

Richard Wallace
Sondre Olimb

摘要

本应用手册介绍了专为 CC26x2P [1] 和 CC1352P [2] 器件上的高功率 PA 端口设计的集成无源器件 (IPC)，该 IPC 在 2.4GHz ISM 频带以 10dBm 的输出功率运行。使用 PA IPC 后，元件数量会减少，同时仍然可以实现高无线电性能。

匹配的滤波器平衡-非平衡变压器元件通常被指定为集成无源器件 (IPC)。CC26x2P 和 CC1352P PA Tx 端口需要 11 个无源器件。使用 PA IPC 后，元件数量从 11 个减少为 1 个，从而节省空间，并降低贴片组装成本。

PA IPC 由 Murata 提供 [3]，尺寸仅为 1.6mm x 0.80mm，非常适合紧凑型设计。

除非另有说明，否则本文档中提供的所有测量结果均基于在 CC2652P PA IPC EM 修订版 1.0 参考设计上执行的测量；请参阅图 1-1。

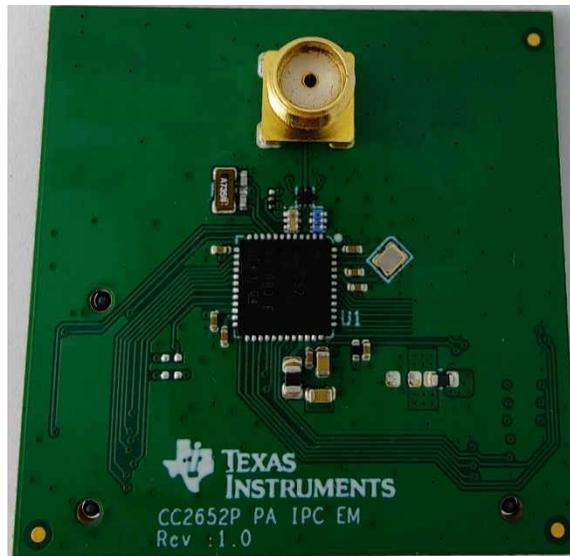


图 1-1. CC2652P PA IPC EM 修订版 1.0

内容

| | |
|--|-----------|
| 首字母缩写词..... | 3 |
| 1 提供参考设计..... | 4 |
| 1.1 用于 10dBm PA 端口的单个元件..... | 4 |
| 1.2 CC2652P PA IPC EM..... | 6 |
| 2 PA IPC 测量结果..... | 12 |
| 2.1 CC2652P 输出功率，1Mbps 低功耗蓝牙..... | 12 |
| 2.2 CC2652P 在各种 PA 设置下的 TX 效率、谐波和输出功率..... | 14 |
| 3 谐波发射法规要求..... | 16 |
| 3.1 符合 FCC 法规..... | 16 |
| 3.2 符合法规..... | 17 |
| 4 总结..... | 18 |
| 5 参考文献..... | 19 |

插图清单

| | |
|--|----|
| 图 1-1. CC2652P PA IPC EM 修订版 1.0..... | 1 |
| 图 1-1. CC1352PEM-XD7793-XD24-PA24_10dBm 射频部分原理图..... | 4 |
| 图 1-2. 10dBm PA 2.4GHz 的 Murata CC1352P IPC 等效电路..... | 5 |
| 图 1-3. CC2652P PA IPC EM 修订版 1.0 原理图..... | 5 |
| 图 1-4. 元件尺寸..... | 6 |
| 图 1-5. CC2652P 元件放置..... | 7 |
| 图 1-6. 过孔放置和 CC1352P/CC2652P 与 PA IPC (FL2) 之间的距离..... | 7 |
| 图 1-7. 第 1 层..... | 8 |
| 图 1-8. 第 2 层..... | 9 |
| 图 1-9. 第 3 层..... | 10 |
| 图 1-10. 第 4 层..... | 11 |
| 图 2-1. CC2652P - 输出功率与频率之间的关系..... | 12 |
| 图 2-2. CC2652P - 二次谐波与频率之间的关系..... | 13 |
| 图 2-3. CC2652P - 三次谐波与频率之间的关系..... | 13 |
| 图 2-4. CC2652P - 电流与 PA 设置之间的关系..... | 14 |
| 图 2-5. CC2652P - 输出功率与 PA 设置之间的关系..... | 15 |
| 图 2-6. CC2652P - 效率与 PA 设置之间的关系..... | 15 |
| 图 3-1. 陷波滤波器的电路图..... | 16 |
| 图 3-2. 10dBm 输出下的 2.4GHz ETSI EN300 220 辐射发射..... | 17 |
| 图 4-1. IPC 与分立式解决方案之间的效率对比..... | 18 |

表格清单

| | |
|-------------------------------|----|
| 表 2-1. CC2652P 的 PA 设置..... | 14 |
| 表 3-1. ETSI 和 FCC 谐波辐射限值..... | 16 |
| 表 3-2. FCC 校正因子和最大占空比示例..... | 16 |

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

首字母缩写词

| 首字母缩写词 | 定义 |
|--------|--------------------|
| DC | 直流 |
| EM | 评估模块 |
| ETSI | 欧洲电信标准化协会 |
| FCC | 联邦通信委员会 |
| FR4 | 用于生产 PCB 的材料类型 |
| ISM | 工业、科学和医疗 |
| LC | 电感器 (L) 电容器 (C) 配置 |
| ML | 多层电感器 |
| NM | 未安装 |
| PCB | 印刷电路板 |
| SoC | 片上系统 |
| SRD | 短程器件 |
| WW | 线绕电感器 |
| PA | 功率放大器 |
| IPC | 集成无源器件 |

1 提供参考设计

10dBm PA 2.4GHz 的现有参考设计基于 LAUNCHXL-CC2652P [7] 和 LAUNCHXL-CC1352P-4 [6]，这两者都基于无源分立式元件，请参阅图 1-1。

每个射频端口均以 50 欧姆阻抗进行端接，可连接到 SMA 连接器、开关或双工器。使用开关或双工器的主要优点是采用一个公共射频端口来取代多个射频端口。

LAUNCHXL-CC2652P [4] 具有两个射频端口，LAUNCHXL-CC1352P-4 [5] 具有三个射频端口。CC1352P 中的附加射频端口可配置为 Sub-1GHz 或 2.4GHz。CC2652P [1] 和 CC1352P [2] 的 PA 端口可配置为 20dBm 或 10dBm。PA IPC [3] 可用于 CC26x2P [1] 和 CC1352P [2] 的 10dBm、2.4GHz 配置。

本应用手册将记录使用 IPC [3] 元件在 CC2652P [1] 和 CC1352P [2] 的 PA Tx 端口 (采用 10dBm 2.4GHz 配置) 上执行的测量。参考设计中与 PA 端口无关的部分将不予讨论。

在 LaunchPad [5] 上使用一个开关 (对于 CC2652P 为 SPDT，对于 CC1352P 为 SP3T) 来启用连接到集成 PCB 双频天线的公共射频端口。

