温度范围的限制)	节 1.1.3
工作湿度	20% 至 70%	节 4.1.3.1
振动	—	节 4.2.3.4
射频抗扰度	从 10 kHz 到 1 GHz 为 30 V/m	节 4.2.3.3
工作环境	室内和室外	节 1.1.3
封装	35x75mm 矩形 PCB	5.3 节

1.3 方框图



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 1. 无线 PIR 系统框图

1.4 重点产品

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 采用 以下器件：

- TLV8544 (节 1.4.1)：纳瓦级功率、CMOS 输入、轨至轨 IO 运算放大器
- CC2650 (节 1.4.2)：SimpleLink 多标准 2.4GHz 超低功耗无线 MCU

如需了解有关这些器件的详细信息，请参见 www.ti.com 上对应的产品文件夹。

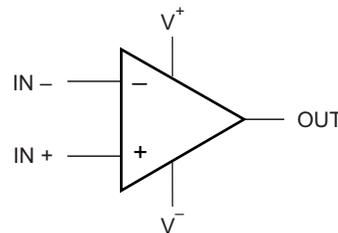
1.4.1 TLV8544

特性:

- 适用于成本优化型系统
- 纳瓦级功率电源电流: 500nA/通道
- 偏移电压: 4mV (最大值)
- $TcVos$: 1.5 μ V/ $^{\circ}$ C
- 增益带宽: 8kHz
- 单位增益稳定
- 低输入偏置电流:100fA
- 宽电源范围: 1.7 至 3.6V
- 轨至轨输入和输出 (RRIO)
- 温度范围: -40° C 至 125° C
- 行业标准封装:
 - 14 引脚 TSSOP 四路封装

下列结果:

- 气体检测仪
- 使用 PIR 传感器的运动检测器
- 使用微波传感器的运动检测器
- 电离烟雾报警器
- 恒温器
- 远程传感器、IoT (物联网)
- 有源 RFID 阅读器和标签
- 便携式医疗设备



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 2. TLV8544 功能方框图

TLV8544 超低功耗运算放大器非常适用于无线和低功耗有线设备中的成本优化型传感应用。TLV8544 放大器可最大限度地减少极其注重运行电池寿命的运动检测安全系统（如微波和 PIR 运动传感）等设备的功耗。此器件的互补金属氧化物半导体 (CMOS) 输入级经过精心设计，能够实现超低飞安级偏置电流，从而降低 I_{BIAS} 和 I_{OS} 误差，否则会影响敏感应用（例如带有兆欧级反馈电阻的互阻抗放大器 (TIA) 配置）以及高源阻抗感测应用。此外，内置的 EMI 保护可降低器件对手机、Wi-Fi®、无线电传输器和标签阅读器等信号源所发出的无用射频信号的敏感度。

TLV8544 运算放大器采用低至 1.7V 的单电源电压供电，并且可在 -40° C 至 125° C 的扩展温度范围内、在低电量情况下连续运行。四通道 TLV8544 采用行业标准 14 引脚 TSSOP 封装。

1.4.2 CC2650

特性:

- 微控制器:
 - 强大的 ARM® Cortex®-M3
 - EEMBC CoreMark™评分: 142
 - 时钟速度高达 48MHz
 - 128KB 系统内可编程闪存
 - 8KB 缓存 SRAM
 - 20KB 超低泄漏 SRAM
 - 2 引脚 cJTAG 和 JTAG 调试
 - 支持无线升级 (OTA)
- 超低功耗传感器控制器:
 - 可独立于系统其余部分自主运行
 - 16 位架构
 - 存储代码和数据的 2KB 超低泄漏 SRAM
- 高效代码尺寸架构, ROM 中装载驱动程序、低功耗蓝牙、IEEE 802.15.4 MAC 和引导加载程序
- 符合 RoHS 标准的封装:
 - 4mm × 4mm RSM VQFN32 封装 (10 个 GPIO)
 - 5mm × 5mm RHB VQFN32 封装 (15 个 GPIO)
 - 7mm × 7mm RGZ VQFN48 (31 GPIO)
- 外设:
 - 所有数字外设引脚均可连接任意 GPIO
 - 四个通用计时器模块
(8 个 16 位或 4 个 32 位计时器, 均采用 PWM)
 - 12 位 ADC、200ksps、8 通道模拟多路复用器
 - 持续时间比较器
 - 超低功耗模拟比较器
 - 可编程电流源
 - UART
 - 2 个同步串行接口 (SSI) (SPI、MICROWIRE 和 TI)
 - I²C
 - I2S
 - 实时时钟 (RTC)
 - AES-128 安全模块
 - 真随机数发生器 (TRNG)
 - 10、15 或 31 个 GPIO, 具体取决于所用封装选项
 - 支持 8 个电容感测按钮
 - 集成温度传感器

- 外部系统:
 - 片上内部 DC-DC 转换器
 - 极少的外部组件
 - 与 SimpleLink CC2590 和 CC2592 范围扩展器无缝集成
 - 与采用 4mm × 4mm 和 5mm × 5mm VQFN 封装的 SimpleLink CC13xx 引脚兼容

- 低功耗：
 - 宽电源电压范围：
 - 正常工作电压：1.8 至 3.8V
 - 外部稳压器模式：1.7 至 1.95V
 - 有源模式 RX：5.9mA
 - 有源模式 TX (0dBm)：6.1mA
 - 有源模式 TX (5dBm)：9.1mA
 - 有源模式 MCU：61 μ A/MHz
 - 有源模式 MCU：48.5 CoreMark/mA
 - 有源模式传感器控制器：8.2 μ A/MHz
 - 待机电流：1 μ A（RTC 运行，RAM/CPU 保持）
 - 关断电流：100nA（发生外部事件时唤醒）
- 射频部分：
 - 2.4GHz RF 收发器，符合 BLE 4.1 规范与 IEEE 802.15.4 PHY 和 MAC
 - 出色的接收器灵敏度（BLE 对应 -97dBm，802.15.4 对应 -100dBm）、可选择性和阻断性能
 - 102dB/105dB (BLE/802.15.4) 的链路预算
 - 高达 5dBm 的可编程输出功率
 - 单端或差分 RF 接口
 - 适用于符合各项全球射频规范的系统：
 - ETSI EN 300 328（欧洲）
 - EN 300 440 2 类（欧洲）
 - FCC CFR47 第 15 部分（美国）
 - ARIB STD-T66（日本）
- 工具和开发环境：
 - 功能全面的低成本开发套件
 - 针对不同 RF 配置的多种参考设计
 - 数据包监听器 PC 软件
 - Sensor Controller Studio:
 - SmartRF™Studio
 - SmartRF Flash Programmer2
 - IAR Embedded Workbench®（适用于 ARM）®
 - Code Composer Studio™

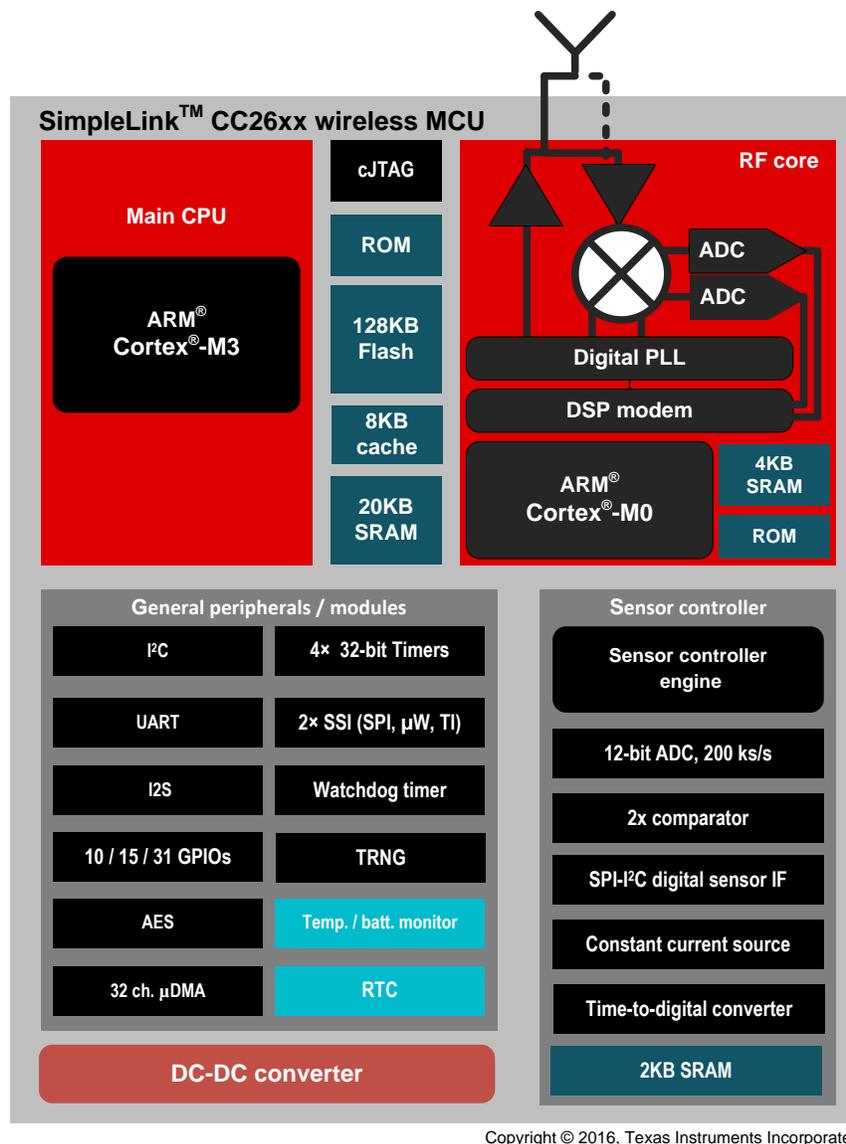


图 3. CC2650 功能方框图

CC2650 是面向蓝牙、ZigBee 和 6LoWPAN 以及 ZigBee RF4CE 远程控制应用的无线 MCU。

此器件属于 CC26xx 系列的经济高效型超低功耗 2.4GHz 射频器件。它具有极低的有源 RF 和 MCU 电流以及低功耗模式流耗，可确保卓越的电池使用寿命，适合小型纽扣电池供电以及在能源采集型应用中使用。

CC2650 器件含有一个 32 位 ARM Cortex-M3 处理器（与主处理器工作频率同为 48MHz），并且具有丰富的外设功能集，其中包括一个独特的超低功耗传感器控制器。此传感器控制器非常适合连接外部传感器，还适合用于在系统其余部分处于睡眠模式的情况下自主收集模拟和数字数据。因此，CC2650 是工业、消费类电子产品和医疗产品中各类应用的理想选择。

低功耗蓝牙控制器和 IEEE 802.15.4 MAC 嵌入在 ROM 中，并且在一定程度上可在单独的 ARM Cortex-M0 处理器上运行。此架构可改善整体系统性能和功耗，并释放闪存以供应用。

Bluetooth 和 ZigBee 协议栈可从 www.ti.com 免费获取。

2 系统设计原理

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通过检测传感器视野内红外 (IR) 能量的差异来感测运动。由于传感器输出是一个非常小的信号，必须通过放大和滤波操作来放大信号并滤除噪声，以便既能获得合理大小的传感器输出信号，又能最大程度减少虚假触发事件。放大后的模拟输出随后会通过窗口比较器功能转换为数字信号，窗口比较器的输出可用作无线 MCU 的中断，这些中断仅在需要时才会唤醒 MCU，以此实现节能的目的。以下章节将详细讨论构成整个子系统的这些不同电路部分的设计。

