

Design Guide: TIDA-00848

使用 **GPIO** 引脚且具有段式 **LCD** 控制功能的单芯片热量分配表参考设计

说明

段式 LCD 显示屏在超低功耗计量与分户计量应用 (例如热量分配表、水表和热量表) 中非常受欢迎, 通常由 MCU 中的专用片上 LCD 控制器模块进行控制。此设计展示了一种 TI 获得专利的替代方案, 无需此类模块即可与任何 TI MCU 配合使用。通过电阻网络和 GPIO 控制软件, 在 **CC1312R** 无线 MCU 内的传感器控制器引擎上实现了 LCD 驱动功能, 从而实现 $7.3 \mu\text{A}$ 的功耗 (未连接 LCD)。为了在符合 EN 834 标准的热量分配表中实现最低功耗, 用户可通过电容式触控或按钮事件来激活 LCD。

资源

TIDA-00848	设计文件夹
CC1312R	产品文件夹
TMP63	产品文件夹
TLV2333	产品文件夹
TIDA-00848	工具文件夹

特性

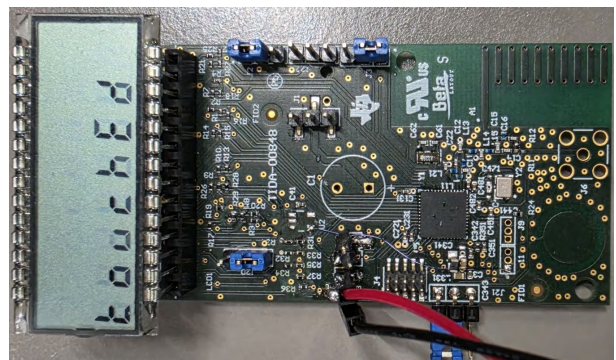
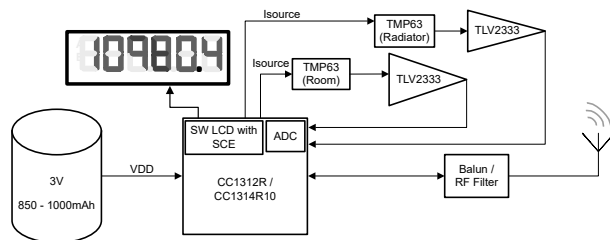
- CC1312 SimpleLink™ 无线 MCU 通过 GPIO 控制段式 LCD (TI 获得专利的 TI MCU 设计)
- 只需四条 COM 线、两条控制线和 21 条段线 (共 27 个 I/O) 即可驱动 84 个 LCD 段 (4-MUX, 1/3 偏置)
- 传感器控制器外设定期读取两个 TMP63 传感器, 检查是否存在 CapTouch 事件并实现 IrDA 通信端口
- 具有 HCA 封装的双层 PCB, 采用 96 段 LCD (4-MUX) 和用于 LCD 开启/关闭的电容式触控区域
- 平均电流: 3.6V 时为 835nA (LCD 关闭) ; 仅 SCE 时为 $7.3 \mu\text{A}$, 3.3V 时为 $11.9 \mu\text{A}$ (使用 BTL002 4-MUX LCD 时 28 个段开启)

应用

- [热量分配表](#)
- [水表](#)
- 热量 (热/冷) 表



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 主要系统规格

CC1312 无线 MCU 在 1.8V 至 3.8V (允许的绝对最大值为 4.1V) 范围内运行，并规定了 TIDA-00848 的电源电压范围。这非常适合原电池化学物质，例如标称电压为 3.6V 的 LiSoCl₂ 或标称电压为 3.0V 的 LiMnO₂。

TMP63 是一款具有正温度系数 (PTC) 的硅基线性热敏电阻，工作电压范围为 0V 至 5.5V，在 25°C (R25) 时标称电阻为 100k Ω ，最大容差为 $\pm 1\%$ (0°C 至 70°C)。该器件在整个温度范围内具有 0.2% 的典型 TCR 容差，采用标准 0402 DEC 封装，快速热响应为 0.6s。

OPA2333 是一款双通道低噪声 RRIO CMOS 运算放大器，适用于对成本敏感的系统；如果仅使用正电源电压，其工作电压范围为 1.8V 至 5.5V。

表 1-1. 主要系统规格

特性	说明
TI 无线 MCU	CC1312R、CC1312R7、CC1314R10
LCD 帧速率	可通过软件进行调节 (基于 RTOS 节拍)
LCD 多路复用比	4MUX, 1/3 偏置
GPIO 数 (4 个 COM + 2 个 AUX + N 条 SEG 线)	最大值 30 (CC1312R/CC1312R7) 最大值 46 (CC1314R10)
工作温度范围 (°C)	- 40°C 至 105°C (CC1312R、CC1312R7 和 CC1314R10) - 40°C 至 150°C (TMP63) 4-MUX LCD 单元 (请参阅数据表)
电流消耗	3V3 时为 11.9 μ A (28 个 SEG 开启)
工作 电压	1.8V 至 3.8V
操作系统 (软件示例)	TI-RTOS 或 FreeRTOS
LCD 波形生成	传感器控制器引擎 (16 位 MCU 模块)
电池 (锂离子原电池)	3.0V LiMnO ₂ 3.6V LiSoCl ₂

2 系统说明

热量分配表 (HCA) 器件用于在采用集中供热源 (如热水) 且每个场所内有多个散热器单元的建筑物中测量所消耗的供暖费用。HCA 与热量表配合使用, 后者以千瓦时 (kWh) 为单位测量物理能量: 每个 HCA 记录其所连接散热器主体的相对热量消耗单位, 以确定每位租户在总供暖费用账单中应分担的合理份额。根据欧洲能效指令 (EED), 收费必须基于实际使用量, 而不是公寓的建筑面积。热量分配表 (HCA) 在温度达到 20°C 或以上时开始记录 (测量)。

HCA 集成了多个子系统:

- **温度检测** (单传感器, 或主要用于室温和散热器的双传感器)
- **RF (射频) 868MHz**, 支持 **wM-Bus C 模式** (S 模式和 T 模式正在逐步淘汰)
- **段式 LCD**, 用于显示消耗的相对单位
- **光学 (IrDA)** 单或双 LED, 用于读取数据并在现场配置 HCA 器件, 也在制造 HCA 器件制造期间使用
- **电池** (原电芯, 典型容量约为 1,000mAh, 使用寿命超过 12 年, 包括 10 年至 11 年的运行时间 + 货架存储时间 + 几个月的运行余量)
- **处理能力** (超低功耗 MCU 内核, 每分钟处理几次温度传感器数据, 使用算法将温差和时间转换为消耗单位。
- **安全与防篡改**, 包括物理密封和电子防篡改传感器或其他手段, 用于检测并记录任何尝试或实际从散热器拆卸该器件的行为

备注

这款 TI 获得专利的设计用于使用多路复用器电阻网络驱动段式 LCD 显示屏, 只能免费与 Texas Instruments Inc. 的任何有线或无线 MCU 产品结合使用, 例如 MSPM0+、MSPM33、C2000™、CC13xx、CC26xx 和 CC27xx 系列等。

TIDA-00848 表示支持 868MHz wM-Bus 的 HCA 单芯片参考设计, 满足以下 EN 834 要求:

- 两个具有成本效益的 **TMP63** 线性热敏电阻温度传感器, 用于替代室温和散热器传感器的常用 NTC
- **CC1312R** 无线 SoC, 用于支持 868MHz wM-Bus 射频子系统 C 模式, 并已证实支持 **mioty (tm)** 模式。

TIDA-00848 通过专用的外部电阻网络 (请参阅节 8.1) 和特殊软件 (以开源代码示例的形式提供) 来驱动段式 LCD 显示屏。**CC1312R** 的传感器控制器外设会定期读取两个 **TMP63** 传感器的电压, 并将这些值转换为温度单位; 其他时间 **TMP63** 传感器通过 **GPIO** 引脚断电。与此同时, 传感器控制器编程为定期 (例如每秒) 检查是否存在 **PCB** 触摸事件。如果检测到此类触摸事件, 则启用 **LCD** 功能, 并且从现在开始 **LCD** 将保持启用状态, 直到发生可编程的超时, 最多 84 个段开启 (可见)。LCD 支持功能已集成到 TI 的 [Sensor Controller Studio](#) 工具中, 并支持 **4-MUX LCD** 显示屏, 也可用于任何配备传感器控制器引擎模块的 TI 无线 MCU 应用。