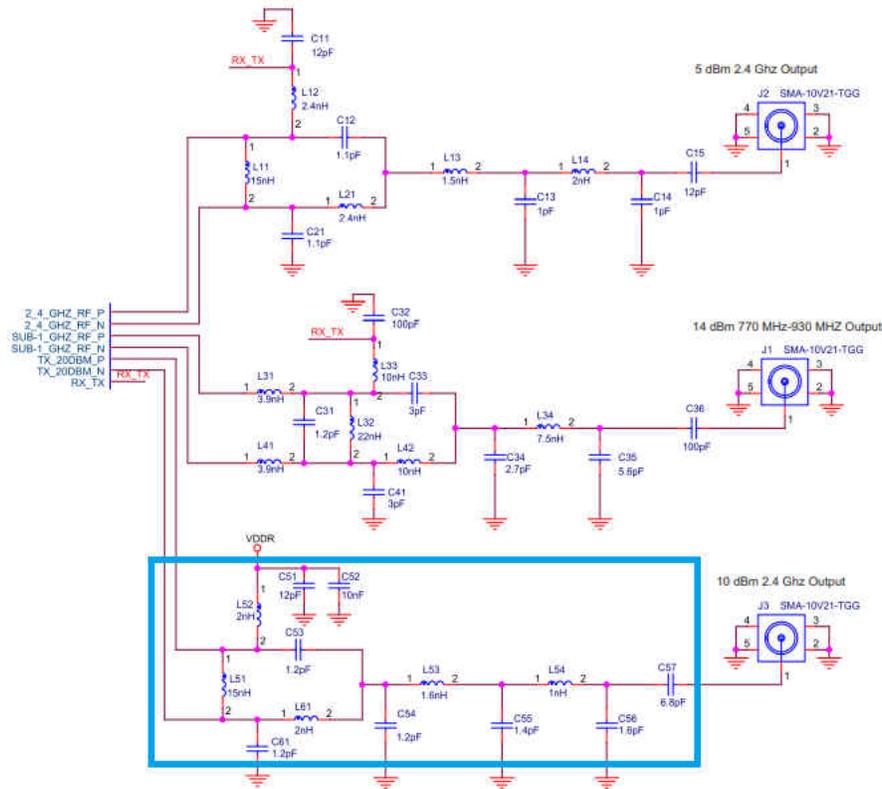


图 1-1. CC1352PEM-XD7793-XD24-PA24_10dBm 射频部分原理图

1.1 用于 10dBm PA 端口的单个元件

与分立式设计 [4] 相比，PA IPC 的目标是：

- 减少所需的外部元件数量
- 减小整体尺寸，以实现更紧凑的布局
- 简化布局过程，从而降低不良射频布局的射频串扰风险
- 保持与分立式设计相似的射频性能

1.1.1 Murata PA IPC 等效电路

图 1-2 展示了 Murata IPC 的等效电路。可以从 Murata 获得其 IPC 的完整规格 [3]。Murata 的匹配平衡-非平衡变压器滤波器解决方案实现包含一个隔直流电容器 (C57) 和一个旁路电容器 (C51)。

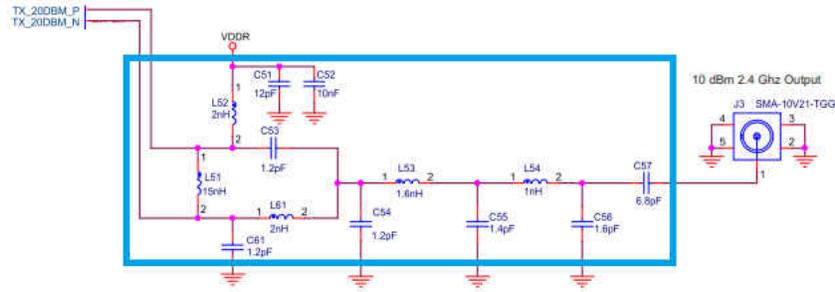


图 1-2. 10dBm PA 2.4GHz 的 Murata CC1352P IPC 等效电路

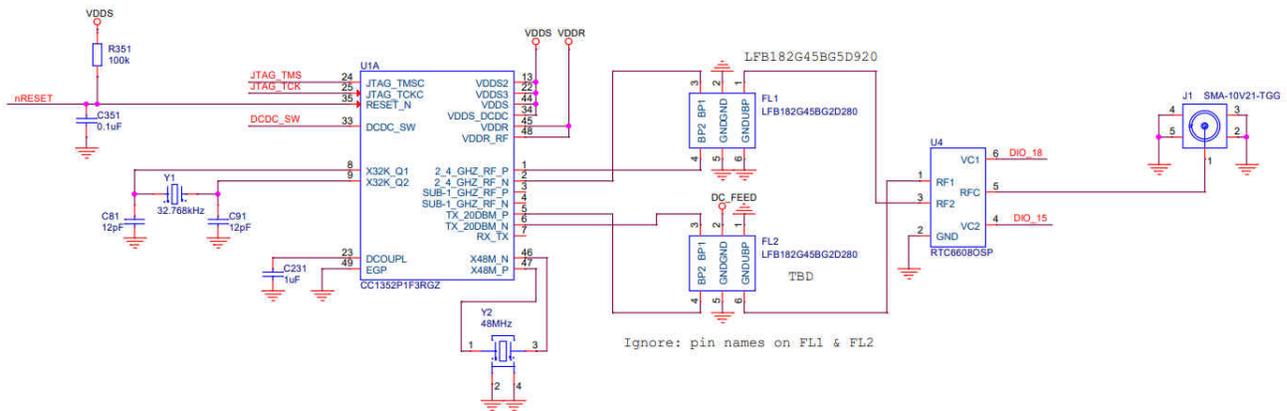


图 1-3. CC2652P PA IPC EM 修订版 1.0 原理图

在如图 1-1 所示的 CC2652P PA IPC EM 板上对 10dBm PA IPC 进行了评估，原理图如图 1-3 所示。CC2652P PA IPC EM 板使用两个 IPC，一个 IPC 用于 Rx/5dBm Tx 端口 [6]，第二个 IPC [3] 用于 10dBm PA 部分。本应用手册仅讨论连接到引脚 5 和 6 的 10dBm PA IPC。

CC2652P PA IPC EM 板有一个公共射频端口。IPC 的非平衡射频端口的 Rx/5dBm Tx 射频端口和 10dBm PA 端口连接到 SPDT 开关的双掷部分。开关的单刀端口连接到 SMA，也可以连接到单馈双频天线。SPDT 开关可由任何 DIO 控制。DIO15 和 DIO18 用于 CC2652P PA IPC EM 设计。

1.1.2 IPC 尺寸

图 1-4 展示了 IPC 的物理尺寸。尺寸仅为 1.60mm x 0.80mm。这使得 IPC 成为紧凑型设计的理想之选，并使布局更容易，产生射频布局问题的风险更低。

