

Application Note

TI 低功耗毫米波雷达传感器中的校准



Kundan Somala, Abhed Misra and Shankar Ram

摘要

TI 的低功耗毫米波雷达传感器已在内部集成到 FECSS 和 APPSS 等子系统中，这些子系统在设计上支持各种校准方法和拓扑。校准例程可确保在工作温度范围和器件之间的工艺变化范围内维持雷达前端的性能。本应用手册介绍了低功耗毫米波雷达传感器支持的各种类型的校准，还详细介绍了这些校准的软件可配置性。

内容

1 本文中使用的首字母缩写词.....	2
2 引言.....	3
3 校准目的.....	4
4 校准的典型阶段.....	5
4.1 工厂校准.....	5
4.2 APLL 校准.....	5
4.3 运行时校准.....	5
5 校准的列表和说明.....	6
5.1 APLL 硬件校准.....	6
5.2 合成器 VCO 校准.....	6
5.3 LO 分配校准.....	6
5.4 功率检测器校准.....	6
5.5 TX 功率校准.....	6
5.6 RX 增益校准.....	6
5.7 RX IFA 校准.....	6
6 软件校准可配置性.....	7
6.1 工厂校准的软件序列.....	7
6.2 运行时（现场）操作的软件序列.....	9
7 建议的校准序列：OLPC 与 CLPC 比较.....	12
7.1 具有 OLPC Tx 功率校准功能的安全应用 - xWRLx432 和 xWRL68xx.....	12
7.2 具有 OLPC Tx 功率校准功能的非安全应用 - xWRLx432 和 xWRL68xx.....	12
7.3 具有 CLPC Tx 功率校准功能的应用 - xWRLx432.....	13
7.4 具有 CLPC Tx 功率校准功能的应用 - xWRL68xx.....	13
8 总结.....	14
9 参考资料.....	14
10 修订历史记录.....	14

插图清单

图 2-1. 毫米波前端架构.....	3
图 3-1. 在不同的温度条件下不执行和执行校准的 Tx 功率变化.....	4
图 6-1. 推荐用于执行工厂校准的 API 流程.....	7
图 6-2. 运行时（现场）操作的建议 API 流程.....	9
图 7-1. 针对带有 TX OLPC 校准功能的安全应用的现场运行时校准序列.....	12
图 7-2. 针对具有 TX OLPC 校准功能的非安全应用的现场运行时校准序列.....	12
图 7-3. 针对带有 TX 校准功能的应用的现场运行时校准序列.....	13
图 7-4. 针对带有 TX 校准功能的应用的现场运行时校准序列.....	13

表格清单

表 4-1. 在不同阶段执行的校准.....5
 表 4-2. 温度区间索引.....5

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 本文档中使用的首字母缩写词

首字母缩写词	说明
APLL	模拟锁相环
APPSS	应用子系统
BIST	内置自检
CLPC	闭环功率控制
FECSS	前端控制器子系统
FMCW	调频连续波
IF	中频
IFA	中频放大器
LNA	低噪声放大器
LO-Dist	本地振荡器分配
LUT	查询表
OLPC	开环功率控制
PA	功率放大器
PD	功率检测器
VCO	压控振荡器

2 引言

TI 的低功耗毫米波雷达传感器包括雷达前端和前端控制器子系统 (FECSS)，子系统负责执行各种校准，以便在温度和工艺变化范围内稳定射频性能。用户应用程序可以完全控制校准的执行。FECSS 还通过确定射频和模拟性能参数，并运行监测器来检测功能故障，从而确保传感器的功能安全。