2.1 CC1312R 具有 352kB 闪存的 SimpleLink 32 位 Arm Cortex-M4F 低于 1GHz 无线 MCU

CC1312 无线 MCU 具有一个用于应用开发的 ARM® Cortex®-M4F 内核 (请参阅图 2-1) 。

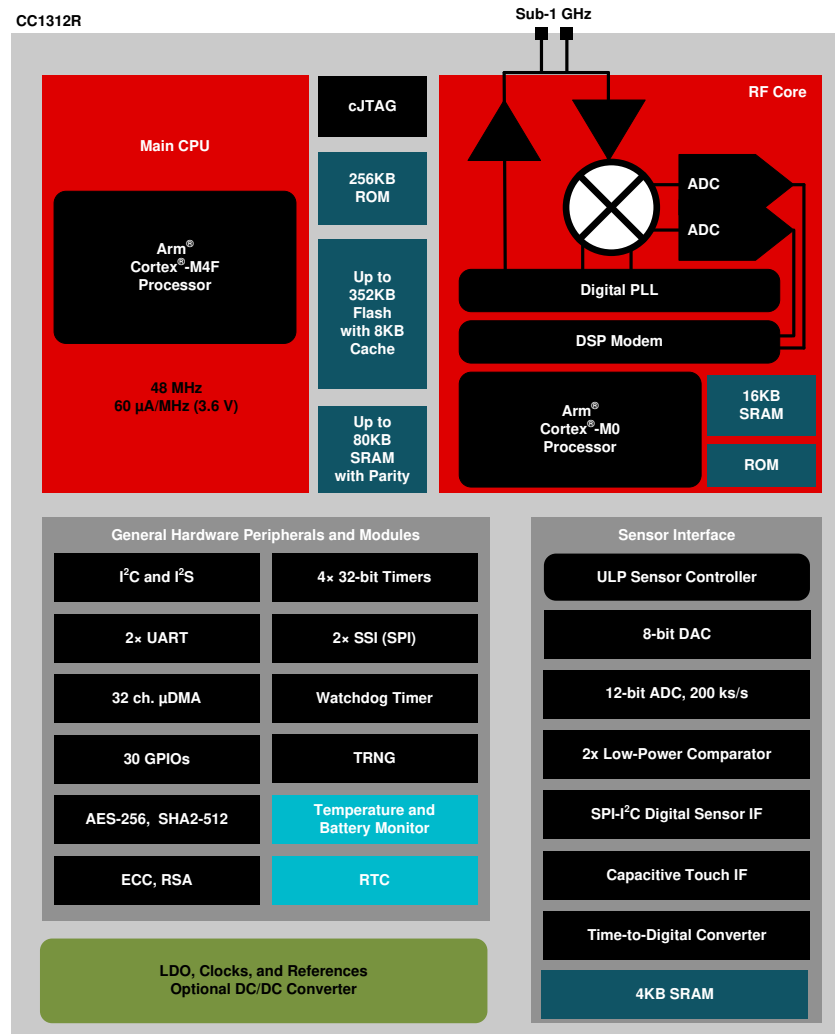


图 2-1. CC1312 方框图

CC1312R 提供高性能、低成本的平台，满足系统对于减小存储器和降低功耗的要求，同时还能提供出色的计算性能和优越的系统中断响应能力。ARM Cortex-M4F 内核以高达 48MHz 的速度运行，并且器件中还配备了 352KB 系统内可编程闪存、用于高速缓存 (或作为通用 RAM) 的 8KB SRAM，以及具有奇偶校验功能的 80KB 超低漏电流 SRAM。传感器控制器引擎 (SCE) 已针对超低功耗进行优化，能够在 24MHz 或 2MHz 低功耗模式下独立于系统的其余部分运行，电流消耗仅为 0.4mA + 8.2 μA/MHz。

作为专有且经过功耗优化的 16 位 CPU，SCE 能够自主读取并监测传感器或执行其他任务，从而显著降低功耗并减轻主 Cortex-M4F CPU 的负担。SCE 采用 16 位架构，并具有专用的 4KB 超低漏电流 SRAM (用于存储代码和数据)。CC1312 待机电流为 0.85 μA (RTC 开启，80KB RAM 和 CPU 保持)。SCE 无缝连接并读取 TMP63 传感器和电容式触控 PCB 区域，以极低的功耗实现极佳的精度，适用于符合 EN 834 标准的 HCA。

传感器控制器引擎 (SCE) 包含可在待机模式下选择性启用的电路；除了 24MHz 模式 (适用于更高计算量和非常精确的计时) 之外，还支持超低功耗应用场景的 2MHz 工作模式。

CC1312 的一个关键外设是 SAR ADC 模块，这是一款 12 位、每秒 20 万次采样的 ADC，具有八个输入和一个内置电压基准。模拟模块最多连接八个不同的 GPIO。每个 CC1312R 器件在室温下都有两个用于 ADC12 的校准值：一个用于增益，一个用于偏移，由 TI 在器件制造期间写入专用闪存区域。

2.2 TMP63 采用 0402 封装的 $\pm 1\%$ 100k Ω 线性热敏电阻

线性热敏电阻可在整个温度范围内提供线性和一致的灵敏度，支持使用简单而准确的方法进行温度转换。低功耗和较小的热质量可最大限度地减小自发热的的影响。凭借内置的高温失效防护以及对环境变化的强大抵抗力，这类器件可长时间提供高性能。TMP6 系列器件外型小巧，可靠近热源放置，并具有快速响应时间。与 NTC 热敏电阻相比，它具有以下优点：无需额外的线性化电路、更大程度减少甚至完全无需校准、电阻容差变化更小以及可节省 MCU 时间和存储的简化转换方法。

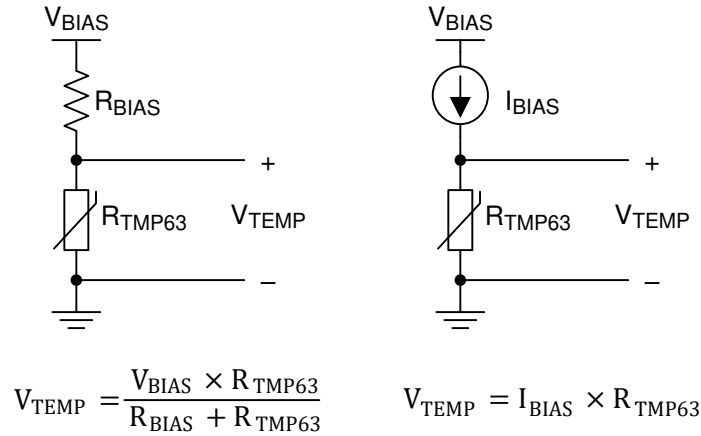


图 2-2. TMP63 # 典型实现

两个 TMP63 由 SCE 内的可编程电流源模块直接激励，从而实现极小封装尺寸、超低成本的温度测量解决方案。

TMP63 线性硅热敏电阻具有线性正温度系数 (PTC)，可在宽工作温度范围内实现一致、稳定的温度系数电阻 (TCR)。TI 使用特殊的硅工艺，其中掺杂水平和有源区器件控制关键特性 (温度系数电阻 (TCR) 和标称电阻 (R25))。该器件具有有源区和由于极化端子而形成的衬底。将正极端子连接到最高电压电位。将负极端子连接到最低电压电位。与纯阻性器件 NTC 不同，TMP63 电阻受器件中电流的影响，并且电阻会随温度变化而变化。

TMP63 是一款经济实惠、体积小巧的精密 NTC 和 PTC 热敏电阻替代产品，其精度规格如下：

- $\pm 1\%$ 最大值 (0°C 至 70°C)
- 传感器长期温漂典型值为 0.3%

与 NTC 热敏电阻相比，TMP63 具有多个优点：无需额外的线性化电路、更大程度减少校准、电阻容差变化更小以及可节省微控制器时间和存储的简化转换方法。

TMP63 目前采用与 0402 封装尺寸兼容的 X1SON 封装，使其成为 HCA 等分户计量应用的理想解决方案。

TLV2333 适用于成本敏感型系统的双路、350kHz、低噪声、RRIO、CMOS 运算放大器

TLVx333 系列 CMOS 运算放大器以极具竞争力的价格提供高精度性能。这些器件属于零漂移放大器系列，采用专有的自动校准技术，在仅 28 μA (最大值) 的静态电流下，同时提供低偏移电压 (最大值为 15 μV) 以及随时间和温度变化的近零漂移。除了接近白噪声的 1/f 噪声，TLVx333 系列特有轨到轨输入和输出，从而使得这款放大器非常适合很多应用，并且使其更加容易设计到一个系统中。这些器件经过优化，可在低至 1.8V ($\pm 0.9V$) 到高达 5.5V ($\pm 2.75V$) 的低电压下运行。TLV333 (单通道版本) 提供 SC70-5、SOT23-5 和 SOIC-8 封装。TLV2333 (双通道版本) 提供 VSSOP-8 和 SOIC-8 封装。TLV4333 提供标准 SOIC-14 和 TSSOP-14 封装。所有器件版本的额定工作温度范围均为 -40°C 至 +125°C。

