



## 摘要

CC3130、CC3135、CC3230x 和 CC3235x 器件是 SimpleLink™ 微控制器 (MCU) 平台的一部分，该平台由 Wi-Fi®、低功耗 Bluetooth®、Sub-1GHz 和主机 MCU 构成。它们均共用一个简单易用的通用开发环境，其中包含单核软件开发套件 (SDK) 和丰富的工具集。一次性集成 SimpleLink™ 平台后，用户可将产品系列器件的任何组合添加至设计中。SimpleLink™ 平台的最终目标是确保在设计要求变更时完全实现代码重用。如需了解更多相关信息，请访问 [www.ti.com.cn/simplelink/cn](http://www.ti.com.cn/simplelink/cn)。

本应用报告介绍了对嵌入式低功耗 Wi-Fi® 器件 (例如 Texas Instruments™ 提供的 SimpleLink Wi-Fi Internet-on-a-chip™ 解决方案) 进行电源管理和延长电池续航时间的最佳实践。

## 内容

<b>1 引言</b>	<b>3</b>
1.1 术语	3
1.2 低功耗互联网系统注意事项	3
1.3 网络子系统快速概览	5
1.4 CC313x 器件电源模式	6
1.5 CC323x 器件电源模式	6
1.6 网络子系统模式切换	8
1.7 电源策略	9
1.8 CC313x 和 CC323x 器件的低功耗设计	10
1.9 电池供电系统注意事项	15
1.10 示例测试用例	16
<b>2 电源管理指南</b>	<b>19</b>
2.1 CC3135 和 CC3235x 器件先决条件	19
2.2 软件设置	19
2.3 启动应用	25
2.4 功率测量测试设置	25
2.5 测试和结果	41
<b>3 修订历史记录</b>	<b>50</b>

## 插图清单

图 1-1. CC313x 和 CC323x 器件方框图	5
图 1-2. 状态间转换	8
图 1-3. 间歇性连接测试用例	16
图 1-4. 始终保持连接的测试用例	17
图 2-1. 编辑 common.h 文件	20
图 2-2. 运行命令	23
图 2-3. 串行输出：功率测量	24
图 2-4. 电源管理用例选择流程图	25
图 2-5. 直流电源分析仪连接到 CC3135 器件	26
图 2-6. 直流电源分析仪连接到 CC3235x LaunchPad™	27
图 2-7. 直流电源分析仪测试设置	28
图 2-8. 采用直流电源分析仪测量的平均电流	29
图 2-9. 电流测量工具连接到 CC3135 器件	30
图 2-10. 电流测量工具连接到 CC3235 SF 器件	31
图 2-11. IMETER-BOOST 测试设置	32

图 2-12. 使用 IMETER-BOOST 器件测量的平均电流.....	33
图 2-13. 具有电流探针测试设置的示波器.....	35
图 2-14. 使用电流探针测量电流.....	36
图 2-15. XDS110 探针和 ETHDR 系统.....	37
图 2-16. EnergyTrace™ 设置.....	37
图 2-17. XDS110 ETHDR 连接到 CC3135 器件.....	38
图 2-18. 分线板连接.....	38
图 2-19. XDS110 ETHDR 连接到 CC3235 SF 器件.....	39
图 2-20. XDS110 辅助接口.....	39
图 2-21. EnergyTrace™ 和 CCS 工具栏.....	40
图 2-22. XDS110 系统的 CC3135 器件测试设置.....	40
图 2-23. XDS110 系统的 CC3235x 器件测试设置.....	40
图 2-24. 采用 EnergyTrace™ 测量的平均电流.....	41
图 2-25. 处于休眠模式的 CC3135 器件.....	42
图 2-26. 处于休眠模式的 CC3235 SF 器件.....	42
图 2-27. 处于 LPDS 模式的 CC3135 器件.....	43
图 2-28. 处于 LPDS 模式的 CC3235 SF 器件.....	43
图 2-29. 处于收发器模式的 CC3135 器件.....	44
图 2-30. 处于收发器模式的 CC3235 SF 器件.....	44
图 2-31. 收发器模式特写.....	45
图 2-32. 处于间歇性连接模式的 CC3135 器件.....	46
图 2-33. 处于间歇性连接模式的 CC3235 SF 器件.....	46
图 2-34. 间歇性连接模式特写.....	47
图 2-35. 处于始终保持连接模式 (UDP) 的 CC3135 器件.....	48
图 2-36. 处于始终保持连接模式 (UDP) 的 CC3235 SF 器件.....	48
图 2-37. 始终保持连接特写.....	49

## 表格清单

表 1-1. CC313x 器件电源模式.....	6
表 1-2. CC323x 器件电源模式.....	6
表 1-3. 始终保持连接电源策略.....	9
表 1-4. 每个睡眠间隔的预期平均电流消耗.....	12
表 1-5. Wi-Fi® 连接电荷.....	13
表 1-6. TCP 和 SSL/TLS 连接电荷.....	13
表 1-7. 突发模式下 TX/RX 的平均电流.....	14
表 1-8. 电池容量.....	15

## 商标

SimpleLink™, Texas Instruments™, Internet-on-a chip™, MSP432™, BoosterPack™, LaunchPad™, Code Composer Studio™, and EnergyTrace™ are trademarks of Texas Instruments.

Wi-Fi® is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.

Bluetooth® is a registered trademark of Bluetooth SIG.

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

Energizer® is a registered trademark of Energizer Brands, LLC.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

电源管理和延长电池续航时间是嵌入式低功耗 Wi-Fi 器件（例如 SimpleLink Wi-Fi Internet-on-a chip™ 解决方案）的主要关注领域。有效处理电源工作方式是任何电池供电器件的基础。对于需要遵守发射功率、信标间隔和数据速率等某些要求的通用无线器件，这个问题尤其具有挑战性，嵌入式 Wi-Fi 器件就是这种情况。本应用报告介绍了 CC3130、CC3135、CC3230x 和 CC3235x Wi-Fi internet-on-a chip™ 网络子系统电源管理 (PM) 功能，描述了系统行为的基础知识，并为开发人员设计最优系统提供了基本工具箱。

CC3130/CC3135 器件仅包含网络子系统并由外部 MCU 主机驱动。CC3230/CC3235x 包含相同的网络子系统以及内部 MCU 应用处理器。本文档面向这两种器件介绍了 Wi-Fi 子系统的电源管理。

### 1.1 术语

本文档引用以下几个与电源相关的测量单位：

- 电流 [安培] - 指 3.3V 时的平均电流，除非另有说明。
- 电荷 [库仑] - [1C = 1 安培 × 1 秒]，指 3.3V，除非另有规定。讨论有限过程（例如连接）时会用到电荷。电池容量以 mA × 小时表示。
- 能量 [焦耳] - [1 焦耳 = 1 库仑 × 1 伏特]

### 1.2 低功耗互联网系统注意事项

在专门设计基于 802.11 协议的低功耗网络系统时，设计人员应考虑几个关键方面。

#### 1.2.1 电源

线路供电或电池供电器件：与电池供电系统相比，线路供电系统通常对功耗不太敏感。电池供电系统必须考虑电池容量，以及针对寿命目标的平均使用曲线。但是，在某些情况下，电源考虑因素适用于线路供电系统，例如当能量预算与每个端点相关时。这在托管部署场景（例如企业环境）中更为常见。

#### 1.2.2 流量属性

- 流量模型 - 要传输或接收的有效载荷以及此活动的频率。例如，一个传感器通常可以每隔几分钟提供 100B；或者，摄像机可以流式传输平均 4Mbps 的吞吐量，每 ≈ 3ms 传输 1500B。
- 协议属性 - 这包括传输协议 (UDP/TCP)、在顶层运行的应用程序协议以及相关的开销。
- 连接类型 - 链路层和传输层的安全协议，如果有的话。
- 系统延迟 - 响应传入流量的预期延迟时间。此参数在确定网络器件的睡眠策略时占主导地位。

#### 1.2.3 网络拓扑

在进行低功耗网络系统设计时，应回答以下问题。这些注意事项适用于系统将解决的特定问题，优先于网络器件的任何特定注意事项。

- 系统应作为服务器还是客户端工作？

作为服务器，它应该始终迅速响应；作为客户端，它可以按自己的时序启动通信事件，并在定义的时间段内关闭。

- 系统是否总是需要连接至接入点？

保持与接入点 (AP) 连接使系统能够以低延迟接收消息。但是，维持连接通常会消耗大量电能。

- 系统是否总是需要连接至服务器？

通过定期存活检测消息维持 TCP 或 SSL 连接会消耗大量能量，每次启动 TCP/SSL 连接的替代方案会消耗开销能量来实现连接设置。

- 系统是与远程服务器还是与本地服务器进行通信？

如果是本地系统（客户端或服务器），请考虑所有相关的后台进程。例如，mDNS 等服务发现协议因其定义的性质，往往会产生过多的电流消耗。

- IP 获取方法是静态 IP 还是 DHCP？

DHCP 过程可能会消耗大量功率。TI 确实支持 DHCP 续订，这会显著降低功耗。静态 IP 也可以用来进一步降低电流消耗。

- IP 寻址方式是 IPv6 还是 IPv4？

IPv6 方式可能会消耗更多的能量；对于对功耗敏感且 IPv6 并非强制性的应用，TI 建议禁用 IPv6 接口。

- 是否需要配置过程？

AP 配置是用于在器件和 AP 之间实现初始连接的方法。一种常用的配置方法是从移动设备访问用作 AP 的器件，或使用 PC 访问用作 AP 的器件。虽然不经常进行配置，但此过程所消耗的功率可能远高于器件正常运行所消耗的功率。

- 什么是往返时间 (RTT)，即终端设备与其对等设备之间的典型延迟？

此延迟会影响系统的最大吞吐量和每 KB 所需的功耗。

例如，考虑达成一个传感器系统，它既与服务器通信以实现远程在线功能（配置、观察和警报指示），又可以在家时直接从智能手机或 PC 进行本地访问。第一个要求可以由长时间（几分钟）关闭、定期检查服务器或在检测到环境变化时访问服务器的系统来满足。从电源角度来看，本地可访问性这第二个要求更具挑战性。系统必须始终响应迅速，因此必须一直与 AP 相连。

#### 1.2.4 解决方案特定参数

本节介绍了构成每个用例构建块的网络系统的一些关键因素和参数，并定义了总功耗。

- 最大吞吐量 - 该因素对应于系统接收或传输固定数据量所花费的时间，从而得出每 KB 所需的功耗。此数值应反映系统中的最小公分母。例如，假设主机接口可提供 12Mbps，而 Wi-Fi® 连接可提供 60Mbps。对于 UDP TX，预计将接近 12Mbps。对于具有非常长 RTT 的 TCP 连接，最大 TP 可能会降低至 2Mbps 或更低。
- 初始化和能量 - 对于涉及频繁的短初始化周期和周期间关闭时间较长的周期性用例，初始化期间消耗的能量可能是主要贡献因素。
- 静态电流消耗 - 任何系统用例都由多个构建块构成，例如 RX 电流、TX 电流、睡眠电流等。
- 动态能耗 - 低功耗系统优化，以及系统在执行特定活动时相对于功耗的效率。例如，连接 AP、发起 TCP 连接、保持与 AP 的连接，以及发送或接收固定数量的数据。

### 1.3 网络子系统快速概览

CC3x3x 器件属于无线网络器件系列。从硬件和软件的角度来看，这些器件都是高度集成的解决方案，包括用于软件卸载的内部 PA 和直流/直流电路硬件加速器。该器件支持业界通用的 BSD 套接字 API、内部 SSL/TLS 安全协议、驱动程序超低占用要求和高级低功耗模式。

Simplelink™ Internet-on-a-Chip™ 器件的两个主要变体是：

- CC313x - 由外部主机 MCU 控制的完整网络器件。
- CC323x - 包含网络子系统，以及 Arm® Cortex®-M4 MCU (CM4) 和外设的完整系统。

在 CC323x 器件中，用户程序控制 CM4 子系统的电源模式，而在网络子系统中，电源管理是自主处理的。一旦启用，子系统总是寻求消耗尽可能少的功率。本文档重点介绍了网络子系统，旨在让负责 CC323x 器件中 CM4 或 CC313x 器件中外部主机 MCU 的程序员掌握构建理想高效系统所需的知识。

#### 1.3.1 CC313x 和 CC323x 器件主要模块

网络子系统包含两个主要模块 (图 1-1)：

- Wi-Fi® 模块
- NWP (网络处理器) 模块

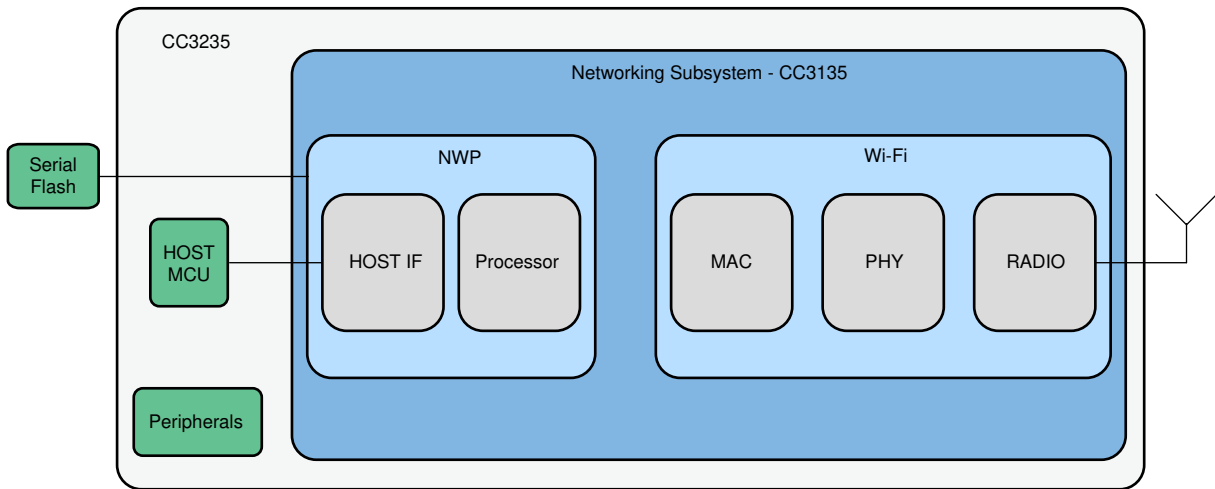


图 1-1. CC313x 和 CC323x 器件方框图

## 1.4 CC313x 器件电源模式

CC313x 器件仅包含网络子系统，并自包含电源优化功能。CC313x 器件有四种电源模式：

- **关断** - 最低功耗模式。不保留存储器，RTC 未运行。需要冷启动初始化，包括缓慢的时钟稳定。器件已断电。
- **休眠** - 保持 RTC 时钟和 RTC 计数器运行的最低功耗模式。需要冷启动初始化。除休眠逻辑外，器件已关闭。
- **低功耗深度睡眠 (LPDS)** - 电压电平降低，快速时钟 (40MHz 晶体和内部 PLL) 关闭。存储器处于保留模式。如果 Wi-Fi® 和 NWP 模块没有立即活动，器件将保持在低功耗深度睡眠模式。两个模块分别管理其睡眠和唤醒事件，当两者都处于低功耗模式时，整个网络子系统处于 LPDS 模式。
- **运行** - 器件处于完全运行状态，电压电平为工作值，所有时钟均运行。此模式可包含各种各样的中间功率状态，这些状态具有瞬态性质并且不受系统明确控制。

表 1-1 列出了 CC313x 器件电源模式和模块状态。

表 1-1. CC313x 器件电源模式

网络子系统电源模式	CC313x 器件电源模式	CC313x 器件模块状态	
		NWP	Wi-Fi
关断	关断	关闭	关闭
禁用 (关闭)	休眠	关闭	关闭
LPDS	LPDS	保留	保留
运行 <sup>(1)</sup>	运行	运行	保留
		保留	运行
		运行	运行

(1) 在运行模式下，NWP 和 Wi-Fi® 可分别处于运行模式或保留模式。如果二者都处于保留模式，那么系统处于 LPDS 模式。

## 1.5 CC323x 器件电源模式

若要全面了解 CC323x 器件电源模式，请考虑以下三个方面：

- MCU 子系统电源模式 - 由 MCU 应用控制。
- 网络子系统电源模式 - 启用时自动保持电源模式。
- 设备级 (芯片) 电源模式 - 源自 MCU 子系统和网络子系统电源模式的组合。

表 1-2 根据 MCU 电源模式和网络子系统电源模式列出了 CC323x 器件电源模式。

表 1-2. CC323x 器件电源模式

MCU 电源模式	网络子系统电源模式		
	禁用	LPDS	运行
休眠	休眠	不适用	不适用
LPDS	LPDS	LPDS	运行
睡眠	运行	运行	运行
运行	运行	运行	运行

### 1.5.1 器件电源模式

器件可以有四种模式：

- **关断** - 最低功耗模式。不保留存储器，RTC 未运行。需要冷启动初始化，包括缓慢的时钟稳定。器件已断电。
- **休眠** - 保持 RTC 时钟和 RTC 计数器运行的最低功耗模式。需要冷启动初始化。除休眠逻辑外，器件已关闭。
- **低功耗深度睡眠 (LPDS)** - 电压电平降低，快速时钟 (40MHz 晶体和内部 PLL) 关闭。存储器处于保留模式。除休眠逻辑和顶层逻辑外，大多数器件逻辑都是电源门控型。唤醒时，MCU 从复位向量开始。
- **运行** - 器件处于完全运行状态，电压电平为工作值，所有时钟均运行。