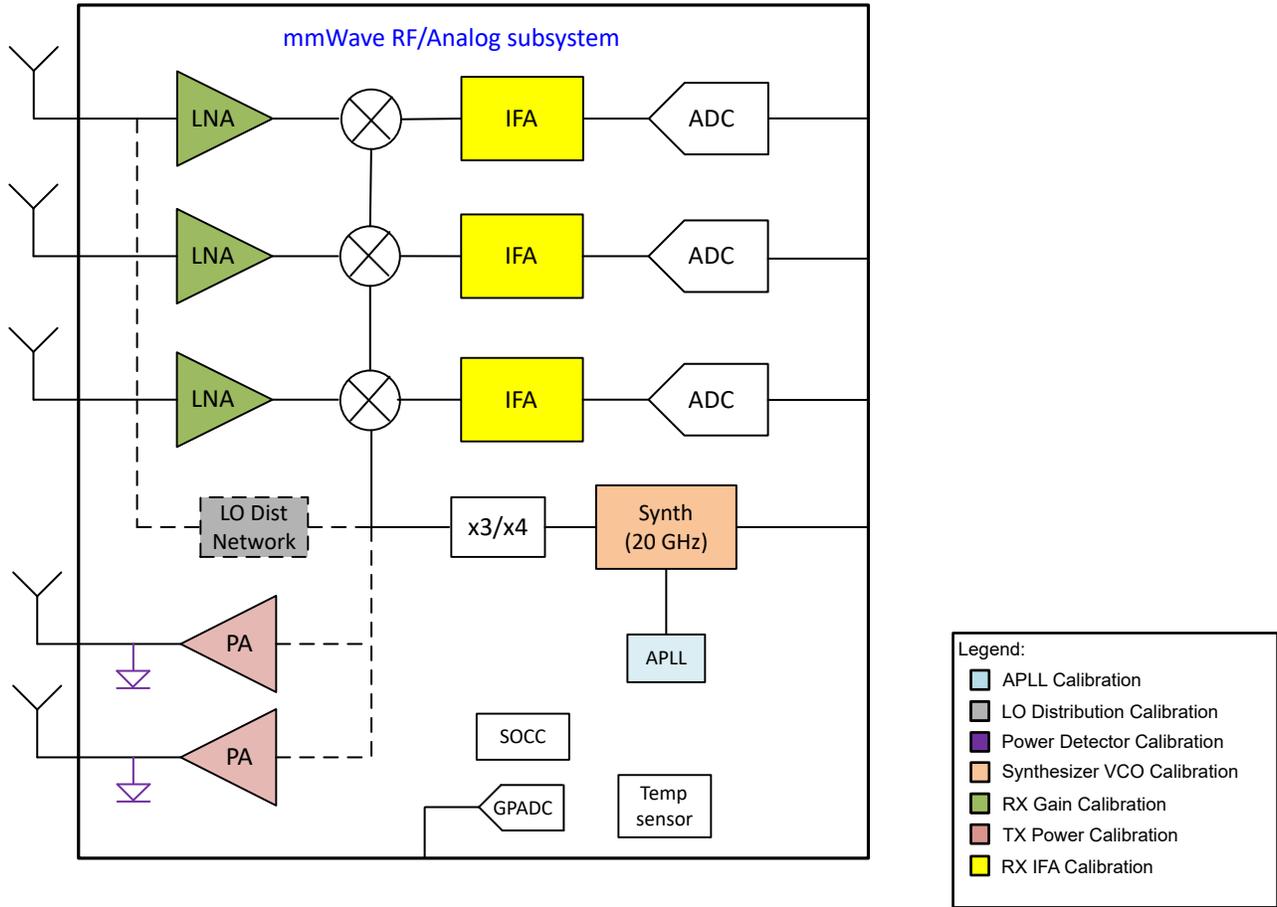


图 2-1. 毫米波前端架构

图 2-1 展示了低功耗毫米波传感器的射频前端架构。在不同的器件之间，LNA、中频放大器、PA、合成器和时钟源 (APLL) 的性能参数会因工艺和温度不同而异。

3 校准目的

图 3-1 中以 TX 功率为例说明了校准目的。由于制造工艺和温度的变化，TX PA 的增益因器件而异。校准的目的是确保根据用户配置保持雷达前端参数，尽管存在工艺和温度变化。为了实现这一点，内部处理器在执行工厂校准时调整毫米波电路配置（以减轻工艺差异的影响）。类似地，在运行时（以减轻温度漂移的影响），每当用户应用程序决定执行运行时校准。图 3-1 展示了如何使用校准来将 TX 输出维持在温度漂移范围内接近配置的设置。此图表用于提供说明，可能无法反映实际的器件性能。即使在整个温度范围内完成这些校准，器件之间也会存在一些增益差异，用户应用中必须考虑这些差异。

图 3-1 演示了在执行和不执行 5dB 的 Tx 回退的 Tx 功率 CLPC 校准的情况下相对于室温归一化的 Tx 输出功率变化。

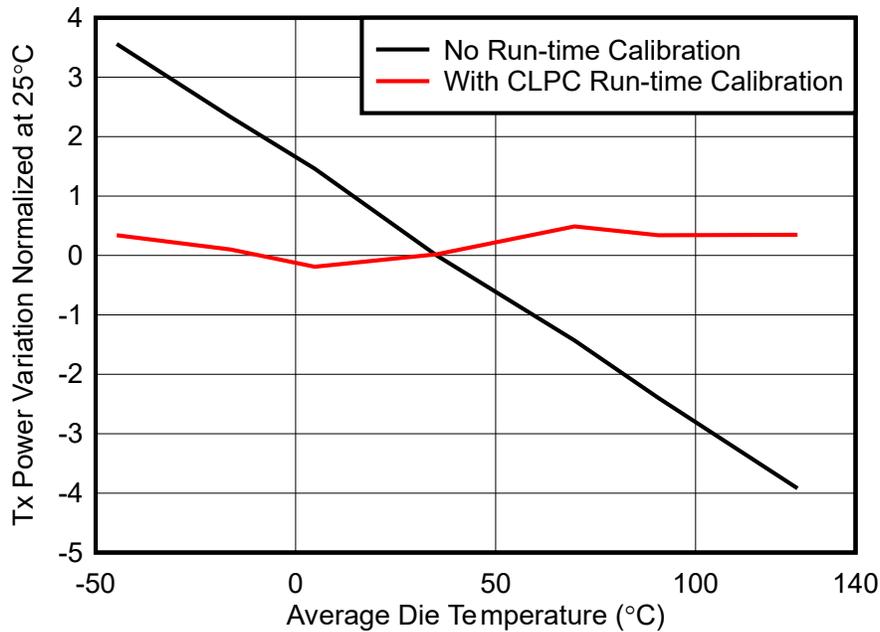


图 3-1. 在不同的温度条件下不执行和执行校准的 Tx 功率变化

4 校准的典型阶段

TI 的低功耗毫米波雷达传感器支持多种类型的校准（详见节 5），这些校准可在下文表 4-1 中所列的各个阶段执行。

表 4-1. 在不同阶段执行的校准

校准	工厂 (补偿工艺差异)	运行时 (在现场针对温度变化进行校准)
APLL 硬件校准	✓	✓ (冷启动时进行一次性校准)
合成器 VCO 校准	✓	✓
LO 分配校准	✓	✓
功率检测器校准	✓	✓
Tx 功率校准	✓	✓
Rx 增益校准	✓	✓
Rx IFA 校准	✓(xWRL68xx)、✗(xWRLx432)	✗

