

AN13230

Kinetis KW45和K32W低功耗蓝牙 (Bluetooth LE) 的功耗分析

第1版 — 2023年9月18日

应用笔记

文档信息

信息	内容
关键字	KW45、K32W1、低功耗、低功耗蓝牙
摘要	本文提供了有关Kinetis KW45B41Z和K32W148无线微控制器 (MCU) 的功耗的信息



1 介绍

无线设备的功耗是高速发展的物联网 (IoT) 领域的一项关键指标。因此，整个行业正从功耗的角度出发，逐步改进和优化硬件，并制定了新的通信标准。智能蓝牙（也称为低功耗蓝牙或蓝牙LE）就是这些新标准的一部分，它专为实现长期（通常长达数年）的电池工作而开发。

Kinetic KW45和K32W1是支持低功耗蓝牙v5.2协议的基于无线通讯的MCU。理解本文内容的前提条件是读者已充分了解低功耗蓝牙协议，并掌握关于Arm MCU架构和无线通讯基础的基本知识。

2 首字母缩略词和缩写

[表1](#)定义了本文档中使用的首字母缩略词和缩写。

表1. 首字母缩略词和缩写

缩写	说明
ADC	模数转换器
ADV	广播
Arm	高级RISC计算机 (RISC - 精简指令集计算机)
Bluetooth LE	低功耗蓝牙
BPSK	二进制相移键控
BTLL	蓝牙链路层
CMP	比较器模块
DAC	数模转换器
DC	直流
DSM	深度睡眠模式
DUT	被测设备
ESR	等效串联电阻
FRDM	自由开发板
GAP	通用访问配置文件
GFSK	高斯频移键控
GPIO	通用输入/输出
IEEE	电气和电子工程师协会
IoT	物联网
ISM	工业、科学和医学频段
LE	低功耗

表1. 首字母缩略词和缩写 (续)

缩写	说明
LL	链路层
LLS	低泄漏停止
LLWU	低泄漏唤醒单元
LPTMR	低功耗定时器
LPUART	低功耗UART
MBAN	医疗体域网
MCU	微控制器单元
NBU	窄带单元
O-QPSK	偏移正交相移键控
PC	个人电脑
PDU	协议数据单元
PMC	电源管理控制器
POR	上电复位
RTOS	实时操作系统
RX	接收
SAR	逐次逼近寄存器ADC
SCGC	系统时钟门控制寄存器
SIM	系统集成模块
SMPS	开关模式电源
SRAM	静态随机存取存储器
TMR	定时器
TSM	收发器序列管理器
TX	发送
UART	通用异步收发器
USB	通用串行总线
VLLS	极低泄漏停止
XCVR	收发器

3 低功耗蓝牙的功耗指标

下文列出了低功耗蓝牙的功耗测量标准：

- 用KW45-EVK或K32W1-EVK板完成一系列的电流测量
- 用低功耗（中心设备和外设）参考设计应用软件（类似于低功耗模式下的温度传感器）将设备设置为不同的电流测量模式。使用的修订软件是SDK PRC2候选版本（Release Candidate 2, RC2）（2022年8月1日）。
- CM33（核心主电源域）和NBU（核心无线电源域）可以在以下状态下处于活动状态：
 - 睡眠模式

- 深度睡眠模式
- 掉电模式
- 深度掉电模式
- CM33被唤醒（核心唤醒电源域）并执行系统初始化和一些预处理操作
- 收发器窄带单元（NBU）被唤醒并准备工作。如果软件允许，CM33可能会进入非活动模式。
- 收发器执行一个或多个RX/TX（接收/发送）序列
- CM33处理接收或发送的数据包
- 收发器返回到睡眠模式
- CM33进入低功耗模式（深度睡眠模式）

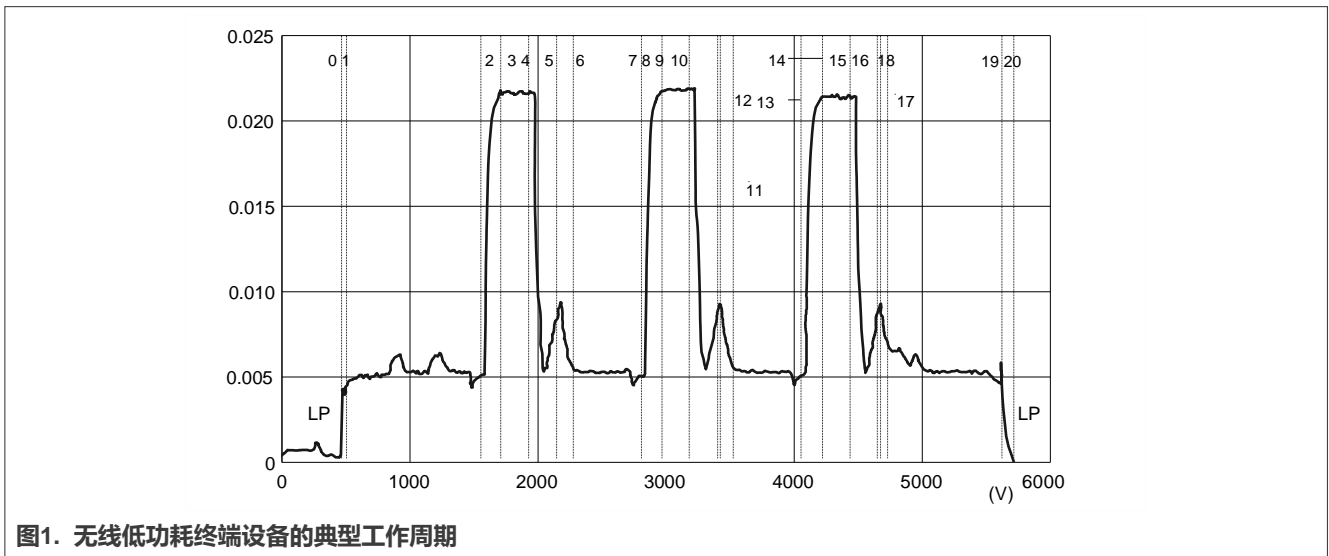


图1. 无线低功耗终端设备的典型工作周期

图1显示了设备在每个工作周期的电流消耗变化情况。

在上电时，系统执行所谓的上电复位，之后进行系统初始化。初始化完成后，系统进入低功耗模式。对于MCU和无线通讯设备，都有多种低功耗模式可选，但软件通常只会定义CM33和XCVR低功耗模式的组合，例如，CM33和NBU的深度睡眠模式。

表2中解释了图1中所显示的时序。

表2. 典型低功耗设备的时序

事件-外设	事件-外设
LP. SoC处于深度睡眠模式	10. 从TX（发送）状态转换到RX（接收）状态
0. SoC从深度睡眠模式中唤醒	11. XCVR处于RX（接收）活动状态
1. CM33运行：预处理	12. XCVR RX渐停
2. XCVR TX预热	13. CM33停止：从RX状态转换到TX状态
3. XCVR处于TX活动状态	14. XCVR TX预热
4. 从TX状态转换到RX状态	15. XCVR处于TX活动状态
5. XCVR处于RX活动状态	16. 从TX转换到RX状态
6. XCVR RX渐停	17. XCVR处于RX活动状态
7. CM33停止：从RX状态转换到TX状态	18. XCVR RX渐停
8. XCVR TX预热	19. CM33 RUN：后处理

表2. 典型低功耗设备的时序 (续)

事件-外设	事件-外设
9. XCVR处于TX活动状态	20. SoC进入深度睡眠模式
-	LP. SoC处于深度睡眠模式

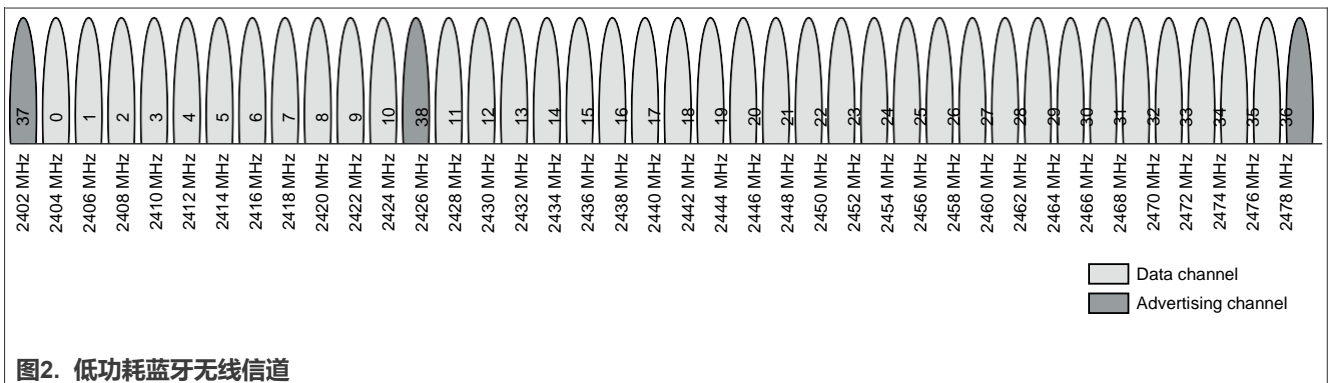
收发器从接收 (RX) 状态切换到发送 (TX) 状态的时间称为RX到TX的切换时间, 这是收发器的一个重要参数。

当无线通讯设备处于工作状态时, CM33会执行各种任务, 例如响应中断或控制各种外设。因此, 考虑到所有相关实体的平均电流, 应用的最佳指标是一段时间内的电流消耗。

3.1 低功耗蓝牙 (LE)

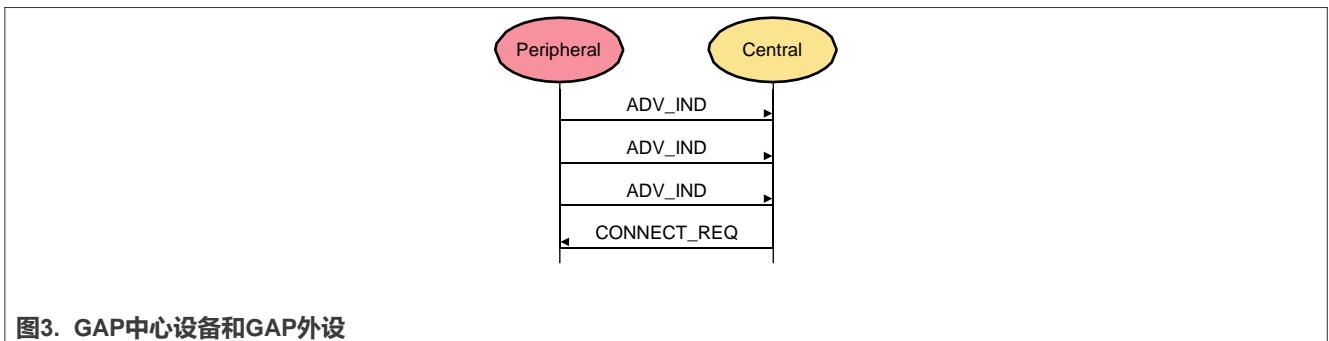
低功耗蓝牙 (Bluetooth LE) 是低功耗通信的理想候选技术, 也是汽车应用 (遥控钥匙扣和锚点) 及物联网 (IoT) 部署的较好选择。低功耗蓝牙在工业、科学和医疗 (ISM) 领域以2.4 GHz的频段工作, 使用高斯频移键控 (GFSK) 调制。带宽位周期乘积为0.5, 调制指数为0.5 (0.45和0.55之间)。

低功耗蓝牙使用40个1 MHz宽的信道, 每个信道相隔2 MHz, 或者使用2 MHz宽的信道进行长距离 (S=2 / S=8) 传输, 其中三个信道用于发送广播包, 37个信道用于数据交换。这些信道的编号为0到39。

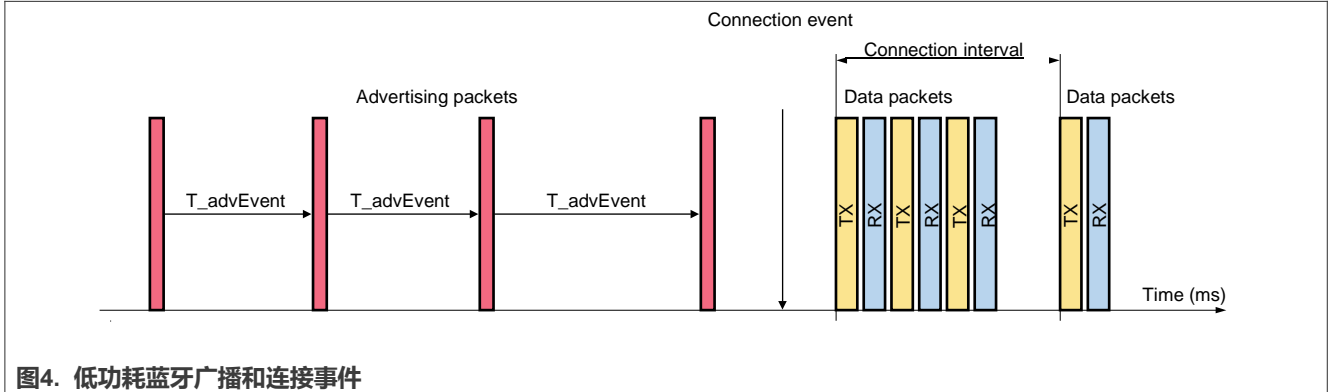


低功耗是通过低占空比的数据发送和/或接收, 以及通过使用短广播包和数据包实现的。一个异步且无连接的链路层可确保低延迟和快速的事务处理。

在通用访问配置文件 (GAP) 层, 低功耗蓝牙设备扮演的角色可能是GAP中心设备或GAP外设。更多细节, 请参见图3。



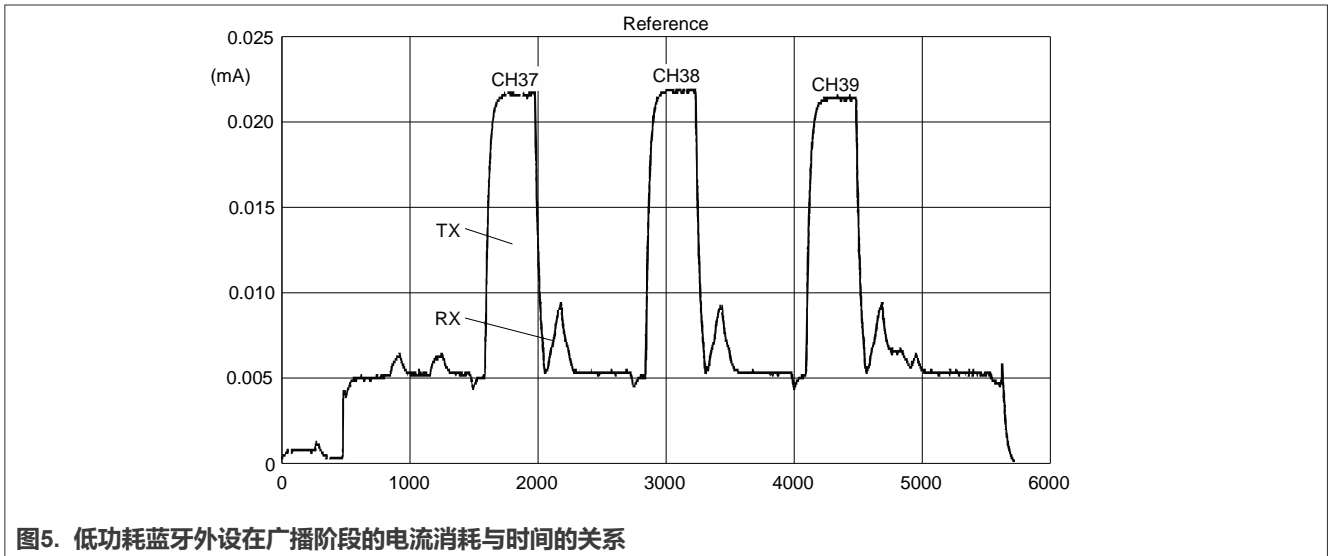
外设开始向中心设备发送广播数据。如果中心设备愿意与该外设建立连接，它会向广播者发送连接请求。在连接建立后开始数据交换。更多细节请参见图4。



根据低功耗蓝牙规范，广播数据包有四种类型：

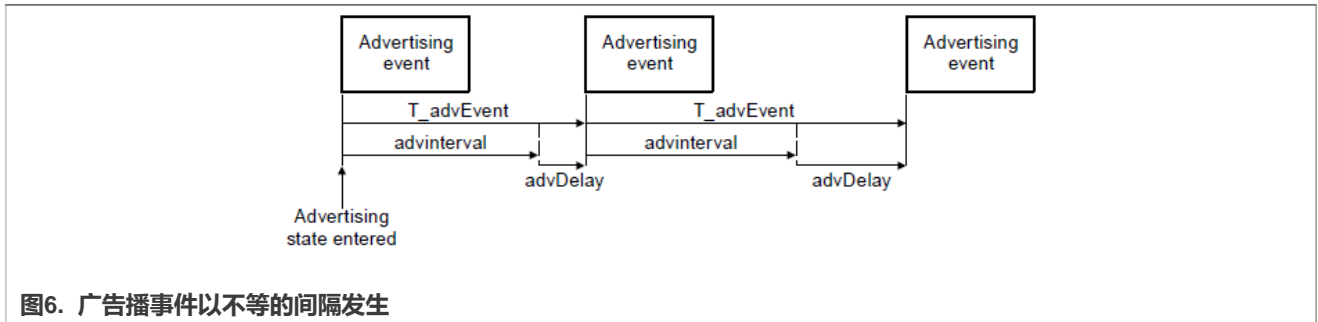
1. ADV_IND - 可连接的无定向广播
2. ADV_DIRECT_IND - 可连接的定向广播
3. ADV_NONCONN_IND - 不可连接的无定向广播
4. ADV_SCAN_IND - 可扫描的无定向广播（也称为ADV_DISCOVER_IND）

除了不可连接的广播数据包外，上述所有类型的广播数据包都使用“TX后接RX”（TX followed by an RX）序列，如图5所示。这是因为在发送广播数据包后，设备会等待来自对应设备的扫描请求或连接请求（如果有的话）。



当系统在处理某个典型的广播事件时，电流随时间的变化情况如图5所示。所有三个广播信道均被使用。对于每个信道，都先执行一个发送（TX）操作，然后进行接收（RX）操作。

根据低功耗蓝牙规范，低功耗蓝牙的另一个特点是，广播事件具有随机的时间成分。有关更多详细信息请参见图6。



方程:

$$T_{advEvent} = advInterval + advDelay$$

其中:

- $advInterval$: 0.625 ms的整数倍, 取值范围在20 ms到10.24 s之间
- $advDelay$: 链路层生成的伪随机值, 取值范围在0 ms到10 ms之间

因此, 广播事件的最小间隔是20 ms, 最大间隔为10.25 s。

低功耗蓝牙是专为超低功耗的电池供电设备而设计和实现的, 但是低功耗蓝牙设备的实际功耗在很大程度上取决于:

- 低功耗蓝牙的应用配置文件
- 应用程序的占空比
- TX (发送) 功率
- 低功耗模式的软件管理
- 电路板设计和布局

4 Kinetis的低功耗特性

KW45B41Z和K32W148 (本文中统称为KW45) 是超低功耗、高度集成的单芯片设备, 能够支持低功耗蓝牙 (低功耗蓝牙-1 Msps、2 Msps、500 ksps (LR S=2)、125 ksps (LR S=8)) 版本5.2和通用FSK (250 kbit/s、500 kbit/s、1000 kbit/s和2000 kbit/s) 的RF连接, 适用于便携式、极低功耗的嵌入式系统 (Z版本) 和汽车应用 (A版本)。KW45和K32W1可以作为主设备、从设备或它们的任意组合, 同时支持最多24个同步低功耗蓝牙连接。KW45和K32W1专为致力于连接嵌入式设备与智能手机的应用而设计, 以增强人机交互体验, 与云共享嵌入式数据, 或实现无线固件更新。

一种领先的汽车应用是数字钥匙, 智能手机可以作为汽车钥匙/智能FOB的替代品, 用于开锁和实现个性化驾驶体验。而且还可以在与人共享汽车时, 不需要钥匙的情况下提供, 选择和授权他人进入并使用汽车。

KW45和K32W1集成了一个兼容低功耗蓝牙5.2标准的无线电收发器, 在2.4 GHz ISM频段工作, 支持一系列的通用FSK, 一个Arm Cortex - M3+ (Cortex - M33) 处理器、高达1 MB的闪存和高达128 kB的SRAM, 低功耗蓝牙链路层的硬件和外设, 经过优化以满足目标应用的要求。KW45的射频部分经过优化, 只需要很少的外部元器件, 从而在印刷电路板上实现最小的射频封装。恩智浦提供了一个经过认证的低功耗蓝牙协议栈来支持KW45和K32W1。

通过Cortex - M3+ (Cortex - M33) 内核中代码执行的高效性和KW45及K32W1的多种低功耗工作模式, 可以实现极长的电池寿命。此外, 一个集成的DC-DC (直流-直流) 转换器可以实现很大的工作电压范围: 降压 (Buck) 模式和旁路模式下均为1.8 V至3.6 V。在降压模式下, DC-DC转换器允许KW45和K32W1通过单个纽扣电池供电, 显著降低了RX (接收) 和TX (发送) 的峰值电流消耗。此外在降压模式下, DC-DC转换器允许在整个可用电压范围 (1.8 V至3.6 V) 内, 使用单个碱性电池V至供电。集成的SYS_LDO稳压器的的工作电压范围为1.71 V至3.6 V。无线模拟设备的工作电压范围为1.2 V至3.6 V。无线PA的工作电压范围为1.1 V至2.4 V。

4.1 KW45对低功耗运行的硬件支持

Kinetic KW45和K32W1 SoC设计并构建了多种硬件特性, 使芯片可以在各种低功耗模式下工作。这些特性包括:

- CM33和NBU的多种电源模式, 包括内存保留模式的低泄漏
- 低功耗蓝牙链路层, 支持深度睡眠模式
- 外设模块时钟门控
- 多种外设休眠模式
- DC-DC转换器
- 收发器序列管理器 (TSM), 确保在没有RX/TX序列进行时收发器的模拟和数字模块不耗电
- 专用电源管理控制器 (PMC)
- 低功耗外设 (LPTMR, LPUART), 可以配置为唤醒源, 以退出特定的低功耗状态

软件负责配置所有硬件, 以实现应用所需的最佳电源方案。正如后面各章节所介绍, 芯片的低功耗模式是CM33和LL/数据包处理器的深度睡眠模式共同作用的结果。外设的时钟门控以及进入低功耗模式前的GPIO状态都由应用程序的开发人员负责。连接软件包提供了一些回调函数; 这些函数在进入低功耗模式前和退出低功耗模式后被调用。当系统处于空闲状态, 并且所有软件层都同意时, 系统将进入低功耗模式。每当发生同步或异步事件, 并需要被处理时, 系统将退出低功耗模式。

4.1.1 CM33和NBU的电源模式

PMC模块提供了多种电源选项, 允许用户根据应用程序要求的功能水平来完成功耗的优化和个性化设置。基于Arm架构的电源模式, 定义了以下四种电源模式:

1. 睡眠模式
2. 深度睡眠模式
3. 掉电模式
4. 深度掉电模式

从软件连接的角度来看, 以下所有模式都可以被认为与应用程序的类型相关:

- 深度睡眠 1 模式
- 深度睡眠 2 模式
- 掉电 1 模式
- 深度掉电 1 模式
- 智能电源切换 1 模式

有关所列的所有电源模式的详细信息, 请参见《KW45B41Z参考手册》(文档编号[KW45B41ZRM](#))。

4.1.2 链路层的电源模式

蓝牙链路层 (BTLL) 支持以下电源模式:

- 空闲
- 运行
- DSM

对于低功耗蓝牙, 连接软件包实现了适用于KW45和K32W1 SoC的13种低功耗模式, 见表3:

表3. 低功耗蓝牙应用的低功耗模式

深度睡眠模式 (如连接框架中所定义)	稳压器	RAM保留 (数据包 RAM和系 统RAM CM33)	核心主 电源域	核心唤 醒电源 域	核心RF 电源域	外设	NBU和 边缘锁 (Edge Lock)	时钟
深度睡眠模式1	所有稳压器处于低功耗模式	保留裸机上的所有RAM	深度睡眠	深度睡眠	深度睡眠	禁用	深度睡眠 (禁用)	OSC32K 启用
深度睡眠模式2 (默认)	所有稳压器处于低功耗模式	保留16 KB的RAM, 保留所有无线通讯RAM	深度睡眠	深度睡眠	深度睡眠	禁用	禁用	OSC32K 启用
掉电模式1	所有稳压器处于低功耗模式	保留16 KB的RAM, 保留所有无线通讯RAM	掉电	掉电	掉电	禁用	禁用	FRO32K 启用
深度掉电模式1	LDO_CORE和DC-DC关闭, LDO_SYS处于低功耗模式	保留8KB的RAM, 不保留无线通讯RAM	深度掉电模式	深度掉电模式	深度掉电模式	禁用	禁用	FRO32K 启用
智能电源切换DPD1	所有稳压器关闭	保留8KB的RAM, 不保留无线通讯RAM	深度掉电模式	深度掉电模式	深度掉电模式	禁用	禁用	FRO16K 启用

注: 低功耗蓝牙使用了一个通用无线电收发器数字模块, 即收发器序列管理器 (TSM), 用于控制按顺序打开/关闭RX/TX (接收/发送) 操作所需的模拟稳压器和电路, 使这些电路只在RX/TX (接收/发送) 期间消耗功率。

有关更多详细信息请参考《KW45K32W1连接框架参考手册》(文档编号KW45K32W1_CONNFWKRM)。要获取本文档, 请联系当地的恩智浦现场应用工程师 (FAE) 或销售代表。

4.1.3 XCVR电源模式

KW45和K32W1收发器与CM33和CM3/NBU相耦合。每当CM33进入低功耗模式时，收发器的模拟稳压器就会断电。根据低功耗模式的不同，数字收发器逻辑会被电源门控 (power-gated) 或保持其状态。

4.1.4 DC-DC (直流-直流) 转换器

DC-DC模块是一种开关模式电源 (SMPS)，它有两种工作模式：

- 降压 (Buck) 模式： $V_{in} = 1.71\text{ V}$ 至 3.6 V
- 旁路 (Bypass) 模式： $V_{in} = 1.71\text{ V}$ 至 3.6 V

该模块可以通过内部寄存器配置为以“降压” (Buck) 模式运行： V_{dcdc_in} 为输入， $DCDC_LX$ 为DC-DC输出，CM33处于运行模式，此时外设被禁用。

关于DC-DC转换器的详细信息，请参见《MKW4xZ/3xZ/3xA/2xZ DC-DC电源管理》(文档编号[AN5025](#))。

4.1.5 GPIO、模拟引脚和时钟门控

为了降低功耗，恩智浦实现了一种时钟门控机制。例如，当某个外设处于闲置状态时，可以通过SIM模块中的SCGCx寄存器来关闭它。时钟门控适用于每个外设，包括GPIO模块。剪除外设的时钟，可确保内部外设电路不会切换状态，因此除了漏电流外，不会耗电。

注：复位后，时钟门控位会被清除，这意味着在使用任何外设之前，必须设置相应的时钟门控位，否则，对外设寄存器的任何访问都可能导致硬件故障。

注：要关闭一个外设的时钟 (门控关闭)，必须在关闭时钟之前先关闭该外设。

用户应用程序必须在设备进入睡眠状态之前以及退出低功耗状态之后，控制并设置GPIO端口的状态。连接软件提供了一些回调函数，可以在设备进入低功耗状态之前和唤醒之后调用。

在模拟引脚方面，该设备有多个可选择参考电压的模拟模块。主要模块有16位SAR模数转换器 (ADC) 和比较器模块 (CMP)。电路板设计应考虑芯片模拟引脚并合理使用它们。

外部模拟输入通常与数字I/O共享。为了在有噪声存在或源阻抗较高的情况下提高性能，建议在这些输入上使用电容。电容应尽可能靠近芯片的模拟引脚放置。

更多细节请参考《KW45参考手册》(文档编号[KW45RM](#)) 和《K32W1480参考手册》(文档编号[K32W1480RM](#))。

4.2 低功耗运行的软件配置

本节介绍低功耗运行所需的软件配置。

4.2.1 低功耗蓝牙应用配置

连接软件包提供多种低功耗蓝牙演示工程。低功耗 (LP) 工程用于进行电流分布测量。该工程可在以下相对路径 (PRC2 RC2 2022年8月) 下找到：

```
<installation_path><SDK revision>\boards\kw45b41zevk\wireless_examples\reference_
design\bluetooth\lp\bm\iar
```

或者

```
<installation_path><SDK revision>\boards\k32w148evk\wireless_examples\reference_
design\bluetooth\lp\bm\iar
```

为了设置设备以进行广播和连接电流测量，KW45或K32W1 SDK的参考设计应用文件夹中包含了低功耗 (LP) 工程 (基于低功耗模式的温度传感器)。它需要做一些更改才能使应用程序进入和退出低功耗模式。使用了 BareMetal (裸机) 或FreeRTOS版本的应用程序。

有关更多信息请参考《KW45/K32W1低功耗连接参考设计用户指南》(文档编号KW45_K32W_LPCDUG)，了解如何设置不同的低功耗模式。该文档可在SDK文档包中使用MCUXpresso SDK Builder下载。

[第4.2.1.1节](#)介绍了不同的构建方式，以将KW45-EVK或K32W1-EVK设置为不同状态：

低功耗应用：

- 广播和连接事件：(默认软件设置为+10 dBm)
 - MCU深度睡眠模式2，保留所有RAM，NBU深度睡眠模式，RF输出功率 = +10 dBm (默认)
- 深度睡眠模式2 (DSM2)

KW45-EVK或K32W1-EVK板用于测量电流消耗。它是使用低功耗二进制文件 (广播事件和连接事件) 进行编程的。

烧写电路板的两种不同方式：

- 通过将USB线连接到PC来使用EVK上的嵌入式MCU链接
- 使用J-Link for Arm作为烧录/调试工具



图7. J-Link for Arm烧录工具/调试器

4.2.1.1 软件的准备

请参考《KW45/K32W1低功耗连接参考设计用户指南》(文档编号KW45_K32W_LPCDUG)，来设置本报告中测量的所有不同模式。该文档可在SDK文档包中使用[MCUXpresso SDK Builder](#)下载。更多细节请参见[表4](#)。

表4. SDK软件支持的深度睡眠模式

深度睡眠模式	稳压器	内存的保留	核心主电源域	核心唤醒电源域	核心RF电源域	外设	NBU和边缘锁 (Edge Lock)	时钟
深度睡眠模式2	所有调节器都处于低功耗模式	保持留16KB的RAM 保留所有无线通讯RAM	深度睡眠	深度睡眠	深度睡眠	禁用	深度睡眠 (禁用)	OSC32K (启用)

5 功率测量和时序分析

本节列出了以下几个方面的详细信息：

- 设置测试环境和被测设备 (DUT)
- 测量电流消耗
- 广播扩展
- 扫描扩展
- 信道选择算法1和2
- 高占空比广播
- 报告

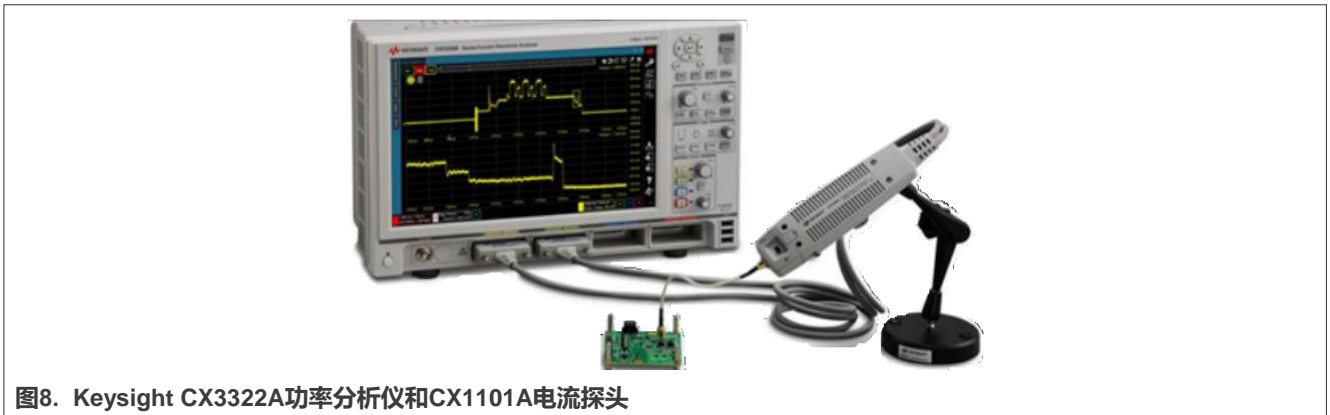
5.1 设置测试环境和被测设备 (DUT)

本节说明了如何设置测试环境，需要哪些硬件工具和电路板，以及在进行测量之前必须完成的所有步骤。

所有的测量都使用Keysight进行：

- 功率分析仪：CX3322A
- 电流探头：CX1101A

有关更多详细信息请参见[图8](#)。



用一个外部电源为KW45-EVK或K32W1-EVK板供电，功率分析仪模块1用作安培表。电源被设置为输出3.6 V直流信号。需要一对优质电缆，一个用于给电路板供电，另一个用于测量电流。为了防止意外的电压波动、功率损耗或电路板复位，功率分析仪和EVK板之间的连接必须完美。有关更多详细信息请参见[图9](#)。

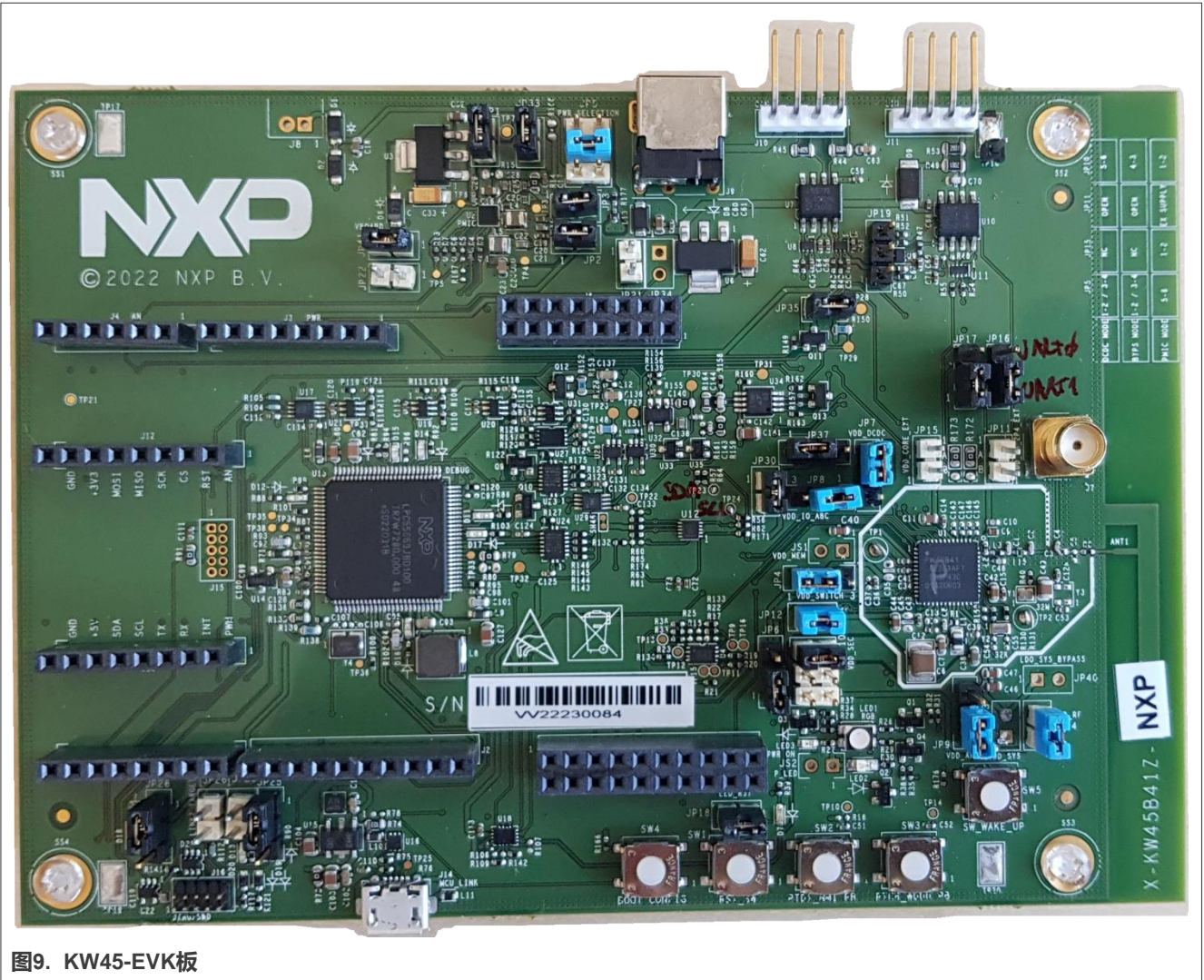


图9. KW45-EVK板

使用KW45-EVK或K32W1-EVK板进行电流测量时有两种设置模式：

- 旁路模式
- 降压模式

有关更多详细信息，请参见表5、图10和图11。

表5. 连接器 (Header) 的功耗测量点

电流信号名称	连接器编号
Ireg	JP5:3-4
Idd_LDO_CORE	JP12:1-2
Idd_RF	JP14:1-2
Idd_ANA	JP9:1-2
Idd_dcdc / Idd_IO_D	JP7:1-2
Idd_IO_ABC	JP8:1-2
Idd_Switch	JP4:1-2

