

在无 32kHz 晶体的 CC2640 上运行低功耗 Bluetooth®

Christin Lee and Fredrik Kervel

Bluetooth low energy Solutions

摘要

本应用报告介绍了如何配置 SimpleLink™低功耗蓝牙 CC2640 无线 MCU、CC2640R2F 无线 MCU 和多标准 CC2650 无线 MCU，以在无需 32kHz 晶体的情况下运行低功耗蓝牙 (BLE) 软件栈。

本应用报告介绍如何配置该运行模式、针对低功耗蓝牙外设和广播（信标）角色设备使用内部 RC 低频振荡器 (RCOSC_LF)（而不是 32kHz 晶体）时必须考虑哪些注意事项以及它对电流消耗有什么影响。本文档假定读者熟悉《CC2640 和 CC2650 SimpleLink™ 低功耗 Bluetooth® 软件栈开发人员指南》和《CC13xx、CC26xx SimpleLink™ 无线 MCU 技术参考手册》中介绍的概念。

从设计中移除 32kHz 晶体可降低物料清单 (BOM) 成本，减少所需的布板空间，并简化采购过程。

内容

1	简介	2
2	要求	2
3	配置	3
4	性能	5
5	建议	6
6	参考	7

附图目录

1	选择的目标	2
2	电流消耗与连接间隔	6

附表目录

1	SimpleBLEPeripheral 中的连接事件的电流消耗	6
---	---------------------------------------	---

商标

SimpleLink is a trademark of Texas Instruments.
iBeacon is a registered trademark of Apple Inc.
Bluetooth is a registered trademark of Bluetooth SIG, Inc.
Eddystone is a trademark of Google Inc.
All other trademarks are the property of their respective owners.

1 简介

蓝牙规范对要进入（并保持）连接的低功耗蓝牙器件的睡眠时钟精度有非常严格的要求。该规范要求设备的睡眠时钟精度 (SCA) 达到 $\pm 500\text{ppm}$ 。有关 SCA 要求的更多详细信息，请参阅蓝牙核心规范 4.0 第 6 卷中的睡眠时钟精度部分，可以从以下 URL 进行下载：<https://www.bluetooth.com/specifications/adopted-specifications>。

该睡眠时钟精度 (SCA) 要求对于低功耗蓝牙连接的主设备侧和从设备侧都是有效的；不过，像低功耗蓝牙信标等设备，因为本就需要改变广播间隔来避免冲突，所以这类设备对睡眠时钟精度没有这些要求。SCA 要求的目的是确保在器件选型中保持灵活性的同时实现低功耗。从设备必须保持在活动 RX 模式的时间（称为接收窗口）取决于睡眠时钟容差；不太精确的睡眠时钟会要求增加接收窗口时间，因此会增加平均电流消耗。

2 要求

2.1 CC2640F128 和 CC2650F128 硬件版本

注： 本小节不适用于 CC2640R2F。CC2640R2F 的所有版本都支持使用 32kHz RC 振荡器。

为了在 CC2640F128 或 CC2650F128 上使用无 32kHz 晶体功能，需要使用具有芯片版本 2.3 或更高版本的器件。有关更多详细信息，请参阅《[CC2640 SimpleLink™ 无线 MCU 勘误表](#)》。

可以通过三种方法来确定芯片版本：

- 使用 `ChipInfo_GetMinorHwRev()`，可以在我们的 driverlib 中的 `chipinfo.h` 中找到该函数。该函数对于较旧的版本返回 0，对于较新的版本（2.3 或更新的版本）返回 1 或更高的值。仅后者支持使用 32kHz RC 振荡器。
- 检查装运芯片的盒子上的版本标签。版本应为“D”或更高。
- 使用 [Flash Programmer 2](#)。您可以在左下角找到版本编号，如下所示：

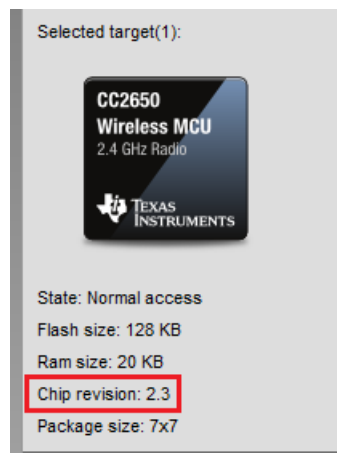


图 1. 选择的目标

CAUTION

依靠 RCOSC_LF 振荡器作为版本 2.2 或更低版本的 CC2640F128 或 CC2650F128 器件上的睡眠时钟可能会导致应用挂起，从而进入无响应状态，进而导致异常和意外的行为。

