

Application Note

使用具有专有射频功能的 SimpleLink CC2340R5 MCU 实现步进电机控制



Ryan Brown

摘要

本应用报告探讨了在单个 MCU 解决方案中，为步进电机设计添加专有射频协议的可行性。步进电机常见于可从嵌入式无线电中获益的各类应用，包括散热器阀门，3D 打印机和机器人技术等领域。本文件中涵盖的内容将证明 SimpleLink CC2340R5 MCU 如何借助 DRV8411 电机驱动器来完成此任务。

本文件提供的解决方案使用可在 TI.com 上购买的硬件 EVM 和 SimpleLink 低功耗 F3 演示 GitHub 上免费提供的固件。文中详细描述了必需的硬件连接方式及固件的工作原理，因此开发人员在获取步进电机后，完全能够搭建自己的演示系统，并可进一步修改该工程以满足自身需求。此外，还提供了其他测试数据，以便读者可以完全了解工作条件和应用扩展选项。

内容

1 简介.....	2
1.1 CC2340R5.....	2
1.2 步进电机.....	2
2 步进电机硬件.....	4
2.1 硬件设置.....	4
2.2 DRV8411EVM 设置.....	4
2.3 连接图.....	4
3 运行示例.....	6
3.1 依赖项.....	6
3.2 加载固件.....	6
3.3 本地控制步进电机.....	6
3.4 使用专有射频进行远程控制.....	7
4 固件设计.....	8
4.1 代码流程描述.....	8
4.2 ADCBuf.....	8
4.3 电源.....	8
4.4 应用程序事件.....	9
4.5 步进表.....	9
4.6 故障检测引脚.....	9
5 测试和结果.....	10
6 总结.....	13
7 参考资料.....	14

商标

SimpleLink™ is a trademark 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。

1 简介

SimpleLink™ **CC2340R5** 是一款功能强大的低成本微控制器单元 (MCU)，具有 512kB 闪存和 36kB 或 64kB SRAM，并且配有 Arm® Cortex® -M0+ 和 2.4GHz 无线电。鉴于该功能集，它能够在单芯片设计中实现适用于各种无线电协议的多种终端应用。本应用报告重点介绍了一个实例，证明该器件的用途较广。

与 **DRV8411** 电机驱动器搭配使用，借助 **CC2340R5** 的专有射频无线电通信等，即可使用不同的步进模式控制步进电机。本指南详细介绍了实现此应用所需的硬件和软件，并对已启用的可选功能进行了注释。通过阅读此报告，用户可以熟悉步进电机控制和 **CC2340R5** 开发情况，并放心在自己的设计中使用类似的概念。

1.1 CC2340R5

CC2340R 系列器件是 SimpleLink™ MCU 平台的一部分，该平台包括 Wi-Fi®、低功耗蓝牙、Thread、Zigbee、Sub-1GHz MCU 和主机 MCU，它们共用一个易于使用的通用开发环境，其中包含单核软件开发套件 (SDK) 和丰富的工具集。这些器件针对低功耗无线通信进行了优化，并支持无线下载 (OAD) 功能，适用于楼宇自动化 (无线传感器、照明控制、信标)、资产跟踪、医疗、零售 EPOS (电子销售终端)、ESL (电子货架标签) 和个人电子产品 (玩具、HID、触控笔) 市场。

LP-EM-CC2340R5 开发套件可借助支持低功耗蓝牙 5 和 2.4GHz 专有协议的 SimpleLink 低功耗蓝牙 MCU 加快开发速度。**SIMPLELINK-LOWPOWER-F3-SDK** 能提供软件支持，可使用免费提供的 **/CCSTUDIO** IDE 进行构建。具体特性包括通过 **BoosterPack™** 插件模块连接器访问所有 I/O 信号以及使用 **TI SimpleLink Connect** 将 **LaunchPad** 开发套件连接到智能手机。**LP-XDS110ET** 或 **LP-XDS110** 调试器 (单独出售) 能用于编程、调试和评估射频。