表5. 连接器的功耗测量点 (续)

电流信号名称	连接器编号
Idd_PA_2p4GHz	JP11:1-2

注: $I_{reg} = I_{dd_LDO_Core} + I_{dd_RF} + I_{dd_ANA} + I_{dd_dcdc} + I_{dd_IO_ABC} + I_{dd_Switch} + I_{dd_PA_2p4GHz}$

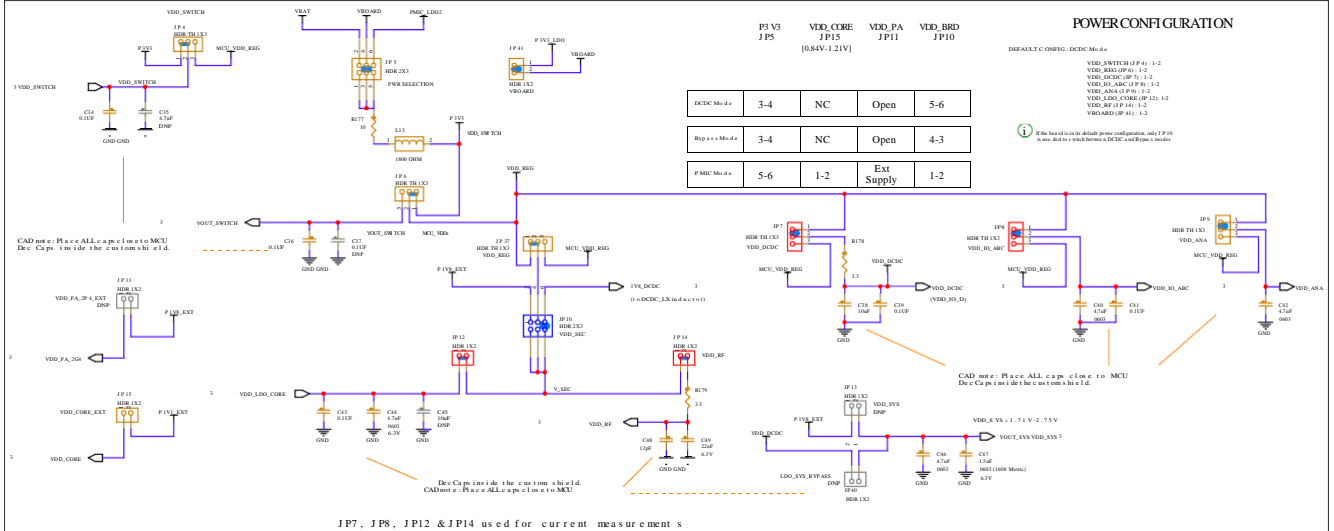
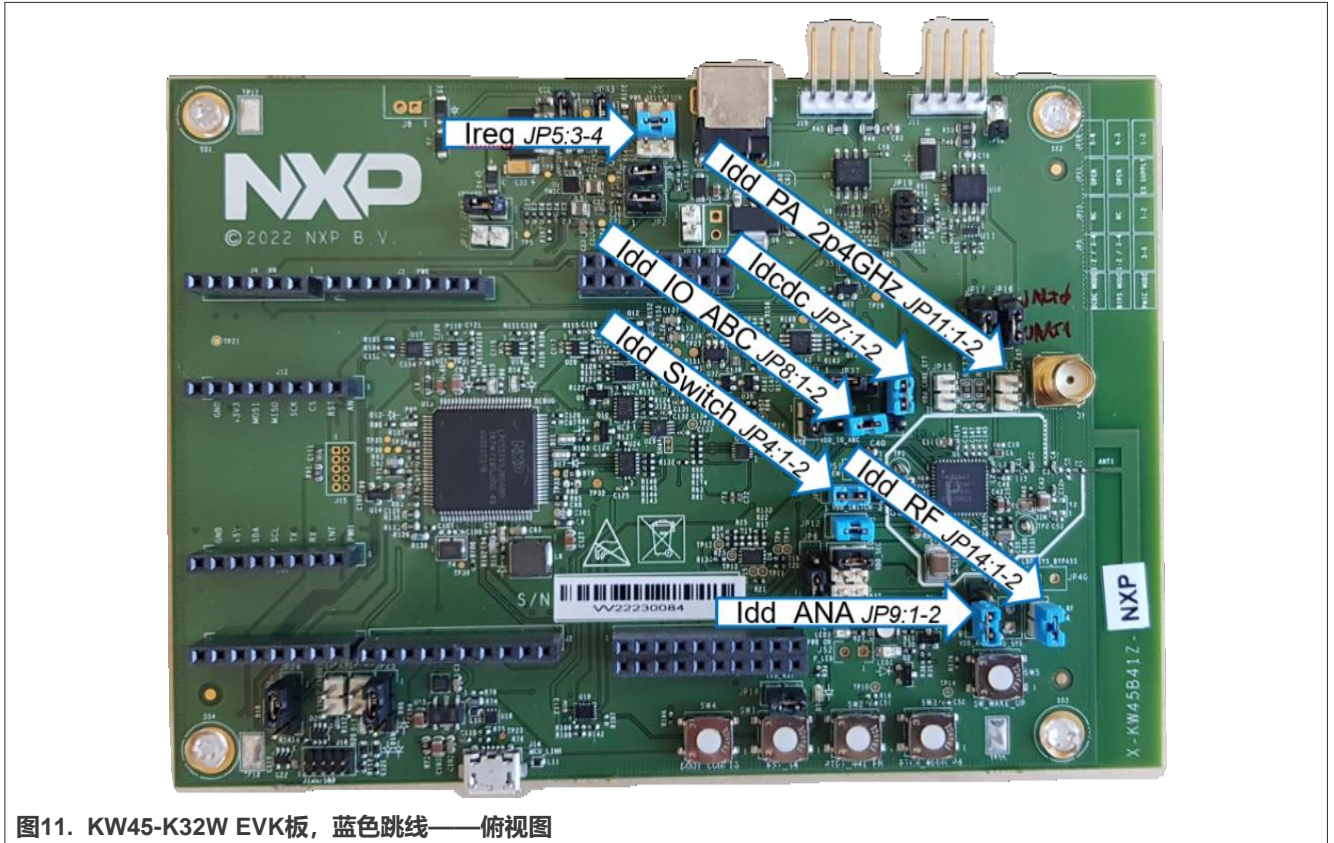


图10. KW45-EVK板原理图, 电流连接器位置



5.1.1 硬件的准备

将EVK板设置为防止在每个低功耗蓝牙事件启动时出现电流峰值过低的情况。为此，将一个铁氧体磁珠 (BLM15HD182SN1) 和一个3.3欧姆串联电阻连接到Vbat导线上。Vdd_dcdc (在降压模式下有效) 和 Vdd_RF均连接一个3.3欧姆串联电阻，参见图12。

这些元器件使电流峰值趋于平缓，但也会影响总功耗。这意味着I_{bat}电流消耗的曲线不会很尖锐。如果您想分析电流消耗的不同阶段，可以拆除这四个元器件。

在本应用笔记中，广播事件、连接事件和扫描事件期间的电流消耗测量都是在没有串联电阻的情况下进行的。

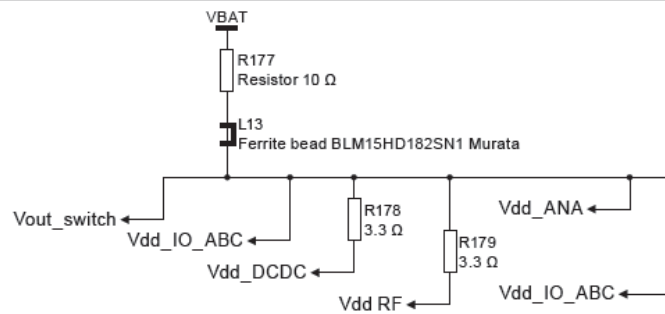


图12. 限制电流峰值的串联电阻

图13和图14显示了广播事件期间的I_{bat}波形，分别为已连接串联电阻和未连接串联电阻的情况：

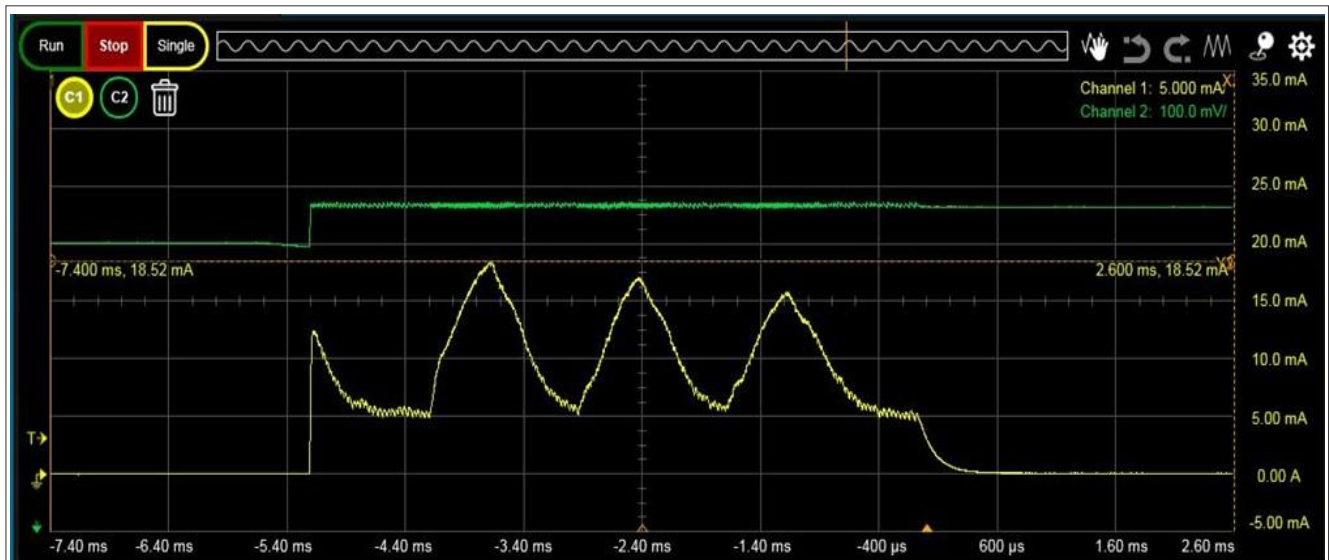


图13. 连接串联电阻时广播事件期间的I_{bat} (黄色曲线) (默认硬件设置)

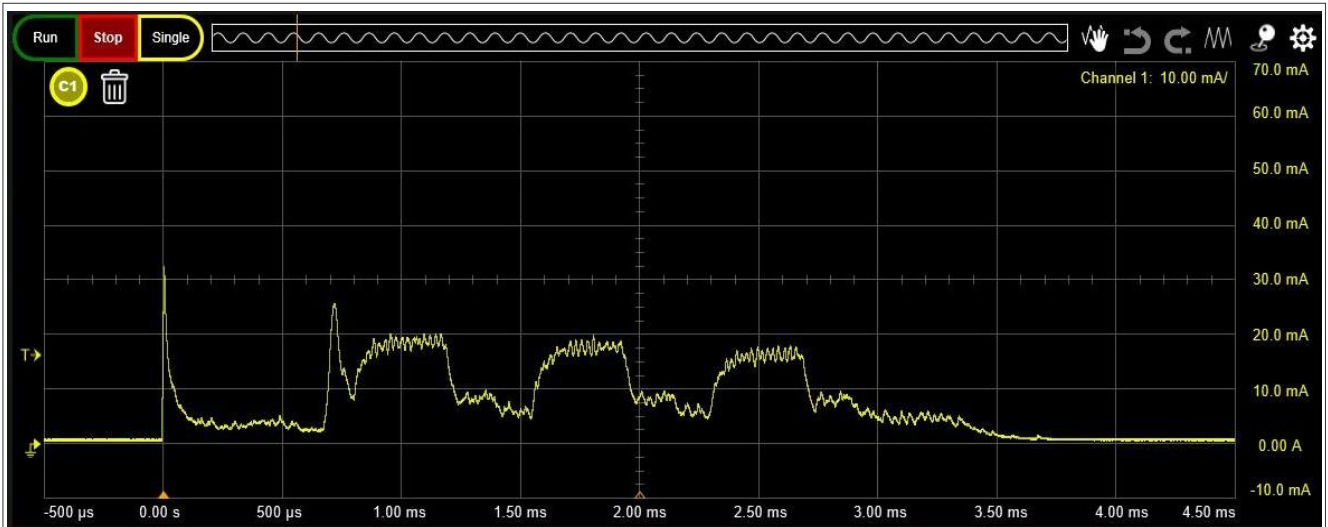


图14. 拆除串联电阻时广播事件期间的 I_{bat} (黄色曲线)(用于电流分析的硬件设置)

5.1.2 电流测量

为了测量选定模式下KW45或K32W1的电流消耗，必须按照图15所示的方式连接跳线。对于JP10接头的供电配置，请参见表6。

- 跳线JP10必须在1-2位置上短接，以允许PMIC模式
- 跳线JP10必须在3-4位置上短接，以允许旁路模式
- 跳线JP10必须在5-6位置上短接，以允许降压模式

表6. JP10接头的供电配置 (降压模式、旁路模式或PMIC模式)

供电模式	接头JP10
PMIC模式	1-2
旁路模式	3-4
降压模式	5-6

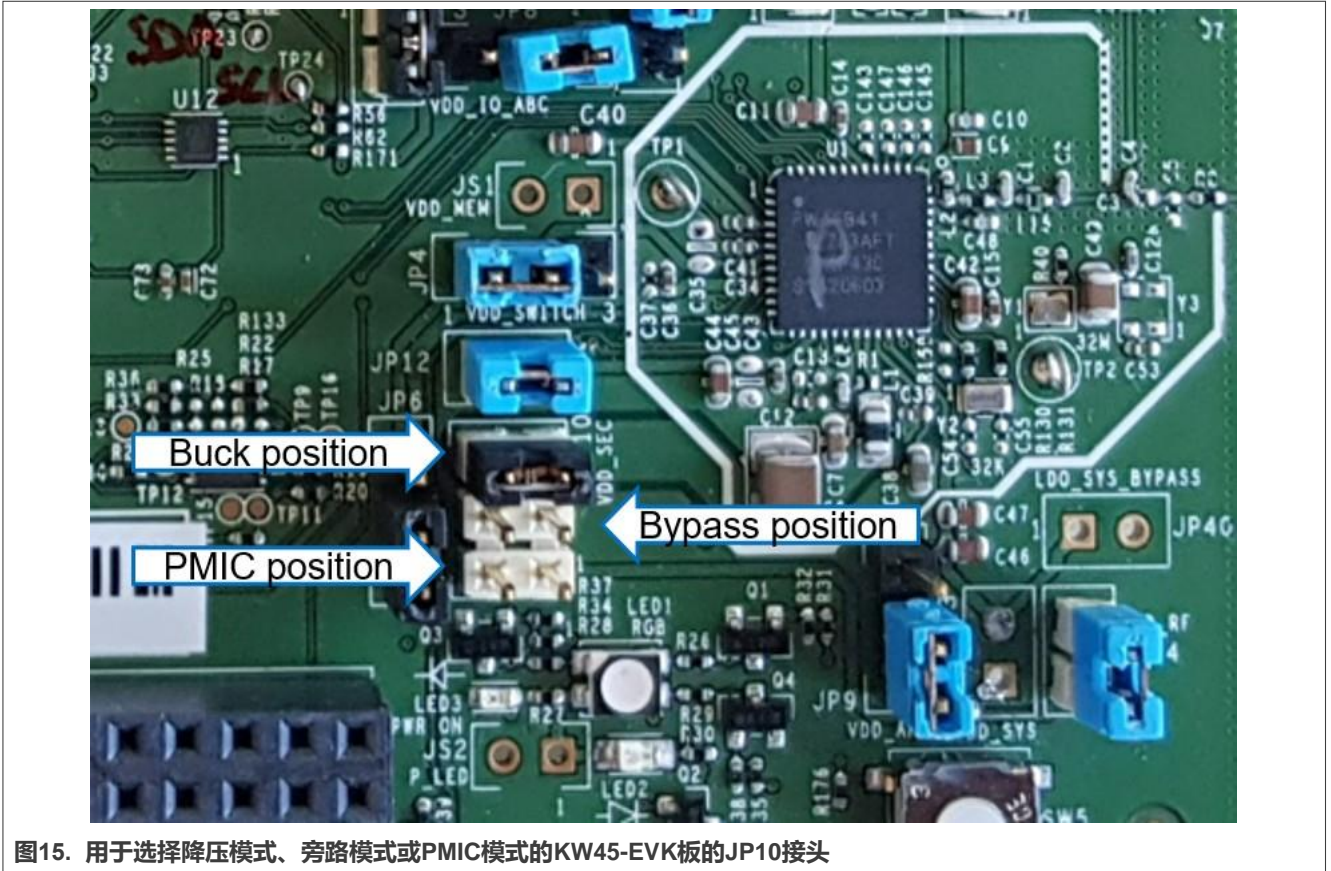


图15. 用于选择降压模式、旁路模式或PMIC模式的KW45-EVK板的JP10接头

5.1.3 I_{reg} 电流测量示例

按照下列步骤测量I_{reg}电流:

1. 断开JP5跳线
2. 将电流探头连接到JP5-JP3, 以测量KW45或K32W1的全局功耗 (I_{reg})
3. 将电流探头的正极连接到外部电源
4. 将外部电源电压设置为3.6 V
5. 通过USB连接器为KW45-EVK板供电。

有关更多详细信息, 请参见图16。

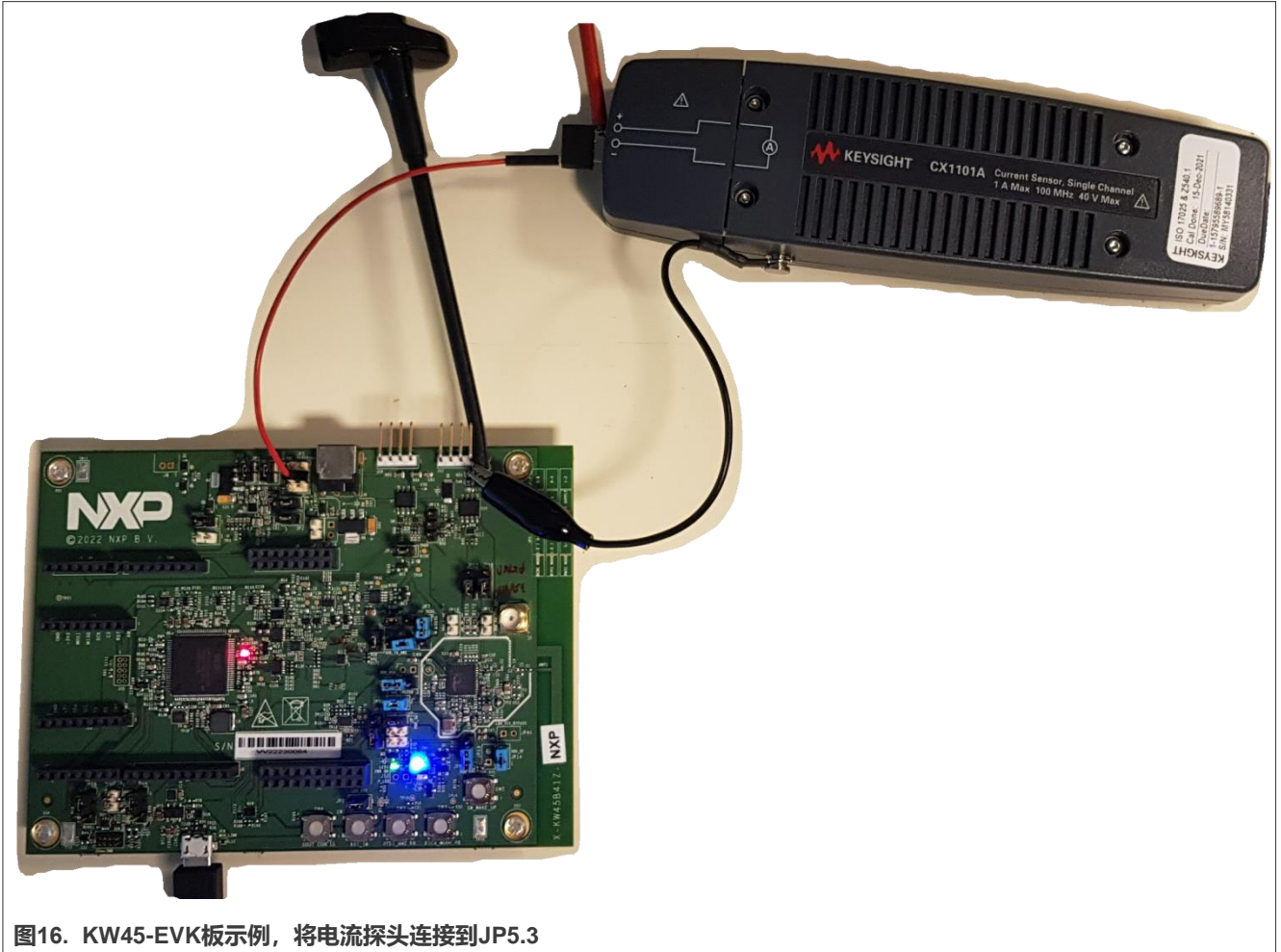


图16. KW45-EVK板示例，将电流探头连接到JP5.3

如果电路板上有SMA连接器，已安装C4电容但未安装C3，则需要将一个SMA天线连接到电路板上，详情请参见图17。

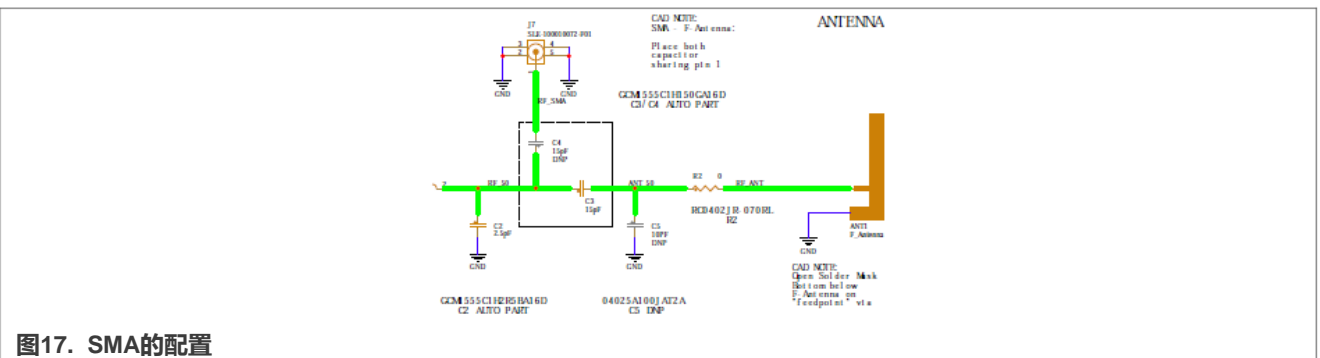


图17. SMA的配置

5.2 测量电流消耗

本节介绍如何设置硬件和软件，以使用KW45-EVK或K32W1-EVK板测量电流消耗。

5.2.1 说明

按照以下的说明测量电流消耗：

1. 选择降压或旁路模式，请参阅[第5.2.2.3.2节](#)或[第5.2.2.3.1节](#)。
2. 将电路板连接到电脑，并将按照[第4.2节](#)所述创建的LP_peripheral (广播或连接) 或LP_master (扫描) 工程下载到电路板上。
3. 将外部电源的输出电压设置为3.6 V。
注：电压范围必须在1.71 V和3.6 V之间。
4. 将TP18 (GND) 连接到电源，参见[图18](#)。
注：在将电源连接器连接到板上时，请确保电源已断开，以避免造成损坏。
5. 将Keysight CX3322A功率分析仪和CX1101A电流探头连接到JP5-3和电源，参见[图18](#)。
有关连接的更多详细信息，请参见[图19](#)。

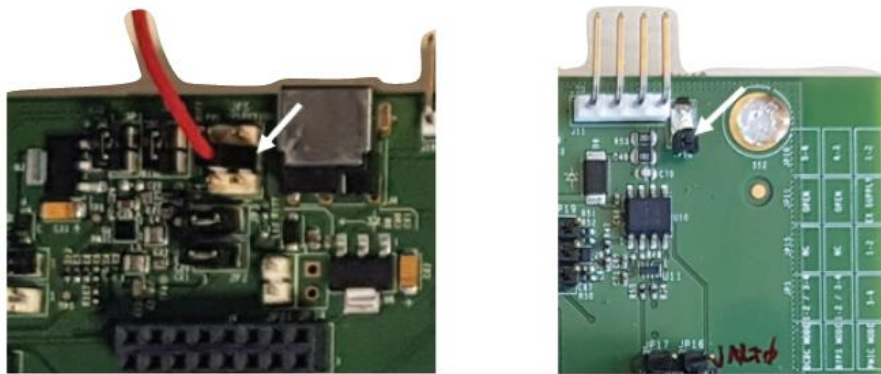


图18. JP5-3, GND (接地) TP18

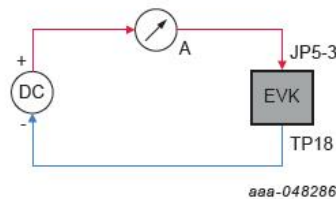


图19. 连接框图

6. 给板上电。

电流测量是通过功率分析仪内置显示器进行的，并使用USB闪存盘来保存测量结果。

5.2.2 测量和结果

以下小节中的所有测量都是在这些条件下进行的：

- CM33处于深度睡眠模式
- Flash处于休眠模式，RF输出为+10 dBm (10 mW)，请参见文件app_preinclude.h，位于：.../Connectivity_test_bm/source/。
- 电源电压为3.6 V
- 室温为25 °C

KW45设备采用经典工艺制作。所有测量和结果列在以下小节中。有关汇总结果请参见[第5.7节](#)。

注：如何使用功率分析仪不在本文档讨论范围内。

5.2.2.1 概述

本节概述了LP_peripheral应用上电启动后的20秒序列。有关更多详细信息，请参见图20。

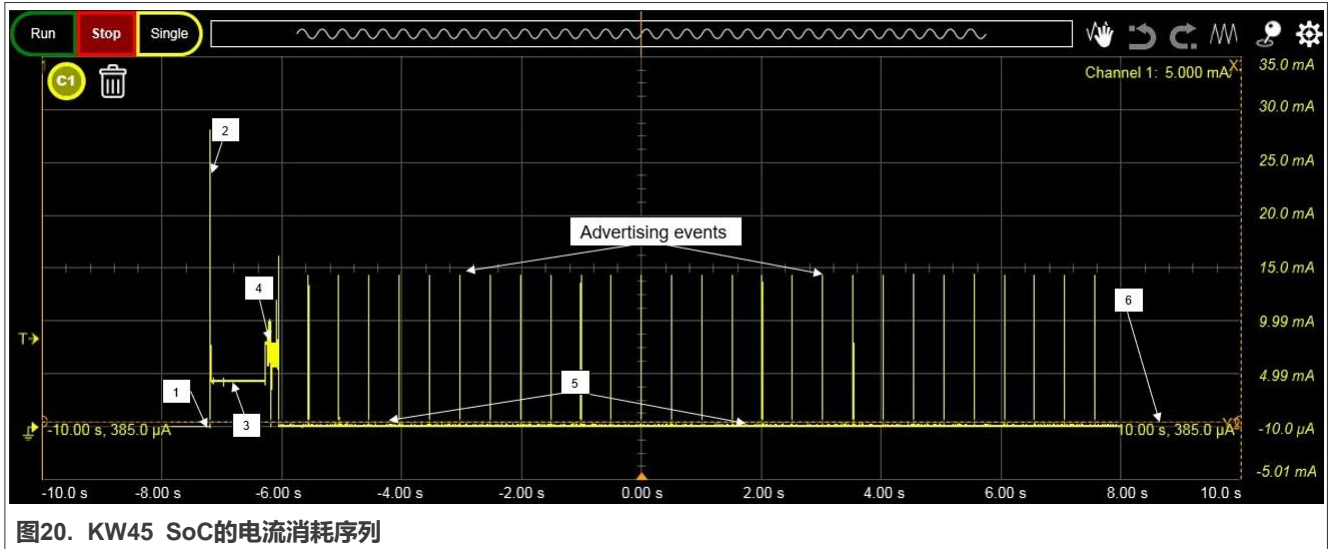


图20. KW45 SoC的电流消耗序列

图20显示了KW45 SoC在不同运行阶段的电流消耗：

表7. 不同运行阶段的电流消耗

阶段	说明
1	上电复位（POR），在SoC连接到电源之后立即进行。图中的尖峰为约26 mA，是由耦合电容以及SoC内部电路（稳压器、时钟振荡器、MCU、数字无线电、模拟无线电等）产生的。
2	MCU在所有软件中进行初始化：底层驱动程序、框架、实时操作系统、低功耗蓝牙堆栈、应用程序
3	MCU开始运行
4	MCU退出深度睡眠模式2并恢复运行。低功耗蓝牙链路层进入运行状态
5	在广播事件之间，系统进入深度睡眠模式2
6	断开连接后，SoC进入深度睡眠模式2

5.2.2.2 深度睡眠模式

将SoC连接到电源时，由于电路板与电源的耦合，会出现一个上电尖峰。MCU POR后：

- 软件开始运行
- 启用并配置时钟和外设
- 初始化连接框架
- 初始化并启动实时操作系统（RTOS）任务
- 启动并运行低功耗蓝牙协议栈
- 启动低功耗蓝牙应用程序