### 1.5.2 网络子系统电源模式

网络子系统可能处于以下三种模式之一：

- **已禁用** - NWP 已关闭，启用时需要冷启动或热启动，具体取决于电源模式状态 (休眠或关机)。
- **低功耗深度睡眠 (LPDS)** - 如果 Wi-Fi® 和 NWP 模块没有即时活动，网络子系统会处于 LPDS 模式。两个模块分别管理自己的睡眠和唤醒事件，当两者都处于低功耗模式时，整个网络子系统处于 LPDS 模式。
- **运行** - 至少一个模块 (NWP 或 Wi-Fi®) 正在运行。此模式可包含各种各样的中间功率状态，这些状态具有瞬态性质并且不受系统明确控制。

### 1.5.3 MCU 电源模式

MCU 可以处于五种电源模式中的一种，由 MCU 程序员指定：

- **关断** - 最低功耗模式。不保留存储器，RTC 未运行。需要冷启动初始化，包括缓慢的时钟稳定。器件已断电。
- **休眠模式** - 仍保持 RTC 运行以加快唤醒速度的最低功耗模式。
- **低功耗深度睡眠模式 (LPDS)** - 当 MCU 处于此模式时，可能会出现两种情况：
  - 网络子系统被禁用，器件模式为 LPDS。
  - 网络子系统启用，器件模式为 LPDS (如果网络子系统处于 LPDS 模式) 或运行 (如果网络子系统处于运行状态)。
- **睡眠模式** - MCU 时钟在睡眠模式关断并保留整个状态。器件模式处于运行状态。MCU 应用使用 CM4 汇编指令 (例如 WFI 或 WFE) 练习此模式。
- **运行模式** - MCU 正在运行且器件模式处于运行状态。

## 1.6 网络子系统模式切换

网络子系统在正常运行期间可能处于三种模式：运行、LPDS 和禁用 (OFF)。

- 从 OFF 到运行模式以及从运行模式到 OFF 模式的转换由使用 SimpleLink™ API 的主机应用控制。
  - **sl\_Start** API 会立即使网络子系统进入运行模式。
  - **sl\_Stop** API 会将网络子系统置于禁用模式，不迟于 API 指定的超时参数。

在 CC313x 器件中，**sl\_Start** 会置位器件的 nHIB 或 nRESET 引脚，**sl\_Stop** 会在向器件发送停止命令后取消置位该引脚。

在 CC323x 器件中，**sl\_Start** 会配置启用 NWP 的内部寄存器。**sl\_Start** 会启动网络子系统的冷启动初始化过程。当网络子系统置位 IRQ 线路并且 SL 驱动程序读取 **sl\_Start** API 状态时，初始化即完成。

- 在 LPDS 和运行模式之间转换：在网络子系统背景下，进入和退出 LPDS 模式由活动决定。主机应用没有直接干预。Wi-Fi® IP 和 NWP IP 都会根据它们的状态（例如连接到 AP、连接到服务器等）来管理相关活动。当其中一个 IP 没有即时活动时（在接近特定阈值内），它可能会进入低功耗模式。当两个 IP 都处于各自的低功耗模式时，整个网络子系统处于 LPDS 模式。主机应用和 SL 驱动程序都不需要知道网络子系统是处于运行模式还是 LPDS 模式。当主机应用想要与 NWP 通信（假设它未被禁用）时，它只需发出 API 调用。如果在发送命令时它处于 LPDS 模式，则 NWP 唤醒并在此后处理命令。请注意，当向主机发送事件信号的 IRQ 线路处于运行状态时，网络子系统不会进入 LPDS 模式。一旦主机驱动程序从 NWP 读回事件状态，IRQ 线路就会被清除。因此，建议对功耗敏感的系统尽快响应 NWP IRQ 中断。

图 1-2 显示了各状态之间的可能转换，以及转换的触发器。

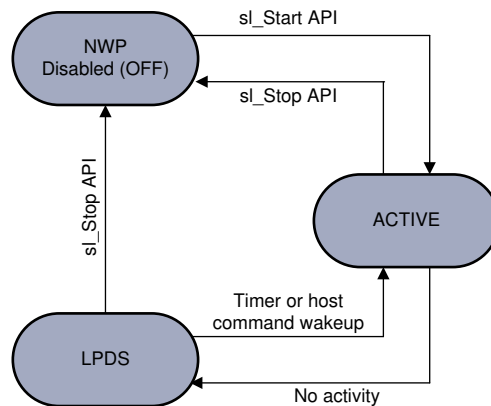


图 1-2. 状态间转换



## 1.7 电源策略

从主机应用的角度来看，只有两种由主机明确选择的运行模式：禁用 NWP (OFF) 或启用 NWP (ON)。运行或 LPDS 状态之间的选择由 NWP 在内部使用电源管理算法进行管理。

网络子系统配备了一个策略管理实体，使开发人员（主机应用程序员）能够通过预定义的电源策略来指导电源管理算法的行为。**sl\_PolicySet** API 会配置器件电源管理策略。可用的策略如下：

- **正常 (默认)** - 流量传递时间和电源性能之间的理想折衷。当连接到 AP 时，Wi-Fi® 模块会在每次接收到信标时唤醒。Wi-Fi® 和 NWP 模块在考虑当前活动并预测未来活动后进入其低功耗模式。
- **低功耗** - NWP 电源管理算法更具投机性，并抓住机会来降低功耗模式。权衡倾向于节能性能（例如，标签应用）。一旦活动结束，网络子系统便会立即进入 LPDS，而不预测未来的活动。主机和 NWP 之间的几乎每次通信都需要可将子系统唤醒的开销，而在空闲模式下没有任何时间预测未来的事件。低功耗策略主要适用于未连接的应用（例如使用收发器模式且未连接到 AP 的应用）。在连接的场景中使用，行为和服务无法得到保证。
- **长睡眠间隔 (LSI)** - 当 802.11 站点连接到接入点时，它必须接收 AP 发送的信标。AP 通常每 102.4ms 发送一次信标。802.11 标准将 DTIM (交付流量指示图) 定义为特定的信标，其中包含有关 STA 的传入数据包的信息。AP 可以选择其 DTIM 间隔（例如，1-每 1 个信标，2-每 2 个信标，等等）。这种特殊的低功耗策略指示网络子系统跳过信标和 DTIM 数据包，并附带所需的最大睡眠时间参数。该参数反映了用于信标接收的两次连续唤醒之间的所需睡眠间隔。Wi-Fi® 模块会计算期望时间并唤醒到下一个不超过指定时间的 DTIM (相关示例见表 1-3)。期望的最大睡眠时间参数为 2 秒。TI 强烈建议将 LSI 参数设置为小于半秒，以确保服务可靠同时降低电流消耗。

### 备注

此策略仅适用于客户端模式和外部连接（通过网关连接互联网）。它会自动终止器件上运行的 mDNS 和内部 HTTP 服务器。用户应用启动的 TCP/UDP 服务器会导致不可预测的系统行为和性能。

表 1-3 列出了 2.4GHz 的值。

表 1-3. 始终保持连接电源策略

AP 信标间隔 [T.U]	AP DTIM 配置	所需最大睡眠时间 [mSec]	实际 Wi-Fi 睡眠时间 [mSec]
100	DTIM = 1	200	204.8
100	DTIM = 2	500	409.6
100	DTIM = 1	500	512
100	DTIM = 3	1400	1228.8
100	DTIM = 1	2000	2048
100	DTIM = 4	800	819.2

- **常开** - Wi-Fi® 和 NWP 模块保持运行且不会进入其低功耗模式。Wi-Fi® 不会进入 802.11 省电模式。在功耗范围内提供最短的响应时间。

## 1.8 CC313x 和 CC323x 器件的低功耗设计

本节综合介绍了 CC313x 和 CC323x 产品的低功耗注意事项与详细特性。本节介绍了旨在省电的网络子系统的关键特性，并解释了设计人员在使用该产品时应考虑和解决的主要权衡因素。

### 1.8.1 连接策略

网络子系统配备了高级连接策略管理器。用户最多可以定义存储在器件 NVMEM 中的七个连接配置文件。

配置文件 (使用 `sl_WlanProfileAdd` 设置) 是配置文件的 SSID、密码和优先级的结构。每当启用网络子系统但未连接到 AP 时，它会努力连接到具有更高优先级配置文件的 AP。在设置自动连接策略时将激活此行为 (使用 `sl_WlanPolicySet`)。连接到 AP 时，网络子系统不会切换到具有更高优先级的另一个 AP。

连接管理器的一个关键特性是快速连接特性 (也使用 `sl_WlanPolicySet` 进行设置)。快速连接策略规定在初始化时 (从禁用 NWP 转换到启用 NWP 模式) 或在断开连接的情况下，网络子系统立即尝试连接到与之相连的最后一个 AP。它会记住最后一个 AP 的 SSID、安全凭据和通道，并自动尝试连接到该网络。快速连接优于自动连接的主要优点是系统跳过了扫描环节。当同时配置了自动连接和快速连接时，系统会根据快速连接策略先尝试连接最后一个 AP；如果失败，它会运行扫描过程并寻找最高优先级的配置文件，然后与其连接。

因为跳过了扫描过程，大量能源得以保留。扫描过程可能很长 (几百毫秒)，在此期间调制解调器处于运行状态，在通道之间切换，发送探测请求数据包并侦听响应。因此，对于每个包含多个连接的系统用例，建议使用快速和自动连接功能。

SimpleLink™ CC3135 和 CC3235xx 器件支持 802.11a (5GHz) 频段。5GHz 是一个具有许多通道和限制的宽频段。SimpleLink™ 器件通过内部优化来减少 5GHz 频段的扫描时间和电流消耗量。

### 1.8.2 服务发现

连接到 AP 后，NWP 通过发送 mDNS 数据包自动开始自我广播。在应用不使用 mDNS 特性时停止此特性有助于节省电量。停止 mDNS 特性是使用 `sl_NetAppStop` API 来完成的，并且可以完成一次，因为指示存储在 NVMEM 中。

### 1.8.3 主机中断 (IRQ) 处理

网络子系统处理自己的电源状态，尽可能地转换至低功耗状态 (LPDS)。但是，当主机 IRQ 线置位时，NWP 不会转换至 LPDS 模式。NWP 向主机发送 IRQ 以指示命令响应或异步事件。然后，预计主机从 NWP 读取事件，并且 NWP 清除 IRQ 行。NWP 不会在 IRQ 线置位的情况下进入 LPDS 并且直到主机读取状态才将其清除，因此请确保主机尽快处理 IRQ 线。

### 1.8.4 使用器件内置系统滤波器减少主机唤醒次数

该器件在不同层配备了先进且可配置的过滤机制。过滤器的智能使用可以减少传输到主机的不需要数据包的数量，并导致主机无谓唤醒。默认情况下，该器件对不属于所加入多播组的 MAC 层广播和多播以及 IP 层多播进行过滤。

### 1.8.5 串行闪存处理

CC3x3x 器件使用串行闪存 (SF) 进行非易失性存储。关于电源管理，请确认 SF 不会成为系统瓶颈。SF 可能处于以下三种模式之一：

- **运行** - 当器件从 SF 读取或写入 SF 时。NWP 使用 SF 存储内部数据，并且可以异步写入 SF。
- **待机** - 当器件不使用 SF 时，CS (片选) 线路保持高电平。这也是 LPDS 模式下的 SF 状态。
- **断电** - CC3x3x 器件进入休眠状态之前，它会向 SF 发送断电命令。此命令由 CC313x 器件中的 NWP 处理，并由 CC323x 器件中的休眠驱动程序处理。对于 CC313x 器件，将此超时参数与 **sl\_Stop** 命令一同使用以允许 NWP 发送断电命令。

### 1.8.6 TX 输出功率

默认情况下，网络子系统以其最大输出功率进行传输。在 2.4GHz (BG) 频段，程序员可以通过使用 **sl\_WlanSet** API 设置回退参数来减小此参数。此参数定义了无线电采取的额外回退 (以 dB 为单位)。如果用户将该值设置为 4 或更大，网络子系统无线电会改为使用低功耗 PA，并且 TX 电流显著降低。

在 5GHz (A 频段) 频段，程序员可以使用图像创建工具根据法规和电路板/平台布线损耗和天线增益设置所需的输出功率。提供此控件以支持不同的用户平台，并且仍然符合规范、协议和法规。

---

#### 备注

对于所有速率，输出功率都以相同的因子降低。例如，1Mbps 对应的最大输出功率为 18dBm，54Mbps 对应的最大输出功率为 14.5dBm。如果该值设置为 4，则 1Mbps 的输出功率将降低到 14dBm，54Mbps 的输出功率将降低到 10.5dBm。因此，如果用户决定降低最大输出功率以降低整体功耗，则传输速率会下降，传输时长更长，整体功耗可能会增加。

---

### 1.8.7 CC313x 器件 (网络子系统) 电流消耗量

适用于 MCU 应用、具有共存选项的 [CC3130 SimpleLink™ Wi-Fi® 无线网络处理器数据表](#) 或适用于 MCU 应用的 [CC3135 SimpleLink™ Wi-Fi® 双频带网络处理器解决方案数据表](#) 应用作电流消耗量值的主要参考。

### 1.8.8 CC323x 器件电流消耗

具有共存选项的 [CC3230S 和 CC3230SF SimpleLink™ Wi-Fi® 2.4GHz 无线 MCU 数据表](#) 或 [CC3235S 和 CC3235SF SimpleLink™ Wi-Fi® 双频带单新芯片解决方案数据表](#) 应用作电流消耗值的主要参考。

### 1.8.9 始终保持连接模式下的电流

空闲连接电流是一个重要参数，尤其对于始终保持连接的系统。这是整个系统在没有任何流量交换的情况下连接到接入点时消耗的平均电流。Wi-Fi® 使用 802.11 省电模式来降低其功率并仅接收信标。在此模式下，网络子系统大部分时间都处于 LPDS 模式。Wi-Fi® 模块被唤醒以接收信标，然后重新进入睡眠状态。如果信标指示 AP 为器件保存数据包或信标随附有广播数据包，则系统将被完全唤醒以处理流量。默认情况下，系统会根据 AP TBTT 参数为了每个信标而唤醒 Wi-Fi® IP，并在此模式下每 55 秒向接入点发送一个存活检测数据包。

如节 1.7 中所述，网络子系统引入了长睡眠间隔 (LSI) 的高级特性。在这种模式下，间隔间的信标会丢失，程序员需设置信标之间所需的睡眠时间。表 1-4 显示了 2.4GHz 频段始终保持连接模式的典型电流消耗，没有 IoT 低功耗特性。5GHz 始终保持连接模式下的电流消耗较低。

表 1-4. 每个睡眠间隔的预期平均电流消耗

PM 模式	唤醒间隔时间 [ms]	平均电流 [mA]
默认值	102	0.690
LSI	204	0.419
LSI	510	0.284
LSI	1020	0.233
LSI	1530	0.208
LSI	2000	0.2

注：

- 不包括待机模式下的串行闪存电流。
- 2 秒是允许的最大 LSI，而最大推荐值为 500ms。
- 在干净的射频环境中使用少数 AP 型号进行测试。
- 在 3.3V VBAT 下测得。
- 测量值基于 CC323x 器件。

在 TBTT 默认值 (102.4ms) 下，CC313x 器件在空闲连接期间的平均电流为 0.69mA。这种性能是 Wi-Fi® 发展 10 多年以来的成果。

SimpleLink™ CC313x 和 CC323x 器件还支持 Wi-Fi® Alliance 全新的省电特性 (IoT 低功耗)。此省电特性允许站点在保持实时连接的同时处于睡眠模式，而不会丢失单播和多播数据包。如需更多信息，请参阅 SimpleLink™ 用户指南。

#### 备注

此参数可能因不同的接入点而异。一些接入点和网络会发送许多广播数据包，迫使网络子系统运行更长时间。一些接入点发送信标的时间不准确，出现信标丢失以及其他现象。网络子系统算法试图克服上述许多现象，但平均电流消耗可能仍然不同。

### 1.8.10 NWP 初始化时间

此参数对于频繁启用和禁用网络子系统的几个用例至关重要。例如，某个系统大部分时间都处于休眠模式，并且每 T 分钟启动一次与云的连接。初始化时间是从启用 NWP (使用 `sl_Start` 命令) 的时间点到 NWP 置位 IRQ 线的时刻开始测量的。该时间可能因以下因素而异：

- 从串行闪存加载的服务包的大小。
- 存储在串行闪存中的配置数量。例如，连接配置文件、静态 IP、MAC 地址等。
- 校准 (如果正在运行且不使用一次性校准选项) 会使 NWP 初始化时间增加约 200ms。

在 3.3V 下充电约 1000 $\mu$ C 时，NWP 的典型初始化时间为 60ms。请参阅 [CC313x 和 CC323x SimpleLink™ Wi-Fi® 嵌入式编程](#)。

