

Application Note

CC27xx 无外部 32kHz 晶体的工作方式与配置



Cashmere Ramos

摘要

CC27xx 器件系列使用内部低频振荡器 (LFOSC) 搭配硬件辅助 LFOSC 校准 (LFCAL)，实现无外部 32.768kHz 晶体的工作模式。该功能使该器件在保持完全符合蓝牙低功耗® (BLE) 规范的同时，降低系统对外接元件的依赖。

为了补偿低功耗待机运行期间的 LFOSC 频率漂移，CC27xx 集成了一个专用的 LFCAL 硬件块。该模块周期性启用高频晶体振荡器 (HFXT)，对内部振荡器 (LFOSC) 执行自动校准，无需 CPU 干预，即可确保器件在不同温度和供电电压条件下，仍能保持蓝牙核心规范允许的最大频偏 $\pm 500\text{ppm}$ 的睡眠时钟精度 (SCA)。

省去外部 32.768kHz 晶体可带来显著的系统级优势，包括降低物料清单 (BOM) 成本、简化 PCB 布局和缩小整体电路板尺寸，同时仍满足蓝牙低功耗规范的时序要求。

内容

1 简介.....	3
1.1 适用器件.....	3
1.2 所需软件.....	3
2 快速决策指南：何时使用无晶体模式？.....	4
2.1 适合使用 LFOSC 的场景.....	4
2.2 权衡因素.....	4
2.3 适合使用外部晶体 (LFXT) 的场景.....	4
3 内部振荡器运行.....	5
3.1 工作原理.....	5
3.2 CC27xx 设计：LFCAL 硬件.....	6
4 快速入门指南.....	7
4.1 打开 SysConfig.....	7
4.2 选择 LFOSC Clock Source.....	7
4.3 启用 LFOSC Compensation.....	7
4.4 添加补偿配置文件.....	8
4.5 设为默认配置文件.....	8
4.6 构建并测试.....	9
5 配置详细信息和功耗.....	10
5.1 了解补偿配置文件.....	10
5.2 配置文件示例.....	11
5.3 电源策略.....	11
6 窗口展宽.....	12
6.1 挑战.....	12
6.2 设计.....	12
7 硬件设计.....	13
7.1 可移除元件.....	13
7.2 LFXT 引脚.....	13
7.3 HFXT 要求.....	13
7.4 电路板启动核查清单.....	13
8 总结.....	14
9 参考资料.....	14

商标

蓝牙低功耗® is a registered trademark of Bluetooth SIG.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

本应用手册介绍了德州仪器 CC27xx 无线 MCU 如何利用内部低频振荡器 (LFOSC) 结合硬件辅助校准，在 32kHz 无晶体模式下运行，以达到所需的睡眠时钟精度 (SCA)。CC27xx 系列集成专用的 LFCAL 硬件，可在待机模式下实现高效的 LFOSC 校准。

1.1 适用器件

本应用手册适用于所有 CC27xx 器件，包括：

- CC2745R10-Q1、CC2745P10-Q1
- CC2745R7-Q1、CC2744R7-Q1
- CC2755P20、CC2755R20

1.2 所需软件

- SimpleLink 低功耗 F3 SDK
- SysConfig

2 快速决策指南：何时使用无晶体模式？

评估是否采用无晶体工作模式时，系统设计必须考虑应用的功率预算、连接间隔要求、工作温度范围以及 PCB 面积限制。无晶体模式更适合成本和空间敏感型设计，前提是 LFOSC 校准和接收窗口展宽带来的额外功耗，在系统整体功耗预算内可以接受。对于低功耗要求严格，或成本、空间限制极高的设计，在移除外部 32.768kHz 晶体之前，必须仔细评估利弊。

2.1 适合使用 LFOSC 的场景

表 2-1. 使用 LFOSC 的优势

优势	详细信息
成本降低	晶体和负载电容器
PCB 空间限制	消除晶体尺寸和布线限制

2.2 权衡因素

- **平均电流增加**：这是因为校准操作带来了额外的唤醒动作
- **更宽的 RX 窗口**：蓝牙低功耗接收 (RX) 窗口更宽，这是因为时钟精度为 500ppm，而使用晶体时（室温下）为 50ppm
- **温度敏感性**：校准频率会随温度变化速率加快而提高

