

Application Note

CC23xx 和 CC27xx 硬件配置与 PCB 设计注意事项



Haiatullah Gholami

摘要

本应用手册提供了 CC23xx 和 CC27xx SimpleLink™ 超低功耗无线微控制器 (MCU) 平台的设计指南。本文档概述了不同的参考设计，然后介绍了射频前端、原理图、PCB 和天线设计注意事项，还介绍了晶体振荡器调谐、理想负载阻抗，同时简要说明了不同的电源配置，本文档最后一节总结了启动电路板需采取的步骤。

内容

1 简介.....	3
2 参考设计.....	3
2.1 LP-EM-CC2340R53.....	3
2.2 LP-EM-CC2340R5.....	3
2.3 LP-EM-CC2340R5-Q1.....	3
2.4 LP-EM-CC2340R5-RGE-4x4-IS24.....	4
2.5 LP-EM-CC2745R10-Q1.....	4
3 原理图.....	5
3.1 原理图概览.....	5
3.2 I/O 引脚驱动强度.....	6
3.3 引导加载程序引脚.....	6
3.4 串行线调试 (SWD) 引脚.....	7
4 PCB 布局.....	8
4.1 电路板堆叠.....	8
4.2 LC 滤波器.....	8
4.3 去耦电容器.....	9
4.4 晶体负载电容器的放置.....	9
4.5 电流返回路径.....	9
4.6 直流/直流稳压器.....	9
4.7 天线匹配元件.....	10
4.8 传输线路.....	10
4.9 电磁仿真.....	10
5 天线.....	10
6 晶体调谐.....	11
6.1 CC23xx 和 CC27xx 晶体振荡器.....	11
6.2 晶体选型.....	11
6.3 对 LF 晶体振荡器进行调谐.....	11
6.4 对 HF 晶体振荡器进行调谐.....	12
7 最佳负载阻抗.....	15
8 PA 表.....	15
9 电源配置.....	16
9.1 电源简介.....	16
9.2 直流/直流转换器模式.....	16
9.3 全局 LDO 模式.....	17
10 电路板启动.....	18
10.1 上电.....	18
10.2 RF 测试：SmartRF Studio.....	18
10.3 RF 测试：传导测量.....	18
10.4 硬件故障排除.....	19

11 总结.....	21
12 参考资料.....	21
13 修订历史记录.....	22

插图清单

图 3-1. CC2340R53 原理图的射频部分和元件.....	5
图 4-1. LP-EM-CC2745R10-Q1 电路板堆叠.....	8
图 4-2. LC 滤波器 PCB 布局设计指南.....	9
图 4-3. 去耦电容器和通孔接地.....	9
图 5-1. 建议用于单频带天线的天线 π 型网络.....	10
图 6-1. 皮尔斯型振荡器.....	11
图 9-1. 电源系统.....	16
图 9-2. 直流/直流模式.....	17
图 9-3. 全局 LDO 模式.....	17

表格清单

表 3-1. 驱动强度高达 10mA 的 CC23xx/CC27xx 引脚.....	6
表 3-2. CC23xx：串行接口的配置.....	6
表 3-3. CC27xx：串行接口的配置.....	7
表 3-4. 默认引导加载程序触发器引脚.....	7
表 3-5. CC23xx 和 CC27xx SWD 引脚.....	7
表 6-1. 用于输出 32kHz 时钟的 I/O.....	12
表 6-2. 电容器阵列.....	13

商标

SimpleLink™, LaunchPad™, and SmartRF™ are trademarks of Texas Instruments.

Bluetooth® is a registered trademark of Bluetooth SIG.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

使用 CC23xx 和 CC27xx 器件系列精心的硬件配置和 PCB 布局设计高性能无线产品。为了优化这些系统的性能，用户必须遵循成熟的设计实践，以确保实现射频性能、功效和法规遵从性。

本应用手册提供了针对 CC23xx 和 CC27xx 器件量身定制的全面硬件配置和 PCB 设计指南。本文档介绍射频前端、晶体振荡器配置、调谐和布局等重要方面。这些建议基于 TI 广泛的验证和参考设计，可帮助用户缩短上市时间，同时更大幅度地降低设计风险。

2 参考设计

LaunchPad™ 是 CC23xx 和 CC27xx 器件的主要开发平台。LaunchPad™ 包含经优化的板载外部射频元件和 PCB 天线，可通过单核软件开发套件 (SDK) 和丰富的工具集提供易于使用的开发环境。每个 CC23xx 和 CC27xx 器件都配备了一个具有射频匹配网络的专用 LaunchPad 和一个针对一个或多个受支持的 ISM 频带进行优化的天线。所有 TI LaunchPad 设计文件 (包括光绘文件和 CAD 源文件) 均可从 [TI.com](http://ti.com) 的产品页面下载，并可在将 CC23xx 或 CC27xx 集成到定制硬件时用作参考设计。

2.1 LP-EM-CC2340R53

LP-EM-CC2340R53 是一款单端 LaunchPad，在 2.4GHz ISM 频段运行，并支持 BLE 5.4 及更早的 LE 规范。射频前端可实现高达 +8dBm 的输出功率。

特色器件：	CC2340R53 RKP 封装
ISM 频带：	2.4GHz
天线：	2.4GHz 倒置 F 型天线 应用手册
设计文件：	LP-EM-CC2340R53 设计文件

2.2 LP-EM-CC2340R5

LP-EM-CC2340R5 是一款单端 LaunchPad，在 2.4GHz ISM 频段运行，并支持 BLE 5.4 及更早的 LE 规范。射频前端可实现高达 +8dBm 的输出功率。

特色器件：	CC2340R5 RKP 封装
ISM 频带：	2.4GHz
天线：	2.4GHz 倒置 F 型天线 应用手册
设计文件：	LP-EM-CC2340R5 设计文件

2.3 LP-EM-CC2340R5-Q1

LP-EM-CC2340R5-Q1 是一款单端 LaunchPad，在 2.4GHz ISM 频段运行，并支持 BLE 5.4 及更早的 LE 规范。射频前端可实现高达 +8dBm 的输出功率。

特色器件：	CC2340R5-Q1
ISM 频带：	2.4GHz
天线：	2.4GHz 倒置 F 型天线 应用手册
设计文件：	LP-EM-CC2340R5-Q1 设计文件

2.4 LP-EM-CC2340R5-RGE-4x4-IS24

LP-EM-CC2340R5-RGE-4x4-IS24 是一款单端 LaunchPad，在 2.4GHz ISM 频段运行，并支持 BLE 5.4 及更早的 LE 规范。射频前端可实现高达 +8dBm 的输出功率。

特色器件：	CC2340R5 RGE 封装
ISM 频带：	2.4GHz
天线：	2.4GHz 倒置 F 型天线 应用手册
设计文件：	LP-EM-CC2340R5-RGE-4x4-IS24 设计文件

2.5 LP-EM-CC2745R10-Q1

LP-EM-CC2745R10-Q1 是一款单端 LaunchPad，在 2.4GHz 频段运行，并支持 BLE 5.4 及更早的 LE 规范。射频前端可实现高达 +10dBm 的输出功率。

