

*User's Guide***CCxxxx 器件的基本射频测试**

Abhishek Chattopadhyay, Dana Perez, and Andrew Lugo

摘要

本文档向德州仪器 (TI) 低功耗射频产品用户概括介绍了器件验证过程中执行的不同特性测试。本文档介绍了测试系统的基本设置，并提供了每个测试的过程信息。

在本文档全文中，术语 CCxxxx 是指低功耗 CC11xx、CC12xx、CC13xx、CC23xx、CC24xx、CC25xx、CC26xx 和 CC27xx 射频器件系列。

内容

1 简介	4
1.1 首字母缩写词	4
2 标准和系统要求	5
2.1 标准	5
2.2 测试设备供应商	5
2.3 无线电认证 URL	5
3 测试设备要求	6
3.1 系统设置	6
3.2 测试初始注意事项	7
3.3 测试提醒	7
4 软件设置	8
4.1 SmartRF Studio 7	8
4.2 SmartRF Studio 8	11
5 DUT 和测试仪器信息	14
5.1 DUT	14
5.2 测试仪器	14
6 时钟频率调谐	15
6.1 利用内部电容器阵列进行 HF 时钟调谐	15
6.2 LF 时钟调谐	16
7 传输测试	18
7.1 传输功率	18
7.2 功率谱密度掩码	20
7.3 误差矢量幅度	22
7.4 传输中心频率偏移	24
7.5 杂散辐射	26
8 接收测试	30
8.1 接收器敏感度	30
8.2 干扰测试	32
8.3 使用射频发生器的干扰测试	35
附录 A 偏移 EVM 与 EVM	38
B 参考资料	39
B 修订历史记录	39
插图清单	
图 4-1. SmartRF Studio 7 器件屏幕	8
图 4-2. SmartRF Studio 7 器件模式	9
图 4-3. SmartRF Studio 7 Radio Control Panel (无线电控制面板) - 运行模式	10

目录

图 4-4. SmartRF Studio 7 Radio Control Panel (无线电控制面板) - 无线电和器件设置.....	10
图 4-5. SmartRF Studio 7 帮助指南.....	11
图 4-6. SmartRF Studio 8 启动窗口.....	12
图 4-7. SmartRF Studio 8 Radio Control Window (无线电控制窗口)	13
图 4-8. SmartRF Studio 8 帮助指南.....	13
图 6-1. 高频时钟调谐设置示意图.....	15
图 6-2. 高频时钟调谐工作台设置.....	15
图 6-3. 低频时钟调谐工作台设置.....	16
图 7-1. 传输功率测试设置示意图.....	18
图 7-2. 传输功率测试工作台设置.....	18
图 7-3. 传输功率测试的频谱分析仪输出.....	19
图 7-4. 功率谱密度掩码要求.....	20
图 7-5. 功率谱密度掩码测试设置示意图.....	20
图 7-6. 功率谱密度掩码测试工作台设置.....	21
图 7-7. 功率谱密度掩码测试的频谱分析仪输出.....	21
图 7-8. 误差矢量幅度.....	22
图 7-9. EVM 及相关量.....	22
图 7-10. 误差矢量幅度测试设置示意图.....	23
图 7-11. 使用 SMA 连接器的误差矢量幅度测试工作台设置.....	23
图 7-12. 使用天线的误差矢量幅度测试工作台设置.....	24
图 7-13. 传输中心频率偏移测试设置示意图.....	25
图 7-14. 使用 SMA 连接器的传输中心频率偏移测试工作台设置.....	25
图 7-15. 使用天线的传输中心频率偏移测试工作台设置.....	25
图 7-16. 传输中心频率偏移测试的频谱分析仪输出.....	26
图 7-17. 杂散辐射测试设置示意图.....	27
图 7-18. 杂散辐射测试工作台设置.....	27
图 7-19. 杂散辐射测试的频谱分析仪输出.....	28
图 8-1. 接收器灵敏度测试设置示意图.....	30
图 8-2. 接收器灵敏度测试工作台设置 - 正面.....	31
图 8-3. 接收器灵敏度测试工作台设置 - 屏蔽箱.....	31
图 8-4. 接收器灵敏度测试工作台设置 - 顶部正面.....	32
图 8-5. 干扰测试设置示意图.....	33
图 8-6. 干扰测试工作台设置 - 概述.....	33
图 8-7. 干扰测试工作台设置 - 屏蔽箱.....	34
图 8-8. 干扰测试工作台设置 - TX 和干扰源连接.....	34
图 8-9. 使用射频发生器的干扰测试设置示意图.....	35
图 8-10. 使用射频发生器的干扰测试工作台设置 - 概述.....	36
图 8-11. 使用射频发生器的干扰测试工作台设置 - 屏蔽箱.....	36
图 8-12. 使用射频发生器的干扰测试工作台设置 - TX 连接。.....	37

表格清单

表 1-1. 术语和缩写.....	4
表 5-1. DUT 信息.....	14
表 5-2. 测试仪器信息.....	14
表 6-1. 时钟频率调谐.....	15
表 6-2. HF 振荡器结果.....	16
表 6-3. LF 振荡器结果.....	17
表 7-1. 传输测试汇总.....	18
表 7-2. 传输功率结果.....	20
表 7-3. IEEE 802.15.4 标准相关要求 (示例)	20
表 7-4. 功率谱密度掩码结果.....	22
表 7-5. 误差矢量幅度测试结果.....	24
表 7-6. 传输中心频率偏移测试结果.....	26
表 7-7. 杂散辐射测试结果.....	29
表 8-1. 接收测试汇总.....	30
表 8-2. 接收器灵敏度测试结果.....	32
表 8-3. 相邻通道测试结果.....	35
表 8-4. 备用信道测试结果.....	35

表 8-5. 相邻通道测试结果.....	37
表 8-6. 备用信道测试结果.....	37

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

本文档向德州仪器 (TI) 低功耗射频产品用户概括介绍了器件验证过程中执行的不同特性测试。本描述性文档使用用户能够更好地了解系统和功能，并提供了有关各种条件和参数下器件测试的一般信息。本文档介绍了测试系统的基本设置，并提供了每个测试的过程信息。

借助德州仪器 (TI) 的低功耗射频产品，可以更轻松地构建适用于远程控制、计量和检测应用的无线链路。大多数情况下，这些产品在无许可证或免许可证的无线产品中使用。无许可证仅意味着这些产品的用户不需要获得由电信监管机构颁发的单独许可证。无许可证并不意味着不受管制；无线产品本身通常必须满足严格的法规要求，并获得相应监管机构的认证。**FCC**、**ETSI** 和 **ARIB** 等不同的国际监管机构对无线电接收器和发送器的使用进行监管。这些机构维护着一些规范，应用报告中提及的每项测试中的所有器件都必须满足这些规范。请参阅相应的标准文档（请参阅节 2.1）。

1.1 首字母缩写词

表 1-1 列出了本文档中使用的许多术语和首字母缩写词。

表 1-1. 术语和缩写

首字母缩写词	定义/含义
ARIB	无线行业企业协会
dBm	测得的功率 dBm (以 1mW 为基准) 的功率比 (以分贝 (dB) 为单位)
DUT	被测器件
ETSI	欧洲电信标准化协会
EVM	误差矢量幅度
FCC	联邦通信委员会
FSQ	全谱量化
GUI	图形用户界面
HF	高频
IEEE	电气和电子工程师学会
INT	干扰源；干扰信号
ISM	工业、科学和医疗
LF	低频
MSK	最小频移键控
PER	误包率
PSD	功率谱密度
RBW	分辨率带宽
RSSI	接收信号强度指示器
RX	已接收，接收器
SMA	超小型 A 版连接器
SoC	片上系统
SPI	系统并行干扰
TX	发送，传输，发送器
VBW	视频带宽

2 标准和系统要求

2.1 标准

以下标准可作为本文档中描述之测试的参考。在文档发布时，所有电子链接都是最新的。

- 低功耗蓝牙 [射频 PHY](#) 标准
- Zigbee [RF4CE](#) 标准
- FCC 第 47 节 CFR15 - 第 15 部分 标准
- ETSI [EN 300 220-第 1 部分、第 2 部分、第 3-1 部分、第 3-2 部分、和第 4 部分](#) 标准
- ETSI [EN 300 328](#) 标准
- ETSI [EN 300 440](#) 标准
- IEEE [802.15.4](#) 标准
- ARIB [T-66](#) 标准
- ANSI [C63.10](#) 标准

2.2 测试设备供应商

可从以下供应商处购买不同测试设备，以执行本文档介绍的各种操作流程。某些此类设备可能需要从代理商处获取。在文档发布时，所有电子链接都是最新的。

- [Rohde and Schwarz](#)
- [Keysight](#)
- [Anritsu](#)
- [Tektronix](#)
- [National Instruments](#)

2.3 无线电认证 URL

CC26xx : <https://www.ti.com/tool/CC26XX-CERTIFICATION>

CC23xx : <https://www.ti.com/tool/download/CC23XX-REPORTS/7.20.00.00> (没有上面 CC26xx 的热站点) 。

3 测试设备要求

任何特性测试系统都有一些通用元件和额外的专业工程定制。典型的测试系统通常由以下元件和子系统组成：

- **信号分析仪（频谱分析仪）**：广泛使用这些工具测量所有类型射频电路的频率响应、噪声和失真特性。这些器件会比较各种条件下的输入和输出频谱。典型的测试系统通常只需要一台信号分析仪。
- **信号发生器**：这些器件（在模拟域或数字域中）产生重复或非重复电子信号。典型系统应至少有两台信号发生器：一台用于产生主信号，另一台用于产生干扰信号。TI 的 CC 器件可在某些实验室设置中用作信号源。但是，功率分辨率可能不如信号发生器产生的功率分辨率。
- **温控腔**：一个箱体，用于测试指定温度条件对一系列测试器件的影响壳。对于大多数测试系统，单个温控腔应该足够了。
- **连接器/电缆/分线器**：这些元件使用同轴电缆将不同的信号从测试系统连接到（以及从）被测器件（DUT）（连接到测试系统）。
- **SmartRF™ Studio**：SmartRF Studio（请参阅[参考资料 5](#)）是一种 Windows 应用，可用于评估和配置德州仪器（TI）的低功耗射频集成电路。该工具可帮助射频系统设计人员在设计过程早期阶段快速轻松地评估相应的器件。它对于生成配置寄存器值、射频系统的实际测试以及找出优化的外部元件值特别有用。SmartRF Studio 可作为单独的应用使用，也可与所有 SimpleLink LaunchPad 评估板配合使用。
- **网络分析仪（矢量网络分析仪器）**：该工具是一种测量电气网络的网络参数的仪器。现代网络分析仪通常测量 s 参数，因为在高频下电气网络的反射和传输很容易测量，但还有其他网络参数集，例如 y 参数、z 参数和 h 参数。网络分析仪通常用于表征双端口网络，如放大器和滤波器；它们也可用于具有任意数量端口的网络。准备好一个网络分析仪很有用。
- **示波器**：这种电子测试仪器让用户可以观察不断变化的信号电压，通常显示为包括一个或多个电势差的二维图形，其中垂直轴或 Y 轴绘制为时间（水平轴或 x 轴）的函数。尽管示波器在垂直轴上显示电压，但也可以显示任何可转换为电压的其他量。在大多数情况下，示波器显示重复出现且没有变化或变化缓慢的事件。使用示波器对于测试系统很有用。

测试配置中的设备越多，各种测试过程自动化的需求就越大。

请记住，给定测试系统中使用的可用设备的功能很可能限制可执行的测试类型。

3.1 系统设置

本文档介绍了两种类型的测试系统配置：传导测试和辐射测试。本部分简要介绍每种配置。实际设置因测试而异，并在每个测试的开头描述。所有测试都将是传导测试，除非规定测试可以是辐射测试。

3.1.1 传导测试系统

用于传导测试的系统使用以下测试设备和资源。

1. CCxxxx Launchpad™ 开发套件
2. LaunchPad™ 开发套件调试器（LP-XDS110 或 LP-XDS110ET，如果 CCxxxx LaunchPad 没有板载调试器器件，则需要使用）
3. RF 电缆
4. 可变衰减器（需要两台，可以用固定衰减器替代）
5. 安装了 SmartRF Studio 软件的 PC
6. 射频耦合器（组合器）
7. 射频信号发生器
8. 频谱分析仪