2.3 适合使用外部晶体 (LFXT) 的场景

表 2-2. 使用 LFXT 的优势

用例	说明
对超低功耗要求严苛	晶体方案无校准额外功耗开销，也不存在窗口展宽问题
所需的最高时序精度	晶体提供小于 50ppm 的精度，因此可实现比 LFOSC 的基本时钟精度更高的精度

3 内部振荡器运行

3.1 工作原理

蓝牙低功耗连接事件需要精确的时序，以确保器件间数据包可靠交换。蓝牙核心规范允许高达 $\pm 500\text{ppm} + 16\mu\text{s}$ 的睡眠时钟精度 (SCA)，该参数规定了低频时钟源在待机间隔内允许的最大漂移。

内部 LFOSC 是一个自由运行的振荡器，其频率随器件工作条件而变化。为了补偿 LFOSC 频率漂移，系统采用周期性硬件校准机制。系统以超低泄漏 (ULL) 时钟测量 LFOSC 周期，该时钟在工作模式期间用作精确基准。在相同模式下，ULL 时钟 (CLKULL) 在 24MHz 下运行，它由高频振荡器 (HFOSC) 产生，而 HFOSC 则由高频晶体振荡器 (HFXT) 产生。当器件进入待机模式时，CLKULL 会切换到使用已配置的低频时钟 (LFCLK)。

通过此次测量可得出换算系数 LFINC，实时时钟 (RTC) 应用该系数实现精准计时。该机制可验证，器件在整个使用寿命周期内，蓝牙低功耗 (LE) 连接事件的时序调度始终符合蓝牙核心规范所规定的睡眠时钟时序精度要求。

此校准机制要求高频晶体振荡器 (HFXT) 处于工作状态。在待机期间，HFXT 会关断以最大限度地降低电流消耗，LFINC 更新随之暂停，该时段内发生的所有 LFOSC 频率漂移无法得到补偿。当发生可重新激活 HFXT 的周期性唤醒事件或 BLE 活动时，LFINC 将重新开始校准。

未启用 LFCAL 时 LFOSC 的简化示例

步骤 1 — 工作模式

1. HFXT (48MHz) 处于工作状态并用作 HFOSC 的精确基准，以便 CC27xx 器件输出 96MHz 跟踪型 HFOSC 信号，CC23xx 器件输出 48MHz 跟踪型 HFOSC 信号。
2. CLKULL 由跟踪型 HFOSC 分频得到，频率为 24MHz。
3. 硬件根据 CLKULL 测量所选的 LFCLK (在本例中为 LFOSC) 周期。例如，当频偏约为 -300ppm 时，
LFOSC 频率 = 32.758kHz。
$$\text{CLKULL} \div \text{LFOSC actual frequency} = \text{CLKULL ticks per LFTICK}$$
$$24 \text{ MHz} \div 32.758 \text{ kHz} = 732.64 \text{ CLKULL ticks per LFTICK}$$
4. LFINC 更新为 $30.527\mu\text{s}$ 。每次 LFTICK 触发时，硬件都会将 LFINC 累加到 RTC TIME 计数器。
$$1 \text{ LFTICK} = 1/32758 = 30.527 \mu\text{s}$$
5. 为了调度下一个连接事件，将比较 (COMPARE) 值设置为当前时间 (TIME) + 所需间隔 (1000ms)。当时间 (TIME) 达到比较 (COMPARE) 值时，RTC 会触发唤醒。

步骤 2 — 待机模式

1. HFXT 被禁用，不再为 HFOSC 提供跟踪基准。
2. CLKULL 切换为基于所选 LFCLK (本例为 LFOSC) 运行；由于没有参考时钟来测量 LFOSC，LFINC 无法更新。
3. RTC 与 WDT 保持工作，沿用上次测量得到的 LFINC。
4. LFOSC 相对标称频率 (32.7844kHz) 漂移至 $+500\text{ppm}$ ，整体频率变化约 800ppm ，由于 LFINC 数值已过时，该 LFOSC 漂移无法得到补偿。
$$\text{New actual LFTICK period} = 24 \text{ MHz} \div 32.7844 \text{ kHz} = 30.5023 \mu\text{s per tick}$$
5. RTC 继续对 LFTICK 边沿进行计数，但每个节拍现在代表的实时时间略小于 LFINC 假设的时间。只要漂移未得到补偿，时序误差就会累积。漂移在待机期间发生得越早，唤醒时的误差就越大。在最坏工况下，漂移在禁用 HFXT 后立即发生，在整个待机持续时间内累积。