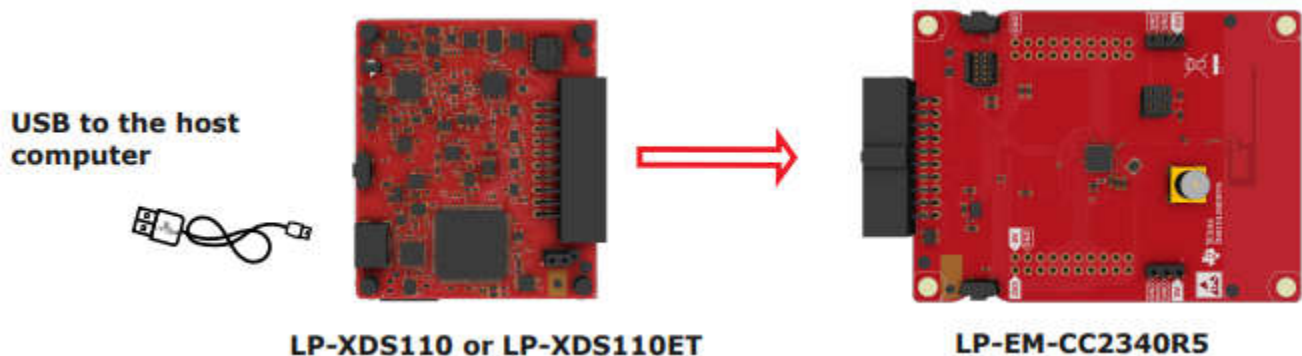


图 1-1. LP-XDS110ET 和 LP-EM-CC2340R5 连接

1.2 步进电机

步进电机是一种无刷直流电机，使用精确的步进来实现精确定位。它通过按预设顺序 (即 “步”) 为电磁线圈通电，使电机转子与定子磁极对齐，从而实现这一功能。每个独特的步进电机都有一个根据其特性确定的步进角，同时还需搭配推荐电压和相电流使用，以达到预期的扭矩。



图 1-2. 步进电机

2 步进电机硬件

2.1 硬件设置

以下各节将介绍必须采购的硬件、在 EVM 上更改的设置，以及在不对默认固件解决方案进行任何修改的情况下运行示例所需的必要连接。

2.2 DRV8411EVM 设置

图 2-1 展示了 DRV8411EVM 电路板，其中跳线安装在正确位置。有关如何与该硬件连接的更多说明，请参阅 DRV8411EVM 用户指南。

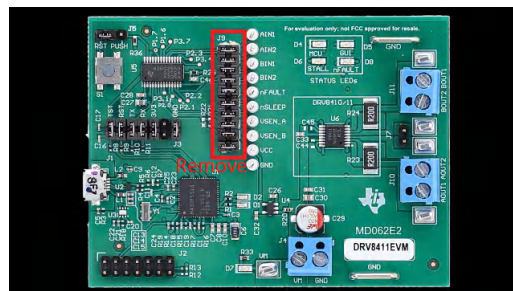


图 2-1. DRV8411EVM 硬件设置

2.3 连接图

表 2-1 是 DRV8411EVM 和 CC2340R52 之间的连接，能演示步进电机。

表 2-1. CC2340R5 和 DRV8411EVM 之间的连接表

连接	CC2340R5 函数	CC2340R5 引脚	DRV8411EVM
A1 相	数字输出	DIO23	AIN1
A2 相	数字输出	DIO2	AIN2
B1 相	数字输出	DIO5	BIN1
B2 相	数字输出	DIO25	BIN2
故障指示灯	数字中断输入	DIO18	nFAULT
睡眠模式	数字输出	DIO1	nSLEEP
A 相电压	ADC 输入	DIO24	VSEN_A
B 相电压	ADC 输入	DIO0	VSEN_B
通用接地	不适用	GND	GND

步进电机导线需要按照电机制造商指定的方向连接到 DRV8411EVM 输出端。DRV8411EVM VM/VCC 应单独为 LP-EM-CC2340R5 供电，因为 LP-XDS110 (ET) 无法充分提供步进电机所需电流。最终结果类似于图 2-2。

