



摘要

本应用报告提供了 CC13xx/CC26xx SimpleLink™ 超低功耗无线 MCU 平台的设计指南。本文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，最后总结了启动电路板需采取的步骤。

内容

| | |
|--|----|
| 1 参考设计 | 2 |
| 1.1 Sub-1GHz LaunchPad..... | 2 |
| 1.2 2.4GHz LaunchPad..... | 3 |
| 1.3 双频带 LaunchPad..... | 3 |
| 1.4 参考设计概述..... | 6 |
| 2 前端配置 | 7 |
| 2.1 CC13xx/CC26xx..... | 7 |
| 2.2 配置前端模式..... | 8 |
| 2.3 CC13xx 单端模式..... | 9 |
| 2.4 CC26xx..... | 10 |
| 3 原理图 | 11 |
| 3.1 原理图概览..... | 11 |
| 3.2 引导加载程序引脚..... | 13 |
| 3.3 AUX 引脚..... | 14 |
| 3.4 JTAG 引脚..... | 15 |
| 4 PCB 布局 | 15 |
| 4.1 电路板堆叠..... | 15 |
| 4.2 平衡-非平衡变压器..... | 15 |
| 4.3 LC 滤波器..... | 16 |
| 4.4 去耦电容器..... | 17 |
| 4.5 晶体负载电容器的放置..... | 17 |
| 4.6 电流返回路径..... | 17 |
| 4.7 直流/直流稳压器..... | 18 |
| 4.8 天线匹配元件..... | 18 |
| 4.9 传输线路..... | 18 |
| 4.10 电磁仿真..... | 18 |
| 5 天线 | 19 |
| 5.1 单频带天线..... | 19 |
| 5.2 双频带天线..... | 19 |
| 6 晶体调谐 | 23 |
| 6.1 CC13xx/CC26xx 晶体振荡器..... | 23 |
| 6.2 晶体选型..... | 23 |
| 6.3 对 LF 晶体振荡器进行调谐..... | 23 |
| 6.4 对 HF 振荡器进行调谐..... | 24 |
| 7 TCXO 支持 | 26 |
| 7.1 硬件..... | 26 |
| 7.2 软件..... | 26 |
| 7.3 示例：在 CC1312R Launchpad 上使用 TCXO..... | 27 |
| 8 集成无源器件 (IPC) | 27 |
| 9 最佳负载阻抗 | 28 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 10 PA 表 | 30 |
| 11 电源配置 | 31 |
| 11.1 引言..... | 31 |
| 11.2 直流/直流转换器模式..... | 31 |
| 11.3 全局 LDO 模式..... | 32 |
| 11.4 外部稳压器模式..... | 33 |
| 12 电路板启动 | 34 |
| 12.1 上电..... | 34 |
| 12.2 射频测试：SmartRF Studio..... | 34 |
| 12.3 射频测试：传导测量..... | 34 |
| 12.4 软件启动..... | 35 |
| 12.5 硬件故障排除..... | 35 |
| 13 参考文献 | 37 |
| 14 修订历史记录 | 37 |

商标

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

Bluetooth® is a registered trademark of Bluetooth SIG, Inc and used by Motorola, Inc. under license.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 参考设计

TI LaunchPad™ 是 CC13xx 和 CC26xx 器件的主要开发平台。LaunchPad 包含经优化的板载外部射频元件、PCB 天线和内置调试器，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 CC13xx/CC26xx 系列成员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 下载，并可在将 CC13xx/CC26xx 集成到定制硬件时用作参考设计。

1.1 Sub-1GHz LaunchPad

本节提供了不同的 LaunchPad 设计，并介绍了针对特定的 CC13xx/CC26xx 器件和 ISM 频带应遵循哪一款设计。

1.1.1 LAUNCHXL-CC1310

| | |
|---------|---------------------------------------|
| 特色器件： | CC1310 |
| ISM 频带： | 868MHz 和 915MHz |
| 天线： | 具有单频带或双频带选项的单极 PCB 天线 |
| 射频前端： | 差分，外部偏置 |
| 设计文件： | LAUNCHXL-CC1310 设计文件 |

1.1.2 LAUNCHXL-CC1312R

| | |
|---------|--|
| 特色器件： | CC1312R |
| ISM 频带： | 868MHz 和 915MHz |
| 天线： | 具有单频带或双频带选项的单极 PCB 天线 |
| 射频前端： | 差分，外部偏置 |
| 设计文件： | SimpleLink Sub-1GHz CC1312R 无线 (MCU) LaunchPad 开发套件 868MHz/915MHz 应用 |

1.2 2.4GHz LaunchPad

1.2.1 LAUNCHXL-CC2640R2

| | |
|---------|--|
| 特色器件： | CC2640R2F |
| ISM 频带： | 2.4GHz |
| 天线： | 2.4GHz 倒置 F 型天线 |
| 射频前端： | 差分，内部偏置 |
| 设计文件： | LAUNCHXL-CC2640R2 设计文件 |

1.2.2 LAUNCHXL-CC26x2R

| | |
|---------|--|
| 特色器件： | CC2652R |
| ISM 频带： | 2.4GHz |
| 天线： | 2.4GHz 倒置 F 型天线 |
| 射频前端： | 差分，内部偏置 |
| 设计文件： | CC26x2R LaunchPad 设计文件 |

该 LaunchPad 还可用于开发 CC2642R。

1.3 双频带 LaunchPad

1.3.1 LAUNCHXL-CC1350EU/US

此 LaunchPad 使用一个射频开关来选择 868MHz/915MHz 射频前端和天线或 2.4GHz 前端和天线。请注意，LaunchPad 有两种不同的版本：EU 和 US。这两者之间的唯一区别是天线匹配元件，它们分别针对 868MHz (EU) 或 915MHz (US) 运行进行了优化。

| | |
|---------|--|
| 特色器件： | CC1350 |
| ISM 频带： | 868MHz/915MHz 和 2.4GHz |
| 天线： | <ul style="list-style-type: none">• 适用于 868MHz 或 915/920MHz 的微型螺旋 PCB 天线• 2.4GHz 倒置 F 型天线 |
| 射频前端： | 差分，外部偏置 |
| 设计文件： | LAUNCHXL-CC1350 设计文件 |

1.3.2 LAUNCHXL-CC1350-4

此 LaunchPad 使用射频开关来选择 433MHz 射频前端和天线或 2.4GHz 前端和天线。

| | |
|---------|---|
| 特色器件： | CC1350 |
| ISM 频带： | 433MHz 和 2.4GHz |
| 天线： | <ul style="list-style-type: none"> • 适用于 868MHz 或 915/920MHz 的微型螺旋 PCB 天线 • 2.4GHz 倒置 F 型天线 |
| 射频前端： | 差分，外部偏置 |
| 设计文件： | CC1350 适用于 433MHz/2.4GHz 频带的双频带 Launchpad 修订版 A |

1.3.3 LAUNCHXL-CC1352R

此 LaunchPad 的修订版 A 使用射频开关将 868MHz/915MHz 或 2.4GHz 射频前端接线到共享的三频天线。更多有关该天线的信息，请参阅节 [5.2.1](#)。此 LaunchPad 的修订版 B 使用双工器（而非开关）将两条射频路径合并到共享天线中，从而释放一个 DIO（因为不再需要此开关的控制信号）。

| | |
|---------|--|
| 特色器件： | CC1352R |
| ISM 频带： | 868MHz、915MHz 和 2.4GHz |
| 天线： | 基于 具有单频带或双频带选项的单极 PCB 天线 |
| 射频前端： | 差分，外部偏置 |
| 设计文件： | CC1352R LaunchPad 设计文件 |

1.3.4 LAUNCHXL-CC1352P1

此 LaunchPad 在大功率 PA 端口上包含一个 868MHz/915MHz 射频前端，能够在各自的 ISM 频带中实现高达 +20dBm 的输出功率。常规的 Sub-1GHz 端口也具有一个 868MHz/915MHz 射频前端，能够在 868MHz/915MHz 频带中以高达 +14dBm 的输出功率进行接收和发送。此外，在 2.4GHz 端口处提供了一个 2.4GHz 射频前端，能够在 2.4GHz 频带中以高达 +5dBm 的输出功率进行接收和发送。所有三条路径共享同一根天线和一个射频开关，该开关选择要连接到天线的射频路径。开关的插入损耗约为 0.5dB。[CC1352P 具有集成功率放大器的 SimpleLink™ 高性能双频带无线 MCU 数据表](#) 的射频性能图中对这一点进行了解释。有关该天线的更多信息，请参阅节 [5.2.1](#)。

| | |
|---------|--|
| 特色器件： | CC1352P |
| ISM 频带： | 868MHz、915MHz 和 2.4GHz |
| 天线： | 基于 具有单频带或双频带选项的单极 PCB 天线 |
| 射频前端： | 差分，外部偏置 |
| 设计文件： | CC1352R LaunchPad 设计文件 |

1.3.5 LAUNCHXL-CC1352P-2

此 LaunchPad 在大功率 PA 端口上包含一个 2.4GHz 射频前端，这可在对应的 ISM 频带中实现高达 +20dBm 的输出功率。常规 2.4GHz 端口具有一个 2.4GHz 射频前端，能够在 2.4GHz 频带中以高达 +5dBm 的输出功率进行接收和发送。此外，在 Sub-1GHz 端口处提供了一个 868MHz/915MHz 射频前端，能够在 868MHz/915MHz 频带中以高达 +14dBm 的输出功率进行接收和发送。所有三条路径共享同一根天线和一个射频开关，该开关选择要连接到天线的射频路径。开关的插入损耗约为 0.5dB。CC1352P 具有集成功率放大器的 SimpleLink™ 高性能双频带无线 MCU 数据表的射频性能图中对这一点进行了解释。更多有关该天线的信息，请参阅节 5.2.1。

| | |
|---------|--|
| 特色器件： | CC1352P |
| ISM 频带： | 868MHz、915MHz 和 2.4GHz |
| 天线： | 基于 具有单频带或双频带选项的单极 PCB 天线 |
| 射频前端： | 差分，外部偏置 |
| 设计文件： | LAUNCHXL-CC1352P-2 设计文件 |

1.3.6 LAUNCHXL-CC1352P-4

该 LaunchPad 在大功率 PA 端口上包含一个 2.4GHz 射频前端。在该 LaunchPad 上，大功率 PA 从 VDDR 进行偏置，从而在使用该射频路径时，TX 产生最多 +10dBm 的低功耗。常规的 Sub-1GHz 端口具有一个射频前端，能够在 433MHz 频带中以高达 +13dBm 的输出功率进行接收和发送。此外，提供了一个 2.4GHz 射频前端，能够在 2.4GHz 频带中以高达 +5dBm 的输出功率进行接收和发送。所有三条路径共享同一根天线和一个射频开关，该开关选择要连接到天线的射频路径。开关的插入损耗约为 0.5dB。CC1352P 具有集成功率放大器的 SimpleLink™ 高性能双频带无线 MCU 数据表的射频性能图中对这一点进行了解释。该天线为双频带，除 2.4GHz 外，还支持在 Sub-1GHz 频率下工作。天线经过调谐，能够在 433MHz 和 2.4GHz 的频率下工作。更多相关信息，请参阅器件特定的设计文件。更多有关该天线的信息，请参阅节 5.2.2。

| | |
|---------|--|
| 特色器件： | CC1352P |
| ISM 频带： | 433MHz 和 2.4GHz |
| 天线： | 基于 具有单频带或双频带选项的单极 PCB 天线 |
| 射频前端： | 差分，外部偏置 |
| 设计文件： | LAUNCHXL-CC1352P-4 设计文件 |

1.4 参考设计概述

在设计定制板时，应尽可能遵循参考设计。一款参考设计并不包含 CC13xx/CC26xx 器件和 ISM 频带的所有组合，但可以使用某款参考设计中的射频前端并将其与兼容的 CC13xx/CC26xx 器件结合使用。表 1-1 显示了对于给定的 ISM 频带，可以使用哪款 CC13xx/CC26xx 参考设计。

例如，如果应用需要在 433MHz 频带运行，但不需要 2.4GHz 运行或 +20dBm 发射功率，则可以使用 CC1312R 器件（而非 CC1352P）。然后，应遵循 LAUNCHXL-CC1352P-4 参考设计，但只需要 SUB-1_GHZ_RF_P/N 引脚上的射频前端。

表 1-1. CC13xx/CC26xx 参考设计概述

| 频段 | 支持的器件 | 参考设计 | 注释 |
|----------------------------|-------------------------------|--|--|
| 433MHz 470MHz 510MHz | CC1310 | CC13xxEM-7XD-4251 | |
| | CC1312R | LAUNCHXL-CC1352P-4 | 使用 CC1352P 参考设计中的 433MHz 前端 |
| 779MHz 868MHz 915MHz | CC1310 | LAUNCHXL-CC1310 | 对于其他参考设计，请访问 该链接 |
| | CC1312R | LAUNCHXL-CC1312R1 | |
| 2.4GHz | CC26x0 | CC2650EM-7ID | CC26x0 的特性评估板。将 7x7 QFN 与差分射频、内部偏置结合使用。 |
| | | CC2650EM-5XD | CC26x0 的特性评估板。将 5x5 QFN 与差分射频、外部偏置结合使用。 |
| | | CC2650EM-4XS | CC26x0 的特性评估板。将 4x4 QFN 与单端射频、内部偏置结合使用。 |
| | | CC2650EM-4XS_Ext_Reg | CC26x0 的特性评估板。在外部稳压器模式配置中使用 4x4 QFN。 |
| | CC2640R2 | LAUNCHXL-CC2640R2 | 评估和开发平台。 |
| | | CC2640EM-CXS | CC2640R2F WCSP 的特性评估板。 |
| | CC2642R CC2652R | LAUNCHXL-CC26x2R1 | 评估和开发平台。 |
| | CC26x2REM-7ID | 特性评估板。 | |
| 多频带 | CC1350 | LAUNCHXL-CC1350-4 | <ul style="list-style-type: none"> • 433MHz • 2.4GHz |
| | CC1352P | LAUNCHXL-CC1352P-4 | |
| | CC1350 | LAUNCHXL-CC1350 | <ul style="list-style-type: none"> • 868/915MHz • 2.4GHz |
| | CC1352R | LAUNCHXL-CC1352R1 CC1352REM-XD7793-XD24 | |
| | CC1352P | LAUNCHXL-CC1352P1 | <ul style="list-style-type: none"> • 868/915MHz (20dBm) • 2.4GHz (5dBm) |
| | | CC1352PEM-XD7793-XD24-PA9093 | |
| | | LAUNCHXL-CC1352P-2 | <ul style="list-style-type: none"> • 868/915MHz (14dBm) • 2.4GHz (20dBm) |
| | | CC1352PEM-XD7793-XD24-PA24 | |