完成所有这些步骤后，系统可以进入不同的深度睡眠模式。默认的深度睡眠模式为深度睡眠模式2（按电流消耗从最低到最高排序）。有关更多详细信息请参见第4.1节。

系统进入深度睡眠模式之前的初始化阶段需要几毫秒的时间，具体时间取决于所选的深度睡眠模式。

对于不同的用例，设备会直接在Deep Sleep mode x下运行。

5.2.2.3 上电复位

EVK板会默认设置为降压模式的配置。

所使用的二进制文件的设置如下：降压模式，深度睡眠模式2（适用于CM33和CM3 / NBU），48 MHz时钟模式，自动开始广播。

对于首次POR，从上电到第一次TX（发送）广播的时间为900毫秒。有关更多详细信息请参见图21和表8。



图21. EVK SoC的首次POR时序

表8. POR时间为900毫秒

唤醒类型	时间 (ms) (硬件+软件初始化)
POR	900

对于其他复位（按下按钮/软件复位），从上电到第一次TX（发送）广播的时间为108毫秒，参见图22和表9。

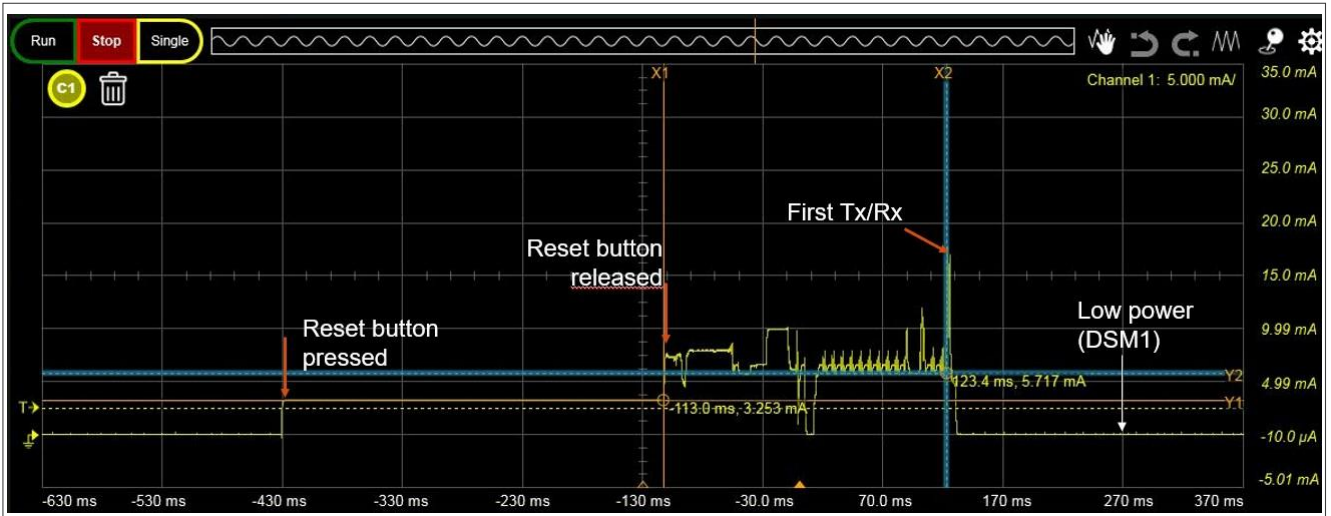


图22. SoC复位时序

表9. 复位时间为108毫秒

唤醒类型	时间 (ms) (硬件+软件初始化)	功耗 (mA) (硬件 + 软件初始化)
首次复位 (POR)	900	4.8
其他复位	108	7.65

5.2.2.3.1 旁路模式

对于旁路模式，使用深度睡眠模式2，其中EVK跳线处于旁路配置。

设备在上电后自动进入深度睡眠模式2。按下SW1按钮后，该Kinetis设备进入广播模式。有关更多详细信息，请参见图23和表10。

旁路模式中使用的二进制文件的设置：lp_kw45b41zevk_buck.srec，广播周期为500毫秒 (ms)，带有效负载且可连接。

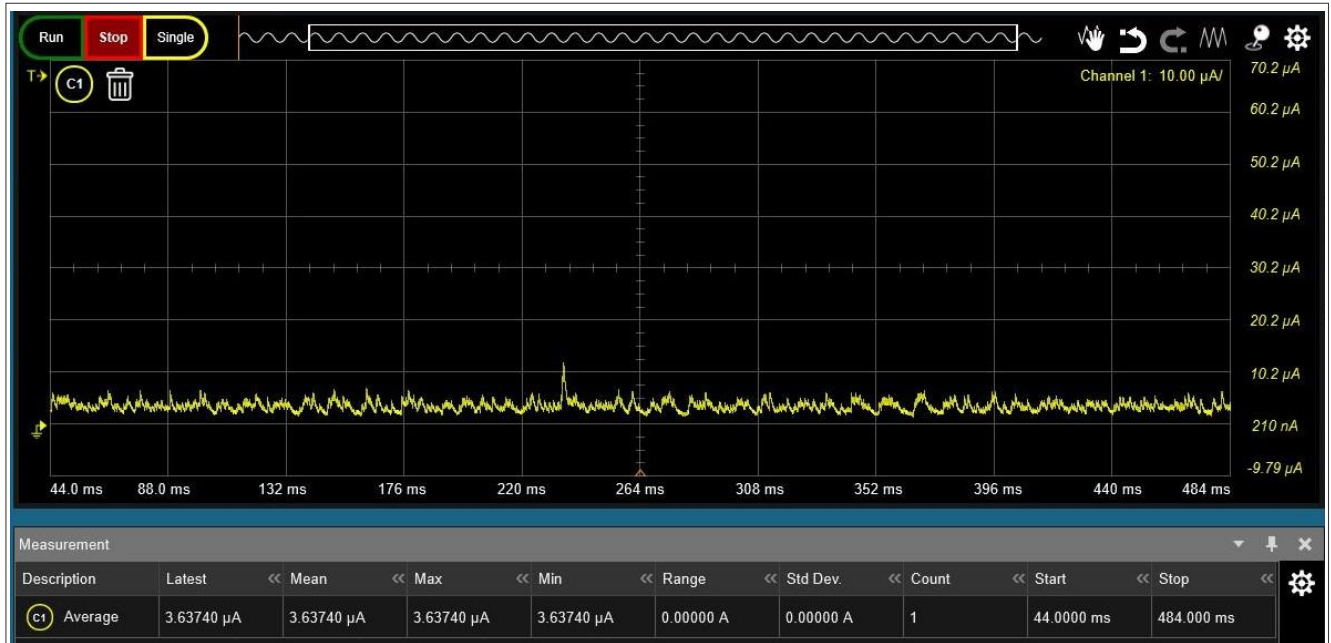


图23. KW45深度睡眠模式2 – 旁路模式

表10. 旁路模式下事件之间的深度睡眠模式2的电流消耗

测得电流			
DCDC_IN = 3.0 V	平均值	最大值	最小值
DCDC_IN = 3.0 V	3.6 µA	4.58 µA	2.83 µA

在3.0 V时广播事件之间测得的低功耗电流消耗为3.6 µA。

5.2.2.3.2 降压模式

在降压模式下，使用深度睡眠模式2，其中EVK跳线处于降压配置。

设备在上电后自动进入深度睡眠模式2。按下SW1按钮后，设备会进入广播模式。有关更多详细信息请参见图24和表11。

所使用的二进制文件的设置与旁路模式相同：lp_kw45b41zevk_bypass.srec，广播周期为500毫秒，带有效负载且可连接。

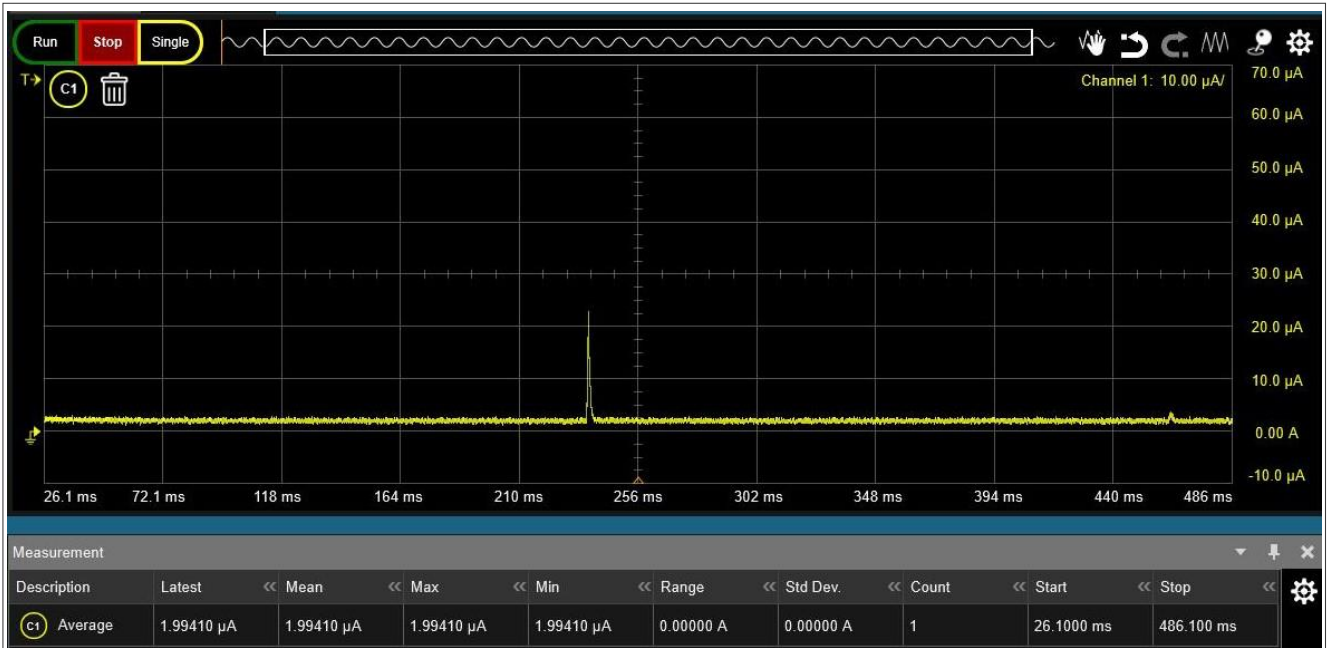


图24. 深度睡眠模式2 - 降压模式

表11. 降压模式下事件间的深度睡眠模式2的电流消耗

所测电流			
DCDC_IN = 3.0 V	平均值	最大值	最小值
DCDC_IN = 3.0 V	1.99 µA	1.72 µA	2.49 µA

在3.0 V时广播事件之间测得的低功耗电流消耗为1.99 µA。

有关低功耗电流消耗的总结，请参见表12、图25和表13。

表12. 在降压模式和旁路模式下事件间的深度睡眠模式2的电流消耗

深度睡眠模式	稳压器	RAM的保留	核心主电源域	核心唤醒电源域	核心RF电源域	外设	DC-DC	3 V时的电流消耗
深度睡眠模式2	均处于低功耗模式	保留所有RAM	深度睡眠	深度睡眠	深度睡眠	禁用	降压	1.99 µA
深度睡眠模式2	均处于低功耗模式	保留所有RAM	深度睡眠	深度睡眠	深度睡眠	禁用	旁路	3.6 µA

注： 降压模式下的DC-DC峰值信息，DC-DC峰值每500毫秒出现一次。标称DC-DC峰值如下图所示。对于500毫秒的广播周期，标称的DC-DC峰值时间约为500微秒。

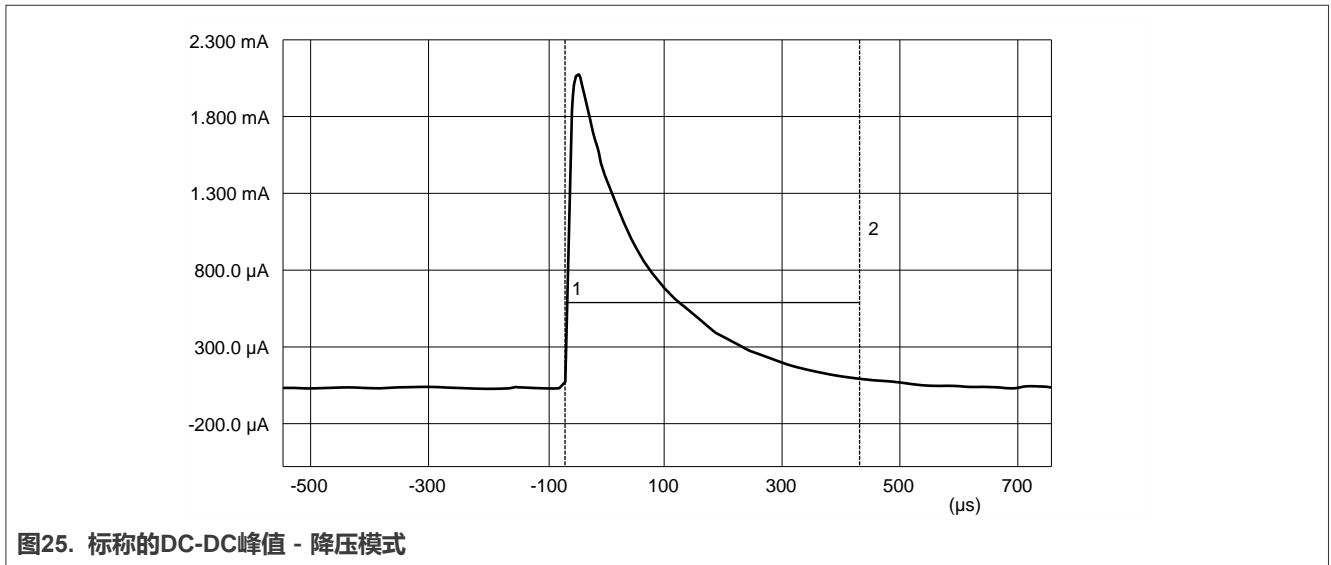


图25. 标称的DC-DC峰值 - 降压模式

表13. 广播事件间的DC-DC峰值电流消耗 - 降压模式

降压模式	Idd_REG (总消耗)		
状态	时间 (ms)	电流 (μA)	mA x mS
DC-DC峰值电流消耗	0.500	614	0.307 mA-mS
电荷积分: 85.27 pAh			

5.2.2.4 广播模式

广播事件是指低功耗蓝牙外设广播一些信息，以便与某个低功耗蓝牙中心设备（如一个智能手机）共享信息或与该中心设备建立连接。该设备会唤醒并通过三个独立信道发送数据包，并在每个信道上监听扫描请求或连接请求。

图26和表14显示了数据速率为1 Mbit/s、无串联电阻（针对纽扣电池设置以避免电流峰值）时的广播事件期间的电流消耗。

所使用的二进制文件的设置如下：

- 48 MHz时钟
- 使用X字节的TX（发送）有效负载，Y字节的RX（接收）有效负载进行广播，可连接
- RF输出为+10 dBm，1 Mbit/s

降压模式：从低功耗模式深度睡眠模式2中唤醒

旁路模式：从低功耗模式深度睡眠模式2中唤醒

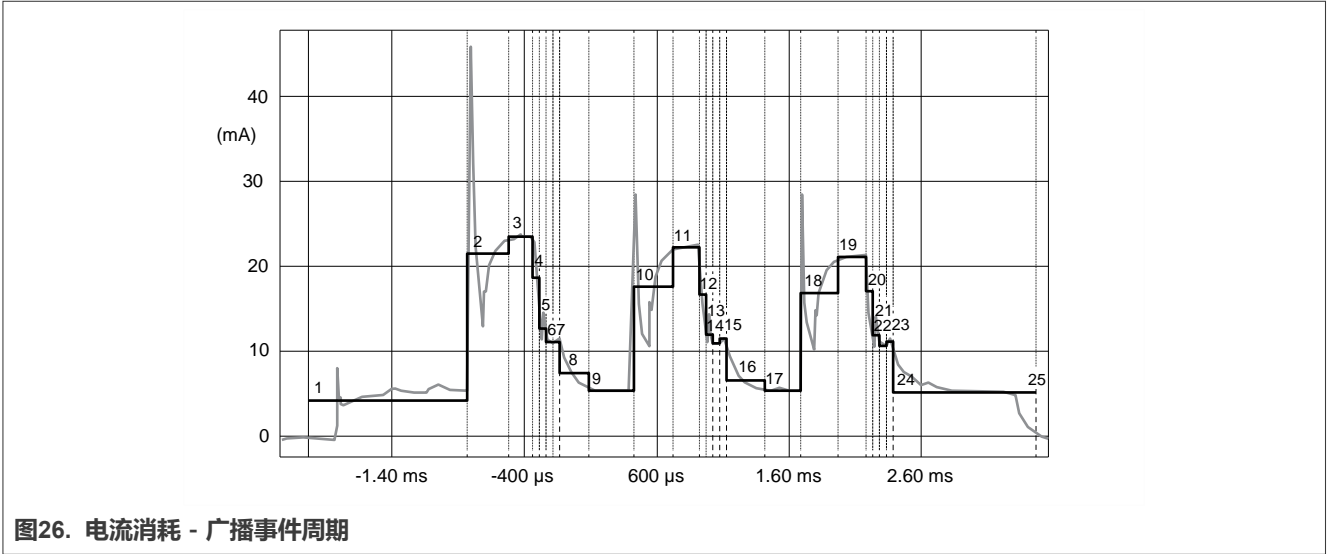


图26. 电流消耗 - 广播事件周期

表14. 广播事件

序号	广播 (ADV) 事件时序
1	预处理
2	TX预热
3	TX活动
4	TX渐停
5	TX转换到RX
6	RX预热
7	RX活动
8	RX渐停
9	MCU停止
10	TX预热
11	TX活动
12	TX渐停
13	TX转换到RX
14	RX预热
15	RX活动
16	RX渐停
17	MCU停止
18	TX预热
19	TX活动
20	TX渐停
21	TX转换到RX
22	RX预热
23	RX活动
24	RX渐停
25	后处理

测试环境：广播

表15. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	1 Mbit/s	
有效负载	Tx (发送) : 31字节; Rx (接收) : 0字节	
可连接	是	
Flash	Doze	
CM33	深度睡眠模式2	
设置	从低功耗DSM2的从设备向主设备广播	
软件	LP_Peripheral (2.15.2 MR2版)	

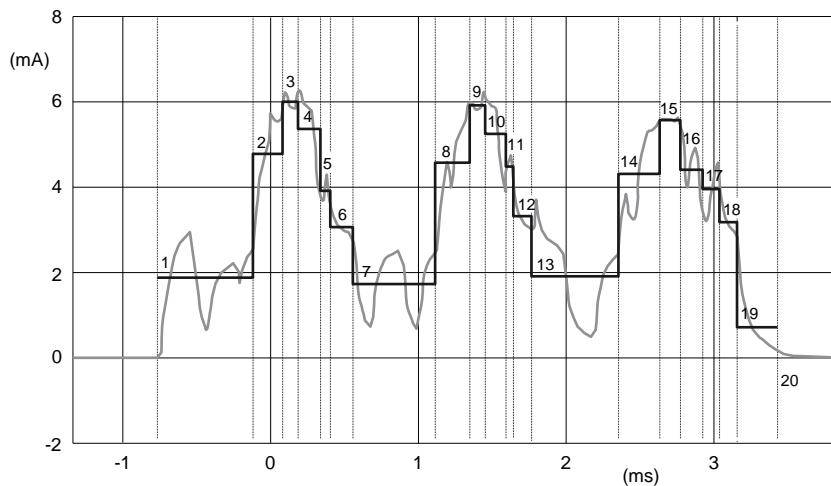


图27. DSM2模式后的降压模式广播事件电流消耗曲线

表16. DSM2模式后的降压模式广播事件电流消耗数据

降压模式	Idd_REG (总电流消耗)			标准差范围: 3个标准差
	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS	
状态				-
预处理	0.650 ms	2.900 mA	1.885 mA-ms	+/-0.04 mA
TX1上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms	-
TX1持平	0.328 ms	6.860 mA	2.250 mA-ms	+/-0.04 mA
TX1下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms	-
TX1转换到RX1	0.050 ms	6.840 mA	0.342 mA-ms	-
RX1上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms	-
RX1持平	0.080 ms	6.948 mA	0.556 mA-ms	+/-0.08 mA

表16. DSM2模式后的降压模式广播事件电流消耗数据 (续)

降压模式	I _{dd} _REG (总电流消耗)			标准差范围: 3个标准差
状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS	-
RX1下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms	-
MCU停止	0.280 ms	1.800 mA	0.503 mA-ms	-
TX2上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms	-
TX2持平	0.328 ms	6.860 mA	2.250 mA-ms	+/-0.04 mA
TX1下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms	-
TX1转换到RX1	0.050 ms	6.840 mA	0.342 mA-ms	-
RX1上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms	-
RX2持平	0.080 ms	6.948 mA	0.556 mA-ms	+/-0.08 mA
RX2下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms	-
MCU停止	0.280 ms	1.800 mA	0.503 mA-ms	-
TX3上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms	-
TX3持平	0.328 ms	6.860 mA	2.250 mA-ms	+/-0.05 mA
TX1下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms	-
TX1转换到RX1	0.050 ms	6.840 mA	0.342 mA-ms	-
RX1上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms	-
RX3持平	0.080 ms	6.948 mA	0.556 mA-ms	+/-0.07 mA
RX3下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms	-
后处理	0.275 ms	2.750 mA	0.756 mA-ms	-
活动消耗	3.458 ms	4.973 mA	17.195 mA-ms	+/-0.05 mA
电荷积分: 4.78 nAh				

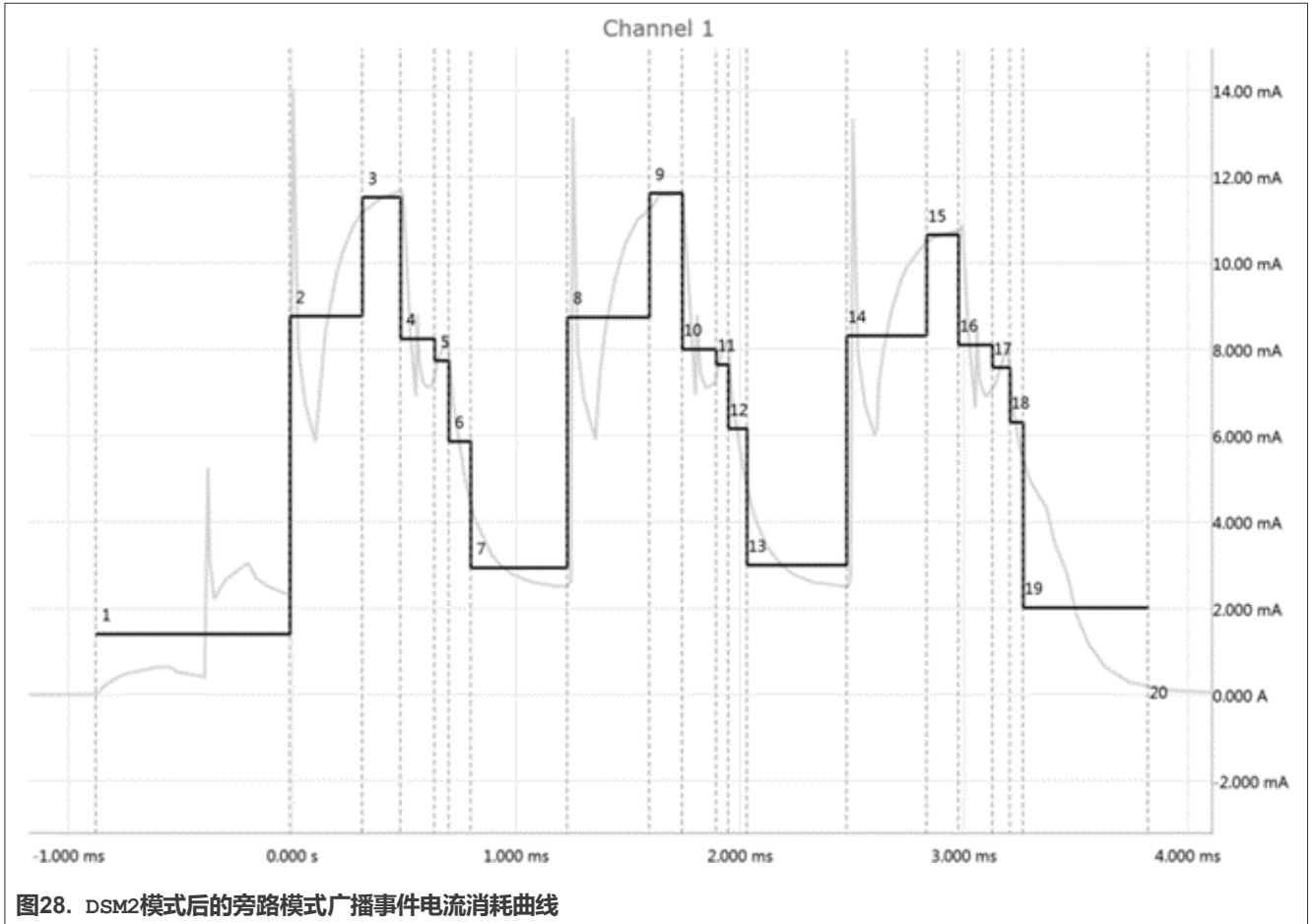


图28. DSM2模式后的旁路模式广播事件电流消耗曲线

表17. DSM2模式后的旁路模式广播事件电流消耗数据

	旁路模式	Idd_REG (总电流消耗)			标准差范围: 3个标准差
		时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS	
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS	-
广播	预处理	0.900 ms	2.400 mA	2.160 mA-ms	+/-0.29 mA
	TX1上升	0.080 ms	3.950 mA	0.316 mA-ms	-
	TX1持平	0.328 ms	14.401 mA	4.724 mA-ms	+/-0.05 mA
	TX1下降	0.020 ms	3.950 mA	0.079 mA-ms	-
	TX1转换到RX1	0.050 ms	3.950 mA	0.198 mA-ms	-
	RX1上升	0.080 ms	3.950 mA	0.316 mA-ms	-
	RX1持平	0.080 ms	14.612 mA	1.169 mA-ms	+/-0.13 mA
	RX1下降	0.020 ms	3.950 mA	0.079 mA-ms	-
	MCU停止	0.280 ms	2.900 mA	0.811 mA-ms	-
	TX2上升	0.080 ms	3.950 mA	0.316 mA-ms	-
	TX2持平	0.328 ms	14.401 mA	4.724 mA-ms	+/-0.07 mA
	TX1下降	0.020 ms	3.950 mA	0.079 mA-ms	-
	TX1转换到RX1	0.050 ms	3.950 mA	0.198 mA-ms	-
	RX1上升	0.080 ms	3.950 mA	0.316 mA-ms	-

表17. DSM2模式后的旁路模式广播事件电流消耗数据 (续)

	旁路模式	Idd_REG (总电流消耗)			标准差范围: 3个标准差
		时间	峰值	能量	
	RX2持平	0.080 ms	14.612 mA	1.169 mA-ms	±0.17 mA
	RX2下降	0.020 ms	3.950 mA	0.079 mA-ms	-
	MCU停止	0.280 ms	2.900 mA	0.811 mA-ms	-
	TX3上升	0.080 ms	3.950 mA	0.316 mA-ms	-
	TX3持平	0.328 ms	14.401 mA	4.724 mA-ms	+/-0.05 mA
	TX1下降	0.020 ms	3.950 mA	0.079 mA-ms	-
	TX1转换到RX1	0.050 ms	3.950 mA	0.198 mA-ms	-
	RX1上升	0.080 ms	3.950 mA	0.316 mA-ms	-
	RX3持平	0.080 ms	14.612 mA	1.169 mA-ms	±0.26 mA
	RX3下降	0.020 ms	3.950 mA	0.079 mA-ms	-
	后处理	0.560 ms	4.000 mA	2.240 mA-ms	-
	活动消耗	3.993 ms	6.677 mA	26.661 mA-ms	+/-0.21 mA
电荷积分: 7.41 nAh					

可连接广播与不可连接广播的对比:

表18. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	1 Mbit/s	
有效负载	Tx (发送) : 31字节; Rx (接收) : 0字节	
可连接	是	
Flash	休眠	
CM33	深度睡眠模式2	
设置	从低功耗DSM2的从设备向主设备广播	
软件	LP_Peripheral (2.15.2 MR2版)	

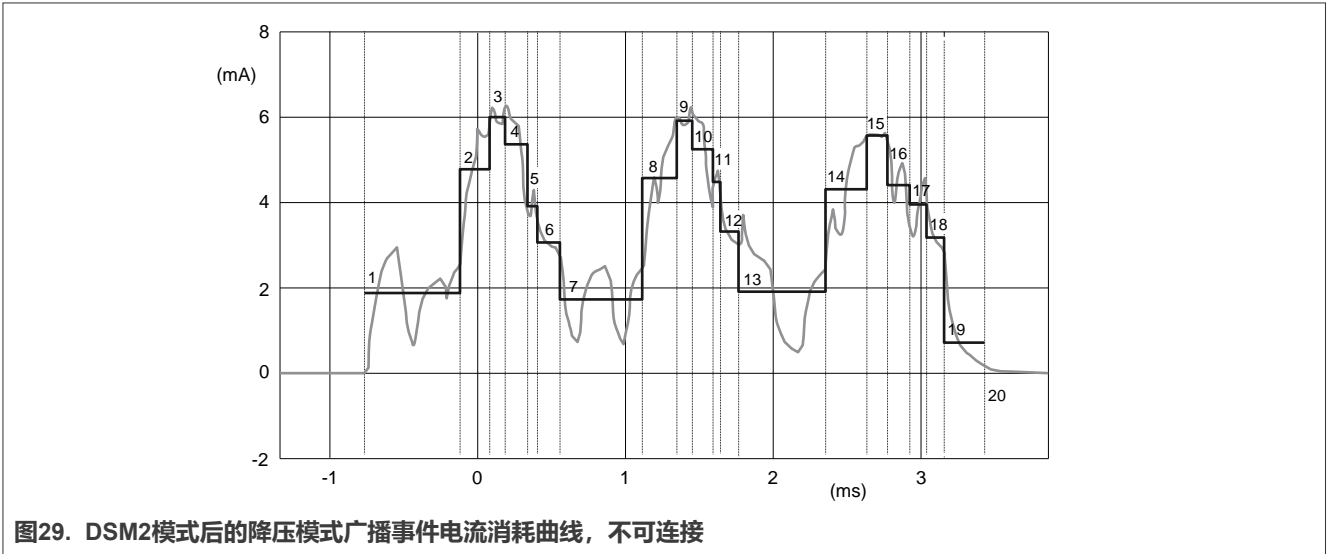


表19. DSM2模式后的降压模式广播事件电流消耗数据，不可连接

	降压模式		Idd_REG (总电流消耗)	
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
不可连接广播	预处理	0.650 ms	2.900 mA	1.885 mA-ms
	TX1上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms
	TX1持平	0.328 ms	6.860 mA	2.250 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms
	MCU停止	0.510 ms	1.800 mA	0.917 mA-ms
	TX2上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms
	TX2持平	0.328 ms	6.860 mA	2.250 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms
	MCU停止	0.510 ms	1.800 mA	0.917 mA-ms
	TX3上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms
	TX3持平	0.328 ms	6.860 mA	2.250 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms
	后处理	0.275 ms	2.750 mA	0.756 mA-ms
	活动消耗	3.228 ms	5.452 mA	13.278 mA-ms
	电荷积分: 3.69 nAh			

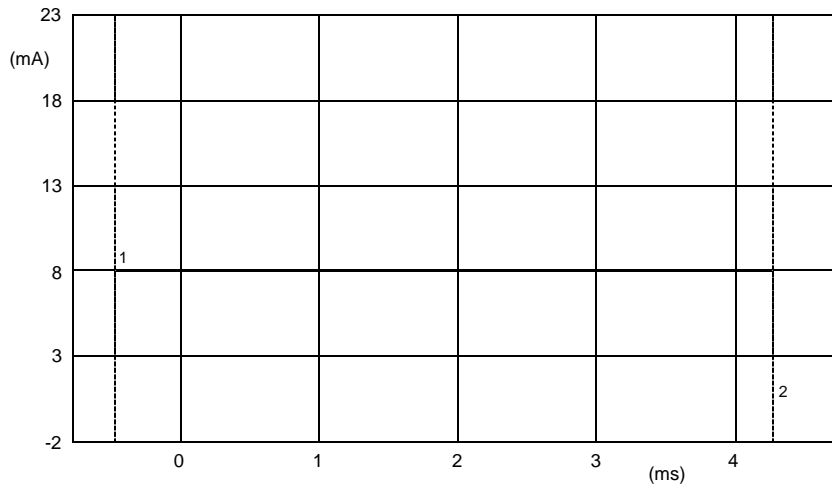


图30. DSM2模式后的旁路模式广播事件电流消耗曲线，不可连接

表20. DSM2模式后的旁路模式广播事件电流消耗数据，不可连接

	旁路模式		I _{dd_REG} (总电流消耗)	
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
不可连接广播	预处理	0.900 ms	2.400 mA	2.160 mA-ms
	TX1上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX1持平	0.328 ms	14.401 mA	4.724 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.510 ms	2.900 mA	1.478 mA-ms
	TX2上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX2持平	0.328 ms	14.401 mA	4.724 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.510 ms	2.900 mA	1.478 mA-ms
	TX3上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX3持平	0.328 ms	14.401 mA	4.724 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	后处理	0.560 ms	4.000 mA	2.240 mA-ms
	活动消耗	3.763 ms	10.446 mA	25.546 mA-ms
	电荷积分: 7.10 nAh			

可连接广播的功耗在降压模式下为4.97毫安，持续3.46毫秒（4.78nAh），在旁路模式下为6.68毫安，持续3.99毫秒（7.41nAh）。

不可连接广播的功耗在降压模式下为5.45毫安，持续3.23毫秒（3.69nAh），在旁路模式下为10.45毫安，持续3.76毫秒（7.10nAh）。

表21. 可连接广播与不可连接广播的对比，降压和旁路模式

DC-DC模式	能否连接	事件持续时间 (ms)	功耗 (mA)	总功率 (nAh)
降压	不可连接	3.228 ms	5.452 mA	3.69 nAh
降压	可连接	3.458 ms	4.973 mA	4.78 nAh
旁路	不可连接	3.763 ms	10.45 mA	7.10 nAh
旁路	可连接	3.993 ms	6.677 mA	7.41 nAh

总结:

表22. 广播事件期间的详细电流数据

48 MHz时钟, 使用32KHz晶振	降压模式Vdd_dcdc=3 V, Vdd_RF=Vdd_LDO_Core=1.25 V	旁路模式Vdd_dcdc=Vdd_RF=Vdd_LDO_Core= 3 V
	DSM2	DSM2
	T= 25 °C	
+0 dBm时一次广播事件的电流消耗	3.458 ms	3.993 ms
	4.973 mA	6.677 mA
	4.78 nAh	7.41 nAh
+0 dBm时的广播电流消耗细节		
TX活动(+0 dBm) - MCU停止	5.060 mA	11.501 mA
RX活动 - MCU停止	5.148 mA	11.712 mA
TX预热 - MCU停止	5.040 mA	10.500 mA
TX渐停 - MCU停止	5.040 mA	10.500 mA
RX预热 - MCU停止	5.040 mA	10.500 mA
RX渐停 - MCU停止	5.040 mA	10.500 mA
TX转换到RX状态 - MCU STOP (广播事件)	5.040 mA	10.500 mA

表23. 广播期间的预处理和后处理时序

48 MHz时钟, 使用32KHz晶振	降压模式Vdd_dcdc=3 V, Vdd_RF=Vdd_LDO_Core=1.25 V	旁路模式Vdd_dcdc=Vdd_RF=Vdd_LDO_Core= 3 V
	DSM2	
	T= 25 °C	
ADV (广播) 预处理时间	0.650 ms	0.900 ms
ADV (广播) 后处理时间	0.275 ms	0.560 ms

表24. 广播期间的预处理和后处理及MCU的电流功耗

48 MHz时钟, 使用32KHz晶振	降压模式Vdd_dcdc=3 V, Vdd_RF=Vdd_LDO_Core=1.25 V	旁路模式Vdd_ dcdc=Vdd_RF=Vdd_LDO_ Core= 3 V
	DSM2	
	T= 25 °C	
ADV预处理	2.900 mA	2.400 mA
无线电后处理	2.750 mA	4.000 mA
MCU停止	1.800 mA	2.900 mA

表25. 广播事件的电流消耗

广播	持续时间 (ms)	功耗 (mA)	功率 (nAh)
降压模式Vdd_dcdc=3 V, Vdd_RF=Vdd_LDO_Core=1.25 V	3.458 ms	4.973 mA	4.78 nAh
旁路模式Vdd_dcdc=Vdd_RF=Vdd_LDO_Core=3 V	3.993 ms	6.677 mA	7.41 nAh

5.2.2.5 LDO_CORE的电流消耗

LDO_CORE 的电流消耗测量是通过将电流探头放置在跳线JP12上来进行的。电源始终通过连接到PC的USB接口来供电, 参见图31和表26。

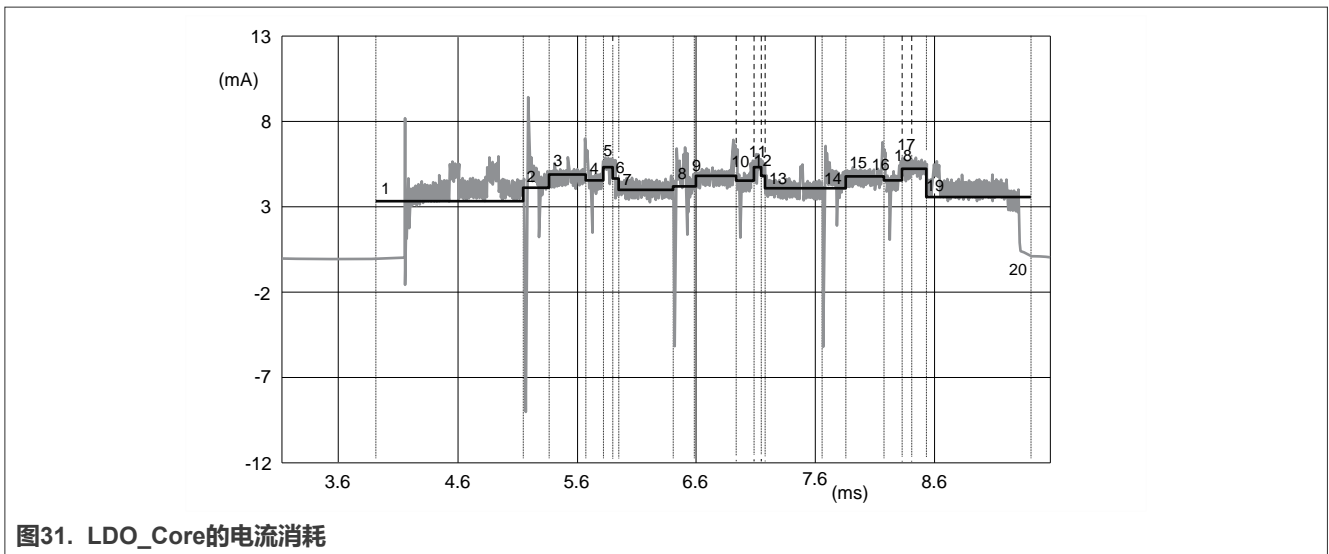


图31. LDO_Core的电流消耗

表26. 事件

序号	广播事件时序
1	预处理
2	TX预热
3	TX活动
4	TX转换到RX状态
5	RX活动

表26. 事件 (续)

序号	广播事件时序
6	RX渐停
7	MCU停止
8	TX预热
9	TX活动
10	TX转换到RX状态
11	RX活动
12	RX渐停
13	MCU停止
14	TX预热
15	TX活动
16	TX转换到RX状态
17	RX活动
18	RX渐停
19	后处理