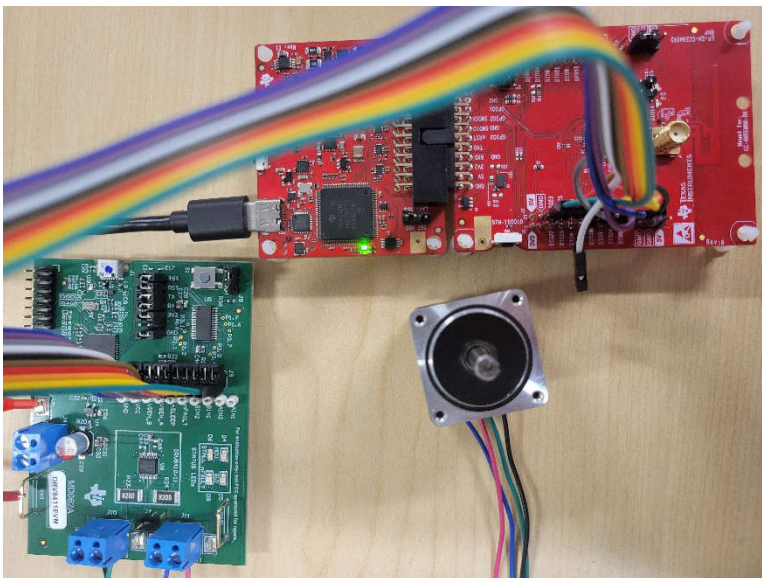


图 2-2. 物理硬件设置

3 运行示例

接下来的几节将介绍固件详细信息，以及每个元件如何通过启用无线电的远程器件，驱动步进电机和进行控制。

3.1 依赖项

低功耗 SimpleLink F3 演示 [GitHub](#) 上提供的代码工程使用 SimpleLink F3 SDK v9.11.0.18、[SYSCONFIG 配置工具 v1.22](#) 和 [TI CLANG v4.0.3](#) 编译器。在尝试将工程导入到 Code Composer Studio (CCS) v20 或更高版本之前，请确保计算机上已安装所有这些依赖项。有关设置环境的更多示例，请参阅 [SimpleLink Academy Labs : Resource Explorer](#)。请注意，用户有责任迁移和支持上面未列出的任何依赖项版本。

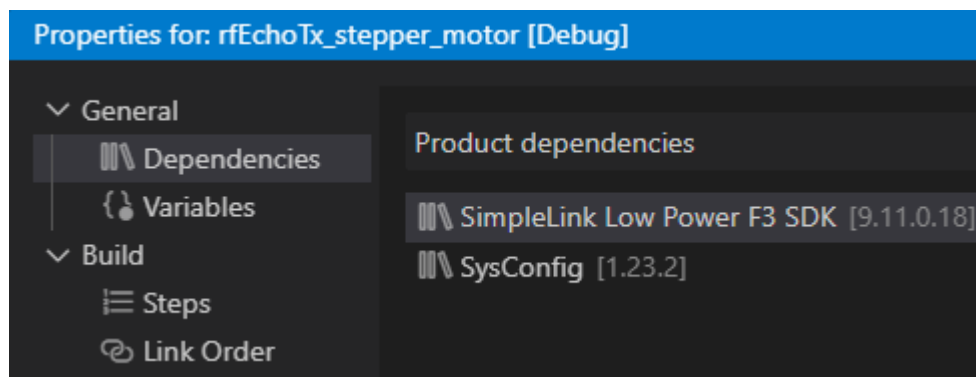


图 3-1. CCS 属性

以下是两个工程

- rfEchoTx_stepper_motor: 这适用于控制步进电机的 CC2340R5 器件，亦是本文重点
- rfEchoRx: 这是一个配套的 CC2340R5 工程，其通过专有射频将步进电机命令传递到 rfEchoTx_stepper_motor

3.2 加载固件

通过选择 Run -> Flash Project (Ctrl + F5) 或 Debug Project (F5)，可以直接在该 IDE 中加载在 CCS 内构建的工程。建议在没有主动调试工程时退出调试模式，让其自由运行。此外，还应考虑使用 [Uniflash](#) 软件工具来加载二进制映像。