特色器件：	CC2745R10-Q1
ISM 频带：	2.4GHz
天线：	2.4GHz 倒置 F 型天线 应用手册
设计文件：	LP-EM-CC2745R10-Q1 设计文件

3 原理图

3.1 原理图概览

图 3-1 显示了描述的射频部分和元件。

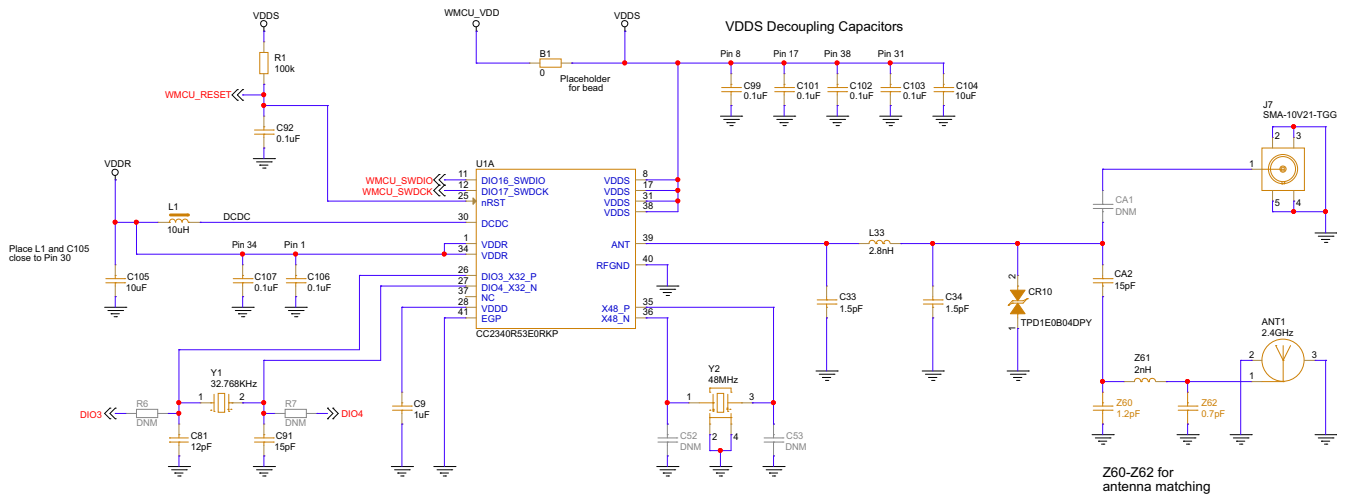


图 3-1. CC2340R53 原理图的射频部分和元件

3.1.1 48MHz 晶振

无线电需要以 48MHz 晶体作为频率基准。对于 CC23xx 和 CC27xx，可以使用内部电容器阵列代替外部负载电容器来用于 48MHz 晶体。有关如何设置内部电容器阵列以及如何调整 HFXT 的详细信息，请参阅节 6.4。

3.1.2 32.768kHz 晶振

32kHz 晶体用作 RTC 时钟的基准。CC27xx 系列器件不需要任何外部 32kHz 晶体。可以自动校准 RC 振荡器，以便为低功耗 Bluetooth® 提供足够精确的睡眠计时器。使用外部晶体的优点是连接事件前后的接收时段较短，可以提高睡眠时钟精度，并降低低功耗蓝牙的功耗。

对于 CC23xx 系列器件，在某些情况下可以使用内部低速 RC 振荡器 (32kHz) 代替外部 32kHz 晶体作为参考。对于在哪些情况下可以使用 LFOSC，请参阅节 12 中的器件特定勘误表。

低频时钟源可以在 Sysconfig TI DEVICES 部分 Device Configuration 中的 Device Configuration 下设置。

1. LF XOSC：外部晶体
2. LF RCOSC：内部 RC 振荡器、DIO23_X32P 和 DIO24_X32N 可以保持悬空或用作 GPIO。
3. 外部 LF 时钟：由另外一个 IC 提供的外部时钟。该时钟必须馈送到 DIO23_X32P 引脚。引脚 DIO24_X32N 可以保持悬空，也可以用作 GPIO。

3.1.3 滤波器

在 RF 引脚与天线之间放置一个 LC 滤波器。滤波器具有衰减谐波的功能。

3.1.4 去耦电容器

在参考设计中，使用了多个去耦电容器。放置去耦电容器时要小心，因为某些同名引脚未在内部连接。如果将去耦电容器放置在错误的引脚处，则去耦电容器的效果会降低。每个器件的参考设计中的原理图显示了每个去耦电容器需要放置的位置。

3.1.5 天线元件

建议在 LC 滤波器与天线之间使用 π 型匹配网络进行天线阻抗匹配。有关更多信息，请参阅节 5。

3.1.6 射频屏蔽层

一些 TI 参考设计使用射频屏蔽层来降低杂散信号的辐射，尤其是三次谐波辐射功率级别中的功率。TI 建议在设计中预留屏蔽层的空间，尤其是对于 20dBm 器件。如果杂散发射在没有屏蔽层的情况下处于预期范围内，则可以将屏蔽层设置为“不安装 (DNM)”。

3.2 I/O 引脚驱动强度

I/O 引脚具有可配置的驱动强度和最大电流。所有 I/O 引脚均支持 2mA，而部分引脚支持高达 10mA 电流。表 3-1 所示为具有高驱动能力的 I/O 引脚。

表 3-1. 驱动强度高达 10mA 的 CC23xx/CC27xx 引脚

4 x 4 (RGE)	5 x 5 (RKP)、5 x 5 (RHB)	6 x 6 (RHA)
DIO12	DIO12	DIO2
DIO16_SWDDIO	DIO16_SWDDIO	DIO3
DIO17_SWDDCK	DIO17_SWDDCK	DIO9_SWDDIO
DIO24_A7	DIO18	DIO10_SWDDCK
	DIO19	DIO17_A8
	DIO24_A7	DIO18_A7

3.3 引导加载程序引脚

引导加载程序通过 2 引脚通用异步接收器和发送器 (UART) 或 4 引脚 SPI 与外部器件进行通信。SPI 端口的优点是支持更高、更灵活的数据速率，但该端口也要求与 CC23xx 和 CC27xx 器件之间具有更多的连接。UART 的缺点是速率略低且可能不太灵活。然而，UART 需要的引脚较少，并且可以通过任何标准 UART 接口轻松实现。

CC23xx 器件的串行接口有三种可能的配置，而 CC27xx 器件的串行接口只有一种可能的配置。表 3-2 和表 3-3 分别指定了为 CC23xx 和 CC27xx 器件的特定 DIO 配置了哪些串行接口信号。ROM 引导加载程序的配置在 FCFG 和 CCFG 之间完成。如果在启动时不存在有效的 CCFG，FCFG 中设置的默认值将生效。默认配置取决于器件封装。请参阅器件特定的技术参考手册，以了解给定封装的默认配置是哪种配置。如果用户想要更改 FCFG 设置的默认值，请更新 CCFG 以提供所需的行为。