2 前端配置

2.1 CC13xx/CC26xx

CC13xx 和 CC26xx 具有以下前端模式：

- 单端：RF_P 引脚或 RF_N 引脚用作射频路径。
- 差分：RF_P 和 RF_N 都用作差分射频接口。
- LNA 的内部或外部偏置：LNA 可以通过内部或外部电感器进行偏置。可以为单端和差分配置选择这两种类型的偏置。

图 2-1 显示了前端选项。如果使用内部偏置，则不需要红色的元件和连接方式。元件值取决于工作的频带。

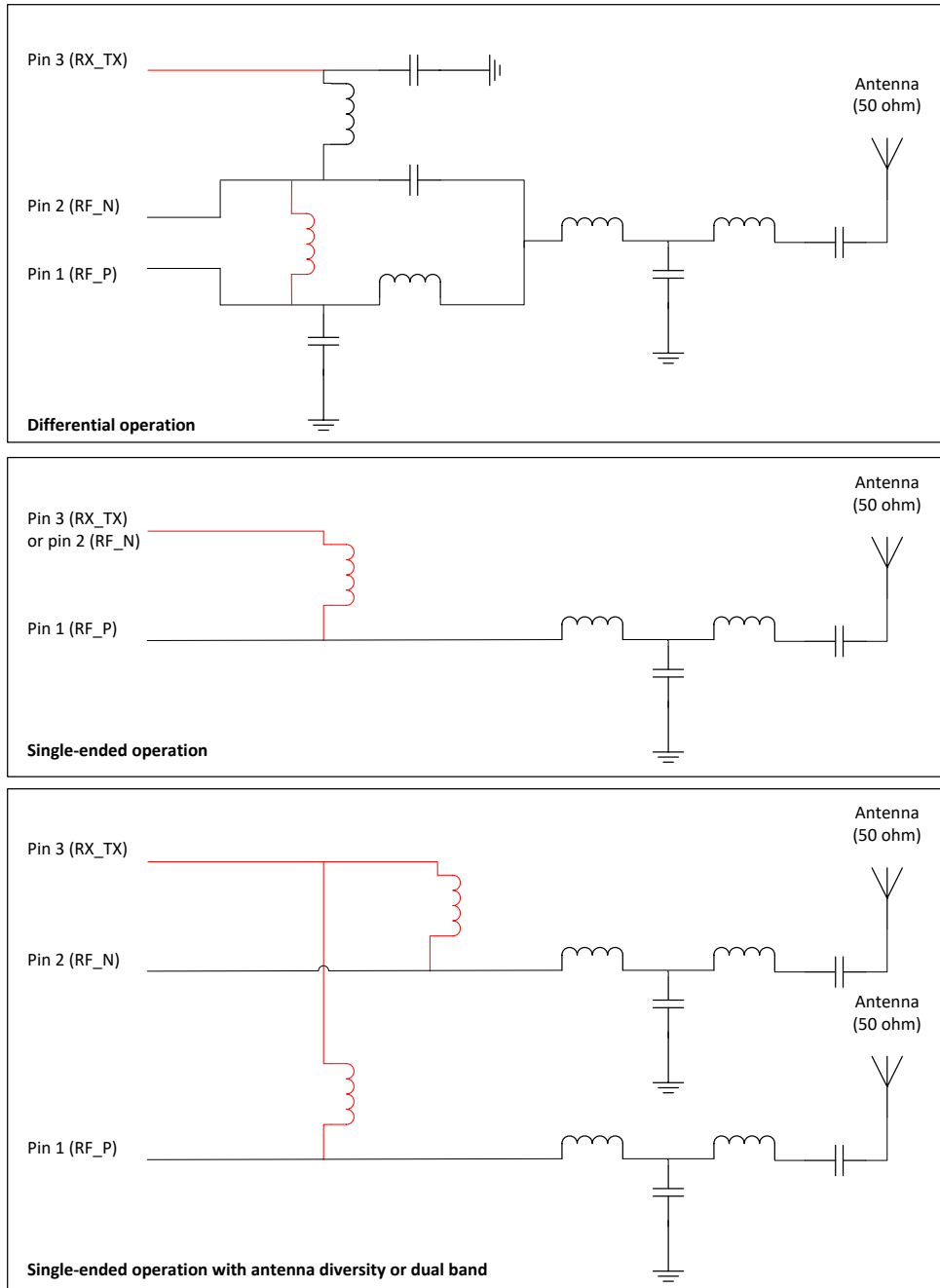


图 2-1. CC13xx/CC26xx 前端选项 (红色 = 使用外部偏置时需要)

图 2-2 总结了不同解决方案的优缺点。将图中的所有数字与差分前端和外部偏置进行比较。

| | External Bias | Internal Bias |
|--------------|---|---|
| Differential | Pros <ul style="list-style-type: none"> • Best RX performance • Best TX performance Cons <ul style="list-style-type: none"> • Biggest footprint • Highest BOM cost | Pros <ul style="list-style-type: none"> • Slightly smaller footprint • Slightly lower BOM cost Cons <ul style="list-style-type: none"> • 1 dB lower sensitivity |
| Single-Ended | Pros <ul style="list-style-type: none"> • Small footprint • Lower BOM cost Cons <ul style="list-style-type: none"> • 1 dB lower sensitivity • 3 dB lower output power | Pros <ul style="list-style-type: none"> • Smallest footprint • Lowest BOM cost Cons <ul style="list-style-type: none"> • 2 dB lower sensitivity • 3 dB lower output power |

图 2-2. CC13xx/CC26xx 前端选项的比较

2.2 配置前端模式

前端模式在 `CMD_RADIO_SETUP` 命令中设置：

- `Config.frontEndMode = 0x00`：差分模式
- `Config.frontEndMode = 0x01`：单端模式 RFP
- `Config.frontEndMode = 0x02`：单端模式 RFN

对于在 RX 中使用一个射频引脚和在 TX 中使用另一个射频引脚的单端操作，必须设置额外的覆盖层：

```
ADI_HALFREG_OVERRIDES(0, 16, 0x7, x) (1)
```

其中，`x=1` 配置 RFP 上的 PA 输出，`x=2` 配置 RFN 上的 PA 输出。

对于单端操作，由 `CMD_RADIO_SETUP Config.frontEndMode` 设置的引脚将在 RX 中使用，由 `ADI_HALFREG_OVERRIDE` 覆盖层设置的引脚将在 TX 中使用。

LNA 偏置在 `CMD_RADIO_SETUP` 命令中设置：

- `config.biasMode = 0`：内部偏置
- `config.biasMode = 1`：外部偏置

2.3 CC13xx 单端模式

2.3.1 单端 RX/TX

典型的 Sub-1GHz 设计通常需要远距离，并且通常使用差分设计。为了降低成本并减小占用空间，可以采用单端设计，但这会使距离缩短，如节 2.3.1 所示。

如果 CC13xx 连接到具有 RX 和 TX 专用 50Ω 端口的前端模块 (FEM)，则需要的元件比单端 RX/TX 设计更少。节 2.3.2 (仅 TX) 和节 2.3.3 (仅 RX) 对此进行了介绍。

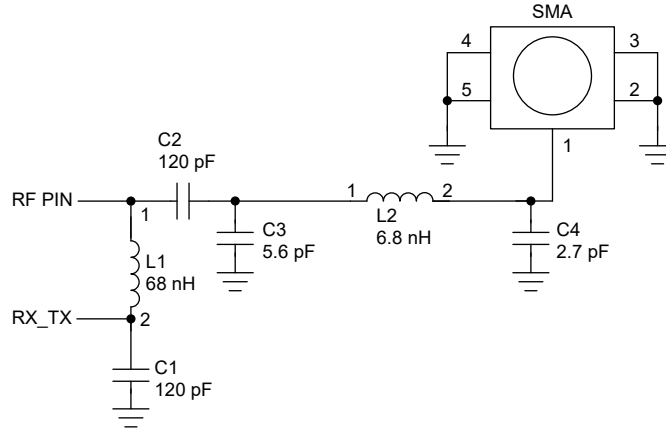


图 2-3. 采用外部偏置时的单端 CC13xx Tx 和 Rx (868/915MHz)

2.3.2 仅单端 TX

负载拉动测量表明，如果单端射频引脚处的阻抗为 $14 - j20\Omega$ ，则可以实现最大输出功率。图 2-4 展示了建议的匹配网络。

备注

尚未针对 433MHz 进行单端测量。

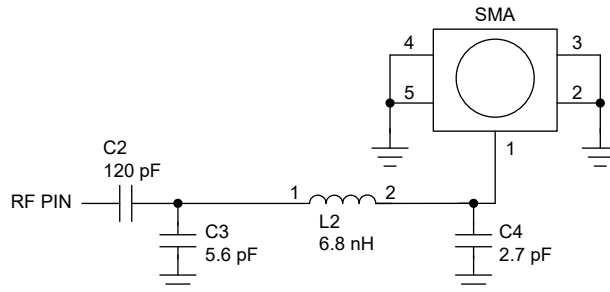


图 2-4. 仅单端 CC13xx TX (868/915MHz)

2.3.3 仅单端 RX

源拉动测量表明，如果单端射频引脚处的阻抗为 $47 + j26\Omega$ ，则可以实现最佳灵敏度。图 2-5 显示了建议的匹配网络。使用该匹配可提供 -110dBm 的灵敏度（在 25°C 、 3.0V 、 868MHz 的条件下在 3 个器件上测得）。请注意，尚未针对 433MHz 进行单端测量。

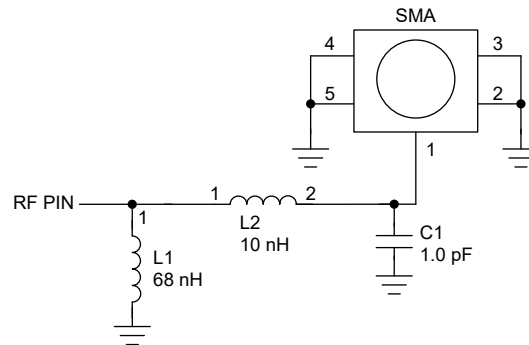


图 2-5. 仅采用外部偏置时的单端 Rx (868/915MHz)

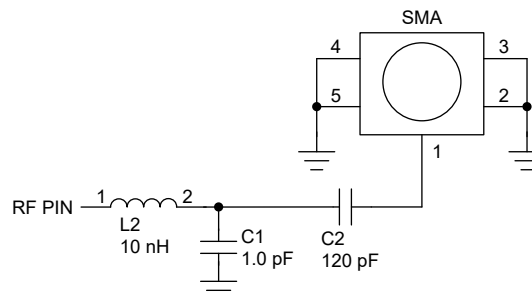
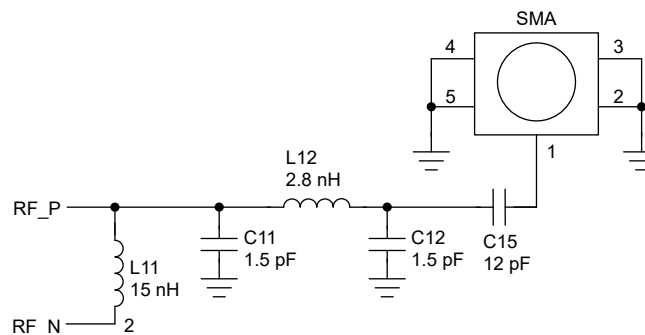


图 2-6. 仅采用内部偏置时的单端 Rx (868/915MHz)

2.3.4 单端 2.4GHz

对于 CC13x2，所示的单端配置可用于 2.4GHz 路径。



2.4 CC26xx

对于 CC26xx，当不需要最大输出功率时，建议采用单端配置。对于单端模式下的 0dBm 输出功率，电流消耗和元件数量将低于对应的差分模式。

适用于单端配置和差分配置的参考设计均可用。

1. 转到：<http://www.ti.com.cn/product/cn/CC2640R2F/technicaldocuments>。
2. 向下滚动至“Design Files”（设计文件）。
3. 这些设计被命名为 4XS、5XD 和 7ID。第一个数字表示数据包大小，X 表示外部偏置，I 表示内部偏置，S 表示单端，D 表示差分。