4.1 工厂校准

执行工厂校准以补偿制造工艺差异造成的影响。建议在用户工厂的受控环境（无射频干扰环境）中执行工厂校准。这些校准通常在 10°C 到 60°C（最好是 25°C）的结温之间执行。执行出厂校准后，将为三个温度区间（表 4-2）生成校准代码。用户应用程序可以将校准结果存储在非易失性存储器中并在冷启动时恢复校准结果。如果最终用户系统无法存储工厂校准结果，则需要在每次冷启动时运行校准。节 6.1 中的图 6-1 讨论了用户应用程序执行工厂校准的各个阶段和步骤。

备注

在 xWRL1432 和 xWRL6432 中，不需要 RX IFA 校准，因为 IFA 级校准已在 TI 的工厂中完成且校准数据是有效的。

4.2 APLL 校准

APLL（或清理 PLL）校准必须由用户应用程序在每次冷启动时执行。热启动不需要进行 APLL 校准，因为之前的校准在整个工作温度范围内都保持良好。

备注

“冷启动”是指完整下电上电（从电源关闭到电源开启）或硬件复位（切换 nReset 引脚）。“热启动”是指深度睡眠退出或软件重置或电源无中断。

4.3 运行时校准

执行运行时校准以减少由温度变化引起的前端性能变化。这些校准需要在每次冷启动时执行，并且取决于温度变化和相应的温度区间索引。用户应用程序可以决定是否启用运行时校准。有关在运行期间根据温度变化执行校准的决策标准，请参阅节 7。节 6.2 讨论了用户应用程序执行运行时校准的各个阶段和步骤。

表 4-2. 温度区间索引

温度区间	器件结温 (J_T)
低	$-40^{\circ}\text{C} \leq T < 0^{\circ}\text{C}$
中	$0^{\circ}\text{C} \leq T < 85^{\circ}\text{C}$
高	$85^{\circ}\text{C} \leq T < 125^{\circ}\text{C}$

5 校准的列表和说明

TI 的低功耗毫米波雷达器件支持以下校准，后文会详细介绍。这些校准可以在工厂中执行，也可以在运行时（现场操作）执行。

5.1 APLL 硬件校准

TI 的低功耗毫米波雷达有一个 APLL（或清理 PLL），它是一个闭环 PLL，将参考时钟作为输入并生成处理器、数字块（外设、GPIO、DMA、总线矩阵）、ADC、DAC 所需的多个时钟以及 FMCW 合成器所需的高频基准时钟。执行 APLL 校准是为了保持系统时钟稳定地锁定在恒定频率，不论工艺和温度如何。

5.2 合成器 VCO 校准

合成器 VCO 生成射频信号，然后馈送至乘法器，以便分别在 60GHz 和 77GHz 低功耗毫米波传感器系列中获得 57GHz 至 64GHz 和 76GHz 至 81GHz 范围内的所需斜坡频率。执行合成器 VCO 校准是为了保持斜坡频率得以锁定，而不受工艺变化和温度的影响。

5.3 LO 分配校准

一组缓冲器用于将高频射频信号分配到 Rx 和 Tx 部分。使用基于温度的查询表来保持和优化缓冲器的输出信号摆幅。

5.4 功率检测器校准

功率检测器旨在为整个雷达芯片提供绝对电压和电源基准。功率检测器可监控射频节点上的电压应力，并量化 TX 输出和射频输入端的输出功率。这样可实现准确的射频 BIST 和阻抗测量（对于安全监控器至关重要）。为了使这些测量准确，功率检测器必须针对温度变化进行校准。针对所有临界功率检测器执行此校准，尤其是用于 TX 功率校准的检测器。

对于符合功能安全标准的器件，对模拟和射频电路运行进行监控至关重要。安全监视器依靠功率检测器，因此执行功率检测器校准非常重要。

5.5 TX 功率校准

执行 TX 功率校准以确保器件在用户配置的发送功率下进行发送。TX 功率校准可以在运行时（现场）操作期间，在开环功率控制 (OLPC) 或闭环功率控制 (CLPC) 模式下执行。

在工厂校准阶段，为配置的相应回退的三个温度区间（表 4-2）生成 Tx PA 代码（2 级）。在现场，用户应用程序需要从非易失性存储器恢复出厂校准数据。

在运行时校准期间，在 OLPC 模式下，根据温度区间索引（低、中、高）设置 TX PA 代码。在 CLPC 模式下，使用峰值检测器测量实际 TX 功率，并改进 TX 级代码，以实现所需的 TX 功率精度。