步骤 3 — RX 窗口时序

1. RTC 计数 32,758 个 LFTICK 边沿，预计经过 1000.00ms。实际运行时间： $32,758 \text{ 个周期} \times 30.5023\mu\text{s} = 999.194\text{ms}$
2. 外设的预估 RX 窗口提早 806 μs 开启
3. 为简化计算，忽略主机 SCA（通常为 50ppm），因此主机在 $T = 1000.00\text{ms}$ 时发送连接数据包。
4. 外设 SCA 为 500ppm，叠加蓝牙规范中规定的 16 μs 瞬时抖动容限，RX 窗口在估算的锚点前后各延伸 516 μs ：

$$\begin{aligned} \text{RX window opens: } & 999.194 - 0.516 = 998.678 \text{ ms} \\ \text{RX window closes: } & 999.194 + 0.516 = 999.710 \text{ ms} \end{aligned}$$

实际数据包在预估锚点后 806 μs 到达，此时窗口已关闭 290 μs 。连接数据包丢失。

3.2 CC27xx 设计：LFCAL 硬件

CC27xx 集成了一个专用的低频校准 (LFCAL) 硬件模块，旨在将睡眠时钟精度保持在蓝牙核心规范允许的 $\pm 500\text{ppm}$ 范围内，无需 CPU 干预。在待机期间，LFCAL 硬件自主执行由以下操作组成的周期性校准序列：

1. 启用高频晶体振荡器 (HFXT)，为测量提供 CLKULL 基准时钟。
2. 根据 CLKULL 基准时钟测量当前的 LFOSC 周期。
3. 推导更新后的 LFINC 换算系数并将其应用于实时时钟 (RTC)。
4. 禁用 HFXT 并使器件返回低功耗待机状态。

整个校准序列在硬件中自主执行。无需 CPU 唤醒事件，从而省去了相关软件开销。该机制验证蓝牙低能耗连接事件时序在整个待机间隔内保持在规格允许的范围内。

基于上述简化示例，下面分析启用 LFCAL 后的相同场景。配置唤醒间隔为 1000ms 的补偿配置文件后，LFCAL 硬件会在待机期间执行周期性校准，在步骤 2 和步骤 3 之间新增一个校准操作。因此，步骤 3 的 RX 窗口时序结果发生改变。

步骤 2a — 待机模式期间的校准

1. 在进入待机模式之前，软件采用适配 1000ms 连接间隔的补偿配置文件，对 LFCAL 硬件进行配置。本示例中仅作假设，校准间隔设定为 150ms。实际值取决于所有配置文件参数（请参阅[了解补偿配置文件](#)）。
2. 在待机期间，LFCAL 在 $T = 150\text{ms}$ 、300ms、450ms、600ms 和 750ms 时刻唤醒，以基准时钟测量 LFOSC，并相应更新 LFINC
3. 完成 $T = 750\text{ms}$ 的最后一次额外校准后，LFINC 与实际 LFOSC 周期匹配。如果 LFOSC 在剩余 250ms 无补偿待机时段内立即产生 500ppm 的漂移，则仅产生残余时序误差

$$\begin{aligned} 500 \text{ ppm} \times 250 \text{ ms} &= 125 \mu\text{s} \\ \text{Estimated anchor point: } & 1000.00 - 0.125 = 999.875 \text{ ms} \end{aligned}$$

步骤 3 — RX 窗口时序

1. 此时 RX 窗口仅提前 125 μ s 开启，而未启用 LFCAL 时提前 806 μ s。
2. 为简化计算，忽略主机 SCA (通常约为 50ppm)，因此主机在 T = 1000.00ms 时发送连接数据包。
3. 在相同假设条件下，即外设 SCA 仍为 500ppm、瞬时抖动容限仍为 16 μ s，RX 窗口约在 999.359ms 开启，1000.391ms 关闭，数据包可被成功接收。

请注意，本示例中使用的校准间隔并不表示所有使用 1000ms 作为唤醒间隔的补偿配置文件。有关更多详细信息，请参阅[了解补偿配置文件](#)。

4 快速入门指南

以下步骤介绍了通过 SysConfig 和 TI SimpleLink Low Power F3 SDK 在 CC27xx 工程中启用无晶体运行的流程。所有配置均通过 SysConfig 完成，该工具可自动生成所需的驱动初始化代码。