3.1.2 辐射测试系统

用于辐射测试的系统使用以下测试设备和资源。

1. CCxxxx Launchpad™ 开发套件
2. LaunchPad™ 开发套件调试器（LP-XDS110 或 LP-XDS110ET，如果 CCxxxx LaunchPad 没有板载调试器器件，则需要使用）
3. 天线
4. 可变衰减器（需要两台，可以用固定衰减器替代）

5. 安装了 [SmartRF Studio](#) 软件的 PC
6. 射频耦合器 (组合器)
7. 射频信号发生器
8. 频谱分析仪

3.2 测试初始注意事项

- 对于传导测量，被测器件 (DUT) 通过带有 SMA 连接器的 50Ω 射频电缆连接到测试仪。默认情况下，LaunchPad 将射频信号路径路由到其 PCB 天线。要将信号路径重新路由到其 SMA 连接器，必须在电路板上将此连接器附近的电容器旋转 90° 。这需要将电容器从原位置拆焊、旋转并重新焊接到新位置。有关详细信息，请参阅 LaunchPad 用户指南。
- 对于辐射测量，被测器件 (DUT) 必须连接到天线。相应地，频谱分析仪必须在输入端连接一根天线。默认情况下，LaunchPad 将射频信号路径路由到其 PCB 天线，因此不需要进行任何改动。如果必须将外部天线连接到 SMA 连接器，请按照上一段中所示的步骤旋转电容器。请注意，辐射测量通常在电波暗室内进行，以防止干扰和信号反射，否则这可能会导致读数不一致或不准确。
- 对于 RX 测试，输入参考信号 (可以是所需信号和干扰信号) 应具有某些特性，必须根据相应的标准文档设置这些特性。
- 所需信号的有效载荷内容应是相关标准指定的序列。对于所有发送的数据包，它们必须相同。
- 在使用干扰信号的测试用例中，必须根据评估器件时适用的标准来定义干扰信号特性。

3.3 测试提醒

无论在给定条件下使用何种测试设置，这些提醒均可作为所有用户的一般注意事项。

1. 将 DUT 连接到信号分析仪的 SMA 电缆必须具有 50Ω 特性阻抗，以便与 DUT 的 SMA 端口的 50Ω 匹配。
2. 执行灵敏度测量时，必须屏蔽 RX 板。
3. 在执行灵敏度测试时，良好的屏蔽测试是将衰减增加至高于产品数据表中规定的灵敏度 20dB 至 40dB 。如果 RX 能够拾取 TX 信号，则必须改进屏蔽。
4. 执行这些测试时，最好将 TX 和 INT 无线电的输出功率保持在大约 0dBm ，并使用不同衰减器提供的衰减。
5. 在干扰信号设置中，最好通过只关闭另一个输出并检查 RX 端的 RSSI 来关联 TX 和 INT 输出。这些测试应在发送器处于连续发送模式下执行。
6. 射频耦合器是不对称的。应考虑与有损耗路径相关的衰减。如果使用分线器 (即组合器)，则应保持对称，使得两条路径上的衰减相同。
7. 干扰信号应处于连续发送模式。
8. 如果载波未调制，TX 和 INT 之间产生的输出功率差异指示阻塞。
9. 如果载波经过调制，则 TX 和 INT 之间产生的输出功率差异指示选择性。
10. 如果 DUT 和测试仪兼容 LaunchPad，则可以使用 SmartRF Studio 来控制 DUT、测试仪或两者。通过在所测试的频段 (低于 1GHz 或 2.4GHz) 范围设置其发送和接收参数，该工具支持各种测试程序，例如 BER/ PER Rx 灵敏度、Tx 输出功率等。
11. 如果在使用射频发生器测试 IEEE 802.15.4 系统中的干扰时使用调制载波，请使用连续 MSK、 2Mbps 调制载波。
12. 保持电缆/衰减器/连接器洁净。否则，电缆中的损耗可能会过大。
13. 使用天线进行辐射测量时，请在测试前参阅 [SWRA726](#)。

4 软件设置

本文档中的所有测试均使用 SmartRF Studio，器件将使用 SmartRF Studio 7 或 SmartRF Studio 8（根据器件而定）。本部分节简要介绍了将器件连接到安装了 SmartRF Studio 的 PC 后如何设置软件。

请注意，软件中的一些选项不会显示，具体取决于所测试 EM 或 LaunchPad 的功能。

4.1 SmartRF Studio 7

4.1.1 SmartRF Studio 7 启动窗口

将 LaunchPad 连接到 PC 后，在 SmartRF Studio 7 启动窗口中，双击“List of Connected Devices”（已连接器件列表）中的器件名称，即可打开“Device Control Panel”（器件控制面板）。

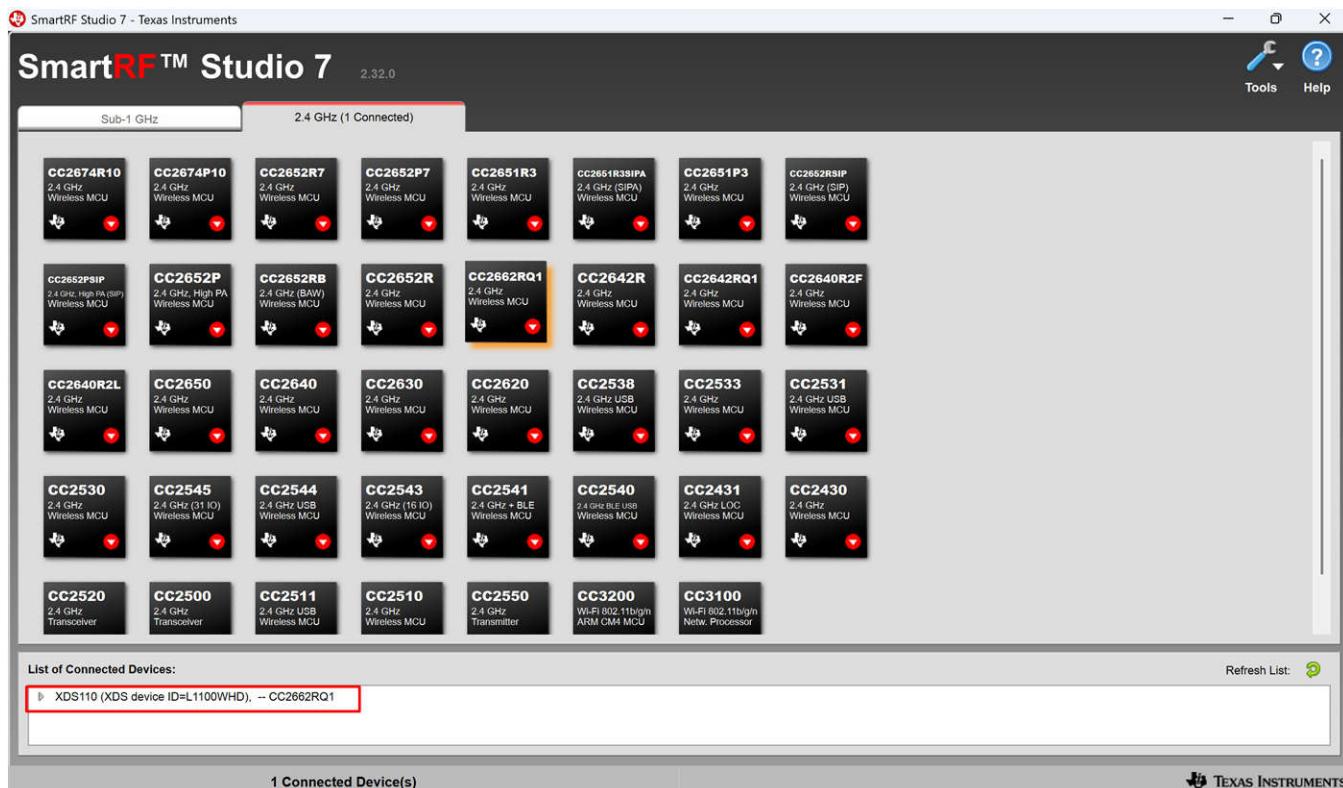


图 4-1. SmartRF Studio 7 器件屏幕

4.1.2 SmartRF Studio 7 模式

根据器件的不同，可能有多种可用模式/PHY，即 BLE 模式、专有模式和 IEEE 802.15.4。选择最适合测试需求的模式。如果只有一种模式，则不会出现任何选项，并且“Device Control Panel”（器件控制面板）弹出并显示相应的模式。

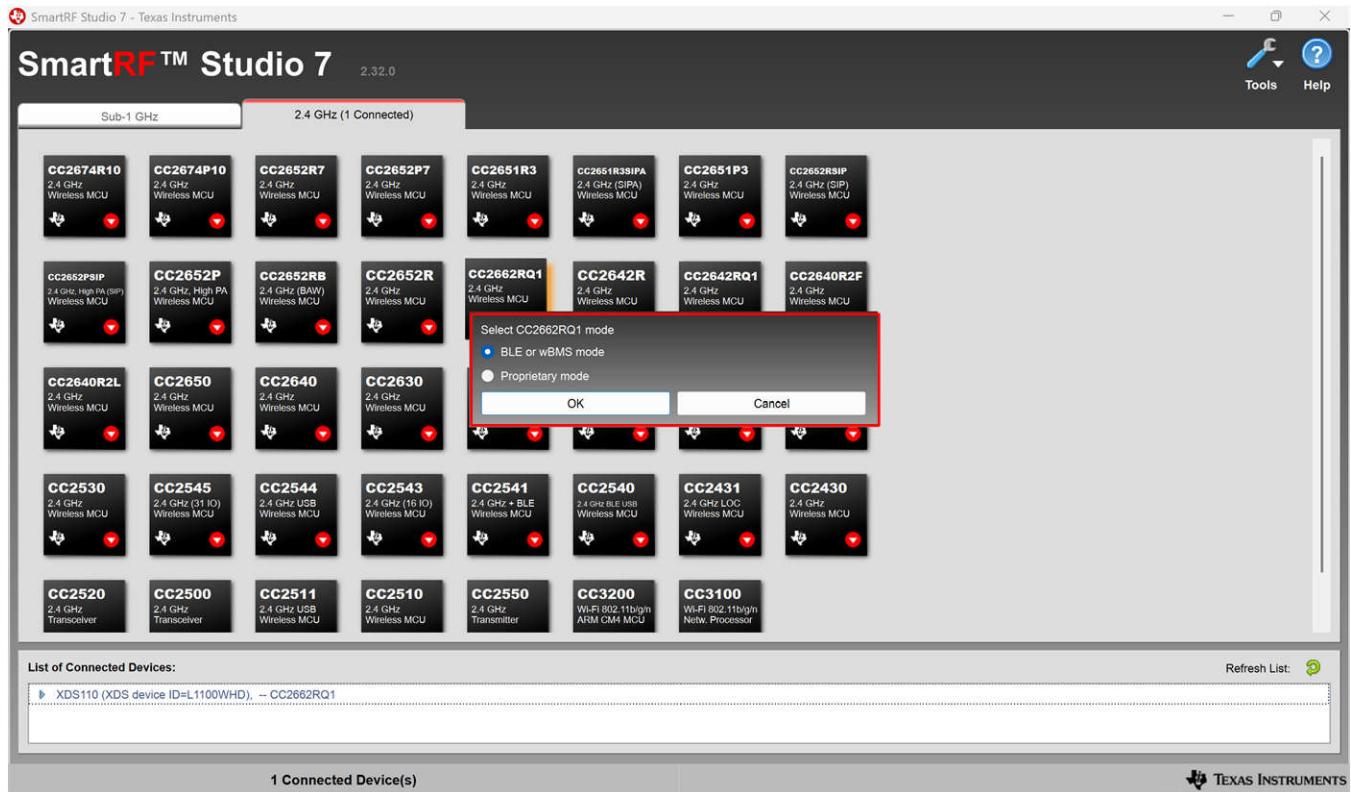


图 4-2. SmartRF Studio 7 器件模式

4.1.3 SmartRF Studio 7 Device Control Panel (器件控制面板)

在“Device Control Panel”（器件控制面板）上，根据需要使用适当的设置和射频参数来设置器件。特性测试的一些重要设置包括射频测试模式、调制设置和电容阵列调谐。对于 IEEE 802.15.4 (Zigbee) 模式，需要进行 EVM 测试。某些器件还具有“Easy Mode”（简易模式）和“Expert Mode”（专业模式）。这些模式可以在“Device Control Panel”（器件控制面板）上选择，在该面板中，需要使用“Expert Mode”（专业模式）来完成涵盖本文档中的特性测试。数据格式也会根据特性测试而变化。