3 系统设计原理

HCA 预计在 20°C 时开始测量，支持的最高温度通常为 90°C 至 95°C。

对于支持射频的系统，需要 MCU + 射频发送器（或收发器）。因此，由于 PCB 面积超小、集成了应用 MCU 和射频子系统并且易于使用，TI 的 CC1312R SimpleLink 无线 MCU 等单芯片设计更受青睐。由于 CC1312R 没有集成的 LCD 控制器硬件模块，因此开发并测试了此处介绍的 TI 专利解决方案：用于通过 GPIO 驱动 LCD。

3.1 CC1312R 作为主应用 MCU

为测量温度，使用了 CC1312R 中的电流源和 ADC12 模块。CC1312 的 12 位 ADC 有两个基准：用于 4.3V 缩放基准的缩放输入，或相对基准（标称值为 CC1312R 的 VDD5 电源电压）。请注意，使用 LiMnO2 电池时，该电压会随着时间的推移而下降，电池寿命终止电压通常设置为约 2V 或 2.1V。

在此 TI 设计中，传感器控制器会定期启用最大电流为 20 μ A 的集成可编程电流源，为两个 TMP63 器件实现电流偏置方案。驱动室温传感器和散热器传感器的电流必须具有相同的值，并布线到不同的模拟引脚，以保持比率测量。

使用来自 SCE 模块的完全相同激励电流时，每个 TMP63 器件产生的压降将在单级放大器电路中被放大，以增加动态范围。这在较高温度下是必要的，如散热器传感器所示。所实现的设计在 20°C 至 90°C 范围内达到近 4 倍的分辨率（包括该范围的上限和下限均增加了 1.5°C 的额外裕度）。

每个 TMP63 传感器放大的信号均馈送到 ADC12 片上模块，并由固件转换为温度值。

主应用程序在 CC1312R 上的 TI RTOS 下运行，因为 TI RTOS 能够精确调度温度测量、PCB 触摸检测和所有其他应用代码。

3.2 带有 TLV2333 放大器的 TMP63 线性热敏电阻

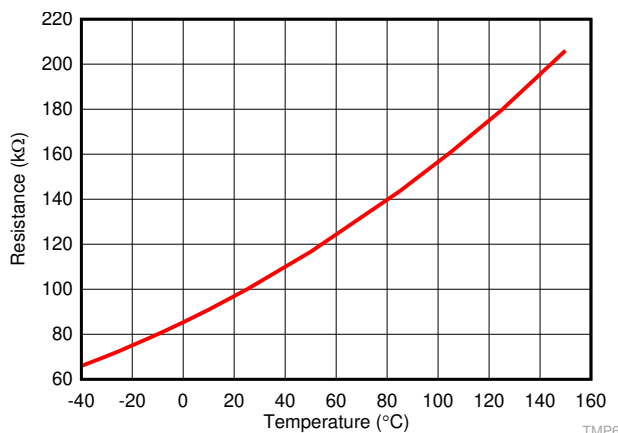


图 3-1. TMP63 典型电阻与环境温度间的关系

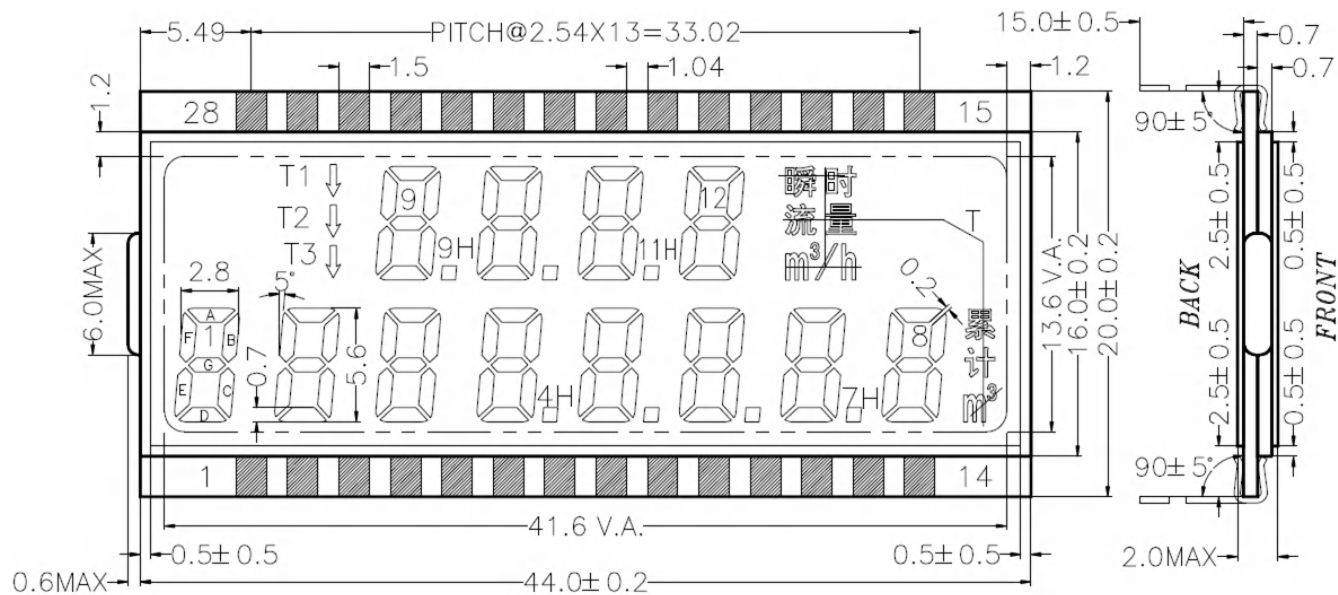
器件的数据表 (TMP63) 中记录了整个温度范围内的 TMP63 电阻图。为 TMP6331DYAT 设置 10 μ A 偏置电流并使用 Vreference 为 2.1V 的 12 位 ADC 时，热敏电阻设计工具（TI.com 上提供的基于 Excel 的工具）显示了典型值：20°C 时 Rvalue = 95458 Ω 和 90°C 时 Rvalue = 144779 Ω 。对于 18°C 至 95°C 的扩展温度范围，温差对应的电压变化仅为 54,625 $\Omega \times 10 \mu\text{A} = 0.546\text{V}$ 。由于最小电源电压为 2.1V 时 ADC12 满量程为 2.1V，因此第一个 TLV2333 放大器可实现近 4 倍的增益级，从而将电压范围扩展至 0.051V 至 2.05V，分辨率提高了近 4 倍。

室温可通过两种方式进行测量：假设输入范围为 20°C 至 40°C，则偏置电流可设置为 10 μ A 至 15 μ A，且无需放大级。如果需要更高的分辨率，则使用我们设计并仿真的单级放大器电路，该电路与散热器传感器类似，提供近 12 倍的高分辨率范围：0.238V 至 2.07V（利用 TLV2333 中的第二个放大器单元）。

3.3 4-MUX 1/3 偏置七段式 LCD (84 段)

由于物理尺寸小且功耗低，因此选择了具有 96 段和 4-MUX 功能的 LCD BTL002。

图 3-2 中提供了 LCD 的规格：



PIN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
COM1	1A	1F	2A	2F	3A	3F	4A	4F	5A	5F	6A	6F	7A	7F	8A	8F	9A	9F	10A	10F	11A	11F	12A	12F	COM1	--	--	--
COM2	1B	1G	2B	2G	3B	3G	4B	4G	5B	5G	6B	6G	7B	7G	8B	8G	9B	9G	10B	10G	11B	11G	12B	12G	--	COM2	--	--
COM3	1C	1E	2C	2E	3C	3E	4C	4E	5C	5E	6C	6E	7C	7E	8C	8E	9C	9E	10C	10E	11C	11E	12C	12E	--	--	COM3	--
COM4	T1	1D	T2	2D	T3	3D	4H	4D	5H	5D	6H	6D	7H	7D	T	8D	9H	9D	10H	10D	11H	11D	--	12D	--	--	--	COM4

图 3-2. BTL002 规格 (96 段 LCD)

3.4 采用 GPIO 的段式 LCD 控制设计说明 (TI 获得专利的设计)