5.6 RX 增益校准

RX 链包含两个放大器，即 LNA 和 IFA。RX 链增益是来自这两个放大器级的增益之和。必须校准 RX 增益，以确保在处理差异和温度变化时保持整体 RX 增益。执行 RX 工厂校准的方法如下：通过片上环回路径把来自合成器的已知幅度的信号电平馈送到 Rx 链。通过处理 ADC 数据幅度来分析 Rx 增益，并相应地针对三个温度区间导出期望增益的 Rx 链增益码。根据相应的温度区间索引，在运行时校准期间应用这些增益代码。

5.7 RX IFA 校准

RX IFA 校准需要在出厂前与所有其他出厂校准一起进行，以校准 IFA 阶段中的 HPF 和 LPF。

6 软件校准可配置性

mmWaveLink API 提供前端控制器子系统 (FECSS) 射频前端的 API 接口。mmWaveLink API 在内部调用 FECSSLib 驱动程序以执行 API 功能并将状态返回给应用。本节通过列出使用的必要 API 以及每个 API 和建议的 API 序列的功能，介绍了校准的软件可配置性部分。

6.1 工厂校准的软件序列

图 6-1 介绍了执行工厂校准和存储校准数据时需要遵循的建议 mmWaveLink API 序列。可将校准数据存储在非易失性存储器中并在现场恢复。

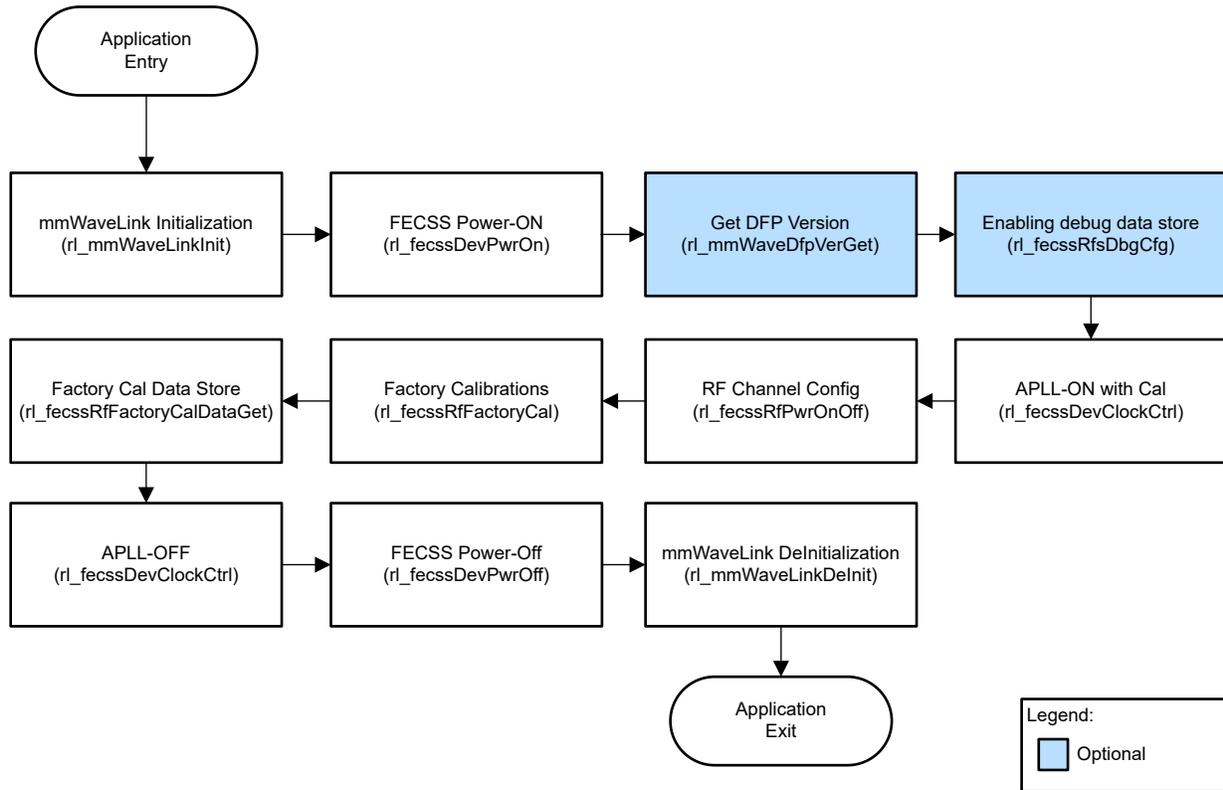


图 6-1. 推荐用于执行工厂校准的 API 流程

6.1.1 mmWaveLink 初始化

`rl_mmWaveLinkInit` API 会初始化 mmWaveLink 和 FECSSLib 的所有接口回调函数和客户端上下文句柄。

6.1.2 FECSS 导通

可以使用 `rl_fecssDevPwrOn` API 来导通控制、功耗模式和时钟配置设置。在发出任何其他功能 API 之前，应用程序可以使用此 API 导通 FECSS。必须在冷启动模式下执行 FECSS 导通，并且需要选择快速时钟源。