软件设置

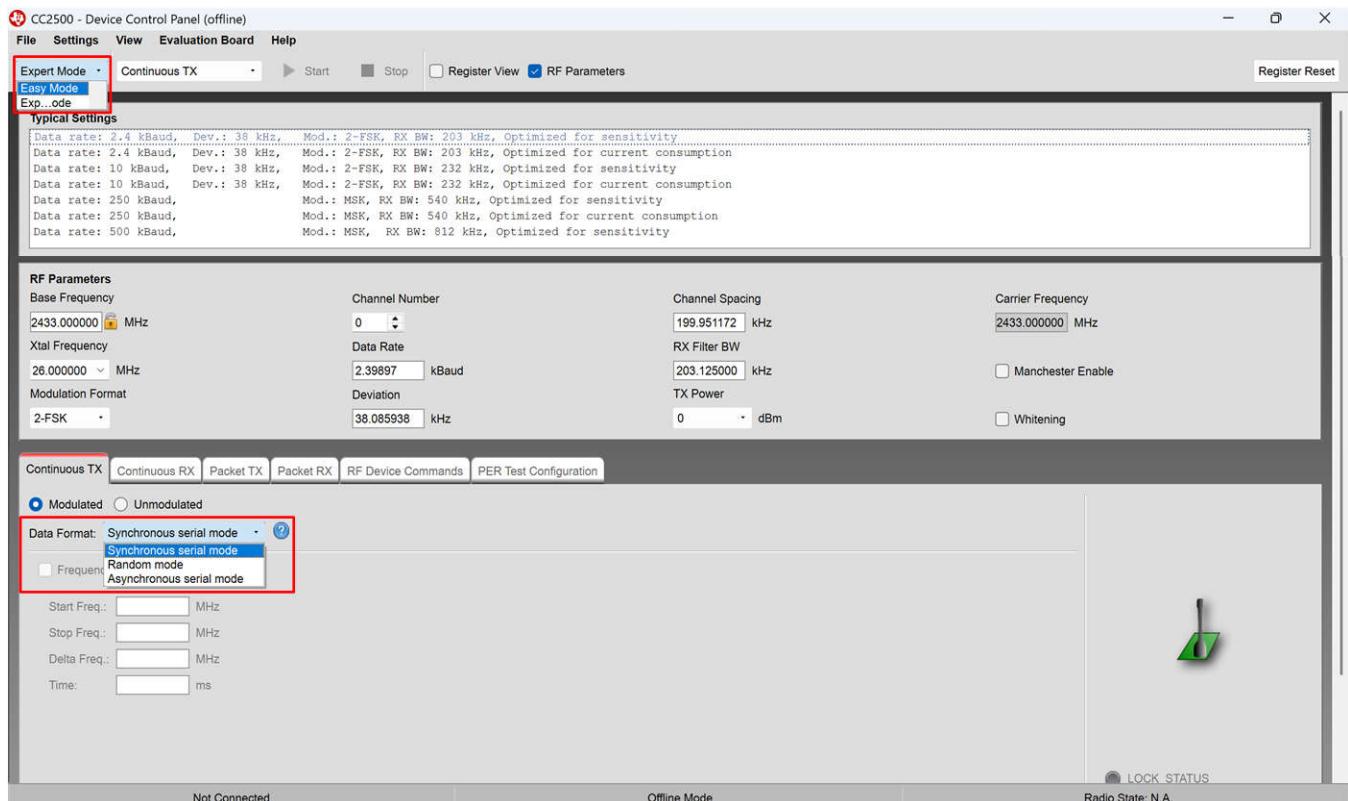


图 4-3. SmartRF Studio 7 Radio Control Panel (无线电控制面板) - 运行模式

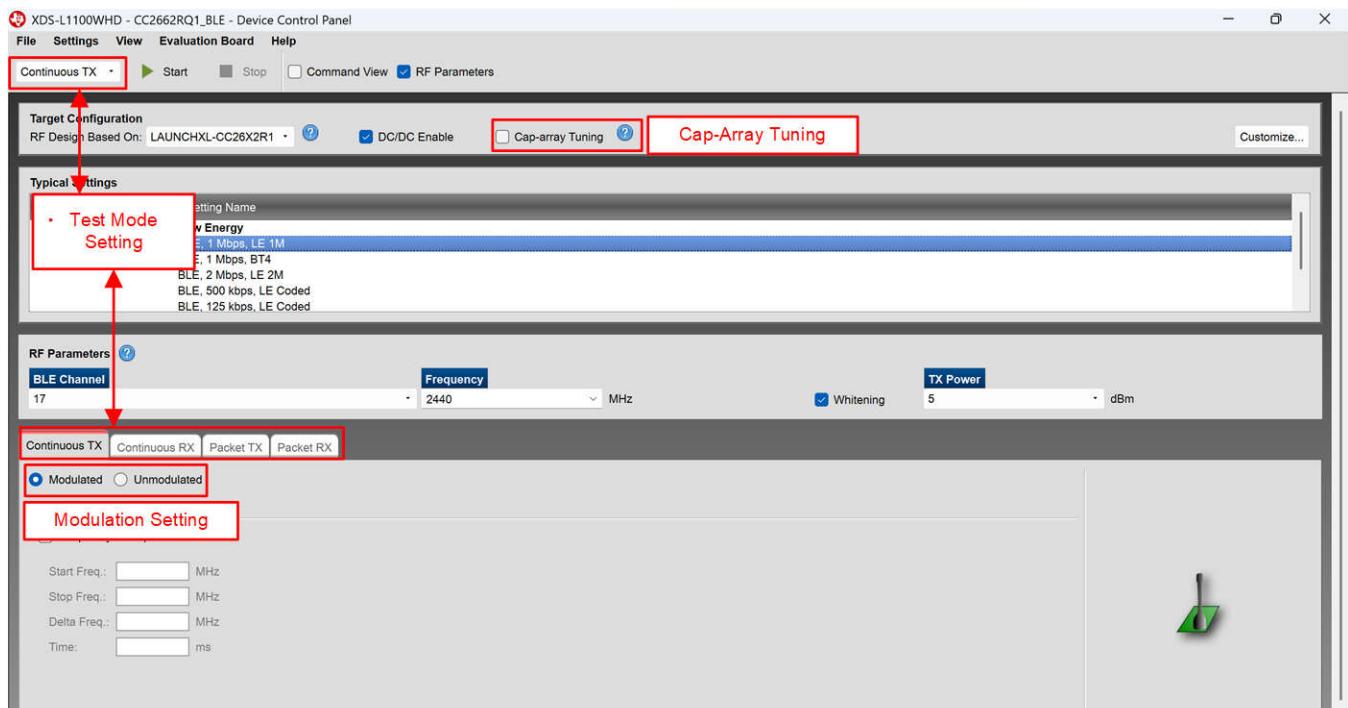


图 4-4. SmartRF Studio 7 Radio Control Panel (无线电控制面板) - 无线电和器件设置

4.1.4 SmartRF Studio 7 软件用户手册

要获得更多高级帮助，请在启动窗口中单击右上角的帮助按钮。出现“SmartRF Studio Help”（SmartRF Studio 帮助窗口）后，单击“Browse Complete Help Document...”（浏览完整帮助文档...），以打开 SmartRF Studio v7 用户手册。

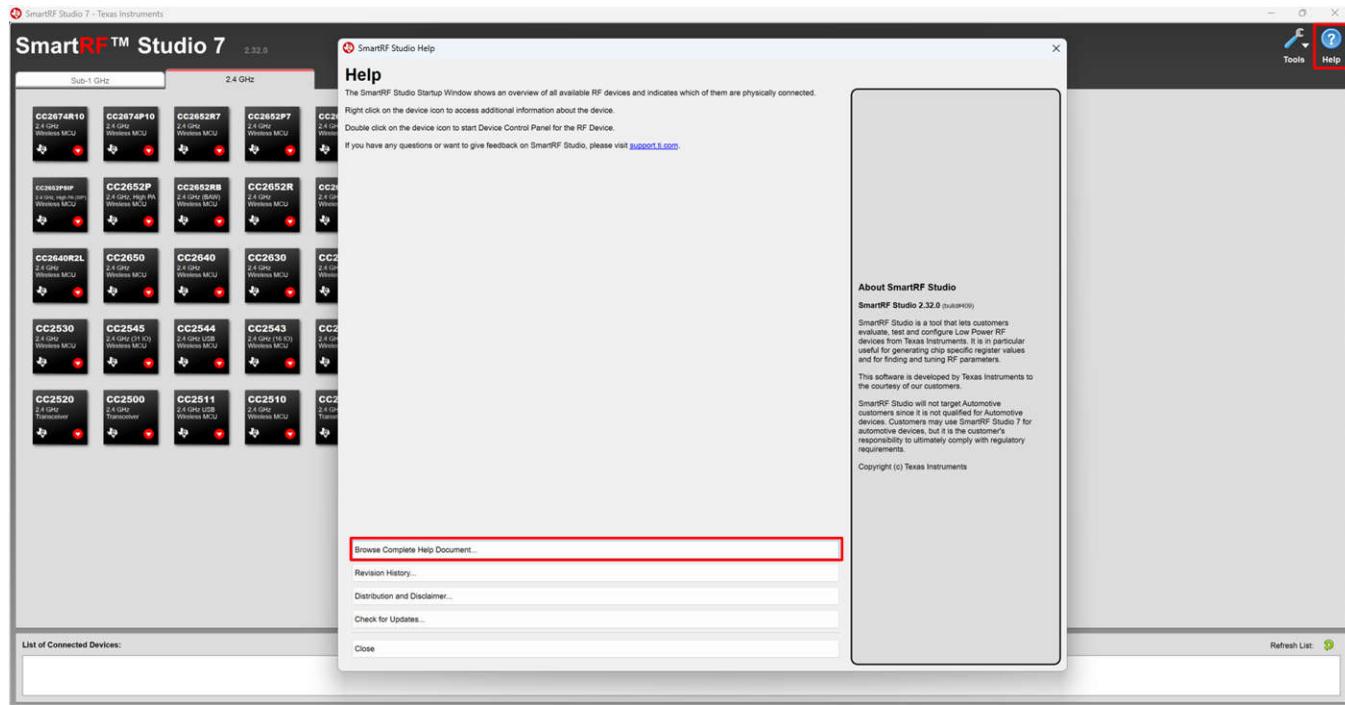


图 4-5. SmartRF Studio 7 帮助指南

4.2 SmartRF Studio 8

4.2.1 SmartRF Studio 8 启动窗口

将 LaunchPad 连接到 PC 后，在 SmartRF Studio 8 启动窗口中，双击“Device Selection”（器件选型）列表中的器件名称，即可打开“Radio Control Window”（无线电控制窗口）。如果连接正确，调试探针的序列号将显示在器件名称下。