2.1 PIR 传感器

若要更好地理解电路，用户必须了解 PIR 运动传感器的工作方式。PIR 运动传感器包含两个或多个元件，这些元件输出的电压与入射红外辐射量成正比。每对热电元件都采用串联方式相连，这样一来，如果每个元件产生的电压相等（例如，由于环境室温或无运动而产生的红外能量），则传感器元件的总电压为 0V。图 4 给出了 PIR 运动传感器结构的图示。

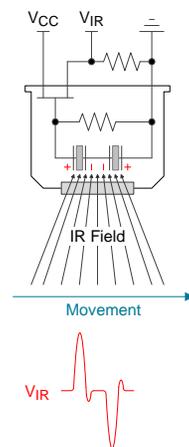


图 4. PIR 运动传感器图示

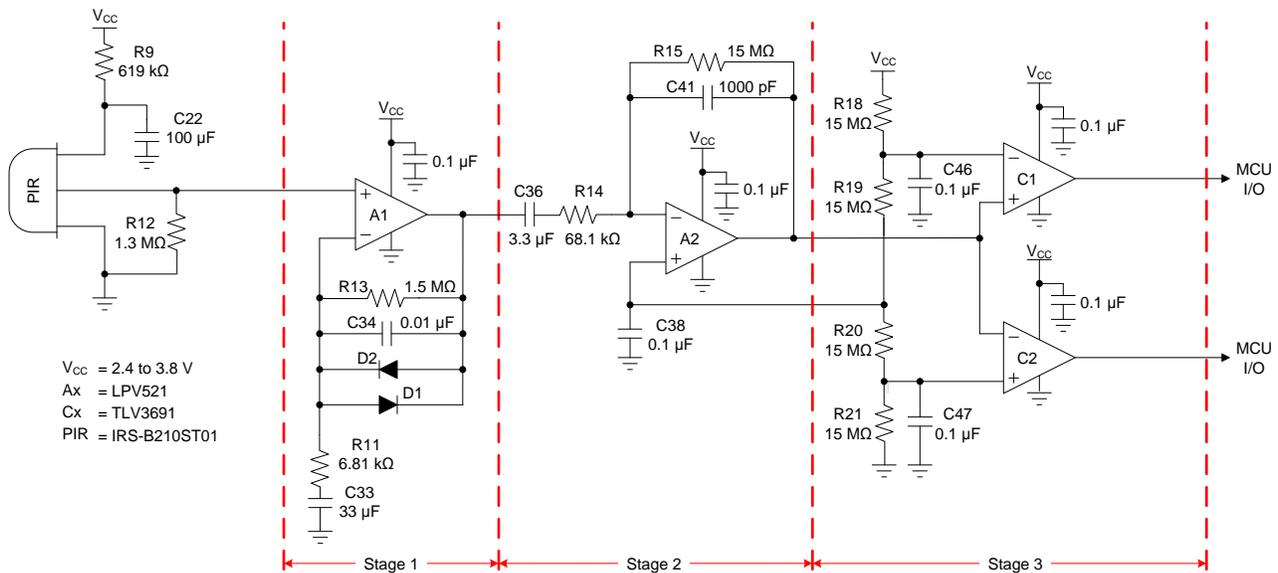
图 4 的下半部分显示了温度不同于环境温度的人体平行于传感器表面运动并穿过两个传感器元件的视野时产生的输出电压信号。此信号的幅值与运动速度以及相对于传感器的距离成正比，其峰峰值介于几百微伏到几毫伏之间或更低。JFET 晶体管用作电压缓冲器，并在传感器输出端提供直流偏移。

由于传感器元件的物理尺寸较小，通常需要将菲涅耳透镜置于 PIR 传感器的前端，从而通过将 IR 能量放大并集中到小型传感器元件上扩展范围和扩大视野。采用这种方法时，透镜的形状和尺寸决定最大检测角和观察区域。透镜的类型通常基于应用以及传感器在环境中的放置方式进行选择。基于上述信息，为实现最佳结果，放置传感器时应确保运动跨传感器而非直接面向传感器，并且要远离高温或变温源（例如，AC 通风孔和照明灯）。

还应注意，传感器首次上电时，需要花费 30 秒或更长时间来使传感器输出稳定下来。在这段“预热”时间内，传感器组件进行自我调节，以适应背景环境条件。对于最大限度延长电池寿命的这种子系统设计而言，这是一项关键措施。原因是必须对传感器自身持续供电才能使其正常运行，这意味着应用于传感器或模拟信号路径本身的电源循环技术无法适用于传感器的正常运行以及针对运动情况的可靠检测。

2.2 模拟信号路径

模拟信号调节部分如图 5 中的原理图所示。图 5 中前 2 级实现放大滤波功能，而第 3 级实现窗口比较器设计。组件 R9 和 C22 作为低通滤波器，用于稳定传感器输入的电源电压，2.3 节 将对此进行深入讨论。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 5. PIR 运动传感器模拟信号路径原理图

电阻 R12 用于设置 PIR 运动传感器 JFET 输出晶体管的偏置电流。为了节省电力，R12 大于建议值，基本上会将流经传感器的电流降到极低。但这样做的代价是，灵敏度将会降低并导致传感器输出端的输出噪声增大，这是延长电池寿命的平衡折衷方案。传感器输出灵敏度损耗可通过提升滤波电路增益进行一定程度的补偿。由于滤波级的增益和传感器输出的噪声较大，因此请谨慎优化高频滤波器极点位置以及窗口比较器阈值来避免误检。

2.2.1 放大滤波器设计

由图 5 中第 1 级和第 2 级组成的滤波电路实现了采用简单极点的四阶带通滤波器。各级电路均可实现相同的二阶带通滤波特性。带通滤波器所选的截止频率设为 0.7Hz 及 10.6Hz。对于 $\approx 90\text{dB}$ 的总信号增益，各级的通带增益选定为 220，目的是最大限度提升所用传感器偏置点的运动灵敏度范围。在不同传感器偏置及增益设置下采集的运动灵敏度范围数据如节 4.2.3.1 所示。

一般而言，滤波器带宽应足够大，以便检测传感器旁边是否有人走动或跑动。同时，滤波器带宽应足够小，从而限制滤波器输出的峰峰值噪声。在多数情况下，该应用可接受的带宽为 0.3Hz 至 2Hz；然而，使用简单极点意味着滤波器的 Q 值较低，会导致其过渡区较大。如果极点靠近过渡区，总通带增益下降，进而降低运动灵敏度并提高本底噪声。

低截止频率限制模拟前端 $1/f$ 噪声的整体影响，同时设定系统能够检测到的最低运动速度，因此对于抑制系统本底噪声至关重要。低截止频率的实际下限由电容决定，大小为 0.1Hz。由于此 TI 设计中传感器使用的偏置电流较低，因此低频噪声将比正常的高电流设计更为严重，这意味着低截止频率应高于 0.3Hz。给定低截止频率的实际范围为 0.3Hz 至 1Hz，本设计采用该范围的中间值作为低截止频率。

高截止频率在多数情况下用于降低宽带噪声。其范围比低截止频率高出十倍，上限为所用运算放大器开环带宽设定的带宽限值。在这种情况下，TLV8544 的单位增益带宽 (UGBW) 为 8kHz，这意味着最大级增益 220 对应的带宽应限制为 36Hz。考虑到 TLV8544 的 UGBW 组件容差及差异，高截止频率的实际范围为 7Hz 至 14Hz。同理，高截止频率应取该范围的中间值。

滤波器的第一级作为同相增益级。该级为传感器提供高阻抗负载，使其偏置点恒定不变。在 C33 的作用下，该级的有效直流增益为 1，因此传感器输出偏置电压为第一级滤波电路提供直流偏置。反馈二极管 D1 和 D2 提供钳位电压，因此两级滤波电路中的运算放大器不会因接近传感器的运动事件而达到饱和状态。公式 1 至公式 3 所示为该级的增益及截止频率：

$$f_{Low1} = \frac{1}{2\pi \times R11 \times C33} = \frac{1}{2\pi \times 6.81 \text{ k}\Omega \times 33 \text{ }\mu\text{F}} = 0.71 \text{ Hz} \quad (1)$$

$$f_{High1} = \frac{1}{2\pi \times R13 \times C34} = \frac{1}{2\pi \times 1.5 \text{ M}\Omega \times 0.01 \text{ }\mu\text{F}} = 10.6 \text{ Hz} \quad (2)$$

$$|G_1| = 1 + \frac{R1}{R11} = 1 + \frac{1.5 \text{ M}\Omega}{6.81 \text{ k}\Omega} = 221.26 \quad (3)$$

由于第二级与第一级呈交流耦合，因此第二级作为反相增益级。将窗口比较器中串联电阻分压器的中心点与该级滤波电路中运算放大器的同相输入相连，从而将直流偏置电压轻松设定为 $V_{CC} / 2$ 。由于该级输出存在峰间噪声，因此应尽量选取较大的 R15，以便将系统的动态电流降至最低水平。公式 4 至公式 6 所示为该级的增益及截止频率：

$$f_{Low2} = \frac{1}{2\pi \times R14 \times C36} = \frac{1}{2\pi \times 68.1 \text{ k}\Omega \times 3.3 \text{ }\mu\text{F}} = 0.71 \text{ Hz} \quad (4)$$

$$f_{High2} = \frac{1}{2\pi \times R15 \times C41} = \frac{1}{2\pi \times 15 \text{ M}\Omega \times 1000 \text{ pF}} = 10.6 \text{ Hz} \quad (5)$$

$$|G_2| = \left| -\frac{R15}{R14} \right| = \left| -\frac{15 \text{ M}\Omega}{68.1 \text{ k}\Omega} \right| = 220.26 \quad (6)$$

总电路增益（不包括因极点位置而导致的任何增益衰减）为

$G1 \times G2 = 221.26 \times 220.26 = 48810 = 93.77\text{dB}$ 。图 6 及图 7 所示为两级滤波电路的仿真结果。

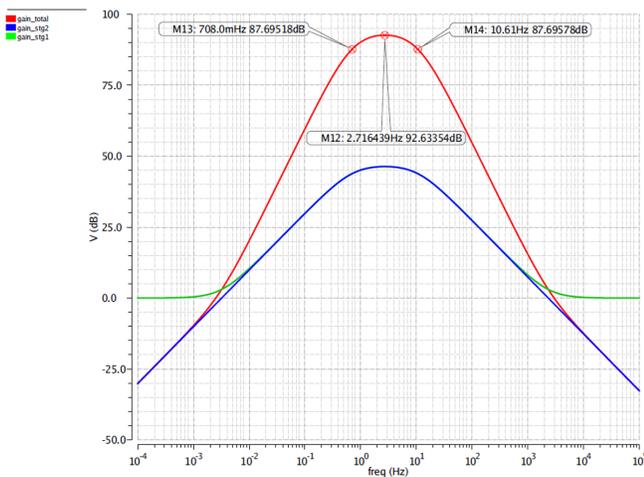


图 6. 放大滤波器仿真结果（理想状态）

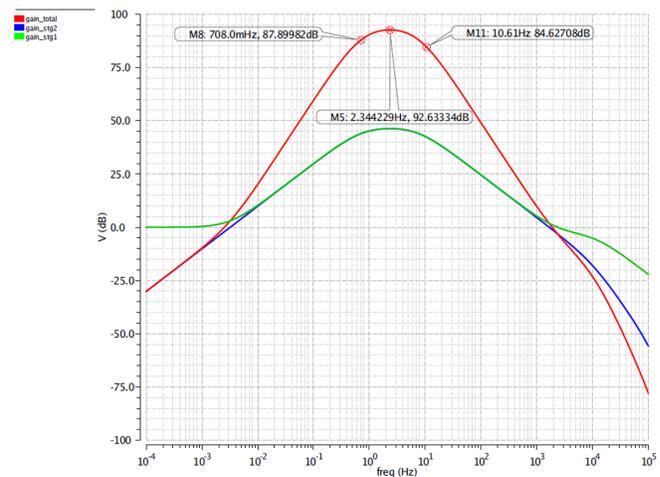


图 7. 放大滤波器仿真结果（非理想状态）

图 6 及图 7 所示的响应曲线说明了电路中放大器有限单位增益带宽的作用。请注意，除了高频响应发生变化，高截止频率处的衰减增大，峰值增益频率发生轻微漂移。

2.2.2 窗口比较器设计

图 5 中第 3 级所示的窗口比较器电路将滤波器的模拟输出转换为数字信号，该信号作为 MCU 的中断，提示其检测到运动情况。由电阻 R18 至 R21 组成的电阻分压器将设置阈值，据此可判断传感器是否检测到有效运动。为了节省电力，此电阻分压器还为第二级滤波器提供偏置电压。设计中必须使用电容器 C38、C46 及 C47 来稳定阈值电压，以防比较器输出发生抖动。由于电阻分压器中的电阻较大，因此上述电容器的值无需较大，但其等效串联电阻 (ESR) 及泄漏电流应较低并首选陶瓷电容器。