### 1.8.11 Wi-Fi® 连接电荷

使用快速连接特性 (跳过扫描过程) 时，网络子系统会自动连接到接入点。连接过程消耗的电荷是并非总保持连接状态的系统的一个重要参数。一个接入点与另一个接入点之间的连接时间和电荷可能会有很大差异，并且在同一接入点内，根据接入点负载和活动，从一个连接尝试到另一个接入点也可能有所不同。

WPA2 连接的典型电荷为 3.3V 时 1000 $\mu$ C 至 2000 $\mu$ C，并且高度依赖于所使用的 AP。表 1-5 中列出的测量是在 CC3135 器件 R1 SP1 和 MSP432™ 主机上使用快速连接特性完成的。

表 1-5. Wi-Fi® 连接电荷

AP	WPA2 连接电荷 [ $\mu$ C]
Cisco 1250	1000
Netgear 3500	1400
TP-Link WR2041	1300

### 1.8.12 TCP 和 SSL/TLS 连接电荷

此参数因服务器而异，并且根据所选的密码套件而异。做出快速响应的服务器的典型连接时间和电荷如表 1-6 所示。

表 1-6. TCP 和 SSL/TLS 连接电荷

密码套件	连接电荷 [ $\mu$ C]
开放 (非安全 TCP)	3500
SSL/TLS (RSA RC4-128 MD5)	4500
SSL/TLS (RSA RC4-128 SHA)	4200
SSL/TLS (RSA AES-256 CBC SHA)	4000
SSL/TLS (DHE RSA AES-256 CBC SHA)	9700
TLS (ECDHE RSA RC4/AES SHA)	44500

注：

- 本地 PC 服务器用于测量。
- 假设往返延迟时间为零。较长的往返延迟时间会显著增加连接时间。但是，每次连接的电荷可能会保持更接近此处指定的结果，因为增加的大部分时间都花在了省电模式下。

### 1.8.13 流量交换电荷和注意事项

应用程序的流量模式因用例而异。从功耗的角度来看，流量的特性有很大影响。

当没有流量时，系统处于空闲连接模式。系统会尝试尽可能长时间地保持在低功耗模式，主机 (TX) 或 AP (RX) 发起的每个流量事件都会使系统退出空闲连接模式。

唤醒系统以处理流量和退出 802.11 省电模式时的开销不可忽略。因此，系统唤醒处理流量的次数应尽量减少。在每次唤醒期间最大限度地减少唤醒次数。例如，尽可能快地发送 10 个数据包远优于发送相同的数据包之间有 30ms 的延迟。

以下准则可改进整体功耗：

- 将应用数据合并为大数据包。
- 将流量集中在突发中优于均匀分布流量。
- 如果系统包括服务器，那么服务器也应该将流量集中在突发中。（减少节点唤醒次数）

UDP TX 是上述指南的一个例外。如果用例需要每次传输少量数据包（最多 5 个），则当数据包之间的延迟大于 50ms 时会取得更好的效果。

表 1-7 显示了当流量以突发形式传输和接收时 UDP/TCP 用例中 TX/RX 的平均电流消耗量。指定的有效载荷以突发形式进行传输或接收，然后器件在剩余的一秒时间内处于空闲状态。该过程每秒重复一次。

表 1-7. 突发模式下 TX/RX 的平均电流

TP [Mbps]	UDP		TCP	
	TX [mA]	RX [mA]	TX [mA]	RX [mA]
0.1	5.8	5.6	6.5	6
0.5	9.1	8.05	9.5	10
1	13.5	11.5	14	15.5
2	22	18	22	26
3	30	24	31	36
5	46.5	36.5	47.5	57
12	105	80	107	94

注：

- 1460B 数据包长度
- 假设链路质量出色
- 在干净的射频环境中使用少数 AP 进行测试

## 1.9 电池供电系统注意事项

对于电池供电系统，应了解一些注意事项。

### 1.9.1 最小运行电压

CC3x3x 器件规定最小工作电压为 2.1V。为确保正常工作，电池电压应始终高于此阈值。根据电池规格和化学成分，当电池放电时，电池电压往往会下降。根据其内部电阻，当从中汲取高电流时，电池电压也会下降。AA 电池的典型内阻为 1Ω。考虑到 TX 电流和校准峰值电流，碱性电池的电压降可以达到 400mV。基于这一系统特性，对于 2 节 AA 碱性电池，AA 电池的最低工作电压为 2.5V。

当使用 2.4GHz 的触发或一次性校准模式时，电池电压甚至可以低于 2.5V，因为不会在运行时进行任何校准。用户应考虑传输峰值电流。对于 5GHz，只有一种校准模式，校准峰值电流与常规传输相同。这意味着用户也可以使用低于 2.5V 的电压，具体取决于 PM 系统和电池特性。

### 1.9.2 可用电池容量

可用电池容量是电池在电压降至 2.5V 以下之前所提供的电池容量。它取决于电池的放电特性。对于碱性电池（使用 Duracell MN1500 AA 进行分析），容量随着平均电流的下降而增加。电池数据表显示了表 1-8 中列出的容量，而电压保持在 2.5V 以上。

表 1-8. 电池容量

平均电流	高于 2.5V 的容量
50mA	1550mAh
25mA	1850mAh
10mA	1990mAh
5mA	2090mAh

预计平均电流将继续下降至 1mA 及以下。该特定电池的平均电流小于 1mA 的可用容量达到 2200mAh。

锂电池具有更好的内阻（基于 Energizer® L91 的分析），其电压和使用时间曲线更为平坦。这给锂电池带来了优势，因为几乎可以使用全部容量。根据对电池的分析，可以使用的容量超过 3000mAh。

## 1.10 示例测试用例

### 1.10.1 间歇性连接测试用例

基于 CC313x 的系统必须每隔几分钟在服务器上传输 100B 和检查消息。在此测试用例中，系统会启动通信并且始终没有响应。因此，系统在每个周期都可以发起一个新的连接，而不必保持连接。如果周期时间足够长，系统会在事务之间切换到休眠模式，并且每次都重新连接到 AP 和服务器而不是保持连接，就可以节省更多的电量。

在此测试用例中，每个活动周期的总能量是以下活动的总和：

- E1 是系统初始化期间所消耗的能量。
- E2 是重新连接到 AP ( 802.11 关联和身份验证 ) 期间所消耗的能量。
- E3 是重新连接到服务器时所消耗的能量 ( 符合应用要求的 IP 层和传输层协议 ) 。
- E4 是在应用流量期间所消耗的能源。
- E5 是 CC313x 器件处于休眠模式时在周期期间所消耗的能量。

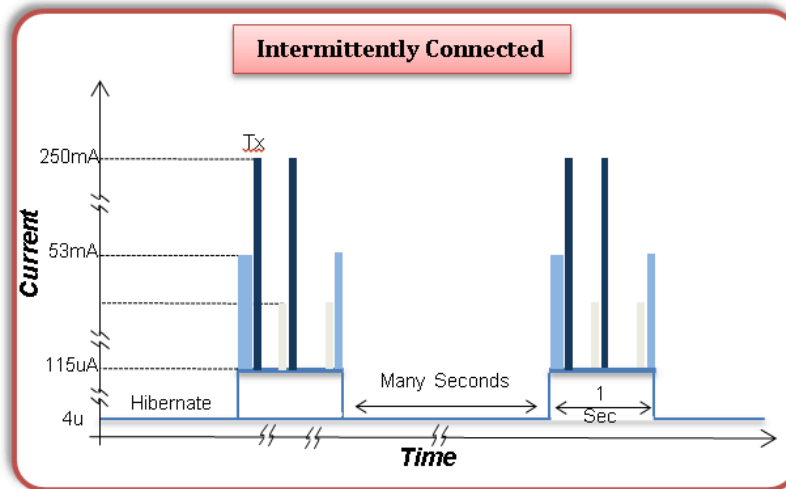


图 1-3. 间歇性连接测试用例

在此测试用例中，应用会启用 CC313x 器件，该器件会自动重新连接到 AP，应用打开并绑定套接字，启动流量并禁用器件。当 CC313x 器件启用时，它会根据定义的策略管理其功耗状态。例如，它可能在等待服务器响应时或如果主机在命令之间出现延迟时处于 LPDS 状态。

方程式 1 给出了总能量消耗和系统寿命。

$$E = \sum_{n=1}^5 E_n$$

$$T = V \times B / E \times C \times 1 / 400$$

(1)

其中

- E 是每个周期的总能量 [焦耳]
- B 是电池容量 [mAh]
- C 是周期时间 [分钟]
- V 是电压 [伏]
- T 是器件寿命 [天]



### 示例 1-1. 间歇性连接测试用例示例

#### 能源

- C - (活动周期) = 2 分钟
- 一个活动周期的典型电流消耗量：
  - E1 = 1700 $\mu$ C 3.3V 时 = 5.6mJ
  - E2 = 2000 $\mu$ C 3.3V 时 = 6.6mJ
  - E3 = 4000 $\mu$ C 3.3V 时 = 13.2mJ
  - E4 = 5000 $\mu$ C 3.3V 时 = 16.5mJ
  - E5 = 600 $\mu$ C 3.3V 时 = 2mJ
  - E<sub>Total</sub> = 44mJ
  - 平均电流 = 111 $\mu$ A

电池：两个 AA 碱性电池，额定电压为 1.5V，每个串联配置，容量为 2000mAh：

- B = 2000mAh
- V = 3.0V

T (器件寿命) =  $3 \times 2000 \times 2 / 0.044 / 400 = 681$  天

#### 1.10.1.1

#### 1.10.2 始终保持连接的测试用例

在此测试用例中，应用要求系统保持其连接（见图 1-4）。系统必须保持在线并在一定的延迟（几秒钟）内响应通知。流量极低，大部分时间系统处于空闲状态。例如，服务器等待客户端连接或客户端一直连接云服务器。在这种情况下，主机启用一次 NWP 并启动与 AP 的连接。只要系统中没有任何活动，系统就处于超低功耗模式（使用 802.11 省电协议来处理链路层上的低功耗）。系统管理以下活动：

- 唤醒信标以检查 AP 缓冲区中是否存在传入流量
- 在指示传入流量时，系统退出低功耗模式，接收流量并在必要时根据配置的过滤器传输到主机。
- 管理与 AP 的存活检测握手以保持连接。

系统消耗的平均能源是以下活动的总和：

- E1 是用于连接维护的能源
- E2 是在应用流量期间消耗的能源

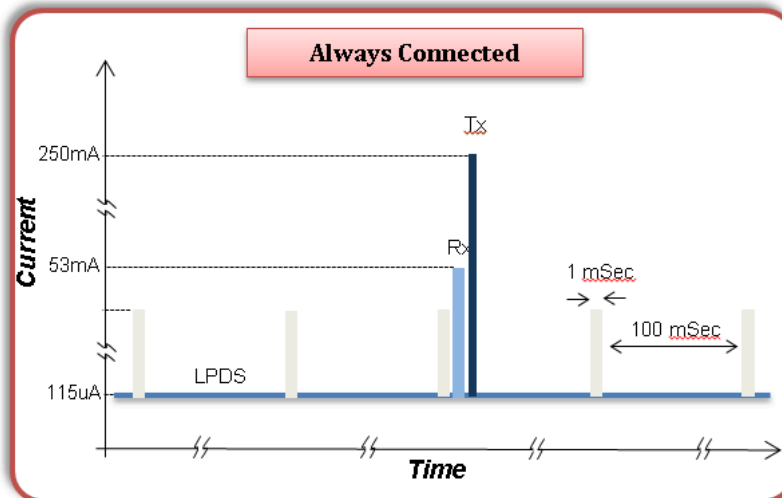


图 1-4. 始终保持连接的测试用例

方程式 2 给出了总能量消耗和系统寿命。

$$T = B \times V / W_1 + E_2 / P_2 (1 / 1000 \times 24) \text{ days} \quad (2)$$

其中

- B 是电池容量 [mAh]。
- V 是电压 [伏]。
- P<sub>2</sub> 是应用流量活动的周期 [秒]。
- W<sub>1</sub> 是空闲连接期间消耗的功率 [瓦]。
- E<sub>2</sub> 是在应用流量期间消耗的能源 [焦耳]。

在器件初始化和连接建立的初始阶段消耗的能源可以忽略不计，因为这是一次性事件。

### 示例 1-2. 始终保持连接的测试用例示例

能源

- P<sub>2</sub> = 60s
- W<sub>1</sub> = 233μA × 3.0V = 0.0007W ( 假设长睡眠间隔为 1 秒 )
- E<sub>2</sub> = 25mA × 200ms × 3.0V = 15mJ ( 假设 200ms 的一部分处于 RX 电流，非常短的时间处于 TX 电流，还有一部分处于 LPDS 电流，结果 200ms 内的平均电流为 25mA )

电池：两个 AA 碱性电池，额定电压为 1.5V，每个串联配置，容量为 2000mAh：

- B = 2000mAh
- V = 3.0V

$$T (\text{器件寿命}) = 2000 \times 3.0 / (0.0007 + 0.015 / 60) / (1000 \times 24) = \text{约 } 263 \text{ 天} \quad (3)$$

## 2 电源管理指南

本节讨论了 CC3x3x 器件的低功耗模式和测试用例 ( 基于 CC3135 BoosterPack™ 或 CC3235x LaunchPad™ ) 的体验步骤, 其中会使用 CC32xx 软件开发套件 (SDK) 中的 *power\_measurement* 源代码示例或 TI 提供的 Wi-Fi 插件软件包。

注意: CC3x30 器件没有专门的评估板。CC3x35 电路板应在仅 2.4GHz 模式下使用, 以评估 CC3x30 性能。

### 2.1 CC3135 和 CC3235x 器件先决条件

以下各节介绍了 CC3135 BoosterPack™ 和 CC3235x LaunchPad™ 实现可靠功率测量所需的标准设备和硬件。在运行 Code Composer Studio™ (CCS) 集成开发环境 (IDE) 和 IAR 中的示例代码之前, 准备好以下各项。

#### 2.1.1 CC3135 和 CC3235x 器件的标准设备

评估 CC3x3x 器件的标准设备如下:

- 能够运行最新版 CCS 或 IAR 以及 Uniflash 的 PC
- 终端仿真器程序, 例如安装在 PC 上的 Tera Term
- Micro-USB 电缆 ( 包含在 EVM 中 )
- 直流电源分析仪或其他用于绘制和测量电流消耗的工具
- 接入点 (AP)

#### 2.1.2 CC3135 和 CC3235x 器件所需的硬件

评估 CC3x3x 器件所需的硬件如下:

CC313x 器件硬件:

- [BOOSTXL-CC3135](#)
- [CC31xxEMUBOOST](#) ( 用于在 CC3135 器件上刷写服务包 )
- [MSP432-EXP432P401R](#) ( 用作主机处理器 )

---

#### 备注

请参阅 [CC3135 SimpleLink™ Wi-Fi® BoosterPack™ 开发套件 \(BOOSTXL-CC3135\) 用户指南](#), 了解:

- 使用 CC31XXEMUBOOST 器件刷写服务包
  - 将 CC3135BOOST 器件连接到 MSP432-EXP432P401R 器件
- 

CC323x 器件硬件:

- [CC3235SF-LAUNCHXL](#)

## 2.2 软件设置

以下部分介绍了在各种电源模式或测试用例中, 运行 *power\_measurement* 软件示例和测量器件性能の説明。

### 2.2.1 下载并安装

按照这些说明下载并安装运行 *power\_measurement* 所需的软件。

1. 下载并安装最新版本的 [CCS](#) 或 [IAR](#)。
2. 下载并安装 [SimpleLink™ SDK](#) ( [CC3235x SDK](#) 或 [MSP432 SDK](#), 带有 [CC3135 附加组件](#) )。
  - 对于 CC3135 器件, 在系统提示安装 FTDI 驱动程序时选择 “Yes” ( 是 )。
  - 对于 CC3135 器件, 请参阅 [CC3x35 入门指南](#), 详细了解如何安装 XDS110 驱动程序。
3. 下载并安装最新的 [Uniflash](#) 工具。

## 备注

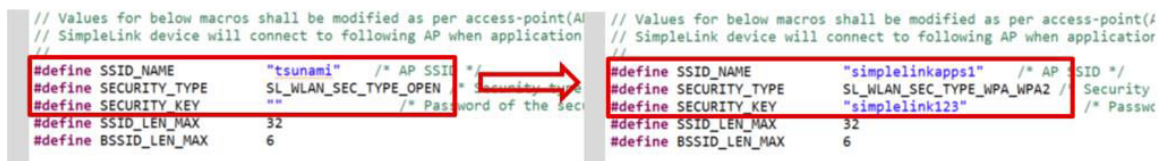
用户必须查看 [CC3x35 入门指南](#)，其中介绍：

- 使用 CCS 或 IAR 构建应用程序
- 使用 UniFlash 工具从 *power\_measurement* 工程中刷写最新的 Service Pack 和预编译的二进制文件。这些文件包含在 SDK 软件包中。在刷写最新的 Service Pack 和应用程序代码之前，请继续按照本指南的 [节 2.2.4](#) 进行操作。

### 2.2.2 宏定义

*power\_measurement* 示例使用户能够轻松配置应用以使用以下任一电源模式和测试用例选项，从而快速开始测量 CC3x3x 器件的功耗：休眠、低功耗深度睡眠 (LPDS)、收发器模式、间歇连接模式或始终保持连接模式。在间歇连接或始终保持连接模式测试用例中，用户必须连接至 AP。