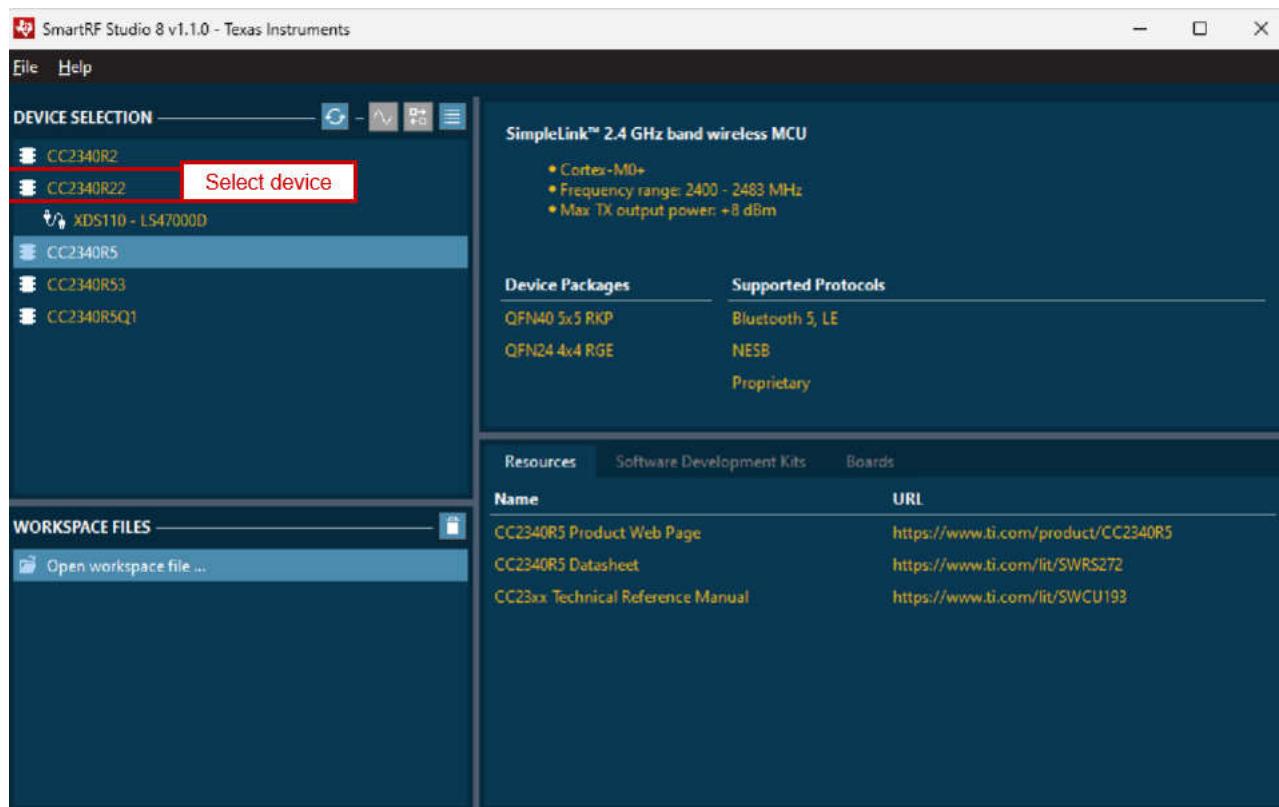


图 4-6. SmartRF Studio 8 启动窗口

4.2.2 SmartRF Studio 8 Radio Control Window (无线电控制窗口)

当“Radio Control Window”（无线电控制窗口）显示时，根据测试需求配置器件。特性测试的一些重要设置包括射频测试模式、PHY 选择、PHY 属性、信号类型和 HFXT 电容阵列调谐。

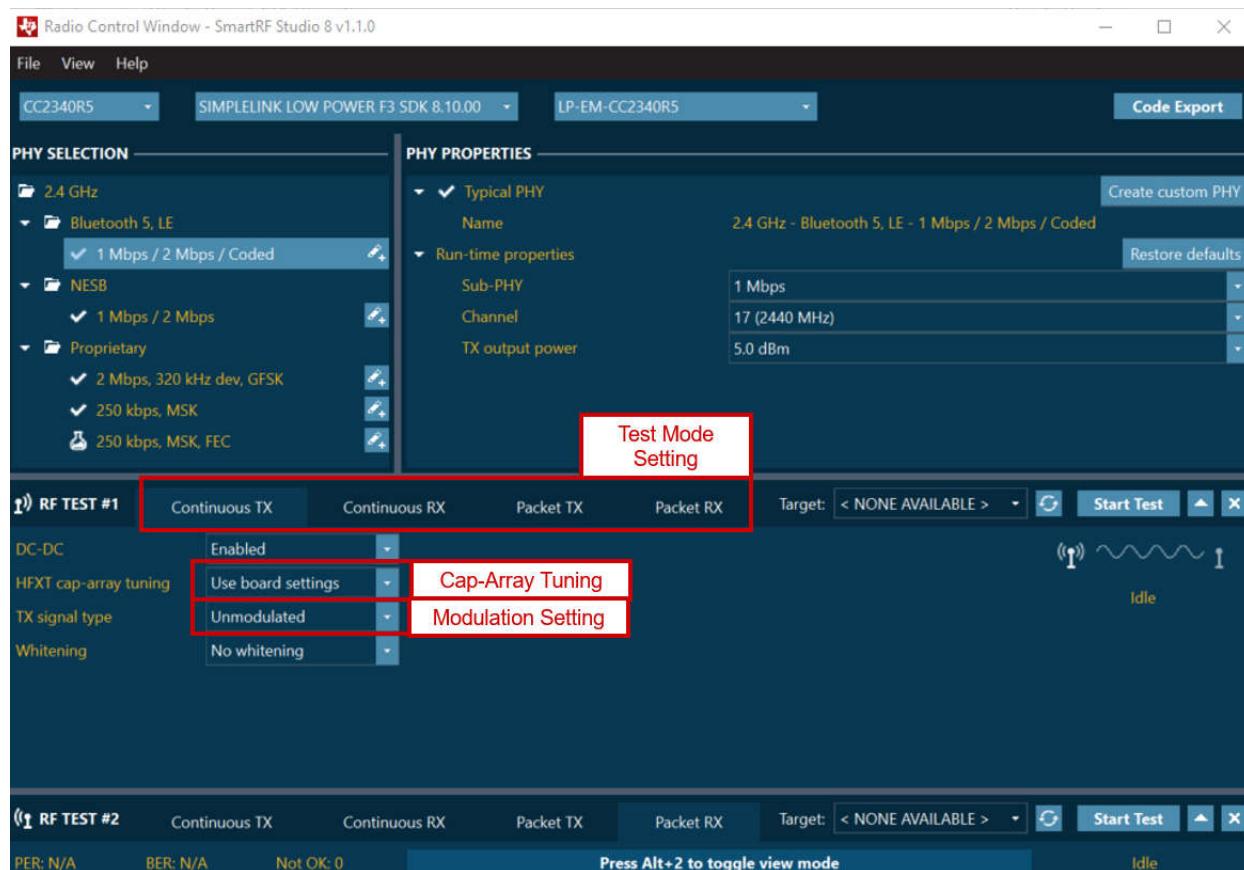


图 4-7. SmartRF Studio 8 Radio Control Window (无线电控制窗口)

4.2.3 SmartRF Studio 8 软件用户指南

有关更多高级信息，请在使用软件时单击 F1 键，或在左上角的窗口功能区中选择“Help”（帮助），然后选择“User Guide...”（用户指南...）以打开 SmartRF Studio 8 的“Help Viewer”（帮助查看器）。

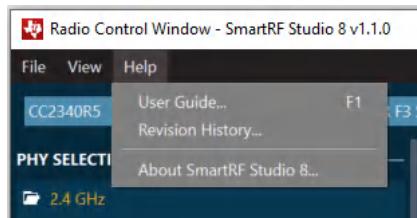


图 4-8. SmartRF Studio 8 帮助指南

5 DUT 和测试仪器信息

本页（以及后续页面）可打印出来作为相应测试设置详细信息的记录。

5.1 DUT

表 5-1 展展示了通用 DUT 信息。

表 5-1. DUT 信息

产品	
模型名称	
硬件版本	
主机接口类型	
模块 SN	

5.2 测试仪器

表 5-2 列出了常规测试仪器数据。（有关更多信息，请参阅 节 3。）

表 5-2. 测试仪器信息

条目	供应商	模型名称	数量
信号发生器			
功率组合器			
频谱分析仪			
电能表			
衰减器			
温控腔			
示波器			
网络分析仪			

6 时钟频率调谐

有关振荡器频率调谐汇总，请参阅表 6-1。

表 6-1. 时钟频率调谐

章节编号	条目	结果
节 6.1	HF 时钟调谐	
节 6.2	LF 时钟调谐	

6.1 利用内部电容器阵列进行 HF 时钟调谐

目的：通过调整器件的内部电容器阵列设置，调节 HF 晶体时钟精度，以满足晶体时钟精度规格。

通过条件：采用最终电容器阵列设置，命令射频输出频率在晶体数据表指定的容差范围内。

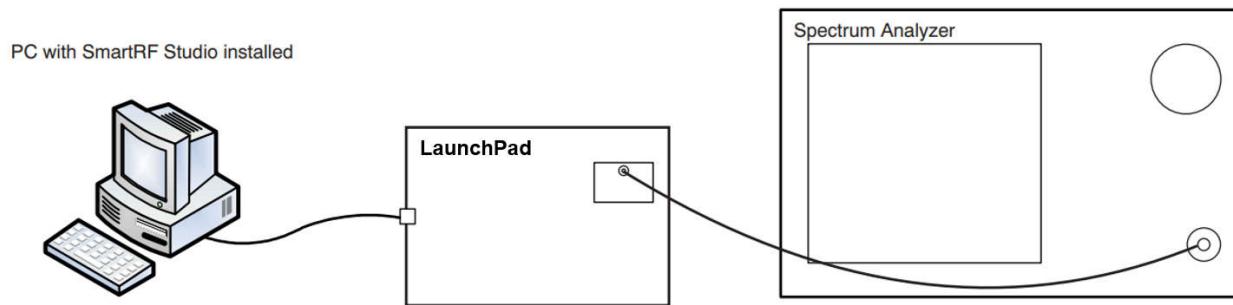


图 6-1. 高频时钟调谐设置示意图

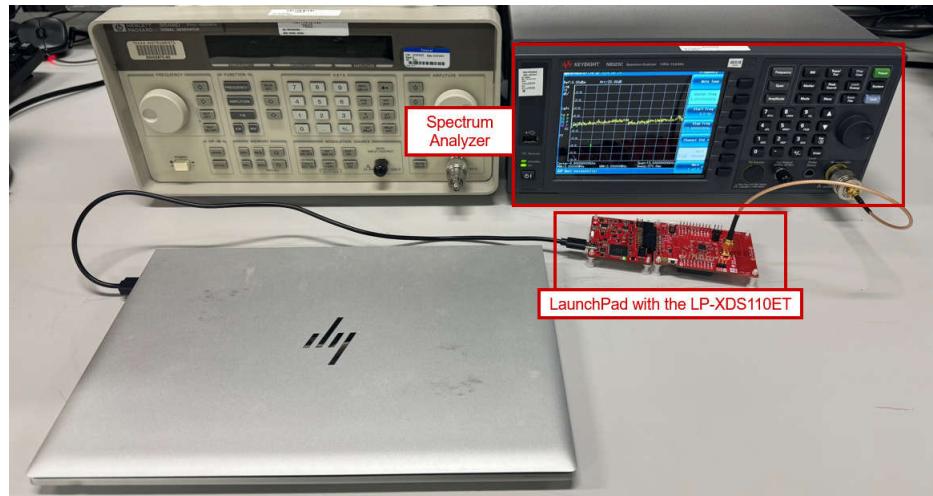


图 6-2. 高频时钟调谐工作台设置

步骤：

- 第 1 步：按图 6-1 和图 6-2 所示连接仪器。
- 第 2 步：打开 SmartRF Studio 并根据射频参数选择所需的频率。
- 第 3 步：选中（启用）“Cap-Array Tuning”（电容阵列调谐）。从 0 处的电容队列开始。
- 第 4 步：在“Continuous TX”（连续 TX）选项卡上，确保未调制 TX 然后单击“start”（启动）。
- 第 5 步：在频谱分析仪上测量的输出频率。
- 第 6 步：如果测得的频率超出命令频率的容差，请停止输出信号，然后根据所需的调整更改电容阵列（增量）值。如果测得的频率高于命令频率，请增大电容阵列设置。如果测得的频率低于命令频率，请减小电容阵列设置。
- 第 7 步：启用射频输出并重新测量输出频率。

- 第 8 步：重复第 6-7 步，直到找到一个电容阵列增量值，该值产生的测得频率尽可能接近命令频率。

备注

确保降低频谱分析仪的 RBW 和频率范围，确保测得的频率分辨率至少在数百 Hz 范围内。此外，建议使用具有精密频率基准的频谱分析仪，以获得出色精度。对于定制应用，请参阅 [SWRA495](#) 以获得晶体选型和实现方面的帮助。