新型 TLV8544 运算放大器特别适用于在电池供电的 PIR 运动检测器应用中实现窗口比较器，因为它能以最优成本实现轨至轨运行能力、相对较低的偏移电压、低偏移电压漂移、超低偏置电流和超低功耗。它适用于此应用的另外一个原因是其输入信号的低频特性。当未检测到运动情况时，比较器输出低电平。通常情况下，运动在传感器中传输时先后在两比较器中产生高电平脉冲，对应于将图 4 下方 S 曲线波形放大后的结果。被测运动情况的方向决定了首先触发哪个比较器。

公式 7 及公式 8 用于调整窗口比较器阈值：

$$V_{REF_High} = V_{CC} \frac{R19 + R20 + R21}{R18 + R19 + R20 + R21} = 0.75 \times V_{CC} \quad (7)$$

$$V_{REF_Low} = V_{CC} \frac{R21}{R18 + R19 + R20 + R21} = 0.25 \times V_{CC} \quad (8)$$

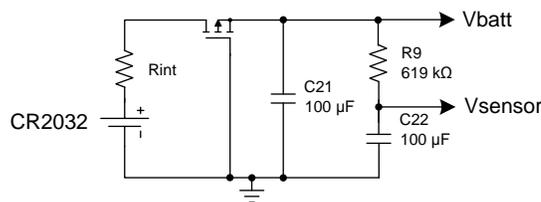
另一限制条件为 $R18 + R19 = R20 + R21$ ，从而使分压器的中心抽头保持为 $V_{CC}/2$ 的偏置水平，以用作滤波器第二级的偏置电压。

此 TI 设计选用的阈值是在灵敏度及噪声抗扰度之间进行平衡的结果。扩大窗口可提升噪声抗扰度，其弊端是灵敏度下降。由于窗口比较器输入存在峰峰值噪声，窗口过小可能导致误触发。

2.3 电源设计

由于电池的阻抗在整个使用寿命中不断增加，同时 PIR 传感器的电源抑制比较低，因此电源网络的设计至关重要，目的是防止 MCU 产生的电流尖峰在流经模拟信号路径后导致误触发。虽然固件中实现的算法有助于滤除此类问题，但这种不必要的电源反馈回路可能产生问题。在理想状态下，针对传感器电源进行调节可断开此回路。然而，此 TI 设计中稳压器额外产生的静态电流有损电池寿命，因此探究了其他解决方法。

图 8 所示为电源网络的简化原理图。该电源网络使用 P 型金属氧化物半导体 (PMOS) 晶体管替代传统肖特基二极管，实现反向电池保护。由于无线电传输时的峰值电流可达 30mA，因此通过一个 R_{DS_ON} 较低的 PMOS 提供压降。与肖特基二极管的压降相比，该压降极低，支持电池电压在电路停止工作前泄放到较低水平，有助于最大限度延长电池使用寿命（有关该技术的详细信息，请参见 SLVA139）。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 8. PIR 运动传感器电源网络简化原理图

在需要高峰值电流快速流经电路的过程中，由电容器 C21 为电路供电，这有助于最大限度提升电池容量并降低电源轨压降，尤其是在电池使用寿命濒临耗尽时，此时电池内部阻抗增大（图 8 中以 R_{int} 表示）。公式 9 给出了 C21 的计算方式。有关此计算方式及高电流峰值对于电池寿命和容量影响的更多详细信息，请参阅白皮书 SWRA349。

$$C21 = \frac{\Delta Q}{V_{MAX} - V_{MIN}} \quad (9)$$

其中

- $\Delta Q = Q_{dis} - \frac{V_{MIN}}{R_{int}} t_{tot}$
- $Q_{dis} = \sum i_n \times t_n$

V_{MAX} 是电池寿命即将终结的情况下、电流脉冲开始时电容器两端的电压， V_{MIN} 是电容器两端在电路工作期间的最低电压，其值等于传感器最低电压与传感器偏置电流在 $R9$ 产生压降之和 ($2V + 0.6\mu A \times 619k\Omega \approx 2.4V$)。 V_{MAX} 取值 2.698V，假设电池寿命结束时的空载电压为 2.7V (V_p)。根据在无线电传输过程中测得的电流曲线（如图 21 和公式 11 所示）：

$$Q_{dis} = 23.2 \text{ mA} \times 100 \mu\text{s} + 4 \text{ mA} \times 3.5 \text{ ms} + 8.8 \text{ mA} \times 2.5 \text{ ms} = 38.32 \mu\text{C} \quad (10)$$

计算 C21：

$$C21 = \frac{38.32 \mu\text{C} - \frac{2.4 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} \times 6.1 \text{ ms}}{2.698 \text{ V} - 2.4 \text{ V}} = 79.5 \mu\text{F} \quad (11)$$

此 TI 设计中的 $C21 = 100\mu\text{F}$ ，同时还额外并联了几十个电容器以改善较高频率下的阻抗。公式 12 给出了 $C21$ 复合电容器在高电流事件结束后再次充电所需的时间，考虑到器件电流消耗低至毫安水平的工作及待机状态，该充电时间已足够短。

$$t = R_{int} \times C21 \times \ln\left(\frac{V_p - V_{MIN}}{V_p - V_{MAX}}\right) = 1 \text{ k}\Omega \times 111.514 \mu\text{F} \times \ln\left(\frac{2.7 \text{ V} - 2.4 \text{ V}}{2.7 \text{ V} - 2.698 \text{ V}}\right) = 0.56 \text{ s} \quad (12)$$

$C21$ 值确定后，可以确定 $R9$ 及 $C22$ 的大小，从而避免在电源出现高电流事件期间出现误触发。 $R9$ 根据传感器偏置所产生压降的可接受范围进行选择，而 $C22$ 的大小由试验确定。如有需要，可降低 $R9$ 值以在略微降低的电压下工作；但是，图 8 中所示 $R9$ 和 $C22$ 的时间需要保持恒定。这意味 $C22$ 值增大并要求使用不同电介质，这很可能加剧漏电现象或提升成本并在一定程度上丧失降低 $R9$ 带来的优势。与 $C21$ 的处理方式相似， $C22$ 额外并联了几十个电容器，可在较高频率条件下保持低阻抗。

2.4 固件控制

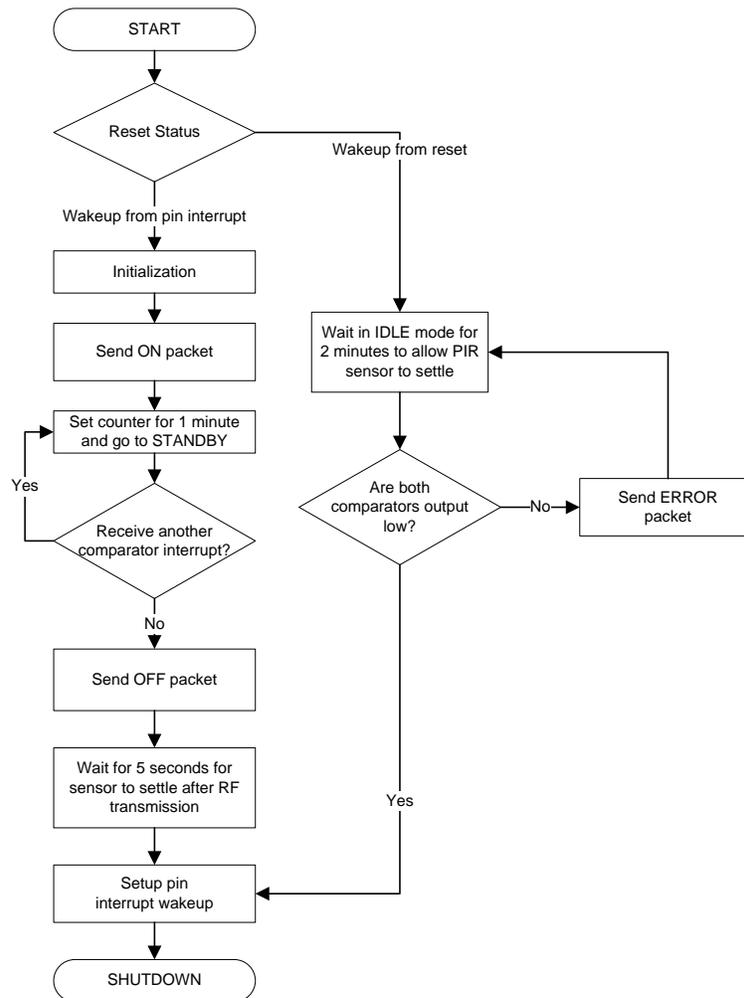


图 9. 无线 PIR 固件流程图

图 9 中所示的流程图介绍了 CC2650 在此 TI 设计中的工作原理。CC2650 首先检查唤醒源。如果器件由复位操作唤醒，则系统第一次通电。CC2650 将以待机模式持续运行 2 分钟，等待 PIR 传感器和模拟信号链上电以及操作点趋于稳定。2 分钟后，固件将查看窗口比较器的输出。默认情况下，两个比较器的输出均应较低。如果任一比较器输出较高，CC2650 将发送一条 ERROR 消息并在传感器操作点稳定前额外等待一段时间。PIR 传感器和模拟信号链正常工作后，CC2650 将进入关断模式。

CC2650 将始终保持关断模式，直至 PIR 传感器通过作为中断的窗口比较器输出告知 MCU 检测到运动情况。如果 CC2650 由 PIR 传感器唤醒，则会发送 ON 数据包，以通知主机控制器检测到运动情况。CC2650 将始终保持待机模式，直至 PIR 传感器静默 1 分钟后向主机控制器发送 OFF 数据包并返回关断模式。

3 硬件和固件入门

3.1 硬件入门

图 10 显示了适用于成本优化型系统的超低功耗无线 PIR 运动检测器 TI 设计所用的硬件。该印刷电路板 (PCB) 为 35mm x 75mm 的矩形，配有 0.5 英寸尼龙支架，可确保在执行实验测量时简单易用。