2.2 BLE-Stack 软件版本

使用内部 32kHz RC 振荡器 (RCOSC_LF) 作为低功耗蓝牙睡眠时钟时，需要对 RCOSC_LF 振荡器执行基于软件的周期性校准。免专利费的 TI 低功耗蓝牙软件协议栈 (BLE Stack) 版本 2.2.x 和 TI SimpleLink BLE-Stack 3.x.x 中均包含该功能。您可以从 www.ti.com/ble-stack 下载 BLE-Stack SDK。

2.3 约束条件

整个 CC2640 温度范围都支持 RCOSC_LF 校准，但必须留意温度梯度。要满足 $\pm 500\text{ppm}$ 的睡眠精度要求，每个校准间隔的最大温度变化不能高于 1°C （默认校准间隔为 1 秒）。

对于支持的低功耗蓝牙 SDK 版本，在选择 RCOSC_LF 构建配置作为睡眠时钟源或根据软件配置部分修改项目时，将启用校准程序（对于不要求睡眠时钟精度的应用，可以手动禁用校准。例如，信标应用使用的非连接的广播）。然后，每当更精确的 24MHz 启动时，校准都将自动运行。

要保持 $\pm 500\text{ppm}$ 精度，校准必须至少每秒运行一次（假设 CC2640 温度变化不超过每秒 1°C ）。在使用高于 1s 的有效低功耗蓝牙连接间隔（处于待机模式的时间大于 1s）的应用中，必须安排至少每秒唤醒一次，以执行 RCOSC_LF 校准。类似地，如果应用处于活动状态的时间长于 1s，则必须由应用触发校准。使用 3.2 节中的支持构建配置，BLE-Stack 软件将会自动处理这些校准要求。

无 32kHz 晶体功能仅支持使用 CC2640/CC2650 无线 MCU 实现低功耗蓝牙外设、观察者和广播（信标）角色。因此，所有中心角色设备或主设备必须使用 32kHz 晶体振荡器。

3 配置

3.1 硬件配置

使用 32kHz RC 振荡器 (RCOSC_LF) 时，不需要进行特别的硬件配置。32kHz 晶体引脚在不使用时将处于 Hi-Z 状态，并且可以安全地连接到任何逻辑电平或处于未连接状态。

3.2 软件配置

要配置器件使其运行在经过校准的 RCOSC_LF（低频振荡器）上，必须执行以下项目修改。以下示例详细介绍了在 IAR 和 Code Composer Studio™(CCS) 集成开发环境 (IDE) 下，使用 BLEStack v2.2 SDK 和 TI SimpleLink BLE-Stack 3.00.00 软件开发套件进行配置的步骤。

1. 包含位于 `<SDK_INSTALL_DIR>\examples\rtos\CC2640R2_LAUNCHXL\ble\common\cc26xx\rcosc` 或 `<SDK_INSTALL_DIR>\src\common\cc26xx\rcosc` 的 `rcosc_calibration.c`、`rcosc_calibration.h` 和 `ccfg_app_ble_rcosc.c` 文件。
2. 从构建中排除 `ccfg_app_ble.c`。
3. 将 `USE_RCOSC` 添加到 `Defined symbols` 中。
4. 将以下代码添加到 `peripheralproject.c` 中

```
#ifndef USE_RCOSC
#include "rcosc_calibration.h"
#endif //USE_RCOSC
```

5. 将以下代码添加到 `peripheralproject.c` 中的 `peripheralproject_init` 函数中

```
#ifndef USE_RCOSC
RCOSC_enableCalibration();
#endif // USE_RCOSC
```

6. 如果使用用户自定义的板级配置文件，则在功耗策略中启用 RCOSC。BLE-Stack 包含的板级配置文件：

```
PowerCC26XX_Config PowerCC26XX_config = {
    .policyInitFxn      = NULL,
    .policyFxn          = &PowerCC26XX_standbyPolicy,
    .calibrateFxn       = &PowerCC26XX_calibrate,
    .enablePolicy       = TRUE,
    .calibrateRCOSC_LF = TRUE,
    .calibrateRCOSC_HF = TRUE,
}
```

7. 将温度变化限制为小于 1°C/秒。如果温度变化快于 1°C/秒，则必须使用较短的校准间隔。可以在 rcosc_calibration.h 中调节校准间隔

```
// 1000 ms
#define RCOSC_CALIBRATION_PERIOD 1000
```

3.2.1 软件概述

RCOSC_LF 校准通过 TI-RTOS 电源驱动程序完成。每次设备从待机状态唤醒时，都会使用更精确的高频晶体振荡器 (XOSC_HF) 作为基准对 RCOSC_LF 执行校准。该校准确保睡眠时钟源满足 $\pm 500\text{ppm}$ 精度要求。

上述的软件配置部分负责 RCOSC_LF 校准。您可以在 BLE-Stack SDK 中的 rcosc_calibration.c 和 rcosc_calibration.h 源文件中找到实现代码。