6.1.3 APLL 导通和硬件校准

`rl_fecssDevClockCtrl` API 可配置器件时钟源选择设置。应用程序可以使用此 API 根据器件的电源状态切换 FECSS 时钟源。此 API 的配置结构有一个子字段 `c_ApllClkCtrl`，可以使用它来导通 APLL 并执行 APLL 校准。

备注

在执行任何其他工厂校准之前，必须完成 APLL 校准。

6.1.4 RF 通道配置

可以使用 `rl_fecssRfPwrOnOff` API 来配置射频通道和其他各种控制设置。应用程序必须在配置射频设置的其他任何功能 API 之前发出此 API。必须启用在运行时（现场）中使用的所有 Tx 和 Rx 通道才能执行校准。

6.1.5 触发工厂校准

`rl_fecssRfFactoryCal` API 可配置并触发射频工厂校准。应用程序必须使用此 API 来执行一次性射频配置相关校准，并将结果存储在非易失性存储器中。API 的配置结构允许用户配置所需的前端参数，如 Rx 增益、Tx 功率、起始频率、线性调频脉冲斜率等。

6.1.6 工厂校准数据存储

可以使用 `rl_fecssRfFactoryCalDataGet` API 将工厂校准数据存储到闪存或外部存储器。稍后可以使用 `rl_fecssRfFactoryCalDataSet` API 恢复校准数据。可以使用此 API 来存储最新的校准数据，并避免在运行时（现场）操作期间重新运行工厂校准。