图31显示了广播事件期间LDO_Core的电流消耗。

所使用的二进制文件的设置为:

- 48 MHz时钟
- 使用X字节的TX有效负载, Y字节的RX有效负载进行广播, 可连接
- RF输出+10 dBm

降压模式: 从低功耗模式的深度睡眠模式2中唤醒

旁路模式: 从低功耗模式的深度睡眠模式2中唤醒

测试环境: Idd_dc/dc/Idd_IO_D

表27. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	1 Mbit/s	
有效负载	Tx (发送) : 31字节; Rx (接收) : 0字节	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	深度睡眠模式2 (DSM2)	
设置	从低功耗DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

降压模式:

DC-DC输出为LDO内核和无线电模块供电。

$$I_{dd_DCDC} = I_{dd_LDO_Core} + I_{dd_RF}$$

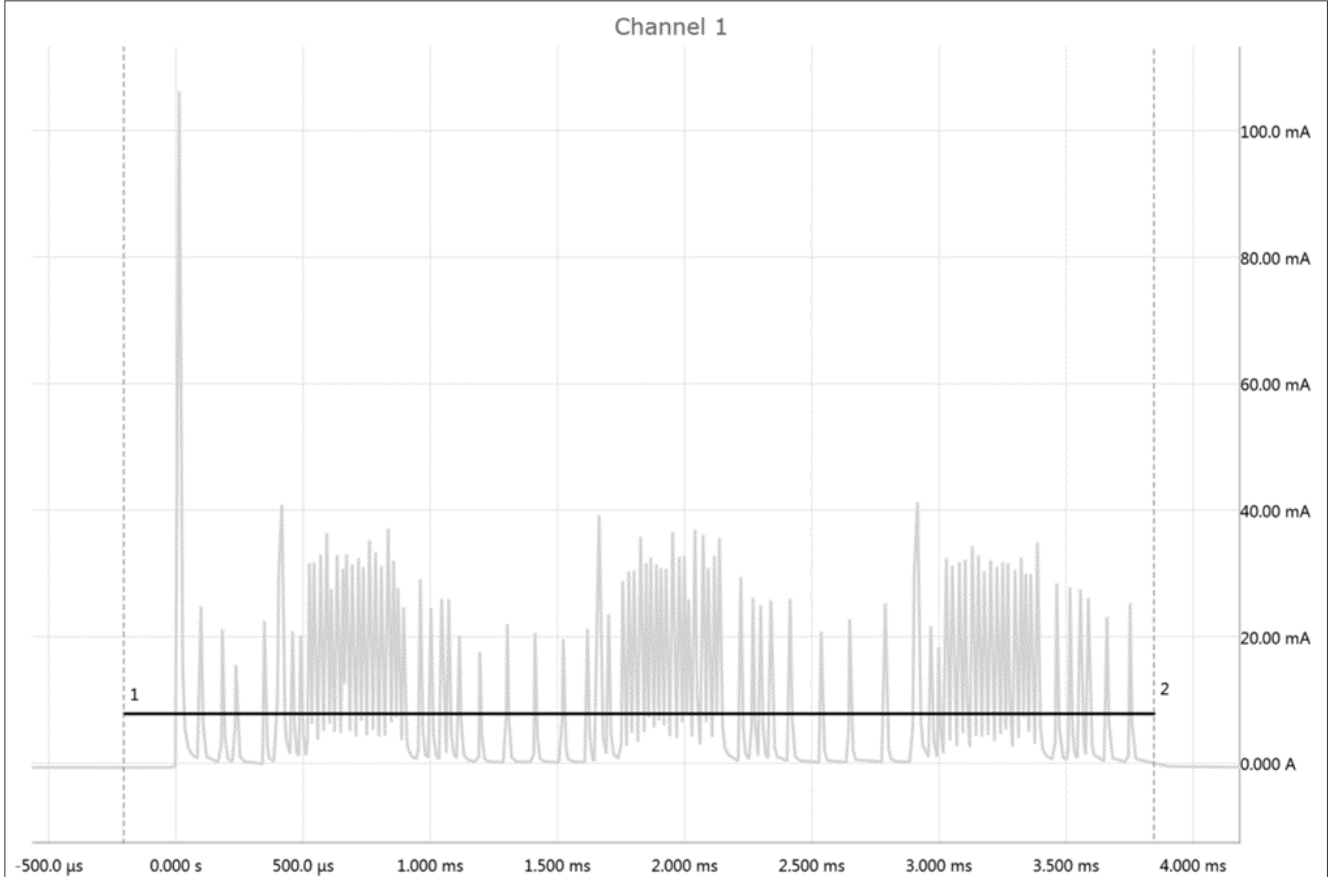


图32. 降压模式下的 I_{dd_dcdc} 电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

表28. 降压模式下的 I_{dd_DCDC} 电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

I _{dd} _DCDC			
状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
预处理	1.500 ms	1.282 mA	1.923 mA-ms
TX1上升	0.084 ms	3.540 mA	0.296 mA-ms
TX1持平	0.216 ms	6.880 mA	1.487 mA-ms
TX1下降	0.020 ms	2.330 mA	0.047 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.945 mA	0.442 mA-ms
RX1上升	0.080 ms	1.552 mA	0.124 mA-ms
RX1持平	0.080 ms	8.545 mA	0.684 mA-ms
RX1下降	0.022 ms	1.552 mA	0.034 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	2.243 mA	1.355 mA-ms
TX2上升	0.080 ms	3.420 mA	0.272 mA-ms
TX2持平	0.216 ms	6.910 mA	1.495 mA-ms
TX1下降	0.021 ms	2.382 mA	0.050 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.853 mA	0.428 mA-ms

表28. 降压模式下的I_{dd_DCDC}电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠) (续)

I _{dd_DCDC}			
状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
RX1上升	0.079 ms	1.839 mA	0.145 mA-ms
RX2持平	0.080 ms	8.530 mA	0.682 mA-ms
RX2下降	0.019 ms	1.840 mA	0.036 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	2.240 mA	1.353 mA-ms
TX3上升	0.072 ms	3.350 mA	0.241 mA-ms
TX3持平	0.216 ms	6.640 mA	1.437 mA-ms
TX1下降	0.019 ms	2.360 mA	0.045 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.360 mA	0.354 mA-ms
RX1上升	0.081 ms	2.360 mA	0.191 mA-ms
RX3持平	0.080 ms	8.490 mA	0.679 mA-ms
RX3下降	0.020 ms	1.580 mA	0.032 mA-ms
后处理	0.980 ms	1.897 mA	1.859 mA-ms
活动消耗	5.624 ms	2.112 mA	11.869 mA-ms
电荷积分: 3.297 nAh			

旁路模式: (DC-DC关闭), I_{dd_dcdc}=100nA

总结:

表29. I_{dd_DCDC}事件的电流消耗

事件	V _{main} V = 3	DSM2 (ms)	DSM2 (mA)	DSM2 (nAh)
I _{dd_DCDC}	降压	5.62	2.112	3.297
	旁路	5.62	0.000100	0.000156

测试环境: I_{dd_LDO_Core}

旁路模式:

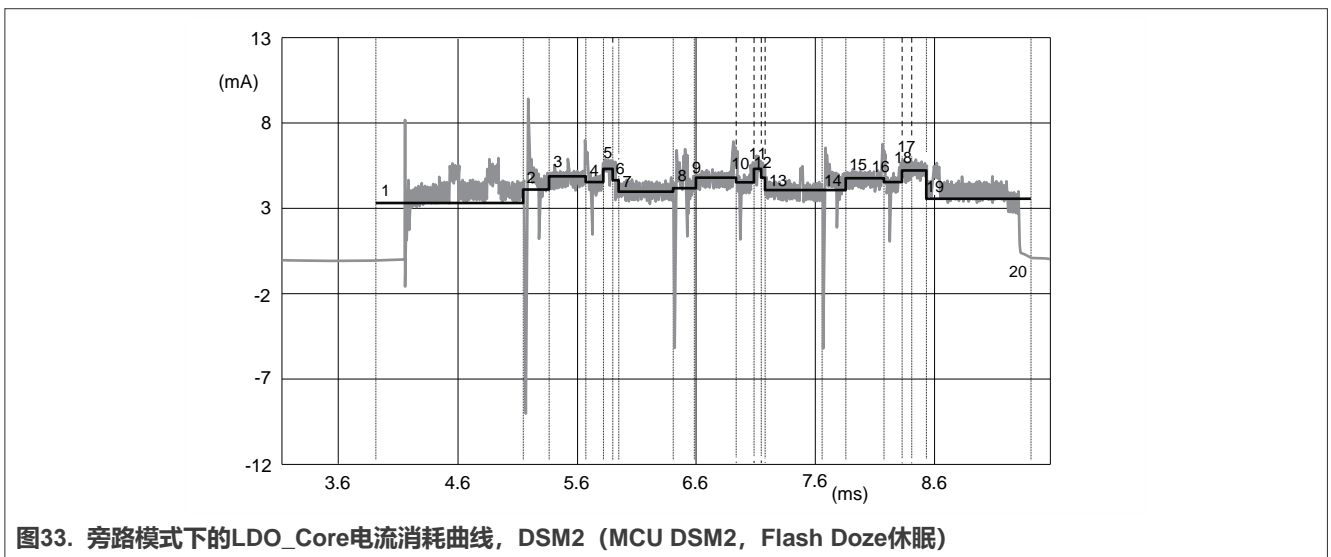


图33. 旁路模式下的LDO_Core电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash Doze休眠)

表30. 旁路模式下的LDO_Core电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

Idd_LDO_CORE			
状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
预处理	1.500 ms	2.628 mA	3.942 mA-ms
TX1上升	0.084 ms	2.022 mA	0.160 mA-ms
TX1持平	0.216 ms	2.718 mA	0.586 mA-ms
TX1下降	0.020 ms	2.022 mA	0.040 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.038 mA	0.306 mA-ms
RX1上升	0.080 ms	2.058 mA	0.163 mA-ms
RX1持平	0.080 ms	3.165 mA	0.253 mA-ms
RX1下降	0.022 ms	2.035 mA	0.037 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	1.797 mA	1.085 mA-ms
TX2上升	0.080 ms	2.022 mA	0.161 mA-ms
TX2持平	0.216 ms	2.720 mA	0.587 mA-ms
TX1下降	0.021 ms	2.042 mA	0.043 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.042 mA	0.306 mA-ms
RX1上升	0.079 ms	2.059 mA	0.167 mA-ms
RX2持平	0.080 ms	3.165 mA	0.253 mA-ms
RX2下降	0.019 ms	2.035 mA	0.040 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	1.900 mA	1.147 mA-ms
TX3上升	0.072 ms	2.023 mA	0.160 mA-ms
TX3持平	0.216 ms	2.714 mA	0.574 mA-ms
TX1下降	0.019 ms	2.042 mA	0.043 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.061 mA	0.309 mA-ms
RX1上升	0.081 ms	2.066 mA	0.169 mA-ms
RX3持平	0.080 ms	3.299 mA	0.264 mA-ms
RX3下降	0.020 ms	2.161 mA	0.042 mA-ms
后处理	0.980 ms	1.879 mA	1.842 mA-ms
活动消耗	5.624 ms	2.050 mA	11.521 mA-ms
电荷积分: 3.2 nAh			

总结:

表31. LDO_Core事件的电流消耗

事件	V_main V = 3	DSM2 (ms)	DSM2 (mA)	DSM2 (nAh)
LDO_Core	旁路	5.62	2.050	3.2

5.2.2.6 Vdd_RF 的电流消耗

Vdd_RF的电流消耗测量是通过将电流探头放置在跳线JP12上来进行的。电源始终通过连接到PC的USB接口供电。

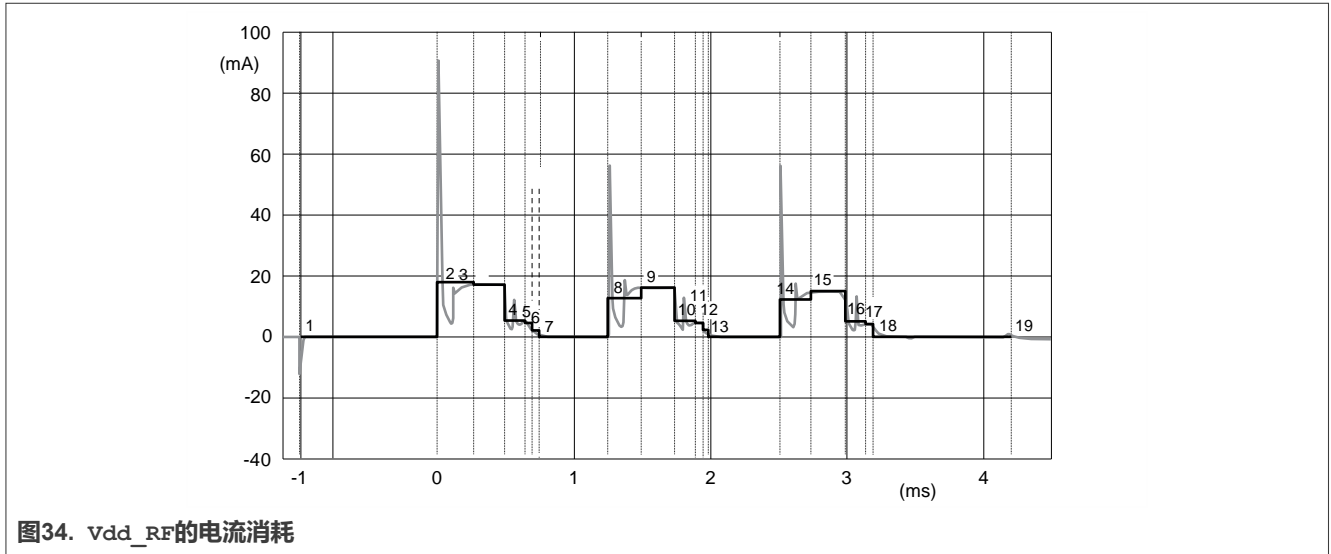


图34. Vdd_RF的电流消耗

表32. 事件

序号	广播事件时序
1	预处理
2	TX预热
3	TX活动
4	TX转换到RX状态
5	RX活动
6	RX渐停
7	MCU停止
8	TX预热
9	TX活动
10	TX转换到RX状态
11	RX活动
12	RX渐停
13	MCU停止
14	TX预热
15	TX活动
16	TX转换到RX状态
17	RX活动
18	RX渐停
19	后处理

图34和表32显示了广播事件期间的Vdd_RF电流消耗。

所使用的二进制文件的设置为:

- 48 MHz时钟
- 使用X字节的TX有效负载, Y字节的RX有效负载进行广播, 可连接
- RF输出+10 dBm

降压模式: 从低功耗模式深度的睡眠模式2中唤醒

旁路模式: 从低功耗模式的深度睡眠模式2中唤醒

测试环境: Vdd_RF

表33. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V, Vdd_LDO_Core = 3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	1 Mbit/s	
有效负载	Tx (发送) : 31字节; Rx (接收) : 0字节	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	深度睡眠模式2 (DSM2)	
设置	从低功耗DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

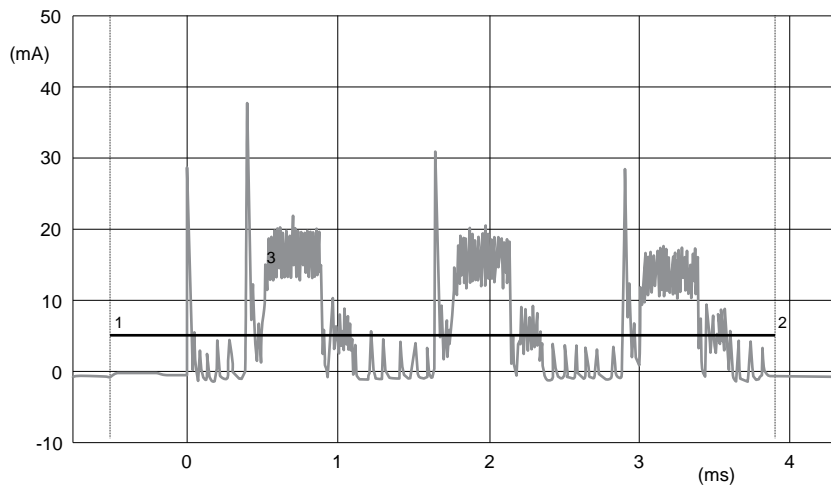


图35. 降压模式下的Vdd_RF电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

表34. 降压模式下的Vdd_RF电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
预处理	1.500 ms	0.380 mA	0.570 mA-ms
TX1上升	0.084 ms	1.709 mA	0.143 mA-ms
TX1持平	0.216 ms	2.441 mA	0.527 mA-ms
TX1下降	0.020 ms	1.709 mA	0.034 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.224 mA	0.334 mA-ms
RX1上升	0.080 ms	2.984 mA	0.239 mA-ms
RX1持平	0.080 ms	4.641 mA	0.371 mA-ms

表34. 降压模式下的V_{dd_RF}电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠) (续)

状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
RX1下降	0.022 ms	2.099 mA	0.046 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	0.306 mA	0.185 mA-ms
TX2上升	0.080 ms	1.733 mA	0.138 mA-ms
TX2持平	0.216 ms	2.445 mA	0.529 mA-ms
TX1下降	0.021 ms	2.006 mA	0.042 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.006 mA	0.301 mA-ms
RX1上升	0.079 ms	3.059 mA	0.242 mA-ms
RX2持平	0.080 ms	4.641 mA	0.371 mA-ms
RX2下降	0.019 ms	2.137 mA	0.041 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	0.307 mA	0.186 mA-ms
TX3上升	0.072 ms	1.731 mA	0.125 mA-ms
TX3持平	0.216 ms	2.444 mA	0.529 mA-ms
TX1下降	0.019 ms	2.027 mA	0.039 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.444 mA	0.367 mA-ms
RX1上升	0.081 ms	3.031 mA	0.246 mA-ms
RX3持平	0.080 ms	4.662 mA	0.373 mA-ms
RX3下降	0.020 ms	2.162 mA	0.044 mA-ms
后处理	0.980 ms	0.295 mA	0.289 mA-ms
活动消耗	5.624 ms	1.122 mA	6.309 mA-ms
电荷积分: 1.75 nAh			

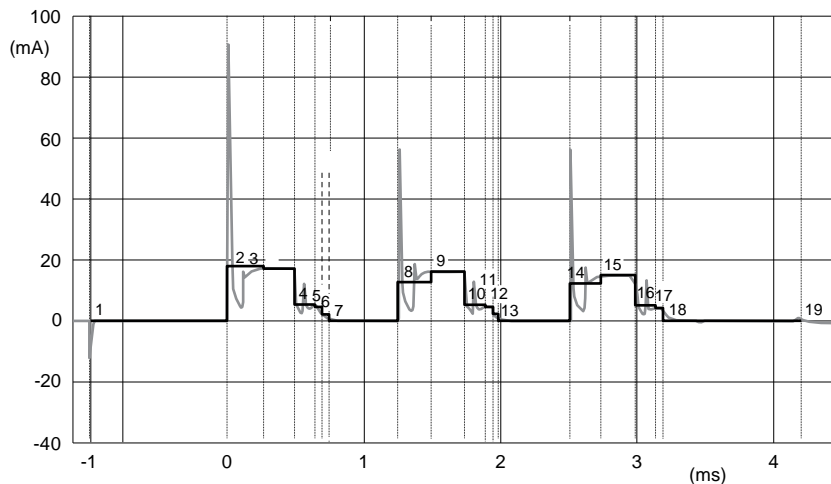


图36. 旁路模式下的V_{dd_RF}电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

表35. 旁路模式下的V_{dd_RF}电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
预处理	1.500 ms	0.160 mA	0.240 mA-ms
TX1上升	0.079 ms	2.284 mA	0.181 mA-ms
TX1持平	0.216 ms	7.188 mA	1.551 mA-ms

表35. 旁路模式下的V_{dd_RF}电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠) (续)

状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
TX1下降	0.020 ms	2.284 mA	0.046 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.073 mA	0.311 mA-ms
RX1上升	0.079 ms	2.049 mA	0.162 mA-ms
RX1持平	0.080 ms	5.051 mA	0.404 mA-ms
RX1下降	0.018 ms	2.019 mA	0.037 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	0.225 mA	0.136 mA-ms
TX2上升	0.080 ms	2.561 mA	0.204 mA-ms
TX2持平	0.216 ms	7.154 mA	1.545 mA-ms
TX1下降	0.021 ms	1.868 mA	0.039 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	1.868 mA	0.280 mA-ms
RX1上升	0.081 ms	1.871 mA	0.152 mA-ms
RX2持平	0.080 ms	5.097 mA	0.408 mA-ms
RX2下降	0.020 ms	2.036 mA	0.040 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	0.207 mA	0.125 mA-ms
TX3上升	0.079 ms	2.582 mA	0.204 mA-ms
TX3持平	0.212 ms	7.038 mA	1.489 mA-ms
TX1下降	0.021 ms	1.828 mA	0.038 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.282 mA	0.342 mA-ms
RX1上升	0.082 ms	2.017 mA	0.165 mA-ms
RX3持平	0.080 ms	5.059 mA	0.405 mA-ms
RX3下降	0.019 ms	2.019 mA	0.039 mA-ms
后处理	0.980 ms	0.206 mA	0.202 mA-ms
活动消耗	5.621 ms	1.340 mA	7.531 mA-ms
电荷积分: 2.092 nAh			

总结:表36. V_{dd_RF}事件的电流消耗

事件	V _{main} =3 V	DSM2 (ms)	DSM2 (mA)	DSM2 (nAh)
V _{dd_RF}	降压	5.62	1.122	1.75
	旁路	5.62	1.340	2.092

测试环境: V_{dd_PA}_2p4GHz

表37. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	V _{dd_DCDC} = 3 V V _{dd_RF} = 1.25 V V _{ddLDO_Core} = 1.25 V	V _{dd_RF} = 3 V, V _{dd_LDO_Core} = 3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	1 Mbit/s	

表37. 测试环境 (续)

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core= 1.25 V	Vdd_RF = 3 V, Vdd_LDO_Core=3 V
有效负载	Tx (发送) : 31字节; Rx (接收) : 0字节	
可连接	是	
Flash	Doze	
MCU	深度睡眠模式2 (DSM2)	
设置	从低功耗DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

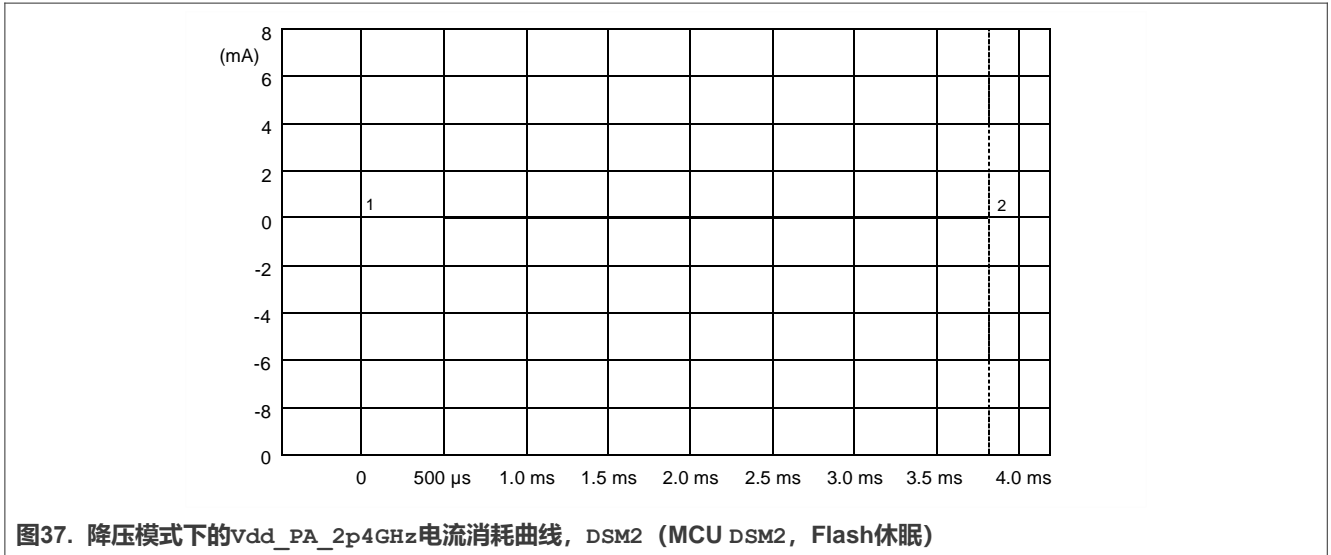


图37. 降压模式下的vdd_PA_2p4GHz电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

表38. 降压模式下的vdd_PA_2p4GHz电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

Idd_PA_2p4GHz			
状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
预处理	1.500 ms	0.929 mA	1.394 mA-ms
TX1上升	0.084 ms	0.012 mA	0.001 mA-ms
TX1持平	0.216 ms	14.180 mA	3.064 mA-ms
TX1下降	0.020 ms	0.846 mA	0.017 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	0.846 mA	0.127 mA-ms
RX1上升	0.080 ms	0.846 mA	0.068 mA-ms
RX1持平	0.080 ms	0.037 mA	0.003 mA-ms
RX1下降	0.022 ms	0.110 mA	0.002 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	0.576 mA	0.348 mA-ms
TX2上升	0.080 ms	10.650 mA	0.848 mA-ms
TX2持平	0.216 ms	14.050 mA	3.040 mA-ms
TX1下降	0.021 ms	3.450 mA	0.072 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	3.450 mA	0.518 mA-ms

表38. 降压模式下的Vdd_PA_2p4GHz电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠) (续)

Idd_PA_2p4GHz			
状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
RX1上升	0.079 ms	3.450 mA	0.273 mA-ms
RX2持平	0.080 ms	0.046 mA	0.004 mA-ms
RX2下降	0.019 ms	0.200 mA	0.004 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	0.571 mA	0.345 mA-ms
TX3上升	0.072 ms	11.190 mA	0.806 mA-ms
TX3持平	0.216 ms	12.700 mA	2.748 mA-ms
TX1下降	0.019 ms	2.596 mA	0.049 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.596 mA	0.389 mA-ms
RX1上升	0.081 ms	2.596 mA	0.210 mA-ms
RX3持平	0.080 ms	0.044 mA	0.004 mA-ms
RX3下降	0.020 ms	0.350 mA	0.007 mA-ms
后处理	0.980 ms	0.667 mA	0.654 mA-ms
活动消耗	5.624 ms	2.666 mA	14.994 mA-ms
电荷积分: 4.165 nAh			

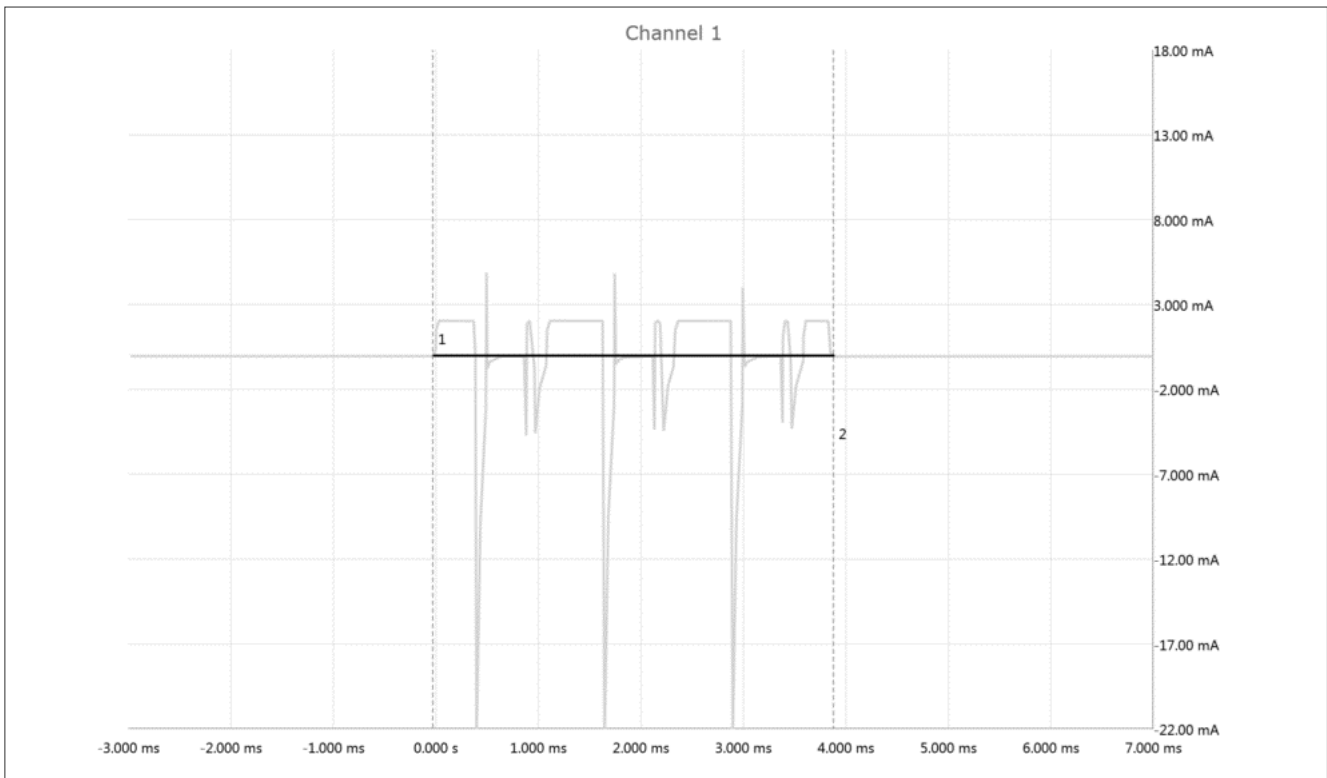


图38. 旁路模式下的Vdd_PA_2p4GHz电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

表39. 旁路模式下的Vdd_PA_2p4GHz电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
预处理	1.500 ms	0.273 mA	0.410 mA-ms
TX1上升	0.079 ms	1.660 mA	0.132 mA-ms

表39. 旁路模式下的Vdd_PA_2p4GHz电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠) (续)

状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
TX1持平	0.216 ms	15.500 mA	3.344 mA-ms
TX1下降	0.020 ms	2.266 mA	0.045 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.254 mA	0.338 mA-ms
RX1上升	0.079 ms	2.254 mA	0.178 mA-ms
RX1持平	0.080 ms	6.092 mA	0.487 mA-ms
RX1下降	0.018 ms	1.359 mA	0.025 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	2.091 mA	1.263 mA-ms
TX2上升	0.080 ms	1.914 mA	0.152 mA-ms
TX2持平	0.216 ms	15.380 mA	3.321 mA-ms
TX1下降	0.021 ms	2.273 mA	0.048 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.273 mA	0.341 mA-ms
RX1上升	0.081 ms	2.273 mA	0.184 mA-ms
RX2持平	0.080 ms	6.092 mA	0.487 mA-ms
RX2下降	0.020 ms	1.960 mA	0.039 mA-ms
MCU停止	0.604 ms	2.103 mA	1.270 mA-ms
TX3上升	0.079 ms	2.150 mA	0.170 mA-ms
TX3持平	0.212 ms	14.730 mA	3.116 mA-ms
TX1下降	0.021 ms	2.019 mA	0.042 mA-ms
TX1转换到RX1状态	0.150 ms	2.273 mA	0.341 mA-ms
RX1上升	0.082 ms	2.019 mA	0.166 mA-ms
RX3持平	0.080 ms	6.095 mA	0.488 mA-ms
RX3下降	0.019 ms	1.067 mA	0.021 mA-ms
后处理	0.980 ms	1.109 mA	1.087 mA-ms
活动消耗	5.621 ms	3.112 mA	17.494 mA-ms
电荷积分: 4.859 nAh			

总结:

表40. Vdd_PA_2p4GHz事件的电流消耗

-	V_main = 3 V	DSM2 (ms)	DSM2 (mA)	DSM2 (nAh)
Vdd_PA_2p4GHz	降压	5.62	2.666	4.165
	旁路	5.62	3.112	4.859

表41. 全局事件电流消耗的总结

引脚名称	V_main=3 V	DSM2 (ms)	DSM2 (mA)	DSM2 (nAh)
LDO_Core	降压	5.62	1.140	1.780 nAh
	旁路	5.62	2.050	3.200 nAh
RF	降压	5.62	1.122	1.752 nAh
	旁路	5.62	1.340	2.092 nAh
Ana	降压	5.62	0.064	0.100 nAh
	旁路	5.62	0.064	0.100 nAh
DCDC/IO_D	降压	5.62	2.112	3.297 nAh

表41. 全局事件电流消耗的总结 (续)

引脚名称	V_main=3 V	DSM2 (ms)	DSM2 (mA)	DSM2 (nAh)
	旁路	5.62	0.0001	0.000156 nAh
IO_ABC	降压	5.62	0.451	0.704 nAh
	旁路	5.62	0.897	1400 nAh
开关	降压	5.62	0.064	0.100 nAh
	旁路	5.62	0.064	0.100 nAh
PA_2p4GHz	降压	5.62	2.666	4.162 nAh
	旁路	5.62	3.112	4.858 nAh
总计	降压	5.62	2.697	4.201 nAh
	旁路	5.62	4.414	6.892 nAh

全局总结:

降压模式下: $I_{dd_reg} = I_{dd_dcdc}$ (power consumption of $I_{dd_LDO_Core}$ and I_{dd_RF}) + $I_{dd_PA} + I_{dd_Ana} + I_{dd_IO_ABC} + I_{dd_switch}$

旁路模式下: $I_{dd_reg} = I_{dd_LDO_Core} + I_{dd_RF} + I_{dd_dcdc}/I_{dd_IO_D} + I_{dd_PA} + I_{dd_Ana} + I_{dd_IO_ABC} + I_{dd_switch}$

表42. 全局事件的总电流消耗与电压的关系

广播	1.71 V	1.8 V	2.1 V	2.4 V	2.7 V	3 V	3.3 V	3.6 V	单位
降压模式	4.10	4.24	4.53	4.82	4.60	4.21	3.91	3.56	nAh
旁路模式	5.92	6.01	6.37	6.76	6.85	6.89	6.88	6.81	nAh