在我们的 BLE Stack 中，在以下情况下执行 RCOSC_LF 校准：

- 待机时间长于 1 秒（例如，较长的有效连接间隔）
 - 使用如下所示的 Power_registerNotify 函数和一个一次性时钟，来安排一个距离上次活动事件 1s 的唤醒事件

```
// Receive callback when device wakes up from Standby Mode.
Power_registerNotify(&injectCalibrationPowerNotifyObj,
    PowerCC26XX_AWAKE_STANDBY,
    (Power_NotifyFxn)rcosc_injectCalibrationPostNotify, NULL);

// Create RCOSC clock - one-shot clock for calibration injections.
Util_constructClock(&injectCalibrationClock,
    rcosc_injectCalibrationClockHandler,
    RCOSC_CALIBRATION_PERIOD, 0, false, 0);
```

- 活动时间长于 1 秒
 - 时钟对象到期并调用以下函数：

```
// Inject calibration.
PowerCC26XX_injectCalibration();
```

下面列出了 ccfg_app_ble.c 和 ccfg_app_ble_rcosc.c 之间的差异

- SET_CCFG_MODE_CONF_VDDR_TRIM_SLEEP_TC：该参数决定是否根据温度更改待机模式下的最低 VDDR 电压电平。当设备处于低温时，RCOSC_LF 漂移会变大，而且较高的 VDDR 休眠调整值会降低 RCOSC_LF 的温度敏感度。启用该功能可确保使用 1s 校准间隔时，SCA 在所有温度下均保持在 $\pm 500\text{ppm}$ 之内（假设温度变化小于 1°C/秒）。这会使设备在处于低温下时的唤醒次数比处于室温和高温时更多。
- SET_CCFG_MODE_CONF_SCLK_LF_OPTION：该参数决定低频系统时钟 (SCLK_LF) 的时钟源。

3.2.2 针对信标广播设备应用的更改

1. 选择 `simple_broadcaster` 应用项目 (\examples\cc2650em\simple_broadcaster) 中的 FlashROM 构建配置。
2. 从构建中排除“Startup”文件夹下的 `ccfg_app_ble.c`。
3. 在构建中包含“Startup”文件夹下的 `ccfg_app_ble_rcosc.c`。
4. 禁用 VDDR 电平的温度补偿，因为对于信标应用，SCA 不需要处于 $\pm 500\text{ppm}$ 之内。

```
#define SET_CC26XX_MODE_CONF_VDDR_TRIM_SLEEP_TC 0x1 // Temperature compensation
on VDDR sleep trim disabled (default)
```

5. 在板级配置文件中禁用 `RCOSC_LF` 校准。

```
const PowerCC26XX_Config PowerCC26XX_config = {
    .policyInitFxn      = NULL,
    .policyFxn          = &PowerCC26XX_standbyPolicy,
    .calibrateFxn       = &PowerCC26XX_calibrate,
    .enablePolicy       = TRUE,
    .calibrateRCOSC_LF = FALSE,
    .calibrateRCOSC_HF = TRUE,
};
```

4 性能

4.1 电流消耗

与利用外部 32kHz 晶体振荡器的电路设计相比，将内部 `RCOSC_LF` 用作睡眠时钟会在器件电流消耗方面具有净效应。电流消耗的差异根据配置的设备角色而变化。对于低功耗蓝牙连接中的外设（从）设备，与使用外部 32kHz 晶体相比，在使用 `RCOSC_LF` 时电流消耗将更高；不过，电流消耗的增加取决于多种因素。电流消耗增加的原因在于：

- 以特定的间隔执行校准
- 由于最大允许睡眠时钟精度 ($\pm 500\text{ppm}$ ，而对于 32kHz 晶体通常为 $\pm 40\text{ppm}$)，使得接收窗口更长。

在 `CC2640` 进行广播（例如，作为信标或等待连接请求）或处于待机状态（空闲时）期间，使用内部 `RCOSC_LF` 的电流消耗将小于（好于）使用 32kHz 晶体振荡器。

校准过程本身会花费大约 1ms，对于典型的低功耗蓝牙连接事件，校准将在无线电运行的同时在后台执行。因此，在大多数情况下，由于执行校准而增加的电流消耗可以忽略不计。在具有较长有效低功耗蓝牙连接间隔（即使用最大从设备延迟而使得连接间隔大于 1 秒）的配置中，将存在额外的功耗，因为设备必须在连接事件之间从待机（睡眠）状态唤醒，以执行 `RCOSC_LF` 校准。在使用 32kHz 晶体的电路设计中，不需要这些校准唤醒。