4.1 打开 SysConfig

在 Code Composer Studio (CCS) Theia 中打开目标工程，并在 Project Explorer 中找到该工程的 .syscfg 文件。双击该文件以启动 SysConfig 图形配置工具。SysConfig 提供了一个硬件抽象化配置界面，可配置器件外设、时钟和驱动程序设置，无需手动进行寄存器级配置。

4.2 选择 LFOSC Clock Source

导航至：TI Devices → Device Configuration → Low Frequency Clock Source

在可用选项中，选择 *LF RCOSC* 以将内部低频振荡器 (LFOSC) 指定为 LFCLK 源。默认选择为 *LF XOSC*，该选项需要外部 32.768kHz 晶体。选择 *LF RCOSC* 会生成代码，以在启动时调用 `PowerLPF3_selectLFOSC()`，这会激活内部 LFOSC 并将其路由到 LFCLK 域。

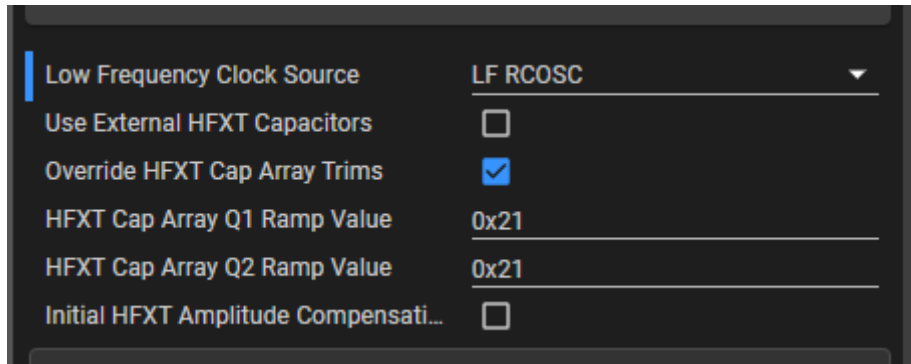


图 4-1. LF 时钟源选择

4.3 启用 LFOSC Compensation

勾选 *Enable LFOSC Compensation* 复选框。当 LFOSC 作为 LFCLK 时钟源时，只要 HFXT 可用，就会自动进行 LFINC 计算。启用该选项将触发额外的 LFCAL 唤醒以实现周期性补偿，同时指示生成代码在启动初始化阶段调用 `PowerLPF3_initLfoscCompensation()` 和 `PowerLPF3_enableLfoscCompensation()`。

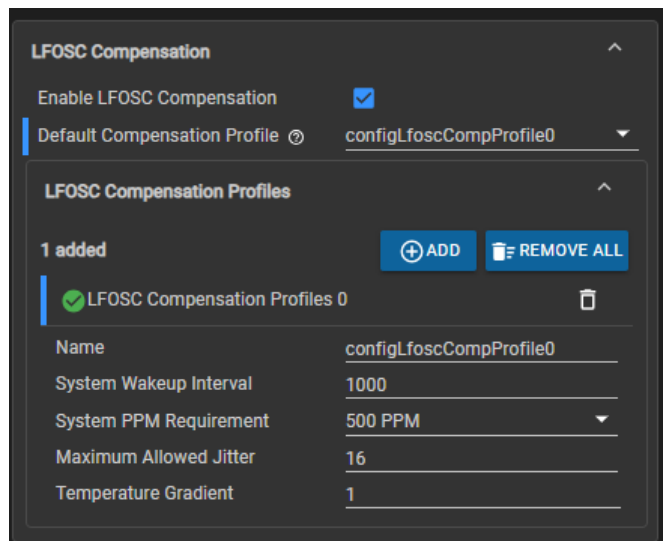


图 4-2. LFOSC Compensation 复选框

4.4 添加补偿配置文件

点击 LFOSC Compensation Profiles 下的 *Add* 以创建新的配置文件。补偿配置文件定义了 LFCAL 硬件用于计算目标应用的校准间隔的操作参数。按照下表中的说明对配置文件字段进行配置：

表 4-1. 补偿配置文件值

参数	典型值	说明
系统唤醒间隔 (us)	1000000 (1s)	已定义的连接间隔
系统 PPM 要求	500ppm	满足蓝牙低功耗合规性所需
温度梯度	1°C/s	最坏工况下的预期温度变化率