表 3-2. CC23xx：串行接口的配置

信号	引脚配置	serialloCfgIndex == 0	serialloCfgIndex == 1	serialloCfgIndex == 2
UART_RX	涉及上拉的输入	DIO20	DIO12	DIO22
UART_TX	无拉取（选择时输出）	DIO6	DIO13	DIO20
SPI_CLK	涉及上拉的输入	DIO8	DIO24	DIO24
SPI_CS	涉及上拉的输入	DIO11	DIO11	DIO11
SPI_POCI	无拉取（选择时输出）	DIO12	DIO21	DIO12
SPI_PICO	涉及上拉的输入	DIO13	DIO13	DIO13

表 3-3. CC27xx : 串行接口的配置

信号	引脚配置	serialloCfgIndex == 0
UART_RX	涉及上拉的输入	DIO2
UART_TX	无拉取 (选择时输出)	DIO1
SPI_CLK	涉及上拉的输入	DIO3
SPI_CS	涉及上拉的输入	DIO7
SPI_POCI	无拉取 (选择时输出)	DIO5
SPI_PICO	涉及上拉的输入	DIO4

引导加载程序可以配置为无条件触发，也可以配置为通过引脚触发。可以在 **SysConfig** 中启用引脚触发器，方法是转到 **TI DEVICES** 部分，在 **Boot Configuration** 中的 **Device Configuration** 下设置 **Enable Pin Trigger** 选项。引脚触发器 DIO 也可以在 **SysConfig** 中的同一位置设置。ROM 引导加载程序的默认引脚触发器 DIO 可在表 3-4 中找到。

表 3-4. 默认引导加载程序触发器引脚

CC23xx	CC27xx
DIO21	DIO21

3.4 串行线调试 (SWD) 引脚

串行线调试 (SWD) 用于在器件上进行编程和调试。下表显示哪两个 I/O 引脚用于 SWD。

表 3-5. CC23xx 和 CC27xx SWD 引脚

信号	CC23xx	CC27xx
SWDIO	DIO16_SWDIO	DIO9_SWDIO
SWDCK	DIO17_SWDCK	DIO10_SWDCK

4 PCB 布局

4.1 电路板堆叠

从顶层到底层的距离需与参考设计相匹配。偏离建议的电路板堆叠可能会改变寄生效应，在某些情况下这可能会导致需要重新设计滤波器。举例来说，图 4-1 显示了用于所有 CC27xx LaunchPad 的电路板堆叠。有关所有 TI 无线器件的电路板堆叠，请参阅器件特定的参考设计。

DESIGN CROSS SECTION CHART TOTAL THICKNESS 1.6MM

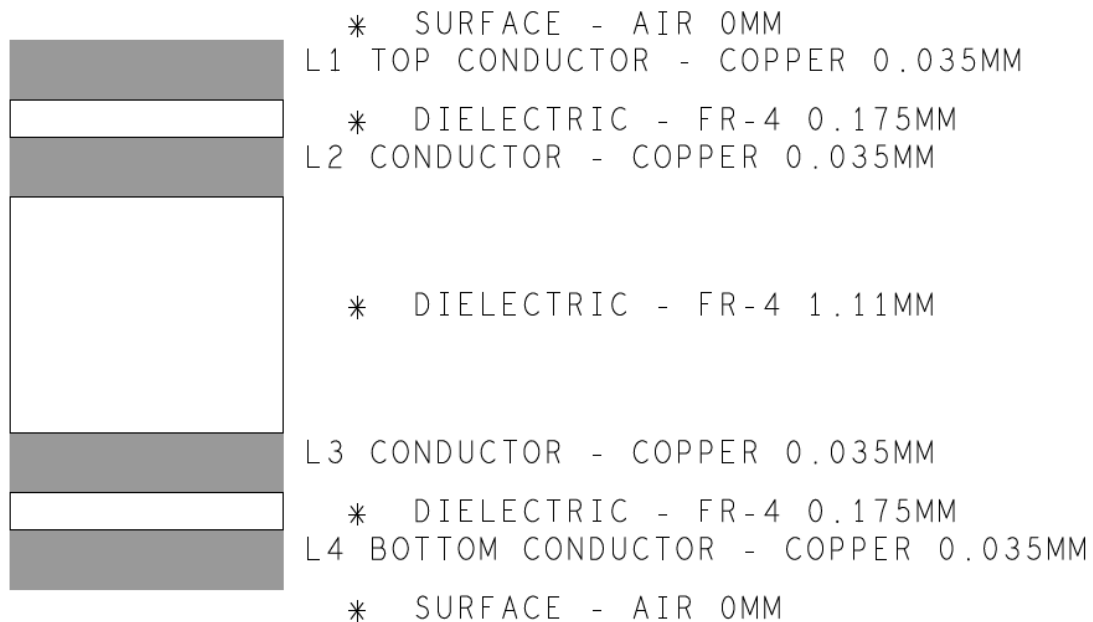


图 4-1. LP-EM-CC2745R10-Q1 电路板堆叠

4.2 LC 滤波器

LC 滤波器的布局应能够使分流元件之间的串扰最小化。图 4-2 显示了三种不同的布局，从左到右性能越来越好。右侧布局的优点是并联电容器和串联电感器之间 PCB 布线（黑色）中的寄生电感与电感器串联在一起。在中间的图中，寄生电感与并联电容串联在一起，从而形成一个串联 LC 电路。

如果设计无法按原样使用参考设计（例如使用不同的元件尺寸），则可能必须重新调整滤波器。使用电磁仿真器对 TI 参考设计和定制设计进行仿真。两个设计具有相同的 S21 和 S22。

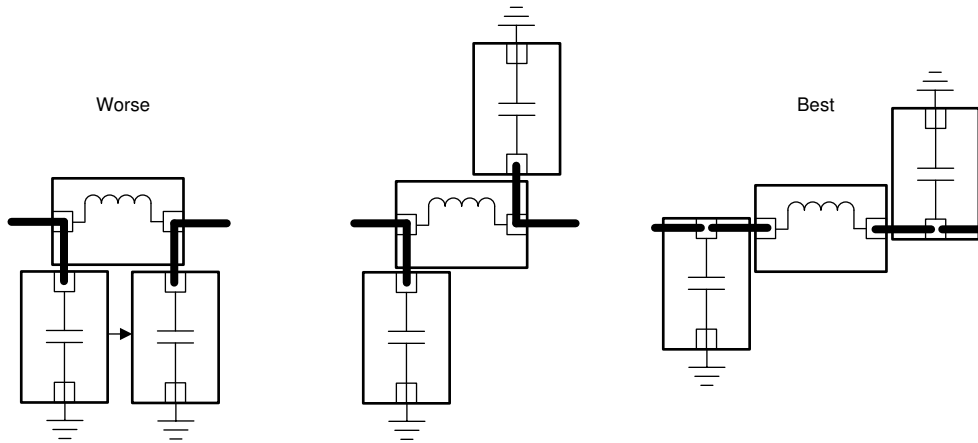


图 4-2. LC 滤波器 PCB 布局设计指南

4.3 去耦电容器

去耦电容器的一般规则：

- 确保去耦电容器与有源器件位于同一层以改善效果。
- 将电源接入去耦电容器中，然后接入有源器件中。
- 每个去耦电容器需有一个单独的通孔接地，以尽可能降低噪声耦合（请参阅图 4-3）。
- 将去耦电容器放置在靠近引脚的位置，以便去耦。
- 去耦电容器和芯片之间的接地电流返回路径需要短且直接（低阻抗）。相关详细信息，请参阅节 4.5。