3 原理图

3.1 原理图概览

图 3-1 显示了以下各小节中讨论的不同元件。

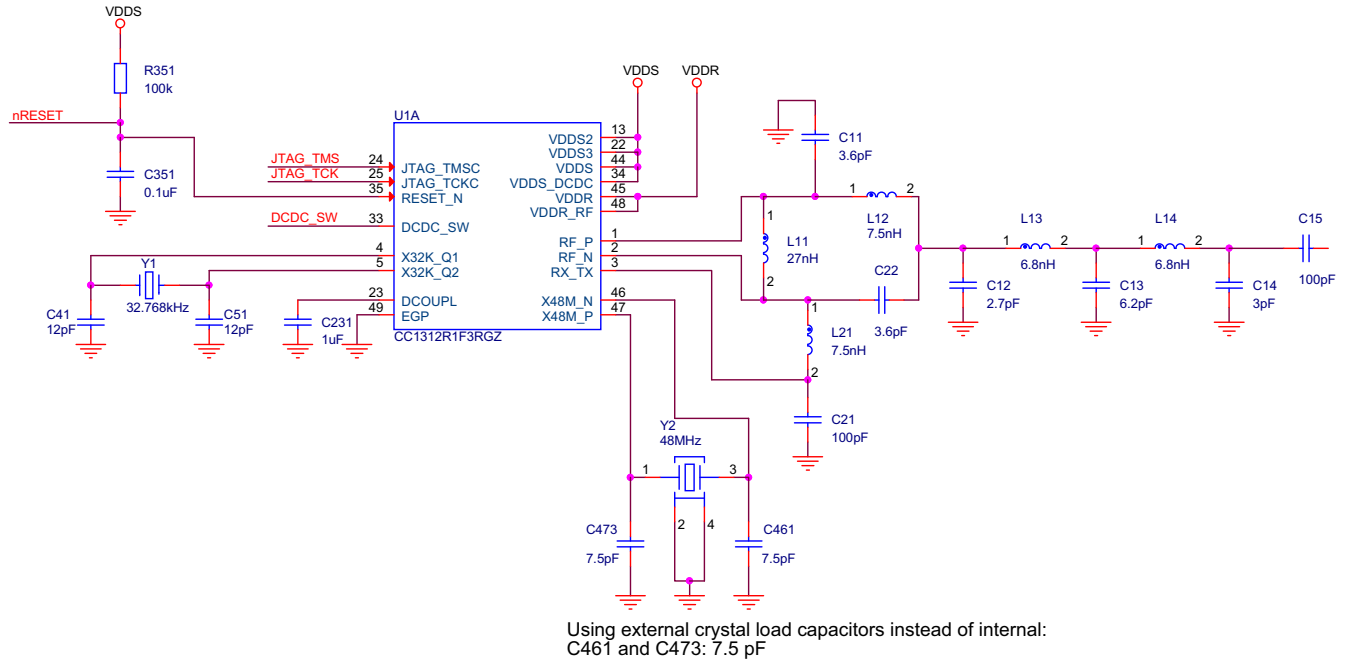


图 3-1. CC1312R 7x7 射频器件原理图概览

3.1.1 24/48MHz 晶体

无线电需要以 24/48MHz 晶体作为频率基准。

对于 CC26x2/CC13x2，在载波的 $N \times 48\text{MHz}$ 偏移处会有杂散。这些杂散是由在晶体与 XOSC 调谐电容器（与片外电容一同构成振荡器槽）之间来回流动的电流引起的。由于晶体槽具有高 Q 值，该电流相当大，并将在与 PA 和 VCO 共享的电源轨上产生 IR 压降。与默认设置相比，将 XOSC 调谐电容器设置为零可将最大杂散降低大概 5dB。

内部电容器阵列可用于大多数用例，但是，如果系统需要遵循 ARIB STD T-108 和中国关于 470 - 510MHz 频带的法规以及当使用 +20dBm PA 时，建议使用外部晶体负载电容器并将内部 XOSC 调谐电容器设置为零。有关如何设置内部 XOSC 调谐电容器的信息，请参阅节 6.4。

3.1.2 32.768kHz 晶体

32.768kHz 晶体是可选的。如果不使用低功率晶体振荡器，内部低速 RC 振荡器 (32kHz) 可以用作参考。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：它可以提高睡眠时钟精度，并降低低功耗蓝牙的功耗（连接事件前后的 RX 时段较短）。时间同步协议（如 TI 15.4-Stack 和 wM-Bus）要求使用外部晶体。

3.1.3 平衡-非平衡变压器

平衡-非平衡变压器是一种将平衡（差分）信号转换为非平衡（单端）信号的网络，因而被称为平衡-非平衡变压器。平衡-非平衡变压器通过使用低通滤波器和高通滤波器实现 $\pm 90^\circ$ 相移。重要的一点是尽可能保持平衡-非平衡变压器的对称性。如果只有其中一个射频引脚用于射频输出/输入，则不需要平衡-非平衡变压器。在这种情况下，芯片和天线之间需要一个滤波器。相关详细信息，请参阅节 2.3。

3.1.4 滤波器

在平衡-非平衡变压器与天线之间放置一个 LC 滤波器。该滤波器具有两个功能：衰减谐波和将阻抗转换为 $50\ \Omega$ 。后一项功能很重要，因为频谱分析仪和射频信号发生器等测量设备提供 $50\ \Omega$ 负载。滤波器平衡-非平衡变压器这个词有时用来描述达到以下两个目的所需的所有元件：实现平衡-非平衡变压器滤波器，以及确保无线电装置与天线之间具有适当的阻抗匹配。

3.1.5 RX_TX 引脚

并非所有 CC26x0/CC13x0 和 CC26x2/CC13x2 器件中都存在该引脚。该引脚为 RX 中的 LNA 输入端提供接地连接。这被称为外部偏置，与使用 LNA 的内部偏置相比，可以将灵敏度提高大约 1dB。

3.1.6 去耦电容器

在参考设计中，使用了多个去耦电容器。原理图显示了应通过去耦电容器进行去耦的电源引脚。

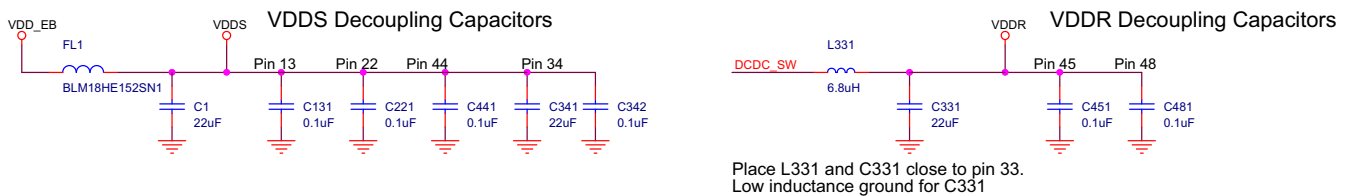


图 3-2. CC1312R 7x7 去耦电容器

3.1.7 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。如需了解更多信息，请参阅节 5.1。

3.1.8 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，尤其是三次谐波发射。

3.1.9 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 和 4mA 电流，而五个引脚支持高达 8mA 电流。

表 3-1. 驱动强度高达 8mA 的 CC26x0/CC13x0 和 CC26x2/CC13x2 引脚

| 7 × 7 QFN (RGZ) | 5 × 5 QFN (RHB) | WCSP (YFV) | 4 × 4 QFN (RSM) |
|-----------------|-----------------|------------|-----------------|
| DIO5 | DIO2 | DIO2 | DIO0 |
| DIO6 | DIO3 | DIO3 | DIO1 |
| DIO7 | DIO4 | DIO4 | DIO2 |
| DIO16 | DIO5 | DIO5 | DIO3 |
| DIO17 | DIO6 | DIO6 | DIO4 |

3.2 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/发送器 (UART) 或 4 引脚 SSI 接口与外部器件进行通信。SSI0 端口的优点是支持更高、更灵活的数据速率，但它也要求与 CC13xx/CC26xx 器件之间具有更多的连接。UART0 的缺点是速率略低且可能不太灵活。然而，UART0 需要的引脚较少，并且可以通过任何标准 UART 接口轻松实现。串行接口信号配置为特定的 DIO。这些引脚是固定的，无法重新配置。

表 3-2. CC13x0/CC26x0 : 信号接口的配置

| 信号 | 引脚配置 | 7 × 7 QFN (RGZ) | 5 × 5 QFN (RHB) | 4 × 4 QFN (RSM) | 2.7 × 2.7 WCSP (YFV) |
|----------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| UART0 RX | 涉及上拉的输入 | DIO2 | DIO1 | DIO1 | DIO1 |
| UART0 TX | 无拉取 (选择时输出) | DIO3 | DIO0 | DIO2 | DIO0 |
| SSI0 CLK | 涉及上拉的输入 | DIO10 | DIO10 | DIO8 | DIO10 |
| SSI0 FSS | 涉及上拉的输入 | DIO11 | DIO9 | DIO7 | DIO9 |
| SSI0 RX | 涉及上拉的输入 | DIO9 | DIO11 | DIO9 | DIO11 |
| SSI0 TX | 无拉取 (选择时输出) | DIO8 | DIO12 | DIO0 | DIO12 |

表 3-3. CC1311Rx、CC1312Rx、CC2651Rx、CC2652Rx : 信号接口的配置

| 信号 | 引脚配置 | |
|----------|-------------|-------|
| UART0 RX | 涉及上拉的输入 | DIO2 |
| UART0 TX | 无拉取 (选择时输出) | DIO3 |
| SSI0 CLK | 涉及上拉的输入 | DIO10 |
| SSI0 FSS | 涉及上拉的输入 | DIO11 |
| SSI0 RX | 涉及上拉的输入 | DIO9 |
| SSI0 TX | 无拉取 (选择时输出) | DIO8 |

表 3-4. CC1311Px、CC1352Rx、CC1352Px、CC2651Px、CC2652Px : 信号接口的配置

| 信号 | 引脚配置 | |
|----------|-------------|-------|
| UART0 RX | 涉及上拉的输入 | DIO12 |
| UART0 TX | 无拉取 (选择时输出) | DIO13 |
| SSI0 CLK | 涉及上拉的输入 | DIO10 |
| SSI0 FSS | 涉及上拉的输入 | DIO11 |
| SSI0 RX | 涉及上拉的输入 | DIO9 |
| SSI0 TX | 无拉取 (选择时输出) | DIO8 |

3.3 AUX 引脚

3.3.1 CC26x2/CC13x2 AUX 引脚

传感器控制器域 (AUX 域) 中有多达 32 个信号 (AUXIO0 到 AUXIO31)。可以将这些信号路由至表 3-5 中给出的特定 DIO 引脚。信号 AUXIO19 至 AUXIO26 具有模拟功能, 但也可以用作数字 I/O。所有其他 AUXIO_n 信号都是数字信号。

表 3-5. CC13x2/CC26x2 引脚映射

| DIO | AUX 域 I/O | DIO | AUX 域 I/O | DIO | AUX 域 I/O |
|-------|-----------|-------|-----------|------|-----------|
| DIO30 | 19 | DIO19 | 30 | DIO8 | 10 |
| DIO29 | 20 | DIO18 | 31 | DIO7 | 11 |
| DIO28 | 21 | DIO17 | 1 | DIO6 | 12 |
| DIO27 | 22 | DIO16 | 2 | DIO5 | 13 |
| DIO26 | 23 | DIO15 | 3 | DIO4 | 14 |
| DIO25 | 24 | DIO14 | 4 | DIO3 | 15 |
| DIO24 | 25 | DIO13 | 5 | DIO2 | 16 |
| DIO23 | 26 | DIO12 | 6 | DIO1 | 17 |
| DIO22 | 27 | DIO11 | 7 | DIO0 | 18 |
| DIO21 | 28 | DIO10 | 8 | | |
| DIO20 | 29 | DIO9 | 9 | | |

3.3.2 CC26x0/CC13x0 AUX 引脚

传感器控制器域 (AUX) 中有多达 16 个信号 (AUXIO0 到 AUXIO15)。可以将这些信号路由至表 3-6 中给出的特定引脚。AUXIO0 到 AUXIO7 具有模拟功能, 但也可以用作数字 I/O, 而 AUXIO8 到 AUXIO15 仅用于数字功能。

表 3-6. CC13x0/CC26x0 引脚映射

| 7 × 7 QFN (RGZ) | 5 × 5 QFN (RHB) | WCSP (YFV) | 4 × 4 QFN (RSM) | AUX 域 I/O |
|-----------------|-----------------|------------|-----------------|-----------|
| DIO30 | DIO14 | | | 0 |
| DIO29 | DIO13 | DIO13 | | 1 |
| DIO28 | DIO12 | DIO12 | | 2 |
| DIO27 | DIO11 | DIO11 | DIO9 | 3 |
| DIO26 | DIO9 | DIO9 | DIO8 | 4 |
| DIO25 | DIO10 | DIO10 | DIO7 | 5 |
| DIO24 | DIO8 | DIO8 | DIO6 | 6 |
| DIO23 | DIO7 | DIO7 | DIO5 | 7 |
| DIO7 | DIO4 | DIO4 | DIO2 | 8 |
| DIO6 | DIO3 | DIO3 | DIO1 | 9 |
| DIO5 | DIO2 | DIO2 | DIO0 | 10 |
| DIO4 | DIO1 | DIO1 | | 11 |
| DIO3 | DIO0 | DIO0 | | 12 |
| DIO2 | | | | 13 |
| DIO1 | | | | 14 |
| DIO0 | | | | 15 |

3.4 JTAG 引脚

可通过专用 cJTAG (IEEE 1149.7) 或 JTAG (IEEE 1149.1) 接口提供片上调试支持。上电后，仅使用 TCK 和 TMS I/O 焊盘的 2 引脚 cJTAG 模式是默认配置。4 引脚 JTAG 使用 TCK、TMS、TDI 和 TDO。

表 3-7. CC26x0/CC13x0 和 CC26x2/CC13x2 JTAG 引脚

| 信号 | 7 × 7 QFN (RGZ) | 5 × 5 QFN (RHB) | WCSP (YFV) | 4 × 4 QFN (RSM) |
|-----|-----------------|-----------------|------------|-----------------|
| TCK | 引脚 25 | 引脚 14 | 引脚 F2 | 引脚 14 |
| TMS | 引脚 24 | 引脚 13 | 引脚 E4 | 引脚 13 |
| TDI | DIO17 | DIO6 | DIO6 | DIO4 |
| TDO | DIO16 | DIO5 | DIO5 | DIO3 |

4 PCB 布局

4.1 电路板堆叠

参考设计压缩文件中介绍了电路板堆叠 (请参阅 [Design_Name_mechanical.pdf](#)) 。最重要的是从顶层到底层的距离。偏离建议的电路板堆叠将改变寄生效应，在某些情况下这可能导致需要重新设计滤波器平衡-非平衡变压器才能获得最佳性能。