1. 在将 *power\_measurement* 示例导入您的工作区后，打开 `common.h` 文件。此文件中包含可管理应用程序设置的宏定义。
2. 用户必须使用 AP 的信息来定义每个宏。编辑 `SSID_NAME`、`SECURITY_TYPE` 和 `SECURITY_KEY` 宏以包含 AP 信息，如 [图 2-1](#) 所示。
  - 对于开放安全，请将 `SECURITY_TYPE` 定义为 `SL_WLAN_SEC_TYPE_OPEN`。
  - 对于 WPA 和 WPA2 安全，请将 `SECURITY_TYPE` 定义为 `SL_WLAN_SEC_TYPE_WPA_WPA2`。
  - 对于 `SSID_NAME` 和 `SECURITY_KEY` 宏，引号必须保留为宏定义的一部分。



```

// Values for below macros shall be modified as per access-point(AP)
// SimpleLink device will connect to following AP when application
//
#define SSID_NAME "tsunami" /* AP SSID */
#define SECURITY_TYPE SL_WLAN_SEC_TYPE_OPEN /* Security type */
#define SECURITY_KEY "" /* Password of the security key */
#define SSID_LEN_MAX 32
#define BSSID_LEN_MAX 6

// Values for below macros shall be modified as per access-point(AP)
// SimpleLink device will connect to following AP when application
//
#define SSID_NAME "simplelinkapps1" /* AP SSID */
#define SECURITY_TYPE SL_WLAN_SEC_TYPE_WPA_WPA2 /* Security type */
#define SECURITY_KEY "simplelink123" /* Password of the security key */
#define SSID_LEN_MAX 32
#define BSSID_LEN_MAX 6

```

图 2-1. 编辑 `common.h` 文件

## 备注

*power\_measurement* 示例中的间歇连接或始终保持连接电源模式的默认设置如下所示：

- DHCP：快速续订 + 不等待
- AP 重新连接：自动 + 快速连接
- 数据包数：1 (1000 个字节)
- LSI 持续时间：100ms

有关这些参数的更多信息，请参阅 [SimpleLink™ Wi-Fi® CC3x20、CC3x3x 网络处理器程序员指南](#)。

### 2.2.3 配置套接字

使用间歇连接和始终保持连接模式测试用例时，用户可以配置宏，并指定套接字类型。此套接字可配置为建立 UDP 或 TCP 连接。建立 TCP 连接需要客户端和服务端，使用 Python 脚本是设置对等服务器的简单解决方案。

#### 2.2.3.1 配置用于 TCP 连接的客户端

若要配置用于 TCP 连接的 SimpleLink™ 器件并运行对等服务器，请执行以下操作：

1. 在 power\_measure.c 文件的定义列表中，识别 SOCKET\_TYPE 宏：

```
#define SOCKET_TYPE SocketType_UDP /* options -> SocketType_UDP, SocketType_TCP, SocketType_SEC_TCP */
```

2. 将 SOCKET\_TYPE 定义为：

- SocketType\_TCP ( 非安全套接字，TCP 连接 )
- 或
- SocketType\_SEC\_TCP ( 安全套接字，TCP 连接 )

#### 备注

有关安全套接字的更多信息，请参阅以下内容：

- 对于 CC313x 和 CC323x 器件，请参阅 [SimpleLink™ Wi-Fi® CC3x20、CC3x3x 内置安全特性应用报告的“网络层安全性”部分](#)。
- 对于 CC313x 和 CC323x 器件，请参阅 [SimpleLink™ Wi-Fi® CC3x20、CC3x3x 网络处理器程序员指南的“安全套接字”部分](#)。

3. 识别如下所示的宏。通过更新 PORT 宏来定义要使用的网络端口号。

```
#define PORT(5001)
#define DEST_IP_ADDRSL_IPV4_VAL(192,168,39,200)
#define SRC_IP_ADDRSL_IPV4_VAL(192,168,1)
/* relevant for Static IP mode */ #define GATEWAY_IP_ADDRSL_IPV4_VAL(192,168,39,242)
/* relevant for Static IP mode */
```

4. 通过将运行 python 脚本的机器的 IP 地址来更新 DEST\_IP\_ADDR 的定义 ( 在下一节中解释 )。这是由正在使用的 AP 分配的 IP 地址。在 Windows 上，这可以使用控制台命令 *ipconfig* 找到。
5. 如果将 SimpleLink™ 器件配置为使用静态 IP 地址，请更新其他宏：
  - SRC\_IP\_ADDR 是分配给 SimpleLink™ 客户端器件的 IP 地址。
  - GATEWAY\_IP\_ADDR 是分配给用户要连接 AP 的 IP 地址。
6. 实现安全服务器时，修改 `bsdTcpSecClient()` 函数中的 *cipher* 和 *method* 变量以将加密协议更改为传输层安全 (TLS)，如下所示。将协议更改为 TLS 的目的将在下一节中介绍。

```
uint32_t cipher = SL_SEC_MASK_TLS_RSA_WITH_AES_256_CBC_SHA;
uint8_t method = SL_SO_SEC_METHOD_TLSV1_2;
```

### 2.2.3.2 使用 Python 脚本配置服务器

按照以下步骤使用 python 脚本来配置服务器。

1. 下载并安装 [Python 2.7.x](#) ( 虽然有 [Python 3.0](#) 安装程序可用, 但未经测试 )。根据安装程序提示的说明在您的 PC 上安装软件包。
2. 下载并安装 [OpenSSL](#) 以实现安全服务器。关于 [OpenSSL](#) 下载和证书生成, 请参阅 [CC31xx](#) 和 [CC32xx](#) [生成证书](#)。完成后, 将所有证书文件放在同一目录下。
3. 以下是可用于实现不安全或安全 TCP 服务器的 Python 脚本示例：
  - 将 `tcp_server.py` 用于非安全套接字：

```
import socket,os
TCP_IP = raw_input ('Please enter the server IP address: ')
TCP_PORT = raw_input ('Please enter the port number: ')
BUFFER_SIZE = 1400
idx = 1# open TCP socket
s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
s.bind((TCP_IP, int (TCP_PORT)))
print "waiting for RX"
while 1:
s.listen(1)
conn, addr = s.accept()
print 'Connection has been established with address: ', addr
while 1:
data = conn.recv(BUFFER_SIZE)
# data will be null when the client closes the socketif not data: breakif data: print
"received data:", idx
#conn.sendall(data) # echo if needed, uncomment this line if you want to reply
idx = idx + 1
conn.close()
```

- 将 `ssl_tcp_server.py` 用于安全套接字：

```
import socket, ssl
TCP_PORT = 443
idx = 1
print "-- Server is starting --"
bindsocket = socket.socket()
bindsocket.bind(('', TCP_PORT))
print "-- Server is set and listening on port " + str(TCP_PORT) + " --"
while True:
    print " Waiting for client requests ..."
    bindsocket.listen(1)
    newsocket, fromaddr = bindsocket.accept()
    connstream = ssl.wrap_socket(newsocket,
    serverside=True,
    certfile="cert.pem",
    keyfile="cert_privkey.pem"
    )
    while True:
        data = connstream.read()
        if not data : break
        if data : print "packet number: ",idx
        idx += 1
    connstream.close()
```

加密协议在 `ssl.py` Python 脚本中定义为 TLS，该脚本是从 Python 2.7.x 库的 `ssl_tcp_server.py` 中导入的。这就是为什么在上一节中将加密协议更改为 TLS 的原因。

4. 打开命令行终端并运行脚本，如图 2-2 所示。确保 PC 与 SimpleLink™ 器件连接至同一 AP。

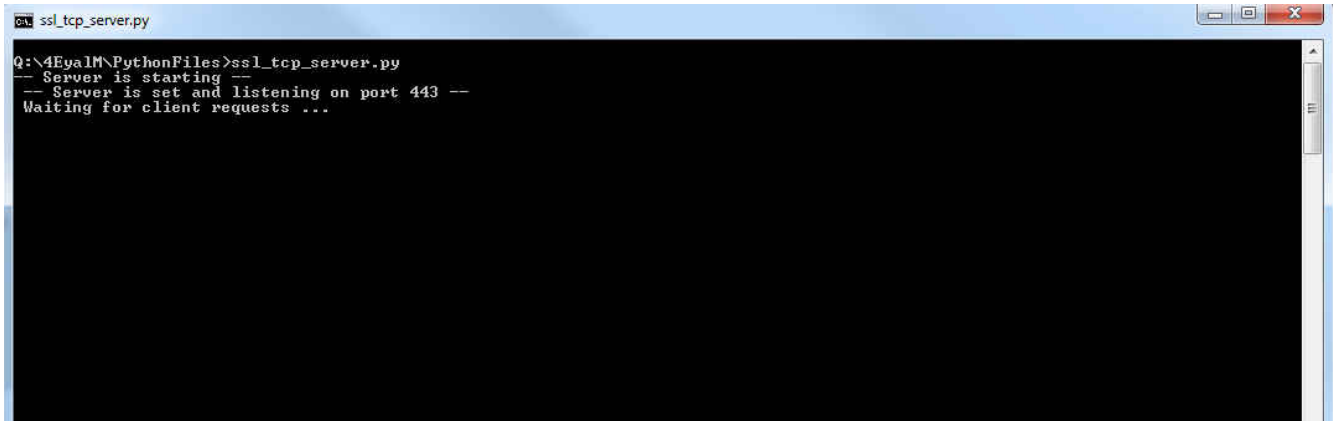


图 2-2. 运行命令

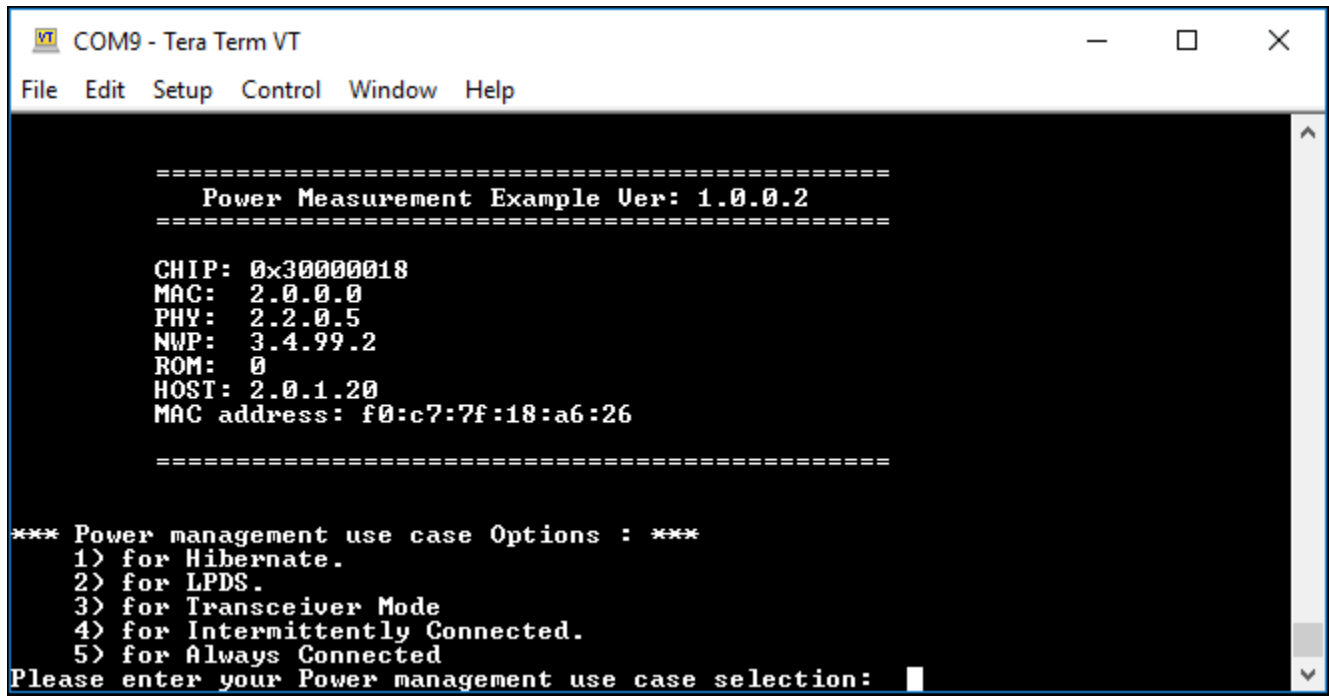
#### 备注

- 建立 TCP 连接时，请确保先启动服务器，然后再启动客户端。
- 出现提示时，运行 `tcp_server.py` 后，输入您的 PC 的 IP 地址和 PORT 宏定义的网络端口号。然后，服务器将等待接收数据。
- 运行 `ssl_tcp_server.py` 时，确保 PORT 宏为 443，因为这是 Python 脚本中定义的网络端口号。

### 2.2.4 运行功率测量示例

对于 `power_measurement` 示例，不应使用 CCS 和 IAR 调试模式，因为 JTAG 在低功耗模式下会断开连接。相反，CCS 和 IAR 应只用于编译代码。编译后，请参阅 [CC3x35 入门指南](#)，将最新的服务包和应用程序代码刷入器件。

1. 当应用程序代码在 SimpleLink™ 器件上成功刷入后，打开终端仿真程序，如 Tera Term，并选择 UART 串行端口。如果终端不显示 COM 端口名称，请参阅 [CC3x35 入门指南](#) 中讨论的设备管理器。
2. 将波特率配置为 115200。
3. 按下开发套件上的复位按钮。
4. 如果成功，终端仿真程序应输出如图 2-3 所示的文本。这表明器件已准备好进行电源用例选择。



```
COM9 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help

=====
Power Measurement Example Ver: 1.0.0.2
=====

CHIP: 0x30000018
MAC: 2.0.0.0
PHY: 2.2.0.5
NWP: 3.4.99.2
ROM: 0
HOST: 2.0.1.20
MAC address: f0:c7:7f:18:a6:26

=====

*** Power management use case Options : ***
1) for Hibernate.
2) for LPDS.
3) for Transceiver Mode
4) for Intermittently Connected.
5) for Always Connected
Please enter your Power management use case selection: █
```

图 2-3. 串行输出：功率测量



## 2.3 启动应用

查看终端程序中显示的菜单后，用户必须通过输入适当的数字来选择要运行的电源模式或测试用例。做出选择后，用户必须重新启动程序才能做出新的选择。图 2-4 简要总结了每种电源模式和测试用例的预期结果。

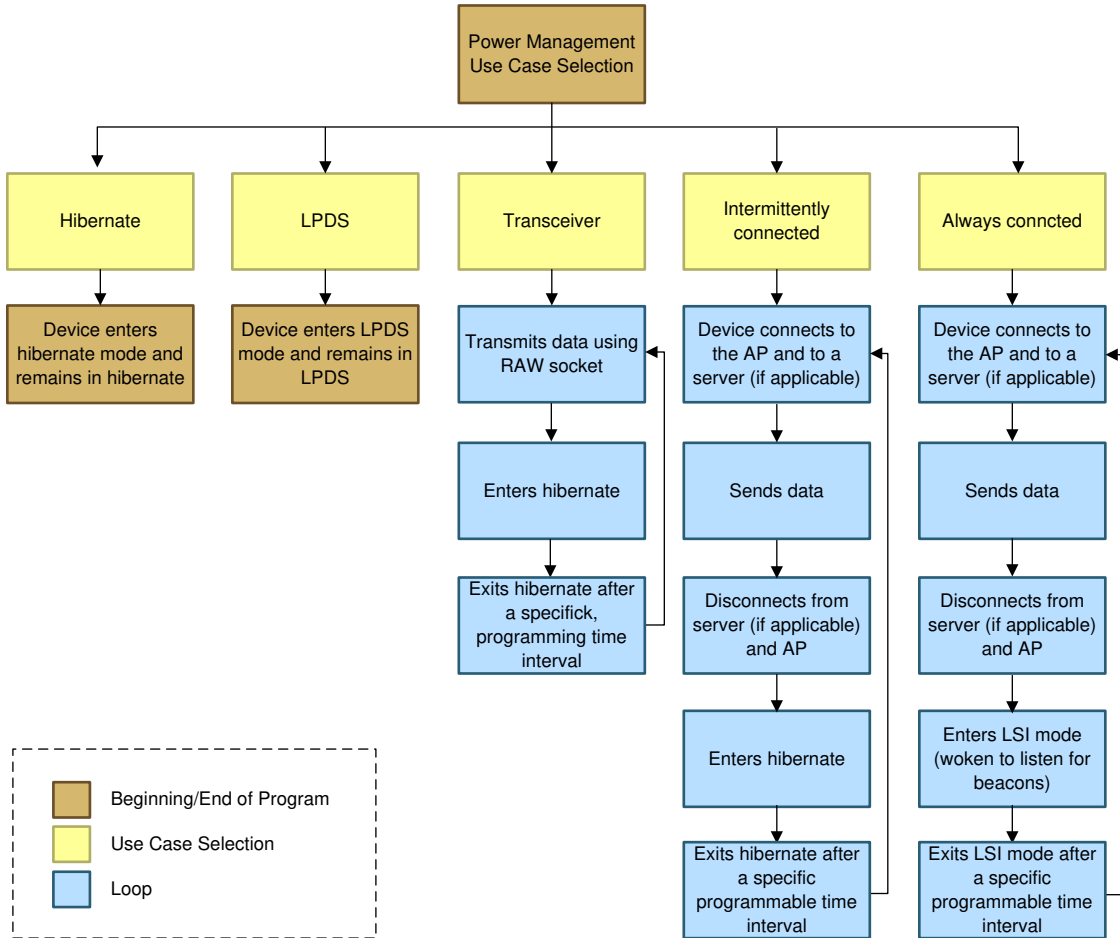


图 2-4. 电源管理用例选择流程图

## 2.4 功率测量测试设置

本节介绍了执行功率测量所需的一般设置。必须在不同的时间测量电流以正确计算平均电流消耗量。在这种情况下，基本万用表对于电流波动的情况是不够的，并且应使用以下各节中描述的某个工具来测量器件的电流消耗量。