图 4-3 的右边使用单独的通孔进行接地，噪声耦合较小。

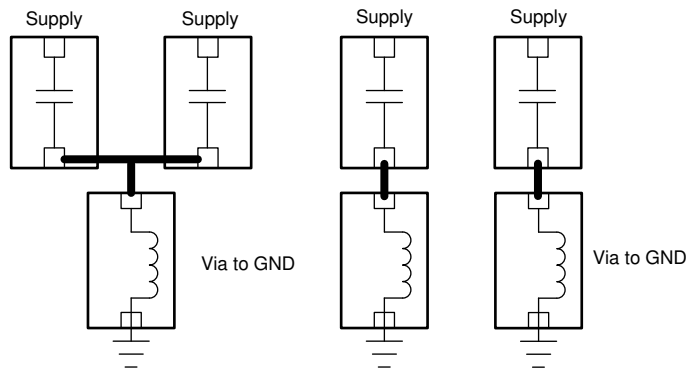


图 4-3. 去耦电容器和通孔接地

4.4 晶体负载电容器的放置

主振荡环路电流在晶体和负载电容器之间流动。应使该信号路径（晶体到 C_{L1} ，到 C_{L2} ，再到晶体）尽可能短，并使用对称布局。因此，电容器的两个接地连接都需要始终尽可能靠近。切勿在电容器之间或整个晶体周围布置接地接头，因为如此长的接地迹线对串扰和 EMI 非常敏感。

4.5 电流返回路径

电容器接地垫和芯片之间需要有一个实心接地层。如果接地平面出现断裂，则可能会导致电流返回路径变长。返回路径变长可能会导致射频性能降低和杂散发射升高。

4.6 直流/直流稳压器

直流/直流元件必须放置在靠近 DCDC 引脚的位置。位于直流/直流稳压器输出（DCDC 引脚）处的电容器与芯片之间必须具有短且直接的接地连接（低阻抗）。应在电容器接地垫和芯片之间保留一个实心接地层。

4.7 天线匹配元件

建议使用 π 型网络进行天线阻抗匹配。天线匹配元件应尽可能靠近天线放置。

4.8 传输线路

LC 滤波器中的布线太短，因此不被视为传输线路，但较长的布线（例如从 LC 滤波器到天线的布线）需具有 $50\ \Omega$ 的阻抗。TXLine 是一款免费的 PCB 布线阻抗计算工具，可在以下位置获取：[TXLine 传输线路计算器](#)。

4.9 电磁仿真

如果设计未遵循参考设计（例如，滤波器元件位置或元件尺寸不同），则 TI 建议使用高级设计系统 (ADS) 或类似系统进行仿真，然后将自定义设计的阻抗和 S 参数与参考设计进行比较。如果自定义设计与参考设计偏差过大，则可能需要更改滤波器元件值。

5 天线

现有的天线文档主要面向以单一频率运行的天线。提供了两个天线选型指南：[天线选型快速指南应用手册](#)和[天线选型指南应用手册](#)。还提供了 [CC-Antenna-DK2](#) 和[天线测量汇总应用手册](#)和全部文档。可以从[天线选型快速指南引用手册](#)访问 TI 的所有天线文档，因为里面包含指向所有天线文档、天线测量报告和所有天线参考设计的超链接。

TI 建议包含一个天线匹配网络，以对天线进行调谐并减少天线的失配损耗。对于单频带天线，建议始终在天线之前包含一个 π 型匹配网络（具体请参阅图 5-1）。仅需要三个封装或元件中的两个。天线的阻抗将决定是使用封装或元件 ANT1 还是 ANT3。始终使用 ANT2。即使天线完全匹配，也可以将 ANT2 设置为 $0\ \Omega$ 电阻。有关天线匹配的更多详细信息，请参阅[天线阻抗测量和匹配应用手册](#)。

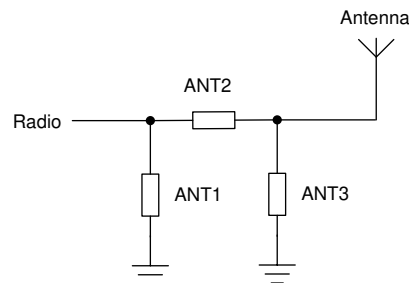


图 5-1. 建议用于单频带天线的天线 π 型网络

6 晶体调谐

6.1 CC23xx 和 CC27xx 晶体振荡器

CC23xx 和 CC27xx 器件具有两个晶体振荡器。高频晶体振荡器 (HFXT) 以 48MHz 的频率运行，是无线电正常工作的必备器件。低频晶体振荡器 (LFXT) 用于 RTC 计时，仅在需要进行精确的 RTC 计时的情况下才使用。例如低功耗蓝牙等同步协议 (请参阅节 3.1.2)。

这两种晶体振荡器都是图 6-1 中所示的皮尔斯型振荡器。在这种类型的振荡器中，晶体和负载电容器构成 π 型滤波器，为内部放大器提供 180° 相移，同时使振荡器一直锁定在指定的频率。为了使该频率正确，必须根据晶体的容性负载 (CL) 参数正确地确定负载电容的尺寸。

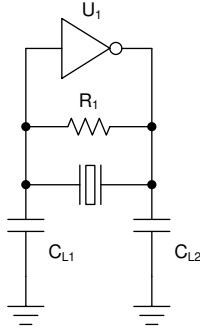


图 6-1. 皮尔斯型振荡器

振荡器之间的关键区别在于，高频振荡器在 IC 内部具有内部可变负载电容，不需要外部负载电容器。低频振荡器需要具有外部电容器才能正常工作。

6.2 晶体选型

选择晶体器件时，请参阅节 12 中的器件特定的 CC23xx 和 CC27xx 数据表，其中列出了对于晶体参数的要求。必须满足所有这些要求，以确保振荡器和器件正常运行。有关推荐的晶体，请参阅 CC13xx、CC26xx 和 CC23xx 系列无线 MCU 的晶体振荡器和晶体选型应用手册。

6.3 对 LF 晶体振荡器进行调谐

可以通过相对于晶体的所需负载电容 CL 正确确定负载电容器的尺寸来设置 32kHz 晶体振荡器的频率。从晶体的角度而言，两个电容器串联放置。PCB 迹线和焊盘会增加一些寄生电容。可以通过方程式 1 来计算总有效电容值。

$$CL = \frac{C1 \times C2}{C1 + C2} + C_{parasitic} \approx \frac{\text{load capacitor value}}{2} + C_{parasitic} \quad (1)$$