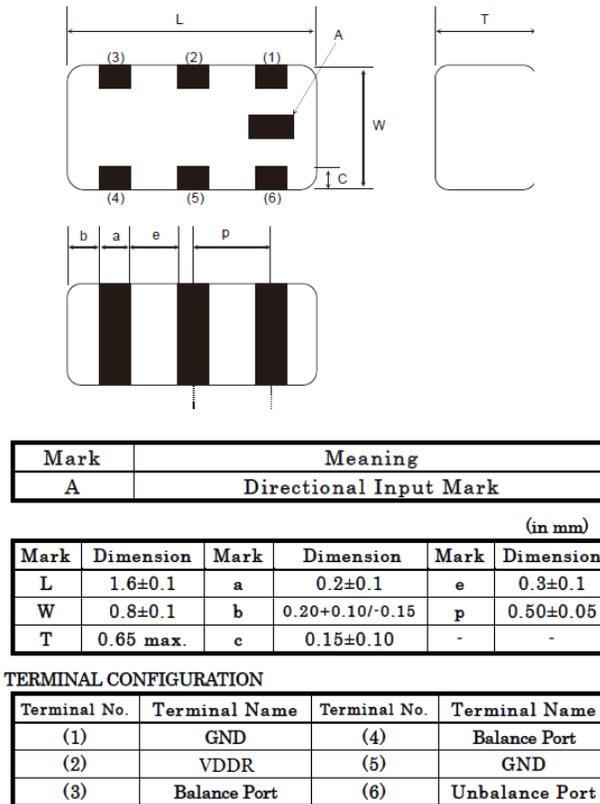


图 1-4. 元件尺寸

1.2 CC2652P PA IPC EM

1.2.1 元件放置和布局

PA IPC 元件放置会影响射频性能，因此应尽可能遵循参考设计，请参阅图 1-5 和图 1-6。PA IPC 和 CC1352P/CC2652P 之间的距离很重要，该距离应该为 0.66mm，如图 1-6 所示。

如果无法复制参考设计，那么射频引脚的布线必须与 IPC 对称。布线长度应保持在最小值，最好与参考设计中使用的建议长度相同，即 0.66mm。CC1352P/CC2652P 与 IPC 之间的布线宽度也应保持为 0.15mm。

如果建议的 0.66mm 距离、0.15mm 布线宽度或 GND 过孔放置位置距离 IPC 太远，则会引入相移和额外的寄生电感。如果不遵循参考设计，则会影响 Tx 输出功率、Tx 谐波和 Rx 灵敏度。有关 IPC 的建议 GND 过孔放置位置，请参阅图 1-6。

所有元件接地焊盘都应有自己的接地过孔，该过孔应尽可能靠近接地焊盘放置。在为元件焊盘接地定位接地过孔时，务必尽量保持返回路径环路尽可能少地接地，以防止产生不必要的辐射发射。