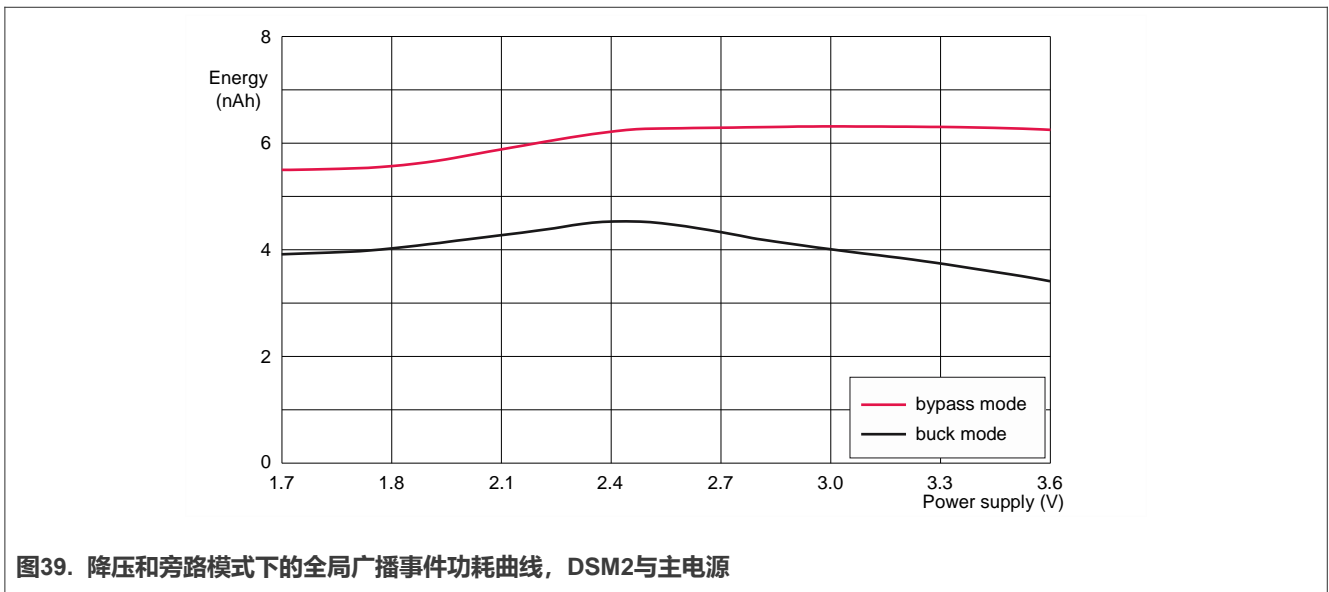


图39. 降压和旁路模式下的全局广播事件功耗曲线, DSM2与主电源

表43. 降压模式下的总电流消耗与电压及温度的关系

广播, 降压	1.7 V	1.8 V	2.1 V	2.4 V	2.7 V	3.0 V	3.3 V	3.6 V	单位
-40 °C	3.97	4.15	4.48	4.67	4.50	4.13	3.84	3.48	nAh
-20 °C	4.03	4.21	4.52	4.73	4.56	4.17	3.88	3.52	nAh
25 °C	4.10	4.24	4.53	4.82	4.60	4.21	3.91	3.56	nAh

表43. 降压模式下的总电流消耗与电压及温度的关系 (续)

广播, 降压	1.7 V	1.8 V	2.1 V	2.4 V	2.7 V	3.0 V	3.3 V	3.6 V	单位
65 °C	4.30	4.75	5.00	5.28	5.02	4.66	4.26	3.96	nAh
85 °C	4.94	5.40	5.62	6.04	5.60	5.16	4.74	4.16	nAh
105 °C	5.84	6.19	6.54	7.02	6.62	6.07	5.58	5.05	nAh
120 °C	6.25	6.76	7.46	7.99	7.65	6.98	6.42	5.94	nAh

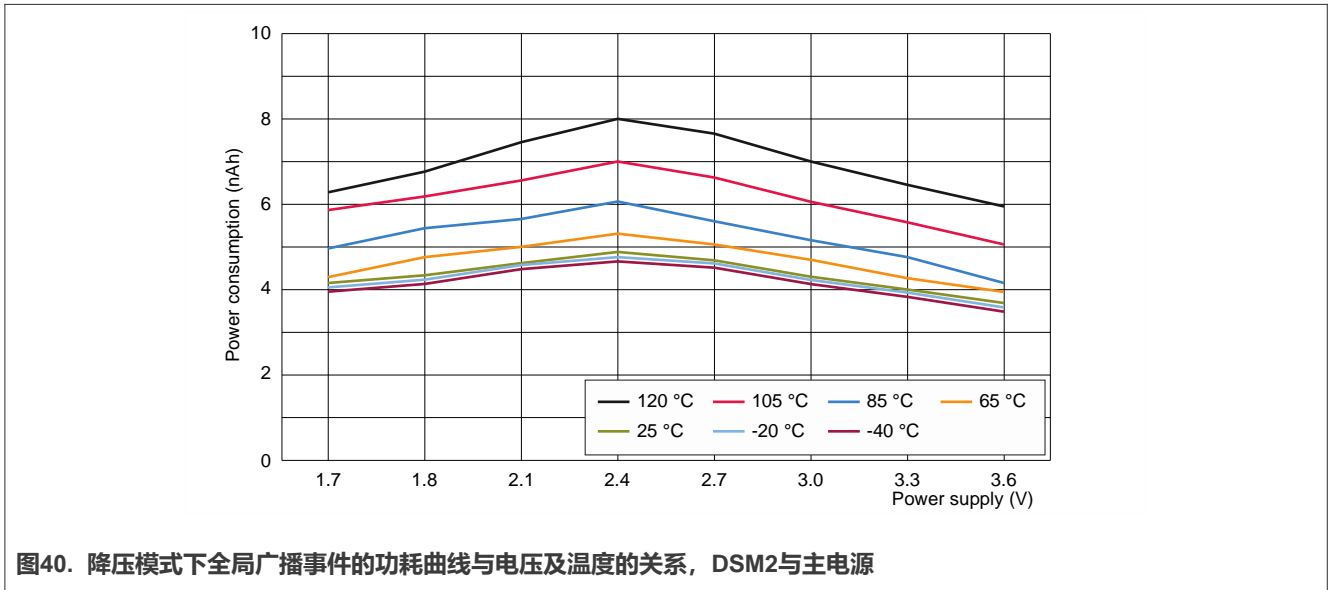


表44. 旁路模式下的总电流消耗与电压及温度的关系

广播, 旁路	1.71 V	1.8 V	2.1 V	2.4 V	2.7 V	3.0 V	3.3 V	3.6 V	单位
-40 °C	5.73	5.87	6.31	6.55	6.71	6.76	6.74	6.66	nAh
-20 °C	5.82	5.96	6.36	6.65	6.80	6.83	6.81	6.73	nAh
25 °C	5.92	6.01	6.37	6.76	6.85	6.89	6.88	6.81	nAh
65 °C	5.93	6.07	6.42	6.87	6.90	6.93	6.91	6.86	nAh
85 °C	6.02	6.15	6.49	6.95	6.98	7.00	6.98	6.88	nAh
105 °C	6.16	6.31	6.55	7.04	7.02	7.07	7.01	6.96	nAh
120 °C	6.47	6.50	6.60	7.13	7.08	7.14	7.05	7.00	nAh

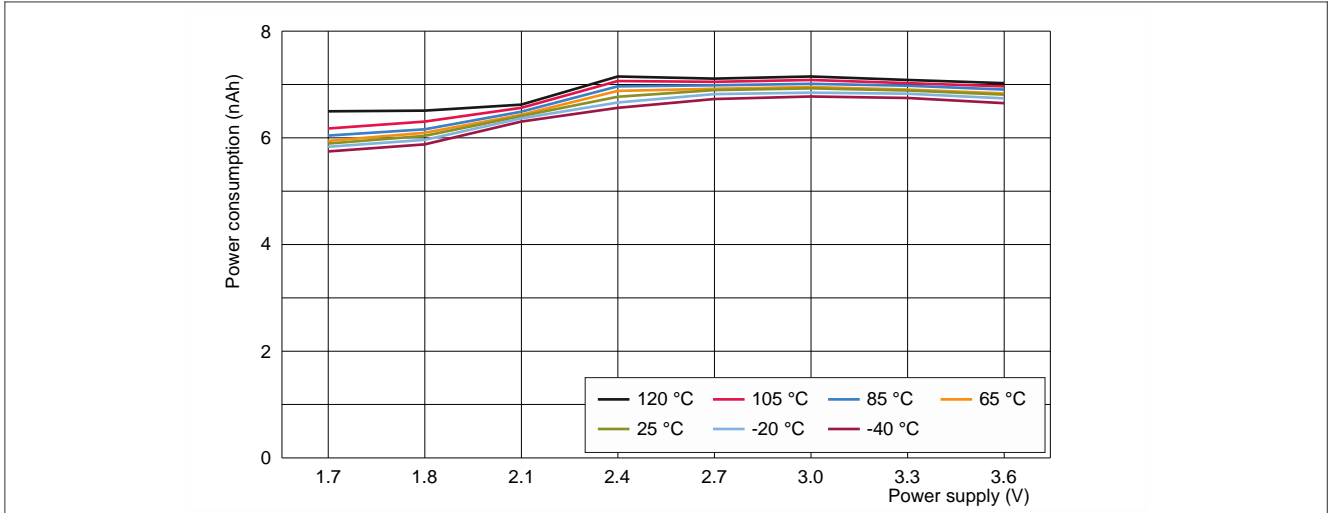


图41. 旁路模式下的全局广播事件功耗曲线与电压及温度的关系, DSM2与主电源

5.2.2.7 连接模式

使用NXP安卓应用程序来建立连接, 参见图42。

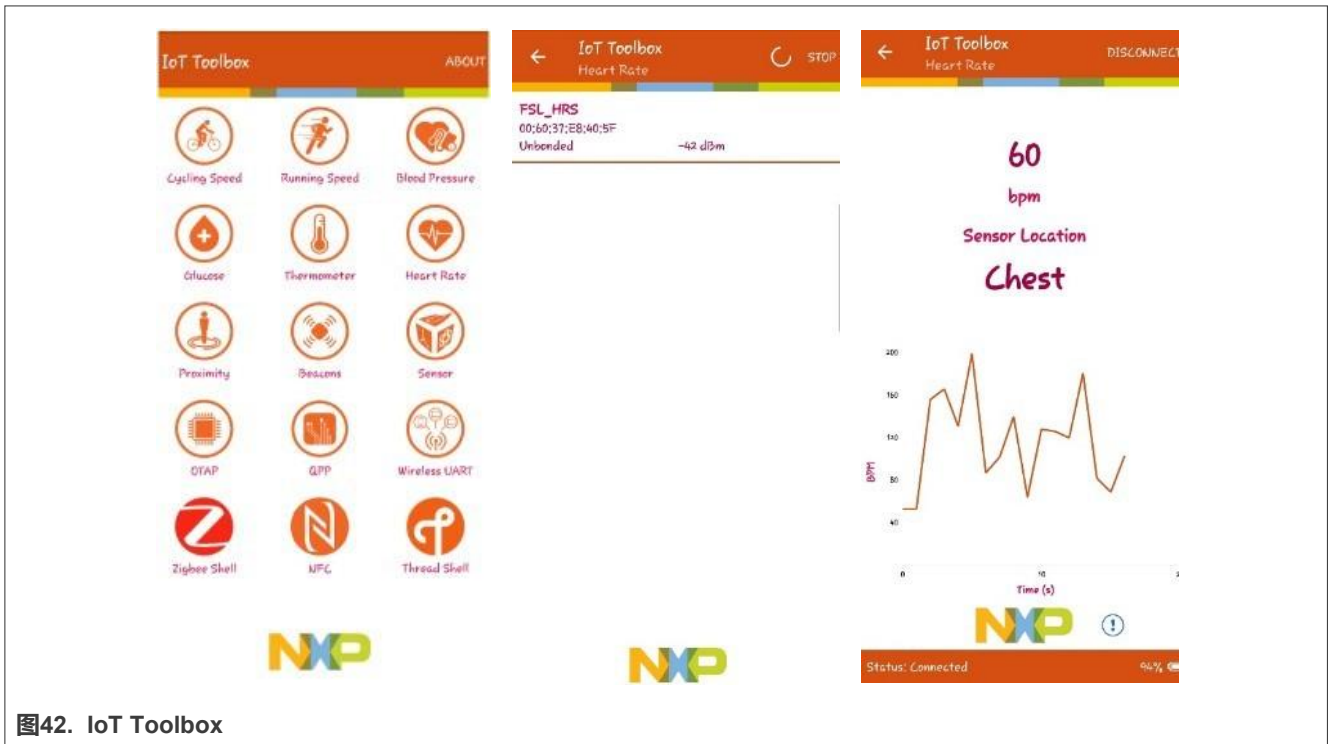


图42. IoT Toolbox

在中心端 (本例中为一台支持低功耗蓝牙5.x的智能手机或平板电脑), 必须安装以下应用程序: IoT Toolbox, 可在Google play商店和Apple iTunes下载 (IoT toolbox版本5.0.9或更高版本)。

必须使用Thermometer (温度计) 应用程序。对于测量广播事件, 不需要连接设备, 但如果是测量连接事件, 则必须建立连接。连接到KW45-EVK板的操作步骤非常简单:

- 打开IoT Toolbox
- 给KW45-EVK板上电并按下SW1，开始广播
- 在Android应用程序中，必须在扫描阶段报告FSL_Thermo
- 连接到FSL_Thermo外设
- 等待测量结果

模板：

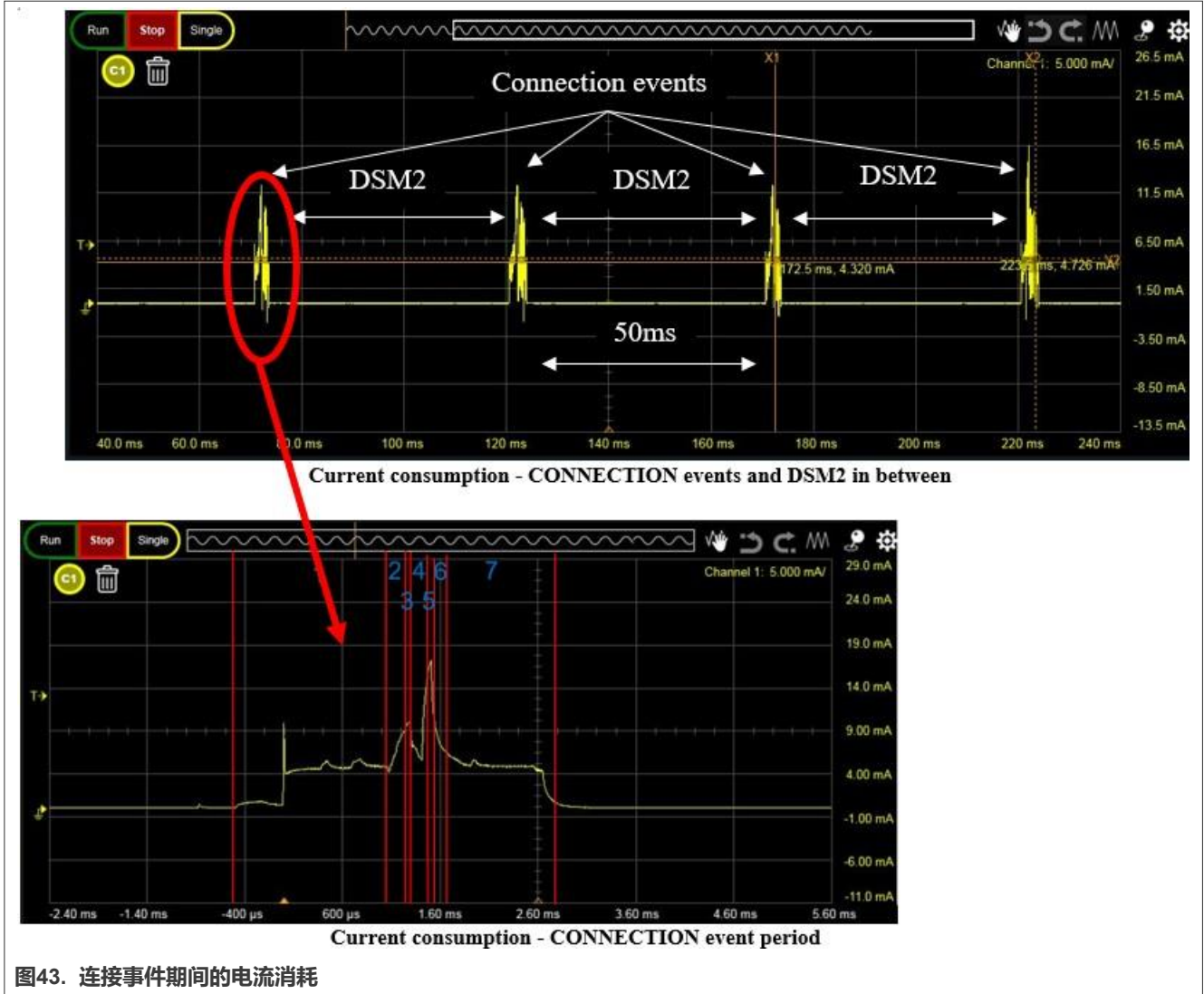


图43. 连接事件期间的电流消耗

表45. 事件

序号	广播事件时序
1	预处理
2	TX预热
3	RX活动
4	RX转换到TX状态
5	TX活动
6	TX渐停

表45. 事件 (续)

序号	广播事件时序
7	后处理

注: 图43中使用了两种用例: 在连接事件之间激活低功耗深度睡眠模式2 (DSM2)。

图43显示了连接事件期间的电流消耗。

所使用的二进制文件的设置 (从设备) 为:

- 48 MHz时钟
- 使用Y字节的RX有效负载, X字节的TX有效负载进行广播, 可连接
- RF输出+0 dBm

降压模式: 从低功耗模式的深度睡眠模式2中唤醒

旁路模式: 从低功耗模式的深度睡眠模式2中唤醒

智能手机是主设备, 它定义了连接期间的数据速率。这里考虑了四种数据速率:

- 1 Mbit/s
- 2 Mbit/s
- 500 kbit/s (LR S=2)
- 125 kbit/s (LR S=8)

在app_preinclude.h中, 必须启用gAppExtAdvEnable才能建立LR连接。

如果已启用, 则需要OPT Host库 (必须在链接器设置中将lib_ble_5-2_OPT_host_cm33_iar.a设置为库)

```
*/ #define gAppExtAdvEnable_d 1
```

测试环境: 连接速率为1 Mbit/s

表46. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	1 Mbit/s	
有效负载	Tx (发送) : 0字节; Rx (接收) : 2字节	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	深度睡眠模式2 (DSM2)	
设置	从低功耗DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

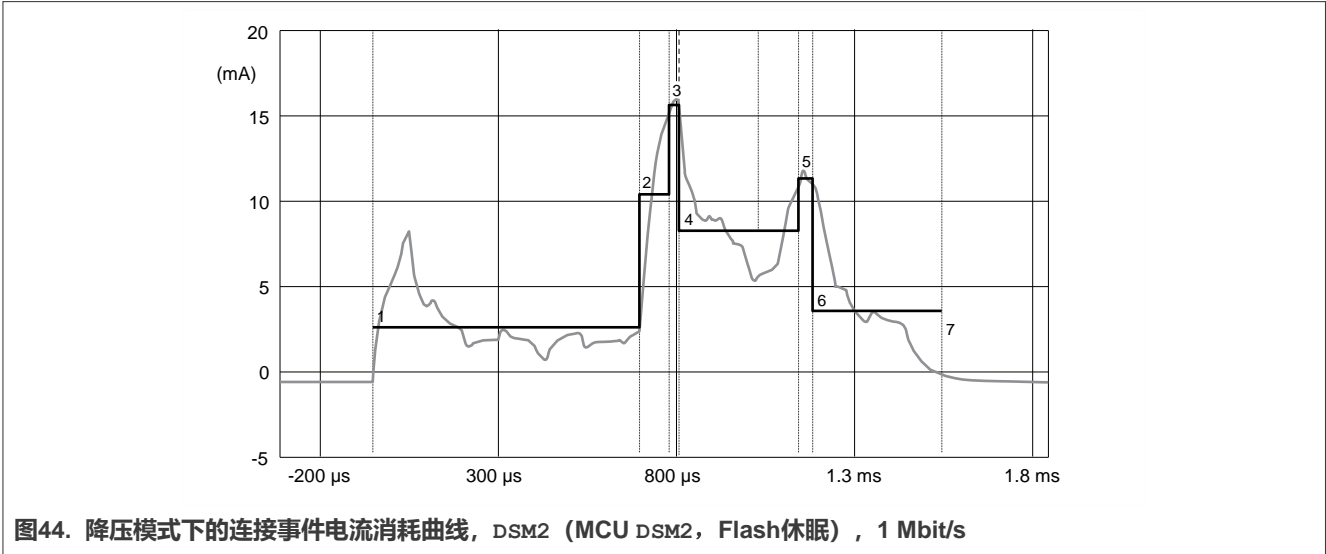
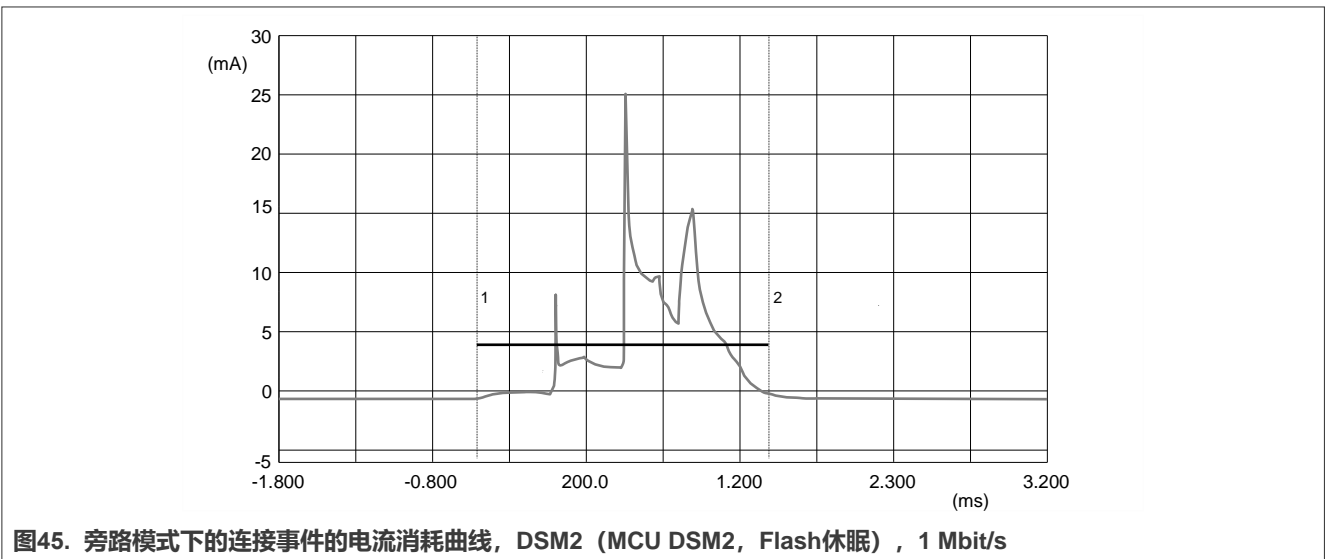


表47. 降压模式下的连接事件的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 1 Mbit/s

连接 (交换1个数据包)				
1 Msps	降压模式	I _{dd} _REG (总电流消耗)		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x ms
连接	预处理	0.750 ms	2.717 mA	2.038 mA-ms
	RX1上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms
	RX1持平	0.080 ms	6.948 mA	0.556 mA-ms
	RX1转换到TX1状态	0.150 ms	6.840 mA	1.026 mA-ms
	TX1持平	0.096 ms	6.860 mA	0.659 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms
	后处理	0.360 ms	4.825 mA	1.737 mA-ms
	活动消耗	1.536 ms	4.361 mA	6.699 mA-ms

电荷积分: 1.86 nAh



应用笔记

表48. 旁路模式下的连接事件电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠) 1 Mbit/s

	旁路模式	Idd_REG (总电流消耗)		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
连接	预处理	0.750 ms	3.378 mA	2.534 mA-ms
	RX1上升	0.080 ms	3.950 mA	0.316 mA-ms
	RX1持平	0.080 ms	14.612 mA	1.169 mA-ms
	RX1转换到TX1状态	0.150 ms	3.950 mA	0.593 mA-ms
	TX1持平	0.096 ms	14.401 mA	1.383 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	3.950 mA	0.079 mA-ms
	后处理	0.360 ms	7.018 mA	2.526 mA-ms
	活动消耗	1.536 ms	5.598 mA	8.599 mA-ms
电荷积分: 2.39 nAh				

测试环境: 连接速率为2 Mbit/s

表49. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	2 Mbit/s	
有效负载	Tx (发送) : 0字节; Rx (接收) : 2字节	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	深度睡眠模式2 (DSM2)	
设置	从低功耗DSM2的从机到主机广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

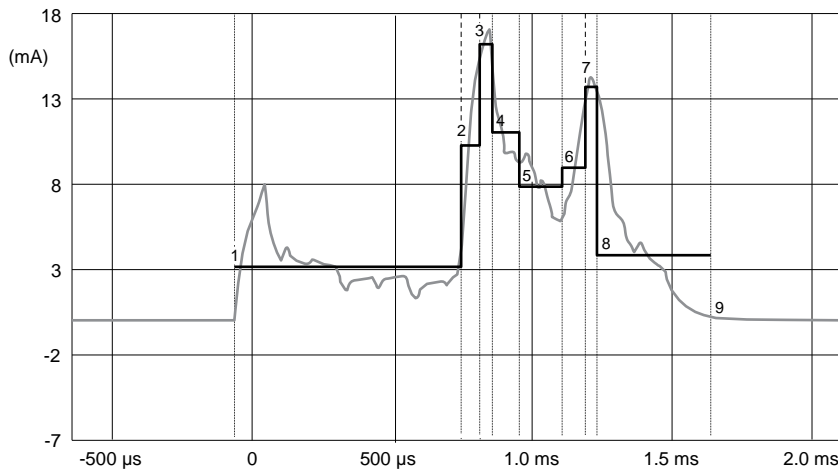


图46. 降压模式下的连接事件电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 2 Mbit/s

表50. 降压模式下的连接事件电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 2 Mbit/s

连接 (交换1个数据包)				
2Msps	降压模式	Idd_REG (总电流消耗)		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
连接	预处理	0.750 ms	1.089 mA	0.816 mA-ms
	RX1上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms
	RX1持平	0.044 ms	6.948 mA	0.306 mA-ms
	RX1转换到TX1状态	0.150 ms	6.840 mA	1.026 mA-ms
	TX1持平	0.052 ms	6.860 mA	0.357 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms
	后处理	0.360 ms	4.825 mA	1.737 mA-ms
	活动消耗	1.456 ms	3.383 mA	4.926 mA-ms
电荷积分: 1.37 nAh				

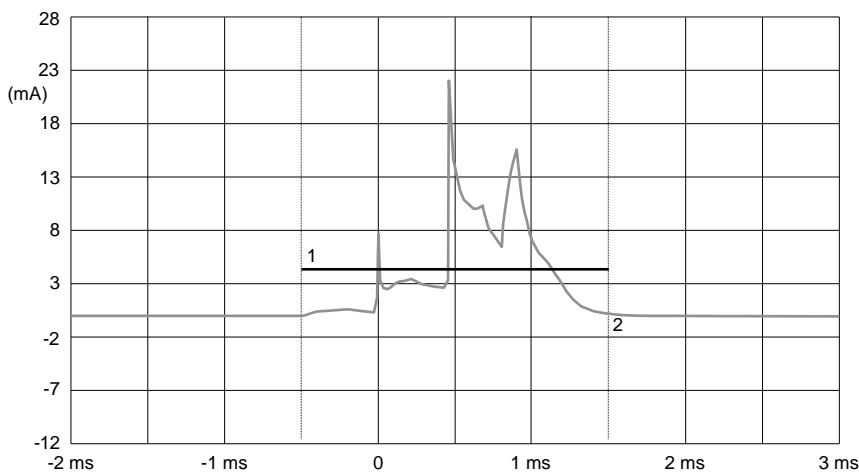


图47. 旁路模式下的连接事件的电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 2 Mbit/s

表51. 旁路模式下的连接事件的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 2 Mbit/s

连接 (交换1个数据包)				
2 Msps	旁路模式	Idd_REG (总电流消耗)		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
连接	预处理	0.750 ms	1.362 mA	1.021 mA-ms
	RX1上升	0.080 ms	3.950 mA	0.316 mA-ms
	RX1持平	0.044 ms	14.612 mA	0.643 mA-ms
	RX1转换到TX1状态	0.150 ms	3.950 mA	0.593 mA-ms
	TX1持平	0.052 ms	14.401 mA	0.749 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	3.950 mA	0.079 mA-ms
	后处理	0.360 ms	7.018 mA	2.526 mA-ms
	活动消耗	1.456 ms	4.071 mA	5.927 mA-ms
	电荷积分: 1.65 nAh			

测试环境: 连接速率为500 kbit/s (编码LR S2)

表52. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	500 kbit/s	
有效负载	Tx (发送) : 0字节; Rx (接收) : 2字节	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	深度睡眠模式2 (DSM2)	
设置	从低功耗DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

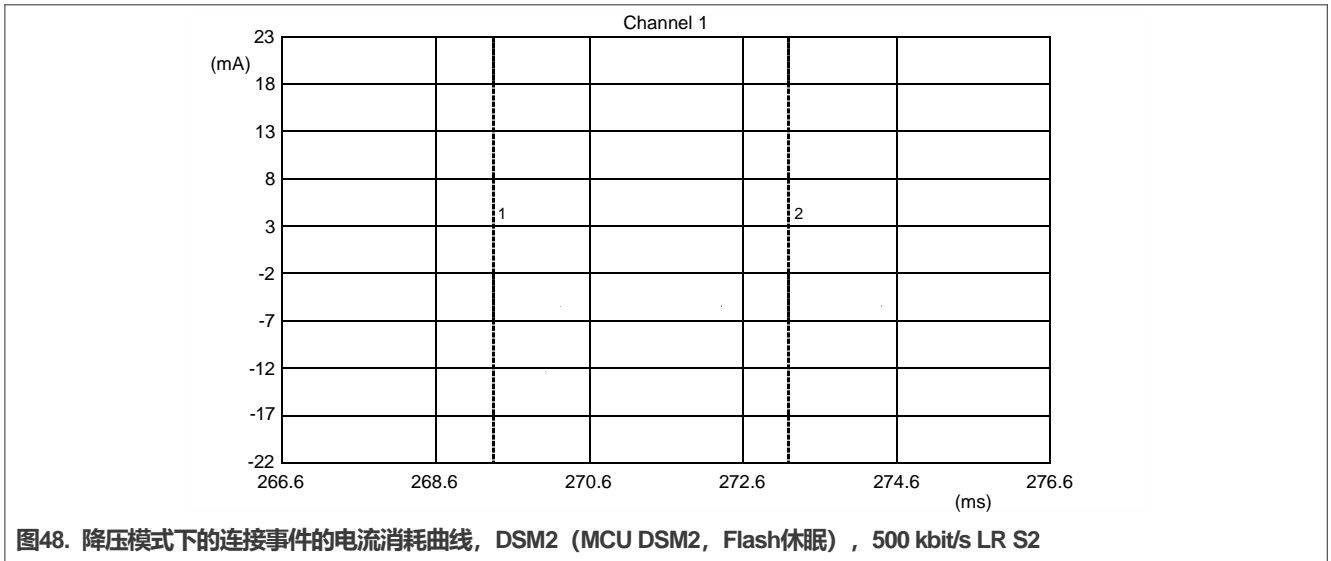


表53. 降压模式下的连接事件的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 500 kbit/s LR S2

连接 (交换1个数据包)				
500 ksps	降压模式	I _{dd} _REG (总电流消耗)		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
连接	预处理	0.750 ms	2.726 mA	2.175 mA-ms
	RX1上升	0.080 ms	6.840 mA	0.313 mA-ms
	RX1持平	0.160 ms	6.948 mA	0.960 mA-ms
	RX1转换到TX1状态	0.150 ms	6.840 mA	0.629 mA-ms
	TX1持平	0.192 ms	6.860 mA	0.816 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	6.840 mA	0.095 mA-ms
	后处理	0.360 ms	4.825 mA	0.641 mA-ms
	活动消耗	1.712 ms	4.626 mA	7.920 mA-ms
电荷积分: 2.20 nAh				

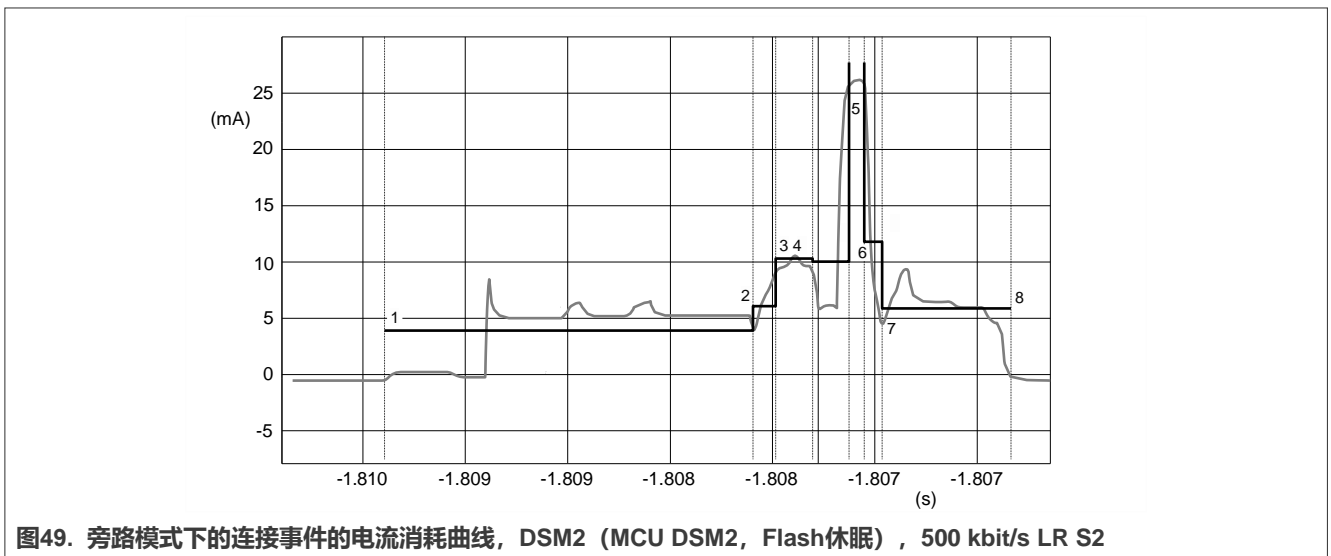


表54. 旁路模式下的连接事件的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 500 kbit/s LR S2

连接 (交换1个数据包)				
500 ksps	旁路模式	Idd_REG (总电流消耗)		
LR S2	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
连接	预处理	0.750 ms	3.430 mA	2.573 mA-ms
	RX1上升	0.080 ms	3.950 mA	0.316 mA-ms
	RX1持平	0.160 ms	14.612 mA	2.338 mA-ms
	RX1转换到TX1状态	0.150 ms	3.950 mA	0.593 mA-ms
	TX1持平	0.192 ms	14.401 mA	2.765 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	3.950 mA	0.079 mA-ms
	后处理	0.360 ms	12.632 mA	4.547 mA-ms
	活动消耗	1.712 ms	7.716 mA	13.211 mA-ms
	电荷积分: 3.67 nAh			

测试环境: 连接速率为125 kbit/s (编码LR S8)

表55. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟方式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	125 kbit/s	
有效负载	Tx (发送) : 0字节; Rx (接收) : 2字节	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	深度睡眠模式2 (DSM2)	
设置	从低功耗DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