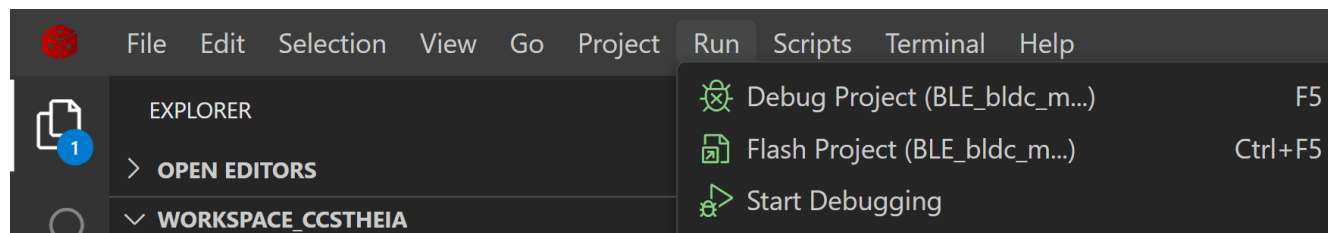


图 3-2. CCS 加载选项

3.3 本地控制步进电机

要仅使用 rfEchoTx_stepper_motor 在本地测试步进电机的运行情况，LaunchPad 按钮被配置为在按下 BTN-1 时，按逆时针方向移动步进电机，在按下 BTN-2 时，按顺时针方向移动步进电机。确保 LP-EM-CC2340R5 和 DRV8411EVM 电路板均已通电，并对 CC2340R5 固件进行了编程。每项操作中步进速度和步进数取决于 stepper_motor.c 中的下述定义

表 3-1. 步进电机应用定义

定义	默认值	单位	功能
FULL_STEP	未定义	不适用	固件会产生全步进波形
HALF_STEP_SLOW	未定义	不适用	固件会产生慢速衰减的半步进波形

表 3-1. 步进电机应用定义 (续)

定义	默认值	单位	功能
HALF_STEP_FAST	已定义	不适用	固件会产生快速衰减的半步进波形
STEP_FREQUENCY	400	Hz	每秒步数
NUMBER_STEPS	400	整数	每项操作中的步数
ADC_SAMPLE_SIZE	100	整数	ADC 缓冲器的大小
ADC_PER_STEP	50	μs	每步进行的 ADC 测量数
WINDOW_HIGH	1500	整数	ADC 窗口比较器的 12 位阈值

在此示例中，使用具有 1.8°步进角 (200 步进/转) 的步进电机，电机可以在一秒运行 (每秒 400 步) 期间完成两次旋转 (400 步)。

3.4 使用专有射频进行远程控制

确认正确的电机功能后，可以添加一个运行专有射频工程的远程 LP-EM-CC2340R5 器件。此示例中包括一个稍作修改的 rfEchoRx 版本，其中实施了类似的按钮功能，以便在每次 rfEchoTx_stepper_motor 请求数据包时通过专有射频无线电进行通信。要与步进电机代码的 rfEchoTx 部分进行通信，*.syscfg 文件必须具有完全相同的 SysConfig -> RF Stacks -> Custom 配置。

表 3-2. 专有射频应用定义

定义	默认值	单位	工程	功能
MAX_LENGTH	10	整数	两种	每个数据包的数据字节
PACKET_INTERVAL	20000000	¼ ms	rfEchoTx	数据包事件之间的时间间隔
TX_DELAY	40000	¼ ms	rfEchoRx	传输响应前的延迟
RX_TIMEOUT	80000	¼ ms	rfEchoTx	等待响应超时
频率	2412000000	Hz	两种	专有射频频率

无需修改 rfEchoRx CC2340R5 LaunchPad。如果正确完成，在两个 LaunchPad 都已编程并通电的情况下，您能够在 rfEchoRx LaunchPad 上按下 BTN-1 或 BTN-2，并且在 PACKET_INTERVAL 结束后，观察到 rfEchoTx_stepper_motor LaunchPad 接收到数据包后步进电机分别逆时针或顺时针方向转动。