隔直流电容器和旁路电容器集成在 PA IPC 中。U2 是一款紧凑型 SPDT 开关，将两个射频端口组合成一个公共射频端口。

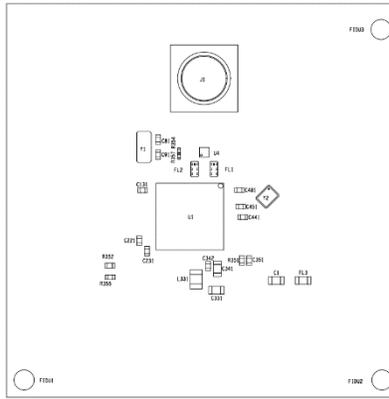


图 1-5. CC2652P 元件放置

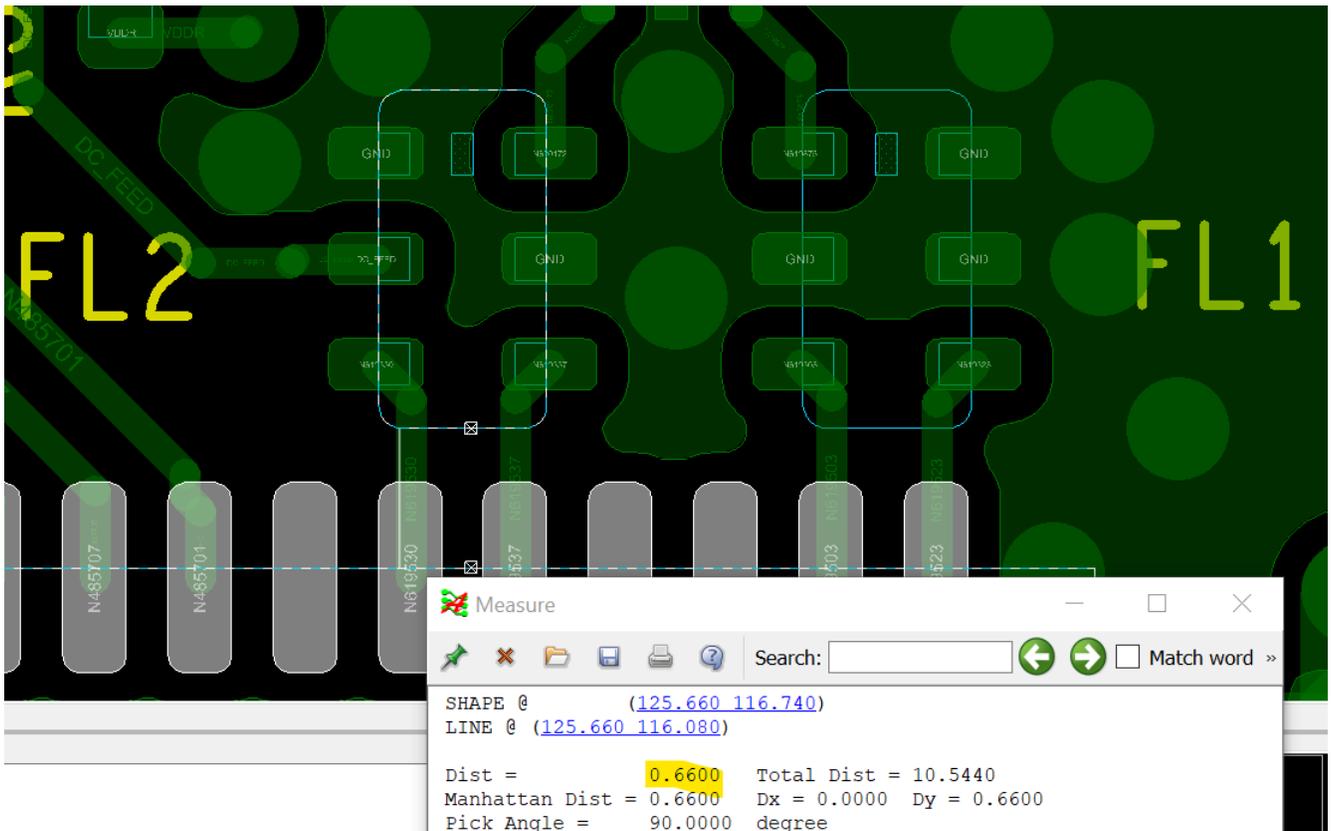


图 1-6. 过孔放置和 CC1352P/CC2652P 与 PA IPC (FL2) 之间的距离

1.2.2 布局 - 第 1 层

图 1-7 展示了 4 层参考设计的顶层。其余区域填充 GND，以实现屏蔽。

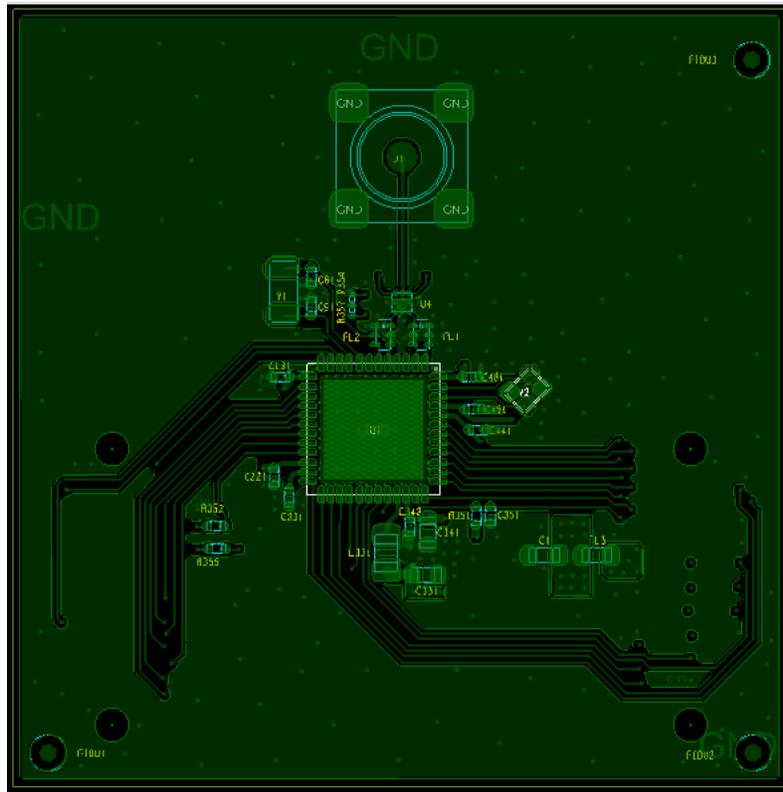


图 1-7. 第 1 层

1.2.3 布局 - 第 2 层

图 1-8 展示了 4 层参考设计的第二层。该层主要是 GND 层。务必在整个射频部分下方实现一个实心接地层，并避免在射频部分正下方进行任何布线。该参考设计 [6] 第 1 层和第 2 层之间的厚度为 175um。这是 FR4 PCB 堆叠中的主要参数，在复制该参考设计时应保持相似。

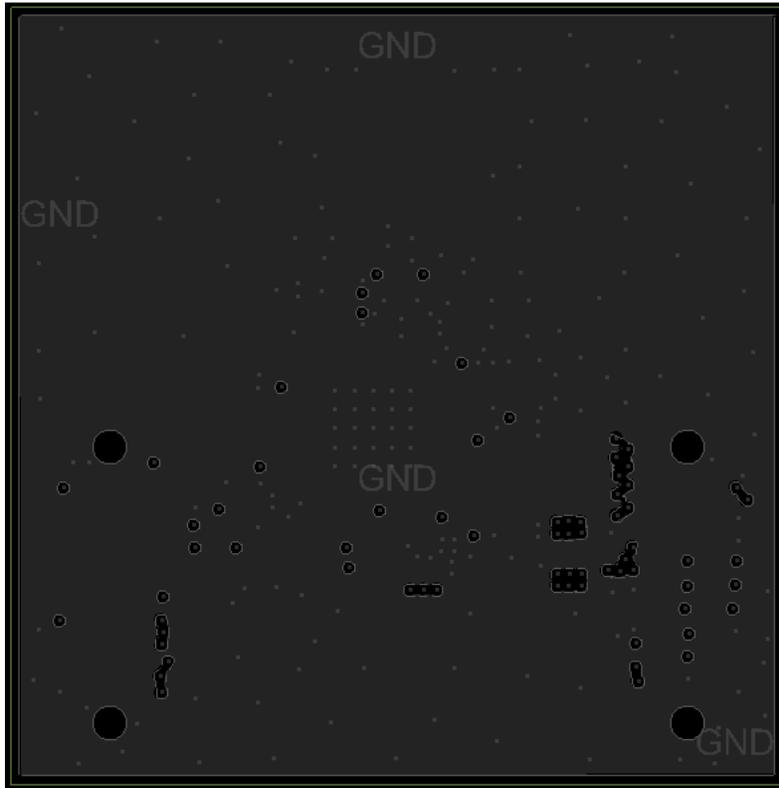


图 1-8. 第 2 层

1.2.4 布局 - 第 3 层

图 1-9 展示了 4 层参考设计的第三层。该层主要用于实现 VDDS 和 VDDR 电源。其余区域填充 GND，以实现屏蔽。电源布线应始终首先连接到去耦电容器；然后从去耦电容器连接到 CC2652P 的焊盘。