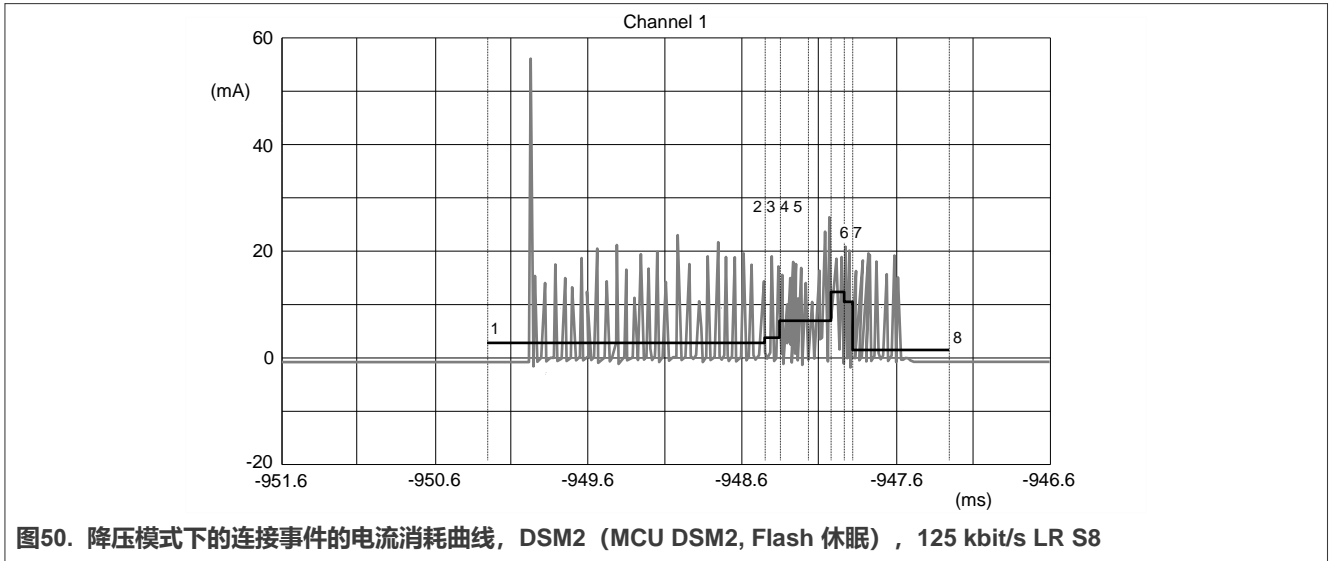


图50. 降压模式下的连接事件的电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash 休眠), 125 kbit/s LR S8

表56. 降压模式下的连接事件的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 125 kbit/s LR S8

连接 (交换1个数据包)				
125 ksps	降压模式	Idd_REG (总电流消耗)		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
连接	预处理	0.750 ms	2.731 mA	2.048 mA-ms
	RX1上升	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms
	RX1持平	0.640 ms	6.948 mA	4.447 mA-ms
	RX1转换到TX1状态	0.150 ms	6.840 mA	1.026 mA-ms
	TX1持平	0.768 ms	6.860 mA	5.268 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms
	后处理	0.360 ms	4.825 mA	1.737 mA-ms
	活动消耗	2.768 ms	5.495 mA	15.210 mA-ms
电荷积分: 4.23 nAh				

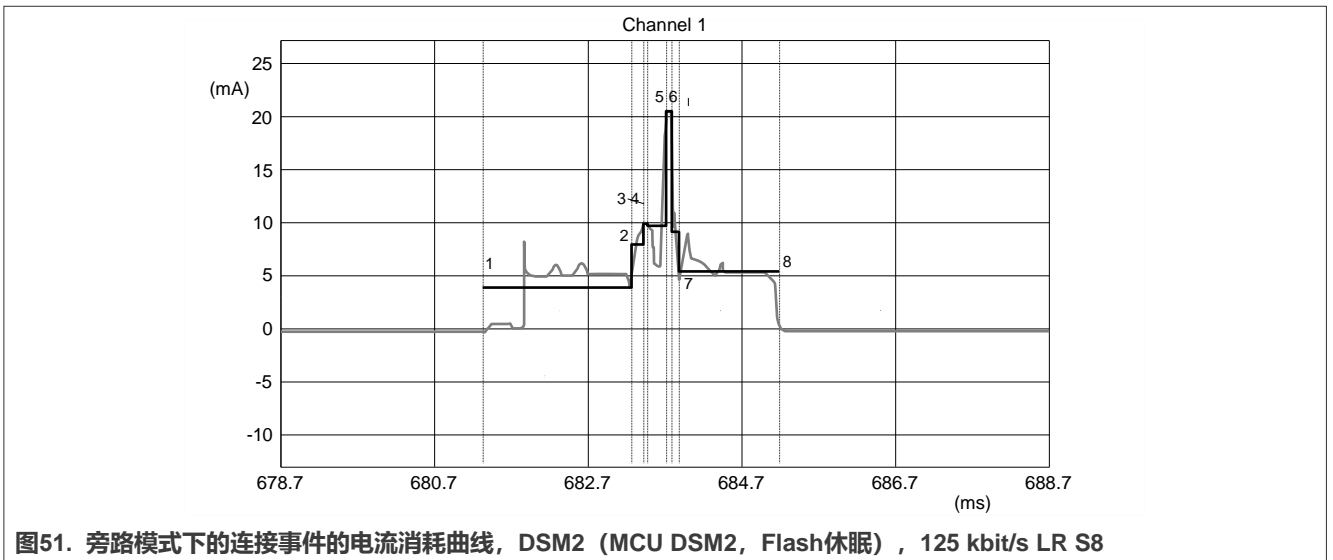


图51. 旁路模式下的连接事件的电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 125 kbit/s LR S8

表57. 旁路模式下的连接事件的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 125 kbit/s LR S8

连接 (交换1个数据包)				
125 kbps	旁路模式	Idd_REG (总电流消耗)		
LR S8	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
连接	预处理	0.750 ms	3.457 mA	2.593 mA-ms
	RX1上升	0.080 ms	3.950 mA	0.316 mA-ms
	RX1持平	0.640 ms	14.612 mA	9.351 mA-ms
	RX1转换到TX1状态	0.150 ms	3.950 mA	0.593 mA-ms
	TX1持平	0.768 ms	14.401 mA	11.060 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	3.950 mA	0.079 mA-ms
	后处理	0.360 ms	12.632 mA	4.547 mA-ms
	活动消耗	2.768 ms	10.310 mA	28.539 mA-ms
	电荷积分: 7.93 nAh			

总结:

表58. 连接事件的电流消耗 (MCU DSM2, Flash休眠)

48 MHz时钟, 使用32KHz晶振	降压模式的电流消耗 (3 V)		旁路模式的电流消耗 (3 V)	
	DSM2		DSM2	
	T= 25 °C			
CONN预处理1 Mbit/s	4.361 mA		5.598 mA	
CONN预处理2 Mbit/s	3.383 mA		4.071 mA	
CONN预处理500 kbit/s	4.626 mA		7.716 mA	
CONN预处理125 kbit/s	5.495 mA		10.310 mA	

表59. 连接时序 (MCU DSM2, Flash休眠)

无线电/配置文件时序参数 (ms)	降压模式的电流消耗 (3 V)		旁路模式的电流消耗 (3 V)	
48 MHz时钟, 使用32 kHz晶振	DSM2		DSM2	
	T= 25 °C			
	Conn (连接) 预处理时间 - 1 Mbit/s	0.750 ms		0.750 ms
Conn后处理时间 - 1 Mbit/s	0.360 ms		0.360 ms	
Conn预处理时间 - 2 Mbit/s	0.750 ms		0.750 ms	
Conn后处理时间 - 2 Mbit/s	0.360 ms		0.360 ms	
Conn预处理时间 - 500 kbit/s	0.750 ms		0.750 ms	
Conn后处理时间 - 500 kbit/s	0.360 ms		0.360 ms	
Conn预处理时间 - 125 kbit/s	0.750 ms		0.750 ms	
Conn后处理时间 - 125 kbit/s	0.360 ms		0.360 ms	

表60. 连接事件的电流消耗

连接	Vdcdc_in=3 V	DSM2		
1 Mbit/s	降压	1.536 ms	4.361 mA	1.861 nAh
	旁路	1.536 ms	5.598 mA	2.389 nAh

表60. 连接事件的电流消耗 (续)

连接	Vdcdc_in=3 V	DSM2		
2 Mbit/s	降压	1.456 ms	3.383 mA	1.368 nAh
	旁路	1.456 ms	4.071 mA	1.646 nAh
LR S2, 500 kbit/s	降压	1.712 ms	4.626 mA	2.200 nAh
	旁路	1.712 ms	7.716 mA	3.670 nAh
LR S8, 125 kbit/s	降压	2.768 ms	5.495 mA	4.225 nAh
	旁路	2.768 ms	10.310 mA	7.928 nAh

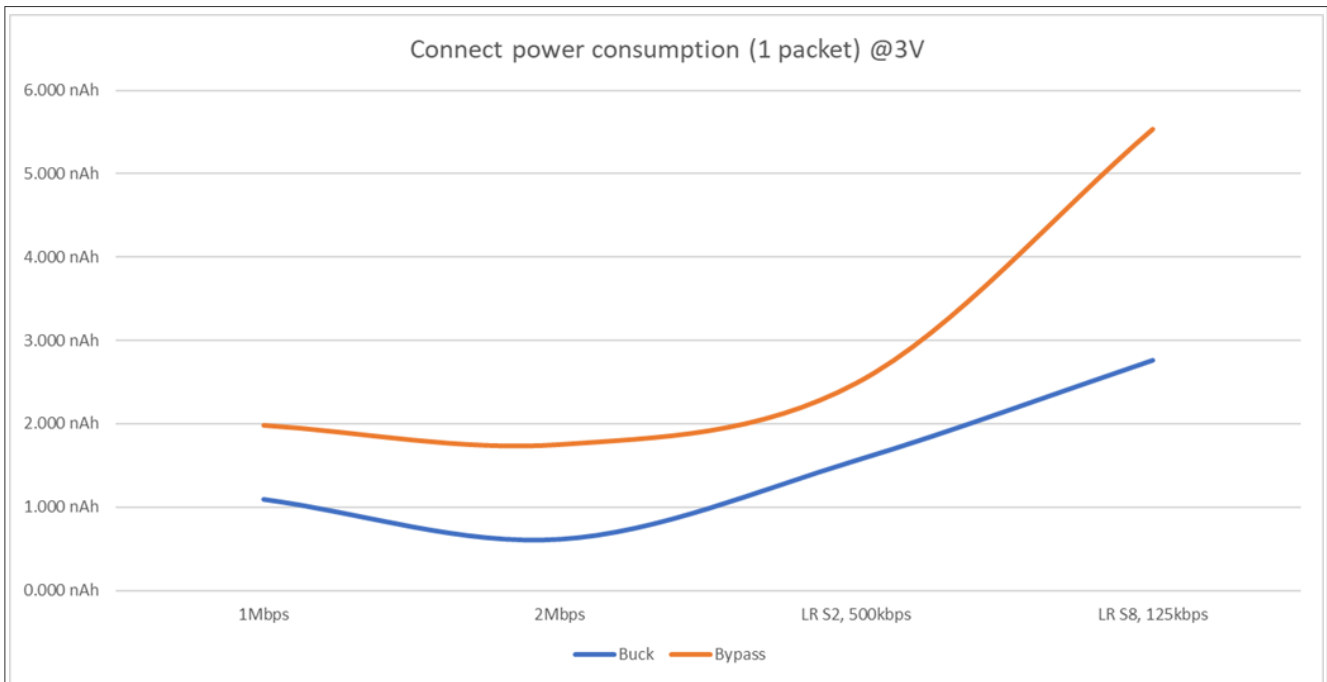


图52. 连接事件的电流消耗曲线与数据速率及DC-DC模式的关系, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

5.2.2.8 扫描模式

按照第4.2节中列出的步骤, 图53显示了部分低功耗蓝牙场景 (温度采集器应用)。表61列出了主要事件和阶段, 包括所有后续的电流图。

使用降压模式和旁路DC-DC模式:

- 在扫描事件之间激活DSM2模式。

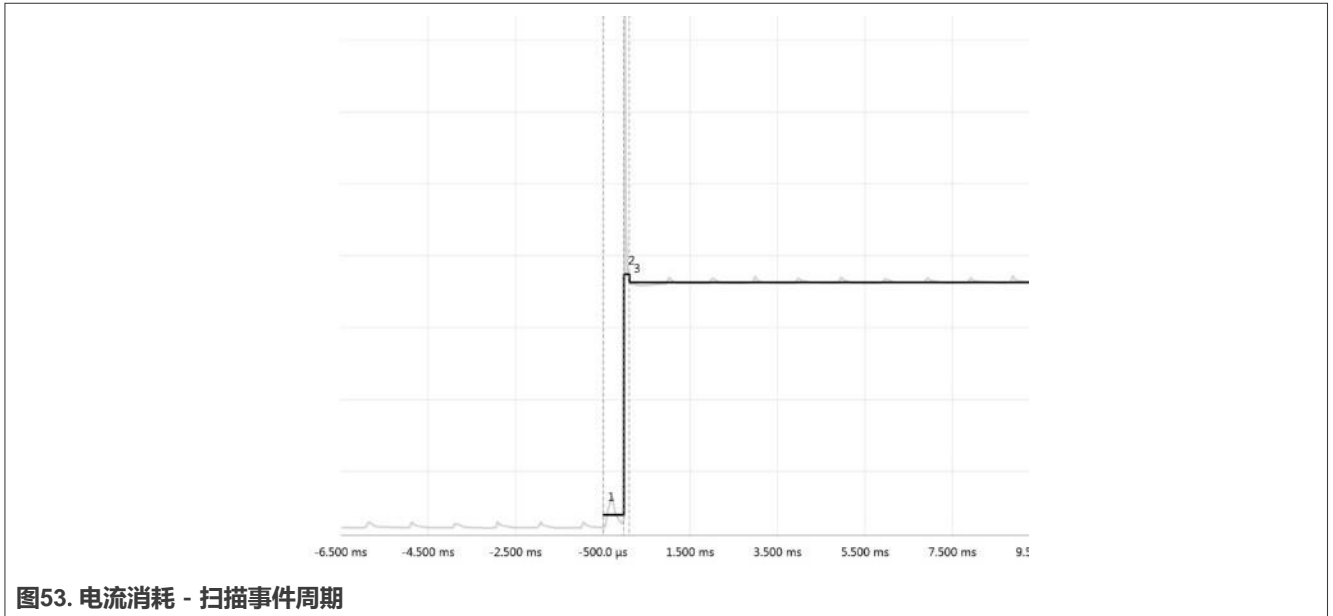


图53. 电流消耗 - 扫描事件周期

表61. 扫描事件

序号	事件
1	预处理
2	RX预热
3	RX活动
4	RX渐停
5	后处理

图54显示了扫描事件期间的电流消耗。

所使用的二进制文件的设置如下：

- 48 MHz时钟
- 扫描

降压模式：从低功耗模式的深度睡眠模式2中唤醒

旁路模式：从低功耗模式的深度睡眠模式2中唤醒

测试环境：扫描模式

表62. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	无可用的数据	
MCU时钟方式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	1 Mbit/s	
有效负载	无可用的数据	
可连接	是	

表62. 测试环境 (续)

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
Flash	Doze	
MCU	DSM2	
设置	从低功率DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

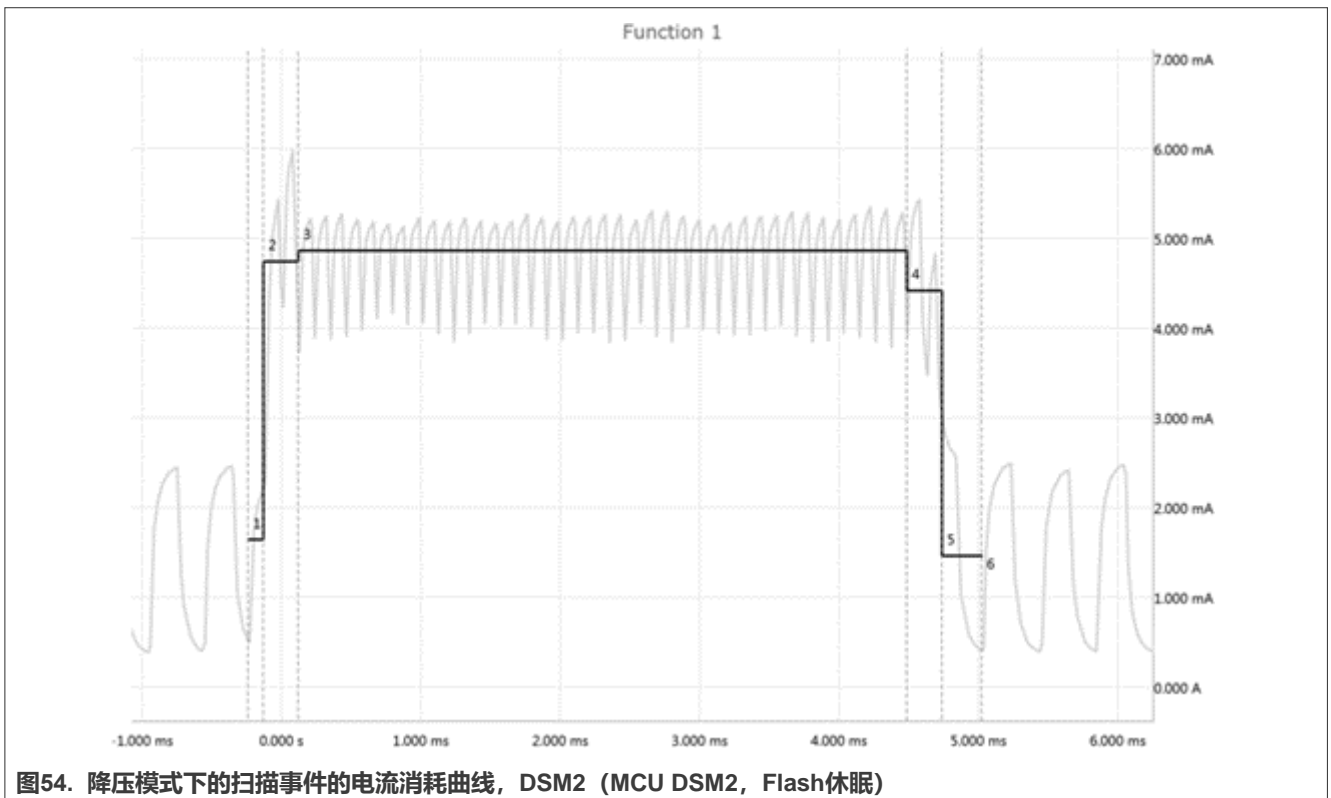


图54. 降压模式下的扫描事件的电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

表63. 降压模式下的扫描事件的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

扫描				
降压	扫描窗口	4.0 ms		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
扫描	扫描预处理	1.900 ms	2.668 mA	5.069 mA-ms
	RX预热	0.080 ms	6.840 mA	0.547 mA-ms
	RX扫描	4.000 ms	7.463 mA	29.851 mA-ms
	RX渐停	0.020 ms	6.840 mA	0.137 mA-ms
	扫描后处理	0.150 ms	4.550 mA	0.683 mA-ms
	活动消耗	6.150 ms	平均值= 5.672 mA	36.287 mA-ms
电荷积分: 10.08 nAh				

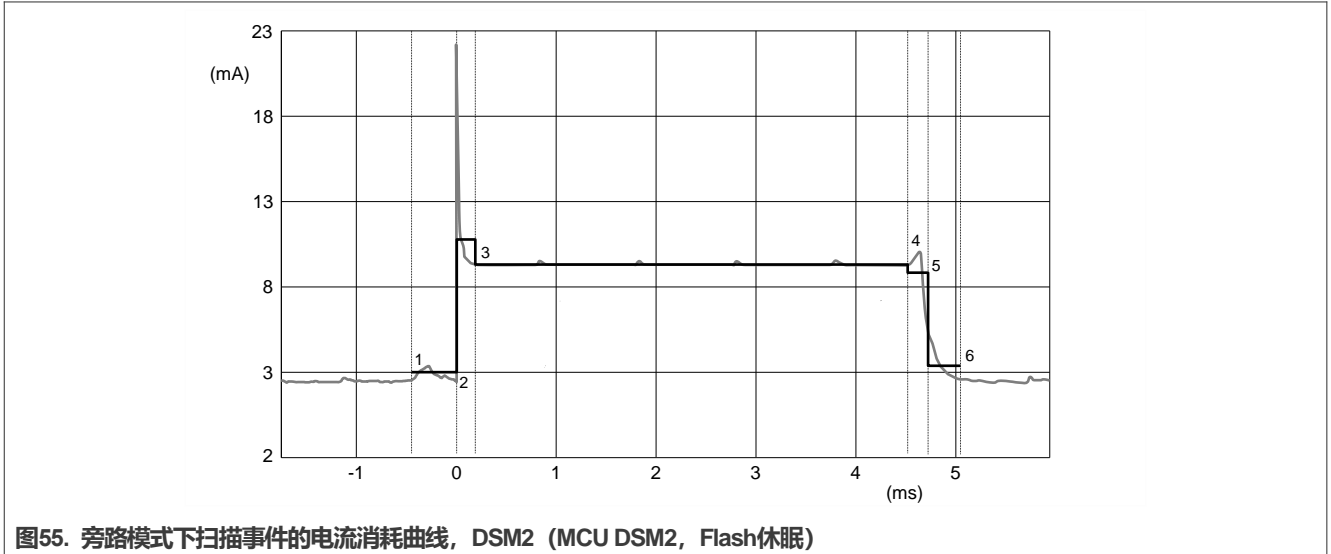


图55. 旁路模式下扫描事件的电流消耗曲线, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

表64. 旁路模式下扫描事件的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)

扫描				
旁路	扫描窗口	4 ms		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
扫描	扫描预处理	1.900 ms	5.760 mA	10.944 mA-ms
	RX预热	0.080 ms	39.900 mA	3.192 mA-ms
	RX扫描	4.000 ms	15.783 mA	63.131 mA-ms
	RX渐停	0.020 ms	39.900 mA	0.798 mA-ms
	扫描后处理	0.150 ms	7.800 mA	1.170 mA-ms
	活动消耗	6.150 ms	平均值= 21.829 mA	79.235 mA-ms
电荷积分: 22.01 nAh				

总结:

表65. 扫描电流时序 (MCU DSM2, Flash休眠)

无线电/配置文件时序参数 (ms)	3.6 V 下的电流消耗	
	降压模式 (3.6 V)	旁路模式 (3.6 V)
	DSM2	
48 MHz FEE模式, 使用32 kHz晶振	T= 25 °C	
扫描预处理时间	1.900 ms	1.900 ms
扫描后处理时间	0.150 ms	0.150 ms

表66. 扫描事件的电流消耗

	Vdcdc_in = 3.6 V	DSM2 (ms)	DSM2 (mA)	DSM2 (nAh)
扫描	降压	6.150 ms	5.672 mA	10.08 nAh
	旁路	6.150 ms	21.829 mA	22.01 nAh

5.3 广播扩展

蓝牙5.x允许在数据信道上传输广播数据包（尽管规范更倾向于将其标记为辅助广播信道）：

- 增加广播数据长度
- 允许在数据信道上进行广播
- 支持远距离连接的建立
- 支持链接（chaining）和周期性广播

在这种情况下，新的主广播会指向一个辅助包；该辅助包指定了一个以已知节奏（Cadence）跳跃的“无连接”数据包序列。

该辅助包提供了节奏（Cadence）信息和访问地址的代码。

表67和图56显示了数据速率为1 Mbit/s、2 Mbit/s（编码）时的广播事件及数据速率为1 Mbit/s、2 Mbit/s（编码）时的广播扩展事件期间的电流消耗。有关更多详细信息请参见图57和图64。

所使用的二进制文件的设置如下：

- 48 MHz时钟
- 广播扩展，对于信道37、38和39为PDU 8字节，而对于辅助信道为PDU Y字节（X字节的有效负载），可连接。
- RF输出+0 dBm

降压模式：从低功耗模式的深度睡眠模式2中唤醒

旁路模式：从低功耗模式的深度睡眠模式2中唤醒

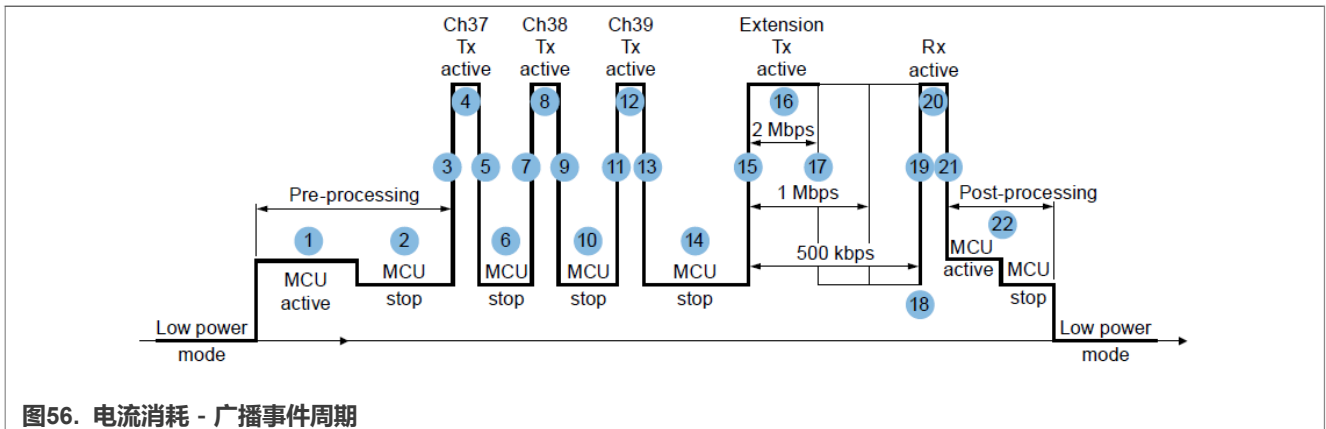


表67. 广播扩展事件

序号	ADV（广播）事件时序
1	预处理/MCU活动
2	后处理/MCU停止
3	TX渐停
4	TX活动
5	TX渐停
6	MCU停止
7	TX预热
8	TX活动

表67. 广播扩展事件 (续)

序号	ADV (广播) 事件时序
9	TX渐停
10	MCU停止
11	TX预热
12	TX活动
13	TX渐停
14	MCU停止
15	TX预热
16	TX活动
17	TX渐停
18	TX转换到RX
19	RX预热
20.	RX活动
21	RX渐停
22	后处理

测试环境: 广播扩展 1 Mbit/s 1 Mbit/s

表68. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	1 Mbit/s 1 Mbit/s	
有效负载	对于信道37、38和39: PDU大小为2字节 (2字节的有效负载), 对于辅助信道: PDU大小为2字节, 有效负载大小为Tx (发送) 31字节, Rx (接收) 0字节	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	DSM2	
设置	从低功率DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版本)	

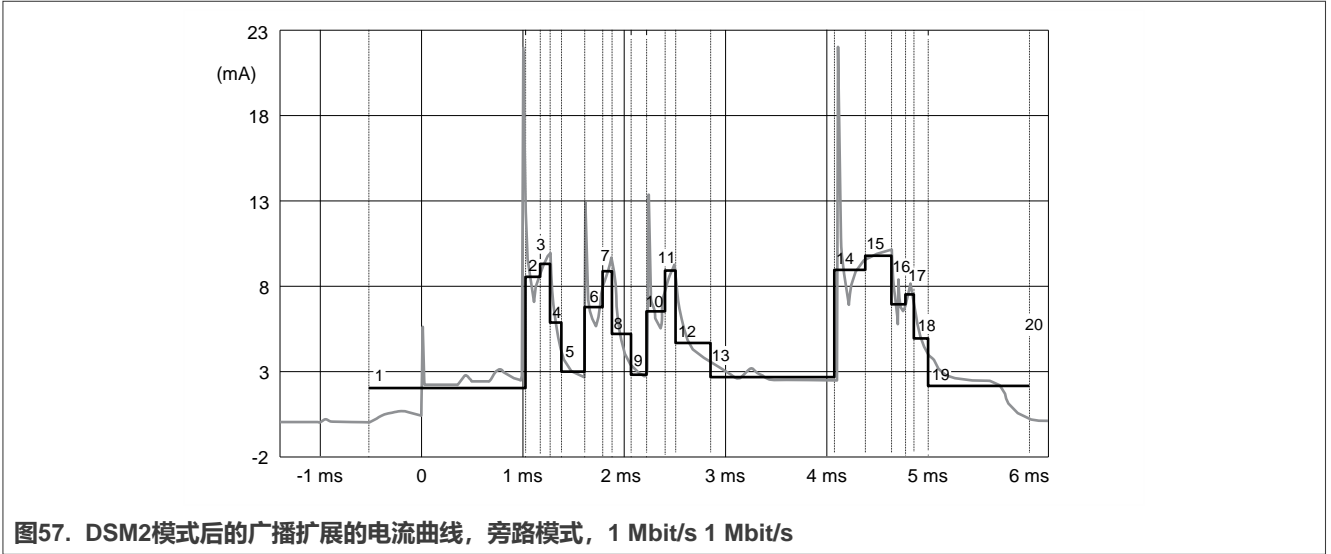


图57. DSM2模式后的广播扩展的电流曲线，旁路模式，1 Mbit/s 1 Mbit/s

表69. 旁路模式下的广播扩展的电流消耗，DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠)，1 Mbit/s 1 Mbit/s

旁路模式		Idd_REG (总电流消耗)		
状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS	
广播	预处理	0.900 ms	2.400 mA	2.160 mA-ms
	TX1上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX1持平	0.096 ms	14.401 mA	1.383 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.117 ms	2.900 mA	0.338 mA-ms
	TX2上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX2持平	0.096 ms	14.401 mA	1.383 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.429 ms	2.900 mA	1.244 mA-ms
	TX3上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX3持平	0.096 ms	14.401 mA	1.383 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.117 ms	2.900 mA	0.338 mA-ms
	TX辅助信道上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX辅助信道持平	0.328 ms	14.401 mA	4.724 mA-ms
	TX转换到RX1	0.050 ms	13.400 mA	0.670 mA-ms
	RX辅助信道持平	0.080 ms	14.612 mA	1.169 mA-ms
	RX辅助信道下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	后处理	0.560 ms	4.000 mA	2.240 mA-ms
	活动消耗	3.268 ms	10.943 mA	22.390 mA-ms
电荷积分: 6.22 nAh				

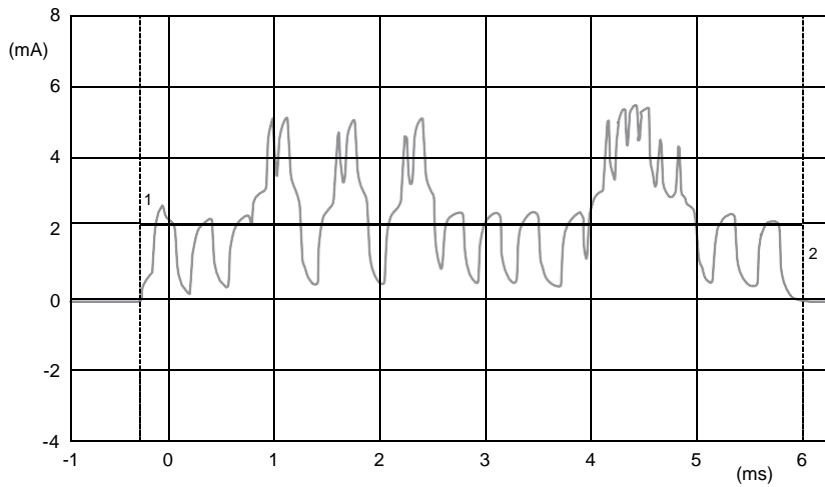


图58. DSM2模式后的广播扩展的电流曲线, 降压模式, 1 Mbit/s 1 Mbit/s

表70. 降压模式下的广播扩展的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 1 Mbit/s 1 Mbit/s

降压模式		Idd_REG (总电流消耗)		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
广播 (ADV)	活动消耗	2.421 ms	4.598 mA	11.132 mA-ms
电荷积分: 3.09 nAh				

测试环境: 广播扩展1 Mbit/s 2 Mbit/s

表71. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128k	
数据速率	1 Mbit/s 2 Mbit/s	
有效负载	对于信道37、38和39: PDU大小为2字节 (2字节有效负载), 对于辅助信道: PDU大小为2字节, 有效负载为Tx (发送) 31字节, Rx (接收) 0字节。	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	DSM2	
设置	从低功率DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

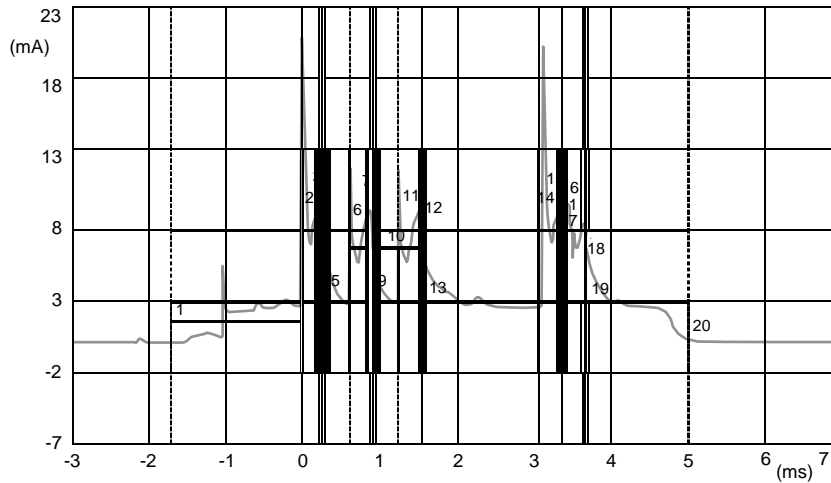


图59. DSM2模式后的广播扩展的电流曲线, 旁路模式, 1 Mbit/s, 2 Mbit/s

表72. 旁路模式下的广播扩展的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 1 Mbit/s 2 Mbit/s

旁路模式		Idd_REG (总电流消耗)		
状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS	
广播	预处理	0.900 ms	2.400 mA	2.160 mA-ms
	TX1上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX1持平	0.052 ms	14.401 mA	0.749 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.161 ms	2.900 mA	0.465 mA-ms
	TX2上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX2持平	0.052 ms	14.401 mA	0.749 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.161 ms	2.900 mA	0.465 mA-ms
	TX3上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX3持平	0.052 ms	14.401 mA	0.749 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.161 ms	2.900 mA	0.465 mA-ms
	TX辅助信道上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX辅助信道持平	0.168 ms	14.401 mA	2.419 mA-ms
	TX转换到RX1	0.050 ms	13.400 mA	0.670 mA-ms
	RX辅助信道持平	0.044 ms	14.612 mA	0.643 mA-ms
	RX辅助信道下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	后处理	0.560 ms	4.000 mA	2.240 mA-ms
	活动消耗	2.760 ms	6.210 mA	17.135 mA-ms
电荷积分: 4.76 nAh				

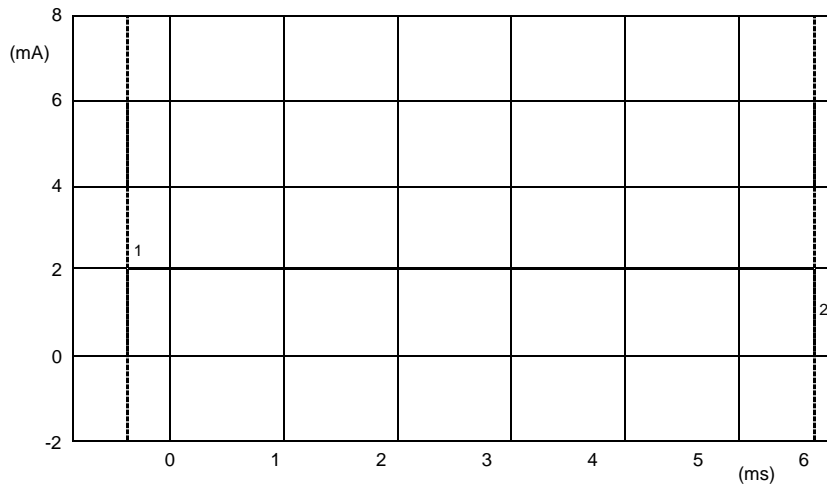


图60. DSM2模式后的广播扩展事件的电流曲线，降压模式，1 Mbit/s 2 Mbit/s

表73. 降压模式下的广播扩展的电流消耗，DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠, 1 Mbit/s 2 Mbit/s)

	降压模式	I _{dd_REG} (总电流消耗)		
		时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
广播 (ADV)	活动消耗	2.225 ms	4.097 mA	9.116 mA-ms
-	电荷积分: 2.53 nAh			