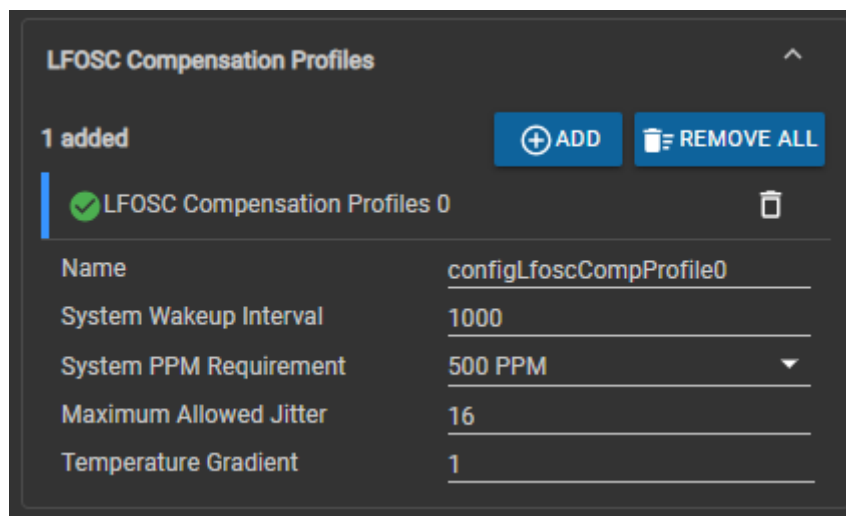


图 4-3. 采用 1ms 唤醒间隔的配置文件配置

4.5 设为默认配置文件

将已配置的配置文件作为默认补偿配置文件。生成的初始化代码会在器件启动时自动加载默认配置文件，从而验证 LFOSC 补偿在 BLE 栈启动第一个连接事件之前是否处于活动状态。在单个工程中可以定义多个补偿配置文件，以适配具有不同工作模式的应用，例如不同的连接间隔或占空比。但是，只能指定一个配置文件作为默认配置文件。可以使用 `PowerLPF3_setLfoscCompensationProfile()` 在运行时切换配置文件，以使校准间隔适应不断变化的应用程序条件。

4.6 构建并测试

当 SysConfig 完成无晶体模式配置后，生成的初始化代码会按顺序调用以下电源驱动 API 来激活 LFOSC 补偿。
编译工程时，以下代码会自动添加到 SysConfig 生成的 Board_init() 函数中：

```
/* activates the internal LFOSC and switches the low-frequency clock (LFCLK) source to the LFOSC. Dynamic switching between low-frequency clock sources is currently not supported.*/  
PowerLPF3_selectLFOSC();  
/* initializes the internal state of the LFOSC compensation subsystem and configures the LFCAL hardware measurement window. The default calibration measurement duration is 1500µs.. */  
PowerLPF3_initLfoscCompensation();  
/* supplies the compensation profile that governs how the LFCAL hardware computes the optimal calibration interval. The profile is defined by the PowerLPF3_LfoscCompensationProfile structure. */  
PowerLPF3_setLfoscCompensationProfile(&configLfoscCompProfile0);  
/* activates the LFCAL hardware block; the driver reads the current device temperature, computes the initial calibration interval based on the active profile, and begins the autonomous periodic calibration cycle. Temperature change notifications are registered internally to dynamically adjust the calibration interval ensuring that sleep clock accuracy remains within ±500ppm under varying thermal conditions. */  
PowerLPF3_enableLfoscCompensation();
```

编译工程，并通过确认在长时间待机期间 BLE 连接事件保持无时序错误，来验证系统运行正常。

5 配置详细信息和功耗

5.1 了解补偿配置文件

PowerLPF3_LfoscCompensationProfile 结构定义了 LFCAL 硬件用于计算目标应用的校准间隔的操作参数。

在整个运行过程中，应用通常涉及不同的状态，每种状态都需要不同的唤醒间隔和时序特性。例如，应用可能在广播状态下使用较长的唤醒间隔，随后切换至连接状态并使用更短的连接间隔。虽然可在所有应用状态下使用单一配置文件，但该文件必须按最坏工况配置：最短唤醒间隔、最严格的 ppm 要求、最大温度梯度以及最小允许抖动。由于校准间隔由最坏工况（最短）唤醒间隔决定，因此在唤醒间隔较长的工作状态下，LFCAL 硬件的校准频率将高于实际所需。为了优化功耗，可以定义多个补偿配置文件，从而使 LFCAL 硬件能够使用最适合当前工作条件的校准间隔。当用户未显式分配配置文件时，系统将应用默认配置文件。以下字段用于配置补偿配置文件：