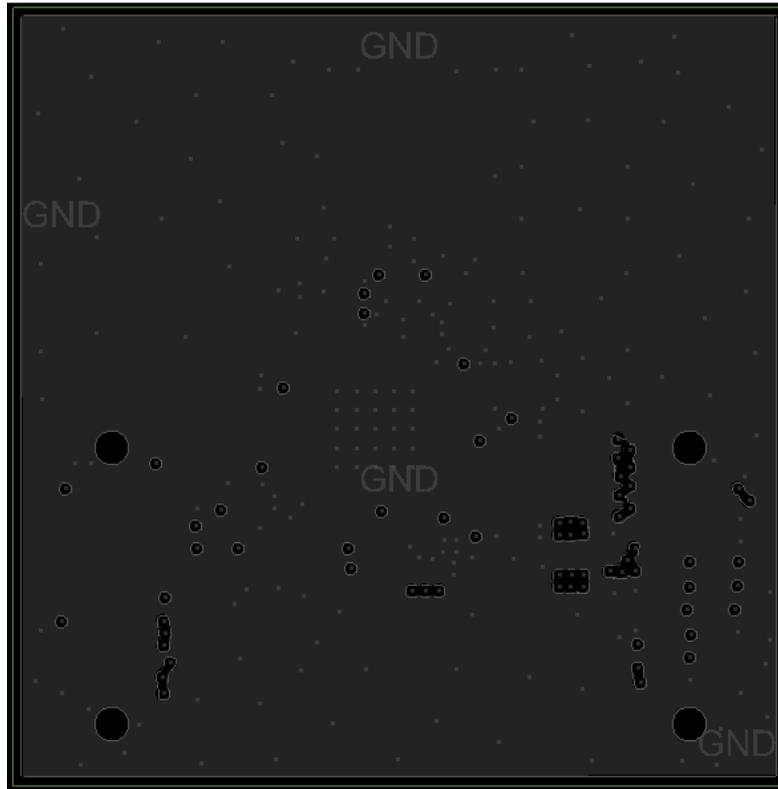


图 1-9. 第 3 层

1.2.5 布局 - 第 4 层

图 1-10 展示了 4 层参考设计的第四层。该层主要用于实现连接器或 DIO 分布。其余区域填充 GND，以实现屏蔽。

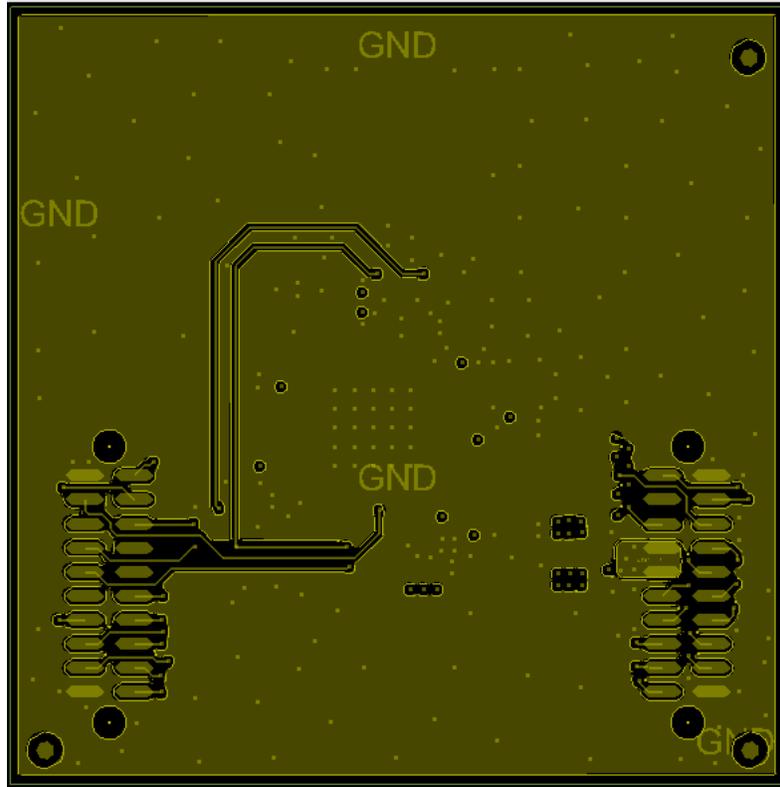


图 1-10. 第 4 层

有关硬件配置和 PCB 设计注意事项，请参阅提供的[应用报告 \[7\]](#)。

2 PA IPC 测量结果

除非另有说明，否则本章中提供的所有结果均基于在 CC2652P PA IPC EM 修订版 1.0 上执行的测量。为了获得本报告中提供的平均结果，我们测量了四个单元。提供的所有测量结果都是典型器件在室温下测得的每批产品的平均值。

备注

除非另有说明，否则所有值均以 dBm 为单位。所有测量均在开关后的 SMA 连接器处执行。在参考设计中，该开关的典型插入损耗为 0.7dB [1]。

2.1 CC2652P 输出功率，1Mbps 低功耗蓝牙

图 2-1 展示了三个离散频率 2402、2440 和 2480MHz 下的输出功率测量值。

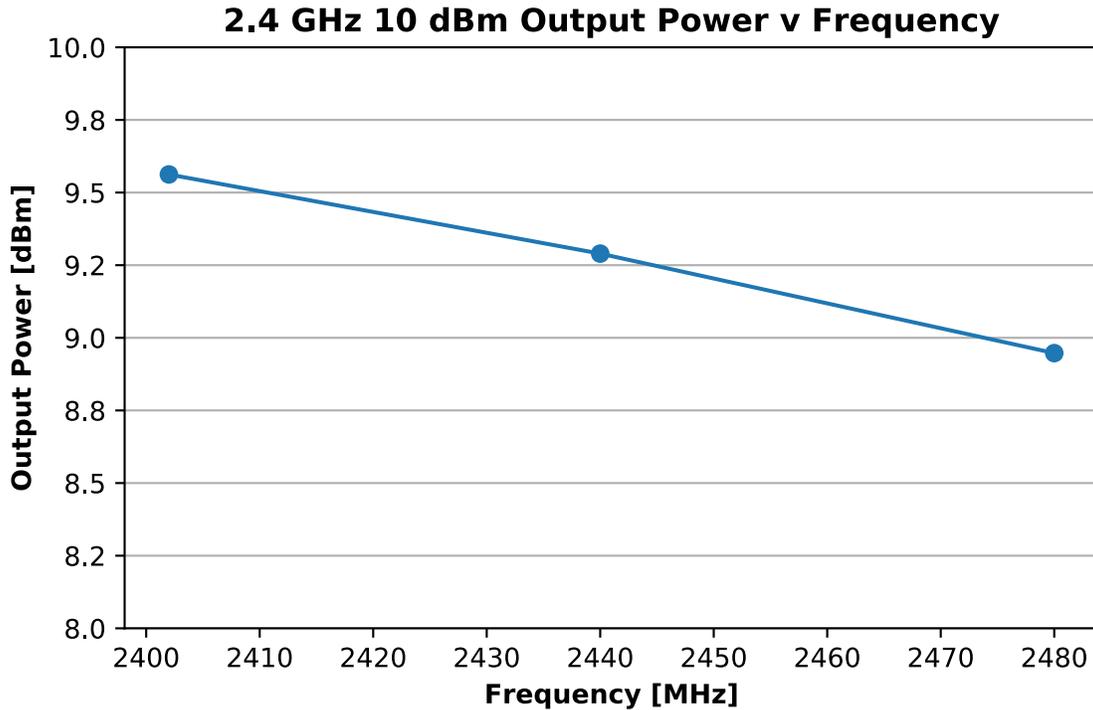


图 2-1. CC2652P - 输出功率与频率之间的关系

图 2-2 展示了与 FCC 和 ETSI 法规相比，10dBm 输出下的二次谐波与三个离散频率 2402、2440 和 2480MHz 之间的关系。节 3 将讨论 FCC 和 ETSI 法规符合性。