测试环境：广播扩展，1 Mbit/s，编码

表74. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	V _{dd_DCDC} = 3 V V _{dd_RF} = 1.25 V V _{ddLDO_Core} = 1.25 V	V _{dd_RF} = 3 V V _{dd_LDO_Core} =3 V
RF输出功率	+ 0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128 k	
数据速率	1 Mbit/s, 编码	
有效负载	对于信道37、38和39: PDU大小为2字节 (2字节有效负载), 对于辅助信道: PDU大小为2字节, 有效负载大小为31字节。	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	DSM2	
设置	从低功率DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

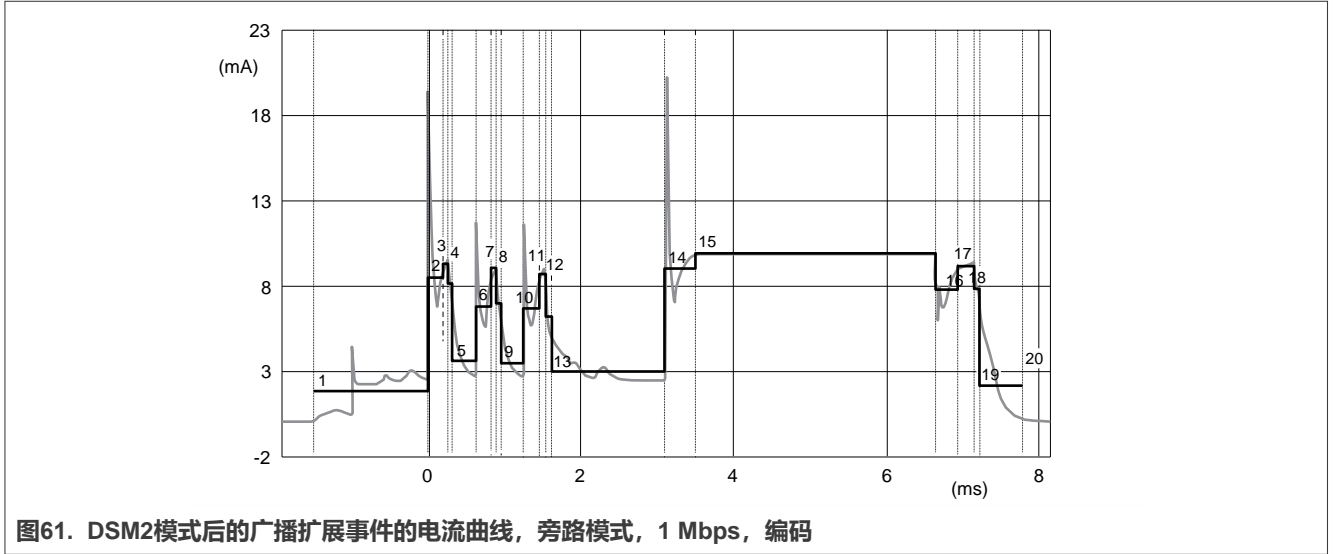


图61. DSM2模式后的广播扩展事件的电流曲线，旁路模式，1 Mbps，编码

表75. DSM2模式下的广播扩展的电流消耗，旁路模式，1 Mbps，编码

旁路模式		I _{DD_REG} (总电流消耗)		
状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x ms	
广播	预处理	0.900 ms	2.400 mA	2.160 mA-ms
	TX1上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX1持平	0.192 ms	14.401 mA	2.765 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.021 ms	2.900 mA	0.059 mA-ms
	TX2上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX2持平	0.192 ms	14.401 mA	2.765 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.021 ms	2.900 mA	0.059 mA-ms
	TX3上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX3持平	0.192 ms	14.401 mA	2.765 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.021 ms	2.900 mA	0.059 mA-ms
	TX辅助信道上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX辅助信道持平	0.656 ms	14.401 mA	9.447 mA-ms
	TX转换到RX1	0.050 ms	13.400 mA	0.670 mA-ms
	RX辅助信道持平	0.160 ms	14.612 mA	2.338 mA-ms
	RX辅助信道下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	后处理	0.560 ms	4.000 mA	2.240 mA-ms
	活动消耗	3.364 ms	9.124 mA	30.688 mA-ms
电荷积分: 8.52 nAh				

表76. 降压模式下的广播扩展的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 1 Mbps, 编码

降压模式		Idd_REG (总电流消耗)		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
广播 (ADV)	有效消耗	2.829 ms	5.442 mA	15.395 mA-ms
电荷积分: 4.28 nAh				

测试环境: 广播扩展编码1 MspS

表77. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128 k	
数据速率	编码1 MspS	
有效负载	对于信道37、38和39: PDU大小为2字节 (有效负载为31字节), 对于辅助信道: PDU大小为2字节, 有效负载为2字节	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	DSM2	
设置	从低功率DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

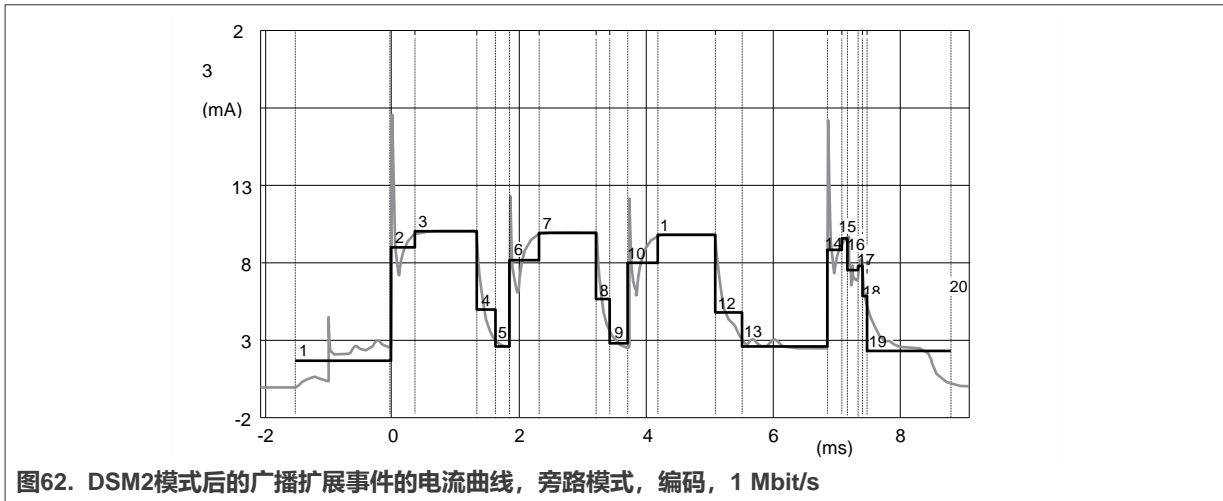


表78. 旁路模式下的广播扩展的电流消耗, DSM2模式, 编码, 1 Mbit/s

	旁路模式	Idd_REG (总电流消耗)		
		时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
广播	预处理	1.500 ms	2.400 mA	3600 mA-ms
	TX1上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX1持平	0.328 ms	14.401 mA	4.724 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.197 ms	2.900 mA	0.571 mA-ms
	TX2上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX2持平	0.328 ms	14.401 mA	4.724 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.197 ms	2.900 mA	0.571 mA-ms
	TX3上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX3持平	0.328 ms	14.401 mA	4.724 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.197 ms	2.900 mA	0.571 mA-ms
	TX辅助信道上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX辅助信道持平	0.096 ms	14.401 mA	1.382 mA-ms
	TX转换到RX1	0.050 ms	13.400 mA	0.670 mA-ms
	RX辅助信道持平	0.080 ms	14.612 mA	1.169 mA-ms
	RX辅助信道下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	后处理	1.330 ms	4.000 mA	5.320 mA-ms
	活动消耗	5.031 ms	6.636 mA	33.386 mA-ms
电荷积分: 9.27 nAh				

表79. 旁路模式下的广播扩展电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash Doze) , 编码, 1 Mbit/s

	降压模式	Idd_REG (总电流消耗)		
		时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
广播 (ADV)	有效消耗	5.031 ms	3.998 mA	20.114 mA-ms
电荷积分: 5.59 nAh				

测试环境: 广播扩展, 编码, 2 Mbit/s

表80. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+ 0 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	

表80. 测试环境 (续)

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RAM大小	128k	
数据速率	编码, 2 Mbit/s	
有效负载	对于信道37、38和39: PDU大小为2字节 (有效负载为31字节), 对于辅助信道: PDU大小为2字节, 有效负载为2字节	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	DSM2	
设置	从低功耗DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

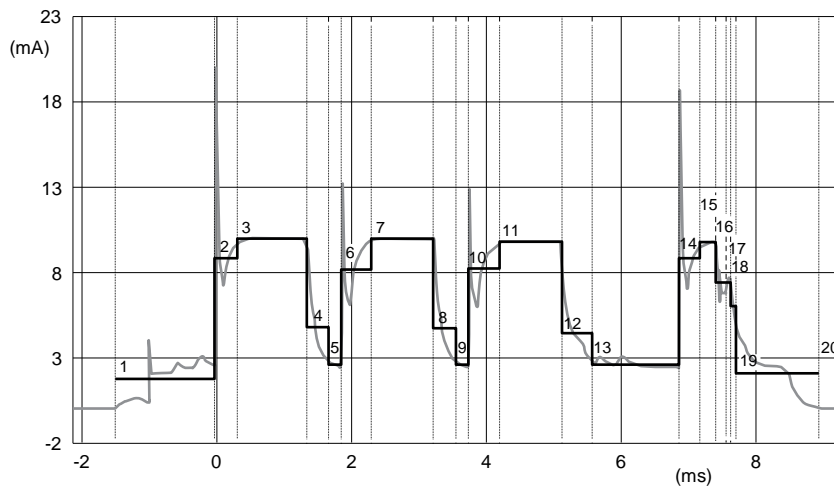


图63. DSM2模式后的广播扩展的电流曲线, 旁路模式, 编码, 2 Mbit/s

表81. 旁路模式下的广播扩展的电流消耗, DSM2模式, 编码, 2 Mbit/s

旁路模式		Idd_REG (总电流消耗)		
状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS	
广播	预处理	1.500 ms	3.621 mA	5.432 mA-ms
	TX1上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX1持平	0.168 ms	14.401 mA	2.419 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.045 ms	2.900 mA	0.129 mA-ms
	TX2上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX2持平	0.168 ms	14.401 mA	2.419 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.045 ms	2.900 mA	0.129 mA-ms
	TX3上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms

表81. 旁路模式下的广播扩展的电流消耗, DSM2模式, 编码, 2 Mbit/s (续)

	旁路模式	Idd_REG (总电流消耗)		
		时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
	TX3持平	0.168 ms	14.401 mA	2.419 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.045 ms	2.900 mA	0.129 mA-ms
	TX辅助信道上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX辅助信道持平	0.052 ms	14.401 mA	0.749 mA-ms
	TX转换到RX1	0.050 ms	13.400 mA	0.670 mA-ms
	RX信道持平	0.044 ms	14.612 mA	0.643 mA-ms
	RX辅助信道下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	后处理	1.330 ms	4.000 mA	5.320 mA-ms
	活动消耗	4.014 ms	6.433 mA	25.819 mA-ms
电荷积分: 7.17 nAh				

表82. 旁路模式下的广播扩展的电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash Doze), 编码, 2 Mbit/s

	降压模式	Idd_REG (总电流消耗)		
		时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
广播 (ADV)	有效消耗	4.014 ms	3.851 mA	15.458 mA-ms
电荷积分: 4.29 nAh				

测试环境: 广播扩展, 编码, 编码

表83. 测试环境: 广播扩展, 编码, 编码

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	+10 dBm	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128 k	
数据速率	编码, 编码	
有效负载	对于信道37、38和39: PDU大小为6字节 (有效负载为31字节), 对于辅助信道: PDU大小2字节, 有效负载大小为Tx (发送): 31字节; Rx (接收): 2字节	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	DSM2	
设置	从低功耗DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

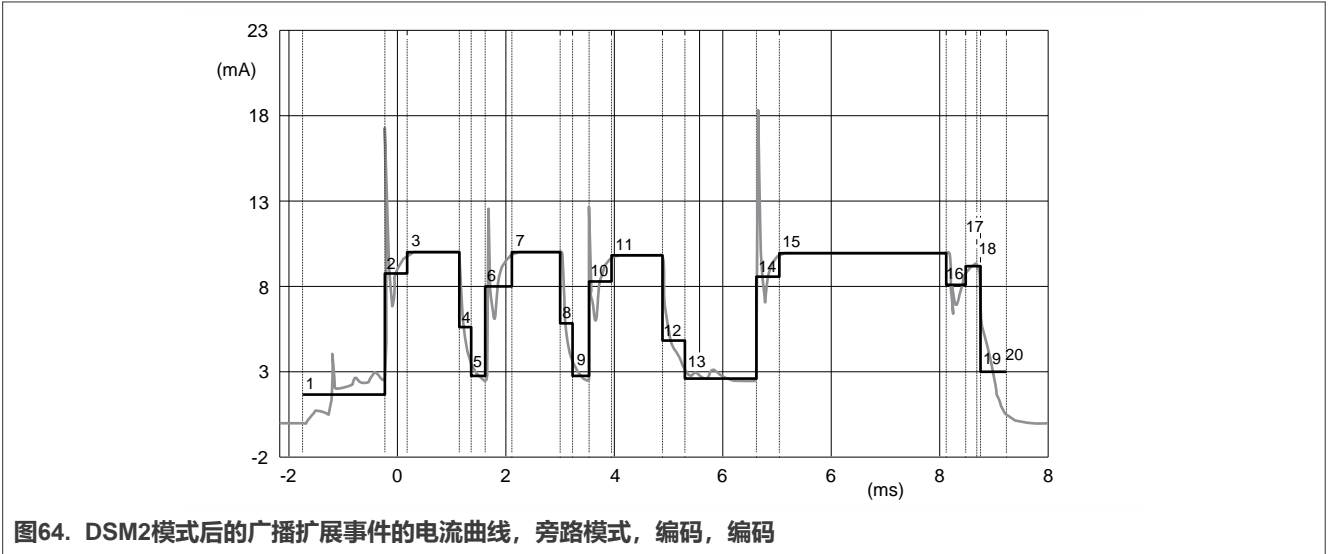


图64. DSM2模式后的广播扩展事件的电流曲线，旁路模式，编码，编码

表84. 旁路模式下的广播扩展的电流消耗，DSM2模式，编码，编码

旁路模式		Idd_REG (总电流消耗)		
状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS	
广播	预处理	1.500 ms	3.653 mA	5.480 mA-ms
	TX1上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX1持平	0.656 ms	14.401 mA	9.447 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.182 ms	2.900 mA	0.526 mA-ms
	TX2上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX2持平	0.656 ms	14.401 mA	9.447 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.182 ms	2.900 mA	0.526 mA-ms
	TX3上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX3持平	0.656 ms	14.401 mA	9.447 mA-ms
	TX1下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	MCU停止	0.182 ms	2.900 mA	0.526 mA-ms
	TX辅助信道上升	0.080 ms	13.400 mA	1.072 mA-ms
	TX辅助信道持平	0.656 ms	14.401 mA	9.447 mA-ms
	TX转换到RX1	0.050 ms	13.400 mA	0.670 mA-ms
	RX辅助信道持平	0.160 ms	14.612 mA	2.338 mA-ms
	RX辅助信道下降	0.020 ms	13.400 mA	0.268 mA-ms
	后处理	1.330 ms	4.000 mA	5.320 mA-ms
	活动消耗	6.609 ms	8.857 mA	58.535 mA-ms
电荷积分: 16.26 nAh				

表85. 旁路模式下的广播扩展电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash 休眠), 编码, 编码

降压模式		Idd_REG (总电流消耗)		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
广播 (ADV)	活动消耗	6.609 ms	4.720 mA	31.194 mA-ms
电荷积分: 8.67 nAh				

汇总表:

表86. 广播扩展的汇总表

		Idd_REG (总电流消耗)			
广播	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS	电荷积分
1 Msps, 1 Msps	降压模式	2.421 ms	4.598 mA	11.132 mA-ms	3.09 nAh
-	旁路模式	3.268 ms	6.851 mA	3.092 mA-ms	6.22 nAh
1 Msps, 2 Msps	降压模式	2.225 ms	4.097 mA	9.116 mA-ms	2.53 nAh
-	旁路模式	2.760 ms	6.210 mA	17.135 mA-ms	4.76 nAh
1个Msps, 编码	降压模式	2.829 ms	5.442 mA	15.395 mA-ms	4.28 nAh
-	旁路模式	3.364 ms	9.124 mA	30.688 mA-ms	8.52 nAh
编码, 1 Msps	降压模式	5.031 ms	3.998 mA	20.114 mA-ms	5.59 nAh
-	旁路模式	5.031 ms	6.636 mA	33.386 mA-ms	9.27 nAh
编码, 2 Msps	降压模式	4.014 ms	3.851 mA	15.458 mA-ms	4.29 nAh
-	旁路模式	4.014 ms	6.433 mA	25.819 mA-ms	7.17 nAh
编码, 编码	降压模式	6.609 ms	4.720 mA	31.194 mA-ms	8.67 nAh
-	旁路模式	6.609 ms	8.857 mA	58.535 mA-ms	16.26 nAh

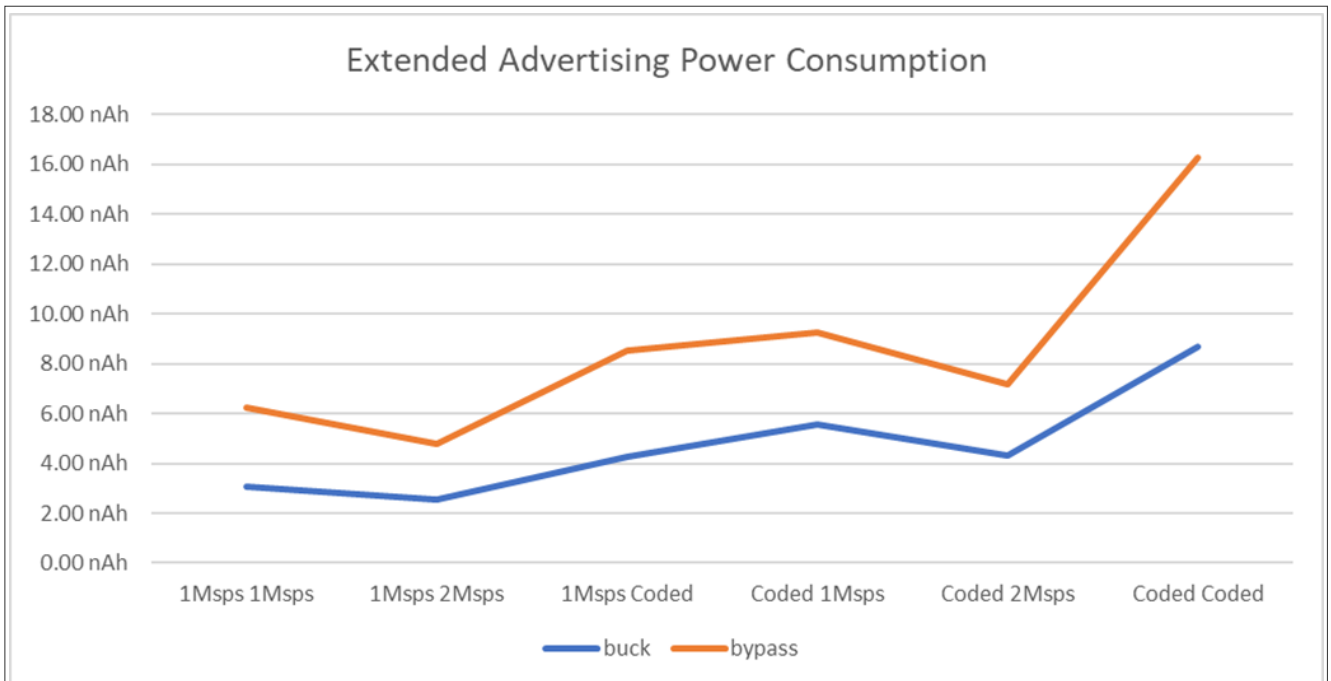
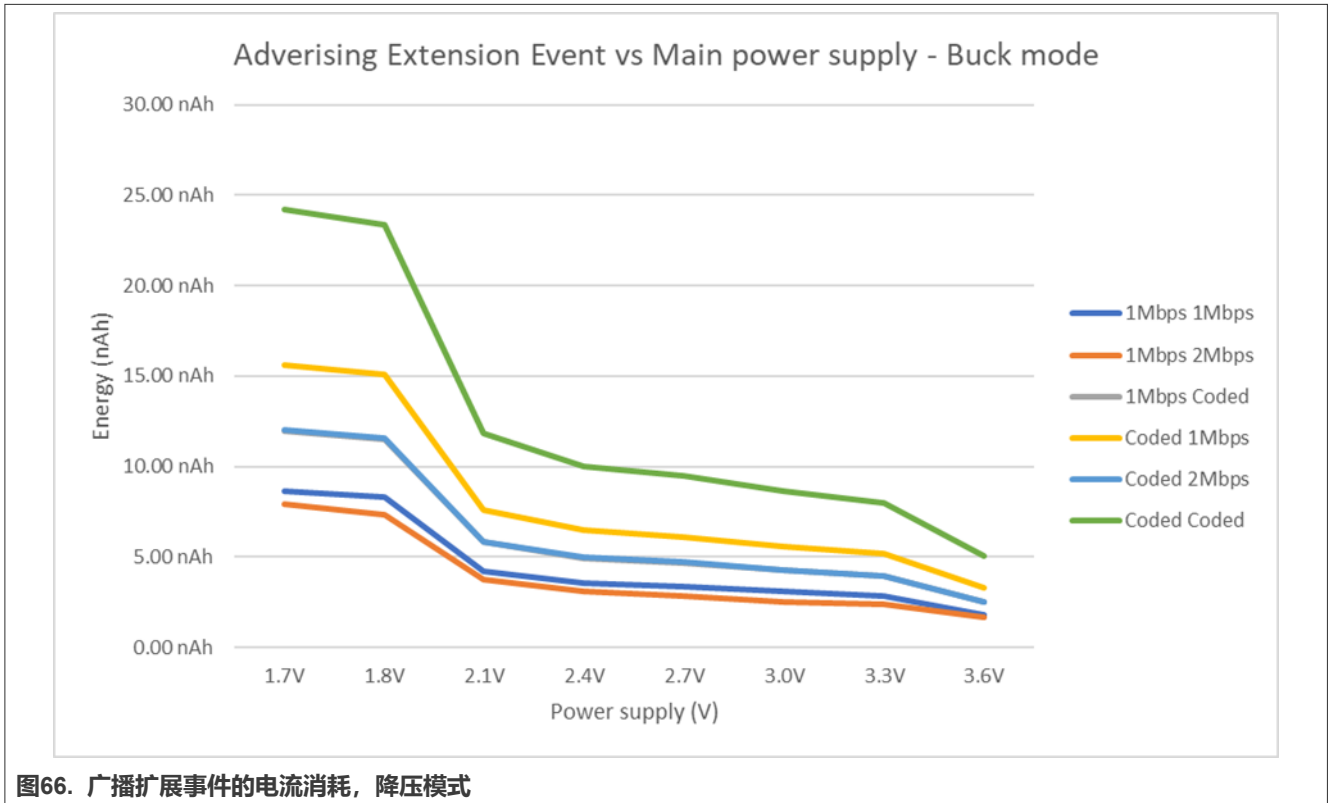


图65. 不同模式下广播扩展的功耗与数据速率的关系

汇总数据:

表87. 广播扩展的电流消耗汇总表

广播扩展	单位: nAh	Vdd_Reg (V) 电源 (环境温度为25 °C)							
		1.7 V	1.8 V	2.1 V	2.4 V	2.7 V	3.0 V	3.3 V	3.6 V
-									
1 Mbit/s, 1 Mbit/s	降压	8.66 nAh	8.34 nAh	4.22 nAh	3.58 nAh	3.39 nAh	3.09 nAh	2.86 nAh	1.81 nAh
-	旁路	4.56 nAh	4.63 nAh	4.93 nAh	5.39 nAh	5.81 nAh	6.22 nAh	6.54 nAh	6.70 nAh
1 Mbit/s, 2 Mbit/s	降压	7.92 nAh	7.31 nAh	3.73 nAh	3.13 nAh	2.88 nAh	2.53 nAh	2.42 nAh	1.67 nAh
-	旁路	3.45 nAh	3.50 nAh	3.71 nAh	4.03 nAh	4.38 nAh	4.76 nAh	5.06 nAh	5.39 nAh
1 Mbit/s, 编码	降压	11.96 nAh	11.53 nAh	5.83 nAh	4.95 nAh	4.68 nAh	4.28 nAh	3.96 nAh	2.51 nAh
-	旁路	6.25 nAh	6.34 nAh	6.75 nAh	7.39 nAh	7.96 nAh	8.52 nAh	8.96 nAh	9.18 nAh
编码, 1Mbit/s	降压	15.63 nAh	15.07 nAh	7.62 nAh	6.47 nAh	6.12 nAh	5.59 nAh	5.17 nAh	3.28 nAh
-	旁路	6.80 nAh	6.90 nAh	7.35 nAh	8.04 nAh	8.67 nAh	9.27 nAh	9.75 nAh	9.99 nAh
编码, 2Mbit/s	降压	12.01 nAh	11.58 nAh	5.86 nAh	4.97 nAh	4.70 nAh	4.29 nAh	3.97 nAh	2.52 nAh
-	旁路	5.26 nAh	5.33 nAh	5.68 nAh	6.22 nAh	6.70 nAh	7.17 nAh	7.54 nAh	7.72 nAh
编码, 编码	降压	24.23 nAh	23.36 nAh	11.81 nAh	10.03 nAh	9.49 nAh	8.67 nAh	8.02 nAh	5.08 nAh
-	旁路	11.93 nAh	12.09 nAh	12.88 nAh	14.09 nAh	15.19 nAh	16.26 nAh	17.09 nAh	17.51 nAh



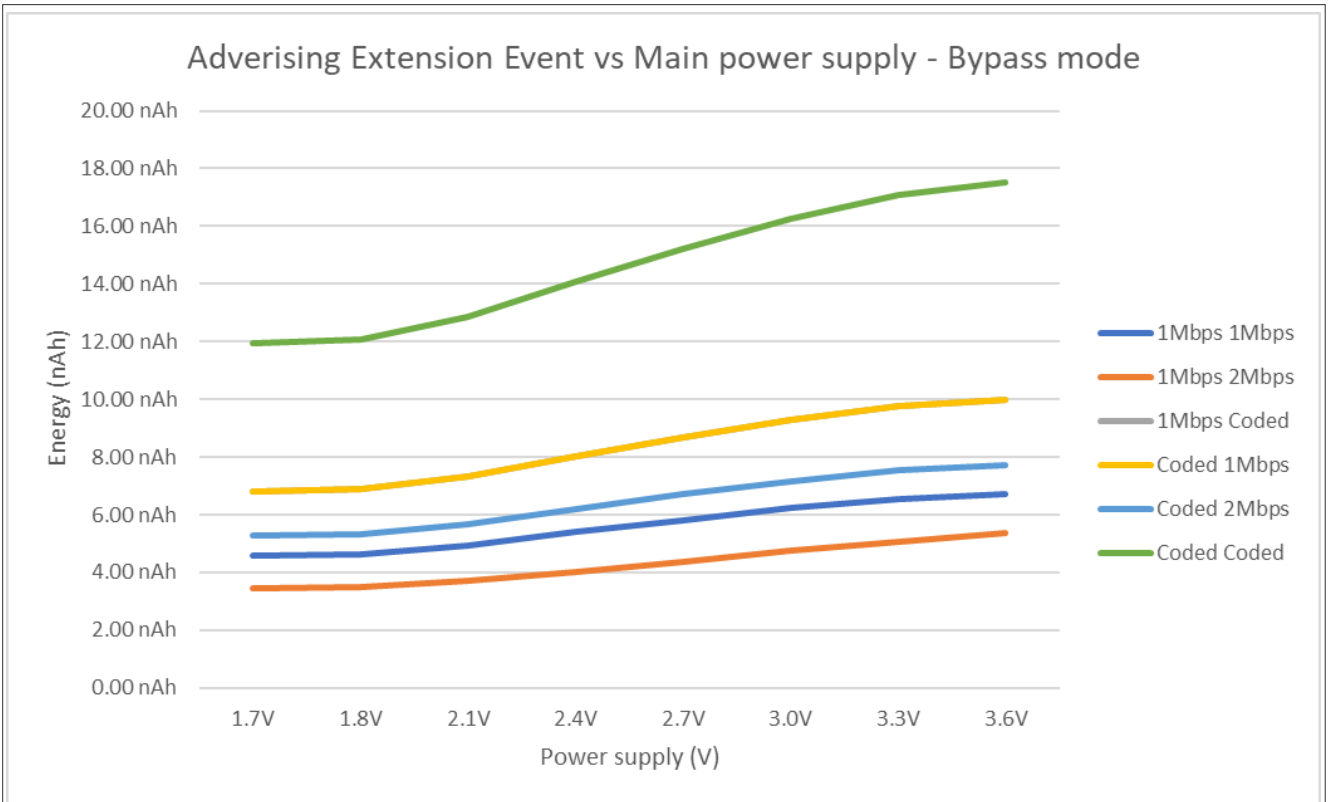


图67. 广播扩展事件的电流消耗，旁路模式

5.4 扫描扩展

使用第4.2节中列出的步骤，已捕获了部分低功耗蓝牙场景（低功耗应用），如图68所示。表88中列出了主要的事件和阶段，包括所有后续的电流感。

两种用例均已使用：

- DSM2模式在扫描事件之间被激活。

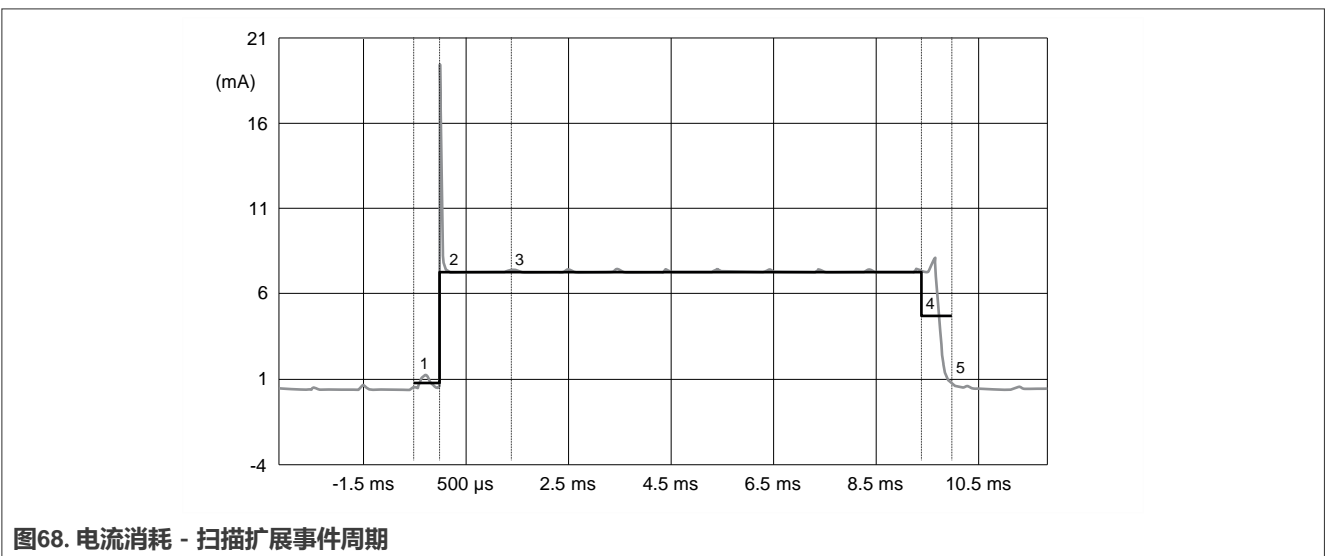


图68. 电流消耗 - 扫描扩展事件周期

表88. 扫描扩展事件

序号	事件
1	预处理
2	RX预热
3	RX活动
4	RX渐停
5	后处理

图69显示了使用1Mbps的数据速率和编码 (S2, 500 kbit/s) 的扫描扩展事件期间的电流消耗。提供了降压模式和旁路模式的图形作为示例。

所使用的二进制文件的设置如下：

- 48 MHz时钟
- 扫描扩展
- 可连接

降压模式：从低功耗模式的深度睡眠模式2中唤醒

旁路模式：从低功耗模式的深度睡眠模式2中唤醒

测试环境：扫描扩展, 1 Mbit/s, 1 Mbit/s

表89. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	无可用数据	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128 k	
数据速率	1 Msps 1Mbit/s	
有效负载	空	
可连接	是	
Flash	休眠	
MCU	DSM2	
设置	从低功耗DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (2.12.5 MR2版)	

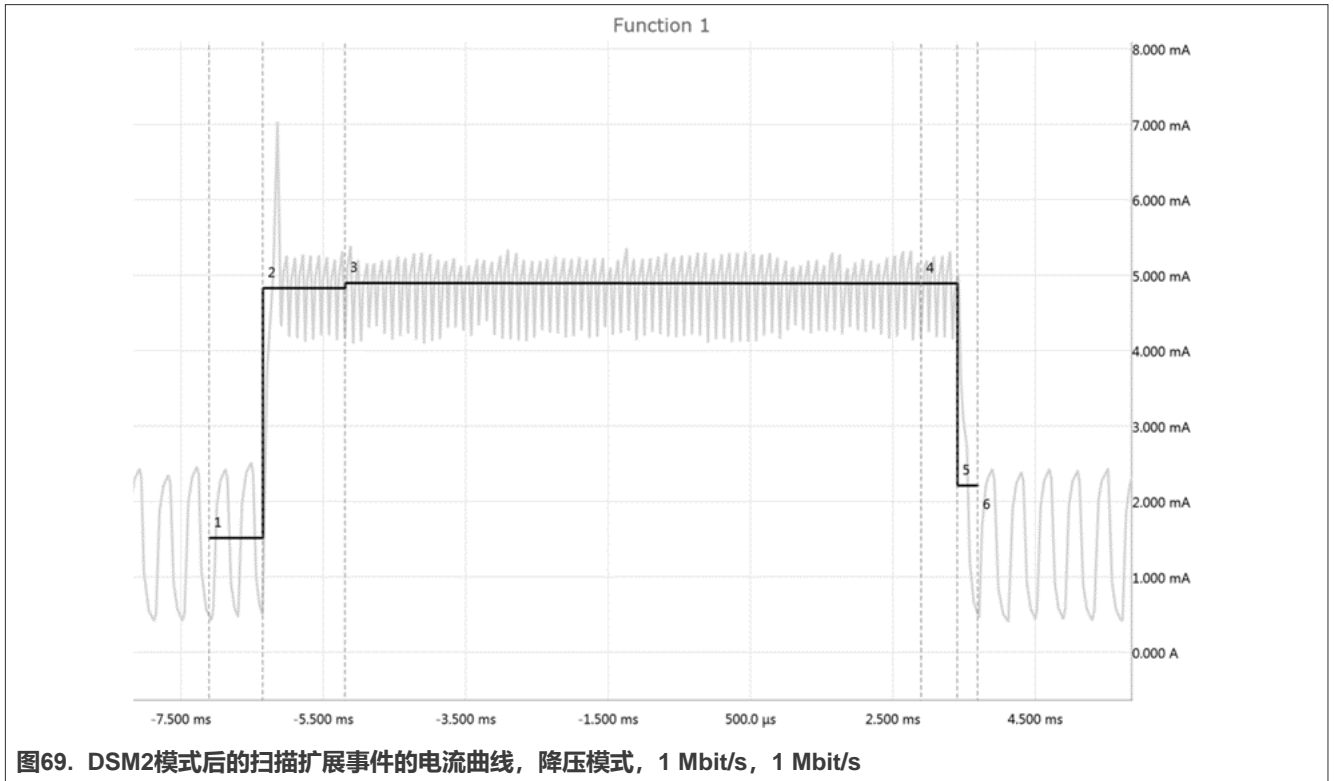


表90. 降压模式下的扫描扩展的电流消耗，DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠) , 1 Mbit/s, 1 Msps