表 5-1. 补偿配置文件说明

字段	说明	默认值	单位
systemWakeupIntervalUsec	连续系统唤醒事件之间的预期间隔（以微秒为单位）；通常对应配置的连接间隔；	1000000	μ s
ppmRequirement	所需的睡眠时钟精度 (SCA)，以百万分率表示。	500	ppm
temperatureGradientMilliCelsiusPerSec	最坏工况下的温度变化率值；梯度越大，平均电流越高	1	C/s
maxAllowedJitterUsec	超出 ppm 要求之外，每次唤醒可容忍的最大附加时序抖动（以微秒为单位）；该值越小，平均电流越高	16	μ s

16 μ s 的默认值反映了 [蓝牙规范](#) 允许的最大单次唤醒瞬时抖动，该规范要求所有瞬时时序相对于由睡眠时钟精度 ($\leq \pm 500$ ppm) 推导出的平均时序，偏差不得超过 16 μ s。该驱动器使用此预算来延长校准间隔并降低平均电流消耗。

LFCAL 补偿模型考虑了 200ppm 的 LFOSC 基线误差 (LFOSC_BASELINE_PPM)，该误差表示 LFINC 滤波器在整个工艺、电压和温度 (PVT) 变化下的精度。此基线与睡眠持续时间无关，不包括频率扰动的影响。系统计算校准间隔时，需保证温度漂移、频率扰动及此基线偏移的总累积误差保持在蓝牙核心规范允许的 ± 500 ppm 睡眠时钟精度要求范围内。

LFOSC 温度系数以 ppm/°C 表示，并存储在出厂配置 (FCFG) 中

- fcfg->appTrims.cc27xx.misc0.lfoscPpmTempMid
- fcfg->appTrims.cc27xx.misc0.lfoscPpmTempExt

在计算 LFCAL 校准间隔时，电源驱动器在运行时通过 CKMDGetLfoscMidTempCoefficientPpmPerC() 和 CKMDGetLfoscExtTempCoefficientPpmPerC() 自动读取这些值。无需在应用层显式访问 FCFG。电源驱动器考虑了 FCFG 中定义的温度系数和用户定义的温度梯度，用于确定 LFCAL 硬件的校准频率，以满足精度要求。

5.2 配置文件示例

以下配置文件示例展示了常见蓝牙低功耗应用场景下的代表性 LFCAL 配置。每种配置均对比了基于 LFOSC 的配置文件与晶体 (LFXT) 基准方案之间的电流消耗。以下示例均基于 LP_EM_CC2745R10-Q1。表 5-2 比较了使用晶体振荡器与内部 RC 振荡器时在单个间隔内的平均电流消耗。表 5-3 列出不同唤醒间隔配置下，单间隔平均电流消耗的变化情况。

请注意，虽然间隔越长需要更多的唤醒次数，但每次校准之间的时间间隔也会增加。

固定值：

- 允许抖动：16 μ s
- 温度梯度：1C/s，
- 温度：25°C

表 5-2. LFXT 与 LFOSC 的测量电流比较

时钟源	连接间隔	TX 功率 (dBm)	单间隔平均电流 (uA)	增加的唤醒次数
LFXT	30ms	0	222	-
LFOSC	30ms	0	266	1
LFXT	30ms	10	265	-
LFOSC	30ms	10	308.5	1

表 5-3. LFOSC 不同用户配置的计算电流比较

连接间隔 (ms)	预期待机平均电流 (uA)	单间隔预期平均电流 (uA ; 0dBm , 3.3V)	增加的唤醒次数
30	46	266	1
100	14.3	80.5	2
250	7	33.7	3
500	4.4	17.8	4
750	3.5	12.4	4
1000	3.1	9.8	5

5.3 电源策略

必须将电源驱动器策略配置为 PowerCC27XX_standbyPolicy 才能启用待机模式。

在 SysConfig 中，可以通过导航到以下位置来设置电源策略：TI Drivers → Power，将 PowerCC27XX_standbyPolicy 设为当前生效策略函数。

6 窗口展宽

在蓝牙低功耗 (BLE) 连接中，主机和外设按精准间隔进行数据交换，该间隔称为连接事件。按照蓝牙核心规范规定，每次连接事件的时序由连接建立流程中的连接间隔参数决定。在连续连接事件之间，两个器件都会进入低功耗待机状态，以尽可能减少电流消耗。