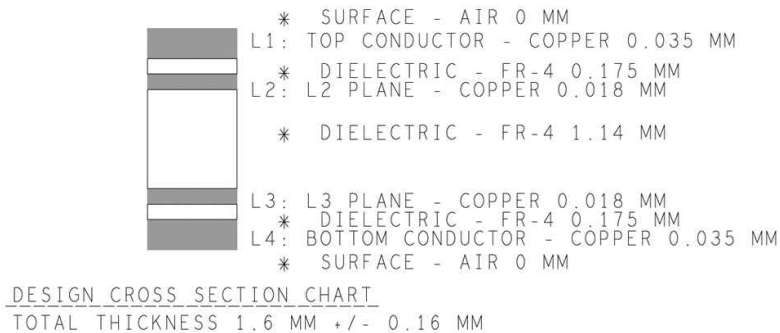


图 4-1. CC1312R 电路板堆叠

4.2 平衡-非平衡变压器

需要注意的一点是，平衡-非平衡变压器应尽可能与射频端口保持对称。因此，从单端端口到每个射频引脚的布线长度应相等，从而在平衡-非平衡变压器中实现最佳的振幅和相位平衡。有关良好的平衡-非平衡变压器 PCB 布局，请参阅图 4-2。平衡-非平衡变压器出现不平衡会导致谐波电平更高，尤其是在二次和四次谐波下。非对称平衡-非平衡变压器的另一个影响是平衡-非平衡变压器单端的输出功率降低。元件值和元件放置方式对于在平衡-非平衡变压器中实现可能最佳的对称性都很重要。振幅不平衡最大应为 1.5dB，相位不平衡最大应为 10°。

为确保获得适当的性能，重要的是实现与参考设计相同的平衡-非平衡变压器、匹配和滤波器布局。更改这些器件的位置可能需要调优元件值以获得所需的性能。调谐需要高级射频技能和适当的设备。

在所有射频元件的下面必须有一个不间断的实心接地层，从天线一直延伸到芯片外露接地垫 (EGP) 中的接地过孔。射频路径下不得有任何布线。

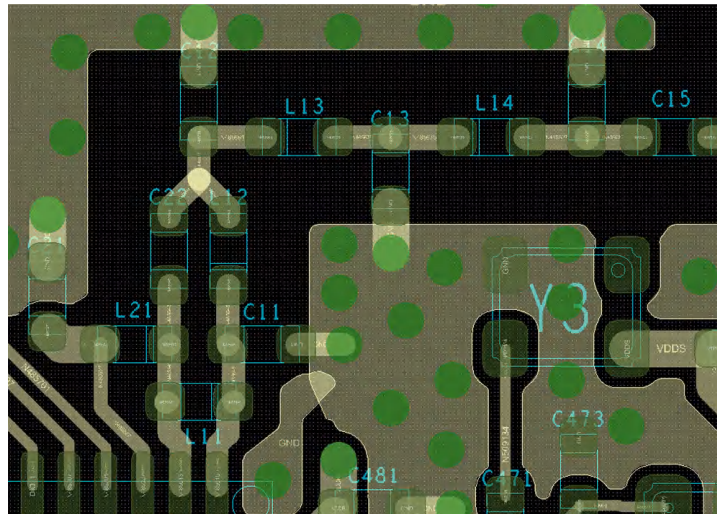


图 4-2. CC1312R 平衡-非平衡变压器和 LC 滤波器 PCB 布局

4.3 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 4-3 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。图 4-2 中 C12、L13、C13、L14 和 C14 的位置体现了良好的设计实践。

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），则很可能必须重新调整滤波器平衡-非平衡变压器。使用电磁仿真器对 TI 参考设计和定制设计进行仿真。两款设计应具有相同的 S21/S22。

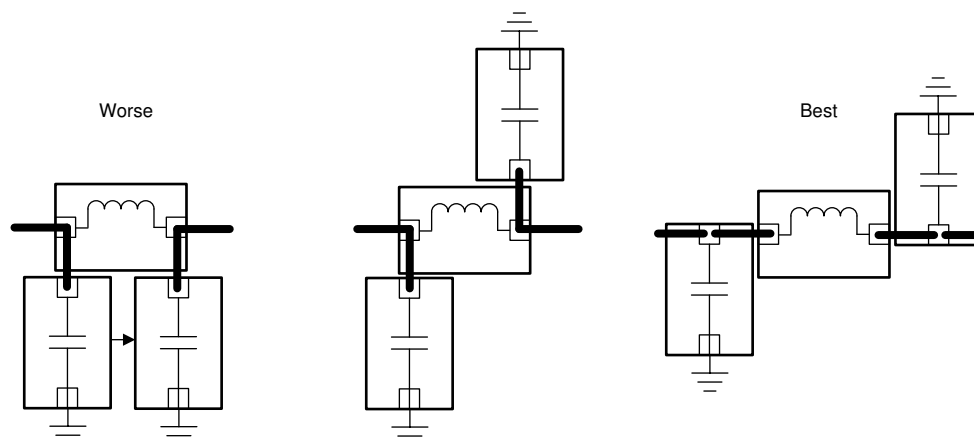


图 4-3. LC 滤波器 PCB 布局设计指南

4.4 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
- 每个去耦电容器应有一个单独的通孔接地，以尽可能降低噪声耦合（请参阅图 4-4）
- 去耦电容器应靠近要通过它进行去耦的引脚放置（请参阅图 3-2）
- 去耦电容器和芯片之间的接地电流返回路径应短且直接（低阻抗）。相关详细信息，请参阅节 4.6。

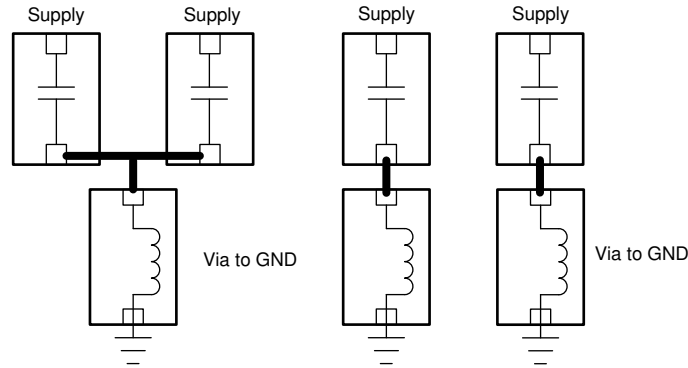


图 4-4. 去耦电容器和通孔接地

右边的图形使用单独的通孔进行接地，噪声耦合较小。

4.5 晶体负载电容器的放置

主振荡环路电流正在晶振和负载电容器间流动。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，两个电容器的接地接头应始终尽可能靠近。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。

4.6 电流返回路径

电容器接地垫和芯片之间应该有一个实心接地层。图 4-5 说明了这一点。如果不遵循这一点，可能会导致射频性能降低和杂散发射升高。

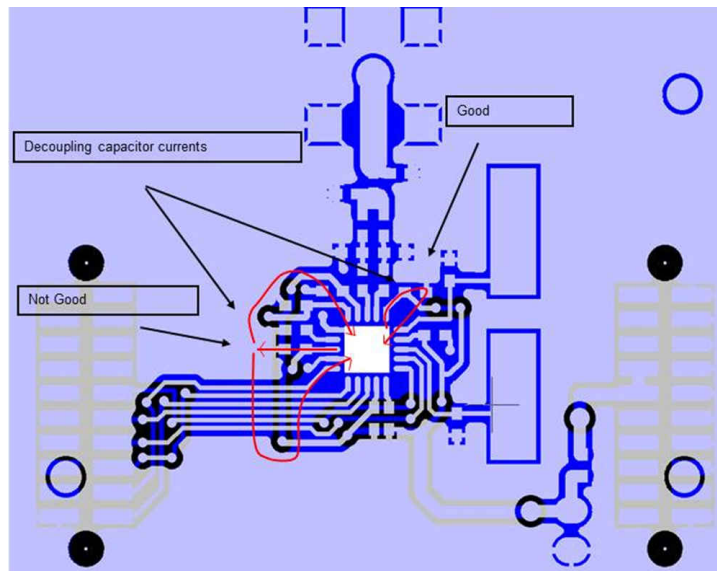


图 4-5. 电流返回路径

4.7 直流/直流稳压器

直流/直流元件必须放置在靠近 DCDC_SW 引脚的位置。位于直流/直流稳压器输出 (DCDC_SW 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, 如图 4-6 中的 C331 所示。

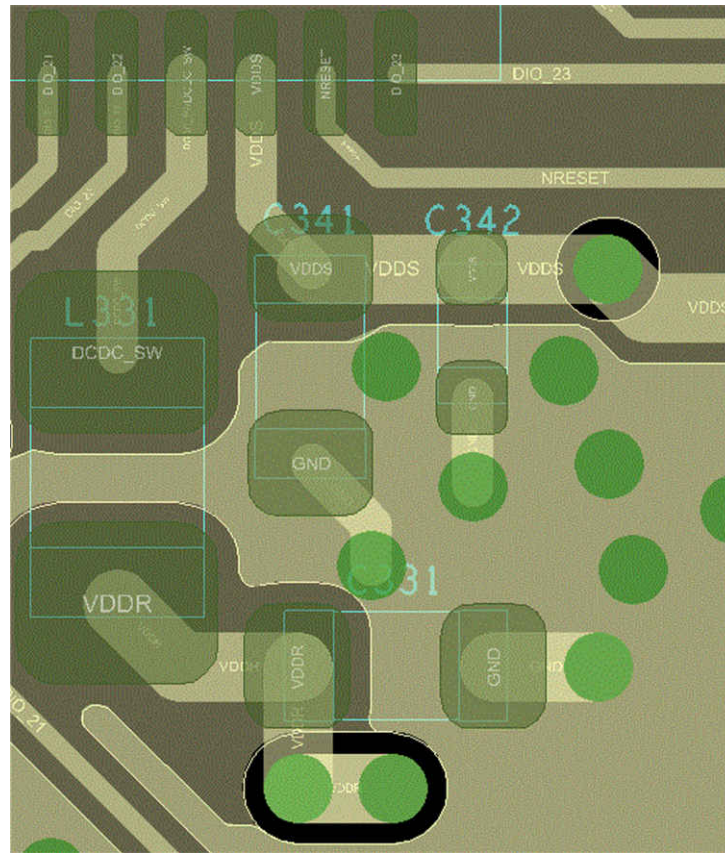


图 4-6. CC1312R 直流/直流稳压器 PCB 布局

4.8 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。

4.9 传输线路

平衡-非平衡变压器和 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) 应具有 $50\ \Omega$ 的阻抗。TXLine 是一款免费的 PCB 布线阻抗计算工具: [TXLine 传输线路计算器](#)。

4.10 电磁仿真

如果设计未遵循参考设计 (例如, 滤波器平衡-非平衡变压器元件位置或元件尺寸不同), 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平衡-非平衡变压器元件值。

5 天线

5.1 单频带天线

TI 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](#) 和全面的 [天线选型指南](#)。除了这些文档之外，TI 的 eStore 中还提供了 [CC-Antenna-DK2](#) 和 [天线测量汇总](#) 和全部文档。可以从 [天线选型快速指南](#) 访问 TI 的所有天线文档，因为该文档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。

始终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/元件中的两个。天线的阻抗将决定是使用封装元件 ANT1 还是 ANT3。将始终使用 ANT2，即使天线完全匹配，也可以将其设置为 0Ω 电阻器。

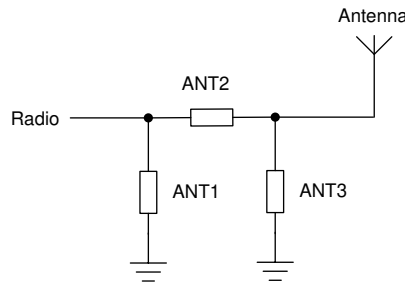


图 5-1. 建议用于单频带天线的天线 π 型网络

5.2 双频带天线

双频带操作的引入结合了低功耗蓝牙的优势以及 Sub-1GHz 的远距离优势，可满足双频带天线的需求。可以对每个频带使用单独的天线，但在大多数提倡使用双频带天线的手持设备上，物理空间通常受到限制。极为常用的双频带配置如下所示：

- 863-928MHz 和 2.4GHz
- 433-450MHz 和 2.4GHz
- 470-510MHz 和 2.4GHz

对于包含低频带和高频带的双频带操作，不建议使用图 5-1 中所示的天线 π 型匹配。建议改用 LC、CL 匹配网络，如图 5-2 所示。LC 部分用于匹配高频带，而 CL 部分用于匹配低频带。因此，为了识别元件，LC 部分将表示为 L_{HIGH} C_{HIGH} ，而 CL 部分将表示为 C_{LOW} L_{LOW} 。

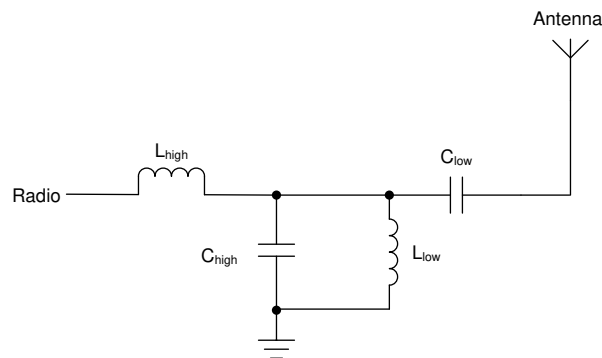


图 5-2. 建议用于双频带天线的天线匹配网络

5.2.1 双频带天线匹配示例：863-928MHz 和 2.4GHz

本示例基于 LaunchPad-CC1352P1。

- 组装 L_{HIGH} : 0Ω 和 C_{LOW} : 0Ω ; C_{HIGH} : NC 和 L_{LOW} : NC
- 使用网络分析器 (VNA) 在低频带 (868MHz) 和高频带 (2440MHz) 测量初始阻抗
 - 868MHz : $54 + j30$, VSWR : 1.78:1

- 2.44GHz : $14 - j32$, VSWR : 5.05:1 (这在本阶段并非必需的，但出于文档编制的目的而记录，以显示增量值)。
- 仅将低频带匹配 C_{LOW} 和 L_{LOW} 元件
 - C_{LOW} : 5.6pF 和 L_{LOW} : NC ; 请参阅图 5-3