在表 1 和图 2 中，我们可以看到在选择某些低功耗蓝牙有效连接间隔时，使用 32kHz 晶体与使用内部 RCOSC_LF 时的平均电流消耗。要获取任何给定配置的实际电流消耗，请执行测量蓝牙智能功耗中的测量过程。

表 1. SimpleBLEPeripheral 中的连接事件的电流消耗

连接间隔 [ms]	使用 RC OSC 的平均电流 [μA]	使用 XOSC 的平均电流 [μA]
10	963.3	897
50	194.5	180
100	98.3	90.8
500	23.9	19.7
1000	15.4	10.8
4000	11.7	4.2

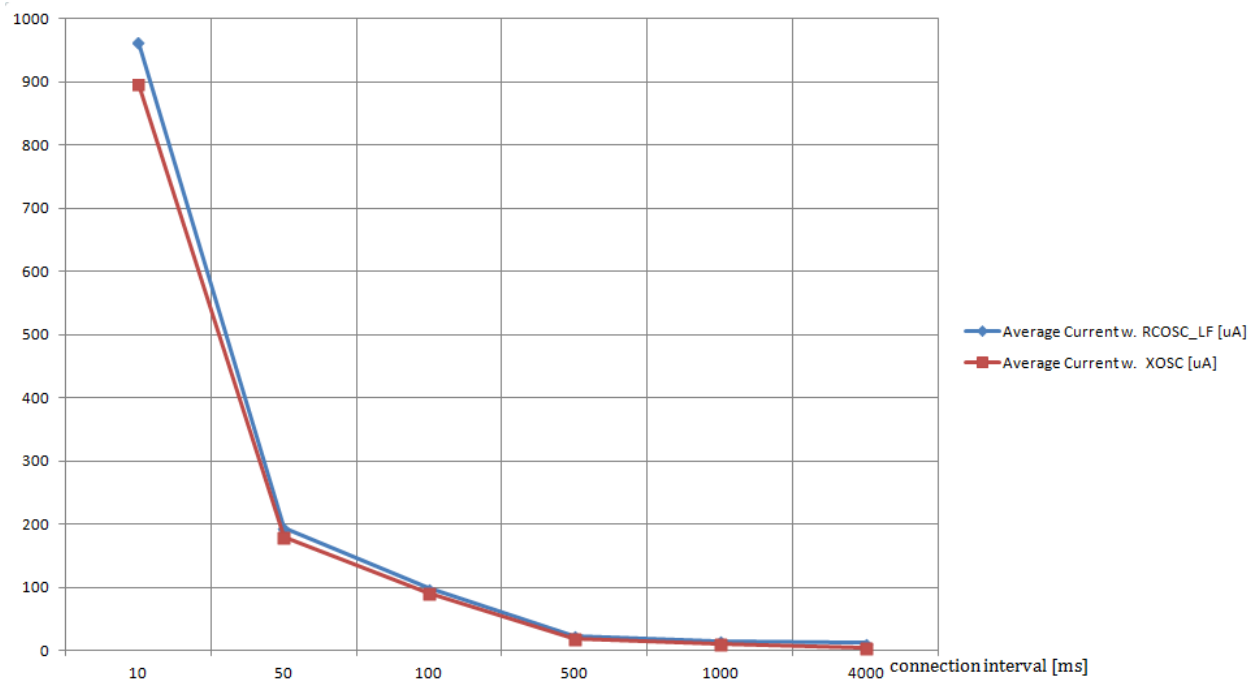


图 2. 电流消耗与连接间隔

5 建议

对于以下 BLE 运行条件，应考虑使用无 32kHz 晶体功能：

- 希望实现最低可能 BOM 成本或布板空间受到限制。
- 某些外设角色设备（从设备），它们将保持短（快速）连接间隔或极少进入 BLE 连接，并在大多数时间中保持空闲或广播状态。典型设备包括门锁、灯泡、血糖仪 (BGM) 和健身/活动追踪器。
- 信标或广播角色设备，如 Apple iBeacon®位置和接近检测技术以及 Eddystone™（Google 提供了一种开放信标格式）。这些设备通常不会形成连接，大部分时间都在执行 BLE 广播。与使用外部 32kHz 晶体相比，这些设备在使用 RCOSC_LF 时可实现更优（更低）的电流消耗。

6 参考

- 《CC2640 和 CC2650 SimpleLink™ 低功耗 Bluetooth® 软件栈 2.2.1 开发人员指南》
- 《CC13xx、CC26xx SimpleLink™ 无线 MCU 技术参考手册》
- 《CC2640 SimpleLink™ 无线 MCU 勘误表》
- 测量蓝牙智能功耗

修订历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

Changes from A Revision (January 2017) to B Revision	Page
• 对2.1 节进行了更新。	2

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认的保证或陈述，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](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)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