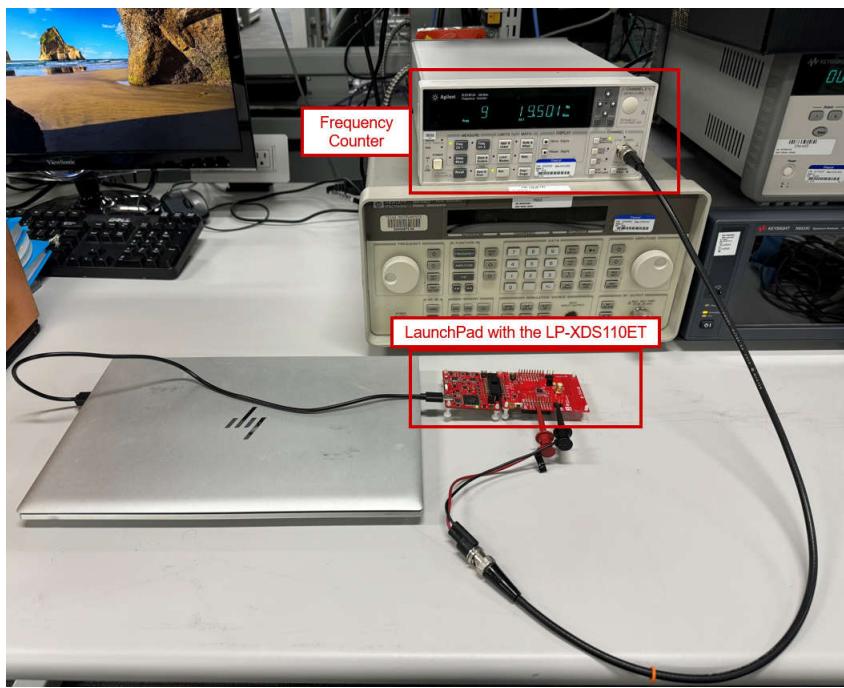
表 6-2. HF 振荡器结果

	电容阵列值	所选频率	输出频率	频率增量	PPM
1					
2					
3					
4					

6.2 LF 时钟调谐

目的：通过调整 LF 晶体的负载电容，调节 LF 晶体时钟精度，以满足晶体时钟精度规格。

通过条件：安装了最终负载电容值后，LF 时钟输出频率在晶体数据表指定的容差范围内。

**图 6-3. 低频时钟调谐工作台设置****步骤：**

- 第 1 步：使用 Code Composer 生成软件负载，将容易探测的 LF 时钟输出到 GPIO。
- 第 2 步：借助您的首选编程工具 (Uniflash 或 SmartRF Flash Programmer)，使用该软件负载对器件进行编程。
- 第 3 步：按 [图 6-3](#) 所示连接仪器。
- 第 4 步：为器件加电并测量分配的 GPIO 引脚的频率以输出 LF 时钟。
- 第 5 步：如果 LF 时钟频率超出容差或者与额定频率的偏差大于预期，请调整负载电容以适当地改变频率。通常，增加负载电容会降低频率，而减少负载电容会增加频率。
- 第 6 步：调整负载电容后，重复第 4 步和第 5 步，直到获得所需的频率时钟精度。

表 6-3. LF 振荡器结果

	电容器 1 值	电容器 2 值	输出频率	PPM
1				
2				
3				

7 传输测试

有关各种传输测试汇总，请参阅表 7-1。

表 7-1. 传输测试汇总

章节编号	条目	结果
节 7.1	传输功率	
节 7.2	功率谱密度掩码	
节 7.3	误差矢量幅度	
节 7.4	传输中心频率偏移	
节 7.5	传输时的杂散发射	

7.1 传输功率

目的：验证 DUT 的传输输出功率是否符合标准限制。

通过条件：有关规范和通过条件，请参阅相应的标准文档。

测试环境：图 7-1 说明传输功率测试设置。

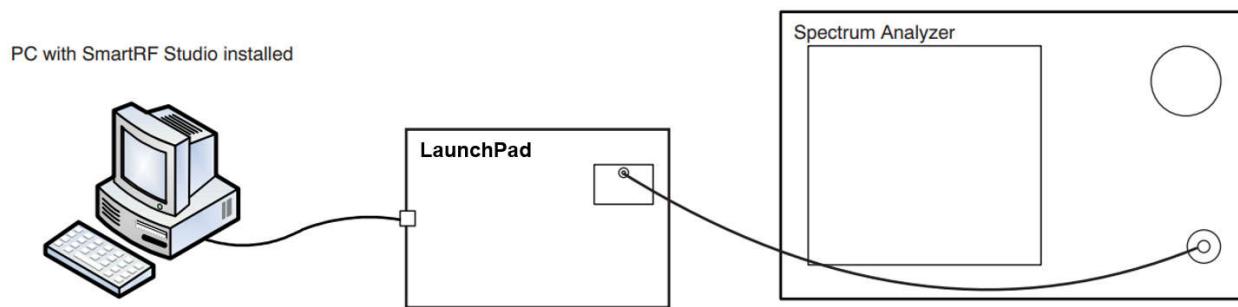


图 7-1. 传输功率测试设置示意图

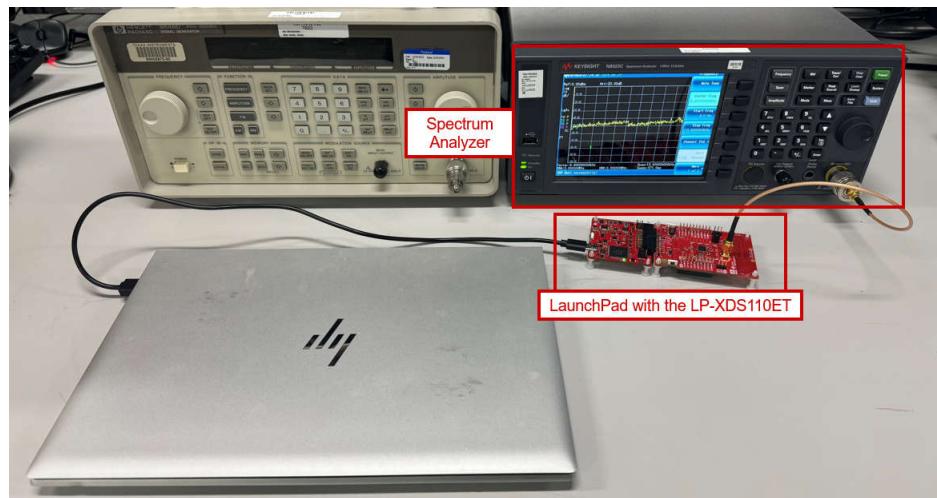


图 7-2. 传输功率测试工作台设置

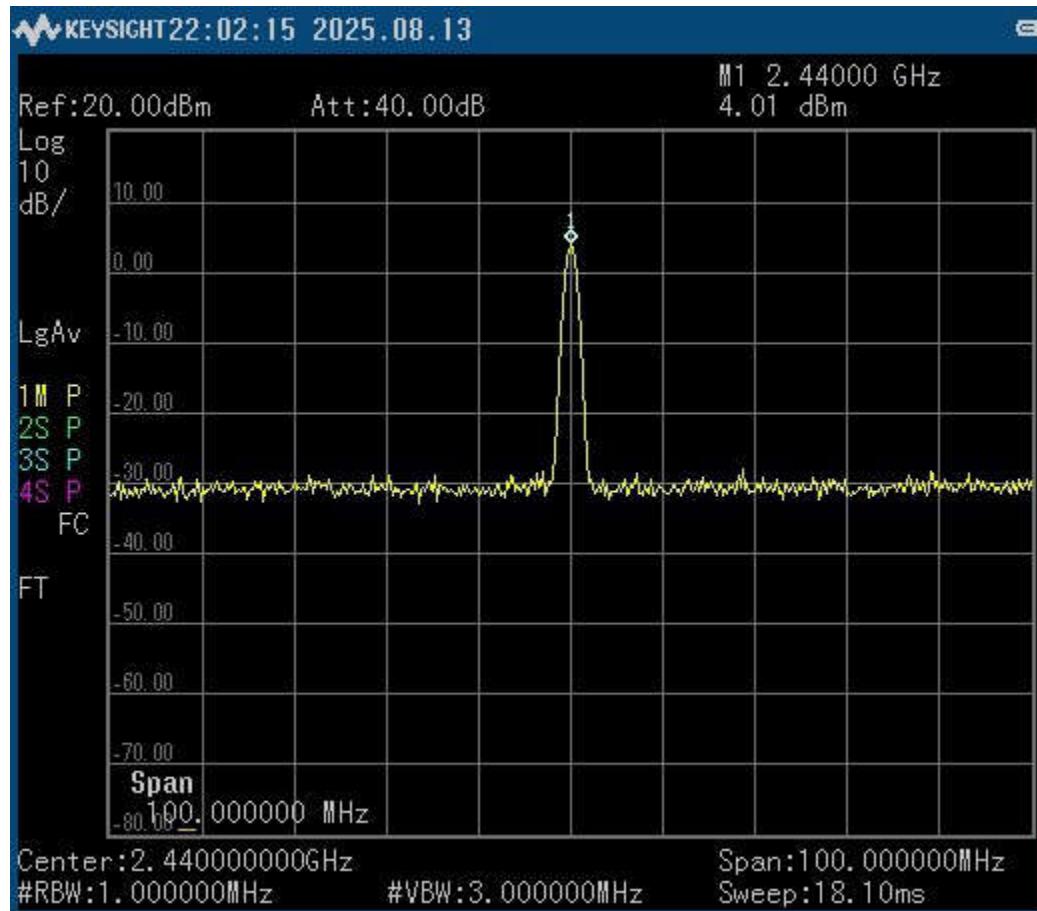


图 7-3. 传输功率测试的频谱分析仪输出

步骤：

- 第 1 步：按 [图 7-1](#) 和 [图 7-2](#) 所示连接仪器。
- 第 2 步：通过 SmartRF Studio，将 EM 设置为未调制的连续 TX 模式（具有适当的输出功率级别），然后单击“Start”（启动）。
- 第 3 步：测量频谱分析仪上的输出功率级别，以确认在 EM 上编程的输出功率。（参考 [图 7-3](#)，查看频谱分析仪上结果的示例）

备注

要获得器件的真正输出功率，请将电缆损耗重新添加到测得的输出功率中。

备注

您产品的传输功率必须符合产品销售地区的地区监管机构规定的限制。例如：

ETSI (欧洲电信标准化协会) EN 300 328：监管 2.4GHz 频段。

- EIRP (有效全向辐射功率) 最大值为 20dBm。

FCC (美国联邦通信委员会)

- EIRP (有效全向辐射功率) 最大值为 36dBm。

验证您的产品设计是否符合每个目标市场的相应监管机构规定的 2.4GHz 频段的具体最大传输功率限制。

表 7-2. 传输功率结果

	输出功率 (dBm)			设计规格 (dBm)	通过/失败 ?
	频率 1 (MHz)	频率 2 (MHz)	频率 3 (MHz)		
1					
2					

测试结果：

7.2 功率谱密度掩码

目的：验证 DUT 的 PSD 是否能够符合规定的合规限制。

通过条件：请参阅相应的标准文档。表 7-3 展示了 IEEE 802.15.4 标准相关要求的示例。图 7-4 对相关要求进行说明。

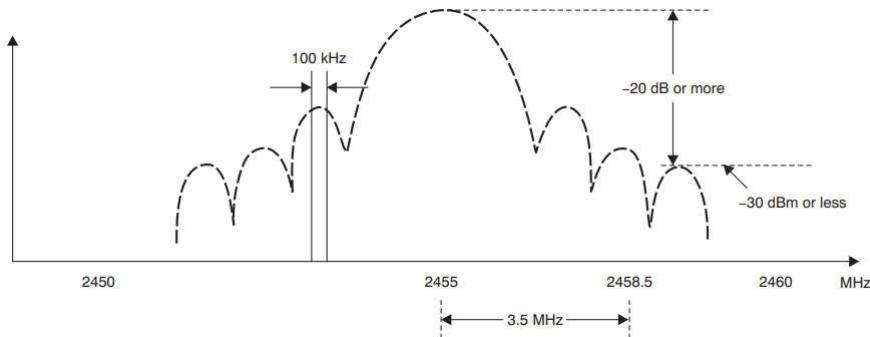


图 7-4. 功率谱密度掩码要求

表 7-3. IEEE 802.15.4 标准相关要求 (示例)