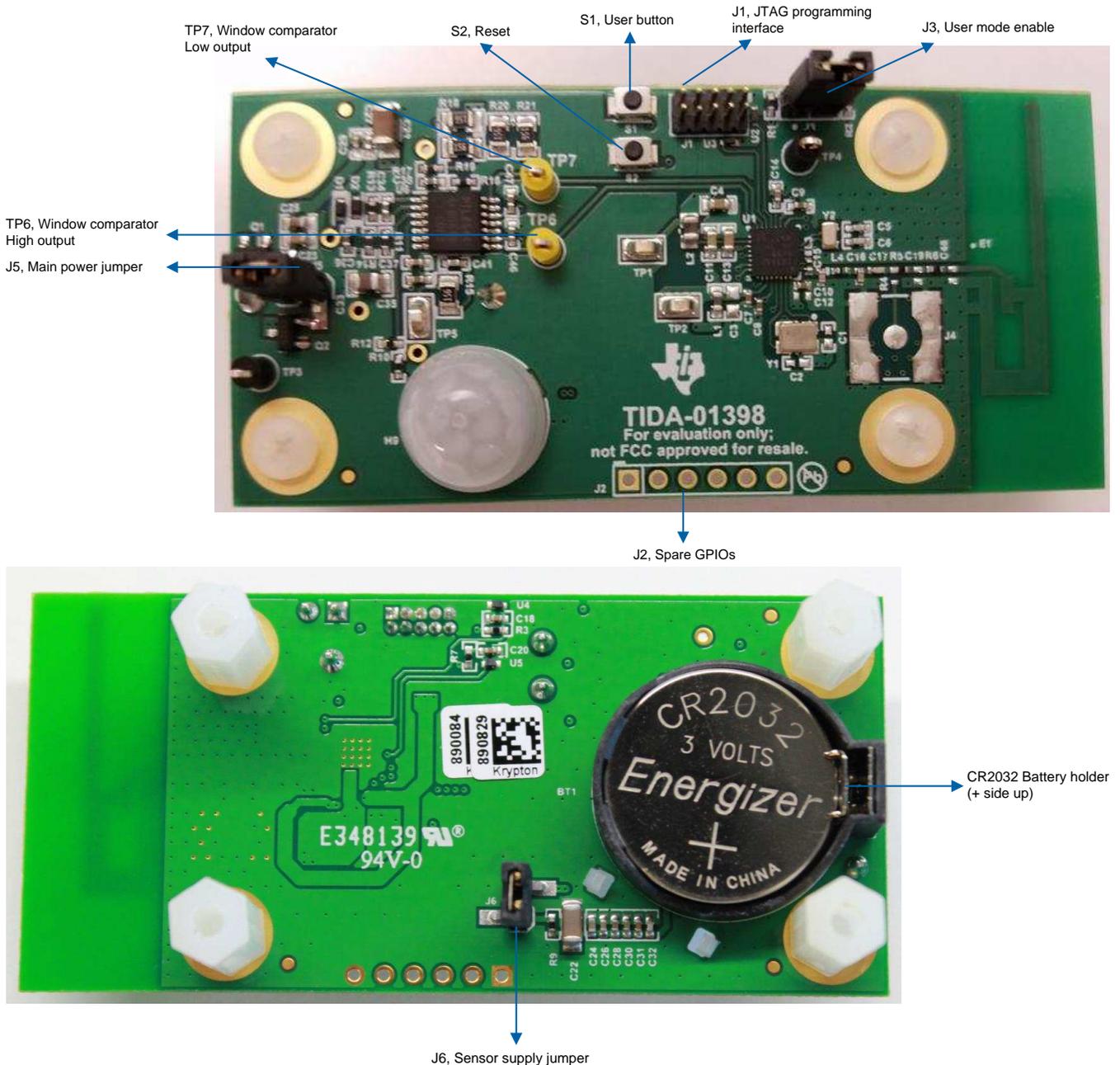


图 10. 超低功耗无线 PIR 运动检测器参考设计硬件 说明

所有集成电路 (CC2650、TLV8544)、若干测试点及跳线均位于 PCB 顶部。天线也位于 PCB 顶部。PCB 底部由 CR2032 纽扣电池托架、跳线 J6 及下半部分天线组成。

CC2650 引出了四个未使用的 GPIO 到一个未被占用的接头，以便后续进行原型设计和调试。

3.1.1 跳线配置

为了便于测量关键参数并调试参考设计，需要使用若干跳线。然而，为使设计正常工作，必须正确安装跳线。正常工作的跳线配置如下：**J5 = 短路、J1 = 开路、J3 = 开路、J6 = 短路。**

对 CC2650 编程的跳线配置如下：**J5 = 开路、J3 = 开路、J6 = 不用考虑**，并且 **J1** 通过带状电缆连接到 SmartRF06 评估板 (EVM) 上的 10 引脚 ARM Cortex 调试连接器。在 SmartRF06 EVM 上，将源开关设置为“USB”，并将“VDD to EM”跳线设置为短路。在此配置中，SmartRF06 EVM 为 CC2650 供电。有关详细信息，请参阅 SmartRF06 EVM 文档 ([SWRU321](#))。

请参见图 10 中有关不同跳线目标功能的简要说明。

3.1.2 测试点说明

此 TI 设计包含若干监测关键信号的测试点。下文说明：

- TP1: CC2650 滤波直流/直流转换器输出
- TP2: 形成到 CC2650 中直流/直流转换器的输入的滤波电池电源
- TP3、TP4: 探针接地点或电压测量公共点
- TP5: 模拟滤波级输出，也是窗口比较器级的输入
- TP6、TP7: 分别是窗口比较器的高阈值及低阈值输出

3.1.3 电池要求

只能插入 Energizer CR2032VP 锂电池或同等规格的电池：

- 经 UL 认证的 CR2032 电池
- 电压：3.0V
- 最小容量：240mAh
- 最小放电率：0.19mA

注： 电池必须由经过培训的专业人员进行更换。

3.1.4 其他

请注意，由于该设计中存在若干敏感的高阻抗节点，因此探测测试点（专用测试点除外）应考虑探针阻抗的影响。

相关示例为探测窗口比较器的基准输入。由于这些基准阈值由 4 个 15MΩ 电阻所组成的分压器生成，因此标准示波器探针或输入阻抗为 10MΩ 的电压表能够有效加载被测电路并造成误测。

3.2 固件入门

3.2.1 加载固件

本 TI 设计使用的固件通过 TI 的 [Code Composer Studio](#) 软件（版本 6.1.0）进行开发。

IAR Embedded Workbench for ARM 也支持 CC265x 系列的 SimpleLink 产品。

对该 TI 设计的硬件进行编程的方式为：通过 10 引脚迷你带状电缆将 J1 连接到 SmartRF06 EVM（10 引脚 ARM Cortex 调试连接器 P410）。在 SmartRF06 EVM 上，将源开关设置为“USB”，并将“VDD to EM”跳线设置为短路。在此配置中，SmartRF06 EVM 为 CC2650 供电。有关详细信息，请参阅 SmartRF06 EVM 文档 ([SWRU321](#))。请参见图 11，了解将 TI 设计硬件与 SmartRF06 EVM 相连的正确配置。

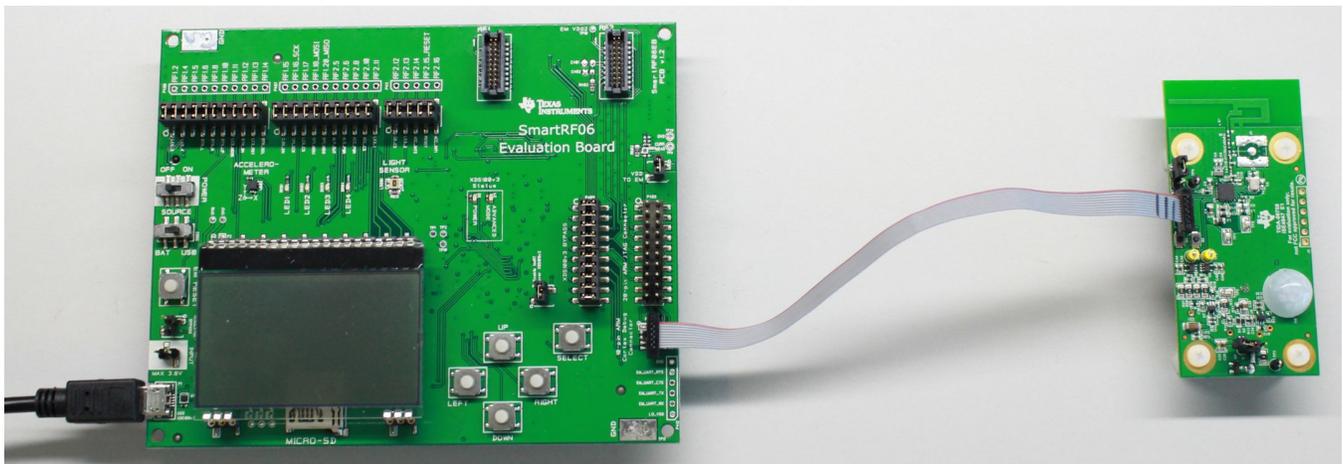


图 11. 适用于编程及调试操作的 SmartRF06 评估板与 TI 设计硬件的连接

3.2.2 接收数据包

如本参考指南之前所述，针对本 TI 设计进行编程的目的是通过 PIR 传感器检测有人存在（请参见节 1.1.4 及 2.1 节）。CC2650 可能广播 3 种操作值：

- 0x00: 传感器上电
- 0x11: 传感器动作
- 0xEE: 传感器在启动过程中出错
- 0xAA: 检测到首个运动时的 ON 数据包
- 0xFF: 检测到最后一个运动后 1 分钟的 OFF 数据包。

为核实无线电传输是否成功，以下小节介绍了两种传输数据包的查看方法。

3.2.2.1 使用 CC2540EMK-USB 和 SmartRF 协议数据包监听器接收数据包

为核实无线电传输是否成功，将使用 CC2540EMK-USB CC2540 USB 评估模块套件通过 SmartRF 协议数据包监听器软件来“监听”数据包。安装 Packet Sniffer 软件（v2.18.1 为撰写本文时的版本）后，按以下步骤检测数据传输：

1. 将 CC2540EMK-USB 插入装有 Packet Sniffer 软件的计算机上未使用的 USB 端口。
2. 打开数据包监听器软件；选择“Bluetooth Low Energy”作为协议并点击 **Start**。

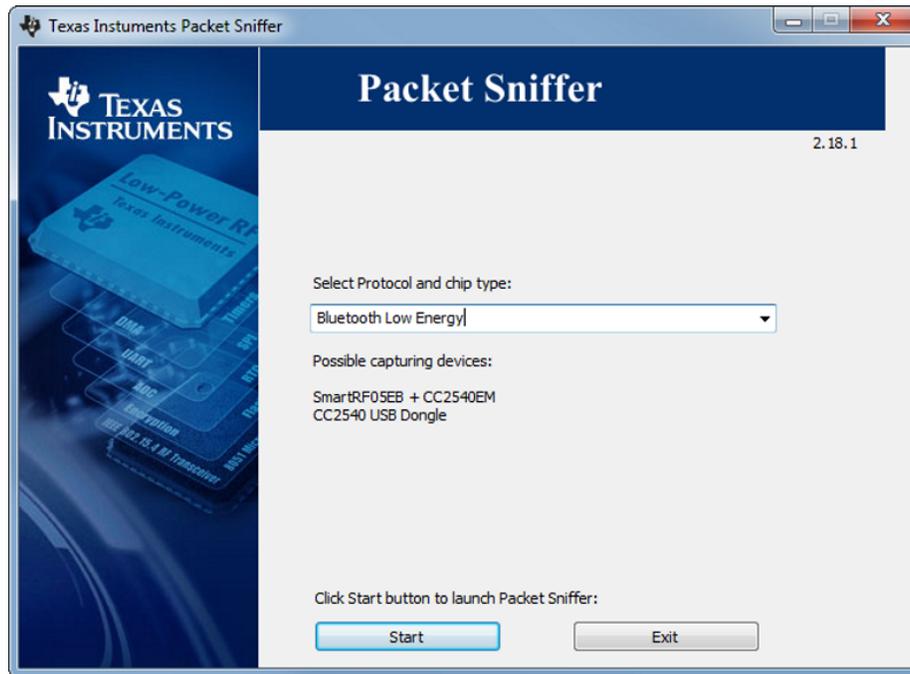


图 12. 数据包监听器软件

3. 单击 Radio Configuration 选项卡，并验证是否选择了“Advertising Channel 39”。
4. 按下顶部工具栏中的 Play 按钮以启动数据包捕获过程。