### 2.4.1 使用直流电源分析仪测量功耗

准确测量和评估电流消耗量的简单方法是使用具有内置效率测量功能的直流电源分析仪。此设置适用于超低功耗和运行模式下的电流测量。

所需工具：

- 直流电源分析仪（例如，[Keysight N6700 电源模块](#)）
- 用于将直流电源分析仪连接到 SimpleLink™ 器件的短电缆
- PC

先决条件和注意事项：

- 确保直流电源分析仪具有内置的电源和测量、电流测量和数据记录功能。
- 确保 `power_measurement` 示例代码在 SimpleLink™ 器件上成功刷写，然后再继续执行以下步骤。
- 校准将直流电源分析仪连接到器件的导线上的电压降（使用短线和多股线）。

步骤：

1. 对每个电路板进行修改。
  - **CC3135 BoosterPack™**：
    - a. 断开 USB 电缆并关闭 CC3135 和 MSP432™ 器件，移除跳线 J6 和 J8。
    - b. 将直流电源分析仪的正输出连接到 J6 的 VBAT\_CC，并使用 P2.1 作为 GND，如图 2-5 所示。

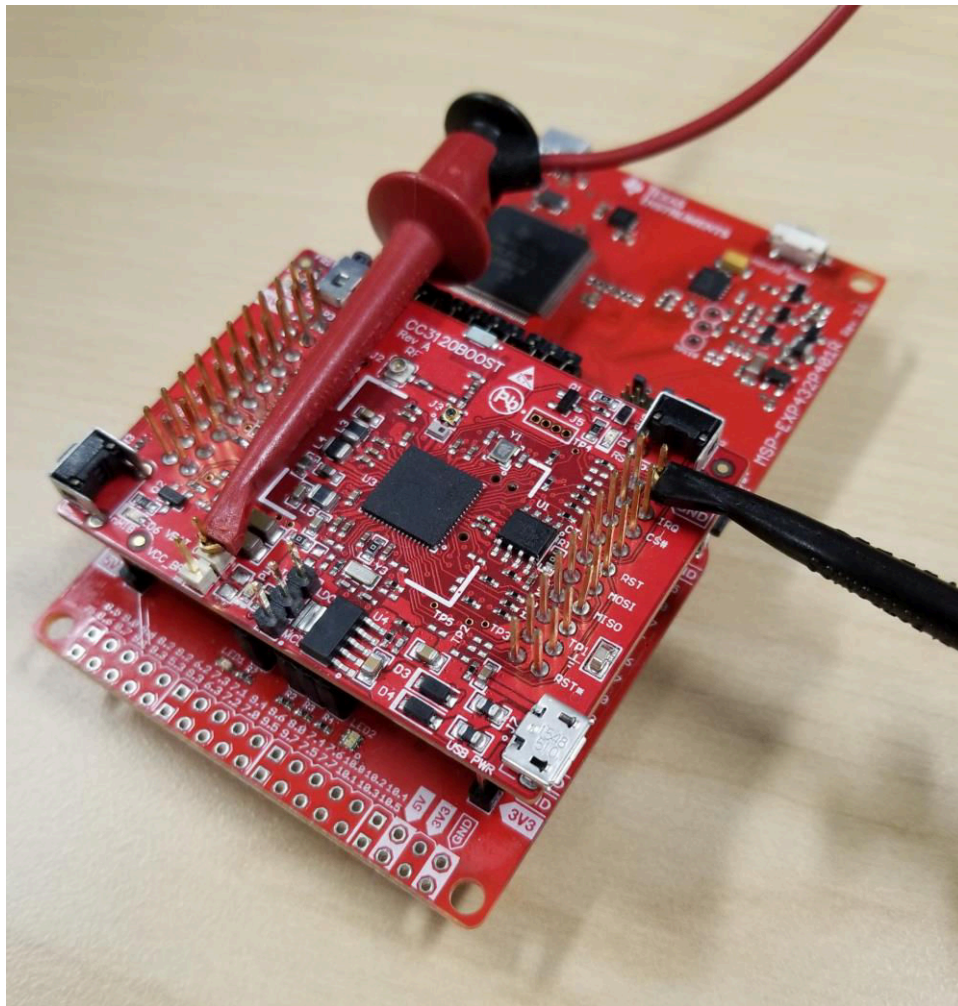
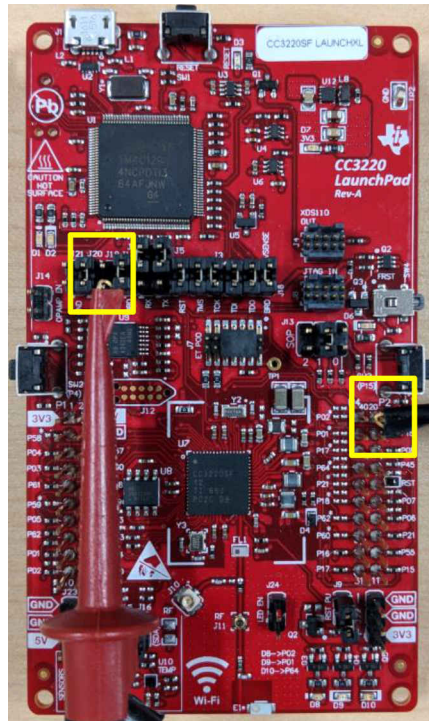


图 2-5. 直流电源分析仪连接到 CC3135 器件

- **CC3235x LaunchPad™**：
  - a. 在断开 USB 电缆并关闭 CC3235x LaunchPad™ 的情况下，移除跳线 J19。
  - b. 此外，移除跳线 J14 和 J24 以禁用板载 OP AMP 和 LED。这将降低开发套件的总电流消耗量。
  - c. 将直流电源分析仪的正输出连接到 J19，并用 P2.1（或 J22）表示 GND，如图 2-6 所示。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 2-6. 直流电源分析仪连接到 CC3235x LaunchPad™

2. 使用 USB 电缆将 SimpleLink™ 器件连接到 PC。
3. 通过给器件上电来执行代码，并使用直流电源分析仪的电源和测量功能来测量电流。作为参考，图 2-7 显示了完整的概图。

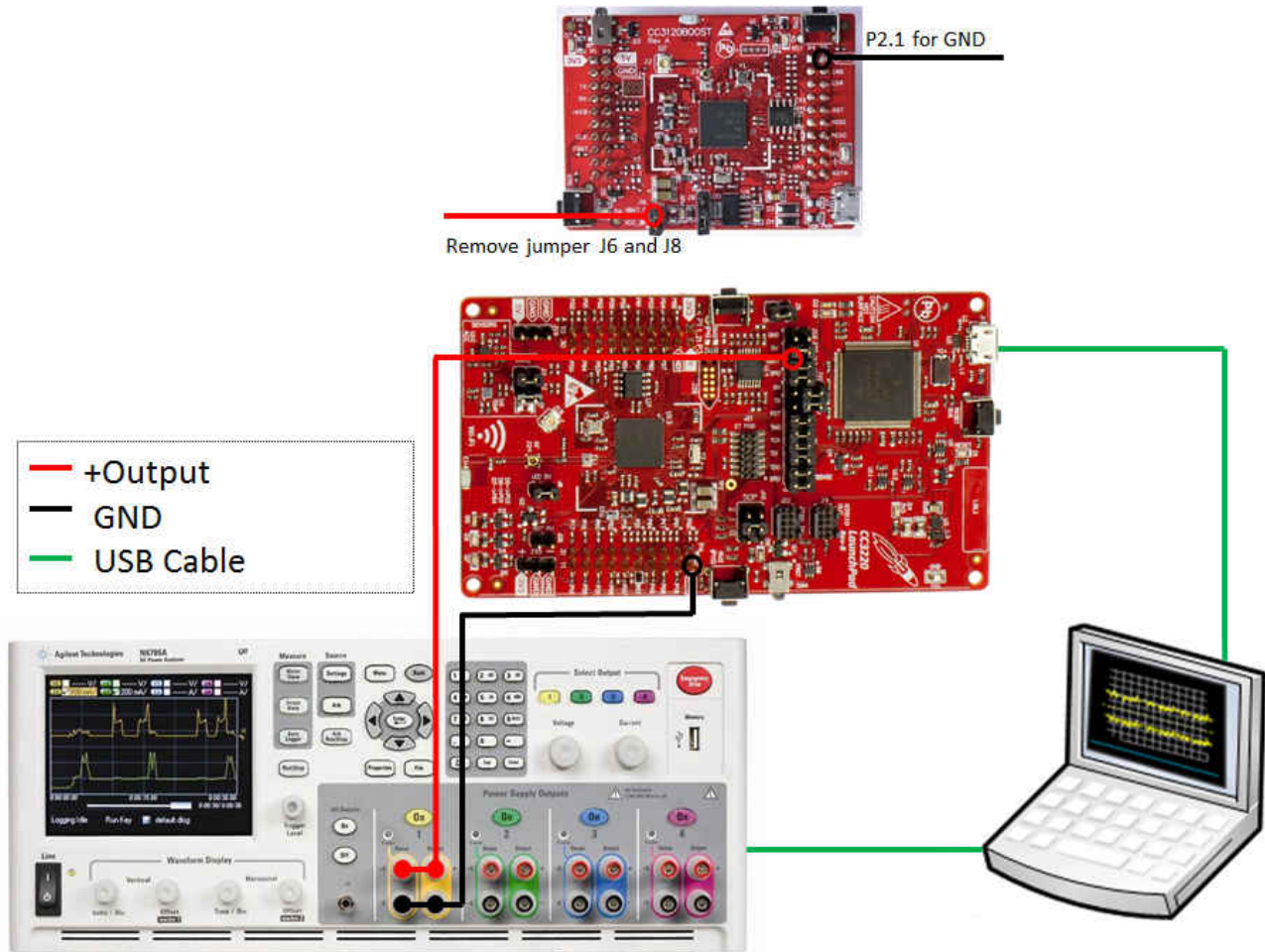


图 2-7. 直流电源分析仪测试设置

4. 电流测量完成后，定位标记以选择要计算的波形。结果应显示位于两个标记之间的采样周期的平均电流消耗量。图 2-8 显示了一个示例。

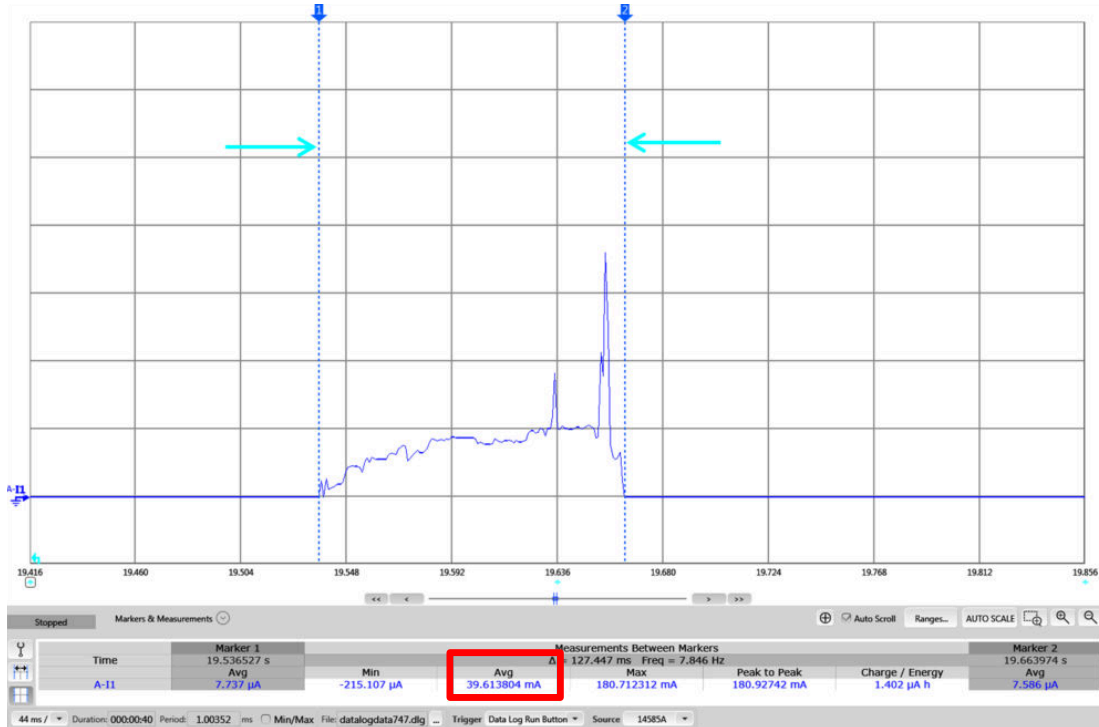


图 2-8. 采用直流电源分析仪测量的平均电流

## 2.4.2 使用 IMETER-BOOST 测量电流消耗

另一种测量电流消耗量的方法是使用精确测量和绘制电流的工具，例如 IMETER-BOOST。此设置适用于超低功耗和运行模式下的电流测量。

所需工具：

- **IMETER-BOOST** ( 或任何具有图形用户界面 (GUI) 以可视化和分析数据的精密数据采集设备 ) 。
- 用于将数据采集 (DAQ) 工具连接到 SimpleLink™ 器件的短电缆
- PC

先决条件和注意事项：

- 确保 *power\_measurement* 示例代码在 SimpleLink™ 器件上成功刷写，然后再继续执行以下步骤。
- 校准将电源连接到器件的导线上的电压降 ( 使用短线和多股线 ) 。

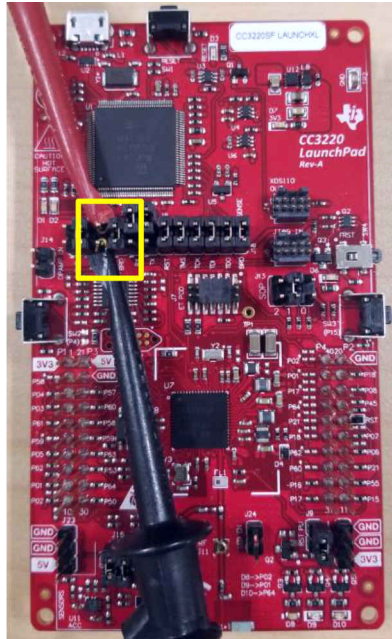
步骤：

1. 对每个电路板进行修改。
  - **CC3135 BoosterPack™** :
    - a. 断开 USB 电缆并关闭 CC3135 BoosterPack™ 和 MSP432 LaunchPad™，移除跳线 J6。
    - b. 在 J6 两端连接 IMETER-BOOST，如图 2-9 所示。
    - c. 使用跳线连接 SimpleLink™ 器件的 GND 引脚和 IMETER-BOOST 系统。



图 2-9. 电流测量工具连接到 CC3135 器件

- CC3235x LaunchPad™ :
  - a. 在断开 USB 电缆并关闭 CC3235x LaunchPad™ 的情况下，移除跳线 J19。
  - b. 此外，移除跳线 J14 和 J24 以禁用板载 OP AMP 和 LED。这将降低开发套件总电流消耗量。
  - c. 在 J19 两端连接 IMETER-BOOST，如图 2-10 所示。
  - d. 使用跳线连接 SimpleLink™ 器件的 GND 引脚和 IMETER-BOOST 系统。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 2-10. 电流测量工具连接到 CC3235 SF 器件