最后的简化要求 C1 和 C2 相等。

测量振荡器频率精度的最佳方法是在 I/O 引脚上输出 32kHz 时钟信号。可以使用频率计数器来测量频率，而不会影响振荡器。以下代码片段将选定的 32kHz 时钟源输出到 DIO19。只能使用一个特定 I/O 为 CC23xx 和 CC27xx 输出 32kHz 时钟 (请参阅表 6-1)。

```

/* INCLUDES
*/
#include <ti/drivers/GPIO.h>
#include DeviceFamily_constructPath(inc/hw_types.h)
#include DeviceFamily_constructPath(inc/hw_memmap.h)
#include DeviceFamily_constructPath(inc/hw_ckmd.h)
#include DeviceFamily_constructPath(inc/hw_ioc.h)
#include DeviceFamily_constructPath(inc/hw_pmctl.h)
// ...
int main()
{
// ...

/** Add the following after Board_init();
 * Be sure IOID used below is not used by any entries in PIN or
 * GPIO tables from the board files.
 * The clock source can be switched with constant clockSrc.
 */

uint8_t clockSrc = 0xF; // for LF crystal clock

// drive output low first
GPIO_setConfig(19, GPIO_CFG_OUTPUT | GPIO_CFG_OUT_LOW);

// Configure the IOC.IOC19.PORTCFG MMR to select DTB
HWREG(IOC_BASE + IOC_O_IOC19) &= ~IOC_IOC19_PORTCFG_M;
HWREG(IOC_BASE + IOC_O_IOC19) |= IOC_IOC19_PORTCFG_DTB;

// Make sure the DTB mux selects in IOC (and if required in
// source clock IP) are reset that zero is driven on DTB0.
// ULLSEL mux select (select CKMD)
HWREG(IOC_BASE + IOC_O_DTBCFG) &= ~IOC_DTBCFG_ULLSEL_M;
HWREG(IOC_BASE + IOC_O_DTBCFG) |= 0x1 << IOC_DTBCFG_ULLSEL_S; // 0x1 to route CKMD to DTB0

// Enable IOC.DTBOE.EN0
HWREG(IOC_BASE + IOC_O_DTBOE) &= ~IOC_DTBOE_EN0_M;
HWREG(IOC_BASE + IOC_O_DTBOE) |= IOC_DTBOE_EN0_EN;

// select which clock (CKMD) to output on DTB0 (DTB[0])
HWREG(CKMD_BASE + CKMD_O_DTBCTL) &= ~CKMD_DTBCTL_CLKSEL_M;
HWREG(CKMD_BASE + CKMD_O_DTBCTL) |= (clockSrc) << CKMD_DTBCTL_CLKSEL_S;

// enable DTB output
HWREG(CKMD_BASE + CKMD_O_DTBCTL) &= ~CKMD_DTBCTL_EN_M;
HWREG(CKMD_BASE + CKMD_O_DTBCTL) |= CKMD_DTBCTL_EN;

// ...
}

```

表 6-1. 用于输出 32kHz 时钟的 I/O

CC23xx	CC27xx
DIO19	DIO27

6.4 对 HF 晶体振荡器进行调谐

HFXT 在 IC 中内置了可变负载电容器（电容器阵列 Q1 和电容器阵列 Q2），不需要安装外部电容器，可以在 Sysconfig *TI DEVICES* 部分的 *Device Configuration* 下设置负载电容，方法是启用 *Override HFXT Cap Array Trims* 并为电容器阵列 Q1 和电容器阵列 Q2 设置适当的值。为了避免晶体两侧出现负载电容器不平衡，电容器阵列 Q1 和电容器阵列 Q2 之间的最大差值不能超过 1。如果未启用 *Override HFXT Cap Array Trims*，则会使用电容器阵列 Q1 和电容器阵列 Q2 的故障值。

表 6-2 显示了在评估板上测得的最终总电容与电容器阵列增量值。请注意，最终的电容值包括寄生电容，因此最低设置不是 0pF。电容器阵列值在两个特定区域内增加时，有效电容不会发生变化。上述两个区域是电容器阵列值从 15 变为 16 以及从 47 变为 48 时。如果使用自动搜索算法查找最佳的电容器阵列值，请注意从搜索算法中剔除 15 或 16 及 47 或 48。

测量 HF 晶体振荡器精度的最佳方法是，通过无线电输出未经调制的载波，并使用频谱分析仪测量相对于所需频率的频率偏移量。晶体频率的相对偏移量（通常以百万分率 (ppm) 表示）与射频载波的相对偏移量相同。

在进行测试时，可以在 SmartRF™ Studio 中调整电容器阵列值。这样就可以动态更新负载电容，从而大幅简化调谐过程。然后可以将 SmartRF Studio 中的最佳值输入到适用软件工程的 Sysconfig 中。

表 6-2. 电容器阵列

电容器阵列值 (Q1 = Q2)	参考板上测得的 CC23xx 电容 (pF)	参考板上测得的 CC27xx 电容 (pF)
1	3.7	3.9
2	3.7	4.0
3	3.8	4.1
4	3.9	4.1
5	4.0	4.2
6	4.1	4.3
7	4.1	4.4
8	4.2	4.4
9	4.3	4.5
10	4.4	4.6
11	4.4	4.7
12	4.5	4.7
13	4.6	4.8
14	4.6	4.9
15	4.7	5.0
16	4.7	5.0
17	4.8	5.0
18	4.9	5.1
19	5.0	5.2
20	5.1	5.3
21	5.2	5.4
22	5.3	5.5
23	5.3	5.6
24	5.4	5.7
25	5.5	5.8
26	5.6	5.9
27	5.7	6.0
28	5.8	6.1
29	5.9	6.2
30	6.0	6.3
31	6.1	6.4
32	6.3	6.6
33	6.4	6.7
34	6.5	6.8
35	6.6	6.9

表 6-2. 电容器阵列 (续)

电容器阵列值 (Q1 = Q2)	参考板上测得的 CC23xx 电容 (pF)	参考板上测得的 CC27xx 电容 (pF)
36	6.7	7.0
37	6.8	7.2
38	6.9	7.3
39	7.1	7.4
40	7.2	7.5
41	7.3	7.6
42	7.4	7.8
43	7.5	7.9
44	7.6	8.0
45	7.7	8.1
46	7.8	8.2
47	7.9	8.3
48	7.9	8.3
49	8.1	8.5
50	8.3	8.7
51	8.4	8.8
52	8.6	9.0
53	8.7	9.2
54	8.9	9.3
55	9.0	9.5
56	9.2	9.7
57	9.3	9.8
58	9.5	10.0
59	9.6	10.1
60	9.8	10.3
61	9.9	10.5

7 最佳负载阻抗

通过以端接负载和源阻抗的形式，测量负载和源极拉取的组合来确定最佳性能的匹配环境。这需要全面的测量来表征射频前端的非线性响应。

考虑的参数包括：

- 发射输出功率
- 发射效率
- 发射谐波功率级别
- 发射输出频谱
- 接收器灵敏度

考虑的运行条件包括：

- 频率
- 电压范围
- 发射功率设置
- 封装寄生效应

此外，还必须考虑温度变化对发射/接收性能的影响。

这些阻抗位置通常位于史密斯圆图的不同区域，并针对一组给定的工作条件确定在发射和接收性能之间实现最佳权衡的设计空间。

确定的目标阻抗高度依赖于应用电路的电源平面和接地平面、精确的测量系统校准以及因 PCB 布局而产生的差模和共模电流分量的影响。虽然使用 EDA 工具对 PCB 进行详细仿真可以增强设计的可信度，但仿真不准确（例如元件模型）却增加了难以考虑的额外误差。