6.1 挑战

当该器件处于待机模式时，每个器件的睡眠时钟会以各自的速率独立漂移。因此，当每个器件因预期下一个连接事件而唤醒时，主机和外设都无法精确确定对方的精确唤醒时序。必须考虑该时钟的不确定性，以验证在每次连接事件中都能可靠接收数据包。

6.2 设计

窗口展宽是蓝牙核心规范定义的机制，用于补偿互联设备间的睡眠时钟不确定性。外设先于预期的锚点打开其接收 (RX) 窗口，并延长窗口时长，保证即使存在时钟漂移累积，仍可成功接收主机数据包。启用该机制无需额外配置；其作为蓝牙低功耗连接过程的一部分自动应用。

接收窗口持续时间由两台设备的综合睡眠时钟精度 (SCA) 及距离上一次同步锚点的时长共同决定，对应公式如下：

$$\text{窗口宽度} = 2 \times (\text{SCA_peripheral} + \text{SCA_central}) \times \text{time_since_last_anchor}$$

其中，SCA 值以百万分率 (ppm) 表示，time_since_last_anchor 为距离上一次成功接收锚点的时长。

当使用 $\pm 500\text{ppm}$ 的 LFOSC 且主机典型 SCA 为 50ppm 时，与 $\pm 20 - 40\text{ppm}$ 的晶体振荡器方案相比，所得的 RX 窗口持续时间大约是基于晶体方案的六到八倍。

有关更多信息，请参阅蓝牙核心规范中的 [窗口展宽](#) 部分。

7 硬件设计

7.1 可移除元件

使用 LFOSC 模式时，可以从 BOM 中移除以下元件：

- 32.768kHz 晶振
- 两个负载电容器 (通常为 6.8-15pF)

7.2 LFXT 引脚

LFXT 对应引脚可做如下处理：

- 保持未连接状态 (无需外接元件)
- 用作 GPIO/SPI/UART 等其他功能引脚
- 请参阅此[产品页面](#)了解更多信息。

7.3 HFXT 要求

48MHz HFXT 为必需器件，其同时用作时钟校准基准与射频载波基准时钟。

7.4 电路板启动核查清单

1. 从 `basic_ble` 示例开始
2. 按照[快速入门](#)中所述在 SysConfig 中配置 LFOSC
3. 构建和烧录
4. 使用智能手机验证蓝牙低功耗连接
5. 监控连接稳定性
6. 逐步添加应用程序功能

8 总结

CC27xx 器件系列通过将外部 32.768kHz 晶体替换为内部低频振荡器 (LFOSC) 并使用专用硬件校准块 (LFCAL) 来支持无晶体 BLE 运行。该功能可在 BOM 中省去晶体和相关负载电容器，从而降低系统成本、简化 PCB 布局并缩小电路板尺寸，同时完全符合蓝牙核心规范的 $\pm 500\text{ppm}$ 睡眠时钟精度 (SCA) 要求。

LFCAL 硬件在待机模式下自主运行，无需 CPU 干预，会周期性唤醒高频晶体振荡器 (HFXT) 以重新校准 LFOSC 并更新实时时钟使用的 LFINC 换算系数。该周期性重校准可限制时序误差累积，即使在温度、供电电压波动工况下，BLE 连接事件时序调度仍符合规范要求。板载必须保留 48MHz HFXT，它既是时钟校准基准，也是射频载波的基准时钟。

与使用外部晶体的方案相比，无晶体模式存在明确的性能取舍。由于 LFCAL 会产生额外唤醒事件，平均功耗更高，并且 BLE 接收窗口比基于晶体的振荡器实现的窗口更宽。校准频率还会随着温度变化率的加快而提高，因此在配置补偿配置文件时，温度梯度是一个关键参数。

完全通过 SysConfig 和 SimpleLink 低功耗 F3 SDK 执行配置，无需手动访问寄存器。

PowerLPF3_LfoscCompensationProfile 结构允许设计人员定义一个或多个配置文件，每个配置文件指定唤醒间隔、PPM 要求、温度梯度和抖动容差，从而支持在不同应用状态（例如广播和有源连接）下的校准间隔。可以通过 PowerLPF3_setLfoscCompensationProfile() 在运行时切换多个配置文件，以便动态适应不断变化的操作条件。

9 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [CC2745R10-Q1](#) 产品页面。
2. 蓝牙, [核心规范 6.2](#), 规格。

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