2. 使用 USB 电缆将 SimpleLink™ 器件连接到 PC。
3. 使用数据采集工具执行代码并测量电流。作为参考，图 2-11 显示了完整的概图。

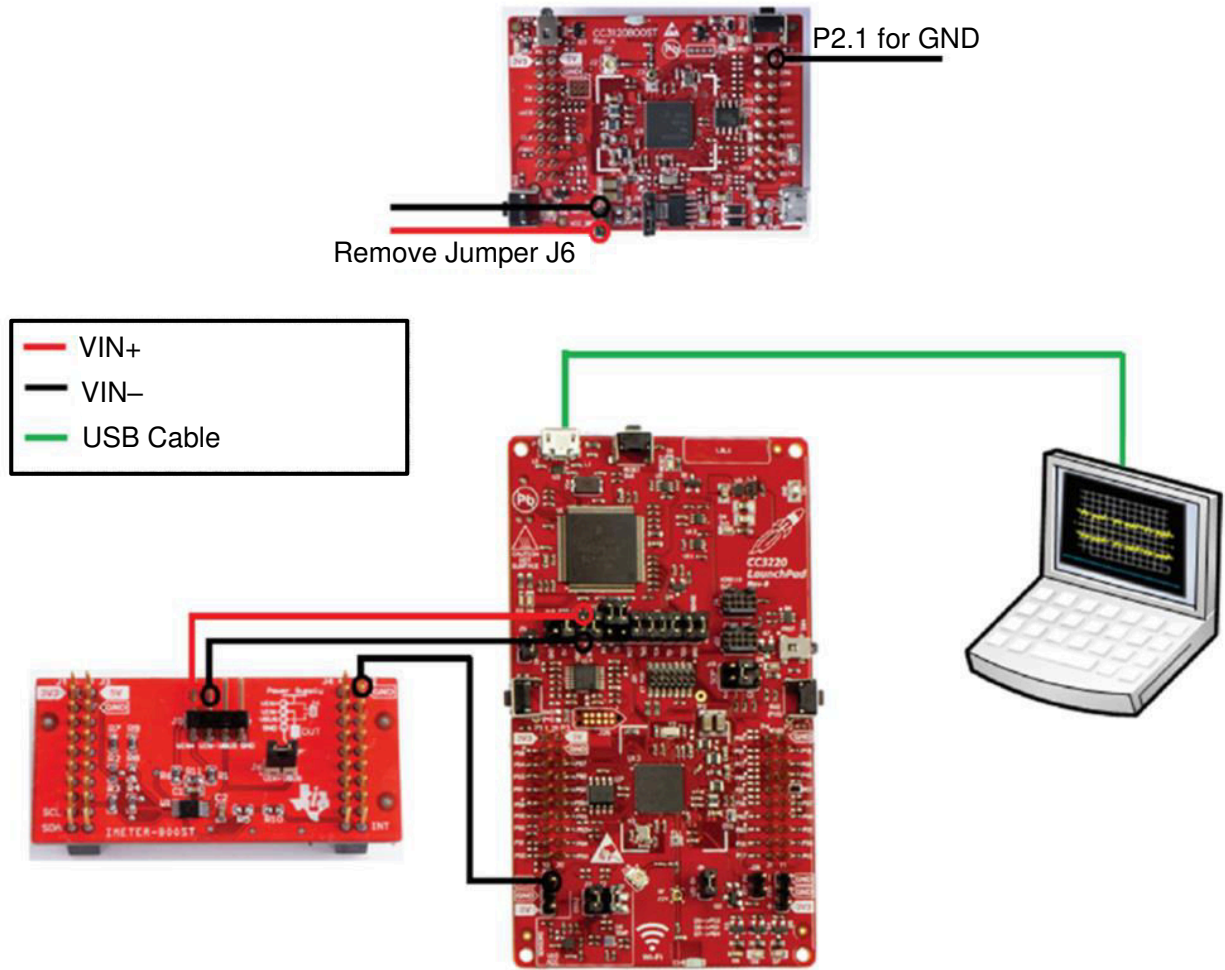


图 2-11. IMETER-BOOST 测试设置



4. 电流测量完成后，定位标记以选择要计算的波形。结果应显示位于两个标记之间的采样周期的平均电流消耗量。图 2-12 显示了一个示例。



图 2-12. 使用 IMETER-BOOST 器件测量的平均电流

### 2.4.3 使用示波器和电流探针测量电流消耗量

借助示波器测量电流的直接方法是使用电流探针并直接监测进入系统的电流。此设置仅适用于动态和运行模式下的电流测量（电流高于 10mA）。

所需工具：

- 示波器
- 带放大器的电流探针
- 外部 3.3V 电源
- 将外部 3.3V 电源连接到 SimpleLink™ 器件的短电缆
- PC

先决条件和注意事项：

- 确保为连接电流探针的通道选择全带宽。这是为了确保您在测量电流时不会错过任何毛刺或尖峰。
- 在将电流探针连接到电源线之前校准电流探针，并将电流探针上的电流方向标记（箭头）与通过电源线的电流方向对齐。
- TI 建议使用稳压直流电源而不是电池，因为这样可以消除可能因使用电量不足或有缺陷的电池而引起的变量。
- 检查您为外部电源而设置的电流限值。较低的电流限值可能会导致 SimpleLink™ 器件重置。
- 确保 `power_measurement` 示例代码在 SimpleLink™ 器件上成功刷写，然后再继续执行以下步骤。
- 校准将电源连接到器件的导线上的电压降（使用短线和多股线）。

步骤：

1. 对每个电路板进行修改。
  - **CC3135 BoosterPack™**：
    - a. 断开 USB 电缆并关闭 CC3135 BoosterPack™ 和 MSP432 LaunchPad™，移除跳线 J6 和 J8。
    - b. 将电源的正输出连接到 J6 的 VBAT\_CC，并使用 P2.1 作为 GND，如图 2-5 所示。
  - **CC3235x LaunchPad™**：
    - a. 在断开 USB 电缆并关闭 CC3235x LaunchPad™ 的情况下，移除跳线 J19。
    - b. 此外，移除跳线 J14 和 J24 以禁用板载 OP AMP 和 LED。这将降低开发套件的总电流消耗量。
    - c. 将电源的正输出连接到 J19，并使用 P2.1（或 J22）作为 GND，如图 2-6 所示。

2. 将电流探针连接到正极电源线，并确保电线中的电流方向与电流探针上的箭头对齐。
3. 使用 USB 电缆将 SimpleLink™ 器件连接到 PC。
4. 使用示波器执行代码并测量电流。作为参考，图 2-13 显示了完整的概图。

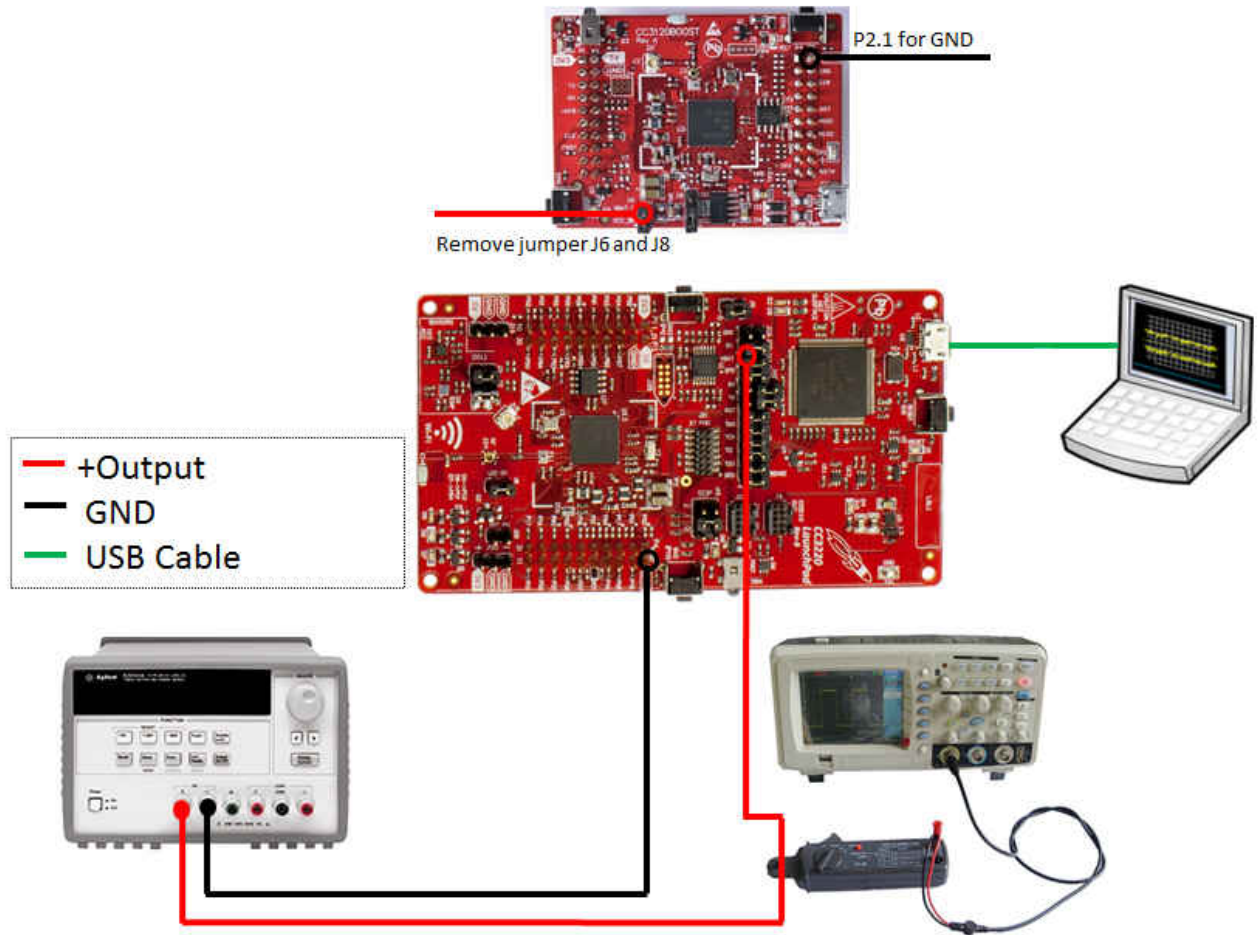


图 2-13. 具有电流探针测试设置的示波器

5. 电流测量完成后，定位标记以选择波形。

若要测量电荷曲线，请使用 *math* 函数执行一段时间内的积分。结果将是光标之间曲线的总电荷（以毫安秒或库仑为单位）。图 2-14 显示了一个示例。

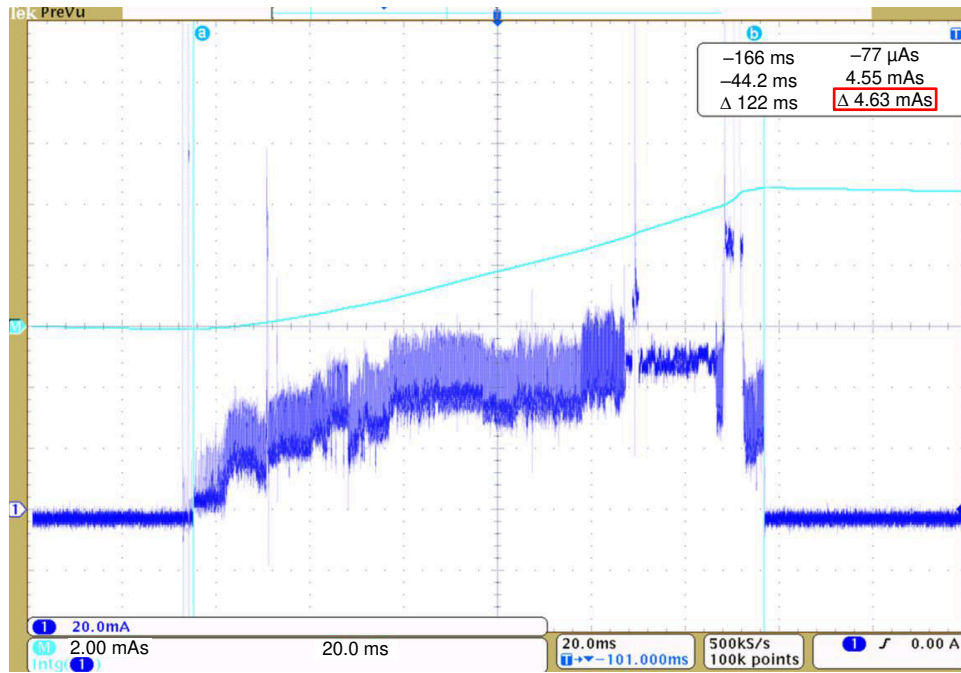


图 2-14. 使用电流探针测量电流

## 2.4.4 使用 XDS110 EnergyTrace™ HDR 测量电流消耗量

测量电流消耗量的另一种方法是使用 CCS 中包含的 EnergyTrace 技术。EnergyTrace™ 技术是一种基于电能的代码分析工具，可测量和显示应用的电能曲线。此设置适用于超低功耗和运行模式下的电流测量。

所需工具：

- XDS110 JTAG 调试探针 (TMDSEMU110-U)
- XDS110 EnergyTrace 高动态范围 (HDR) 调试探针插件 (TMDSEMU110-ETH)
- 14 引脚辅助电缆 (随 TMDSEMU110-U 器件提供)
- 用于辅助电缆的分线板 (随 TMDSEMU110-U 器件提供)
- 跳线
- PC

先决条件和注意事项：

- XDS110 EnergyTrace 高动态范围 (ETHDR) 为基本 XDS110 调试探针提供了增强 HDR EnergyTrace 功能。
- 通过堆叠外壳将 XDS110 ETHDR 连接到 XDS110 调试探针，请参见图 2-15。



图 2-15. XDS110 探针和 ETHDR 系统

- 分线板仅在使用 CC3135 BoosterPack™ 测量电流消耗量时使用。
- 确保 PC 上安装了最新版本的 CCS。
- 打开 CCS，依次转到“Window → Preferences → Code Composer Studio → Advanced Tools → EnergyTrace Technology”。在“Target Connection”下，将“Connection”配置为 XDS110，将“Voltage”配置为 3300mV。此外，选中“Raw data to CSV file”旁边的框。图 2-16 显示了指定的字段。



图 2-16. EnergyTrace™ 设置

- 确保 `power_measurement` 示例代码在 SimpleLink™ 器件上成功刷写，然后再继续执行以下步骤。

步骤：

1. 对每个电路板进行修改。

- CC3135 BoosterPack™：
  - a. 断开 USB 电缆并关闭 CC3135 和 MSP432™ 器件，移除跳线 J6 和 J8。
  - b. 将 BoosterPack™ 上 VBAT\_CC 和 P2.1 的跳线分别连接到分线板上的 TGT SUPPLY OUT 和 GND，如 [图 2-17](#) 和 [图 2-18](#) 所示。
  - c. 最后，将 14 引脚辅助电缆连接到分线板上。

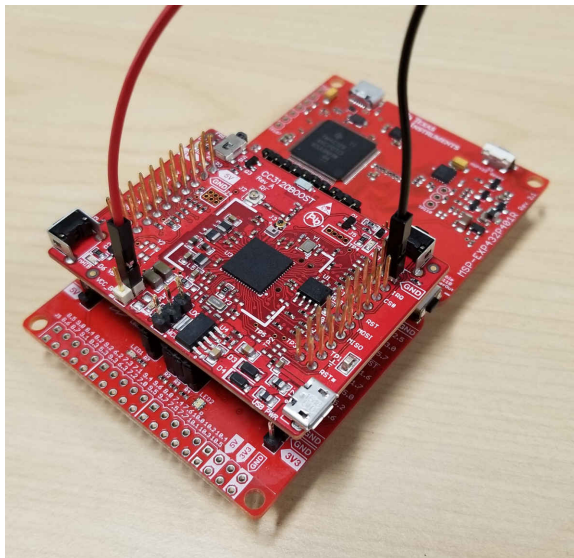


图 2-17. XDS110 ETHDR 连接到 CC3135 器件

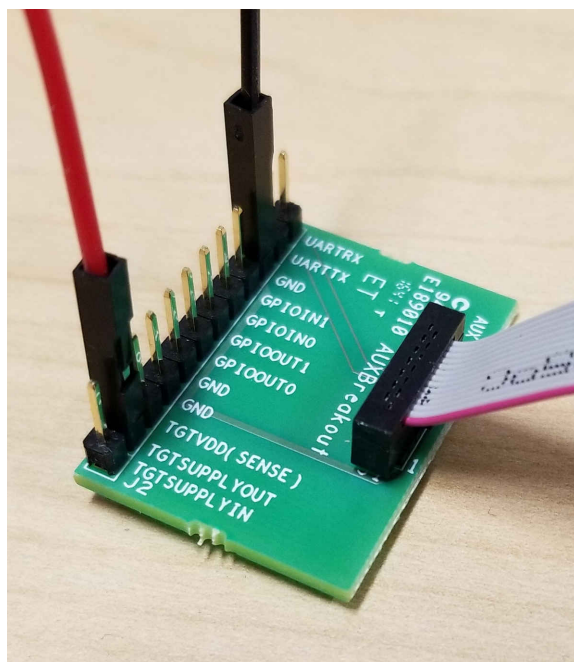


图 2-18. 分线板连接

- CC3235x LaunchPad™ :
  - a. 在断开 USB 电缆并关闭 CC3235x LaunchPad™ 的情况下，移除隔离块接头两端的跳线。
  - b. 此外，移除跳线 J14 和 J24 以禁用板载 OP AMP 和 LED。这将降低开发套件的总电流消耗量。
  - c. 将 14 引脚辅助电缆连接到 J7，如图 2-19 所示。

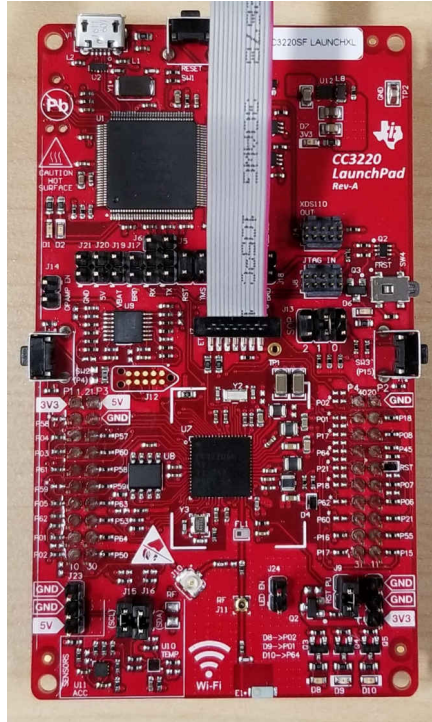


图 2-19. XDS110 ETHDR 连接到 CC3235 SF 器件

2. 将 14 引脚辅助电缆的另一端连接到 XDS110 调试探针的 AUX 端口，如图 2-20 所示。然后，使用 USB 电缆将 XDS110 调试探针连接到 PC。