4 固件设计

现在默认步进电机工程按预期运行，并进一步分析了固件。

4.1 代码流程描述

图 4-1 是 CC2340R5 代码内部所用过程的简单代码方框图。该功能在 `stepper_motor.c` 文件中实现。

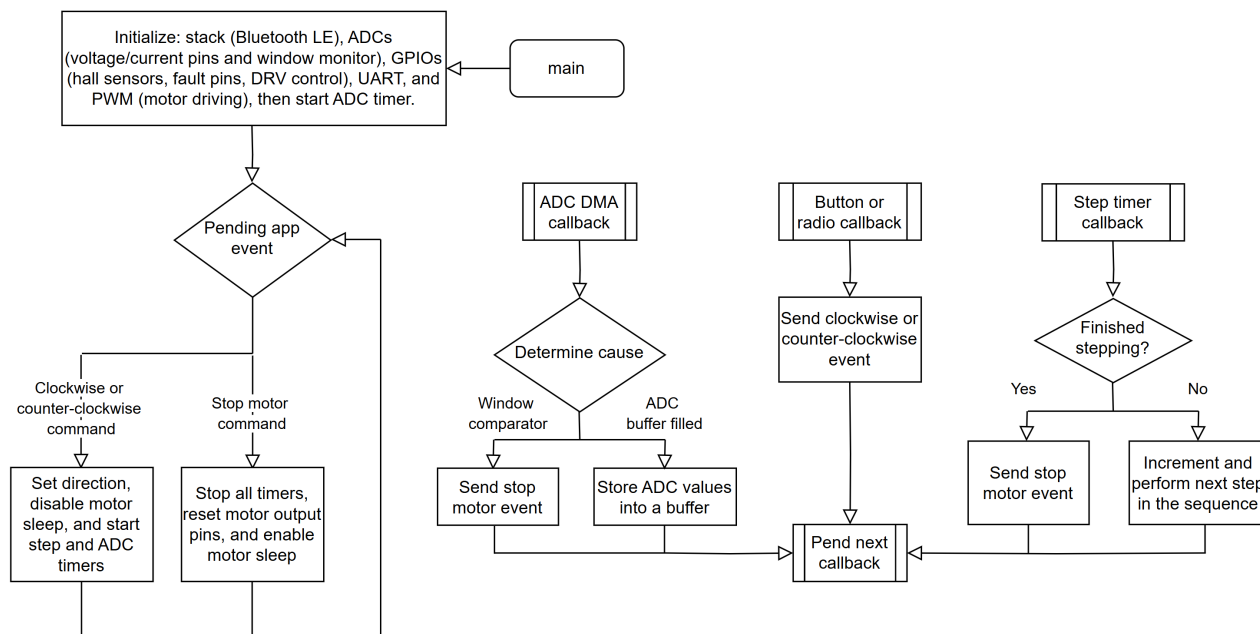


图 4-1. 步进电机代码图

主函数初始化步进电机示例运行所需的所有 TI 驱动器 and 计时器。进入主 `while` 环路后，这会对由硬件回调设置的事件执行进一步的操作。通过子例程维护相应的操作后，会重置事件并且会自动重复该过程。

除一些例外情况外，所有硬件回调都只是发布一个事件以供主应用程序处理。一种例外情况是 `ADCBuf` 回调，它会立即处理状态，除非超过了窗口比较器阈值，否则不会从主应用程序环路调用任何进一步的操作。

4.2 ADCBuf

默认 `ADCBuf` 在单个通道上以重复单模式运行。该应用需要两次连续通道转换 (`VSEN_A` 和 `VSEN_B`)，因此通过在工程的主目录中添加一个自定义 `ADCBufLPF3.c` 来使用重复序列模式。这样，通过 ADC 外设的 FIFO 而不是单个存储器寄存器，传输数据。

原始 TI 驱动程序还能选择自动开始后续 ADC 转换。这并不适用于步进电机设计，在该项设计中，每步应测量规定的次数。因此，ADC 被设置为根据 LGPT 触发器触发转换。每步的 ADC 测量速率由 `ADC_PER_STEP` 定义决定。由于每个区间会进行两次测量，`ADC_SAMPLE_SIZE` 除以二表示 ADC 回调频率。这也取决于可用于增加 ADC 缓冲器的 RAM 数量。