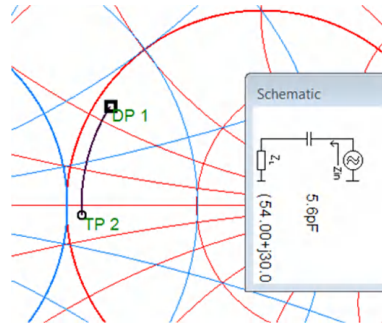


图 5-3. 将低频带匹配 C_{LOW} : 5.6pF 和 L_{LOW} : NC

- 通过再次测量阻抗，确认低频带是匹配的：
 - 868MHz : $42 + j2$, VSWR : 1.18:1。在低频带匹配良好
 - 2.44GHz : $16 + j34$, VSWR : 5.38:1
- 仅将高频带匹配 C_{HIGH} 和 L_{HIGH} 元件
 - L_{HIGH} : 2.2nH 和 C_{HIGH} : NC ; 请参阅图 5-4

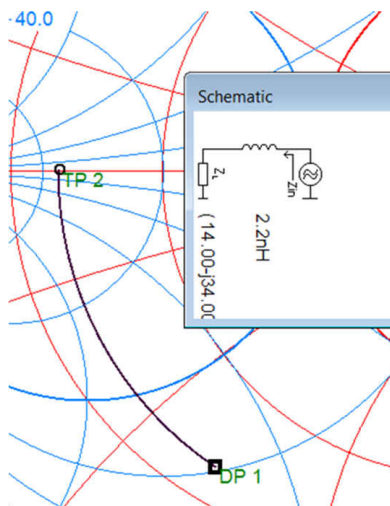


图 5-4. 将高频带匹配 L_{HIGH} : 2.2nH 和 C_{HIGH} : NC 理想值

- L_{HIGH} : 2.2nH 在测量时不够大, 改为 3.3nH。天线匹配元件基于无寄生效应的理想元件。由于史密斯图中的阻抗位置, 无法使用 C_{HIGH} 元件, 因此匹配不理想。
- 使用网络分析器 (VNA) 在低频带 (868MHz) 和高频带 (2440MHz) 测量最终阻抗,
 - 868MHz : $37 + j8$, VSWR : 1.36:1 在低频带匹配良好
 - 2.44GHz : $16 + j8$, VSWR : 3.18:1 在高频带匹配合理, 但优先使用 VSWR < 2.00:1 ; 请参阅图 5-5 和图 5-6。

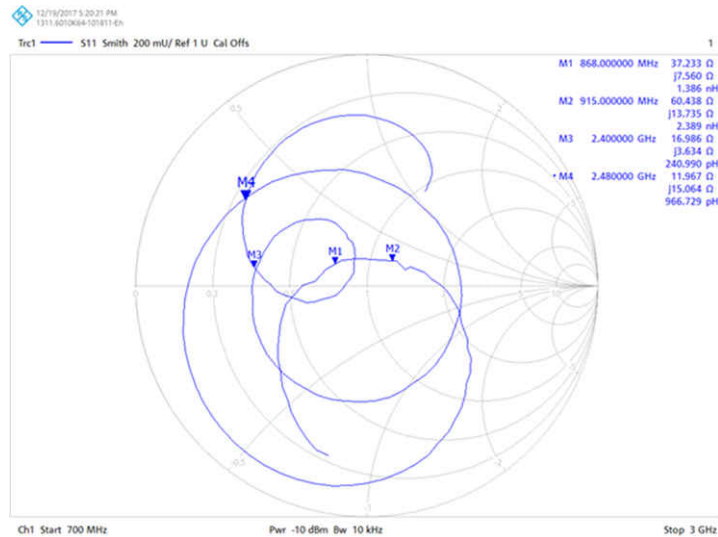


图 5-5. 最终匹配值为 L_{HIGH} : 3.3nH 和 C_{LOW} : 5.6pF 的史密斯图

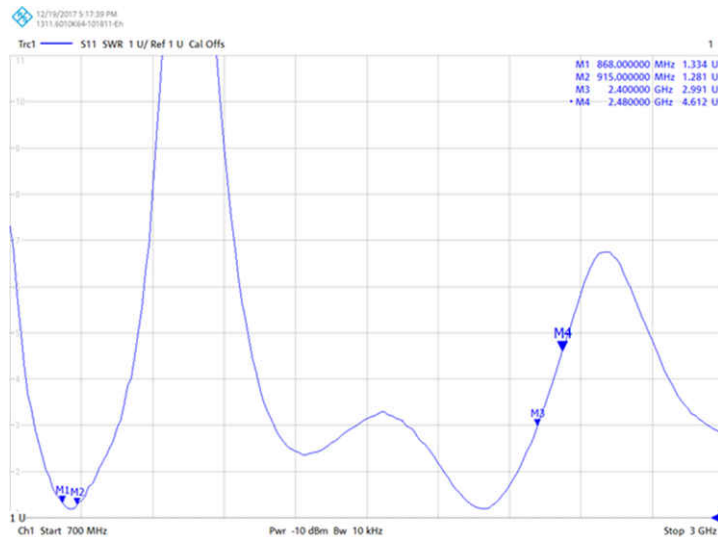


图 5-6. 最终匹配值为 L_{HIGH} : 3.3nH 和 C_{LOW} : 5.6pF 的 VSWR 图

- 通过匹配元件, 天线匹配实现如下改进:
 - 868MHz : VSWR : 1.78:1 - > 1.36:1
 - 2.44GHz : VSWR : 5.05:1 - > 3.18:1

上面显示的示例使用了 868MHz 的低频带。因为要同时涵盖 ETSI 频带 (863-870MHz) 和 FCC 频带 (902-928MHz), LaunchPad-CC1352P-1 需要在完整的 863 - 928MHz 频带内良好运行。在没有匹配元件的情况下, CC1352P1 上的天线长度具有大概 900MHz 的自然谐振。

如果 2.44GHz 下的性能比同时支持 868MHz 和 915MHz ISM 频带更为重要，则可以增加天线的长度，以使自然谐振约为 813MHz (2440MHz/3)。这将在 868MHz 和 2.4GHz 下提供非常好的性能，但 915MHz 频带将受到影响。双频带的常见天线匹配是高频带与低频带之间性能的折衷。

5.2.2 双频带天线匹配：433-510MHz 和 2.4GHz

该天线设计基于 LaunchPad-CC1352P-4 (采用“433MHz 至 930MHz 和 2.4GHz BOM 可调 PCB 天线”)。应用手册 [swra730](#) 中完整介绍了这种 BOM 可调天线。

为了涵盖 433 - 510MHz 频带，在通常用于 863-928MHz 和 2.4GHz 的天线结构中添加了一个外部元件 (LANT)。这是保持天线相对较小和维持高效率所必需的。LANT 元件增加了额外的电感，延长了天线结构的长度。由于带宽较宽，仅用一个 BOM 很难涵盖整个 433 - 510MHz 频带，因此会将频率范围划分为几个区域。还添加了一个额外的天线结构，该结构也导致标准天线的长度延长，请参阅图 5-7。

适用于 433-510MHz 操作的 L_{ANT} 元件的值：

- 51nH : 433MHz
- 39nH : 470MHz
- 33nH : 490MHz

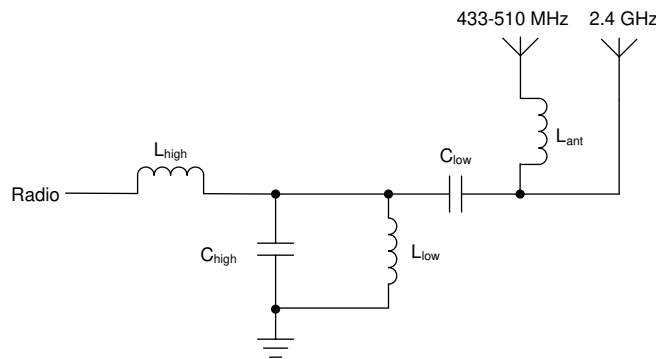


图 5-7. 建议用于双频带天线的天线匹配网络 (433-510MHz 和 2.4GHz)

一旦选择了 LANT 元件，则匹配过程与上一个示例中所示类似。在天线匹配过程之后，可以确定天线匹配元件的最终值。如图 5-8 所示，490MHz 和 2.4GHz 的匹配均低于 VSWR 1.90:1，这是很好的结果。

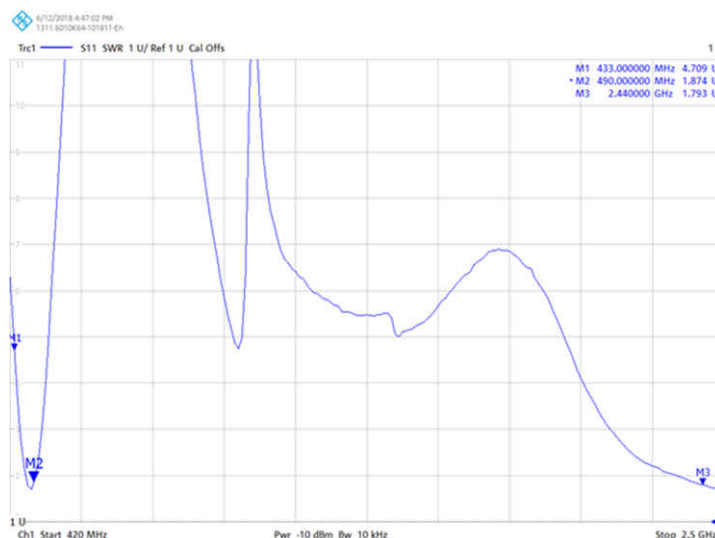


图 5-8. 带有以下最终匹配值的 VSWR 图： L_{ANT} : 33nH L_{HIGH} : 3.9nH 和 C_{LOW} : 0 Ω

匹配天线的操作应在产品的最终外壳中进行，包括所有周围元件，如电池、显示器等。即使选择的材料是塑料，外壳也会影响天线的谐振。天线的位置或人体效应也会影响天线的谐振。天线始终会因频率下降而失谐。因此，

如果天线有两种不同的环境（例如木制桌子上的手持天线和独立天线），则让独立谐振稍高一些则更好，这样，在人体效应/金属物体等导致失谐时可以利用天线的带宽。

6 晶体调谐

6.1 CC13xx/CC26xx 晶体振荡器

CC13xx/CC26xx 器件具有两个晶体振荡器，如图 6-1 所示。高频晶体振荡器 (HFXOSC) 在 CC13x0/CC26x0 和 CC13x2/CC26x2 上分别以 24MHz 和 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 (LFXOSC) 用于 RTC 计时，仅在需要进行精确的 RTC 计时的情况下才使用（例如用于低功耗蓝牙等同步协议时）。

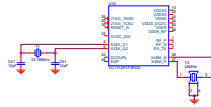


图 6-1. 带有 32kHz 和 48MHz 晶体的 CC1312R

这两种晶体振荡器都是皮尔斯型振荡器，如图 6-2 所示。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。

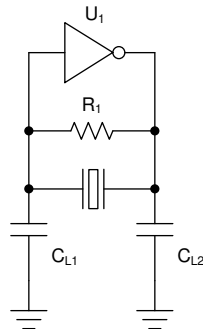


图 6-2. 皮尔斯型振荡器

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，在大多数情况下不需要外部负载电容器。有关何时需要使用外部电容器而非内部可变负载电容的详细信息，请参阅节 3.1.1。另一方面，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，务必查看器件特定的 CC13xx/CC26xx 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。

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，这意味着必须使用用于计算最终总电容的“电阻器并联”方程。还要注意 PCB 迹线和焊盘会增加一些寄生电容。可以通过方程式 2 来计算正确的负载电容值。

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

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 引脚上输出时钟信号。这样，可以使用频率计数器来测量频率，而不会影响振荡器。以下 Driverlib 调用将在除关断之外的所有电源状态下输出选定的 32kHz 时钟源：

```
#include <driverlib/aon_ioc.h>
IOCPortConfigureSet(IOCIDn, IOC_PORT_AON_CLK32K, IOC_STD_OUTPUT);
AONIOC32kHzOutputEnable();
```

6.4 对 HF 振荡器进行调谐

HF 振荡器在 IC 中内置了可变负载电容器（电容器阵列），不需要安装外部电容器，但也存在一些例外情况。有关何时需要使用外部电容器（而非内部电容器阵列）的详细信息，请参阅节 3.1.1。

可通过以下定义在 CCFG.c 中设置负载电容：

```
#ifndef SET_CCFG_MODE_CONF_XOSC_CAP_MOD
// #define SET_CCFG_MODE_CONF_XOSC_CAP_MOD 0x0 // Apply cap-array delta
#define SET_CCFG_MODE_CONF_XOSC_CAP_MOD 0x1 // Don't apply cap-array delta
#endif
#ifndef SET_CCFG_MODE_CONF_XOSC_CAPARRAY_DELTA
// #define SET_CCFG_MODE_CONF_XOSC_CAPARRAY_DELTA 0xFF // Signed 8-bit value, directly
// modifying trimmed XOSC cap-array value
#endif
```

SET_CCFG_MODE_CONF_XOSC_CAP_MOD 定义告诉系统它应该使用默认值还是使用由 SET_CCFG_MODE_CONF_XOSC_CAPARRAY_DELTA 设置的相对于默认值的偏移量。默认电容器阵列值对于 CC13x0/CC26x0 QFN 为 9pF，对于 CC2640R2F WCSP 为 5pF，对于 CC13x2/CC26x2 为 6.7pF。

电容器阵列增量值是相对于默认值的偏移量，可以是负数，也可以是正数。表 6-1 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。使用等于或低于表中最低负值的增量值将内部负载电容器阵列完全禁用。

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 中调整电容器阵列增量值。这样就可以动态更新负载电容，从而大幅简化调谐过程。然后将 SmartRF Studio 中的最佳值输入到适用软件工程的 CCFG 中。