鉴于稳健设计必须考虑的参数数量和所需的测试数量，TI 建议遵循参考设计。

8 PA 表

SmartRF Studio 中提供了各种器件的 PA 表。可通过选择该表中使用的 txPower 值，使器件间的差异尽可能小。此外，txPower 设置具有内置的温度补偿功能，作为温度的函数，可实现非常小的输出变化。

使用的 PA 应确保在最大功率下实现高效率。在最大功率下，PA 处于饱和状态，因此器件间差异很小。对于较低功率设置，PA 处于线性区域，输出功率取决于晶体管增益，这会导致较大的器件间差异。

9 电源配置

9.1 电源简介

CC23xx 器件具有三个暴露在外部引脚上的电源轨：VDDS、VDDR 和 VDDD。CC27xx 器件还有一个电源轨：VDDIO。VDDS 是无线微控制器的主电源，必须从外部为其提供 1.71V 至 3.8V 的电压。VDDR 是由内部直流/直流转换器或内部全局 LDO 供电的内部电源轨。VDDR 调节至大约 1.5V。VDDD 由数字 LDO 或 LDO 在内部供电，具体取决于电源状态。将该电源轨修整为约 1.28V，并且需要 1μF 的外部去耦电容器。VDDIO 电源为某些 GPIO 的分离轨 IO 电源供电，必须使用 1.71V 至 3.8V 从外部供电。

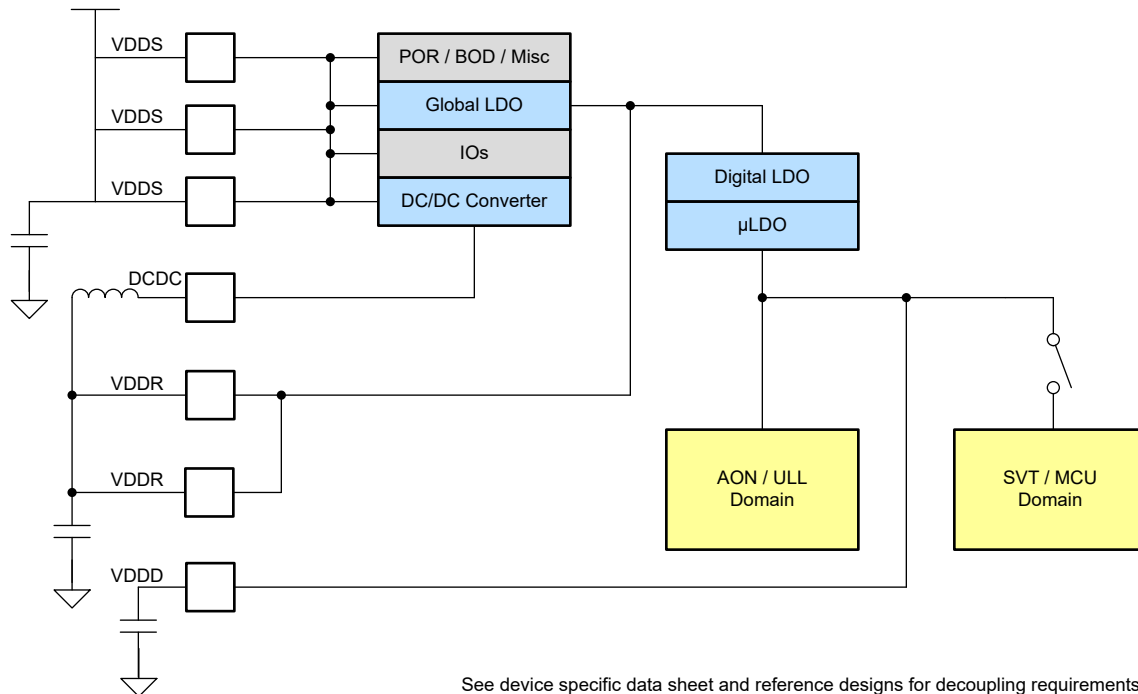


图 9-1. 电源系统

9.2 直流/直流转换器模式

使用内部直流/直流转换器可获得理想的效率，而这要求使用外部电感器和电容器。将元件尽可能靠近 CC23xx 或 CC27xx 器件放置，并从 DC/DC 电容器接地端到芯片上的焊盘之间有一条短的电返回路径。VDDS 引脚未在内部连接在一起。查看参考设计，以确定每个去耦电容器需要放置的位置。去耦电容器和 DC/DC 电感器的实际值可能因器件而异。关于实际值，请参阅器件特定的参考设计。

在直流/直流模式下运行时，电源系统会根据所需负载在全局 LDO 和直流/直流转换器之间动态切换，以实现最佳效率。如果 VDDS 降至 2.2V 以下，则 DC/DC 转换器的效率将低于 LDO，器件将在全局 LDO 模式下运行。对于在 VDDS 小于 2.2V 的情况下运行的系统，请考虑使用全局 LDO，以节省元件成本和电路板面积。

要使用 DC/DC 转换器，客户必须在 Sysconfig 中的 *TI DEVICES -> Device Configuration -> Voltage Regulator* 中选择 *DCDC*。有关更多详细信息，请参阅图 9-2。

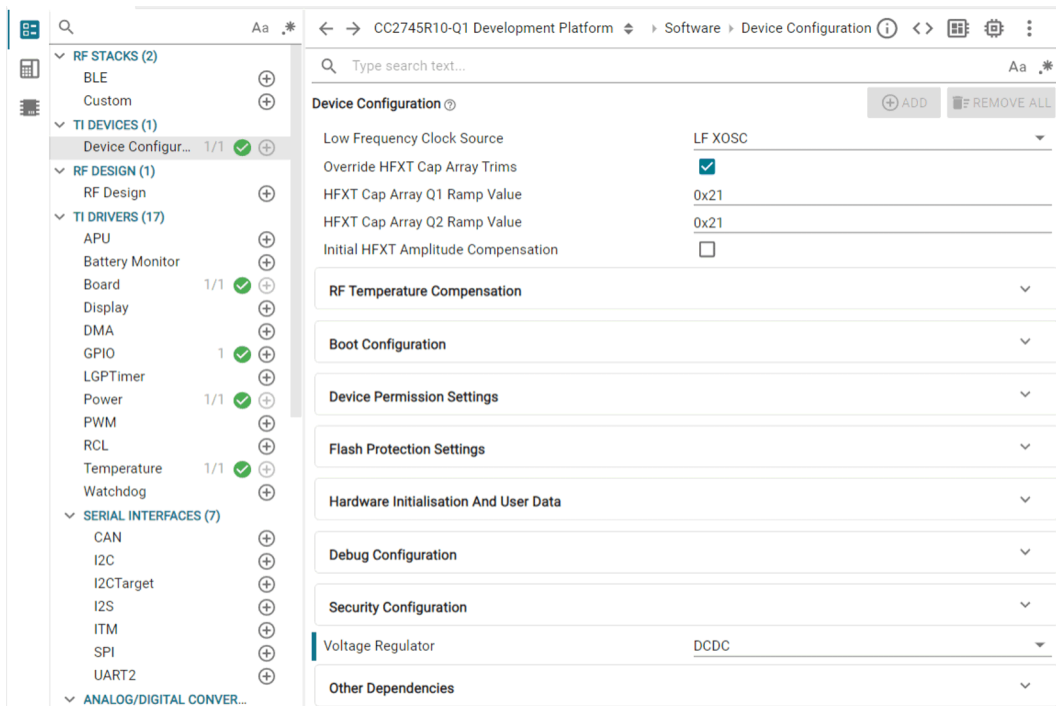


图 9-2. 直流/直流模式

9.3 全局 LDO 模式

为了节省成本和降低 PCB 面积，可以去掉直流/直流电感器，并以更高的功耗为代价从全局 LDO 为 VDDR 供电。请参阅器件特定的数据表以了解预计电流消耗会增加多少。在这种模式下，VDDR 上仍然需要一个大容量电容器，并且将它放在靠近 VDDR 引脚的位置。