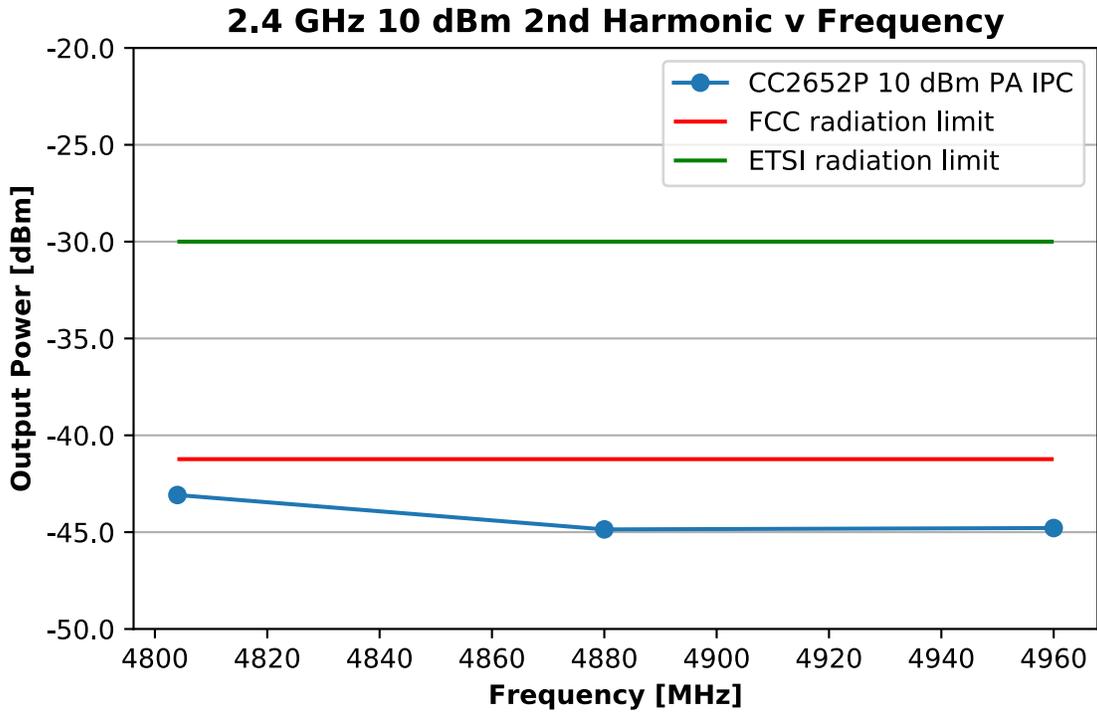


图 2-2. CC2652P - 二次谐波与频率之间的关系

图 2-3 展示了 10dBm 输出下的三次谐波与三个离散频率 2402、2440 和 2480MHz 之间的关系。

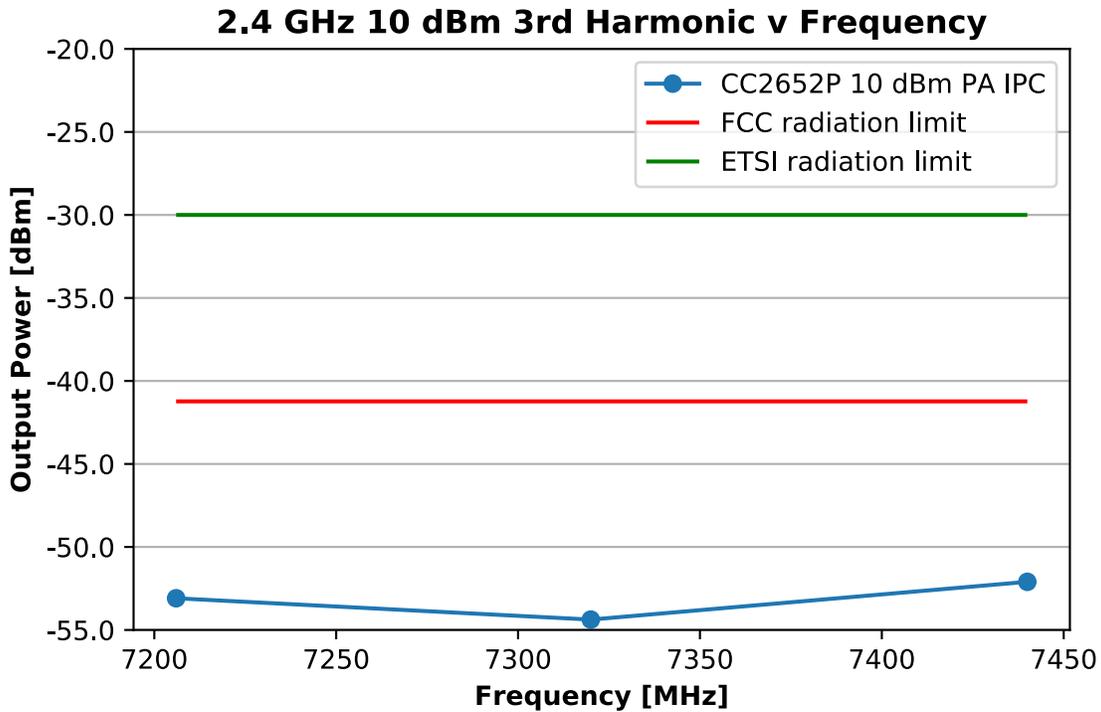


图 2-3. CC2652P - 三次谐波与频率之间的关系

3V，最大输出功率设置；2402-2480MHz 的平均结果：

- TX 效率：9.6%
- TX 电流：25.76 mA
- 输出功率：9.3dBm
- 二次谐波电平：-44.7dBm
- 三次谐波电平：-54.4dBm

2.2 CC2652P 在各种 PA 设置下的 TX 效率、谐波和输出功率

表 2-1. CC2652P 的 PA 设置

| 索引 (十六进制) | 输出功率 [dBm] |
|-----------|------------|
| 0x144F2A | 6 |
| 0x144F2A | 7 |
| 0x10335A | 8 |
| 0x103F5F | 9 |
| 0x104F66 | 10 |