- 有可能会检测到许多其他数据包，这些数据包可能来自使用蓝牙协议的手机和其他设备。若要仅查看从该 TI 设计的硬件发出的数据包，需使用显示过滤器。图 13 显示未使用过滤器时记录的数据包示例。突出显示的这一行是所需的数据包，其他则是不需要的数据包。

P.nbr.	Time (ms)	Channel	Access Address	Adv PDU Type	Adv PDU Header			AdvA	AdvData	CRC	RSSI (dBm)	FCS		
					Type	TxAdd	RxAdd	PDU-Length						
1	+0	=0	0x27	0xE99BED6	ADV_NON_CONN_IND	2	0	0	9	0x265026502650	00	0x9CB70A	-38	OK
2	+120009	=120009	0x27	0xE99BED6	ADV_NON_CONN_IND	2	0	0	9	0x265026502650	11	0x864FCA	-42	OK
3	+20227	=140237	0x27	0xE99BED6	ADV_NON_CONN_IND	2	0	0	9	0x265026502650	07	0x7E808A	-32	OK
4	+60187	=200424	0x27	0xE99BED6	ADV_NON_CONN_IND	2	0	0	9	0x265026502650	FF	0x0F9B4A	-33	OK
5	+72328	=272753	0x27	0xE99BED6	ADV_NON_CONN_IND	2	0	0	9	0x265026502650	AA	0x7E808A	-36	OK
6	+1414	=274167	0x27	0xE99BED6	ADV_IND	0	0	0	33	0x0EA050031F13	56 31 33 31 42 32 30 59 30 02 0A 00			
7	+85	=274253	0x27	0xE99BED6	ADV_IND	0	0	0	37	0x00A050031F13	02 01 06 14 08 30 39 61 30 35 30 30 33 31 66 33 31 42 32 30 30 59 30 02 0A 00 C3 03 0F 18			
8	+69	=274343	0x27	0xE99BED6	ADV_IND	0	0	0	37	0x00A050031F13	02 11 06 14 08 30 39 61 30 35 30 30 33 31 66 33 31 42 32 30 30 59 30 02 0A 00 03 02 0F 18			
9	+82	=274431	0x27	0xE99BED6	ADV_IND	0	0	0	37	0x00A050031F13	02 01 06 14 08 30 39 61 30 35 30 30 33 31 66 33 31 42 32 30 30 59 30 02 0A 00 03 02 0F 18			
10	+259	=274691	0x27	0xE99BED6	ADV_IND	0	0	0	37	0x00A050031F13	02 01 06 14 08 30 39 61 30 35 30 30 33 31 66 33 31 42 32 30 30 59 30 02 0A 00 03 02 0F 18			

图 13. 数据包监听器软件在不使用过滤功能时进行的记录

- 通过适当的过滤器可找出 ADV_NONCONN AdvA 字段等于 0x265026502650 的不可连接通告数据包。在 Field Name 中，从下拉列表选项中选择 ADV_NONCONN AdvA。单击“First”按钮。将过滤条件修改为正确地址，点击“Add”，然后单击“Apply filter”。过滤视图示例如图 14 中所示。

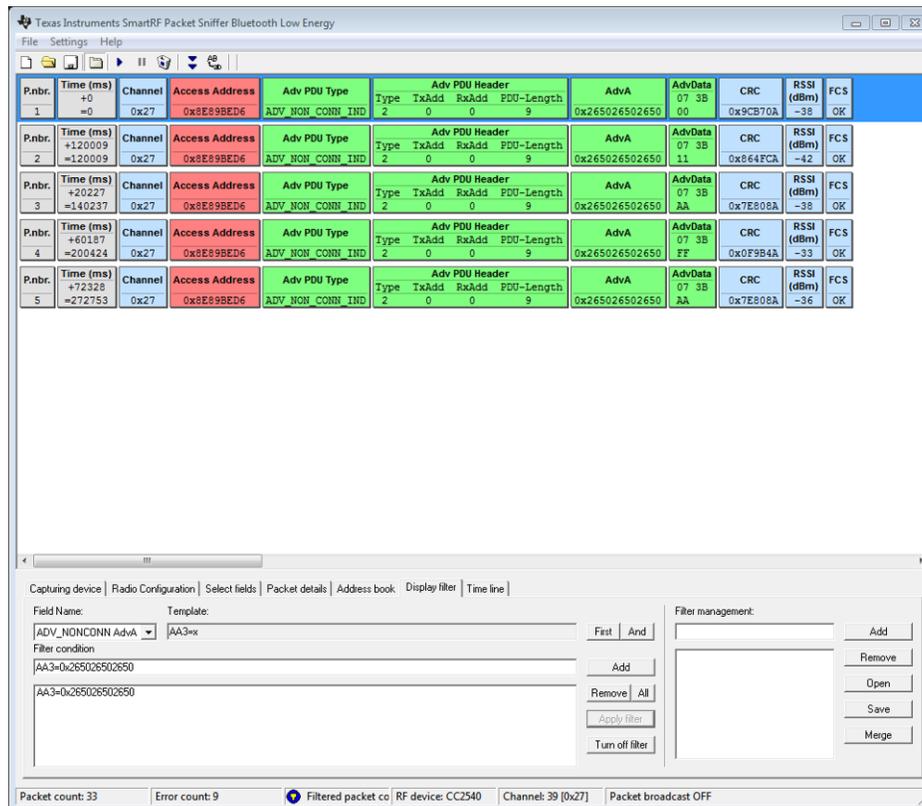


图 14. 数据包监听器软件在使用过滤功能后进行的记录

- 要导出捕获并过滤的数据包，请按工具栏上的“Saves the current session”按钮，或者暂停数据包捕获并单击 File → Save data...；执行其中任一操作，软件都会提示以数据包监听器数据 (.psd) 文件格式保存显示的数据。
- 使用 HexEdit 软件将 .psd 文件转换为可读取的十六进制值。使用其他十六进制编辑器也可以执行此操作；不过，本指南的作者尚未验证过。
- 在 HexEdit 软件中打开 .psd 文件。点击工具 (Tools) → 选项 (Options)。在 HexEdit Options 窗口中，单击 Document → Display 并将 Column 值更改为“271”。点击编辑 (Edit) → 全选并编辑 (Select All and Edit) → 复制为 16 进制文本 (Copy As Hex Text)。打开文本编辑器程序（例如记事本），粘贴 16 进制文本并保存文本文件。然后可将此文本文件导入到 Microsoft® Excel® 电子表格软件中进行进一步分析。有关监听器数据包格式の詳細信息，请单击数据包监听器软件上的 Help → User Manual。

3.2.2.2 使用 SmartRF06 评估板和 CC2650 评估模块接收数据包

第二种方法是采用 SmartRF06 评估板和 CC2650 评估模块硬件，以通过 SmartRF Studio“监听”数据包。安装 SmartRF Studio (v2.3.0 为撰写本文时的版本) 后，按以下步骤检测数据传输：

1. 将 CC2650 EVM 连接到 SmartRF06 评估板上的 EM 接头。
2. 验证是否填充了以下跳线：P483、P484、P485 和 VDD TO EM。
3. 开启 SmartRF06 板。
4. 运行 SmartRF Studio 软件。
5. 单击 Refresh 按钮，并确认 CC2650 列在“Connected devices”窗口下。
6. 单击“2.4GHz”选项卡，并双击 CC2650。
7. 选择“BLE mode”单选按钮。
8. 将 BLE channel 更改为 39，并选择与 CC2650 EVM 匹配的目标配置。
9. 单击“Packet Rx”选项卡。
10. 选中“Infinite”框，将所有其他选项保留为默认值。
11. 单击“Start”按钮。

SmartRF Studio 将捕获通道 39 上的所有 BLE 通告数据包，并显示数据包信息。图 15 是示例快照。

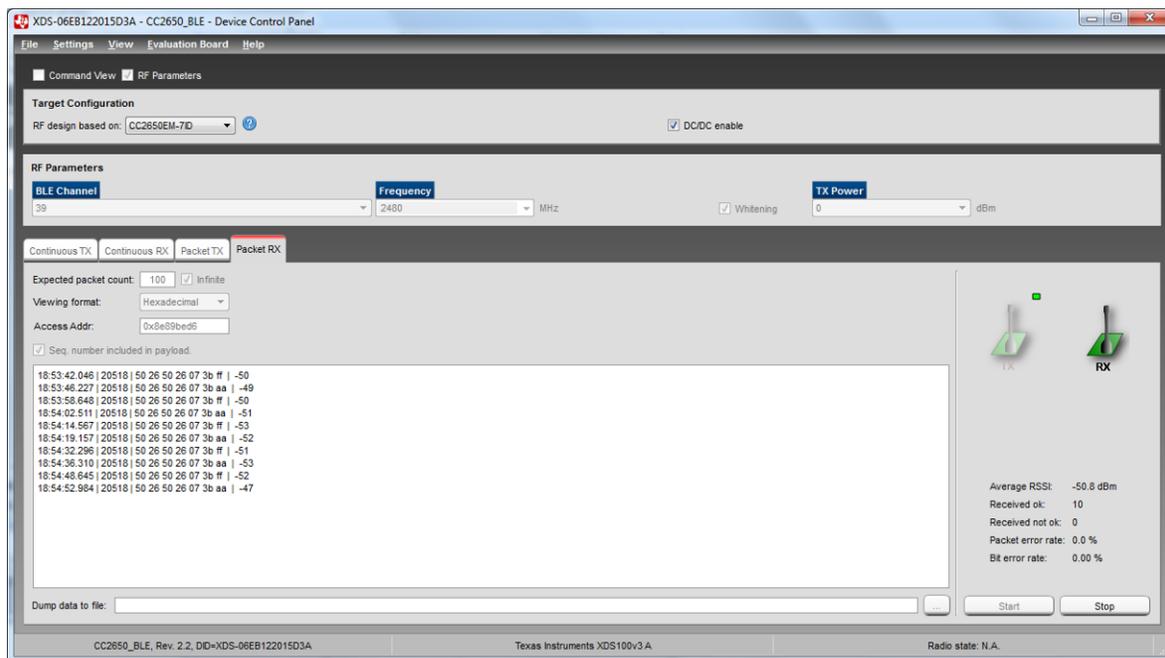


图 15. SmartRF Studio 数据包监听器记录

4 测试和结果

4.1 测试设置

4.1.1 概述

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的特征是可支持该子系统的所有关键规格。以下章节介绍了执行这些测量所需的测试装置，包括所用设备及测试条件（除非另外注明）。

4.1.2 功耗

本参考设计的功耗测量对于平衡电池寿命与传感器偏置电流和运动灵敏度至关重要。建立初始原型设计，允许对参考设计中的不同电流路径进行测量，以此进行初步分析。原型设计的测量结果如节 4.2.1 所示。然后在参考设计的硬件测量电源电流，这将确认原型设计的测量结果。针对参考设计的硬件在设计电压范围内的运行情况进行了深入的特性分析。电源电流测量测试装置如图 16 所示。