`ADCBuf` 回调操作还包括窗口监测器高电平中断的状态处理，该中断在 `stepper_motor.c` 文件中进行初始化。通过这种方式，应用程序便会收到高电流事件通知，并在被触发后立即停止电机。默认使用 TI 驱动程序中包含的 API 对这些值进行了调整并将其转换为微伏。

4.3 电源

在 `stepper_motor.c` 中添加了一个自定义策略函数，用于计算 CPU 不执行任何操作时的空转时间。然后将其作为应用程序总 CPU 使用量的测量值报告给用户。`stepper_motor.syscfg` SysConfig 文件电源模块直接引用该自定义策略函数，以便使用该函数。仅将该功能用于测试和评估。

4.4 应用程序事件

一旦用户操作或硬件回调设置事件，以下例程将对其进行处理。

表 4-1. 应用程序例程和功能

例程	功能
ACTION_CCLOCK	如果目前电机未运行，则相应地设置方向和动作变量并设置 ACTION_START
ACTION_CLOCK	如果目前电机未运行，则相应地设置方向和动作变量并设置 ACTION_START
ACTION_START	将休眠引脚驱动为高电平，启动电机，再启动电机步进时钟，开始进行 ADC 转换以及初始化 LGPT 同步计时器以测量 ADC
ACTION_STOP	闭合 ACTION_START 中启动的所有外设并将休眠引脚驱动为低电平，停止电机

4.5 步进表

每次电机计时器到期时，都会递增并评估步进计数。如果没有更多步数，则调用 ACTION_STOP 应用程序事件。否则，使用实例语句来确定完成电机输出引脚的当前步的下一迭代。迭代次数取决于步进模式，无论是 FULL_STEP (四次迭代) 还是 HALF_STEP_SLOW/ HALF_STEP_FAST (八次迭代)。一次只能选择一个步进模式。

4.6 故障检测引脚

如果 DRV8411 检测到步进电机性能出现错误，则会强制 nFault 引脚为低电平。CC2340R5 已将相应引脚配置为中断，以便可以立即调用 ACTION_STOP 事件以停止电机输出引脚波形。