图 2-4 展示了上述每个 PA 设置的电流。

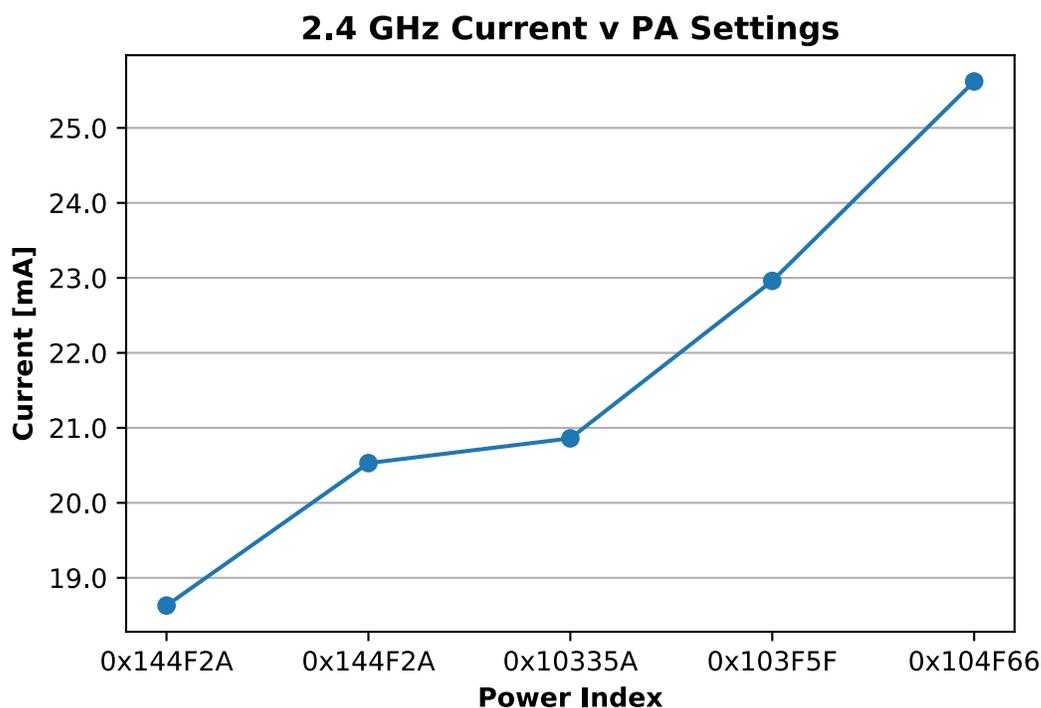


图 2-4. CC2652P - 电流与 PA 设置之间的关系

图 2-5 展示了 CC2652P 的输出功率与表 2-1 中给出的所有 PA 设置之间的关系。

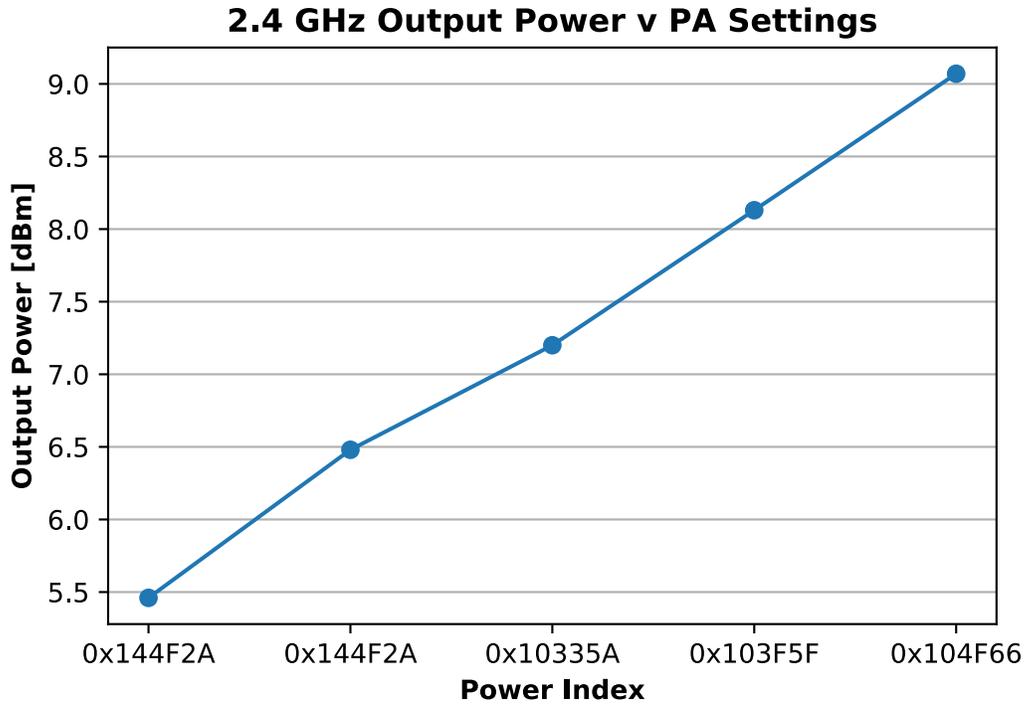


图 2-5. CC2652P - 输出功率与 PA 设置之间的关系

图 2-6 展示了 CC2652P 的效率与表 2-1 中给出的所有 PA 设置之间的关系。效率几乎随着功率设置的增加而线性增加。

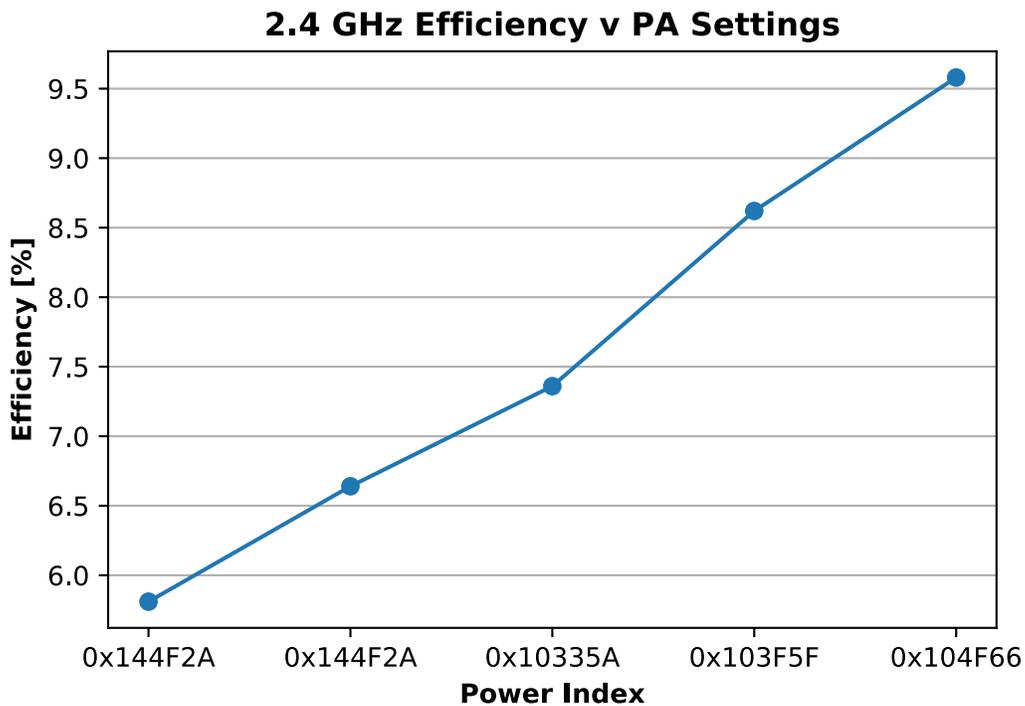


图 2-6. CC2652P - 效率与 PA 设置之间的关系

3 谐波发射法规要求

备注

本章介绍的所有测量都必须在最终应用板上执行，以符合 ETSI 和 FCC 法规，因此这些测量仅用于预认证。

表 3-1 提供了 FCC 和 ETSI 的发射法规，所有将在受这些法规管辖的市场上销售的产品都必须符合这些法规。

表 3-1. ETSI 和 FCC 谐波辐射限值

| 限制 | fc | 二次谐波 | 三次谐波 | 四次谐波 | 五次谐波 |
|-----------------|-------|----------|----------|----------|----------|
| FCC 15.249 | 0dBm | 54dBmV/m | 54dBmV/m | 54dBmV/m | 54dBmV/m |
| FCC 15.247 | 30dBm | 20 dBc | 54dBmV/m | 54dBmV/m | 54dBmV/m |
| ETSI EN 300 220 | 14dBm | -30dBm | -30dBm | -30dBm | -30dBm |

表 3-1 展示了 FCC 和 ETSI 限值。在 1GHz 以上，如果使用占空比，则 FCC 允许辐射比表 3-1 中给出的限值高 20dB。

3.1 符合 FCC 法规

表 3-2. FCC 校正因子和最大占空比示例

| 测得的违规谐波 (使用最大输出功率) | -21.23 | -25 | -30 | -35 | -40 | -41.23 | dBm |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| 法规要求 (二次和三次谐波) | -41.23 | -41.23 | -41.23 | -41.23 | -41.23 | -41.23 | dBm |
| TX 导通时间 (ms) | 10.00 | 15.43 | 27.45 | 48.81 | 86.80 | 100.00 | ms |
| 占空比 | 10.00 | 15.43 | 27.45 | 48.81 | 86.80 | 100.00 | % |

$$CF = -20 \cdot \log\left(\frac{t}{100ms}\right) \quad (1)$$

如果在最大输出功率下运行时无法选择占空比，则建议实施陷波滤波器或带阻滤波器，以满足 FCC 对二次谐波的要求。图 3-1 中给出的陷波滤波器由一个电感器和一个电容器串联组成。图 3-1 中所示的组件值可通过方程式 2 得出，应该足以使二次谐波衰减。其中， L 是电感器， C_{tot} 是电容器 C 的电容和布局中的寄生电容之和。滤波器应连接到 PA IPC 的非平衡端口。但是，如果使用开关，那么将其放置在射频开关的公共端口是有益的，因此所有射频端口都将受益于额外的滤波。