图 3-3 展示了用于生成四个 COM 信号和一个 SEG 信号的 TI 专利电路。每条 SEG 线都有一个 GPIO 引脚，并通过一个单独的电阻器 R_{seg} 连接到四个不同的 LCD 段 (如果使用了 4 MUX LCD)，以及连接到 SEG_BASE_COMMON 信号。连接到一条 SEG 线的四个 LCD 段中的每一段都连接到不同的 COM 线。

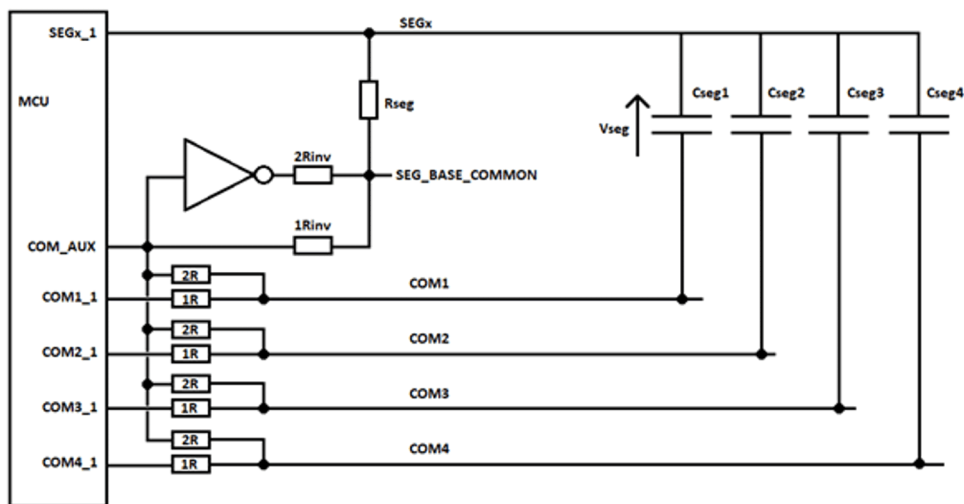


图 3-3. TI 获得专利的 MUX LCD 信号生成，4 个 LCD 段显示为电容 Cseg1 至 Cseg4

上图中的电阻器 1R 和 2R 表示 2R 的值是 1R 的两倍，这同样适用于可选外部反相器器件周围的 $2R_{inv}$ 和 $1R_{inv}$ 电阻器。

用于生成 COM 信号以及 BASE_PWM 和 BASE_PWM_N 信号的所有 GPIO 均配置为输出。COM 输出的信号如下所示。要生成 SEG_BASE_COMMON 信号，可以使用单独的 GPIO 作为 BASE_PWM_N，而不是反相器。任何 LCD 的偏置值均规定 LCD 电源电压 (V_{LCD}) 被划分为多少个中间电压电平。例如，BTL002 显示屏的 1/3 偏置表示有四种不同的电压电平： $0V_{LCD}$ ； $1/3V_{LCD}$ ； $2/3V_{LCD}$ ；和 $3/3V_{LCD}$ 。

3.5 通过 GPIO 生成方形 LCD 波形 (TI 获得专利的设计)

问题：如何仅使用在 V_{LCD} 和 GND 之间切换的逻辑信号，生成在 $2/3V_{LCD}$ 和 $1/3V_{LCD}$ 之间切换的方波信号？

该 TI 获得专利的设计提供了一种方法，通过使用电阻网络、反相器以及将 COM 信号与辅助时钟信号 BASE_PWM 进行叠加，来生成 $1/3V_{LCD}$ 和 $2/3V_{LCD}$ 的中间 LCD 电压电平。TI 获得专利设计的第二个型号规定，反相器功能可通过名为 BASE_PWM_N 的附加 GPIO 信号来替代。

与目前现有的基于 PWM 的 GPIO 方法不同，该 TI 设计所需的外部元件数量更少。只需要电阻器和一个可选的反相器。在固件方面，无需高速复杂的信号，只需以 LCD 帧更新频率 8 倍的速率进行基于计时器节拍的简单 IO 切换。与基于 PWM 的 GPIO LCD 设计相比，这可以减少 MCU 所需的资源，从而显著降低电流消耗。

3.5.1 COM 线生成

方波波形是通过一个额外的信号（称为 **BASE_PWM**）及其反相版本（名为 **BASE_PWM_N**）借助电阻分压网络生成的，请参阅 TIDA-00848 原理图中的 R30-R38，其阻值分别为 $1\text{M}\Omega$ 和 $2\text{M}\Omega$ 。此外，R28 和 R29 电阻分压器再次使用此 1/3 至 2/3 的比例，阻值同样为 $1\text{M}\Omega$ 和 $2\text{M}\Omega$ 。当所有 84 个 LCD 段均开启时，流经 **SEG_BASE_COMMON** 的电流在最坏情况下将由 21 条段线分担。

虽然 U2 SN74AHC1G04 反相器的运行已成功通过测试，但研究发现，持续流经电阻网络 R28 和 R29 的额外电流会带来显著的功耗弊端。因此，最终实现（针对更低功耗进行了优化）去除了反相器，并将 CC1312 的 DIO_27 引脚改作 **BASE_PWM_N** 信号，该信号即为 **BASE_PWM** 的反相版本。通过在 LCD 处于非活动状态时将 DIO_27 或 **BASE_PWM_N** 设置为输出低电平状态，即可消除流经 R28 和 R29 的电流。

任何段式 LCD 中的 COM 和段电极都会在其交点处形成一个电容器，两者之间以液晶作为电介质。在 4-MUX 显示屏中，一个 LCD 段引脚在内部连接到 4 个（或更少）段：BTL002 的引脚段 1 (S1) 连接到显示屏上的 1A、1B、1C 和 T1 段 — 请参阅图 3-2 中 Pin1 的左侧列。请注意，这些段中的每一个都连接到不同的 COM 平面（COM 线），以实现每个段的时分多路复用控制。

驱动段式 LCD 器件所需的电压必须相对于 0V_{LCD} 无直流偏移，故在驱动公共平面（COM 信号）后，需要第二个反极性相，请参阅 *Technical Information and Application Notes*。

因此，对于 BTL002 显示屏，发送到 LCD 的每一帧中必须有 $4 \times 2 = 8$ 个分频。图中展示了具有 f_{frame} 周期的 COM0 线；选择的帧速率通常为：每秒 25 帧 (fps) 以实现无闪烁 LCD 显示；最大为 60Hz 以将电流消耗保持在合理值范围内。

在 TIDA-00848 源代码项目中，进行了以下定义：

- 两条 **BASE_PWM/BASE_PWM_N** 线和四条 COM 线，以极小的 MCU 开销生成适当的波形
- 八个子相（一个用于驱动 COM 平面和段；下一个为相反的极性，用于对 LCD 进行无直流偏移控制）
- 段线需要动态处于三态，或者针对每个子相位设置为输出高电平或低电平

所有这些功能均已在 SCE 模块的 LCD 资源中实现，该模块以 2MHz 运行，以实现最低功耗。

3.5.1.1 段线

在 TIDA-00848 中，CC1312 和 BTL002 之间的段线对应 DIO_1 至 DIO_21，COM 引脚为 DIO22 至 DIO25，**BASE_PWM** 和 **BASE_PWM_N** 分别为 DIO26 和 DIO27。为了演示 LCD 功能，将 DIO_27 分配给 **BASE_PWM_N**，因此 TMP63 传感器不使用该引脚。

3.5.2 段线生成

要为 LCD 生成适当的段线波形，必须将相应的 MCU GPIO 引脚设置为三态（对应段关闭），或者在段开启的情况下设置为高电平/低电平两种输出状态。全振幅是 LCD 引脚处段线和 COM 线之间差分电压的结果。

为了能够生成这些段波形，定义了一个通用支持信号，名为 SEG_BASE_COM 信号。此 SEG_BASE_COM 信号提供简单的脉冲序列，具有相同的八个子相时序，并在 1/3 和 2/3 V_{LCD} 值之间切换。

对时序、直流偏移和电压电平的详细分析

Andreas Lechner 的学士学位论文详细分析了各种参数对施加到 LCD 段的电压 V_{Seg} 的影响。 V_{Seg} 的 RMS（称为 V_{RMS} ）决定段是否可见。此外，LCD 段非常容易受到直流电压的影响。因此， V_{Seg} 不得有直流偏移。