要使用全局 LDO，用户必须在 SysConfig 中的 *TI Devices -> Device Configuration -> Voltage Regulator* 中选择 GLDO。有关更多详细信息，请参阅图 9-3。

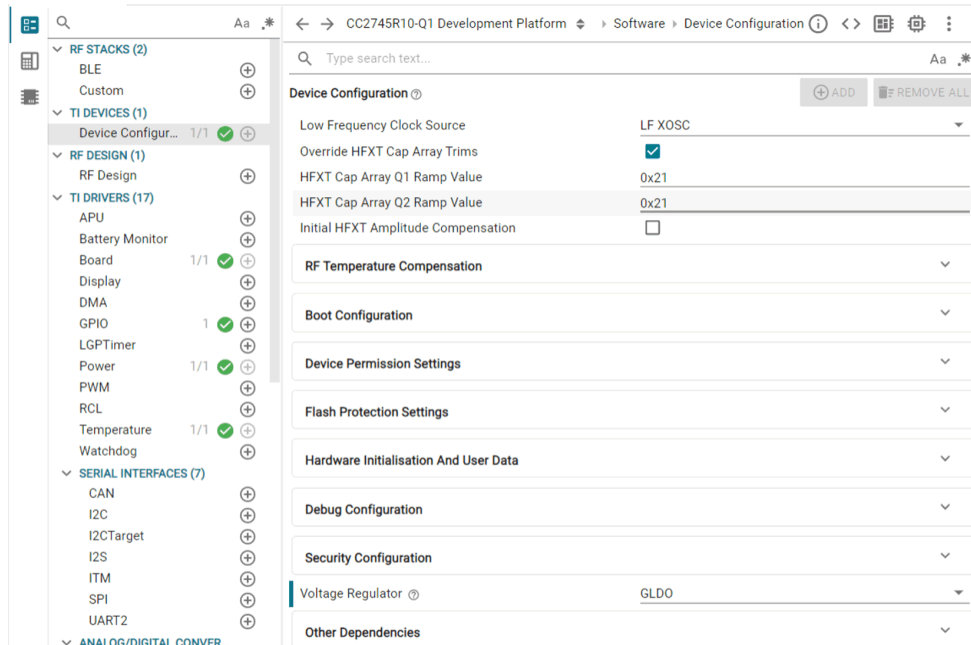


图 9-3. 全局 LDO 模式

10 电路板启动

在开始开发软件或进行范围测试之前，TI 建议进行传导测量，以验证电路板是否具有预期的性能。通常，需测量灵敏度、输出功率、谐波和电流消耗，以验证硬件设计。

所需的测量取决于电路板的类型和应用。如果这是具有 10m 范围要求的设计，则检验过程不需要像采用范围扩展器的设计那样详细。对于要求高性能的应用和其他设计，强烈建议使用频谱分析仪和信号发生器（应可选择发送射频数据包）。

以下各节讨论了不同的测量方法，用户需选择适合电路板的方法。有关更详细的测试，请参阅 [CCxxx 器件的基本射频测试应用报告](#)。

10.1 上电

首次给电路板上电时，请检查以下引脚上的电压是否符合预期。

CC23xx 和 CC27xx

- VDDR = 1.5V
- VDDD = 1.28V

请勿直接在 X48P 和 X48N 引脚上进行测量，否则会损坏器件。

10.2 RF 测试：SmartRF Studio

为了使用 SmartRF Studio 进行测试，电路板需要使用一个连接器，将调试器直接连接到射频芯片。对 CC23xx 和 CC27xx 使用 LP-XDS110/LP-XDS110ET。所需连接的引脚为 VDDS（器件由外部供电时不需要）、GND、RESET、SWDIO 和 SWDCK。

1. 将调试器连接到电路板。打开 SmartRF Studio 并验证器件是否显示在已连接器件列表中。
2. 放置两个相距 2m、已知正常的电路板。此处的 *已知正常的电路板* 指 TI 的 LaunchPad。在 SmartRF Studio 中使用的预定义 PHY 设置，应与将在最终产品中使用的 PHY 最匹配。
3. 将一块电路板设置为 Packet RX，另一块设置为 Packet TX，并传输 100 个数据包。确认数据包已接收，并记下所接收数据包的 RSSI。
4. 将 TX 中使用的电路板替换为被测器件 (DUT)。重复执行 #3 中所述的测试。
5. 将 RX 中使用的电路板替换为 DUT。将 TX 中使用的电路板替换为已知正常的电路板。重复执行 #3 中所述的测试。
6. 如果可能，需首先使用 *已知正常的* 天线进行测量，然后使用后续将在最终设计中使用的天线再次进行测量。调谐不良的天线可能会导致显著的灵敏度或输出功率损失。
7. 如果结果满足要求，请将设置从预定义设置更改为计划在最终产品中使用的射频设置。使用所需的射频设置重复 #3 至 #5 中所述的测试。

如果 RSSI 偏离参考值，则检查原理图和布局。

10.3 RF 测试：传导测量

对于高性能设计，TI 建议在设置射频链路之前执行传导测量以验证性能。

10.3.1 灵敏度

1. 断开天线并在 SMA 连接器处执行传导测量，或在 50 Ω 点处焊接一根半刚性同轴电缆。
2. 配置被测电路板并使用 SmartRF Studio 8 中的 Packet RX 选项（类似于 [节 10.2](#) 介绍的测试）。在 Packet RX 模式下，用户可以设置预期的数据包计数。

3. 使用 LaunchPad 作为发送器。在 LaunchPad SMA 连接器和定制板上的 50 Ω 点之间连接同轴电缆并进行衰减。使用该方法很难获得准确的数字，因为输出功率和衰减的确切值通常是未知的。一些能量也将通过空气从 EM 传输到 DUT。此外，背景噪音也会影响结果。为了获得更准确的结果，应将接收器放置在屏蔽箱中。
4. SmartRF Studio 将计算数据包错误率 (PER) 和误码率 (BER)。