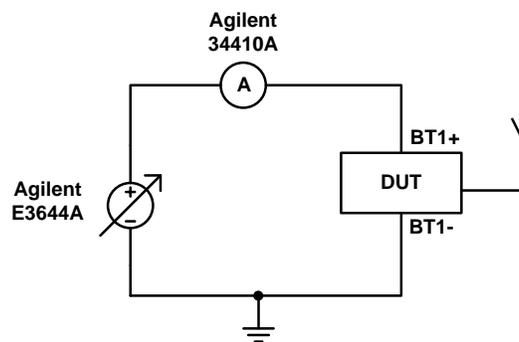
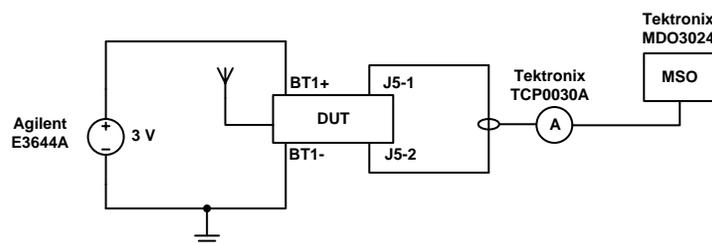


图 16. 适用于测量电源电流的测试电路

为了计算电池寿命，同样需要对无线电传输时间间隔进行特性分析。原因是这些时间间隔内的电流在稳定至毫安级低电流（采用上述步骤测得）前均存在短暂高峰。测量无线电传输时间间隔需要将电流探针与示波器相连，从而可用于触发高电流事件。然后将这段时间间隔内的数据导出至 Microsoft Excel 并在其中进行分析。该装置如图 17 所示。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 17. 适用于在无线电传输时间间隔内测量电源电流的测试电路

4.1.3 功能

以下小节介绍了在不同环境条件下进行的功能测试。这些测试通常验证子系统的工作极限。

在仅测试 PIR 运动传感器设计功能的情况下，我们重复使用了来自《具有低于 1GHz 无线连接且可实现 10 年纽扣电池寿命的低功耗 PIR 运动检测器 TI 设计》(TIDA-00489) 的测试结果。除了用 LPV802 和 TLV3691 替代 TLV8544 之外，两个 TI 设计使用了相同的 PIR 运动传感器设计，包括原理图、布局和 BOM，这允许在这两个设计中重复使用测试结果。以下每个章节都说明了是否重复使用了来自此 TI 设计的低于 1GHz 版本的测试结果。

4.1.3.1 温度及湿度范围

低于 1GHz 版本的 TI 设计 (TIDA-00489) 针对温度和湿度偏置进行了承受能力测试，以确保设计正常运行并在目标环境的极端条件下不会引起误触发。典型的扩展建筑环境温度范围假设为 0°C 至 50°C，同时对低至 -30°C 及高达 60°C 的设计温度极限进行附加测试。同理，建筑环境的典型湿度范围假设为 20% 至 70%。

用于测试温度和湿度承受范围的处理室为 CSZ ZH322-H/AC 温度/湿度处理室，同时还有用于监测湿度的 Vaisala™ HMP235 湿度探针。Watlow™ F-4 控制器用于进行自动测试。参考设计 PCB 放置在处理室内，并安装了新的增强型®CR2032 锂离子纽扣电池。CC1111 USB 软件狗放置于处理室内 TI 设计硬件附近，并通过 USB 电缆与处理室外的笔记本电脑相连，用于在测试过程中监测误触发。图 18 所示为装置图照片。



图 18. 无线 PIR 运动检测器温度及湿度测试装置

为了防止因环境温度快速变化及后续传感器稳定过程造成误检，测试过程中的温度应缓慢变化，实现典型工作环境中的效果。在 25°C 浸润 10 分钟开始测试；然后以 1°C/分钟增至 50°C 并在 50°C 浸润 5 分钟；以 5°C/分钟继续增至 60°C；然后斜降至 50°C 并在 50°C 浸润 5 分钟；然后以 1°C/分钟降至 0°C 并在该温度下浸润 5 分钟。在 0°C 时按相似方式以 5°C/分钟降至 -30°C 并回升到 0°C；在 0°C 浸润 5 分钟，然后以 1°C/分钟回升至 25°C。

由于处理室物理结构及其中使用风扇进行空气流通，升温过程中会发生误触发。在浸润过程中，整个测试温度范围内不会发生误触发，证明了本设计在超出温度极限时的功能性。误触发是基于 PIR 的运动检测器中的常见现象，通常建议不要将检测器安装于通风系统附近。防止测试期间发生误触发的唯一已知方法是将传感器覆盖，使其不受加压气流及室壁反射所造成热梯度的影响；然而，这不是该测量工作的内容。

为了防止因湿度快速变化而造成误检，测试过程中的湿度应缓慢变化，实现典型工作环境中的效果。测试中的湿度以 1%/分钟由 20% 升至 70%，然后降至 20%，初始浸润时间为 30 分钟。温度保持 45°C 以避免冷凝；然而，当湿度大于等于 68% 时，依然发生冷凝。

测试过程中唯一的异常现象出现于 PCB 发生冷凝的时刻，此时将发生误触发。当湿度降至 PCB 变干时，误触发现象停止，后续测试中也将消失。

4.1.3.2 运动灵敏度

低于 1GHz 版本的 TI 设计 (TIDA-00489) 的运动灵敏度范围是通过以下方式测量的：将通用原型设计 PCB 中构建的双脉冲展宽器设计与每个通道中提供直观指示的 LED 输出相连。脉冲展宽器的输入与参考设计的窗口比较器输出测试点相连。如果使用该方法，在 LED 指示正在检测运动的过程中允许 PIR 传感器的位置固定不变。脉冲展宽器由自身纽扣电池进行供电，以避免干扰或更改被测 PIR 传感器的运行。指示针对运动进行可靠检测的最远距离，对其进行测量并以灵敏度的形式进行报告。该装置图 19 所示。

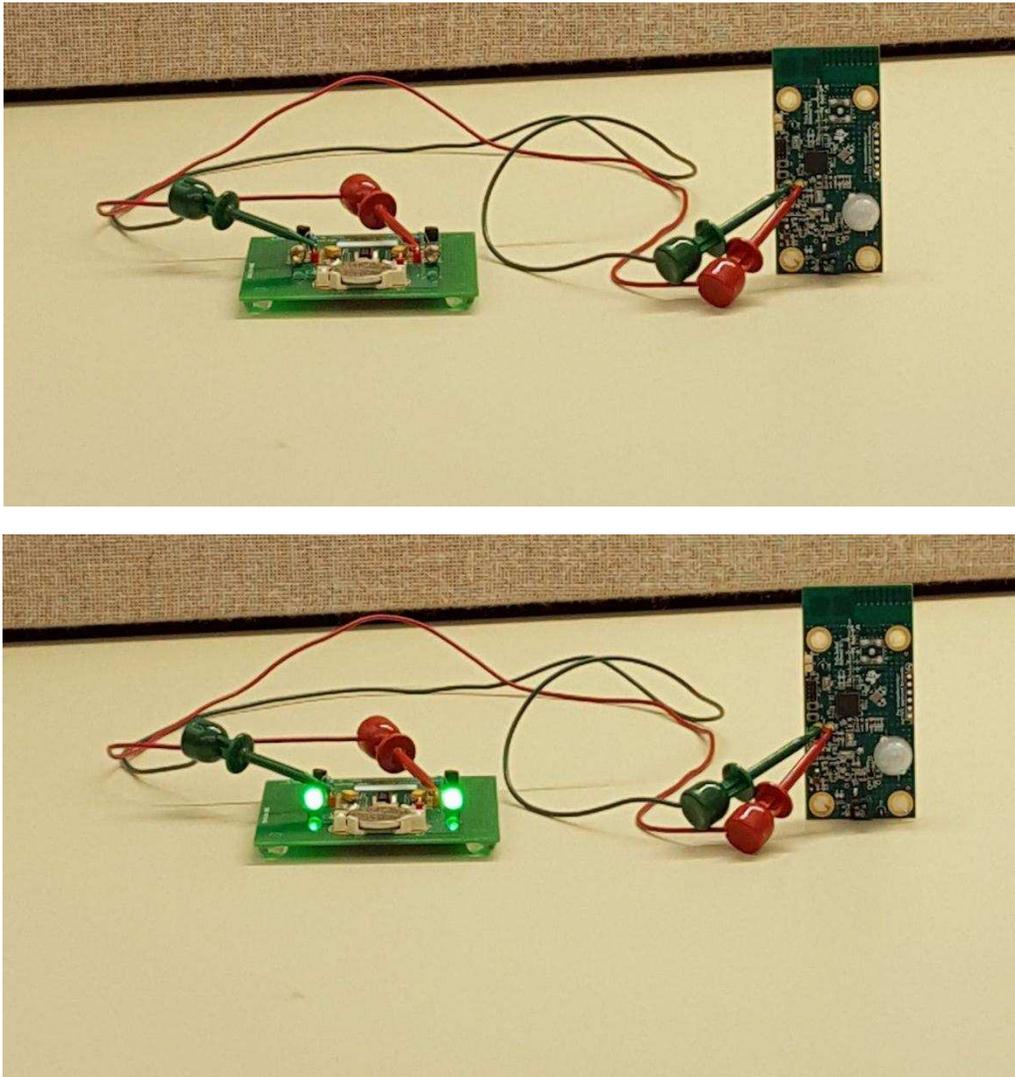


图 19. 运动灵敏度测试装置
(上图：无运动；下图：检测到运动)

4.1.3.3 无线射频范围

2.4GHz 无线射频的范围通过使用节 3.2.2.2 中所述的 SmartRF06 评估板和 CC2650 EVM 测得。对于此测试，当 PIR PCB 从 SmartRF06 板上移开时，SmartRF06 板保持在静止位置。在 PIR PCB 的移动过程中，PIR 设计始终在短暂的固定时间间隔内进行复位，以确保不断传输无线电数据包。这两个板始终互相直视。然后测量不再接收数据包时的距离。

4.1.3.4 射频抗扰度

低于 1GHz 版本的 TI 设计 (TIDA-00489) 的射频辐射抗扰度是根据 IEC61000-4-3 标准在扩展低频范围内测得的。IEC 标准规定的频率范围为 80MHz 至 1GHz；然而，该测试将频率范围向下扩展至 10kHz，以了解设计对于电路通带附近干扰的敏感性。

该装置将节 4.1.3.2 所用脉冲展宽器电路板与窗口比较器输出相连，同时使用消音室内部摄像机监测 LED 活动情况。另外，在被测电路板附近放置一个场强探针，监控其射频场强大小。图 20 所示为测试装置。