直流偏移

LCD 段不能过长时间承受直流电压。否则，化学过程会随着时间的推移开始分解液晶，最终导致段无法正常工作。无法确定直流电压损坏 LCD 单元经过的确切时间。几分钟的直流电压不会立即损坏单元，但会缩短其寿命。由于显示屏的使用寿命长达数年，因此应避免直流偏移；对于大多数 LCD 显示屏，规定的最大允许直流电压为 $\pm 50\text{mV}$ 。

因此，连接到显示屏的电压 V_{seg} 不得包含直流偏移。如果 COM 和 SEG 信号相对于 $\frac{1}{2} V_{LCD}$ 均无直流偏移，则可验证此条件成立。仅当所有信号 GPIO 同时切换且电压电平准确时才会出现这种情况，因此 LCD 帧时序很重要。以下部分中分析了直流偏移的潜在来源。

电阻器容差对 COM 和 SEG 信号直流偏移的影响

分析了电阻器容差对相对于 COM 信号 $\frac{1}{2} V_{LCD}$ 的直流偏移影响。以下所有公式均基于假设 $T_{sub-frame}$ 为常数值。最终结果表明，如果 $T_{sub-frame}$ 保持不变，电阻器容差对 COM 信号的 V_{RMS} 没有影响，因此不会产生相对于 $\frac{1}{2} V_{LCD}$ 的直流偏移。

$T_{sub-frame}$ 不一致对直流偏移的影响

如果 $T_{sub-frame}$ 并非恒定，则可能会导致电压直流偏移。此偏移的最坏情况是，从 0V 到 V_{LCD} 的全摆幅时序发生延迟。请参阅下面允许的延迟 $T_{DelayMax}$ 的示例公式。

参数： $V_{LCD} = 3.3\text{V}$

$T_{Sub-frame} = 4.1667\text{ms}$ (30Hz 帧速率)

$V_{DCOffset} = \pm 50\text{mV}$ (允许的最大直流电压)

$T_{DelayMax} = V_{DCOffset} / V_{LCD} \cdot 2 \cdot T_{Sub-frame}$

$T_{DelayMax} = (0.05\text{V}) / (3.3\text{V}) \cdot 2 \cdot 4.1667\text{ms} = 126.2\text{ }\mu\text{s}$

此公式表明， $T_{Sub-frame}$ 中的延迟大于 $126.2\text{ }\mu\text{s}$ 会导致直流偏移大于 50mV ，并因此影响 LCD 规格。

COM 和 SEG 信号之间延迟对直流偏移的影响

下一要点是 COM 线和 SEG 线之间的理论延迟对产生的差分电压 V_{Seg} 的影响。如果并非所有 GPIO 引脚均同时切换，而是例如先更新所有 COM GPIO，然后更新所有 SEG GPIO，则可能会发生此类延迟。这一点仅具有理论意义，因为实际上，Sensor Controller Studio 的 LCD 资源会在一条命令内同时设置所有 30 个 GPIO。

通过模拟 LCD 信号生成来研究这一影响，结果表明，COM 和 SEG 线之间的时序延迟导致接近零的直流偏移，如图 3-4 所示。在 10mV 的典型设置中，COM 线和段线之间 $100\text{ }\mu\text{s}$ 的延迟对差分电压 V_{Seg} 的影响微乎其微，因此 LCD 显示屏不会损坏。不过，图 3-4 也显示了对施加到单个段的差分电压 V_{Seg} 的 RMS 产生影响。换句话说，如果延迟过大，单个段可能会保持灰色，而不是完全可见或不可见。实际值或可接受延迟的公式很难估算，因为它在很大程度上取决于所使用的显示屏和电阻网络。这必须对每个设置进行测试，但在大多数情况下，影响极小。

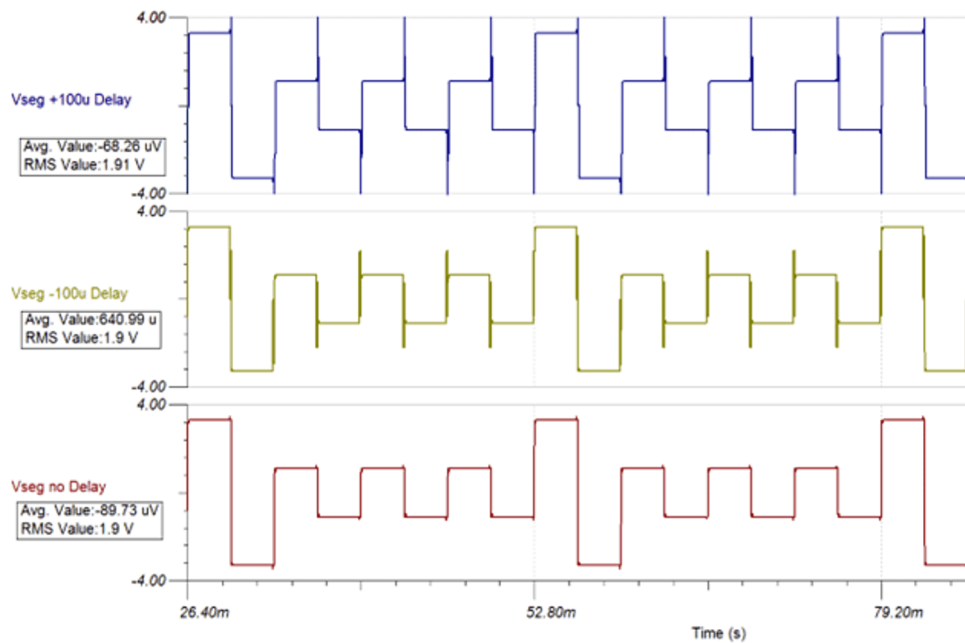


图 3-4. V_{Seg} 及相应的直流偏移 (平均值) 和 V_{RMS} (RMS 值) 在 $+100\mu s$ 延迟 (蓝色)、 $-100\mu s$ 延迟 (绿色) 和无延迟 (红色) 时的表现

与无延迟时的 1.9V 相比, 该延迟导致 V_{RMS} 上升到 1.91V。略高的 V_{RMS} 对于 LCD 功能来说不是问题, 但恢复的延迟也可能产生相反的效果, 即降低 V_{RMS} , 这会降低段的对比度。在该仿真中, 由于 V_{RMS} 保持在 1.9V, 因此这种影响并不明显。此仿真最重要的结果是, COM 和 SEG 线之间具有延迟的波形没有直流偏移, 因为由延迟引起的异常会相互抵消。

3.5.3 将 GPIO 软件设计移植到其他 4-MUX、1/3 偏置 LCD

显然，并非所有应用都使用 BTL002 显示屏，因此需要将代码移植到客户显示屏。在执行此操作之前，请考虑以下事项：

- 熟悉 [SCS](#) 工具中提供的 LCD 控制器资源，此资源可以在任意数量的 GPIO 引脚上以较低的更新速率生成复杂波形，通常用于七段式 LCD（液晶显示屏）及类似产品。此资源专为支持 TI 获得专利的 MUX LCD 解决方案而开发。
- 自定义 LCD 规范决定了 COM 和 SEG 线的分配。
- 将所有四条 COM 线、多达 24 条 SEG 线和两个 PWM 辅助信号映射到 CC1312 的 DIO1-DIO30 引脚，并确保该映射与原理图相符。

SCS 中的 LCD 资源通过一条传感器控制器指令，同时更新所有已使用 GPIO 引脚的波形状态（高电平、低电平或三态），专门用于 2MHz 的低功耗运行，本参考设计即采用此方案。有关进一步详细信息，请查看 [SCS 工具](#) 中的帮助查看器。

请注意，LCD 控制分为两部分实现：除了 SCE 资源外，还需要在 Cortex-M4F MCU 内核上运行的主应用程序中的额外代码。CPU 应用程序负责准备波形状态并将其加载到 SCE 存储器 (AUX RAM) 中。必须有一种所有 GPIO 引脚均为三态（即未驱动 LCD 显示屏）的波形状态。此状态必须是启动传感器控制器任务时的初始状态，并且是停止传感器控制器任务时的最终状态。