扫描				
降压	扫描窗口	4.00 ms		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
扫描	扫描预处理	1.550 ms	2.660 mA	4.123 mA-ms
	RX预热	0.160 ms	9.260 mA	1.482 mA-ms
	RX扫描	4.000 ms	4.860 mA	19.440 mA-ms
	RX渐停	0.200 ms	8.900 mA	1.780 mA-ms
	扫描后处理	0.700 ms	3.530 mA	2.471 mA-ms
	活动消耗	6.610 ms	平均值= 5.842 mA	29.296 mA-ms
电荷积分: 8.14 nAh				

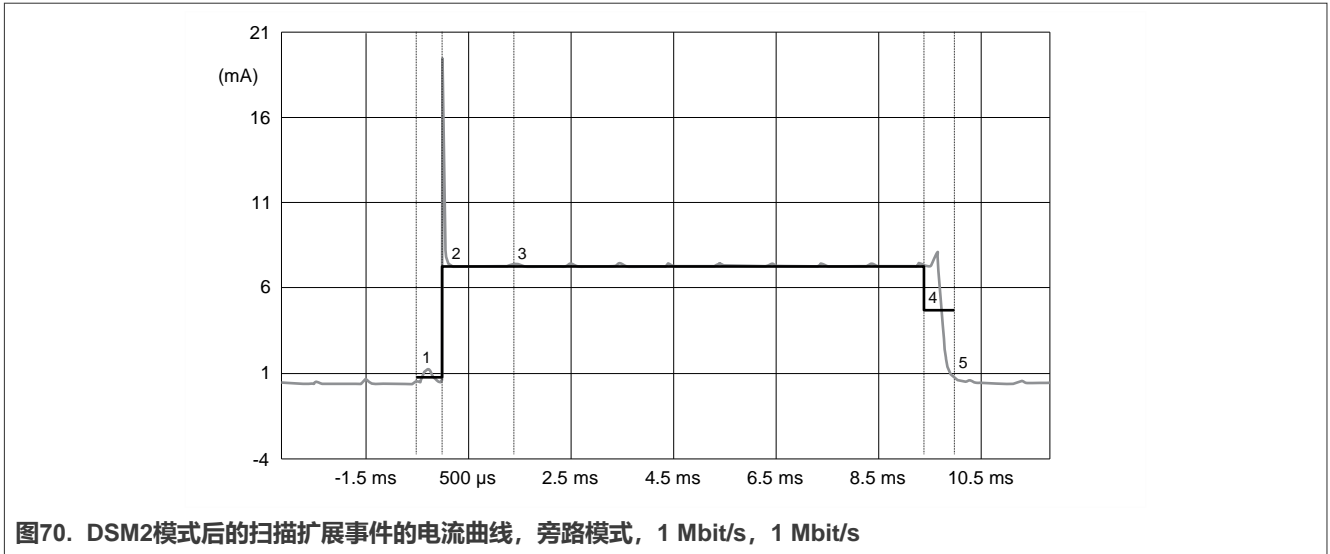


表91. 旁路模式下的扫描扩展的电流消耗，DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠) , 1 Mbit/s, 1 Msps

扫描				
降压	扫描窗口	4.000 ms		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
扫描	扫描预处理	2.000 ms	2.170 mA	4.340 mA-ms
	RX预热	0.160 ms	13.930 mA	2.229 mA-ms
	RX扫描	4.000 ms	9.700 mA	38.800 mA-ms
	RX渐停	0.200 ms	8.130 mA	1.626 mA-ms
	扫描后处理	0.850 ms	2.700 mA	2.295 mA-ms
	活动消耗	7.210 ms	平均值= 7.326 mA	49.290 mA-ms
电荷积分: 13.69 nAh				

测试环境: 扫描扩展, 1 Mbit/s, 编码

表92. 测试环境

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
RF输出功率	无可用数据	
MCU时钟模式	48 MHz	
RAM大小	128 k	
数据速率	1 Msps, 编码 (LR S2)	
有效负载	空	
可连接	是	
Flash	休眠	

表92. 测试环境 (续)

DC-DC模式	降压	旁路
供电电压	Vdd_DCDC = 3 V Vdd_RF = 1.25 V VddLDO_Core = 1.25 V	Vdd_RF = 3 V Vdd_LDO_Core=3 V
MCU	DSM2	
设置	从低功耗DSM2的从设备到主设备广播	
软件	低功耗 (PRC2 RC2版)	

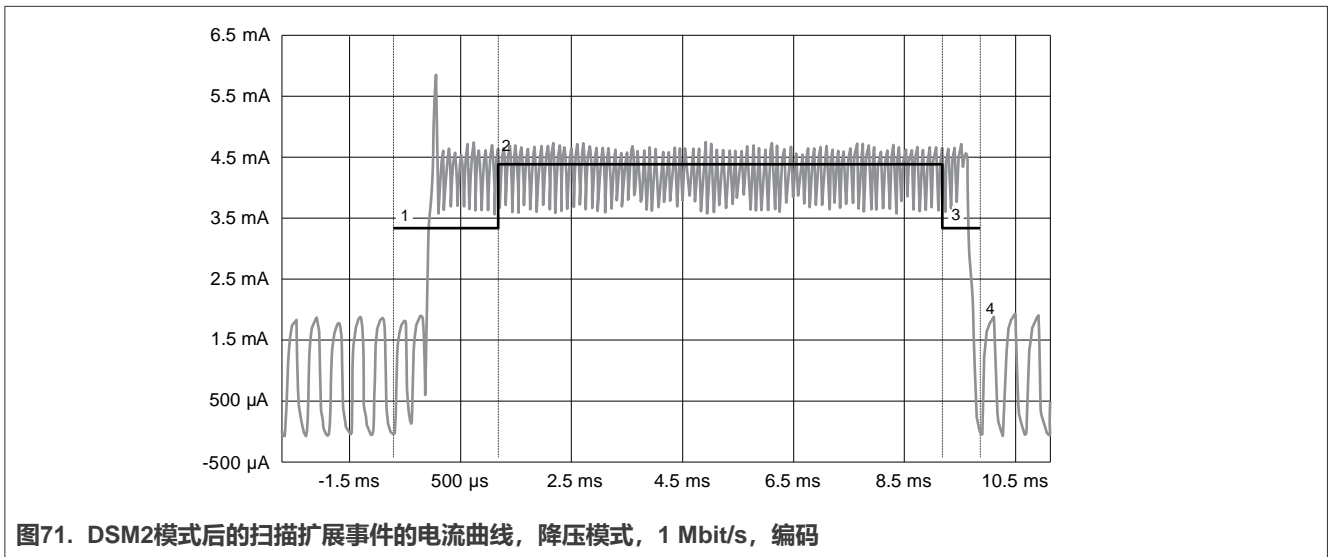


表93. 降压模式下的扫描扩展电流消耗, DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠), 1Mbit/s, 编码

扫描				
降压	扫描窗口	4.000 ms		
	状态	时间 (ms)	电流 (mA)	mA x mS
扫描	扫描预处理	1.550 ms	2.690 mA	4.170 mA-ms
	RX预热	0.160 ms	9.800 mA	1.568 mA-ms
	RX扫描	4.000 ms	4.860 mA	19.440 mA-ms
	RX渐停	0.200 ms	6.270 mA	1.254 mA-ms
	扫描后处理	0.700 ms	1.947 mA	1.363 mA-ms
	活动消耗	6.610 ms	平均值= 5.113 mA	27.794 mA-ms
电荷积分: 7.72 nAh				

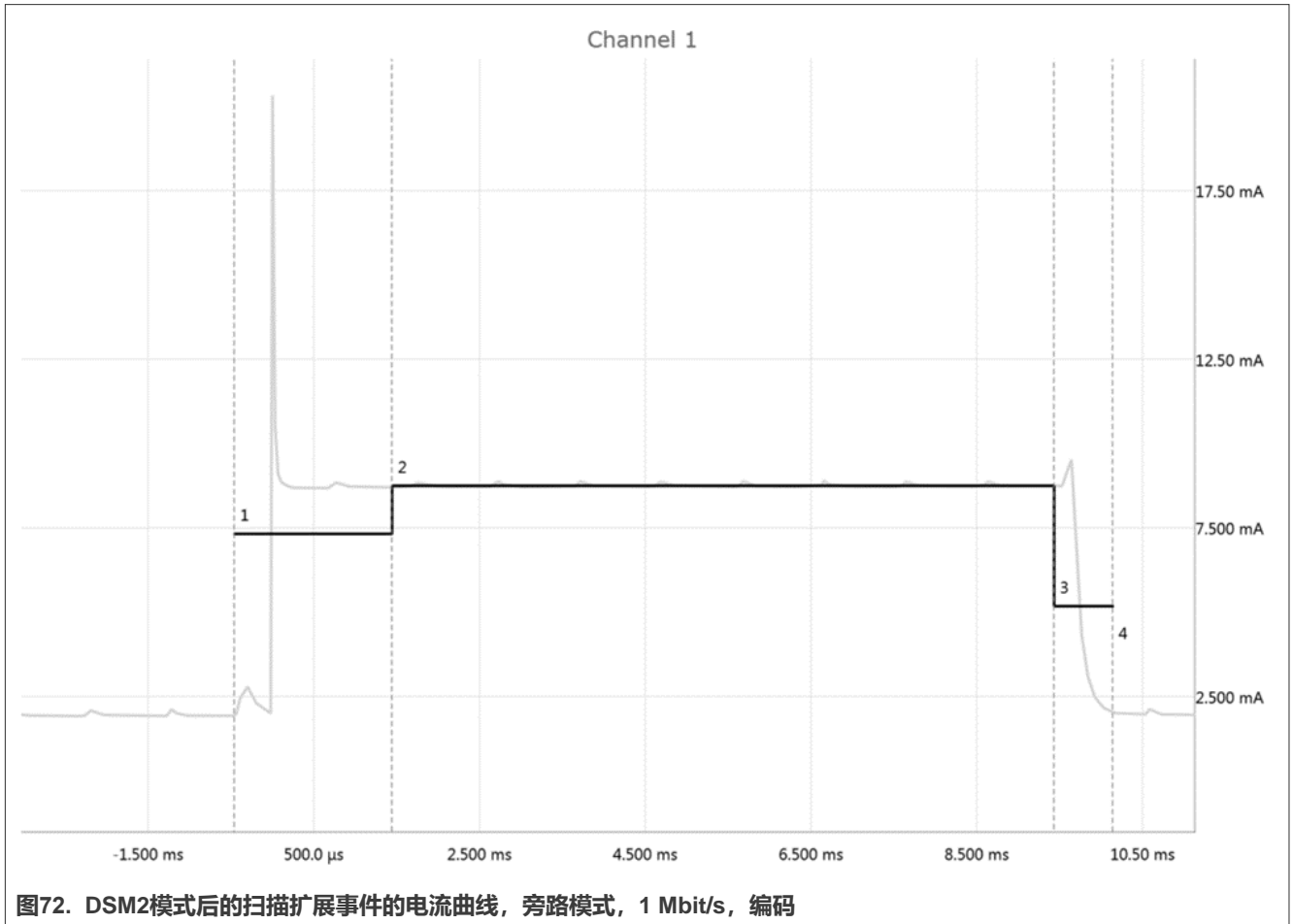


表94. 旁路模式下的扫描扩展的电流消耗，DSM2 (MCU DSM2, Flash休眠) , 1 Mbit/s，编码

扫描				
降压	扫描窗口状态	4.000 ms		
		时间 (ms)	电流 (mA)	mA x ms
扫描	扫描预处理	2.000 ms	2.183 mA	4.366 mA-ms
	RX预热	0.160 ms	12.900 mA	2.064 mA-ms
	RX扫描	4.000 ms	9.880 mA	39.520 mA-ms
	RX渐停	0.200 ms	5.300 mA	1.060 mA-ms
	扫描后处理	0.850 ms	2.100 mA	1.785 mA-ms
	活动消耗	7.210 ms	平均值= 6.473 mA	48.795 mA-ms
电荷积分: 13.55 nAh				

时序数据:

表95. 扫描扩展时序表

序号	状态	时序 (ms)			
		降压		旁路	
		DSM2		DSM2	
		1M1M	1MCoded	1M1M	1MCoded
1	预处理	1.550 ms	1.550 ms	2.000 ms	2.000 ms
2	RX预热	0.160 ms	0.160 ms	0.160 ms	0.160 ms
3	RX活动	4.000 ms	4.000 ms	4.000 ms	4.000 ms
4	RX渐停	0.200 ms	0.200 ms	0.200 ms	0.200 ms
5	后处理	0.700 ms	0.700 ms	0.850 ms	0.850 ms
6	总计	6.610 ms	6.610 ms	7.210 ms	7.210 ms

表96. 扫描扩展的电流消耗表

序号	状态	消耗量 (mA)			
		降压		旁路	
		DSM2		DSM2	
		1M1M	1MCoded	1M1M	1MCoded
1	预处理	2.660 mA	2.690 mA	2.170 mA	4.340 mA
2	RX预热	9.260 mA	9.800 mA	13.930 mA	2.229 mA
3	RX活动	8.800 mA	8.900 mA	9.700 mA	38.800 mA
4	RX渐停	8.900 mA	6.270 mA	8.130 mA	1.626 mA
5	后处理	3.530 mA	1.947 mA	2.700 mA	2.295 mA
6	总计	6.630 mA	5.921 mA	7.326 mA	49.290 mA

汇总数据:

表97. 扫描扩展的电流消耗汇总表

扫描	单位: nAh	1.7 V	1.8 V	2.1 V	2.4 V	2.7 V	3.0 V	3.3 V	3.6 V
扫描, 1Mbit/s	降压	7.55 nAh	7.54 nAh	7.44 nAh	7.62 nAh	7.30 nAh	6.54 nAh	6.01 nAh	5.62 nAh
	旁路	12.94 nAh	12.89 nAh	12.79 nAh	13.10 nAh	12.78 nAh	12.38 nAh	12.34 nAh	12.32 nAh
扫描扩展, 1 Mbit/s	降压	9.34 nAh	9.38 nAh	9.32 nAh	9.45 nAh	9.08 nAh	8.14 nAh	7.49 nAh	7.00 nAh
	旁路	14.31 nAh	14.26 nAh	14.14 nAh	14.49 nAh	14.13 nAh	13.69 nAh	13.67 nAh	13.64 nAh
扫描扩展, 编码, 500kbit/s	降压	8.89 nAh	8.92 nAh	8.81 nAh	9.00 nAh	8.62 nAh	7.72 nAh	7.17 nAh	6.68 nAh
	旁路	14.00 nAh	13.95 nAh	13.88 nAh	14.17 nAh	13.85 nAh	13.55 nAh	13.47 nAh	13.48 nAh

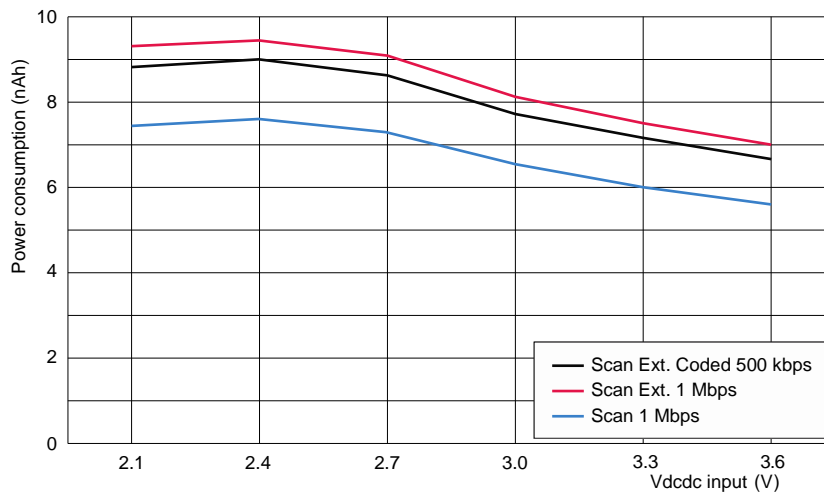


图73. 扫描扩展事件的电流消耗，降压模式

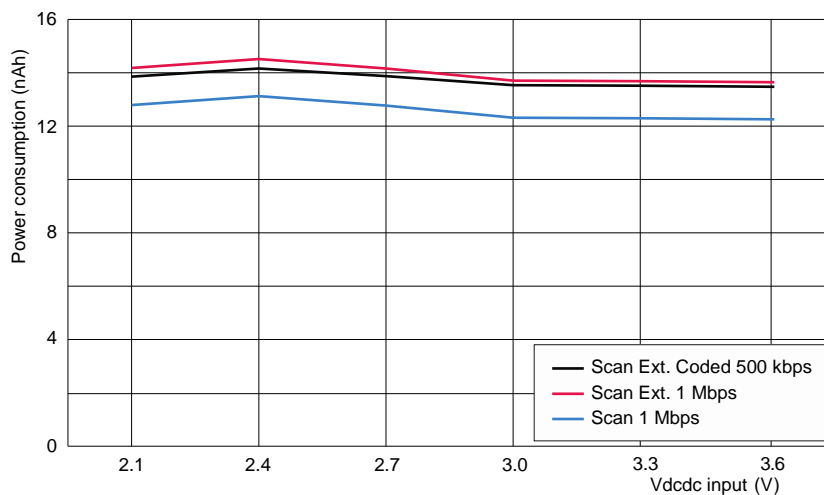


图74. 扫描扩展事件的电流消耗，旁路模式

5.5 信道选择算法1和2

信道选择算法1是一种仅支持连接事件信道选择的传统方法。信道选择算法1分为两个阶段：首先计算未映射的信道索引，然后将该索引映射到所用的信道集中的某个数据信道索引。

信道选择算法2支持连接事件和周期性广播数据包信道选择。在事件开始时（该事件可以是连接事件，也可以是周期性广播包），这里描述的算法会生成一个事件信道索引（视情况而定，其可以是一个数据信道索引或辅助广播信道索引）。信道选择算法2的特点包括：

- 信道选择算法2 (CSA #2) 是一种更复杂且更难追踪的算法，用于获取下一个事件信道索引。
- 在避免干扰和多径衰落效应 (multi-path fading effect) 方面，它比信道选择算法1更有效，特别是在高吞吐量的用例中。

5.6 高占空比广播

高占空比广播能够更快地建立连接。该模式没有具体的功耗。

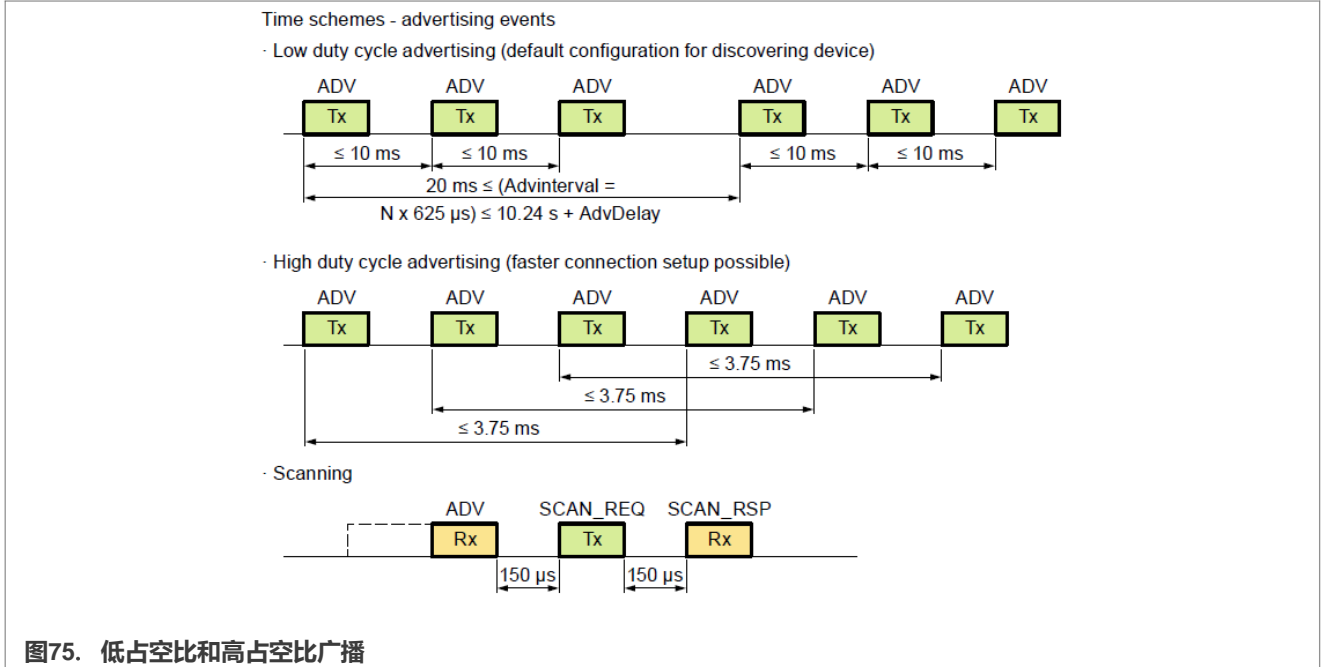


图75. 低占空比和高占空比广播

5.7 报告

表98显示了在环境温度为 (+25 °C) ， 供电为3.0 V时降压和旁路模式下的功耗。

表98. SoC测量汇总表 (环境温度为25 °C, 3 V)

深度睡眠模式	稳压器	内存的保留	核心主电源域	核心唤醒电源域	核心RF电源域	外设	DC-DC	3V时的电流消耗
深度睡眠模式1	均处于低功耗模式	保留16K内存	深度睡眠	深度睡眠	深度睡眠	禁用	降压	1.99 μA
深度睡眠模式1	均处于低功耗模式	保留16K内存	深度睡眠	深度睡眠	深度睡眠	禁用	旁路	3.6 μA

注: *活动模式: 降压模式 (Vdcdc_in=3 V) , 48 MHz时钟, CM33 深度睡眠模式2

注: 测量条件: Vdcdc_in=3 V, 25 °C (环境温度)

表99. 唤醒时序汇总表

唤醒类型	时间 (ms) (硬件+软件初始化)	功耗 (mA) (硬件+软件初始化)
第一次复位 (POR)	900 ms	4.8 mA
其他复位	108 ms	7.65 mA

功耗汇总表:

表100. 事件的功耗汇总表

1个事件, V _{dc} = 3 V, 25 °C		DSM2 (ms)	DSM2 (mA)	DSM2 (nAh)
广播	降压	3.458 ms	4.973 mA	4.78 nAh
	旁路	3.993 ms	6.677 mA	7.41 nAh
MCU	降压	0.280 ms	1.800 mA	0.14 nAh
	旁路	0.280 ms	2.900 mA	0.23 nAh
连接-1Mbps	降压	1.536 ms	4.361 mA	1.86 nAh
	旁路	1.536 ms	5.598 mA	2.39 nAh
连接-2Mbps	降压	1.456 ms	3.383 mA	1.37 nAh
	旁路	1.456 ms	4.071 mA	1.65 nAh
连接-500 kbit/s	降压	1.712 ms	4.626 mA	2.20 nAh
	旁路	1.712 ms	7.716 mA	3.67 nAh
连接-125 kbit/s	降压	2.768 ms	5.495 mA	4.23 nAh
	旁路	2.768 ms	10.310 mA	7.93 nAh
扫描	降压	6.150 ms	5.672 mA	10.08 nAh
	旁路	6.150 ms	21.829 mA	22.01 nAh

表101. 广播的功耗汇总表

48 MHz时钟, 使用32MHz晶振	降压模式的电流消耗 (3 V)		旁路模式的电流消耗 (3 V)	
	DSM2		DSM2	
	T= 25 °C			
1个广播事件的电流消耗, +0 dBm	3.458 ms		3.993 ms	
	4.973 mA		6.677 mA	
	4.78 nAh		7.41 nAh	
广播的电流消耗细节, +0 dBm				
TX活动(+0 dBm) - MCU停止	5.060 mA		11.501 mA	
RX活动 - MCU停止	5.148 mA		11.712 mA	
TX预热 - MCU停止	5.040 mA		10.500 mA	
TX渐停 - MCU停止	5.040 mA		10.500 mA	
RX预热 - MCU停止	5.040 mA		10.500 mA	
RX渐停 - MCU停止	5.040 mA		10.500 mA	
TX转换到RX - MCU停止 (广播事件)	5.040 mA		10.500 mA	

表102. 预处理/后处理, MCU的电流消耗汇总表

48 MHz FEE模式, 使用32MHz晶振	降压模式的电流消耗 (3 V)		旁路模式的电流消耗 (3 V)	
	DSM2		DSM2	
	T= 25 °C			
广播 (ADV) 预处理	2.900 mA		2.400 mA	
连接 (CONN) 预处理 - 1 Mbit/s	4.361 mA		5.598 mA	
连接预处理 - 2 Mbit/s	3.383 mA		4.071 mA	
连接预处理 - LRS2	4.626 mA		7.716 mA	

表102. 预处理/后处理, MCU的电流消耗汇总表 (续)

48 MHz FEE模式, 使用32MHz晶振	降压模式的电流消耗 (3 V)		旁路模式的电流消耗 (3 V)	
	DSM2			
	T= 25 °C			
连接预处理 - LRS8	5.495 mA		10.310 mA	
无线电后处理	2.750 mA		4.000 mA	
MCU停止	1.800 mA		2.900 mA	

表103. MCU的功耗汇总表

MCU DSM2的电流消耗	降压模式的电流消耗 (3 V)		旁路模式电流消耗 (3 V)	
	DSM2			
	T= 25 °C			
时序周期 (ms)	0.280 ms		0.280 ms	
消耗量 (mA)	1.800 mA		2.900 mA	
MCU DSM2的电流消耗 (nAh)	0.140 nAh		0.225 nAh	

时序汇总表:

表104. 广播和连接的时序汇总表

无线电/配置文件时序参数 (ms)	降压模式的电流消耗 (3 V)		旁路模式的电流消耗 (3 V)	
	DSM2			
	T= 25 °C			
广播预处理时间 - 1 Mbit/s	0.650 ms		0.650 ms	
广播后处理时间 - 1 Mbit/s	0.275 ms		0.275 ms	
连接预处理时间 - 1 Mbit/s	0.750 ms		0.750 ms	
连接后处理时间 - 1 Mbit/s	0.360 ms		0.360 ms	
连接预处理时间 - 2 Mbit/s	0.750 ms		0.750 ms	
连接后处理时间 - 2 Mbit/s	0.360 ms		0.360 ms	
连接预处理时间 - 500 kbit/s	0.750 ms		0.750 ms	
连接后处理时间 - 500 kbit/s	0.360 ms		0.360 ms	
连接预处理时间 - 125 kbit/s	0.750 ms		0.750 ms	
连接后处理时间 - 125 kbit/s	0.360 ms		0.360 ms	
扫描预处理时间 - 125 kbit/s	1.900 ms		1.900 ms	
扫描后处理时间 - 125 kbit/s	0.150 ms		0.150 ms	

6 修订历史

表105总结了本文档的修订历史。

表105. 修订历史

版本号	发布日期	描述
第1版	2023年9月18日	更新了表格, 添加了新数据, DSM1改为DSM2。
第0版	2022年12月21日	初版发布

7 Legal information

7.1 Definitions

Draft — A draft status on a document indicates that the content is still under internal review and subject to formal approval, which may result in modifications or additions. NXP Semiconductors does not give any representations or warranties as to the accuracy or completeness of information included in a draft version of a document and shall have no liability for the consequences of use of such information.

7.2 Disclaimers

Limited warranty and liability — Information in this document is believed to be accurate and reliable. However, NXP Semiconductors does not give any representations or warranties, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of such information and shall have no liability for the consequences of use of such information. NXP Semiconductors takes no responsibility for the content in this document if provided by an information source outside of NXP Semiconductors.

In no event shall NXP Semiconductors be liable for any indirect, incidental, punitive, special or consequential damages (including - without limitation - lost profits, lost savings, business interruption, costs related to the removal or replacement of any products or rework charges) whether or not such damages are based on tort (including negligence), warranty, breach of contract or any other legal theory.

Notwithstanding any damages that customer might incur for any reason whatsoever, NXP Semiconductors' aggregate and cumulative liability towards customer for the products described herein shall be limited in accordance with the Terms and conditions of commercial sale of NXP Semiconductors.

Right to make changes — NXP Semiconductors reserves the right to make changes to information published in this document, including without limitation specifications and product descriptions, at any time and without notice. This document supersedes and replaces all information supplied prior to the publication hereof.

Suitability for use — NXP Semiconductors products are not designed, authorized or warranted to be suitable for use in life support, life-critical or safety-critical systems or equipment, nor in applications where failure or malfunction of an NXP Semiconductors product can reasonably be expected to result in personal injury, death or severe property or environmental damage. NXP Semiconductors and its suppliers accept no liability for inclusion and/or use of NXP Semiconductors products in such equipment or applications and therefore such inclusion and/or use is at the customer's own risk.

Applications — Applications that are described herein for any of these products are for illustrative purposes only. NXP Semiconductors makes no representation or warranty that such applications will be suitable for the specified use without further testing or modification.

Customers are responsible for the design and operation of their applications and products using NXP Semiconductors products, and NXP Semiconductors accepts no liability for any assistance with applications or customer product design. It is customer's sole responsibility to determine whether the NXP Semiconductors product is suitable and fit for the customer's applications and products planned, as well as for the planned application and use of customer's third party customer(s). Customers should provide appropriate design and operating safeguards to minimize the risks associated with their applications and products.

NXP Semiconductors does not accept any liability related to any default, damage, costs or problem which is based on any weakness or default in the customer's applications or products, or the application or use by customer's third party customer(s). Customer is responsible for doing all necessary testing for the customer's applications and products using NXP Semiconductors products in order to avoid a default of the applications and the products or of the application or use by customer's third party customer(s). NXP does not accept any liability in this respect.

Terms and conditions of commercial sale — NXP Semiconductors products are sold subject to the general terms and conditions of commercial sale, as published at <http://www.nxp.com.cn/profile/terms>, unless otherwise agreed in a valid written individual agreement. In case an individual agreement is concluded only the terms and conditions of the respective agreement shall apply. NXP Semiconductors hereby expressly objects to applying the customer's general terms and conditions with regard to the purchase of NXP Semiconductors products by customer.

Export control — This document as well as the item(s) described herein may be subject to export control regulations. Export might require a prior authorization from competent authorities.

Suitability for use in non-automotive qualified products — Unless this data sheet expressly states that this specific NXP Semiconductors product is automotive qualified, the product is not suitable for automotive use. It is neither qualified nor tested in accordance with automotive testing or application requirements. NXP Semiconductors accepts no liability for inclusion and/or use of non-automotive qualified products in automotive equipment or applications.

In the event that customer uses the product for design-in and use in automotive applications to automotive specifications and standards, customer (a) shall use the product without NXP Semiconductors' warranty of the product for such automotive applications, use and specifications, and (b) whenever customer uses the product for automotive applications beyond NXP Semiconductors' specifications such use shall be solely at customer's own risk, and (c) customer fully indemnifies NXP Semiconductors for any liability, damages or failed product claims resulting from customer design and use of the product for automotive applications beyond NXP Semiconductors' standard warranty and NXP Semiconductors' product specifications.

Translations — A non-English (translated) version of a document, including the legal information in that document, is for reference only. The English version shall prevail in case of any discrepancy between the translated and English versions.

Security — Customer understands that all NXP products may be subject to unidentified vulnerabilities or may support established security standards or specifications with known limitations. Customer is responsible for the design and operation of its applications and products throughout their lifecycles to reduce the effect of these vulnerabilities on customer's applications and products. Customer's responsibility also extends to other open and/or proprietary technologies supported by NXP products for use in customer's applications. NXP accepts no liability for any vulnerability. Customer should regularly check security updates from NXP and follow up appropriately. Customer shall select products with security features that best meet rules, regulations, and standards of the intended application and make the ultimate design decisions regarding its products and is solely responsible for compliance with all legal, regulatory, and security related requirements concerning its products, regardless of any information or support that may be provided by NXP.

NXP has a Product Security Incident Response Team (PSIRT) (reachable at PSIRT@nxp.com) that manages the investigation, reporting, and solution release to security vulnerabilities of NXP products.

NXP B.V. - NXP B.V. is not an operating company and it does not distribute or sell products.

7.3 Trademarks

Notice: All referenced brands, product names, service names, and trademarks are the property of their respective owners.

NXP — wordmark and logo are trademarks of NXP B.V.

Kinetic KW45和K32W低功耗蓝牙 (Bluetooth LE) 的功耗分析

AMBA, Arm, Arm7, Arm7TDMI, Arm9, Arm11, Artisan, big.LITTLE, Cordio, CoreLink, CoreSight, Cortex, DesignStart, DynamIQ, Jazelle, Keil, Mali, Mbed, Mbed Enabled, NEON, POP, RealView, SecurCore, Socrates, Thumb, TrustZone, ULINK, ULINK2, ULINK-ME, ULINK-PLUS, ULINKpro, μ Vision, Versatile — are trademarks and/or registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries or affiliates) in the US and/or elsewhere. The related technology may be protected by any or all of patents, copyrights, designs and trade secrets. All rights reserved.

Apple — is a registered trademark of Apple Inc.

Bluetooth — the Bluetooth wordmark and logos are registered trademarks owned by Bluetooth SIG, Inc. and any use of such marks by NXP Semiconductors is under license.

Cadence — the Cadence logo, and the other Cadence marks found at www.cadence.com/go/trademarks are trademarks or registered trademarks of Cadence Design Systems, Inc. All rights reserved worldwide.

EdgeLock — is a trademark of NXP B.V.

Kinetic — is a trademark of NXP B.V.

目录

1	介绍	2
2	首字母缩略词和缩写	2
3	低功耗蓝牙的功耗指标	3
3.1	低功耗蓝牙 (LE)	5
4	Kinetis的低功耗特性	7
4.1	KW45对低功耗运行的硬件支持	8
4.1.1	CM33和NBU的电源模式	8
4.1.2	链路层的电源模式	9
4.1.3	XCVR电源模式	10
4.1.4	DC-DC (直流-直流) 转换器	10
4.1.5	GPIO、模拟引脚和时钟门控	10
4.2	低功耗运行的软件配置	10
4.2.1	低功耗蓝牙应用配置	10
4.2.1.1	软件的准备	12
5	功率测量和时序分析	12
5.1	设置测试环境和被测设备 (DUT)	13
5.1.1	硬件的准备	16
5.1.2	电流测量	17
5.1.3	Ireg电流测量示例	18
5.2	测量电流消耗	19
5.2.1	说明	19
5.2.2	测量和结果	20
5.2.2.1	概述	21
5.2.2.2	深度睡眠模式	21
5.2.2.3	上电复位	22
5.2.2.4	广播模式	26
5.2.2.5	LDO_CORE的电流消耗	35
5.2.2.6	Vdd_RF的电流消耗	39
5.2.2.7	连接模式	49
5.2.2.8	扫描模式	60
5.3	广播扩展	64
5.4	扫描扩展	78
5.5	信道选择算法1和2	85
5.6	高占空比广播	86
5.7	报告	86
6	修订历史	88
7	法律声明	89

Please be aware that important notices concerning this document and the product(s) described herein, have been included in section 'Legal information'.