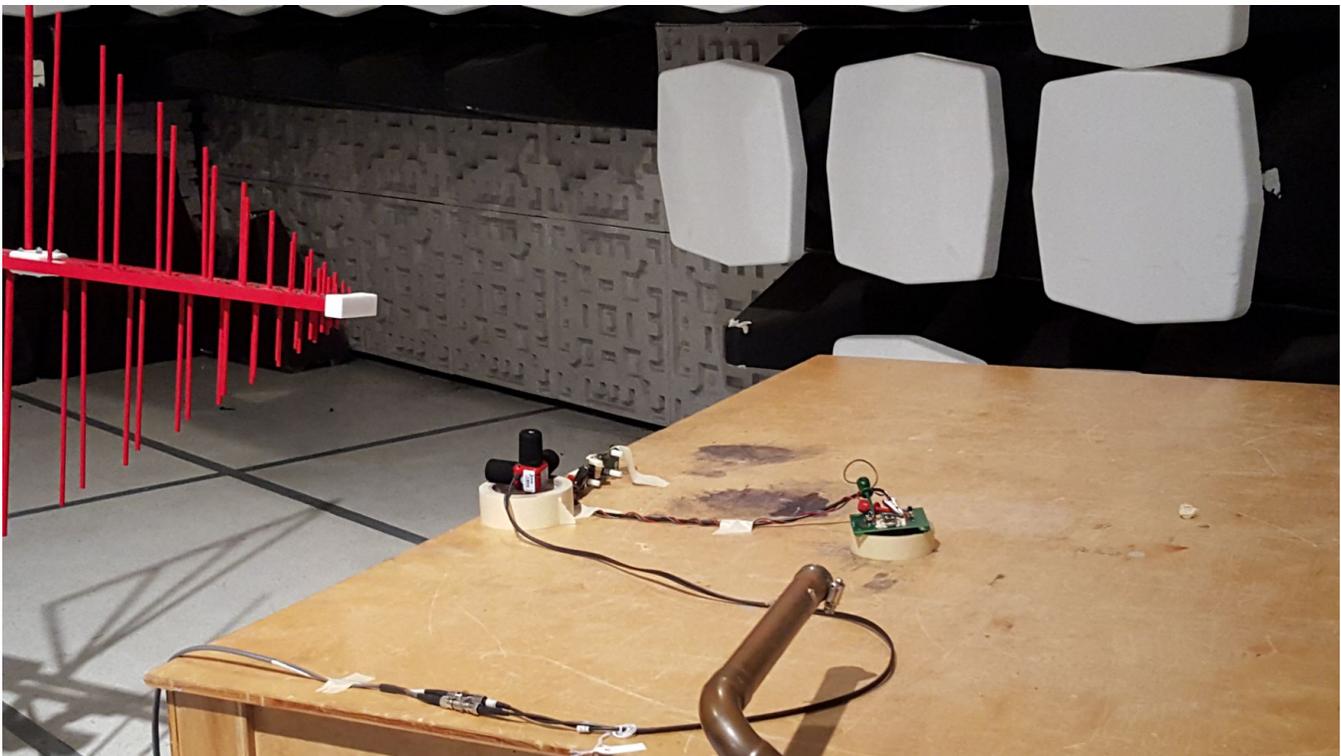


图 20. RF 干扰度测试装置

图 20 所示的双锥天线在水平和垂直方向的工作频率范围均为 30MHz 至 1GHz（图中为垂直方向）。对于低于 30MHz 的频率，每个方向必须使用一根拉杆天线。

4.2 测试数据

注：除非另行说明，否则以下章节中的系统测试数据均在室温下测得。本节中的所有测量值均使用经过校准的实验室设备测量。

4.2.1 电源特性

表 2 显示整个系统在关断和待机模式下工作时的功耗。这两种模式与图 9 中所述的模式有关。增量列用于确定电源电流在这两种模式间的增量。该值将用于计算电池寿命。表 2 中高亮显示的行仅供参考。传感器在该电压下的噪声过大，开始产生误触发。测量此电压在关断模式下的电流时仅使用了唯一一种方式，即对用户模式进行编程，使 MCU 保持关断并忽略中断，这也是在此电源电压电平下系统未报告任何待机模式数据的原因。

表 2. 低功耗 PIR 运动检测器电源特性结果

V _{CC}	电源电流		
	关断	待机	增量
3.8V	2.25μA	3.56μA	1.31μA
3.6V	2.22μA	3.40μA	1.18μA
3.4V	2.19μA	3.32μA	1.13μA
3.2V	2.18μA	3.38μA	1.20μA
3.0V	2.16μA	3.45μA	1.29μA
2.8V	2.15μA	3.49μA	1.34μA
2.6V	2.13μA	3.47μA	1.34μA
2.4V	2.12μA	4.04μA	1.91μA
2.2V	2.11μA	不可用	不可用

从表 2 中还可观察到关断电流与电源电压之间存在轻微正相关性，这正是希望出现的结果。然而，这还表明根据平均值计算的电池寿命较为保守，原因是电源电流随电池的老化而降低。

表 2 中用于计算电池寿命的值是在 3.3V 至 2.4V 的电池电压范围内的平均电流。关断模式的平均电流为 2.16μA，而待机模式的平均电流为 3.51μA。关断和待机模式之间的平均 Δ 电流为 1.34μA。

电源特性界定的最后一部分是在模式发生变化时测量无线电传输过程中的大电流间隔。图 21 显示发送 ON 数据包的事件。测试结果保持不变，重复使用了低于 1GHz 版本 TI 设计 (TIDA-00489) 的测试结果。

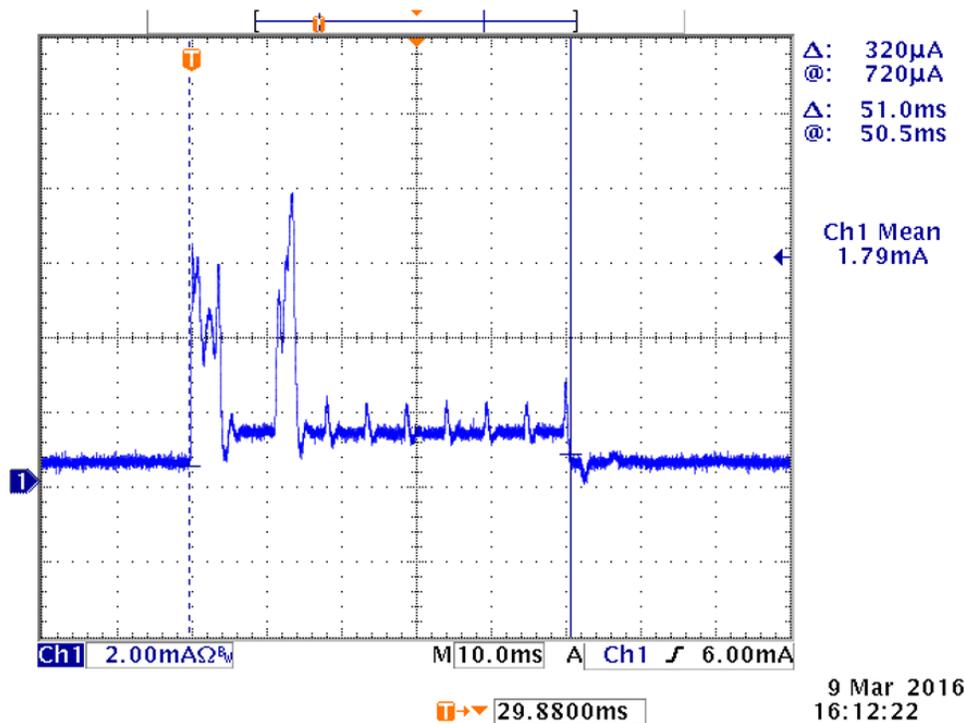


图 21. 无线电传输事件电源电流

平均电流通过多个 PIR 板在无线电传输期间的测量值计算得出。在 56.66ms 的总持续时间内，平均电流消耗为 1.57mA。

本节中高亮显示的数据值将在下节中用于计算电池在不同预期使用条件下的预期寿命。

4.2.2 电池寿命计算

本参考设计电池寿命的计算过程较为复杂，原因是应用种类繁多，而且此类传感器节点可在多种条件下使用。此处采用的方法计算两种不同预期使用条件与极端使用条件对应的平均值。这些使用条件如下所述：

- **案例 1：极端情况：**在电池使用寿命内，每小时发生 10 次运动事件。每个运动事件均为穿行事件，即人体穿过视野后产生一个中断，允许工作定时器超时并在下次事件发生前再次进入关断模式。
- **案例 2：办公室环境内忙碌的房间：**14 小时处于关断模式，持续运动 10 个小时，以便工作定时器在激活后不会超时。
- **案例 3：房间在营业时间内进行间歇性运动：**14 小时处于关断模式，持续运动 10 小时，每小时发生 10 次运动事件。与案例 1 相似，每个事件即为一次穿行事件。

调整本设计中工作定时器的时间是另一种优化电池寿命的方法。固件的默认值是 1 分钟。由于该值可以更改，因此以 30 秒重新计算案例 1 和案例 3 的电池寿命，从而显示预期的改善效果。

上述三种案例的电池预期使用寿命的计算公式如下：

电池寿命的通用计算公式为：

$$\text{Lifetime} = \frac{\text{Battery Capacity}}{\text{Shutdown Current} + \text{Event Current}} \times \frac{1}{8760 \text{ hr / yr}} \times \text{Derating Factor} \quad (13)$$

其中

- $\text{Event Current} = [(\Delta \text{Current} \times \text{Active Mode Duty Cycle}) + (\text{Radio Transmission Current} \times \text{Duty Cycle})] \times \text{Number of Events}$

案例 1

$$\text{Lifetime} = \frac{240 \text{ mAH}}{\left\{ 2.16 \mu\text{A} + \left[\left((1.34 \mu\text{A} \times 60 \text{ s / event}) + (1.57 \text{ mA} \times 56.66 \text{ ms / event} \times 2) \right) \times \frac{10 \text{ events / hr}}{3600 \text{ s / hr}} \right] \right\}} \times \frac{1}{8760 \text{ hr / yr}} \times 0.85 = 8.09 \text{ years}$$

案例 2

$$\text{Lifetime} = \frac{240 \text{ mAH}}{2.16 \mu\text{A} + 1.34 \mu\text{A} \left(\frac{10 \text{ hours}}{24 \text{ hours}} \right) + \left[(1.57 \text{ mA} \times 56.66 \text{ ms / event}) \times \frac{2 \text{ events / day}}{(3600 \text{ s / hr})(24 \text{ hr / day})} \right]} \times \frac{1}{8760 \text{ hr / yr}} \times 0.85 = 8.57 \text{ years}$$

案例 3

$$\text{Lifetime} = \frac{240 \text{ mAH}}{\left\{ 2.16 \mu\text{A} + \left[\left((1.34 \mu\text{A} \times 60 \text{ s / event}) + (1.57 \text{ mA} \times 56.66 \text{ ms / event} \times 2) \right) \times \frac{10 \text{ events / hr}}{3600 \text{ s / hr}} \times \frac{10 \text{ hours}}{24 \text{ hours}} \right] \right\}} \times \frac{1}{8760 \text{ hr / yr}} \times 0.85 = 9.47 \text{ years}$$

这些公式中的降额因子代表电池的自然老化。根据这些公式，当有源计时器时间设为 1 分钟时，此参考设计的平均电池预期寿命为

8.71 年。将案例 1 和案例 3 中的有源计时器时间设为 30 秒并重新进行计算，计算结果分别为 8.42 年和 9.65 年。因此，当有源计时器时间设为 30 秒时，电池平均预期寿命为 8.88 年。通过检查案例 3 发现，进一步减少有源计时器值可以产生长达 10 年的估计电池寿命。

4.2.3 功能

以下子章节介绍了不同功能测试的测试结果。在仅测试 PIR 运动传感器设计功能的情况下，我们重复使用了来自《具有低于 1GHz 无线连接且可实现 10 年纽扣电池寿命的低功耗 PIR 运动检测器 TI 设计》(TIDA-00489) 的测试结果。两个 TI 设计使用相同的 PIR 运动传感器设计，包括原理图、布局 and BOM，这允许在这两个设计中重复使用测试结果。以下每个章节都说明了是否重复使用了来自此 TI 设计的低于 1GHz 版本的测试结果。

4.2.3.1 运动灵敏度

多个传感器的运动灵敏度是在不同偏置条件及两种不同增益设定下测得的。表 3 总结了这些测量结果。这些测试使用了 2.4GHz 和低于 1GHz 两个版本的 TI 设计 (TIDA-00489)。