备注

TIDA-00848 的源代码示例基于 TI RTOS 操作系统，其开发目的仅在于展示软件 GPIO 功能。未测试确切的时序，且不保证所用时序的正确性。

用户负责确保应用中的 LCD 控制提供正确的波形时序以及为 LCD 提供无直流偏移的电压，尤其是在 SCE 模块上运行其他任务时。

4 方框图

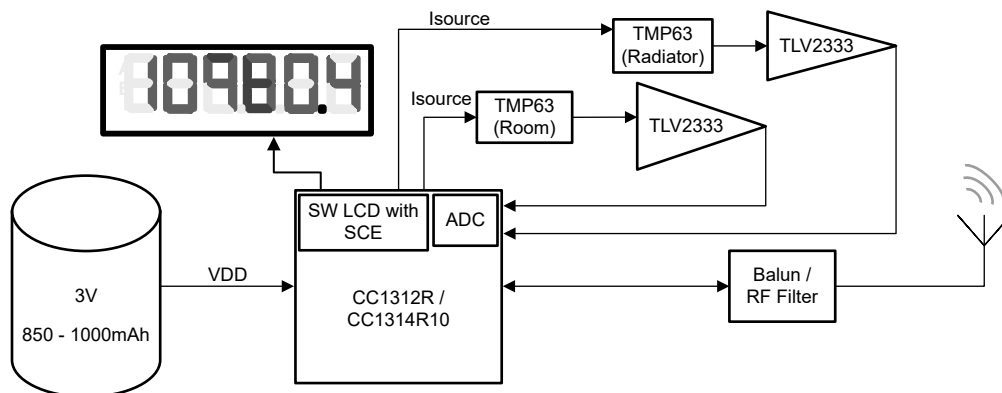


图 4-1. TIDA-00848 的方框图

TIDA-00848 方框图显示用于 HCA 温差测量的两个 TMP63 以及一个 TLV2333 内的两个 OPA 单元。此参考设计仅包含几个元件：两个 1% 精度的 100k Ω 线性热敏电阻器件 TMP63 作为温度传感器，每个传感器都与 TLV2333 内的一个运算放大器配对。所有其他子系统均由 CC1312R 无线 MCU 器件实现，该器件具有片上传感器控制器引擎和电流源模块、RTC 模块、12 位 ADC、COMP 以及 30 个 GPIO 信号。

5 入门硬件

可以使用 J4 连接器 (标准的 2×5 引脚 ARM JTAG 连接器) 对 TIDA-00848 硬件进行编程和调试。一根 10 引脚扁平带状电缆可将 J4 连接到各种 TI LaunchPad EVM，其中包括用于对 CC1312R 进行编程的 XDS110 调试器硬件。

对 CC1312R 进行编程时，请断开跳线 J12，该跳线从 PCB 背面的电池座提供电池电压。J12 还可用于连接万用表器件，用于测量近似平均电流。请注意，由于电源峰值非常短，因此需要使用 Agilent N6781A 等专用设备才能进行精确的电流消耗测量。或者，使用具有 EnergyTrace (tm) 功能的 TI FET430 UIF 工具来测量功耗数据，如此处所记录。

5.1 TMP63 电路

TIDA-00848 PCB 可以通过扩展柔性 PCB 或类似电路板来容纳 TMP63 传感器：一个温度传感器测量散热器主体 (或加热器传感器)，另一个传感器采集室温 (或室温传感器)。任何 HCA 器件均牢固地安装在加热器主体上，且加热器温度传感器必须与加热器主体保持热接触 (但不能有电气接触)。相比之下，室温传感器应朝向与房间相反的方向，或远离加热器主体。本 TI 设计中使用的双传感器方法在 EN 834 标准中描述为 *双传感器测量法*。

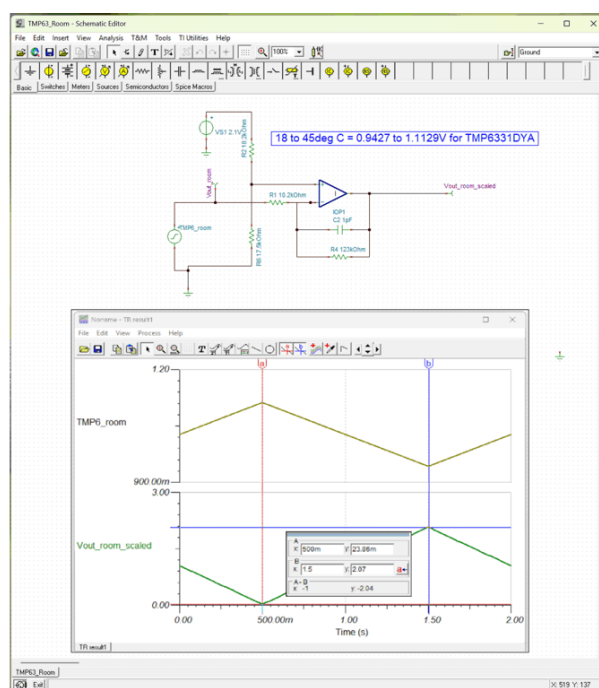


图 5-1. 具有仿真功能的 TMP63 室温传感器电路

为便于评估，包含两个 TMP63 传感器和 TLV2333 器件的电路可以通过两个扩展接头 J9 和 J11 进行连接。尽管尚未完成硬件设计，但已提供每个传感器电路的 TINA TI Spice 仿真文件。两个传感器均采用电流偏置方案，使用 SCE 内的可编程电流源模块。TIDA-00848 文件夹中的仿真文件示例包含两个文件 (每个 TMP63 传感器一个)。

仿真显示 18°C 到 95°C 范围内的曲线图，以及通过 CC1312R 可编程电流源向 TMP6331 器件提供 10 μ A 电流源激励的情况。如果使用 2.1V 作为 CC1312R 的电源电压：x = 500m 时，18°C 的最小值对应 ADC12 的 2mV 电压电平；而 x = 1500m 且温度为 95°C 时输出电压为 2.1V。

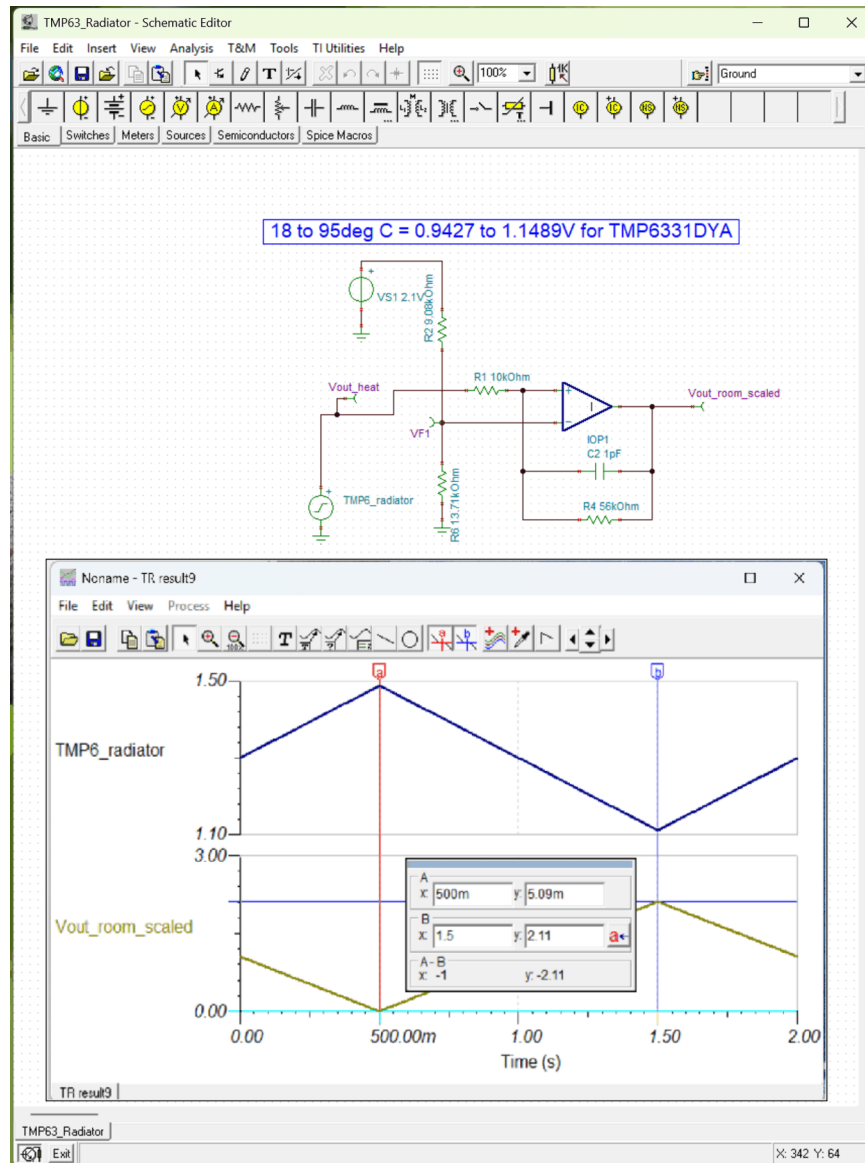


图 5-2. 具有仿真功能的 TMP63 加热器传感器电路

选择 2.1V 电源作为 3V LiMnO₂ 原电芯寿命终止时的电压，该电压常用于热量分配表。ADC12 模块可以使用 VDDS 作为基准电压，因此可以利用 0V 至 2.1V 的范围作为 ADC 满量程，即使 VDDS 在使用寿命期间从 3.25V（新电芯）降至 2.1V（表示电池电量耗尽）时也是如此。