如果传导灵敏度差，请检查以下各项。

- 设置是否与 SmartRF Studio 的建议值相同？如果在使用 SmartRF Studio 时灵敏度较好，但在使用用于工程的设置时灵敏度不佳，则必须检查这些设置。
- DUT 和信号源之间的频率差是多少？可以通过传输未经调制的连续波来测量频率偏移。
- 原理图（包括所有元件值）是否与参考设计一致？
- 布局是否与参考设计一致？

10.3.2 输出功率

1. 断开天线并在 SMA 连接器处执行传导测量或在 50 Ω 点处焊接一根半刚性同轴电缆。
2. 首选方法：使用频谱分析仪 (SA)。使用 2MHz RBW 来测量输出功率。
3. 如果 SA 不可用，则使用带 SMA 连接点的 LaunchPad。在 EM/LaunchPad SMA 连接器和定制板上的 50 Ω 点之间连接同轴电缆并进行衰减。使用 SmartRF Studio 并将 LaunchPad 设置为连续 RX 模式并读取 RSSI。请注意，RSSI 具有给定的容差，因此测量不会像首选方法那样精确。

有关射频测试的更多指导，请参阅 [CCxxxx 器件的基本射频测试](#)。

10.4 硬件故障排除

本节介绍了引起性能不佳的一些常见原因。

10.4.1 无链路：RF 设置

为了在两个射频芯片之间建立链路，两个射频芯片必须以相同的频率和相同的射频设置运行。

10.4.2 无链路：频率偏移

对于窄带系统，TX 和 RX 器件之间的频率偏移较大可能导致无链路或链路非常差。确保接收所需的最小 RX 带宽使用 [方程式 2](#) 计算得出：

$$RX \text{ BW} = \text{Signal Bandwidth} + 4 \cdot \text{ppm Crystal} \cdot \text{RF Frequency of Operation} \quad (2)$$

对于 FSK，信号带宽可以近似表示为数据速率 + 2×频率偏差（卡森法则）。

10.4.3 链路不良：天线

天线需要一个匹配的网络来进行调谐并减少天线的失配损耗。如果天线未进行调谐，则能量会在 TX 和 RX 中损失，而链路预算会降低。有关更多详细信息，请参阅 [节 5](#)。

10.4.4 低功耗蓝牙：器件可以广播但无法连接

如果使用 32kHz 晶体振荡器作为 RTC 源，则：

- 针对 32.768kHz 晶体的负载电容器不合适会导致频率偏移
- 32kHz 晶体无法启动（负载电容器不合适、晶体缺失、焊接问题）

如果使用 32kHz RC 振荡器作为 RTC 源，则：

- 校准配置不正确。如需更多信息，请参阅 SDK 随附的低功耗蓝牙堆栈用户指南。

RTC 频率不正确将导致器件漏掉连接事件，从而断开与中心器件的连接。

为了调试这个问题，可以在 I/O 引脚上输出 32kHz 时钟，并使用频率计数器进行测量。如需更多信息，请参阅节 6.3。通过在引脚上输出时钟，用户需要始终测量 `_selected_` RTC 时钟源，并在不影响此时钟源的情况下进行测量（探测晶体会有影响）。

如果使用 32.768kHz 晶体，请确保晶体符合器件特定的 CC234x 和 CC27xx 数据表中概述的要求。请确保适当确定负载电容器的尺寸，如节 6.3 所示。

验证 BLE-Stack 是否已根据正确的睡眠时钟精度进行了配置。中央设备和外设器件的默认值分别为 50ppm 和 40ppm。睡眠时钟精度可通过 `HCI_EXT_SetSCACmd` API 来调整。请参阅 `hci.h` 或 SDK 随附的 TI 供应商特定 API 指南。

10.4.5 灵敏度差：背景噪声

射频通道将接收所选频率范围内的所有无线电流量。除了所需的信号之外，该通道还将接收背景噪声。部分背景噪声是所选频带上的其他射频流量。若要接收射频数据包，接收到的信号必须具有给定的 SNR。如果背景噪声增大，则实际灵敏度会变差。

例如，如果传导灵敏度为 -100dBm，所需的 SNR 为 7dB，背景噪声为 -90dBm，则实际辐射灵敏度为 -83dBm。

在进行距离测试之前，应测量背景噪声。一种方法是关闭所有已知的 TX 源，将 LaunchPad 或已知良好的板连接到 SmartRF Studio，选择“Continuous RX”选项卡并按“Play”。所生成图的平均值可用作查找实际灵敏度的输入。

10.4.6 睡眠状态功耗高

- 当连接了调试器时，芯片不会进入最低功耗模式。
- 软件：使用相关 SDK 中的 `gpiosshutdown` 示例。
- 测量 Launchpad 上的电流消耗时，请拆下所有跳线。
- 确保电路板上的每个 IC 都已断电。
- 如果应用配置为使用 32kHz 晶体，请检查该晶体是否已连接，以及振荡器是否正在运行。
- 确保没有任何输入引脚处于三态。

11 总结

本应用手册提供了使用 CC23xx 和 CC27xx 器件系列设计定制硬件的指南。本文档首先概述了这些器件的可用参考设计，然后介绍了原理图和 PCB 布局的主要注意事项，最后提供了有关调谐晶体振荡器的指导以及有关如何启动电路板的说明。

12 参考资料

- Cadence , [TXLine 传输线路计算器](#)
- 德州仪器 (TI) , [2.4GHz 倒置 F 型天线](#) , 应用手册
- 德州仪器 (TI) , [LP-EM-CC2340R53 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI) , [LP-EM-CC2340R5 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI) , [LP-EM-CC2340R5-Q1 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI) , [LP-EM-CC2340R5-RGE-4x4-IS24 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI) , [LP-EM-CC2745R10-Q1 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI) , [天线选型快速指南](#) , 应用手册
- 德州仪器 (TI) , [天线选型指南](#) , 应用手册。
- 德州仪器 (TI) , [CC-Antenna-DK2](#)。
- 德州仪器 (TI) , [CC-Antenna-DK2 和天线测量汇总](#) , 应用手册。
- 德州仪器 (TI) , [CCxxxx 器件的基本射频测试](#) , 应用手册
- 德州仪器 (TI) , [CC13xx、CC26xx 和 CC23xx 系列无线 MCU 的晶体振荡器和晶体选型](#) , 应用手册
- 德州仪器 (TI) , [天线阻抗测量和匹配](#) , 应用手册
- 德州仪器 (TI) , [CC2340R SimpleLink™ 2.4GHz 无线 MCU 系列](#) , 勘误表
- 德州仪器 (TI) , [CC2340R5-Q1 SimpleLink™ 无线 MCU 器件](#) , 勘误表
- 德州仪器 (TI) , [CC2340R SimpleLink™ 2.4GHz 无线 MCU 系列](#) , 数据表
- 德州仪器 (TI) , [CC2340R5-Q1 SimpleLink™ 低功耗 Bluetooth® 5.3 无线 MCU](#) , 数据表
- 德州仪器 (TI) , [CC274xR-Q1、CC274xP-Q1 汽车类 SimpleLink™ 低功耗 Bluetooth® 5.4 无线 MCU](#) , 数据表

13 修订历史记录

Changes from Revision * (May 2025) to Revision A (February 2026)	Page
• 更新了表 3-2 和表 3-3	6

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月