表 3. 低功耗 PIR 运动检测器灵敏度值

传感器	电源电流 (空闲)	V _{OUT} (直流)	最大值距离 (A _v = 90dB)	最大值距离 (A _v = 70dB)
RS = 2.2MΩ, RD = 1MΩ				
IRS-B210ST01	365nA	0.78V	20ft	6ft
IRS-B340ST02	355nA	0.764V	25ft	8ft
IRA-E700ST0	500nA	1.093V	12ft	4.5ft
IRA-E712ST3	555nA	1.204V	13ft	5ft
RS = 1.3MΩ, RD = 620KΩ				
IRS-B210ST01	594nA	0.77V	> 30ft	6.5ft
IRS-B340ST02	572nA	0.744V	27ft	8ft
IRA-E700ST0	838nA	1.085V	15ft	5ft
IRA-E712ST3	920nA	1.178V	17ft	7.5ft

表 3 中突出显示的单元格说明了在 2.4GHz 和低于 1GHz 版本的 TI 设计中实现的电路配置的运动灵敏度。

4.2.3.2 无线射频范围

在具有直接视线的典型办公环境中，测得的无线射频范围至少为 54 米。由于用于该测试的办公大楼所存在的物理限制，我们无法测试更长的距离。此外，CC2650 无线电传输功率设置为 0dBm。

此 TI 设计能够成功将数据包下行传输到整个长度为 54 米的办公大楼，基本没有障碍。不过，终端设备环境下的无线电性能可能有所不同，因为射频传输路径受阻后会导致范围缩小。为了充分验证 TI 设计的硬件传输特性，需要进一步测试终端设备环境。

4.2.3.3 射频抗扰度

在整个 10kHz 至 1GHz 频率范围内测得的低于 1GHz 版本 TI 设计 (TIDA-00489) 的射频抗扰度为 30V/m。由于设备频率范围限制为 30MHz 左右, 因此未测试超出该场强的抗扰度。该抗扰度水平对应于 IEC61000-4-3 标准中的级别 3。

本测试中观察到的唯一异常是 728.5MHz 这一独特频率步长。天线水平方向的抗扰度水平在该频率步长下降至 29.8V/m。导致下降的原因是 PIR PCB 以及用于监视的脉冲扩展板之间的接线。

4.2.3.4 振动

本参考设计的振动测试并非官方测试。部分原因是难以找到市售 PIR 运动探测器的振动规范。初级振动测试是使用低于 1GHz 参考板在实验室内完成的, 具体方法为敲打放置 PIR 的桌子, 并查看窗口比较器的输出是否产生误触发事件。根据本测试, 只要 PCB 未发生物理移动, 便不会出现误触发。本设计较为简略, 但依然说明了在正常应用中, 除传感器自身结构外, 本设计自身并不会引发系统性误触发。

更为详细的测试包括在频率和幅值同时变化的情况下控制振动。测试结果揭示了针对振动的潜在谐波灵敏度。为了全面揭示给定设计在不同安装方式下的振动灵敏度, 还可以改变 PCB 方向进行测试。由于此类精心设计的测试会随 PCB 设计最终物理封装的不同而产生不同结果, 因而这也超出了本参考设计的范围。

在传感器物理构造及自身工作方式的影响下, 所有基于 PIR 的运动传感器对于振动均存在一定敏感性。由于制造 PIR 传感器的热电堆元件具有晶振结构, 因此如果热电堆自身振动的频率和幅值达到一定程度, 将产生压电效应。更为常见的影响源于传感器整体的移动。Fresnel 镜头将 IR 能量集中于传感器元件的小区域中, 从而放大远离传感器位置的有效视野, 因此传感器的微小移动会导致视野内发生大幅移动。由于存在背景红外线能量, 传感器输出无法区分静态背景下运动引起的红外线能量变化或视野运动导致背景自身快速变化。换言之, 运动检测具有相对性。如果传感器完全静止, 检测到的运动将与传感器相关; 然而, 如果背景静止但传感器发生移动, 也会检测到运动情况。在这两种情况下, 由于存在运动情况, 所以输出有效, 但将输出降至理想状态依赖于安装和封装设计。

5 设计文件

5.1 电路原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-01398](#) 的设计文件。

5.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-01398](#) 的设计文件。

5.3 PCB 布局建议

针对 [TIDA-00759](#) 所示的布局指南也适用于 [TIDA-01398](#) 参考设计。

为了确保实现高性能，适用于成本优化型系统的超低功耗无线 PIR 运动检测器 TI 设计使用四层 PCB 进行布局。第二层为固态 GND 覆层，第三层用于电源轨布线，GND 分布在未使用区域。顶层和底层用于一般信号布线，GND 也分布在未使用区域。对于本 TI 设计中使用的全部 TI 产品，要遵照相应数据表详述的布线指南操作。

另外，考虑到低功耗设计以及设计中因此而产生的高阻抗路径，应尽量缩短 PIR 传感器输出和窗口比较器输入连接之间模拟传感器路径中的信号布线，同时在这些信号周围安放足够的接地端。

如果在可能积累灰尘或水分的环境中使用此 TI 设计，请注意可能需要使用保形涂层，以防随着时间推移，在工作环境的影响下产生其他泄漏路径。

此 TI 设计的天线是用于 2.4GHz 收发器和发送器的倒置 F 型 PCB 天线。有关布局和性能的更多详细信息，请参阅应用手册 DN0007 ([SWRU120](#))。

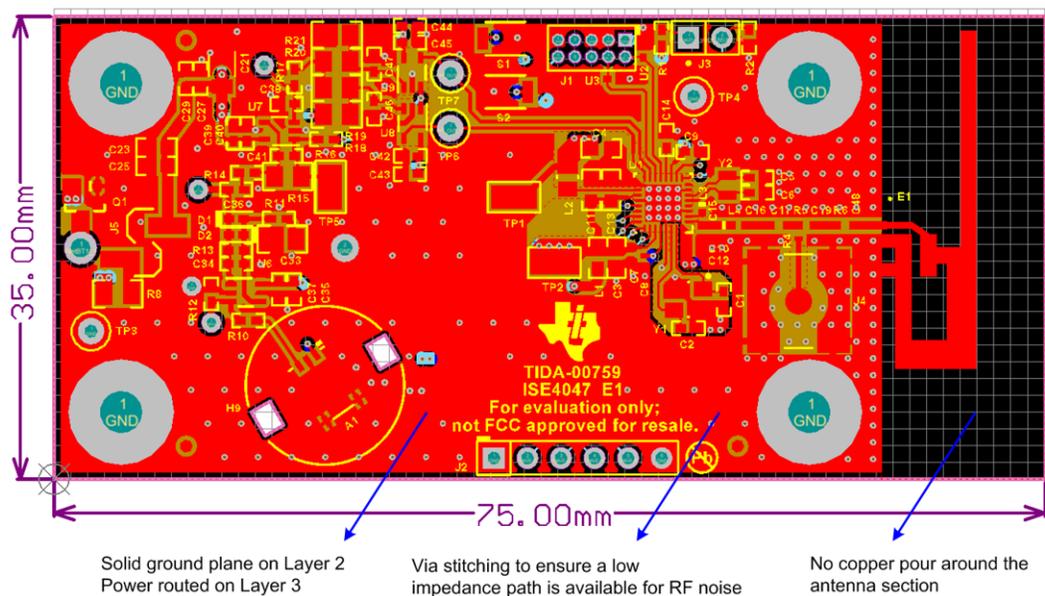
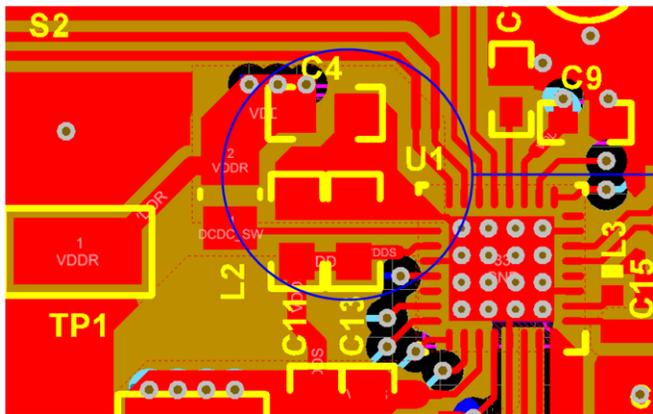


图 22. 低功耗 PIR 运动检测器参考设计布局指南



For the integrated DC-DC converter in the CC2650, the input capacitors C11 and C13, inductor L2, and output capacitor C4 were placed such that a common ground area is used for the capacitors. The ground area had no ground vias and was directly connected the ground pin on the CC2650.

图 23. DCD 布线准则

5.3.1 层图

要下载层图，请参阅 [TIDA-01398](#) 的设计文件。

5.4 Altium 项目

要下载 Altium 项目文件，请参阅 [TIDA-01398](#) 的设计文件。

5.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-01398](#) 的设计文件。

5.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-01398](#) 的设计文件。

6 软件文件

要下载软件文件，请参阅 [TIDA-01398](#) 的设计文件。

7 参考

1. 德州仪器 (TI) 应用报告 《反向电流/电池保护电路》(SLVA139)
2. 德州仪器 (TI) WP001 白皮书 《纽扣电池和峰值电流消耗》(SWRA349)
3. 德州仪器 (TI) DN007 应用报告 《2.4GHz 倒置 F 型天线》(SWRU120)
4. 德州仪器 (TI) WEBENCH®设计中心 (<http://www.ti.com.cn/webench>)

7.1 商标

SimpleLink, SmartRF, Code Composer Studio are trademarks of Texas Instruments.
 WEBENCH is a registered trademark of Texas Instruments.
 ARM, Cortex, ARM) are registered trademarks of ARM Ltd.
 Bluetooth is a registered trademark of Bluetooth SIG.
 CoreMark is a trademark of EMBEDDED MICROPROCESSOR BENCHMARK CONSORTIUM.
 增强型 is a registered trademark of Energizer Brands, LLC.
 IAR Embedded Workbench is a registered trademark of IAR Systems.
 Microsoft, Excel are registered trademarks of Microsoft.
 Murata is a registered trademark of Murata Manufacturing Co. Ltd..
 Wi-Fi is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.
 ZigBee is a registered trademark of ZigBee Alliance.

All other trademarks are the property of their respective owners.

8 关于作者

DAVID STOUT 是德州仪器 (TI) 的系统设计师，负责开发工业领域的参考设计。David 在模拟、混合信号和 RF IC 设计领域拥有超过 18 年的丰富经验，专注于工业半导体市场产品超过 14 年。David 于路易斯安那州巴吞鲁日市的路易斯安那州立大学获得电气工程专业理学学士学位 (BSEE)，然后在德克萨斯州理查德森市的德克萨斯大学达拉斯分校获得电气工程理学硕士学位 (MSEE)。

CHRISTINA S. LAM 是德州仪器 (TI) 的系统架构师，负责开发面向工业领域的参考设计解决方案中的固件。Christina 在应用处理器、微控制器以及数字信号处理器领域经验丰富，尤为擅长开发嵌入式固件。Christina 拥有德克萨斯大学奥斯汀分校的电气及计算机工程硕士学位 (BS)。

GUSTAVO MARTINEZ 是德州仪器 (TI) 的高级系统架构师，他负责开发面向工业应用的参考设计。Gustavo 在开发适用于智能电网和家庭自动化领域的系统参考设计方面拥有丰富的经验，其中包括高性能应用处理器、浮点数字信号处理器和射频技术。Gustavo 在休斯顿大学获得了电气工程学硕士学位，并在德克萨斯大学埃尔帕索分校获得了理学学士学位。

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。您就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等产权包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默示的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无复发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、评估模块和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2017 德州仪器半导体技术（上海）有限公司