频率	相对限值	绝对限值
$ f - f_c > 3.5 \text{ MHz}$	-20dB	-30dBm

测试环境：图 7-5 展示了测试设置。

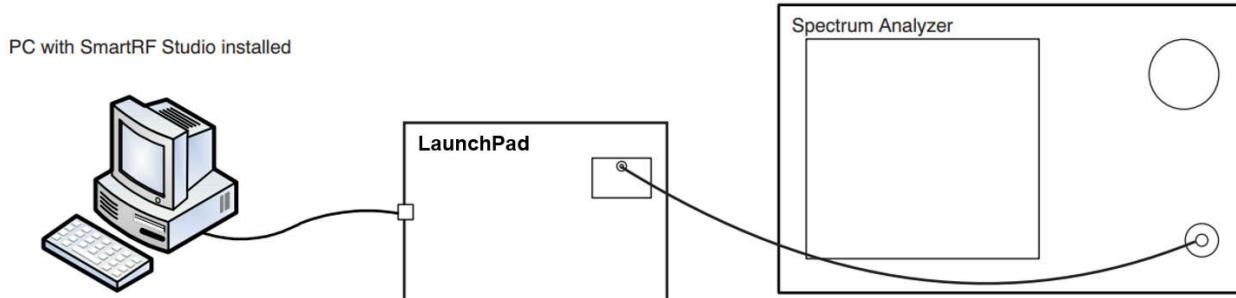


图 7-5. 功率谱密度掩码测试设置示意图

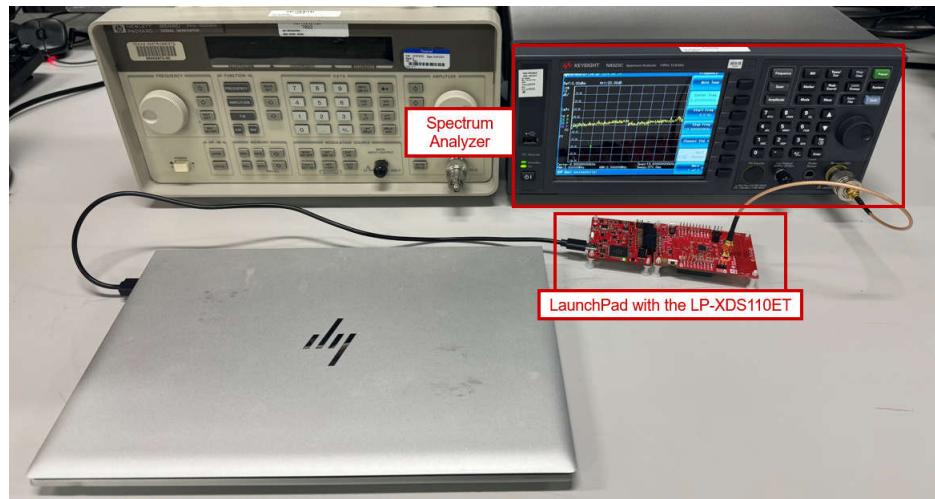


图 7-6. 功率谱密度掩码测试工作台设置

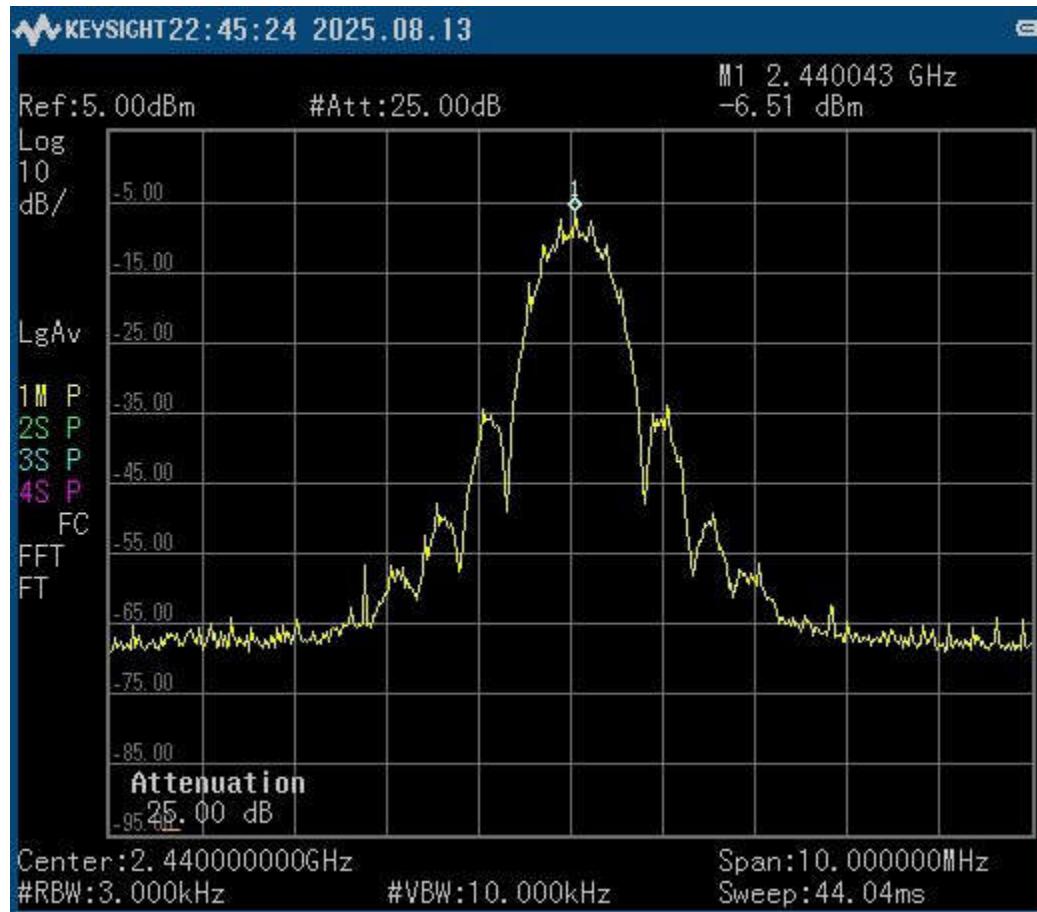


图 7-7. 功率谱密度掩码测试的频谱分析仪输出

步骤：

- 第 1 步：按 [图 7-5](#) 和 [图 7-6](#) 所示连接仪器。
- 第 2 步：打开 SmartRF Studio 并根据射频参数选择所需的频率。
- 第 3 步：通过 SmartRF Studio，将 EM 设置为经过调制的连续 TX 模式，然后单击“start”（启动）。
- 第 4 步：在频谱分析仪上验证 PSD 掩码是否符合给定标准。（参考 [图 7-7](#)，查看频谱分析仪上结果的示例）

备注

要获得器件的真正输出功率，请将电缆损耗重新添加到测得的输出功率中。

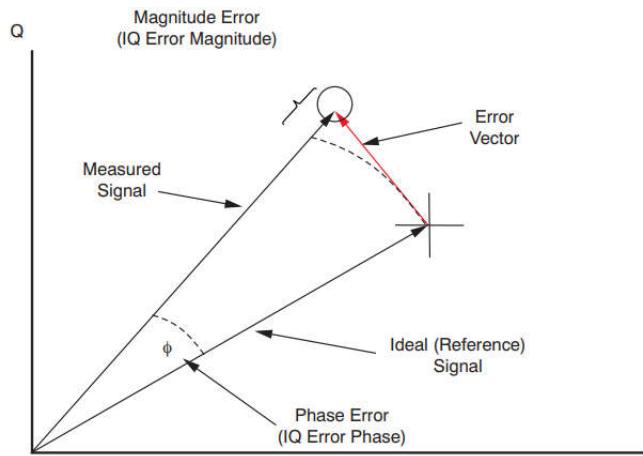
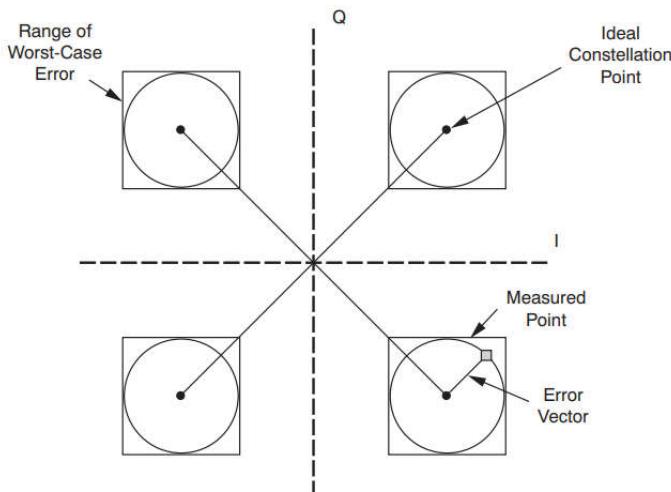
表 7-4. 功率谱密度掩码结果

	PSD 相对限值 (%)			设计规格 (%)	通过/失败 ?
	频率 1 (MHz)	频率 2 (MHz)	频率 3 (MHz)		
1					
2					

测试结果：

7.3 误差矢量幅度

目的：使用误差矢量幅度 (EVM) 测量传输调制精度。EVM (如图 7-8 和图 7-9 所示) 是理想基准信号与测得的传输信号之间相位差的幅度，是该时间的函数。