表 6-1. 电容器阵列增量

| 参考板上测得的电容 | CC13x0/CC26x0 QFN 的 CCFG 增量值 | CC2640R2F WCSP 的 CCFG 增量值 | CC13x2/CC26x2 QFN 的 CCFG 增量值 |
|-----------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 2,1 | < -55 | < -28 | < -40 |
| 2,1 | -55 | -28 | -40 |
| 2,2 | -54 | -27 | -39 |
| 2, 3 | -53 | -26 | -38 |
| 2,4 | -52 | -25 | -37 |
| 2,5 | -51 | -24 | -36 |
| 2,6 | -50 | -23 | -35 |
| 2,7 | -49 | -22 | -34 |
| 2,7 | -48 | -21 | -33 |
| 2,8 | -47 | -20 | -32 |
| 2,9 | -46 | -19 | -31 |
| 3,0 | -45 | -18 | -30 |
| 3,1 | -44 | -17 | -29 |
| 3,2 | -43 | -16 | -28 |
| 3,3 | -42 | -15 | -27 |
| 3, 4 | -41 | -14 | -26 |
| 3, 4 | -40 | -13 | -25 |
| 3,6 | -38 | -12 | -24 |

表 6-1. 电容器阵列增量 (continued)

| 参考板上测得的电容 | CC13x0/CC26x0 QFN 的 CCFG 增量值 | CC2640R2F WCSP 的 CCFG 增量值 | CC13x2/CC26x2 QFN 的 CCFG 增量值 |
|-----------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 3,7 | -37 | -11 | -23 |
| 3,8 | -36 | -10 | -22 |
| 3,9 | -35 | -9 | -21 |
| 4,0 | -34 | -8 | -20 |
| 4,1 | -33 | -7 | -19 |
| 4,3 | -32 | -6 | -18 |
| 4,4 | -31 | -5 | -17 |
| 4,5 | -30 | -4 | -16 |
| 4,6 | -29 | -3 | -15 |
| 4,7 | -28 | -2 | -14 |
| 4,8 | -27 | -1 | -13 |
| 5,0 | -26 | 0 | -12 |
| 5,1 | -25 | 1 | -11 |
| 5,2 | -24 | 2 | -10 |
| 5,3 | -23 | 3 | -9 |
| 5,5 | -21 | 4 | -8 |
| 5,6 | -20 | 5 | -7 |
| 5,8 | -19 | 6 | -6 |
| 5,9 | -18 | 7 | -5 |
| 6,1 | -17 | 8 | -4 |
| 6,2 | -16 | 9 | -3 |
| 6,4 | -15 | 10 | -2 |
| 6,5 | -14 | 11 | -1 |
| 6,7 | -13 | 12 | 0 |
| 6,8 | -12 | 13 | 1 |
| 7,0 | -11 | 14 | 2 |
| 7,1 | -10 | 15 | 3 |
| 7,3 | -9 | 16 | 4 |
| 7,4 | -8 | 17 | 5 |
| 7,6 | -7 | 18 | 6 |
| 7,7 | -6 | 19 | 7 |
| 7,9 | -5 | 21 | 8 |
| 8,2 | -4 | 22 | 9 |
| 8,4 | -3 | 23 | 10 |
| 8,6 | -2 | 24 | 11 |
| 8,8 | -1 | 25 | 12 |
| 9,0 | 0 | 26 | 13 |
| 9,2 | 1 | 27 | 14 |
| 9,4 | 2 | 28 | 15 |
| 9,6 | 3 | 29 | 16 |
| 9,8 | 4 | 30 | 17 |
| 10, 1 | 5 | 31 | 18 |
| 10,3 | 6 | 32 | 19 |
| 10,5 | 7 | 33 | 20 |
| 10,7 | 8 | 34 | 21 |
| 10,9 | 9 | 35 | 22 |

表 6-1. 电容器阵列增量 (continued)

| 参考板上测得的电容 | CC13x0/CC26x0 QFN 的 CCFG 增量值 | CC2640R2F WCSP 的 CCFG 增量值 | CC13x2/CC26x2 QFN 的 CCFG 增量值 |
|-----------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 11,1 | 10 | 36 | 23 |
| 11,1 | > 10 | > 36 | > 23 |

7 TCXO 支持

CC13x0 和 CC26x0 不支持 TCXO 作为时钟源。CC13x2 系列器件支持 TCXO。支持两种类型的 TCXO：削波正弦波和 CMOS 输出。TCXO 输出端应连接到 X48M_P 输入端。如果使用削波正弦波类型，则需要使用串联电容器，因为在这种情况下会使用内部共模偏置。应检查所选 TCXO 的数据表中是否存在串联电容器的建议值。

7.1 硬件

相关参考设计，请参阅 [CC1312R Launchpad](#) 的设计文件。TCXO 必须符合数据表中的要求。注意最大输出电压。

7.2 软件

必须使用 SDK 版本 4.10 或更高版本。在 syscfg 中启用 TCXO。在“TI Devices” → “Device Configuration”下，选择“External 48MHz TCXO”作为 HF 时钟源。选择 TCXO 作为源后，选择 TCXO 类型和“TCXO Max Startup Time”。务必注意正确设置该时间。如果设置的时间过短，则芯片可能会在稳定之前尝试切换到 TCXO，这又可能导致芯片出现故障。

使用 TCXO 时，必须减小内部负载电容器以避免加载 TCXO。所需的设置将取决于所选的 TCXO。关闭电容器阵列会导致某些 TCXO 的输出摆幅过大。在这些情况下，电容器阵列中的电容器将有助于降低电压摆幅。应正确设置电容器阵列的值，从而使 X48M_P 上的摆幅（最小和最大摆幅）处于 CC13x2 数据表中设置的值的范围内。进行测量时必须小心，以确保测量不会增加该节点的负载，否则会影响测量结果。

在 syscfg 中转到“TI Devices” → “Device Configuration”并选中“Enable XOSC Cap array modification”旁边的框，然后设置所需的值。

电源驱动程序包含一个必须添加到代码中的函数挂钩 PowerCC26X2_Config.enableTCXOFxn。如果未定义该函数，那么代码会进行编译，但在系统请求打开无线电时会挂起。利用函数挂钩可以通过 DIO 为 TCXO 供电，在 CC13x2 处于待机状态时关闭 TCXO，并且能够及时地再次将其打开以进行射频操作。

以下代码片段显示了当 TCXO 由 DIO 供电时的函数：

```
void Power_enableTCXO(bool turnOn)
{
    if ( turnOn ) {
        // Set corresponding DIO high to enable the TCXO
        GPIO_write(GPIO_TCXO_PIN, 1);
    }
    else {
        // Set the corresponding DIO low to disable the TCXO
        GPIO_write(GPIO_TCXO_PIN, 0);
    }
}
```

SmartRF Studio 2.17 或更早版本不支持 TCXO。

7.3 示例：在 CC1312R Launchpad 上使用 TCXO

CC1312R Launchpad 上安装了一个 TCXO，但默认情况下使用晶体。若要选择 TCXO，必须在电路板上进行以下改动：

- 卸下 R5 和 R6
- 为 R7 和 R8 安装 0Ω 电阻器。

在 syscfg 中：

1. 转到“TI Devices” → “Device configuration”。
2. 设置以下各项：
 - a. 启用 XOSC Cap 阵列修改：勾选以启用
 - b. XOSC Cap 阵列增量：0xE7
 - c. HF 时钟源：外部 48MHz TCXO
 - d. TCXO 类型：削波正弦型
 - e. TCXO 最大启动时间：0x14

8 集成无源器件 (IPC)

集成无源器件 (IPC) 是一种匹配的滤波器平衡-非平衡变压器元件，专用于射频应用或与其匹配。IPC 减少了元件数量，从而节省了空间并降低了贴片组装成本。此外，由于最大限度地减少了射频串扰，IPC 射频布局不良的风险也降低了。表 8-1 列出了可用的 IPC。

表 8-1. 可用的 IPC

| 芯片系列 | 频率 (MHz) | 供应商 | 器件型号 | 应用报告 |
|---|----------|---------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| CC1101、CC1111、 CC1110、CC110L、 CC113L、CC115L、 CC430 | 430-435 | Johanson Technology | 0433BM15A0001 | SWRA520 |
| CC1101、CC1111、 CC1110、CC110L、 CC113L、CC115L、 CC430 | 430-435 | Johanson Technology | 0433BM15A0001E-AEC*1 | SWRA520 |
| CC1101、CC1111、 CC1110、CC110L、 CC113L、CC115L、 CC430 | 863-873 | Johanson Technology | 0868BM15C0001 | SWRA520 |
| CC1101、CC1111、 CC1110、CC110L、 CC113L、CC115L、 CC430 | 863-873 | Johanson Technology | 0868BM15C0001E-AEC*1 | SWRA520 |
| CC1101、CC1111、 CC1110、CC110L、 CC113L、CC115L、 CC430 | 863-928 | Johanson Technology | 0896BM15A0001 | SWRA520 |

表 8-1. 可用的 IPC (continued)

| 芯片系列 | 频率 (MHz) | 供应商 | 器件型号 | 应用报告 |
|---|------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| CC1120、CC1121、 CC1175、CC1200、 CC1201 | 863-928 | Johanson Technology | 0900PC15J0013 | SWRA407 |
| CC1101、CC1111、 CC1110、CC110L、 CC113L、CC115L、 CC430 | 902-928 | Johanson Technology | 0915BM15A0001 | SWRA297 |
| CC1101、CC1111、 CC1110、CC110L、 CC113L、CC115L、 CC430 | 902-928 | Johanson Technology | 0915BM15A0001E-AEC*1 | SWRA297 |
| CC13xx | 430-510 | Walsin (华新科技) | RFBLN2520090YC3T10 | SWRA524 |
| CC13xx | 770-928 | Murata (村田) | LFB18868MBG9E212 | SWRA524 |
| CC13xx | 770-928 | Johanson Technology | 0850BM14E0016 | SWRA524 |
| CC1352R、CC1352P | 863 - 928 2400-2480 | Murata (村田) | LFB21868MDZ5E757 | SWRA629 |
| CC1352R、CC1352P | 430-435 , 2400-2480 | Murata (村田) | LFB21433MDZ6F112 | SWRA629 |
| CC1352R、CC1352P | 863 - 928 2400-2480 | Johanson Technology | 0900PC15A0036 | SWRA629 |
| CC2420 | 2400-2480 | Anaren (安伦) | BD2425N50200A00 | SWRA155 |
| CC2430 | 2400-2480 | Anaren (安伦) | BD2425N50200A00 | SWRA156 |
| CC2430、CC2480 | 2400-2480 | Johanson Technology | 2450BM15A0001 | |
| CC2520 | 2400-2480 | Johanson Technology | 2450BM15B0002 | |
| CC2500、CC2510 | 2400-2480 | Johanson Technology | 2450BM15B0003 | |
| CC1352R、CC1352P、 CC2620、CC2630、 CC2640、CC2650 | 2400-2480 | Murata (村田) | LFB182G45BG5D920 | |
| CC1352R、CC1352P、 CC2620、CC2630、 CC2640、CC2650 | 2400-2480 | Johanson Technology | 2450BM14G0011 | SWRA572 |
| CC1352R、CC1352P、 CC2620、CC2630、 CC2640、CC2650 | 2400-2480 | Johanson Technology | | |
| CC13xP、CC26xP 对于 HPA 端口, 仅限 TX。 | 2400-2480 | Murata (村田) | LFB182G45BGEF296 | SWRA729 |

9 最佳负载阻抗

CC13xx/CC26xx 支持多种前端配置, 包括具有内部或外部偏置的差分 and 单端操作。节 2 更详细地介绍了不同的射频前端配置。TI 为 CC13xx/CC26xx 提供了多种参考设计, 其中包含针对不同射频前端配置的建议。请注意, 不同参考设计的不同射频前端配置不遵循封装尺寸 (7x7mm、5x5mm 和 4x4mm), 并可以根据需要混合使用。

CC13xx/CC26xx 阻抗随芯片状态 (TX/RX) 和输出/输入信号电平的变化而变化。在接收状态下运行时, LNA 增益根据输入信号电平进行调整, 因此并非恒定的。这会使 LNA 针对不同的增益设置以不同的配置运行。PA 阻抗与接收阻抗有更多的不同。PA 阻抗随配置的输出功率级别而变化, 并且不是线性的。术语输出阻抗用于线性放大器或可以近似表示为线性等效器件的放大器。输出阻抗通常用于设计放大器和负载之间的复数共轭阻抗匹配。对于线性放大器, 这足以确保实现最佳功率传输。因此, 该方法对 CC13xx/CC26xx 系列无效。

CC13xx/CC26xx 的运行在很大程度上取决于滤波器平衡-非平衡变压器的阻抗, 对于 Sub-1GHz, 至少达到四次谐波, 对于 2.4GHz, 至少达到三次谐波。仅在基频上匹配负载阻抗很容易导致高电流消耗、低输出功率和高杂散/谐波。

为了通过 CC13xx/CC26xx 设计获得最佳性能，强烈建议遵循参考设计（原理图、布局和堆叠）。TI 通过整个工作范围内的仿真以及负载和源端牵引测量，找到了建议的平衡-非平衡变压器和匹配电路。射频电路旨在提供理想的整体 TX 和 RX 性能（输出功率、灵敏度、电流消耗以及谐波和杂散发射）。

请注意，根据数据表分析和参考设计原理图计算出的阻抗通常会偏离 TI 给出的最佳负载阻抗。PCB 寄生效应和元件缺陷通常是造成这些差异的原因。在高频下工作时，必须对 PCB 迹线进行建模，以便考虑相移、趋肤效应、电感和电容的影响。无源器件制造商通常会提供线性 LCR 模型和/或 S 参数模型来表示处于较高频率下的元件。请注意检查这些模型的有效频率范围，并且仅在该范围内使用这些模型。仿真器经常在没有警告的情况下推断模型数据，此时仿真结果是无效的。请记住，有效频率范围覆盖电路中的最高有效频率分量。

有些设计无法按原样使用参考设计（例如使用不同的元件尺寸）。在这种情况下，建议在 ADS 中同时对 TI 参考设计和客户设计进行仿真。两个设计应具有相同的 S21/S22。