6.1.7 APLL 关断

`rl_fecssDevClockCtrl` API 配置器件时钟源选择设置。成功存储出厂校准数据后，可使用此 API 来关断 APLL。

6.1.8 FECSS 关断

可以使用 `rl_fecssDevPwrOff` API 来关断 FECSS。FECSS 关断必须在不保留存储器中信息的情况下执行。

6.1.9 mmWaveLink 反初始化

`rl_mmWaveLinkInit` API 会将 mmWaveLink 和 FECSSLib 的所有接口回调函数和客户端上下文句柄反初始化。

6.2 运行时 (现场) 操作的软件序列

执行运行时校准来补偿温度等运行时变化。图 6-2 介绍了用于现场操作的建议 mmWaveLink API 序列。

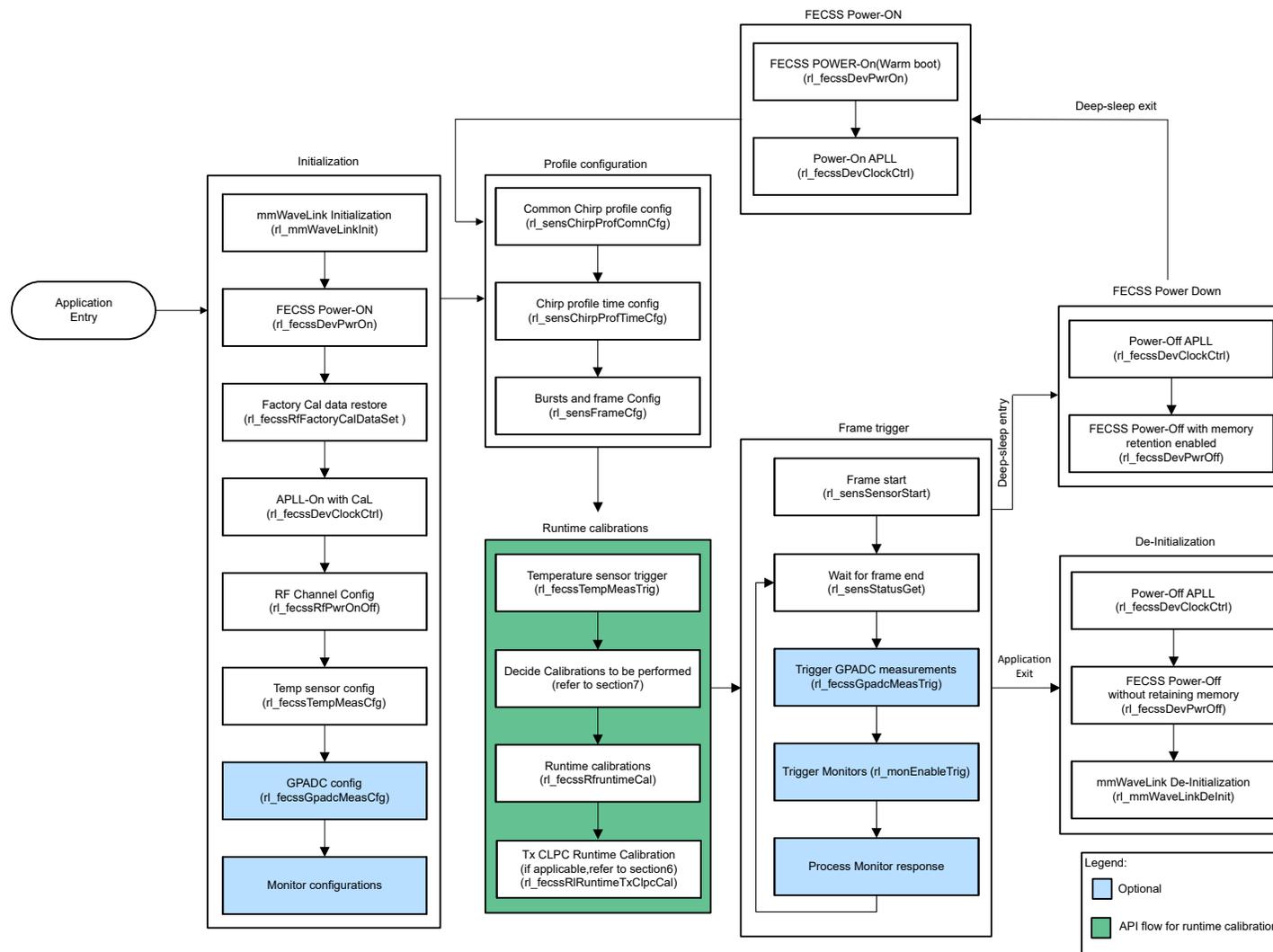


图 6-2. 运行时 (现场) 操作的建议 API 流程

6.2.1 初始化

6.2.1.1 mmWaveLink 初始化

`rl_mmWaveLinkInit` API 会初始化 mmWaveLink 和 FECSSLib 的所有接口回调函数和客户端上下文句柄。

6.2.1.2 FECSS 导通

可以使用 `rl_fecssDevPwrOn` API 来导通控制、功耗模式和时钟配置设置。在发出任何其他功能 API 之前，应用程序可以使用此 API 导通 FECSS。必须在冷启动模式下执行 FECSS 导通，并且需要选择快速时钟源。

6.2.1.3 APLL 导通和硬件校准

`RL_fecssDevClockCtrl` API 可配置器件时钟源选择设置。应用程序可以使用此 API 根据器件的电源状态切换 FECSS 时钟源。此 API 的配置结构有一个子字段 `c_ApllClkCtrl`，可以使用它来导通 APLL 并执行 APLL 校准。

备注

APLL 校准只能在每次冷启动时执行。

6.2.1.4 工厂校准数据恢复

可以使用 `rl_fecssRfFactoryCalDataSet` API 来恢复/更新之前使用 `rl_fecssRfFactoryCalDataGet` API 存储的工厂校准数据。此 API 仅恢复校准数据，不会将数据应用于硬件寄存器。

要将校准数据应用于各个寄存器，必须在恢复校准数据后发出 `rl_fecssRfRuntimeCal` API。

6.2.1.5 温度传感器配置

可以使用 `rl_fecssTempMeasCfg` API 来配置片上温度传感器测量。此 API 控制温度传感器以启用或禁用它们。

6.2.2 配置文件配置

6.2.2.1 配置文件通用配置

可以使用 `rl_sensChirpProfComnCfg` API 来配置一帧中所有线性调频脉冲的通用 FMCW 雷达线性调频脉冲配置文件参数。

6.2.2.2 配置文件时间配置

可以使用 `rl_sensChirpProfTimeCfg` API 来配置 FMCW 雷达线性调频脉冲曲线时序参数，如空闲时间、ADC 开始时间、Tx 开始时间、射频斜率、开始频率等。

6.2.2.3 帧配置

可以使用 `rl_sensFrameCfg` API 来对帧中的线性调频脉冲进行分组。借助此 API，应用程序可以配置多个参数，例如线性调频脉冲数、突发数、帧数以及与线性调频脉冲、突发和帧相关的时序。

6.2.3 运行时间校准

6.2.3.1 温度传感器触发器

可以使用 `rl_fecssTempMeasTrig` API 来测量片上温度。TI 建议在器件退出深度睡眠模式时且在触发功能帧之前发出此 API。

6.2.3.2 运行时校准配置和触发器

可以使用 `rl_fecssRfRuntimeCal` 来配置和触发运行时校准。此 API 的配置结构允许您选择需要根据温度区间和温度变化执行的必要校准（请参阅节 7）。应用程序可以使用 `rl_fecssTempMeasTrig` API 读取器件温度并向此运行时校准 API 的配置结构提供区间索引。触发此 API 后，以响应的形式获取运行时校准状态。

有关完成每次校准所需的持续时间，请参阅接口控制文档中的“校准执行时间”小节。

6.2.3.3 Tx CLPC 校准

当触发 `rl_fecssRfRuntimeCal` API 以执行运行时校准时，FECSS 在 OLPC 模式下执行 Tx 功率校准。对于大于 3dB 的回退，TI 建议使用 `rl_fecssRfRuntimeTxClpcCal` 在 CLPC 模式下执行校准，以提高 Tx 输出功率的精度。

可以在现场操作期间使用此 `rl_fecssRfRuntimeTxClpcCal` API 来校准 Tx 通道。API 使用 CLPC 算法校准 Tx 通道，并立即将结果应用于硬件寄存器。

6.2.4 帧触发器

6.2.4.1 传感器启动

`rl_sensSensorStart` API 控制帧触发逻辑并触发帧。

6.2.4.2 传感器状态

可以使用 `rl_sensStatusGet` API 来读取当前传感器状态参数，例如线性调频脉冲、突发和帧计数。

6.2.4.3 传感器停止

获取传感器状态后，可以使用 `rl_sensSensorStop` API 向帧计时器和线性调频脉冲计时器模块发送停止信号，从而停止器件传输。

6.2.5 进入和退出深度睡眠

传输所有功能线性调频脉冲后，可以使用 `rl_fecssDevClockCtrl` API 在进入深度睡眠期间关断 APLL。可以使用 `rl_fecssDevPwrOff` API 来关断 FECSS。关断 FECSS 后必须保留存储器中的信息。