**图 7-8. 误差矢量幅度****图 7-9. EVM 及相关量**

通过条件：有关规范和通过条件，请参阅相应的标准文档。

测试环境： 图 7-10 展示了 EVM 测试的设置。图 7-10

PC with SmartRF Studio installed

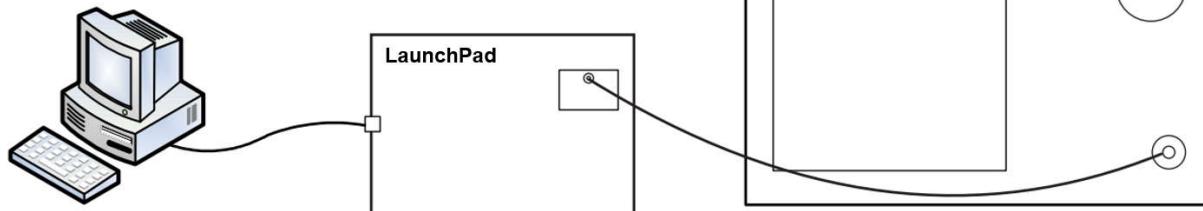


图 7-10. 误差矢量幅度测试设置示意图

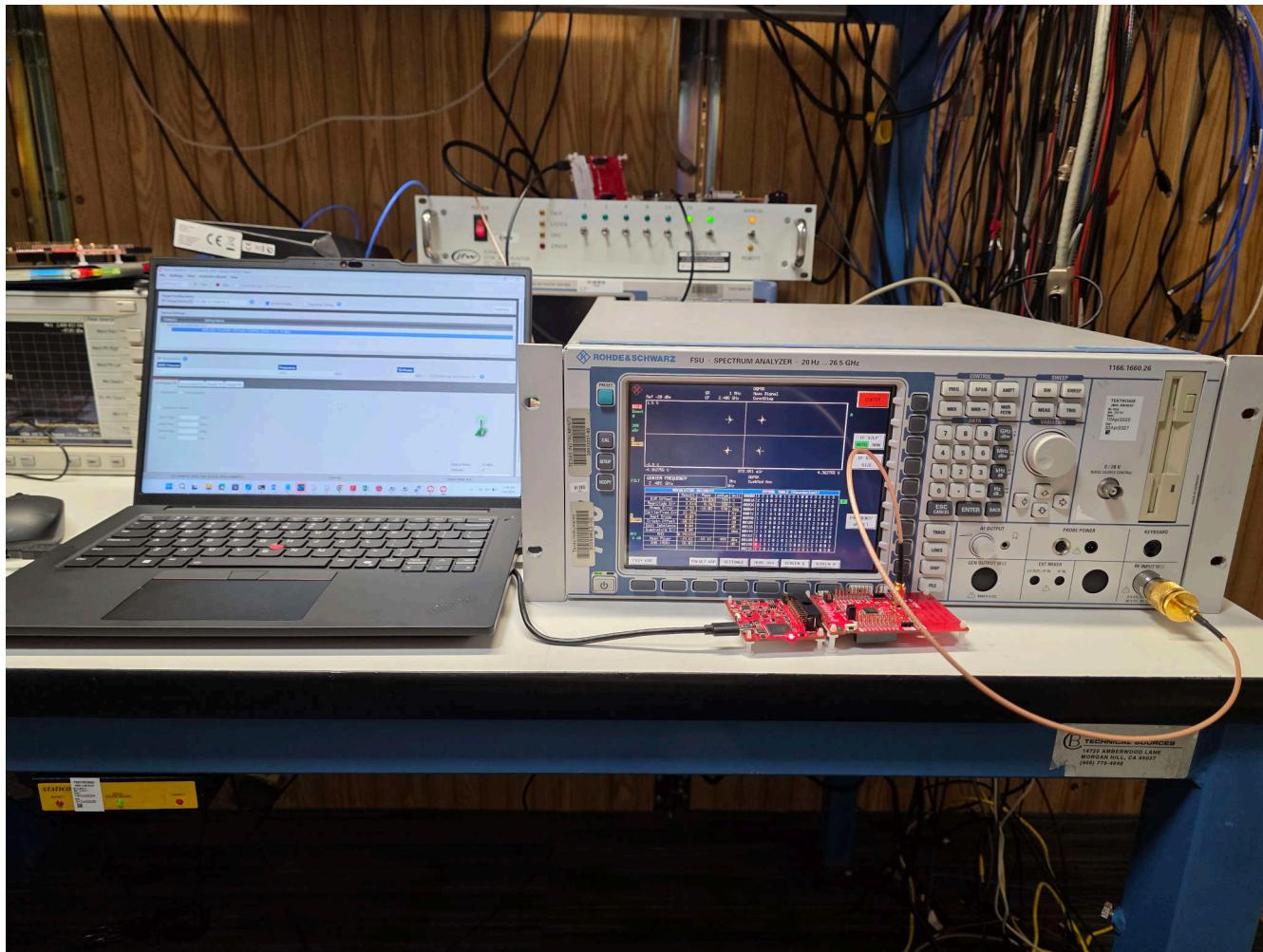


图 7-11. 使用 SMA 连接器的误差矢量幅度测试工作台设置

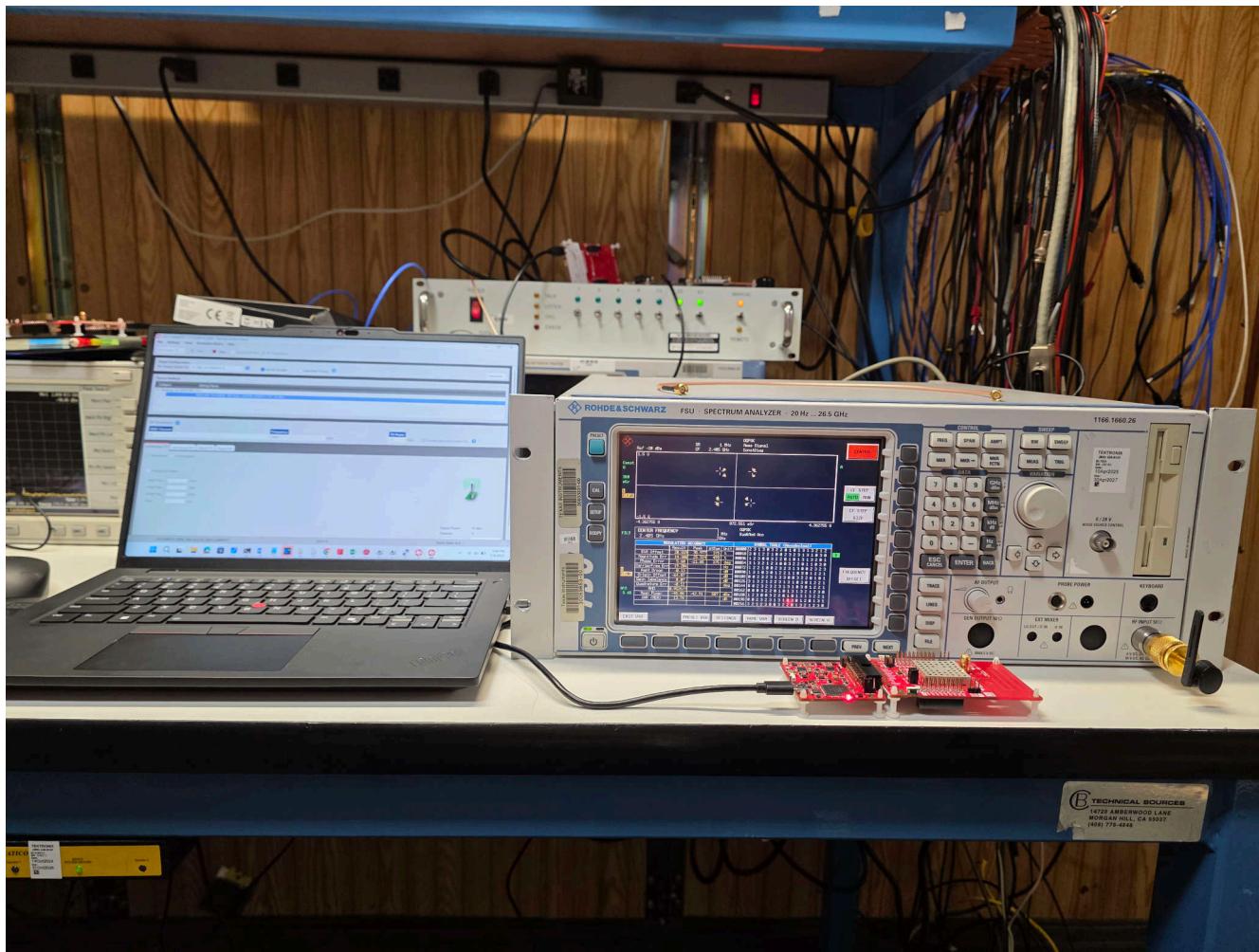


图 7-12. 使用天线的误差矢量幅度测试工作台设置

步骤：

- 第 1 步：如图 7-10 和图 7-11 所示连接仪器，或者如果使用天线，则参考图 7-12 进行连接。
- 第 2 步：通过 SmartRF Studio 将 EM 设置为经过调制的连续 TX 模式（如果适用，使用随机调制数据）。
- 第 3 步：按照频谱分析仪用户手册中所述的步骤设置该仪器后，使用其测量 EVM。（有关更多信息，请参阅附录 A。）

示例：使用 Rohde & Schwarz FSQ 对 ZigBee 信号进行 EVM 测量，可按照参考资料 1 中的说明进行设置。

请注意，并非所有频谱分析仪都能用于本测试，它们必须具有进行 EVM 测量的功能并进行相应配置才能使用。

表 7-5. 误差矢量幅度测试结果

	EVM (%) 为 ____ kbp/s			设计规格 (%)	通过/失败？
	频率 1 (MHz)	频率 2 (MHz)	频率 3 (MHz)		
1					
2					

测试结果：

7.4 传输中心频率偏移

目的：验证中心频率偏移是否在限制范围内。

通过条件：有关规范和通过条件，请参阅相应的标准文档。

测试条件：图 7-13 展示了传输中心频率偏移测试的设置。

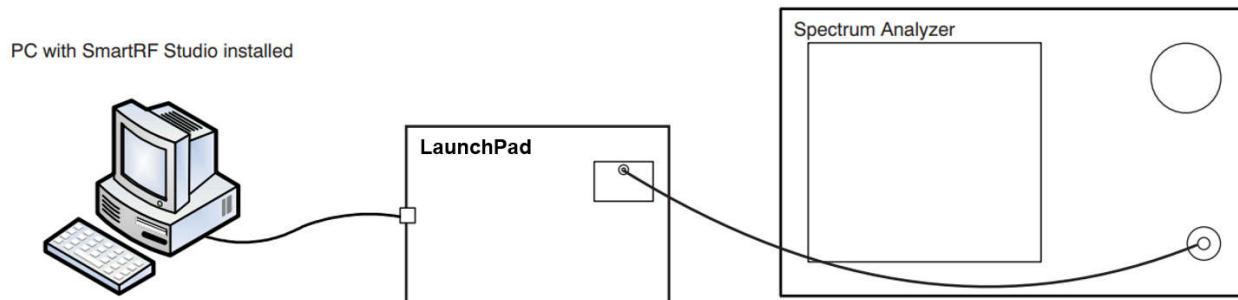


图 7-13. 传输中心频率偏移测试设置示意图

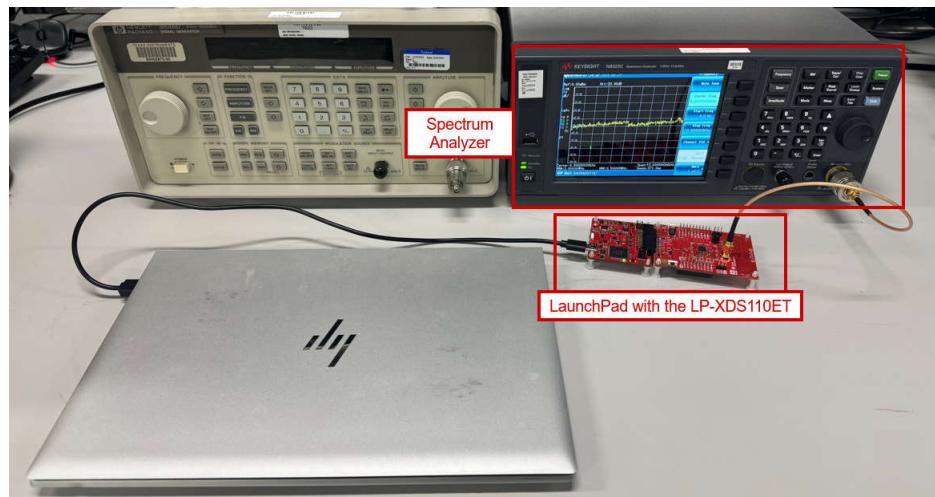


图 7-14. 使用 SMA 连接器的传输中心频率偏移测试工作台设置

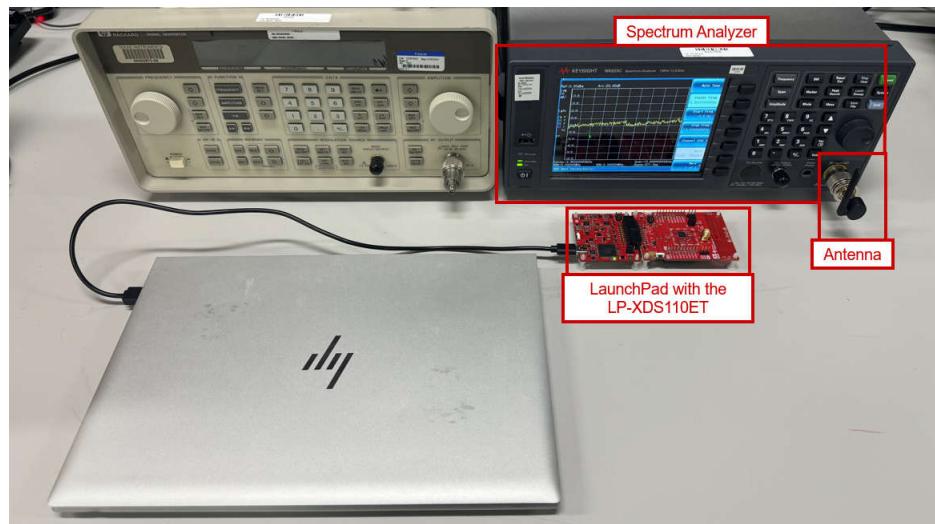


图 7-15. 使用天线的传输中心频率偏移测试工作台设置

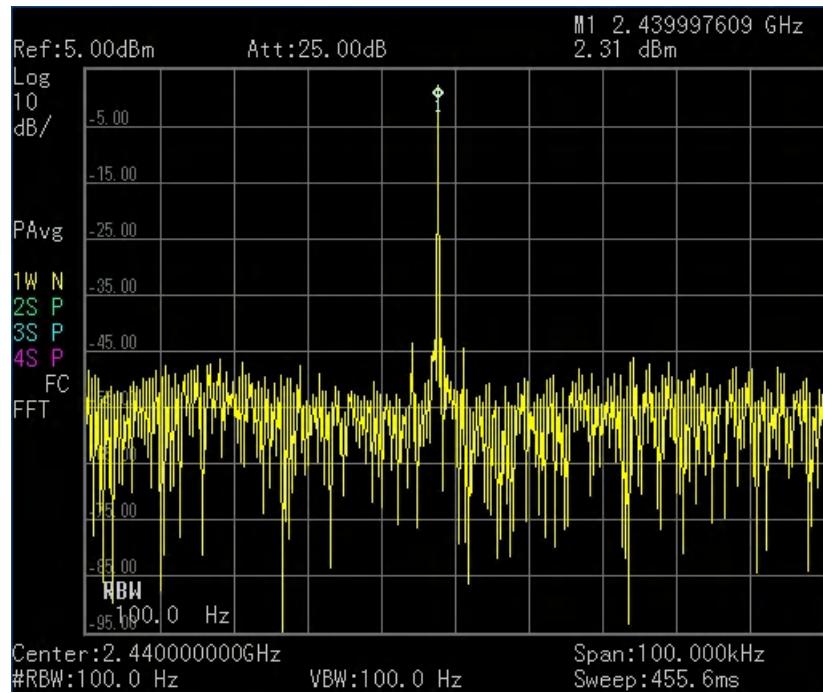


图 7-16. 传输中心频率偏移测试的频谱分析仪输出

步骤：

- 第 1 步：如图 7-13 和图 7-14 所示连接仪器，或者如果使用天线，则参考图 7-15 进行连接。
- 第 2 步：通过 SmartRF Studio 将 EM 设置为连续、未调制的 TX 模式。
- 第 3 步：将中心频率设置为所需通道频率。
- 第 4 步：在频谱分析仪上测量的实际频率。实际频率和中心频率之间的差值就是频率偏移。（请参考图 7-16，查看频谱分析仪上的结果示例，RBW 和 VBW 越低，频率测量越精确）