TIDA-00848 PCB 上可用于温度检测的信号包括：

- DIO_28 = Vtmps_1
- DIO_27 = Isrc_1（第一个 TMP63 传感器的模拟输出）— 在此设计中，改作 BASE_PWM_N 信号以驱动 LCD
- DIO_29 = Isrc_2（第二个 TMP63 传感器的模拟输出）

温度检测代码尚未实现和测试。可以为主 M4F MCU 内核编写该代码，因为通常温度每分钟仅测量 1-2 次，功耗开销较低，尤其是在与其他周期性应用程序代码功能结合使用时。或者，SCE 模块可用于将 ADC12 代码转换为温度值，因为目前同时处理触摸和 LCD 任务时 SCE RAM 的利用率为 35.7% 或 731 个字（16 位长），因此留有充足的 RAM 空间用于温度代码计算。如果此代码使用 SCE，则必须仔细调整任务时序，因为 LCD 帧时序必须具有最高优先级；其他任务必须安排在 LCD 帧活动之间执行。

5.2 PCB 上的电容式触控区域

TIDA-00848 PCB 在 SMA 天线连接器旁边集成了一个圆形 PCB 区域，用于基于电容式感应方法检测触摸事件。传感器控制器固件示例项目支持两个并发任务，如图 5-3 所示。第一个任务每秒检查一次 PCB 电容式触控区域（该周期也可由用户通过软件配置）。第二个任务利用 SCS LCD 资源，为 LCD MUX TI 获得专利的设计生成时序准确的波形。

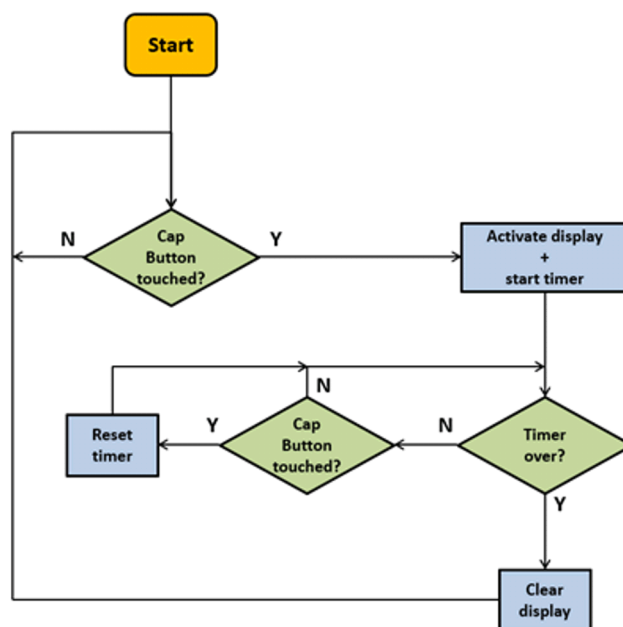


图 5-3. 使用 CapTouch 激活 LCD 的 SCE 固件流程图

5.3 电池电源

TIDA-00848 的开发目标是同时支持 3.0V (LiMnO₂) 和 3.6V (LiSoCl₂) 的原电池电压。这些化学物质的表现存在显著差异，尤其是在脉冲负载和环境温度条件下。一般来说，添加一个与电池并联的缓冲电容器有助于吸收射频传输期间的峰值电流；此处选择了具有 1200μF/10V 的 Würth 器件 WCAP-ATLI。

如果使用型号 FDK CR14250SE 的 3.0V 电池或容量更高的 FDK CR¹/₂ 6LHT，则可以减少甚至完全省去 1200μF 的缓冲电容器，因为这些电池能够承受 20mA、持续 10ms 的周期性峰值电流，且不会导致电池使用寿命下降。要正确选择缓冲电容器的尺寸，请联系所选电池制造商，并尽可能精确地提供应用的电流曲线。

6 固件入门

编译和调试 TIDA-00848 固件需要完整版本的 [TI CCS 版本 12.8.1](#) (基于 Eclipse) 或 [CCS20.5](#) (Theia), 并搭配 [TI SIMPLELINK-LOWPOWER-F2-SDK](#) 版本 8.32.00.07 或更高版本中包含的 TI RTOS 安装包。

为了简化在 SCE 模块上运行的程序代码开发, TI 提供了一套完整的工具链, 用于为控制器编写软件: [Sensor Controller Studio \(SCS\)](#) 2.0.9.208。

这是一款完全集成式工具, 包含 IDE、编译器、汇编器和链接器, 可生成 SCE 二进制代码。完整的固件代码项目将 CC1312R 的应用代码与 SCE 代码合并为一个可交付的源代码包 ([TIDA-00848_firmware.zip](#))。

提供的 CCS 源代码项目包括一个 SCS 子项目, 位于安装路径 /HCA-848_CC1312R1_TouchLCDOn/sce_output, 名为 “HCA-00848_CapTouch_LCDOn.scp”。

6.1 SCS 代码项目

已定义两个任务: 一个用于触摸事件, 另一个用于驱动 LCD 显示屏 BTL002。

6.1.1 SCS 任务 CapTouchButton

CapTouchButton 任务使用 COMPA、TDC 和 ISRC 模块来实现 “CapTouch” 事件检测。专用 PCB 区域 (圆形小铜箔焊盘) 通过 DIO_30 连接到 COMPA 输入端, 而 COMPA 基准为 DCOUPL 信号, 其标称值为 1.27V。TDC 计算将 PCB 区域 (表示顶层与底层之间的电容器) 充电至 1.27V 所需的时间节拍数 (以 96MHz 节拍为单位), 从而使 COMPA 的输出变为高电平。

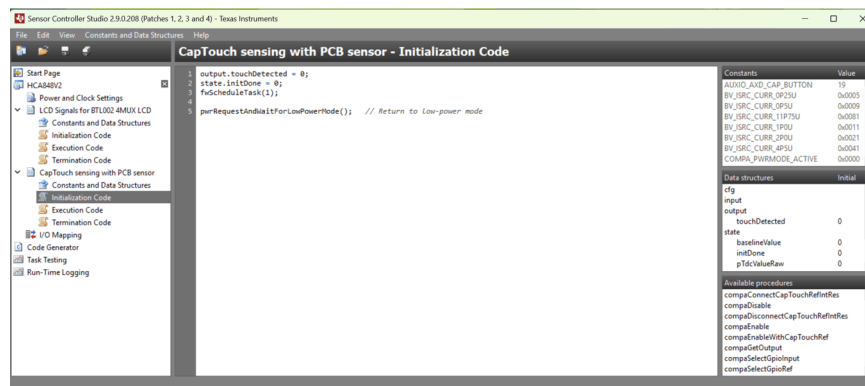


图 6-1. CC1312R 的 SCS 项目: CapTouchButton 任务 (初始化代码部分)

任务的执行代码部分如图 6-2 所示：

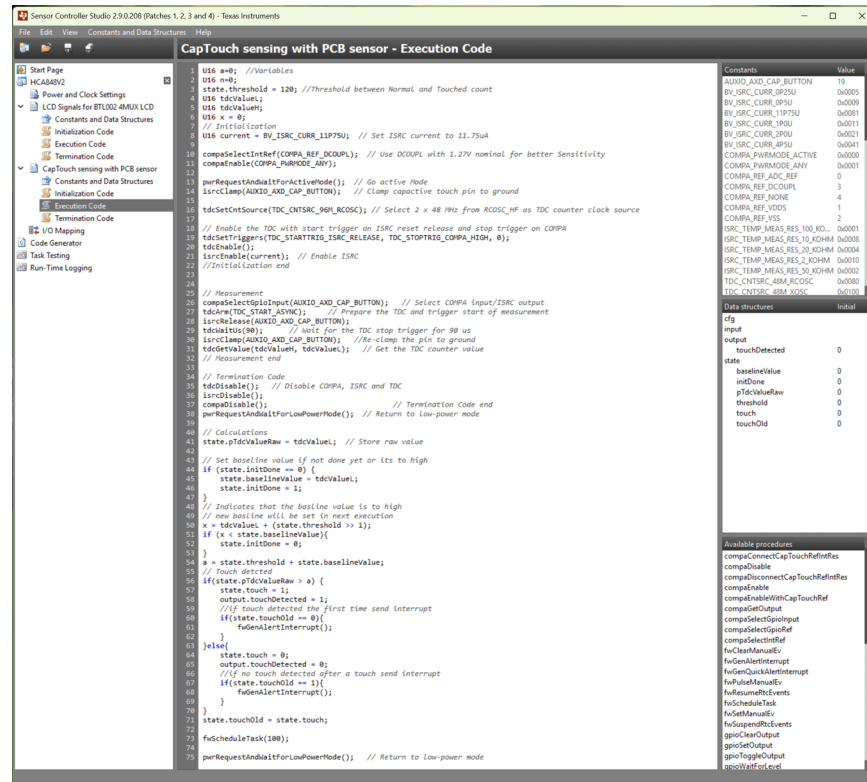


图 6-2. CC1312R 的 SCS 项目：CapTouchButton 任务（执行代码部分）

变量“threshold”设置非触摸事件与触摸事件之间的差值（如有必要，可对该值 120 进行调整）。如果检测到此类结果一次，则立即开始 90μs 的第二个测量周期，以确认这确实是一个触摸事件（而不仅仅是一个外部噪声）。