5 测试和结果

使用逻辑分析仪，验证从 CC2340R5 驱动到 DRV8411 的波形。下面提供了一个具有快速衰减模式的半步进示例。

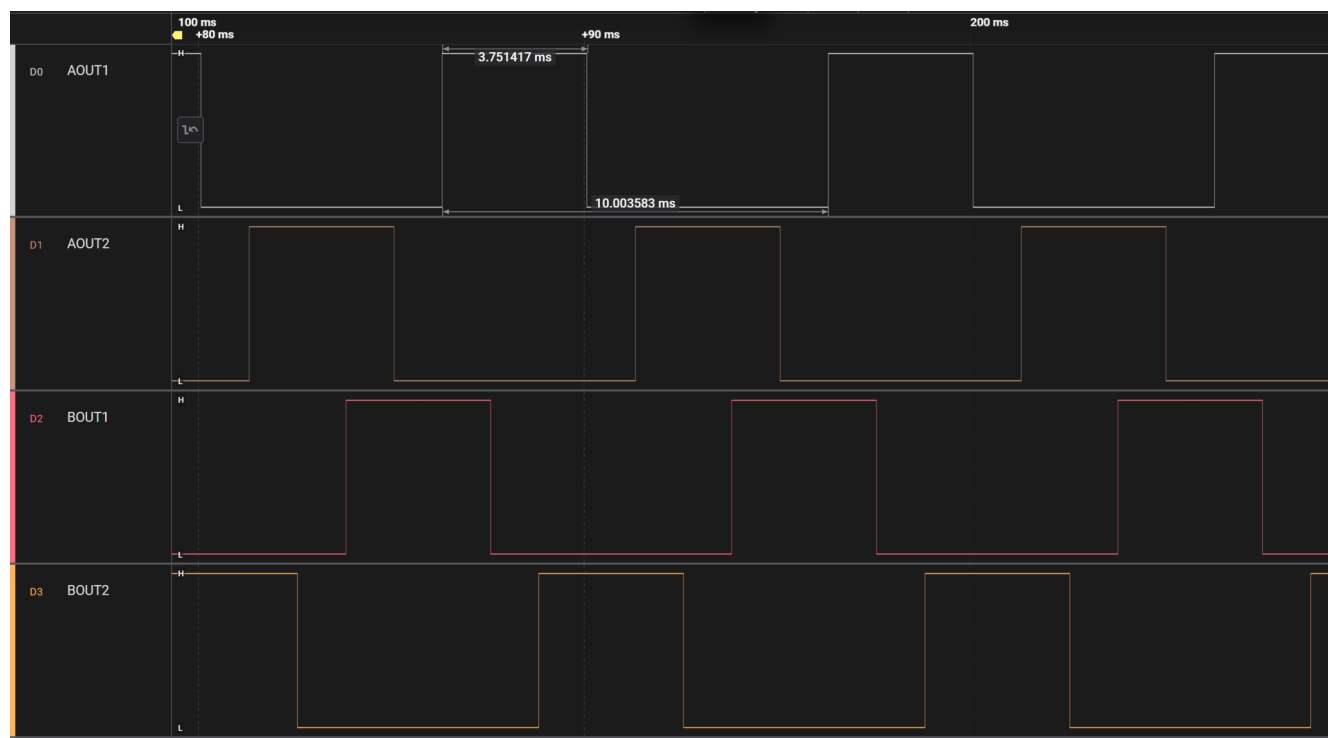


图 5-1. 在半步进情况下，具有快速衰减模式的步进电机波形

在调试会话期间，可以使用 Code Composer Studio 的 Watch 窗口，监控 ADC 值。在下图中，偶数条目显示 VSEN_A，而奇数条目显示 VSEN_B。在这一短暂时间段内，可以观察到两个电机相位均处于主动驱动状态，因为随着时间的推移，两者的数值都在上升。

microVoltBuffer: 536885440	0x200038C0
[0]: 727696	0x200038C0
[1]: 108784	0x200038C4
[2]: 742192	0x200038C8
[3]: 126528	0x200038CC
[4]: 754288	0x200038D0
[5]: 141024	0x200038D4
[6]: 763952	0x200038D8
[7]: 155536	0x200038DC
[8]: 775232	0x200038E0
[9]: 166816	0x200038E4
[10]: 788128	0x200038E8
[11]: 181312	0x200038EC
[12]: 795392	0x200038F0
[13]: 191792	0x200038F4
[14]: 807472	0x200038F8
[15]: 206304	0x200038FC
[16]: 815536	0x20003900
[17]: 218384	0x20003904
[18]: 825200	0x20003908

图 5-2. ADC 缓冲器测量

我们使用 **ENERGYTRACE** 评估 CC2340R5 MCU 的功耗，该评估同时考虑了两种场景：一是仅存在周期性专有射频无线电传输间隔的待机状态，二是电机在设定时长内被主动驱动的工作状态。下文对这些观察结果进行了比较。通过进一步配置前面介绍的专有射频定义，平均待机电流消耗可实现进一步优化，从而降至 $10\mu\text{A}$ 以下。有源电机测量仅考虑 CC2340R5，而不是 DRV8411EVM 驱动电机所需的电流消耗。