成功进入深度睡眠模式之后以及退出深度睡眠模式时，可以使用 `rl_fecssDevPwrOn` 导通 FECSS。FECSS 上电必须在热启动模式下完成。`rl_fecssDevClockCtrl` API 的配置结构具有一个子字段 `c_ApllClkCtrl`，其可用于导通 APLL。在热启动期间或退出深度睡眠后，不需要进行 APLL 硬件校准。

6.2.6 反初始化

在传输所有功能帧后退出应用程序时，可以使用 `rl_fecssDevClockCtrl` API 来关断 APLL。可以使用 `rl_fecssDevPwrOff` API 来关断 FECSS。FECSS 关断必须在不保留存储器中信息的情况下执行。

`rl_mmWaveLinkInit` API 会将 `mmWaveLink` 和 `FECSSLib` 的所有接口回调函数和客户端上下文句柄反初始化。

7 建议的校准序列：OLPC 与 CLPC 比较

本节介绍了 TI 建议的各种应用校准序列，以便在运行时（现场）操作期间执行校准。当器件从冷启动中唤醒时或在退出深度睡眠后，应用程序必须检查温度并将温度作为形参（温度区间索引）传递到 `rl_fecssRfRuntimeCal` 以触发运行时校准。

7.1 具有 OLPC Tx 功率校准功能的安全应用 - xWRLx432 和 xWRL68xx

应用程序可以按照建议的流程图图 7-1 来决定需要执行的校准。对于使用 Tx OLPC 校准的安全应用，PD 运行时校准是强制性的。Tx 功率、Rx 增益和 LO-Dist 校准属于 LUT 更新。因此，这些校准（LUT 更新）的执行时间非常短，在几 μs 的数量级上。

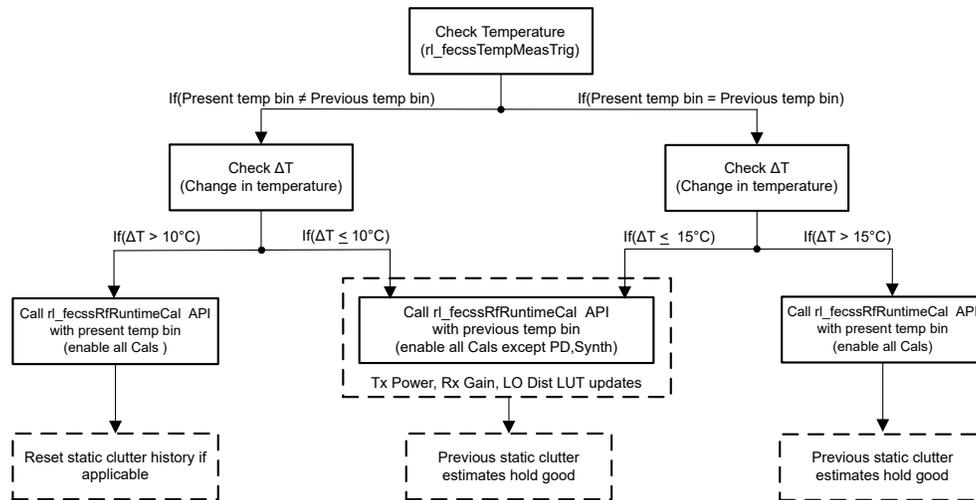


图 7-1. 针对带有 TX OLPC 校准功能的安全应用的现场运行时校准序列

7.2 具有 OLPC Tx 功率校准功能的非安全应用 - xWRLx432 和 xWRL68xx

应用程序可以按照建议的流程图图 7-2 来决定需要执行的校准。Tx 功率、Rx 增益和 LO-Dist 校准属于 LUT 更新。因此，这些校准（LUT 更新）的执行时间非常短，在几 μs 的数量级上。