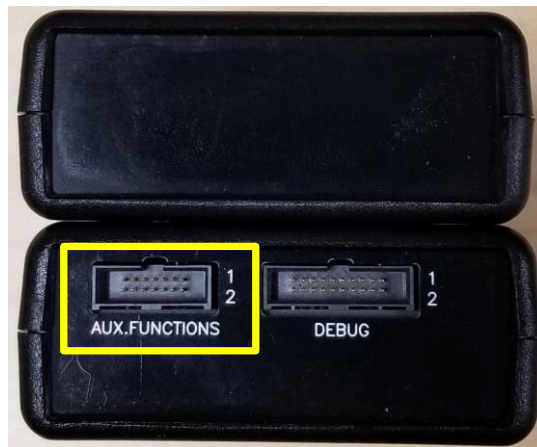


图 2-20. XDS110 辅助接口

3. 点击 CCS 工具栏中带有 EnergyTrace 标识的蓝色图标，启用 EnergyTrace 工具，如图 2-21 所示。



图 2-21. EnergyTrace™ 和 CCS 工具栏

4. 测量电流消耗量。

- CC3135 BoosterPack™ :
  - a. 点击“EnergyTrace Technology”窗口中的绿色“Start”图标，启动 EnergyTrace™ 捕获。
  - b. 然后，使用第二条 USB 电缆将 MSP432 LaunchPad™ 连接到 PC 以执行代码。
- CC3235x LaunchPad™ :
  - a. 点击“EnergyTrace Technology”窗口中的绿色“Start”图标，启动 EnergyTrace™ 捕获并执行代码。

#### 备注

- 可以使用主视图中的秒表图标更改捕获的持续时间。
- 若要在跟踪捕获正在进行时停止跟踪收集，请点击“Pause”图标而非“Start”图标。

5. 作为参考，图 2-22 和图 2-23 显示了 SimpleLink™ 器件和 XDS110 系统的测试设置。



图 2-22. XDS110 系统的 CC3135 器件测试设置



图 2-23. XDS110 系统的 CC3235x 器件测试设置



测量完成后，可以在“EnergyTrace Technology”窗口中查看平均电流消耗量值。测得的电流波形可以在“Current”窗口中查看，如图 2-24 所示。EnergyTrace 没有可用于选择测量的特定时间范围的标记。或者，可以点击“EnergyTrace Technology”窗口中的“Save”图标将电能配置保存为 CSV 文件。

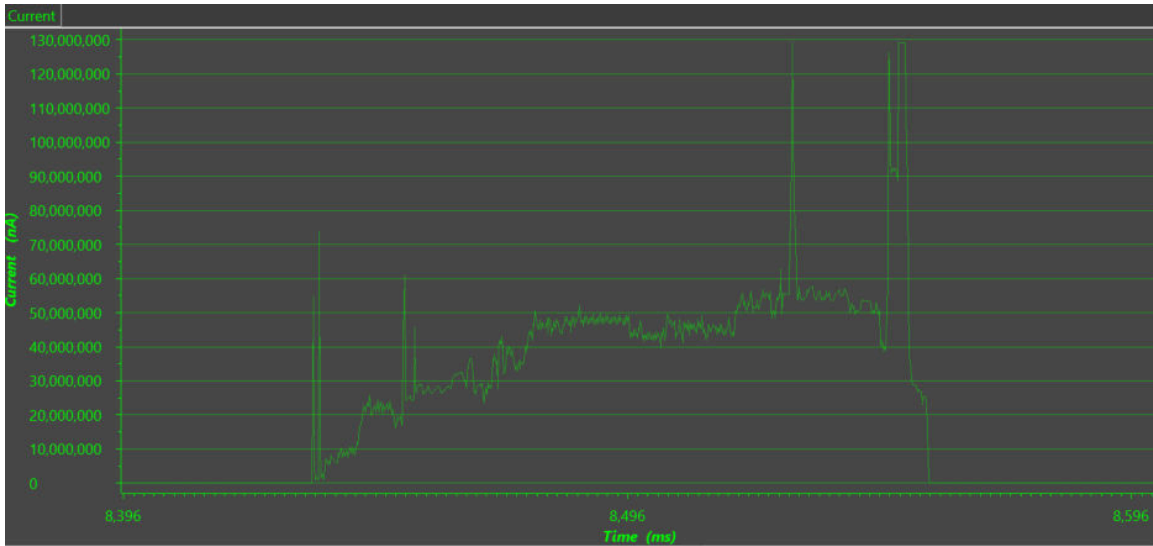


图 2-24. 采用 EnergyTrace™ 测量的平均电流

## 2.5 测试和结果

以下各节列出了测试结果。

### 2.5.1 低功耗模式电流测量

以下各节介绍了 CC3135 BoosterPack™ 和 CC3235SF LaunchPad™ 在低功耗模式下的电流测量。为实现精确的测量，使用了 Keysight N6705B 直流电源分析仪。CC3135 BoosterPack™ 和 CC3235SF LaunchPad™ 的供电电压均为 3.3V。

### 2.5.1.1 休眠模式下的电流测量

图 2-25 和图 2-26 显示了当 CC3135 和 CC3235SF 器件处于休眠模式时所消耗的电流。测得的平均电流分别为 4.818 $\mu$ A 和 6.867 $\mu$ A。

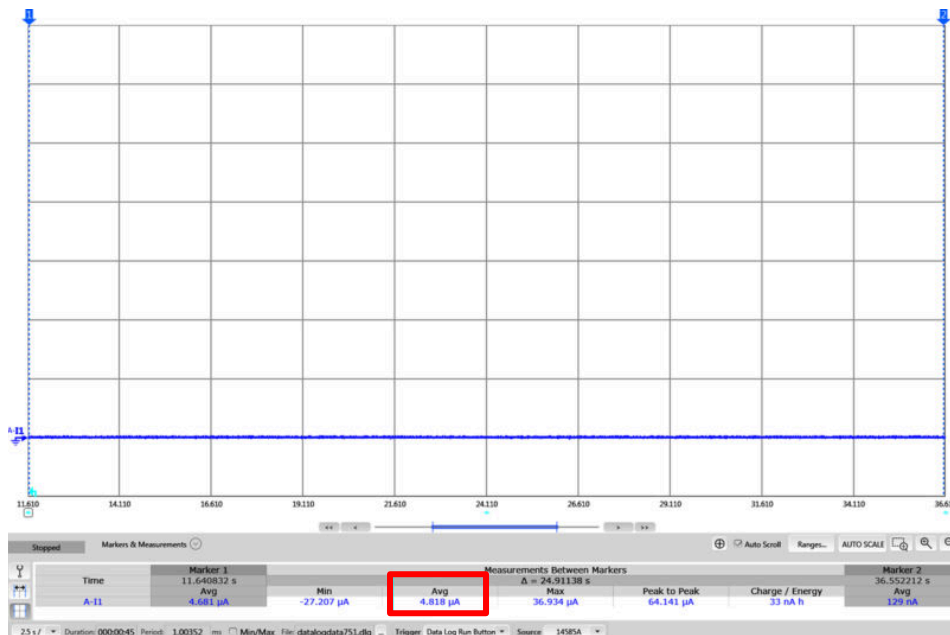


图 2-25. 处于休眠模式的 CC3135 器件

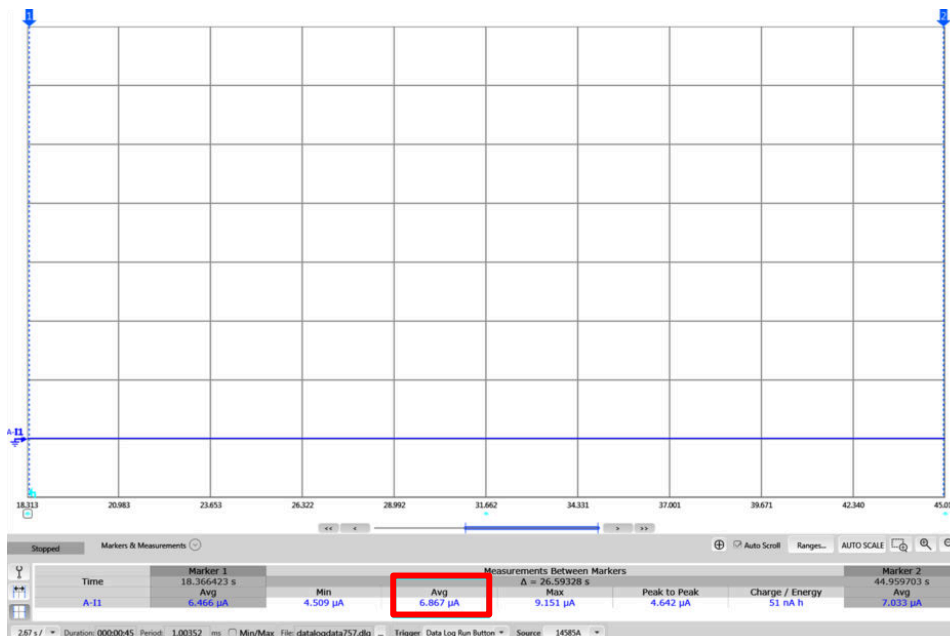


图 2-26. 处于休眠模式的 CC3235 SF 器件

### 2.5.1.2 LPDS 模式下的电流测量

图 2-27 和图 2-28 显示了当 CC3135 和 CC3235SF 器件处于 LPDS 模式时所消耗的电流。测得的平均电流分别为 116.478 $\mu$ A 和 134.127 $\mu$ A。在 power\_measure.c 的第 1540 行调用的 sl\_Start() 会配置启用 NWP 的内部寄存器，以管理其睡眠/唤醒事件。从以下测量中可以观察到的电流尖峰是由 NWP 周期性唤醒输出日志引起的。

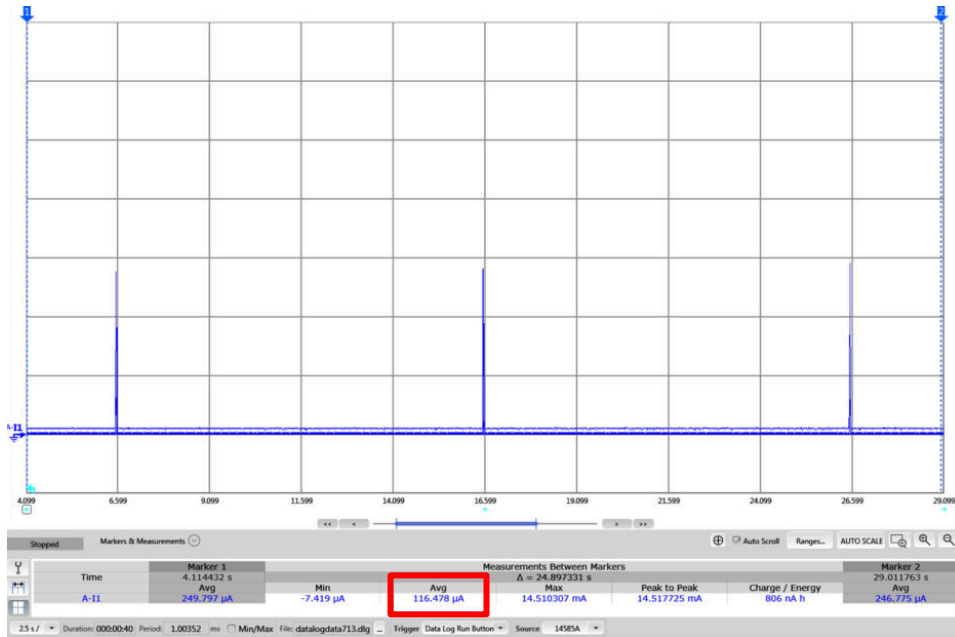


图 2-27. 处于 LPDS 模式的 CC3135 器件

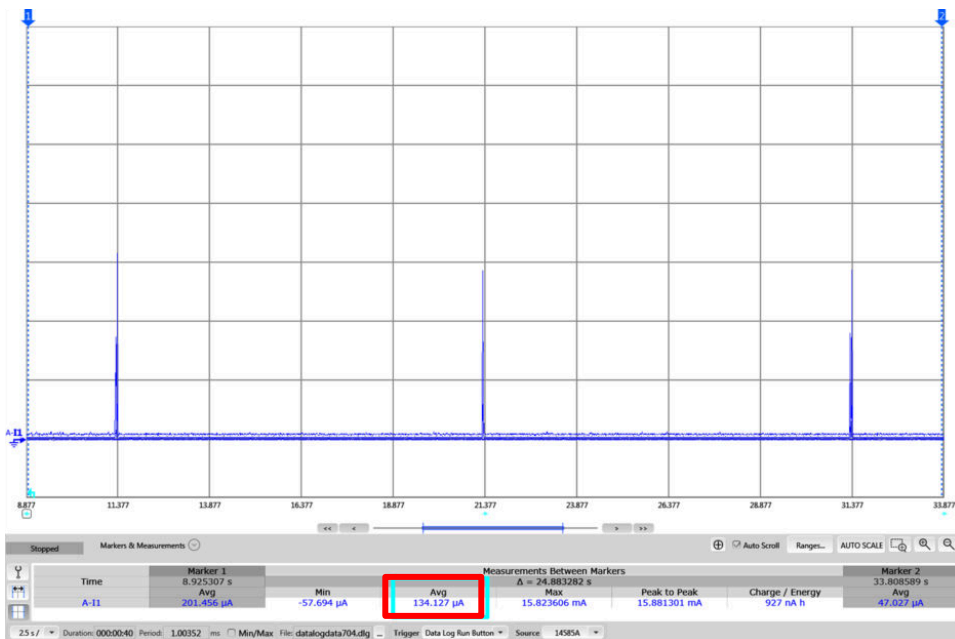


图 2-28. 处于 LPDS 模式的 CC3235 SF 器件

## 2.5.2 测试用例电流测量

以下各节介绍了 CC3135 BoosterPack™ 和 CC3235SF LaunchPad™ 在不同测试用例中的电流测量。为实现精确的测量，使用了 Keysight N6705B 直流电源分析仪。CC3135 BoosterPack™ 和 CC3235SF LaunchPad™ 的供电电压均为 3.3V。

### 2.5.2.1 收发器模式下的电流测量

图 2-29 和图 2-30 显示了当 CC3135 和 CC3235SF 器件置于收发器模式时消耗的电流。测得的平均电流分别为 398.289 $\mu$ A 和 1.02mA。

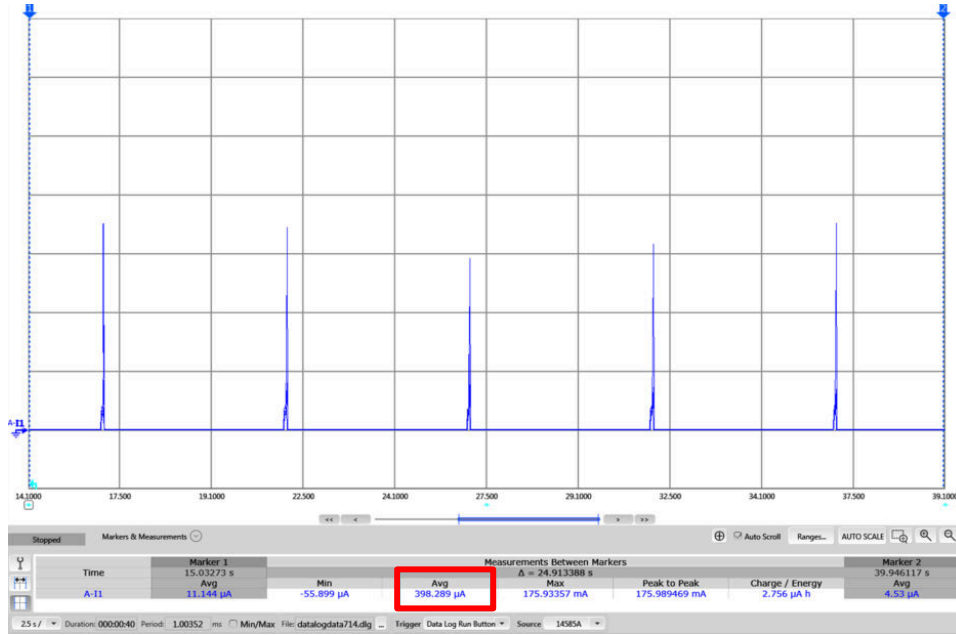


图 2-29. 处于收发器模式的 CC3135 器件

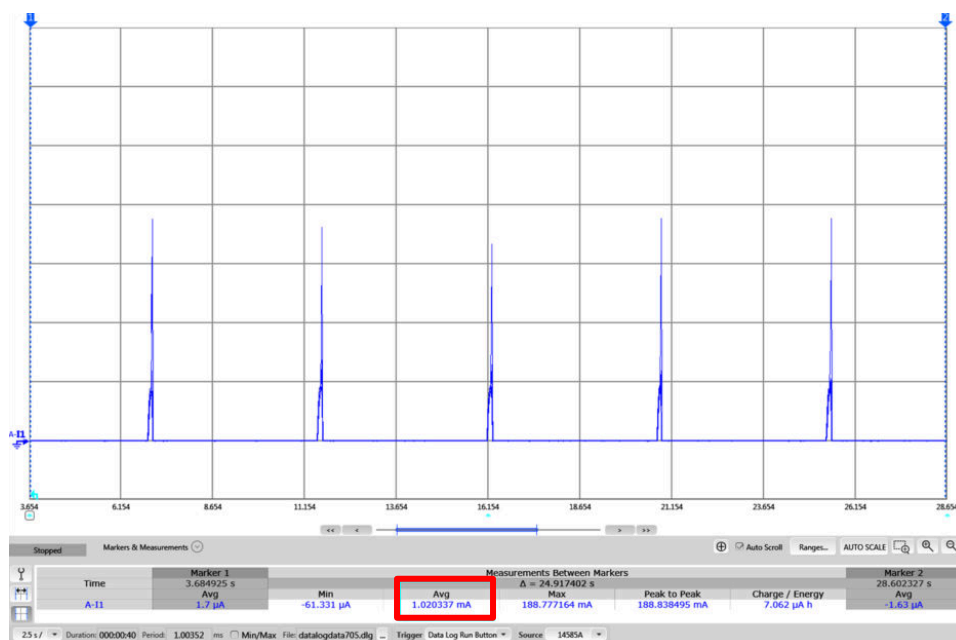


图 2-30. 处于收发器模式的 CC3235 SF 器件

图 2-31 显示了当 CC3235SF 器件处于收发器模式、从休眠模式唤醒、发送数据，然后再次进入休眠模式时的波形特写。此事务的平均电流消耗量为 37.19mA。