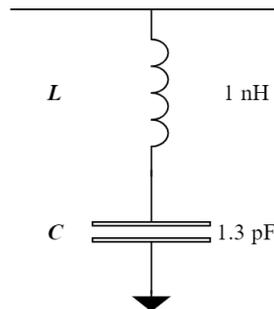


图 3-1. 陷波滤波器的电路图。

$$f_c = 1/(2\pi\sqrt{LC_{tot}}) \quad (2)$$

3.2 符合法规

图 3-2 展示了 CC1352P/CC2652P 符合 ETSI 传导、ETSI 辐射法规和 FCC 传导法规。如果在以最大输出功率运行时使用占空比，则符合 FCC 辐射法规。如果无法使用占空比，则建议使用外部陷波滤波器，以符合 FCC 辐射法规或降低输出功率。

请注意，辐射发射水平取决于接地平面、去耦电容器和电源布线。天线的选择也会影响辐射发射。

天线应与 2.4GHz 频率相匹配 (VSWR < 2.1)，这一点很重要。否则，如果天线失配很大，则会产生不良辐射发射，并且有用的输出功率会降低。

图 3-2 展示了使用 10dBm 设置时的最坏情况辐射性能。如果需要降低基波和/或二次谐波，则降低功率设置也会产生所需的结果。

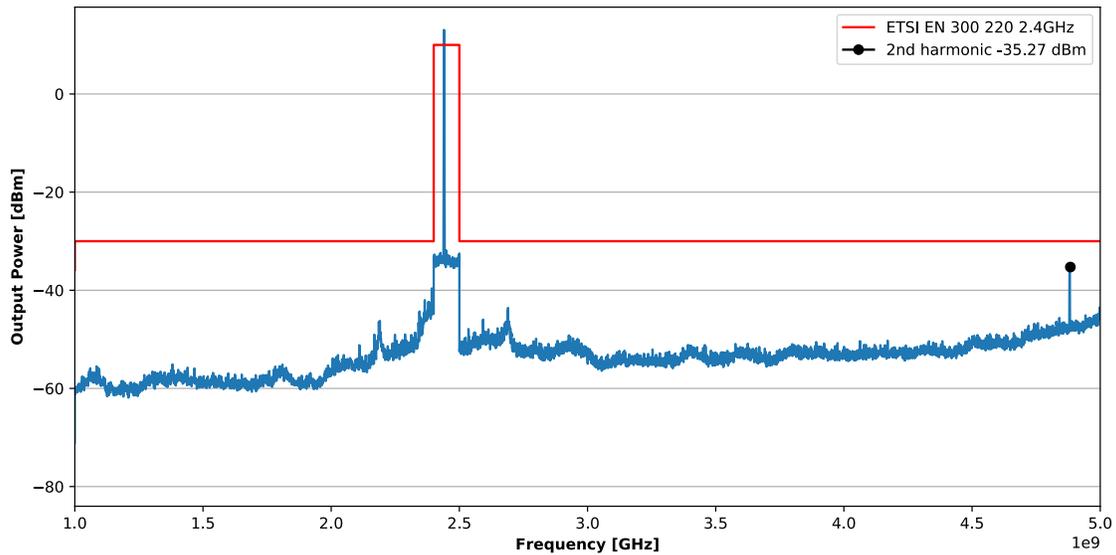


图 3-2. 10dBm 输出下的 2.4GHz ETSI EN300 220 辐射发射

4 总结

作为图 1-2 所示的分立式参考设计的替代方案，10dBm PA IPC 元件参考设计具有与分立式参考设计相似的性能，但具有更少的元件数量。CC2652P 10dBm PA 端口需要 11 个无源器件，但通过使用 IPC，元件数量从 11 个减少为 1 个，从而节省空间，并降低贴片组装成本。

图 4-1 展示了 LAUNCHXL-CC1352P-4 10dBm 的效率为 10.9%，而 10dBm PA IPC 的效率为 9.6%，这表明非常紧凑的设计具有相似的性能。这意味着与标准参考设计相比，实施 10dBm PA IPC 时性能略有损失。

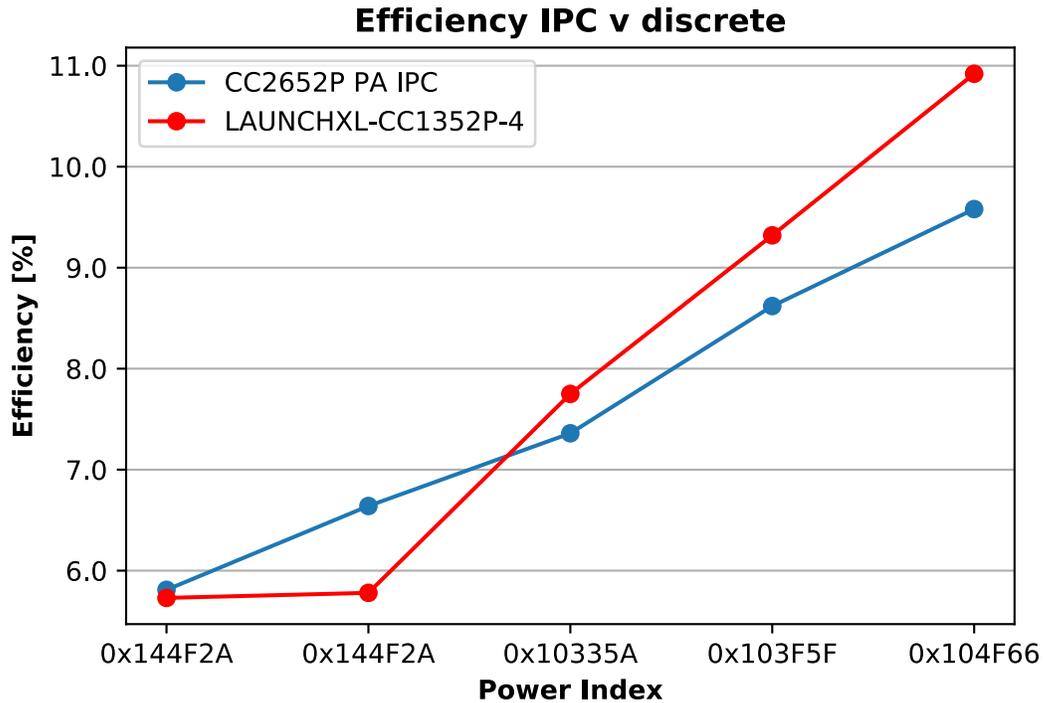


图 4-1. IPC 与分立式解决方案之间的效率对比

与分立式设计相比，10dBm PA IPC 有一些明显的优势。如果效率损失是可以接受的，那么 10dBm PA IPC 可以提供更紧凑的布局、更低的“贴片”生产成本和简单的布局。

5 参考文献

- [1] [CC2652P 数据表](#)
- [2] [CC1352P 数据表](#)
- [3] [Murata 联系信息](#)
- [4] [LAUNCHXL-CC2652P 参考设计](#)
- [5] [LAUNCHXL-CC1352P-4 参考设计](#)
- [6] [适用于 2.4GHz 配置的 Rx/5dBm Tx IPC 应用手册](#)
- [7] [CC13xx/CC26xx 硬件配置和 PCB 设计](#)

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