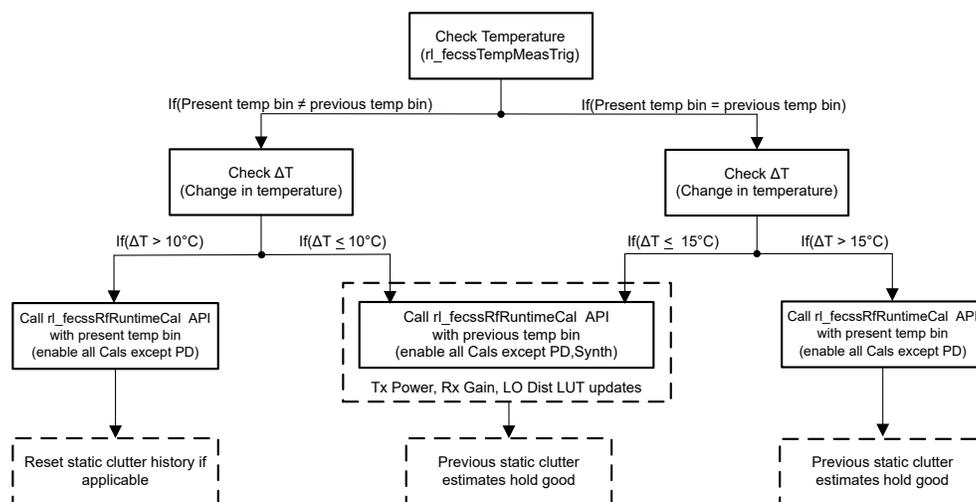


图 7-2. 针对具有 TX OLPC 校准功能的非安全应用的现场运行时校准序列

7.3 具有 CLPC Tx 功率校准功能的应用 - xWRLx432

触发片上温度测量后，应用程序可以按照建议的流程图图 7-3 决定需要执行的校准。首次执行 Tx CLPC 校准后，应用程序必须保存 Tx 偏置代码并在覆盖模式下使用它们。覆盖模式可用于跳过校准并应用先前由应用程序保存的结果。Rx 增益和 LO-Dist 校准属于 LUT 更新。因此，这些校准（LUT 更新）的执行时间非常短，在几 μs 的数量级上。

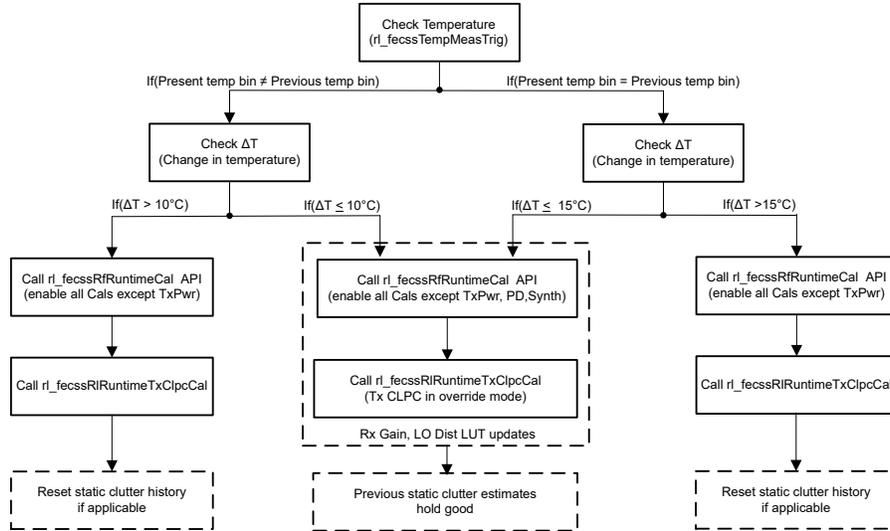


图 7-3. 针对带有 TX 校准功能的应用的现场运行时校准序列

7.4 具有 CLPC Tx 功率校准功能的应用 - xWRL68xx

触发片上温度测量后，应用程序可以按照以下流程图图 7-4 决定需要执行的校准。Rx 增益和 LO-Dist 校准属于 LUT 更新。因此，这些校准（LUT 更新）的执行时间非常短，在几 μs 的数量级上。

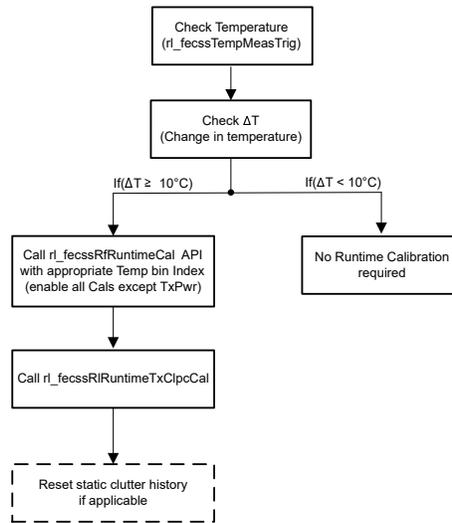


图 7-4. 针对带有 TX 校准功能的应用的现场运行时校准序列

备注

在以上流程图中， ΔT 是相对于先前校准温度的绝对温度变化。

8 总结

本应用手册详细介绍了低功耗毫米波雷达传感器支持的不同校准类型，并提供了根据应用进行特定校准的建议。用户可以遵循本应用手册中介绍的流程，了解何时执行校准以及需要在终端设备系统中执行哪些校准。

9 参考资料

1. 接口控制文档：<https://www.ti.com.cn/tool/cn/MMWAVE-L-SDK>
2. 请参阅工厂和运行时校准的 SDK 示例代码（可从 [ti.com](https://www.ti.com) 下载，网址如下：<https://www.ti.com.cn/tool/cn/MMWAVE-L-SDK>）。

10 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision A (September 2024) to Revision B (February 2025)	Page
• 更新了毫米波前端架构图中的 Rx IFA 校准.....	3
• 更新了 xWRL68xx 在不同阶段执行的校准表中的 Rx IFA 校准.....	5
• 添加了 Rx IFA 校准和 xWRL68xx 说明.....	6
• 添加了 <i>RX IFA 校准</i> 一节.....	6
• 为 xWRL68xx 添加了建议的 CLPC 序列.....	12
• 添加了具有 CLPC Tx 功率校准功能的应用 - xWRL68xx 一节.....	13

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司