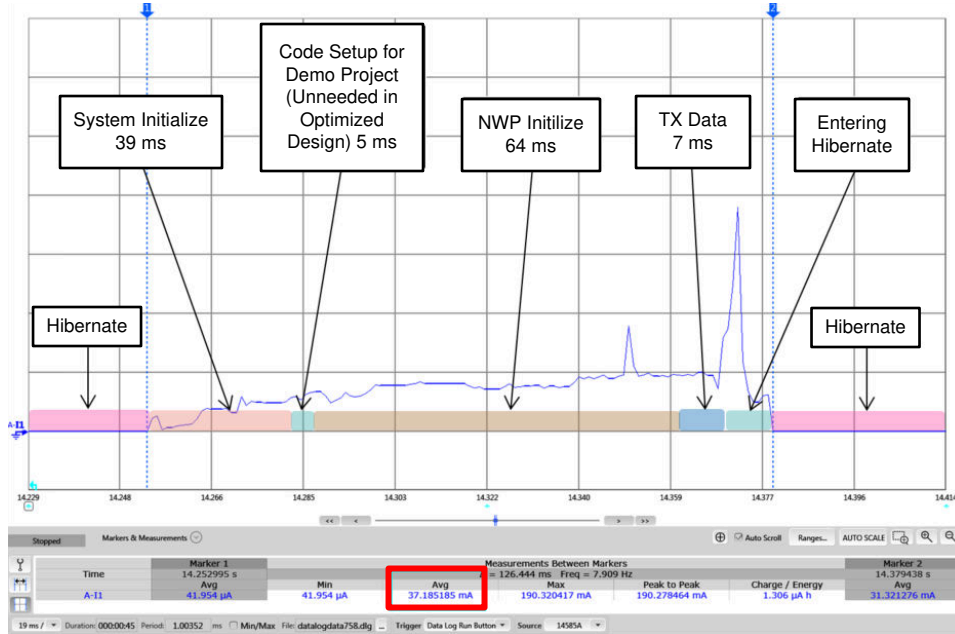


图 2-31. 收发器模式特写

### 2.5.2.2 间歇性模式下的电流测量

图 2-32 和图 2-33 显示了当 CC3135 和 CC3235SF 器件处于间歇性连接模式时所消耗的电流。测得的平均电流分别为 1.13mA 和 2.54mA。

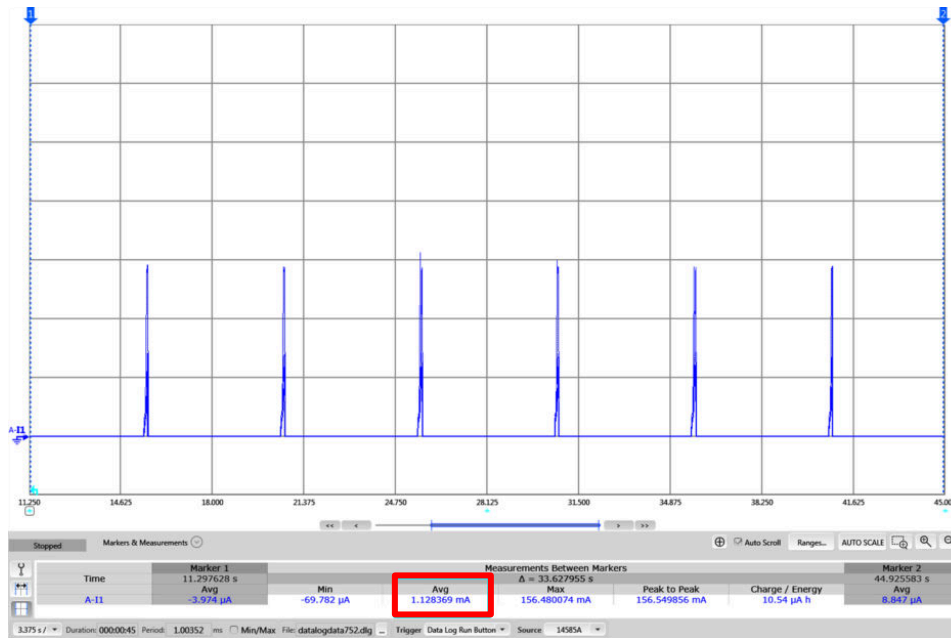


图 2-32. 处于间歇性连接模式的 CC3135 器件

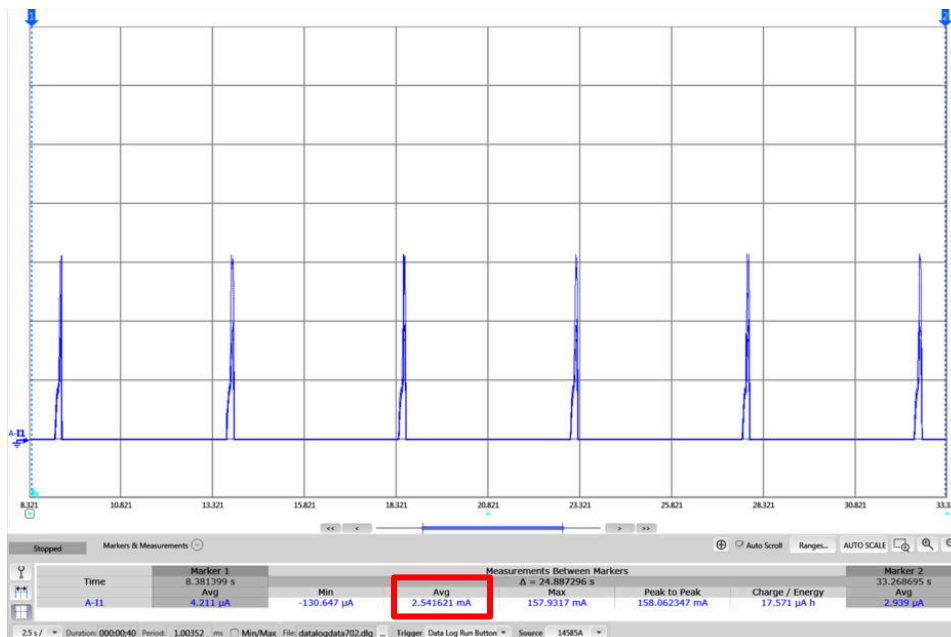


图 2-33. 处于间歇性连接模式的 CC3235 SF 器件

图 2-34 显示了 CC3235SF 器件处于间歇性连接模式时的波形特写。从休眠模式唤醒后，它会发送数据，并再次进入休眠模式。

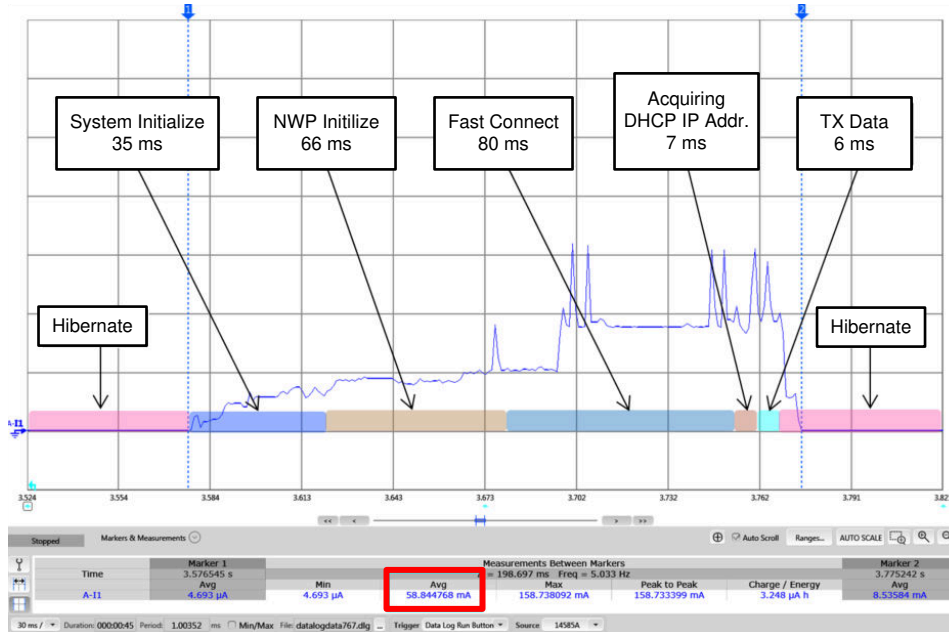


图 2-34. 间歇性连接模式特写

### 2.5.2.3 始终保持连接模式下的电流测量

图 2-35 和图 2-36 显示了当 CC3135 和 CC3235SF 器件处于间歇性连接模式时所消耗的电流。测得的平均电流分别为 567.98 $\mu$ A 和 767.87 $\mu$ A。

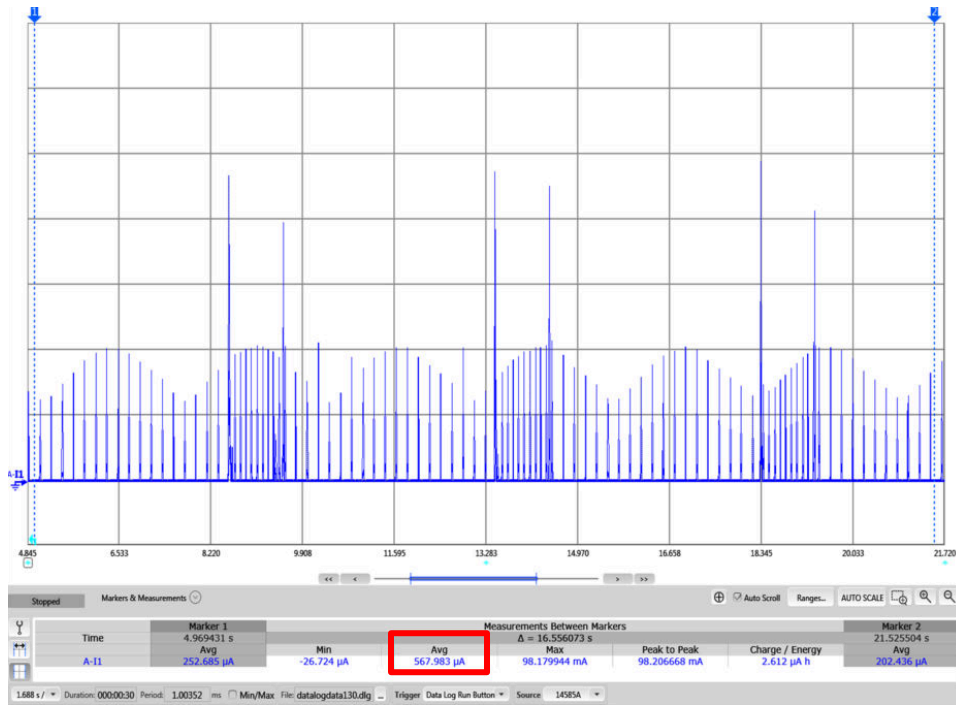


图 2-35. 处于始终保持连接模式 (UDP) 的 CC3135 器件

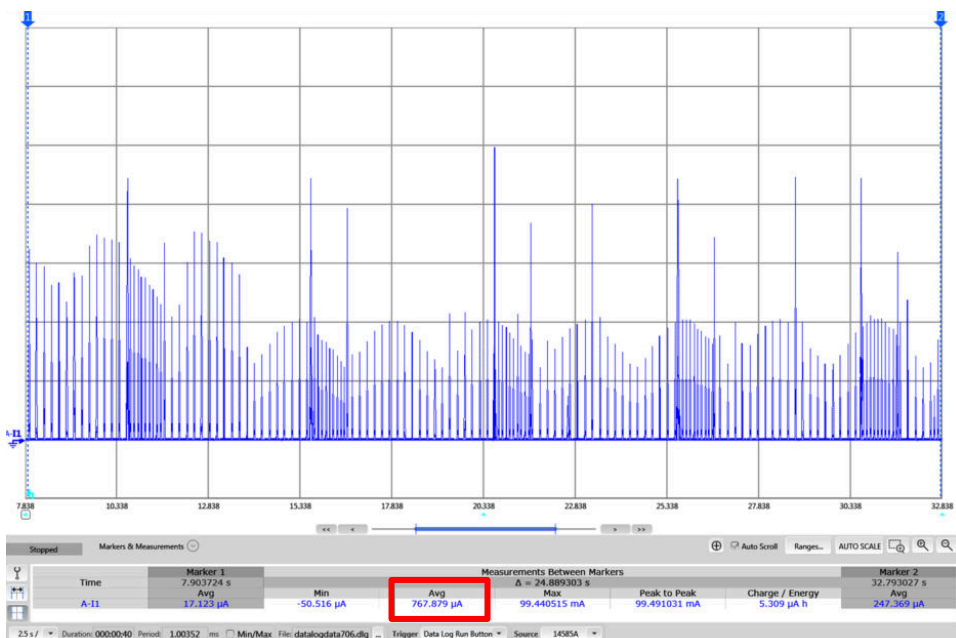


图 2-36. 处于始终保持连接模式 (UDP) 的 CC3235 SF 器件



图 2-37 显示了 CC3235SF 器件处于始终保持连接模式时的波形特写。从 LPDS 模式唤醒后，它会接收和发送数据，并再次进入 LPDS 模式。

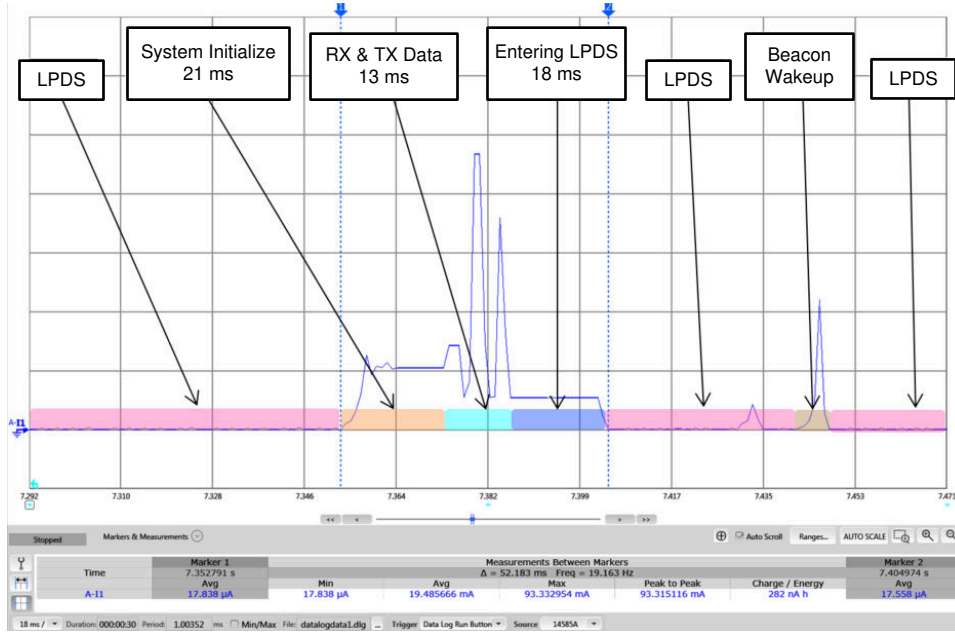


图 2-37. 始终保持连接特写

### 3 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

<b>Changes from Revision * (January 2018) to Revision A (August 2020)</b>	<b>Page</b>
• 更改了文档标题和整个文档以包括 CC3230 器件.....	<a href="#">3</a>
• 对节 1 进行了更新.....	<a href="#">3</a>

## 重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司