CC26xx

- 差分外部偏置目标负载阻抗： $45 + j43\Omega$
- 差分内部偏置目标负载阻抗： $42 + j21\Omega$
- 单端内部偏置目标负载阻抗： $38 + j5\Omega$

CC1310、CC1312

- 863-928MHz
 - 868MHz 目标负载阻抗： $40 + j15\Omega$
- 2440MHz 目标负载阻抗： $25 - j10\Omega$

CC1352R、CC1352P

- 863-928MHz
 - 898MHz Tx/Rx 目标负载阻抗： $37 - j8\Omega$
 - 仅限 898MHz Rx 的优化目标负载阻抗： $47 + j1\Omega$
- 2450MHz 目标负载阻抗： $33 + j11\Omega$
- 2440MHz 高功率 PA 目标负载阻抗：
 - 基波负载阻抗： $26 + j25\Omega$
 - 二次谐波阻抗： $4 + j15\Omega$
 - 二次谐波衰减：45dB（最小值）
 - 三次谐波阻抗： $406 - j19\Omega$
 - 三次谐波衰减：60dB（最小值）
- 863-928MHz 高功率 PA 目标负载阻抗：
 - 基波负载阻抗： $92 + j84\Omega$
 - 二次谐波阻抗： $8 - j77\Omega$
 - 二次谐波衰减：45dB（最小值）
 - 三次谐波阻抗： $3 + j37\Omega$
 - 三次谐波衰减：60dB（最小值）

10 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，因此输出功率将取决于晶体管增益，这将导致较大的器件间差异。对于 SmartRF Studio 提供的 PA 表未涵盖的输出功率，无法找到使器件间差异小或在整个温度范围内输出功率稳定的 txPower 设置。

如果需要，客户可以生成自定义 PA 表。作为温度的函数，FEM 的输出功率通常不会保持恒定；在使用 FEM 时，可以找到一个能够在整个温度范围内提供更恒定输出功率的 txPower 值。

参数 txPower 包含温度系数设置、增益设置、IB 设置和 TX BOOST 位：

- txPower[15:9]：温度系数
- txPower[8]：TX BOOST 位
- txPower[7:6]：增益
- txPower[5:0]：IB

通过应用温度系数，可以根据 AON_BATMON_TEMP 的温度读数自动补偿 IB 设置。

提供三种不同的增益设置，对于每种增益设置，可以在 0x0 至 0x3F 的范围内调整 IB，从而为 TX 输出功率提供 192 (64*3) 种可用的设置。除了要求的增益和 IB 设置之外，还以输入的形式提供温度系数。根据温度传感器的读数和温度系数设置来调整 IB。根据方程式 3 来调整 IB。

$$Ib = Ib_{\text{requested}} + \frac{(\text{Temperature} - 25^\circ) \cdot \text{temcoeff}}{256} \quad (3)$$

应通过以下方法生成自定义 TX 功率表（从而针对某个 Tx 参数值，在整个温度范围内获得恒定的 Tx 功率）：

1. 室温设置：调整增益和 IB 设置，从而在室温下获得禁用温度补偿时所需的输出功率级别。该设置将为 Ib_requested。
2. 低温设置：使用相同的增益设置并调整 IB 设置，从而在低温下获得与步骤 1 最接近的输出功率级别。该设置将为 Ib_low_temp。
3. 高温设置：使用相同的增益设置并调整 IB 设置，从而在高温下获得与步骤 1 最接近的输出功率级别。该设置将为 Ib_high_temp。
4. 计算温度系数。使用低温和高温测量中的 IB 设置来计算温度系数。温度系数基于两个极端温度之间的线性近似值，并可使用方程式 4 进行计算。

$$\text{temp_coeff} = 256 \cdot \frac{(Ib_{\text{high_temp}} - Ib_{\text{low_temp}})}{\text{high_temp} - \text{low_temp}} \quad (4)$$

$$Ib = Ib_{\text{requested}} + \frac{(\text{Temperature} - 25 \text{ deg}) \cdot \text{temcoeff}}{256} \quad (5)$$

$$\text{temp_coeff} = 256 \cdot \frac{(Ib_{\text{high_temp}} - Ib_{\text{low_temp}})}{\text{high_temp} - \text{low_temp}} \quad (6)$$

5. 针对所需的所有功率级别，重复执行步骤 1-3。

11 电源配置

11.1 引言

CC13xx/CC26xx 器件具有三个暴露在外部引脚上的电源轨：VDDS、VDDR 和 DCOUPL。VDDS 是无线微控制器的电源，必须从外部为其提供 1.8V 至 3.8V 的电压。VDDR 是一种内部电源轨，由内部直流/直流转换器或内部全局 LDO 供电，但也可以由外部电源供电。VDDR 在升压模式下运行时可调节至约 1.68V 或 1.95V，以在 Sub-1GHz 频带下实现最大输出功率。在升压模式下，要求采用最低为 2.1V 的 VDDS 电压。DCOUPL 由数字 LDO 或微型 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 1 μ F 的外部去耦电容器。

11.2 直流/直流转换器模式

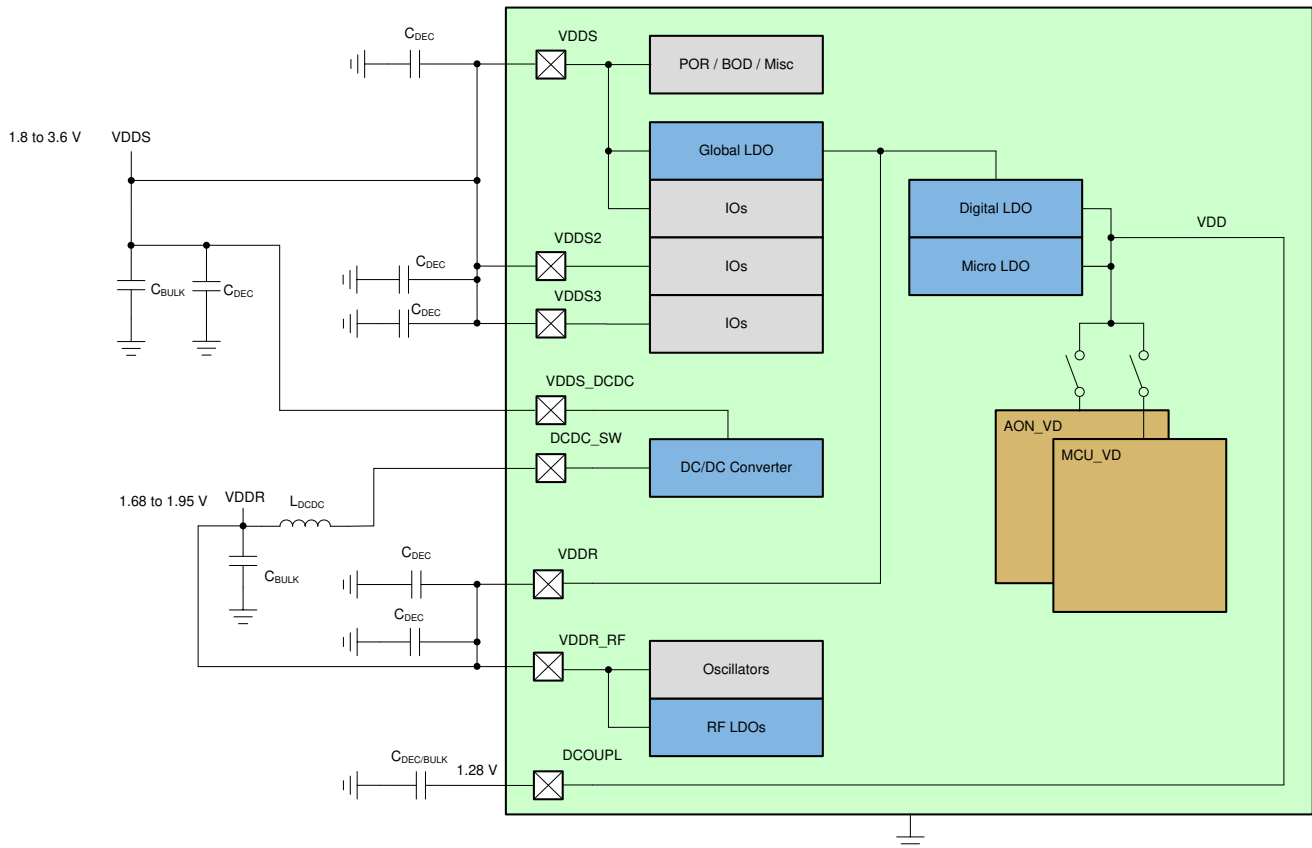


图 11-1. 直流/直流模式

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 (LDCDC) 和电容器 (CDCDC)。元件应尽可能靠近 CC13xx/CC26xx 器件放置，并且从 CDCDC 接地面到芯片上的焊盘之间务必有短的一条电流返回路径（请参阅节 4.7）。此外，VDDS 上的大容量电容器应靠近 VDDS_DCDC 引脚放置。LDCDC、CDCDC 和 CBULK 的实际值因器件而异。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 2.0V 以下，直流/直流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 2.0V 的情况下运行的系统，请考虑使用全局 LDO 或外部稳压器模式，以节省元件成本和电路板面积。

若要使用直流/直流转换器，需要在 CCFG 中进行以下软件设置：

```
#ifndef SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_RECHARGE
#define SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_RECHARGE    0x0    // Use the DC/DC during recharge in powerdown
// #define SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_RECHARGE    0x1    // Do not use the DC/DC during recharge in
powerdown
```



```
#endif
#ifndef SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_ACTIVE
#define SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_ACTIVE    0x0    // Use the DC/DC during active mode
// #define SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_ACTIVE    0x1    // Do not use the DC/DC during active mode
#endif
```

11.3 全局 LDO 模式

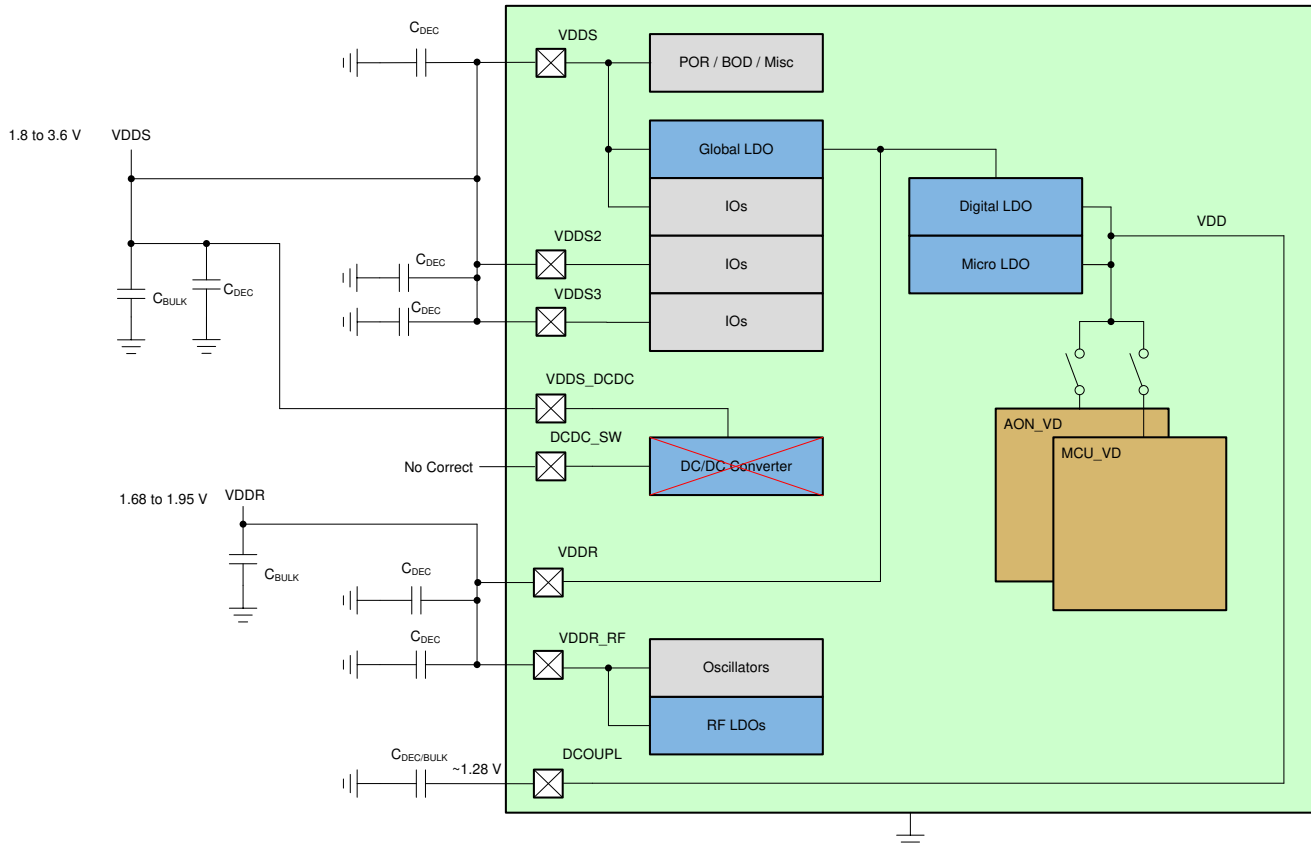


图 11-2. 全局 LDO 模式

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。在这种模式下，VDDR 上仍然需要一个大容量电容器，并且应将它放在靠近 VDDR 引脚的位置。VDDSDC 引脚必须连接到 VDDSD，并且 DCDC_SW 应保持悬空，以避免当通过软件错误地启用直流/直流转换器时发生 VDDSD 短路。VDDSD 大容量电容器不需要靠近 VDDSDC 引脚，而应该靠近 VDDSD 引脚放置。

若要禁用直流/直流转换器并从全局 LDO 为 VDDR 供电，需要在 CCFG 中进行以下软件设置：

```
#ifndef SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_RECHARGE
// #define SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_RECHARGE 0x0 // Use the DC/DC during recharge in powerdown
#define SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_RECHARGE 0x1 // Do not use the DC/DC during recharge in powerdown
#endif
#ifndef SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_ACTIVE
// #define SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_ACTIVE 0x0 // Use the DC/DC during active mode
#define SET_CCFG_MODE_CONF_DCDC_ACTIVE 0x1 // Do not use the DC/DC during active mode
#endif
```