如果两次测量的差值均高于阈值，则会使用 fwGenAlertInterrupt() 函数触发 Cortex-M4F 内核的中断。

CapTouchTask 将重新安排为在一个 1 RTOS 节拍后运行，其中 RTOS 节拍已设置为 1 秒。

6.1.2 SCS 任务 LCD

HCA-00848_CapTouch_LCDOn.scp 文件中名为 LCD Signals 的任务根据 TIDA-00848 原理图将 27 条 DIO 线映射到 BTL002 引脚。

该任务包含初始化、执行和终止代码部分，其中使用了多个 LCD 资源函数调用，如 lcdInit()、lcdPrepareNextState() 和 lcdApplyNextState()。

6.2 CCS 代码项目

传感器控制器代码已集成到 TIDA-00848 固件的 /sce_output 文件夹中。

使用具有 EnergyTrace (tm) 功能的 FET430 TI 工具，对搭载 CC1312R 和 LCD 固件的 TIDA-00848 进行了功耗测试。

7 测试数据

TIDA-00848 硬件测试分为多个步骤，重点关注以下三个方面：

- 传感器控制器任务 (CapTouch 事件检测)
- 在多个段上具有足够对比度的 LCD，例如显示字符串 *touched* 或 *cc1312r*
- 电压 3.3V 至 2.5V (对比度较低，可在电池电压随使用寿命下降时通过动态提高帧率来提高对比度)

7.1 用于 CapTouch 检测的传感器控制器任务

底部图中的 *pattern detected* 变量表示触摸事件；output.pTdcValueRaw 和 output.pTdcValueFilt 分别显示测得的 96MHz 节拍数 (Raw) 以及经过一些简单滤波后的节拍数 (Filt)。



图 7-1. SCS 下的任务测试：触摸事件即上方两个图形中的峰值

7.2 LCD

已对反相 BASE_PWM_N 线和段线串联电阻两种不同的值进行了测试：R1 至 R4、R7 至 R10、R13 至 R17、R19 至 R22、R5 至 R27，阻值为 3M Ω 或 10M Ω 。最终决定保留 10M Ω 值，因为这可提供较低的平均电流，同时 LCD 对比度没有明显变化。

此外，Rev1 中的 R28 (11k Ω) 和 R29 (22k Ω) 已分别提高到 100k Ω 和 200k Ω ，随后又分别提高到 1M Ω 和 2M Ω ，以更好地匹配 SEG 线的 3M Ω 或 10M Ω 串联电阻。

7.3 TIDA-00848 电流消耗

TIDA-00848 的功耗使用具有 EnergyTrace 技术的 TI FET430 工具测得。

SEG_BASE_COMMON [R1-4、R7-10、R13-R22、R25-27]	COM1-4 [R30、R32、R34 和 R36]	COM1-4 [R31、R33、R35 和 R37]	TIDA-00848 功耗 [LCD 开启，3V 电源]
3M Ω	100k Ω	200k Ω	128.3 μ A
3M Ω	1M Ω	2M Ω	11.8 μ A

8 设计文件

8.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-00848](#) 中的设计文件。

8.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-00848](#) 中的设计文件。

8.3 PCB 布局建议

TIDA-00848 是一款总体厚度约为 1mm 的双层 PCB；采用双层设计旨在实现最低成本，而 1mm 的厚度则提高了 PCB 的机械稳定性。顶层铜箔的布局进行了修改，以使通往 SMA 天线连接器的射频线达到 50 Ω 带状线阻抗。

8.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-00848](#) 中的设计文件。

8.4 Altium 工程

要下载 Altium 工程文件，请参阅 [TIDA-00848](#) 中的设计文件。

8.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-00848](#) 的设计文件。

8.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-00848](#) 中的设计文件。

9 软件文件

要下载软件文件，请参阅 [TIDA-00848](#) 中的设计文件。

10 参考资料

1. Peter Spevak , 美国专利 : MODULATOR FOR A MUX LCD, US 10,068,512 B2 , 2018 年 9 月 4 日
2. Andreas Lechner , 学士学位论文 “Low-power implementation of segment LCD control using GPIO pins and software” , 兰茨胡特应用技术大学 , 2019 年
3. 德州仪器 (TI) 公司 , “CC1312R SimpleLink™ 高性能低于 1GHz 无线 MCU”
4. Beuth , *Heat cost allocators for the determination of the consumption of room heating radiators - Appliances with electrical energy supply* , DIN EN 834:2013-12 (www.beuth.de)
5. 德州仪器 (TI) , Sensor Controller Studio (<http://www.ti.com/tool/sensor-controller-studio>)
6. 德州仪器 (TI) , TI-RTOS Wiki : (http://processors.wiki.ti.com/index.php/TI-RTOS_Support)
7. Saft Batteries , LS, LSH (<http://www.saft-batteries.com/battery-search/ls-lsh>)
8. FDK , *High Capacity Cylindrical Type Primary Lithium Batteries* (http://www.fdk.com/battery/lithium_e/lithium_cylindrical.html)
9. Pacific Display Devices , *Technical Information and Application Notes* (<http://www.pacificdisplay.com/technical.htm>)

11 商标

TI E2E™, SimpleLink™, and C2000™ are trademarks of Texas Instruments.

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

所有商标均为其各自所有者的财产。

12 术语

热量分配表 (HCA)	电池供电的电子器件，用于采集用户配电箱中散热器的比例热输出
加热器传感器	连接到散热器（或加热元件）的温度传感器
室温传感器	用于监测室温或环境空气温度的温度传感器
wM-Bus	欧洲射频计量标准，提供适用于 169、433 和 868MHz 频段的解决方案
LCD	液晶显示器

13 作者简介

MILEN STEFANOV (M.Sc.E.E) 是 TI 的系统工程师，其工作领域为电网基础设施，此外他还是射频通信技术和计量应用方面的专家。从开姆尼茨工业大学 (TUC) 毕业后，他在该校担任了 5 年的研究助理。此后，他在半导体行业从事高速光通信和有线通信领域的工作，担任系统工程师 3.5 年，并于 2003 年加入 TI，成为 Wi-Fi 专家，负责为主要 OEM 厂商的 TI Wi-Fi 产品提供支持。

自 2010 年以来，他一直致力于开发面向欧洲电网基础设施市场的计量、分户计量和低于 1GHz 射频解决方案。Stefanov 先生在欧洲发表了多篇关于 wM-Bus 技术的文章，并在于慕尼黑举行的无线大会与智能家居和计量峰会上提交了技术论文。

作者在此特别感谢前 TI MGTS 成员兼团队技术人员 **PETER SPEVAK**，感谢他贡献了使用 GPIO 实现软件控制段式 LCD 的专利，并参与了 TIDA-00848 的硬件和软件设计工作。

ANDREAS LECHNER (M.Sc.E.E) 是德州仪器 (TI) 能源基础设施团队的系统工程师，专注于电源转换和可再生能源领域。他获得了兰茨胡特应用技术大学的电气工程硕士学位。

14 Revision History

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision A (June 2016) to Revision B (July 2026)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。.....	1
• 更新了 SCE 模块中具有 LCD 支持的软件示例.....	3
• 添加了双温度传感器 TMP63 的仿真文件.....	14
• 更新了包含 CC1312R 的 SCH、BOM 和 Altium CAD 项目.....	20

Changes from Revision * (June 2016) to Revision A (June 2016)	Page
• 更改了“从预发布页面”	1

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月