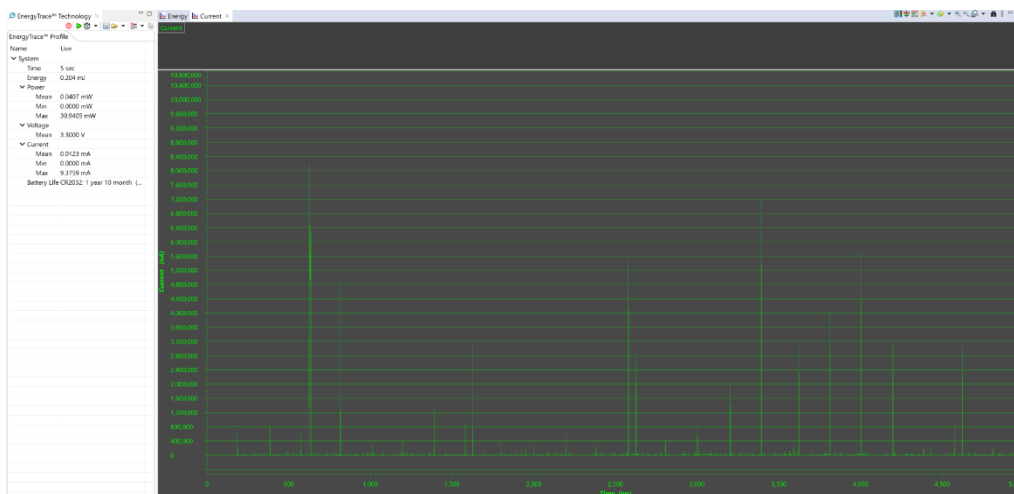


图 5-3. 待机低功耗模式下的 EnergyTrace CC2340R5 MCU 功耗测量值

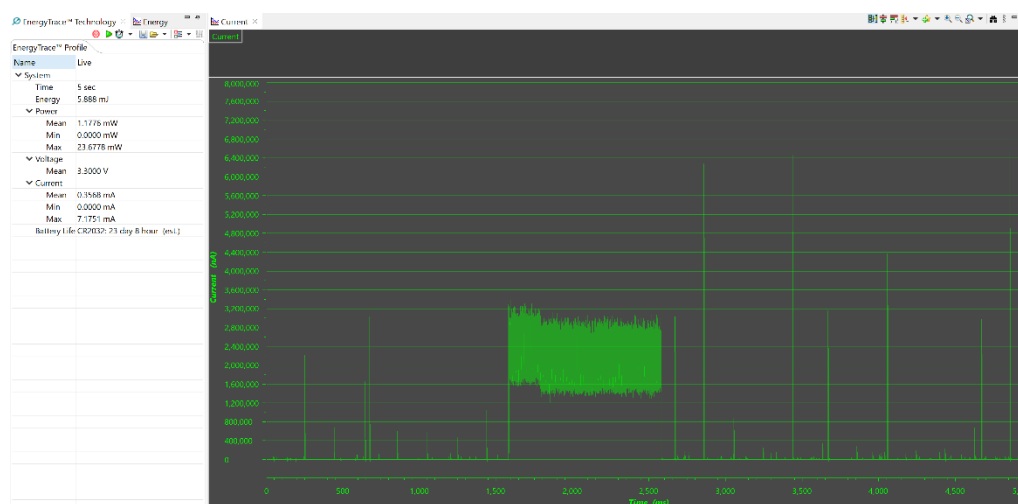


图 5-4. EnergyTrace CC2340R5 MCU 在电机运行状态期间的功耗测量值

6 总结

本应用报告全面定义了使用 SimpleLink CC2340R5 和 DRV8411 的步进电机专有射频解决方案。文中介绍了必要的硬件连接和 MCU 编程说明，从而授权用户进行开箱即用演示。提供测试结果，确认解决方案的稳定性和稳健性。可自由访问源代码，并且已详细说明代码流，因此开发人员熟悉工程的工作原理，并能够进一步修改工程以满足其独特的应用要求。我们鼓励读者在 E2E 论坛发帖，询问与这些资源有关的任何其他问题或支持需求。

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [CC2340R SimpleLink™ 2.4GHz 无线 MCU 系列](#), 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [LP-EM-CC2340R5](#) 快速入门指南。
3. 德州仪器 (TI), [具备电流调节功能的 DRV8411 双路 H 桥电机驱动器](#), 数据表。
4. 德州仪器 (TI), [DRV8410_DRV8411_DRV8411AEVM 用户指南](#), 用户指南
5. 德州仪器 (TI), [专有射频文件](#)
6. 德州仪器 (TI), [PropRF SimpleLink Academy Labs](#)
7. 德州仪器 (TI), [测量 CC13xx 和 CC26xx 电流消耗](#), 应用手册。
8. GitHub, [SimpleLink 低功耗 F3 演示](#), 示例代码。

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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月