11.4 外部稳压器模式

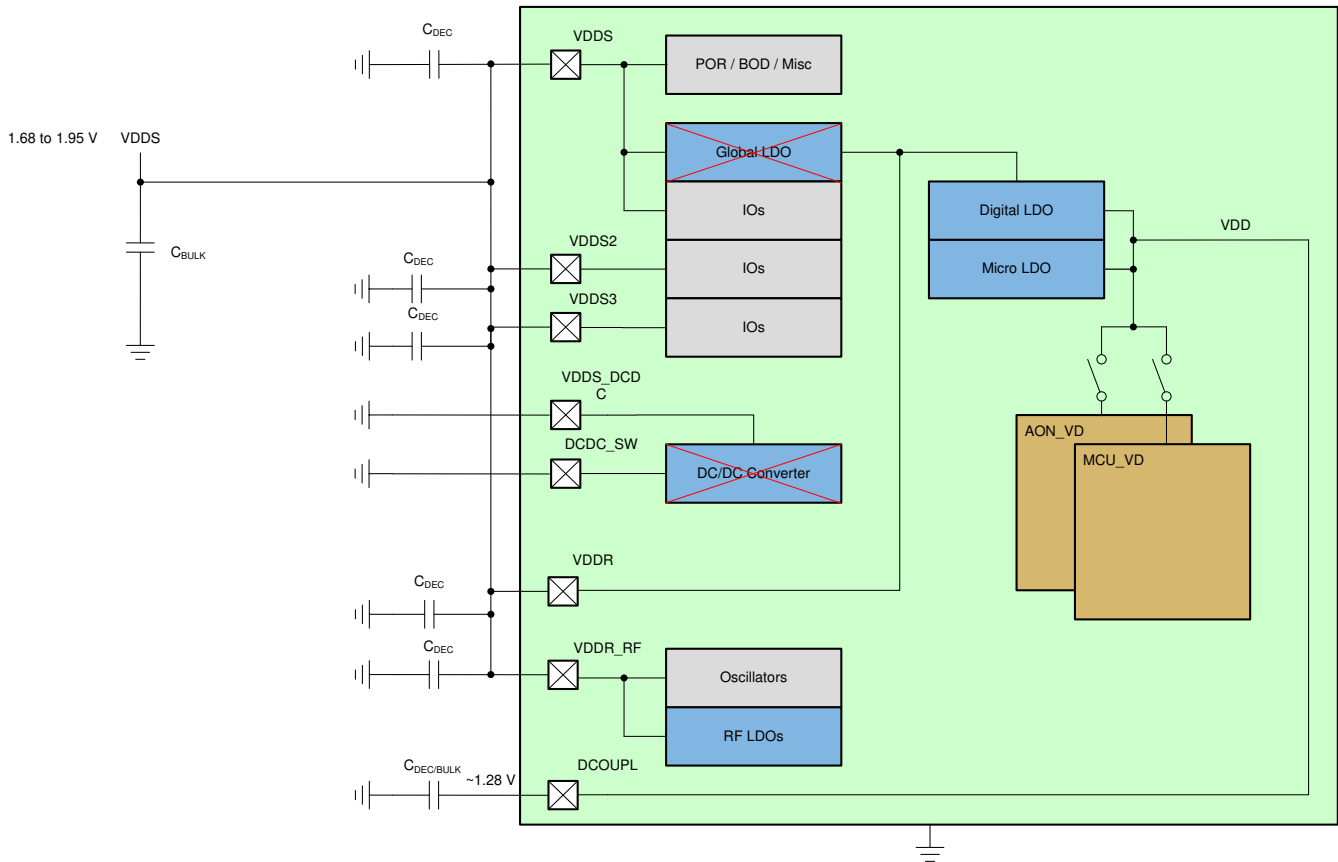


图 11-3. 外部稳压器模式

在外部稳压器模式下，全局 LDO 和直流/直流均未激活，VDDSS 和 VDDR 必须由同一个电源轨供电。通过将 VDDSS_DCDC 接地，可禁用稳压器。请注意，外部稳压器上的最高电压电平受 VDDR 限制，应不超过器件特定数据表中定义的绝对最高额定值。为获得 Sub-1GHz PA 的最大输出功率，电源电压应设置为 1.95V。

备注

仅在 CC26x0 器件上支持外部稳压器模式。

12 电路板启动

在开始开发软件或进行范围测试之前，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，应测量灵敏度、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。例如，对于具有 10m 范围要求的设计，检验过程不需要像采用范围扩展器的设计那样详细。对于采用范围扩展器的设计以及其他要求高性能的设计，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，读者可自行选择适合其电路板的方法。

12.1 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。

CC13xx 和 CC26xx

- VDDR = 1.68V (对于 CCFG_FORCE_VDDR_HH = 0)
- VDDR = 1.95V (对于 CCFG_FORCE_VDDR_HH = 1)
- DCOUPL = 1.27V

请勿直接在 X24M_P 和 X24M_N 或 X48M_P 和 X48M_N 引脚上进行测量，否则会使器件砖化。

12.2 射频测试：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：

- 对于 CC13xx 和 CC26xx，应使用 XDS100v3、XDS110 或 XDS200。

cJTAG 模式下所需的引脚是 VDDS、GND、RESET、TCK 和 TMS。

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 EM 或 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 PacketRX，另一块设置为 PacketTX，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，应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/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，则应检查原理图和布局。请注意，如果客户电路板上的射频端口和天线之间的网络与 TI 评估板不同，则必须考虑由 SAW 滤波器和开关引起的损耗。

12.3 射频测试：传导测量

对于高性能设计，强烈建议在设置射频链路之前执行传导测量以验证性能。

12.3.1 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 中的 PacketRX 选项（类似于节 12.2 介绍的测试）。在 PacketRX 模式下，您可以设置预期的数据包计数。
3. 首选：使用能够传输数据包的信号发生器。务必正确设置同步字和 CRC。
4. 如果没有信号发生器，请使用 EM/LaunchPad 作为发送器。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。

备注

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。

5. SmartRF Studio 将计算数据包错误率 (PER) 和误码率 (BER)。

如果所需的射频设置与预定义的设置不同，则应另外测量 PER 随电平变动的情况。输入功率级别应以 1-2dB 的阶跃从灵敏度限值增加到 0dBm 左右。对于每个功率级别，至少传输 100 个数据包并记录 PER。如果 AGC 设置不是最优的，通常某些步骤的 PER 将高于 0（残留 PER），如果出现这种情况，则必须检查 AGC 设置。

如果传导灵敏度差：

- 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？

12.3.2 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：使用频谱分析仪 (SA)。使用 1MHz RBW 来测量输出功率。
3. 如果 SA 不可用，则使用带 SMA 连接点的 EM 或 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 EM/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。

12.4 软件启动

对于 CC13xx：

访问 <http://dev.ti.com/tirex/#!/>，可在“Software”->“Examples”->“Development Tools”->“<相关的开发板>”中的“TI Drivers”下找到射频和其他驱动程序的基本示例。在开始编写软件之前，建议在未修改的情况下运行最接近所需应用的射频示例，验证它们是否能正常运行。然后根据需要 will 将射频设置更改为所需的数据速率，等等。

对于 CC26xx 和低功耗蓝牙：

更多相关信息，请参阅[板的初次启动](#)（使用建议的软件映像），进行初次运行。

访问 <http://dev.ti.com/tirex/#!/>，可在“Software”->“Examples”->“Development Tools”->“<相关的开发板>”中的“TI Drivers”下找到射频和其他驱动程序的基本示例。

12.5 硬件故障排除

本节介绍了引起性能不佳的一些常见原因。

12.5.1 无链路：射频设置

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。这意味着两者必须使用相同的数据速率、偏差和调制格式。一种常见的错误是两个器件上的同步字设置不同，这两者必须相等。

12.5.2 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过大可能导致无链路或链路非常差。

确保接收所需的最小 RX 带宽由下式给出：

$$\text{RX BW} = \text{Signal Bandwidth (信号带宽)} + 4 * \text{ppm Crystal (晶体)} * \text{RF Frequency of Operation (运行频率)} \quad (7)$$

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）。

对于 CC13x0：若要实现低数据速率，应使用位重复补丁 [CC13x0 低数据速率运行](#)。如果不使用该补丁，则频率偏移容差可能低于 10ppm，这可能会导致具有正常晶体容差的链路中断。

12.5.3 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。如需了解更多详情，请参阅 [节 5](#)。

12.5.4 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：

- 针对 32.768kHz 晶体的负载电容器不合适 - 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）- 器件默认以 31.25kHz 的频率从 48MHz RC 振荡器运行 RTC。如需更多信息，请参阅 [CC13x0](#)、[CC26x0 SimpleLink™ 无线 MCU 技术参考手册](#) 和 [C13x2](#)、[CC26x2 SimpleLink™ 无线 MCU 技术参考手册](#) 中的 *PRCM* 一章。

如果使用 32kHz RC 振荡器作为 RTC 源：

- 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链接。

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。更多有关如何执行此操作的信息，请参阅 [CC13x0](#)、[CC26x0 SimpleLink™ 无线 MCU 技术参考手册](#) 和 [C13x2](#)、[CC26x2 SimpleLink™ 无线 MCU 技术参考手册](#) 中的 *I/O* 一章。通过在引脚上输出时钟，用户将始终测量 `_selected_` RTC 时钟源，并能在不影响此时钟源的情况下进行测量（例如，探测晶体）。

如果使用 32.768kHz 晶体，请确保晶体符合器件特定的 CC13xx/CC26xx 数据表中概述的要求。此外，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。默认设置为 40ppm 并可以使用 `HCI_EXT_SetSCACmd` API 进行调整，请参阅 `hci.h` 或 SDK 随附的 TI 供应商特定 API 指南。

12.5.5 灵敏度差：直流/直流元件布局

当涉及到连接至 DCDC_SW 引脚的元件时，强烈建议遵循参考设计。DCDC_SW 引脚的串联电感器之后的分流电容器必须具有一个较短的从接地焊盘到芯片接地端的返回路径（请参阅 [节 4.7](#)）。糟糕的直流/直流元件布局可能会导致超过 5dB 的灵敏度损失。若要检查灵敏度是否受直流/直流元件限制，请在 `CCFG.c` 文件中关闭直流/直流元件。

12.5.6 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。

示例：如果传导灵敏度为 -110dBm，所需的 SNR 为 7dB，背景噪声为 -100dBm，则实际辐射灵敏度为 -93dBm。

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。

12.5.7 睡眠状态功耗高

- 请注意，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 `pinStandby` 或 `pinShutdown` 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（在 CCFG.c 中设置），请检查该晶体是否已连接，以及振荡器是否正在运行。

13 参考文献

- [TXLine 传输线路计算器](#)
- 德州仪器 (TI)：[天线选型快速指南](#)
- 德州仪器 (TI)：[天线选型指南](#)
- [CC-Antenna-DK2](#)
- 德州仪器 (TI)：[CC-Antenna-DK2 和天线测量汇总](#)
- 德州仪器 (TI)：[CC13x0 低数据速率运行](#)
- 德州仪器 (TI)：[具有单频带或双频带选项的单极 PCB 天线](#)
- 德州仪器 (TI)：[LAUNCHXL-CC1310 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI)：[SimpleLink Sub-1GHz CC1312R 无线 \(MCU\) LaunchPad 开发套件 868MHz/915MHz 应用](#)
- 德州仪器 (TI)：[2.4GHz 倒置 F 型天线](#)
- 德州仪器 (TI)：[LAUNCHXL-CC2640R2 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI)：[CC26x2R LaunchPad 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI)：[适用于 868MHz 或 915/920MHz 的微型螺旋 PCB 天线](#)
- 德州仪器 (TI)：[LAUNCHXL-CC1350 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI)：[具有单频带或双频带选项的单极 PCB 天线](#)
- 德州仪器 (TI)：[2.4GHz 倒置 F 型天线](#)
- 德州仪器 (TI)：[CC1352R LaunchPad 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI)：[LAUNCHXL-CC1352P-2 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI)：[LAUNCHXL-CC1352P-4 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI)：[CC1350STK 设计文件](#)
- 德州仪器 (TI)：[适用于 868/915MHz BOOSTXL-CC1125 的 CC1125 BoosterPack™](#)
- 德州仪器 (TI)：[用于 868/915MHz 运行且与 CC112x、CC117x 和 CC12xx 高性能无线电系列相匹配的集成无源器件](#)
- 德州仪器 (TI)：[Johanson Technology, Inc. 高温稳定阻抗匹配射频前端差分平衡-非平衡变压器带通滤波器集成陶瓷元件](#)
- 德州仪器 (TI)：[CC1310 适用于 779-928MHz 的集成无源器件](#)
- 德州仪器 (TI)：[CC1352 和 CC1352P 的匹配滤波器平衡-非平衡变压器](#)
- 德州仪器 (TI)：[针对德州仪器 \(TI\) CC2420 收发器进行了优化的 Anaren 0404 \(BD2425N50200A00\) 平衡-非平衡变压器](#)
- 德州仪器 (TI)：[针对德州仪器 \(TI\) CC2430 收发器进行了优化的 Anaren 0404 \(BD2425N50200A00\) 平衡-非平衡变压器](#)
- 德州仪器 (TI)：[适用于 CC26xx 器件系列的 Johanson 平衡-非平衡变压器](#)
- 德州仪器 (TI)：[CC13x0、CC26x0 SimpleLink™ 无线 MCU 技术参考手册](#)
- 德州仪器 (TI)：[C13x2、CC26x2 SimpleLink™ 无线 MCU 技术参考手册](#)

14 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

| Changes from Revision F (February 2022) to Revision G (September 2022) | Page |
|--|------|
| • 更新了节 2.3.1 至节 2.3.4 中的图形和内容..... | 9 |

重要声明和免责声明

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

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

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司