表 7-6. 传输中心频率偏移测试结果

	通道	频率	频率偏移	设计规格 (ppm)	通过/失败？
1					
2					
3					

测试结果：**7.5 杂散辐射**

目的：验证传导杂散辐射是否在限制范围内。

通过条件：有关规范和通过条件，请参阅相应的标准文档。

测试条件：图 7-17 展示了杂散辐射测试设置。

PC with SmartRF Studio installed

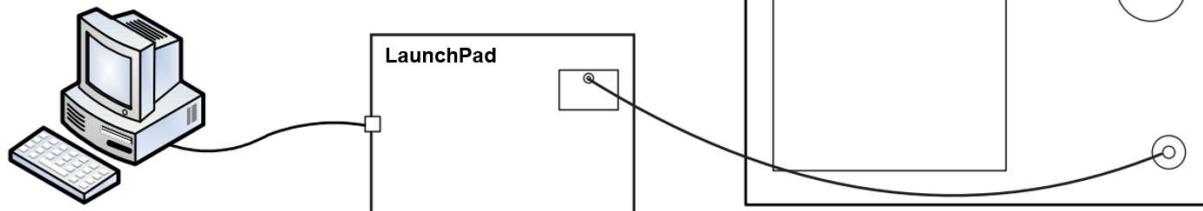


图 7-17. 杂散辐射测试设置示意图

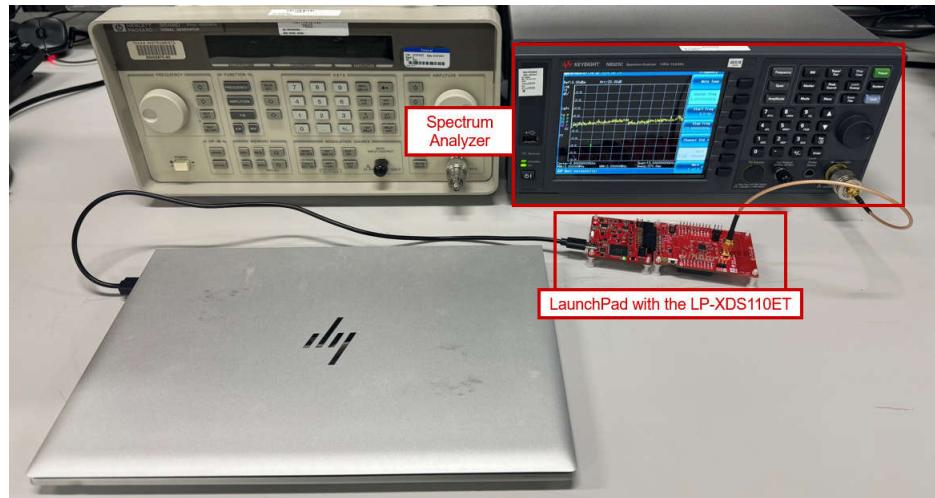


图 7-18. 杂散辐射测试工作台设置

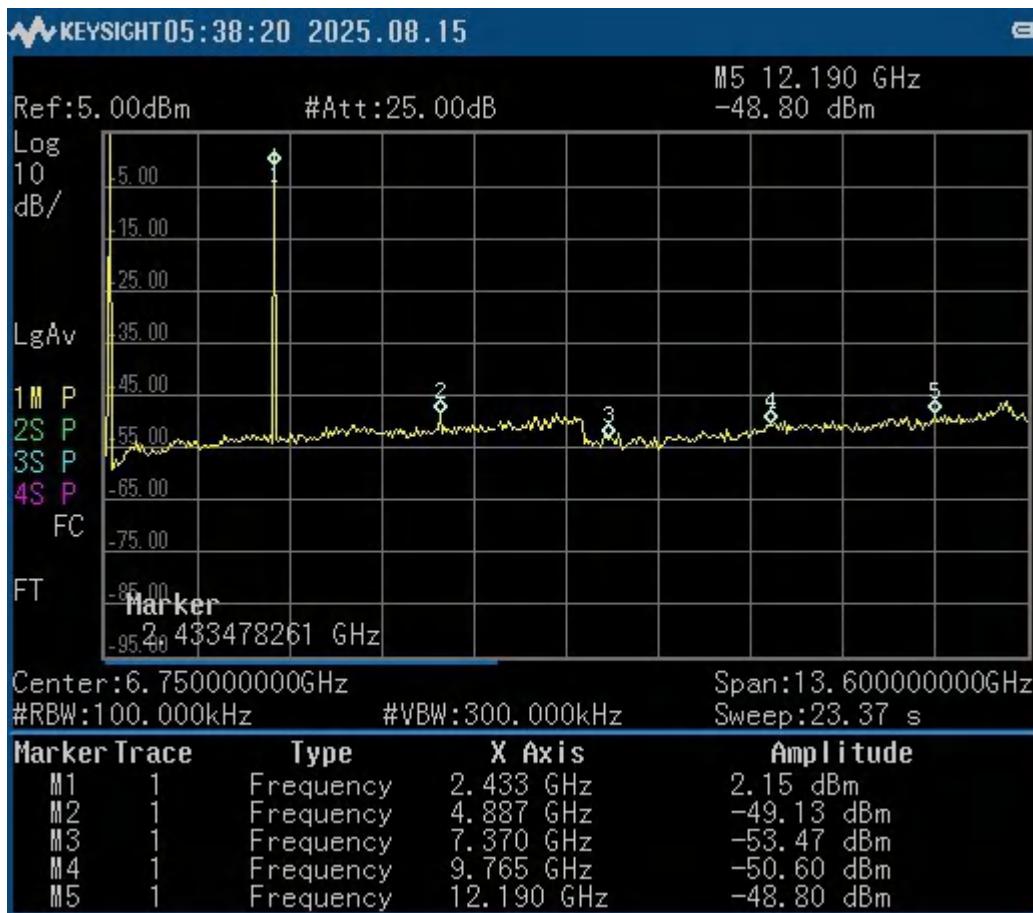


图 7-19. 杂散辐射测试的频谱分析仪输出

步骤：

- 第 1 步：按 [图 7-17](#) 和 [图 7-18](#) 所示连接仪器。
- 第 2 步：在 SmartRF Studio 中，将 EM 设置为连续调制 TX 模式。将中心频率设置为所需通道频率。
- 第 3 步：测量频谱分析仪的最小限值到最大限值范围内的杂散。（参考 [图 7-19](#)，查看频谱分析仪上结果的示例，杂散显示为谐波）

备注

要获得器件的真正输出功率，请将电缆损耗重新添加到测得的输出功率中。此外，不同的频谱分析仪具有不同的最大频率。高达 25GHz 就足够了。

备注**杂散辐射的监管合规性**

杂散辐射需符合您运营所在区域特定的监管限制。您的产品必须符合所有适用的地区标准和法规。以下是 2.4GHz 频率运行的常见谐波辐射限制，可供参考。

ETSI (欧洲电信标准化协会) EN 300 328 : 监管 2.4GHz 频段。

- 场强：不能超过 54dB_{UV}/m。
- 杂散辐射：EIRP (有效全向辐射功率) 在 3 米距离处必须低于 -30dBm。

FCC (美国联邦通信委员会) 第 15.209 部分一般辐射限制。

- 场强：在 3 米距离处内不能超过 500uV/m。这相当于 54dB_{UV}/m。
- 杂散辐射：EIRP (有效全向辐射功率) 在 3 米距离处必须低于 -41.3dBm。

表 7-7. 杂散辐射测试结果

	信道频率	杂散频率	测得的杂散 (dBm)	设计规格 (dBm)	通过/失败 ?
1					
2					
3					

测试结果：

8 接收测试

请参阅表 8-1，了解各种接收器测试汇总。

表 8-1. 接收测试汇总

章节编号	条目	结果
节 8.1	接收器敏感度	
节 8.2	干扰测试	
节 8.3	使用射频信号发生器的干扰测试	

8.1 接收器敏感度

小心

对于此处介绍的配置，需要记住的一个问题是射频功率可以通过同轴电缆和衰减器到达路径外的接收器。如果两个电路板相互非常靠近且接收器的工作灵敏度极高（即数据速率和接收器带宽较低），则该问题尤为值得关注。如果即便在衰减极高的情况下接收器仍然可以对数据包解码，并且无法正确找到灵敏度阈值，则会观察到该问题。为了避免该问题，应将其中一块电路板放置在屏蔽箱中，屏蔽层接地并且箱体上唯一的开口是一个电缆接线小孔。这种配置可最大限度降低辐射。

目的：验证接收器灵敏度是否符合性能标准。

通过条件：有关规范和通过条件，请参阅相应的标准文档。

测试环境：图 8-1 展示了接收器灵敏度的测试设置。

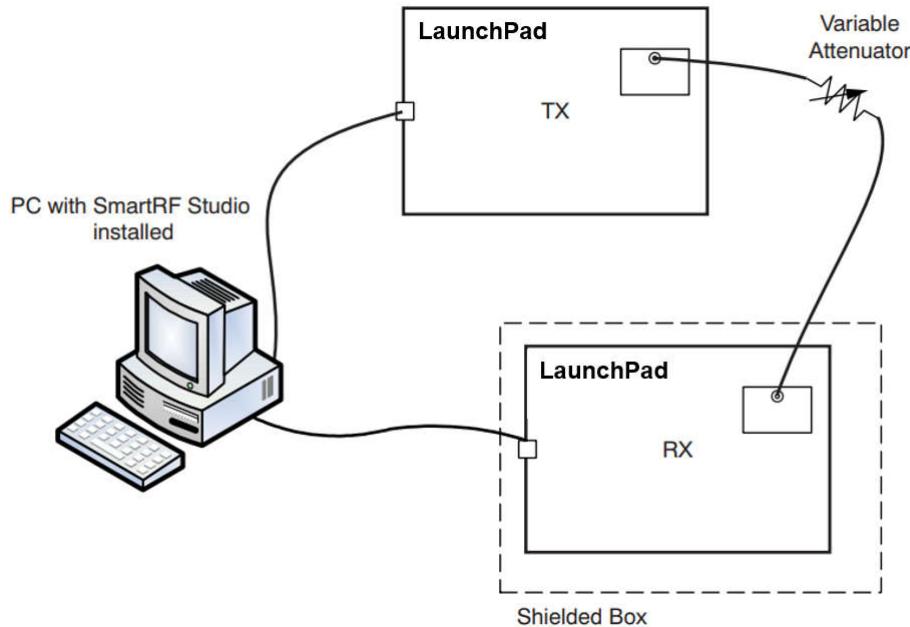


图 8-1. 接收器灵敏度测试设置示意图

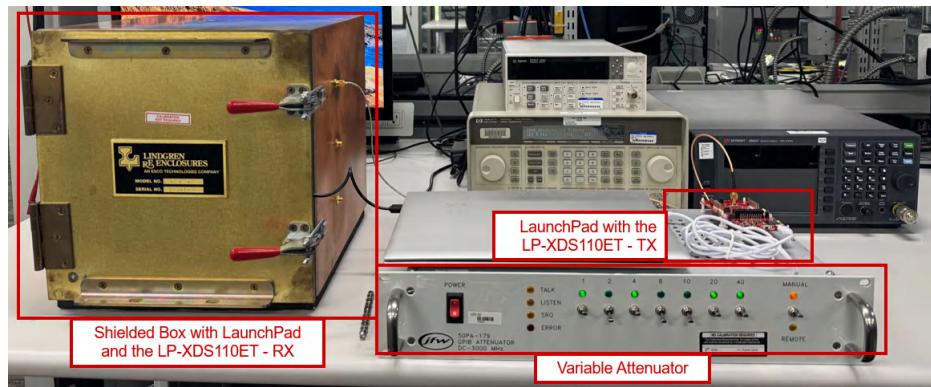


图 8-2. 接收器灵敏度测试工作台设置 - 正面

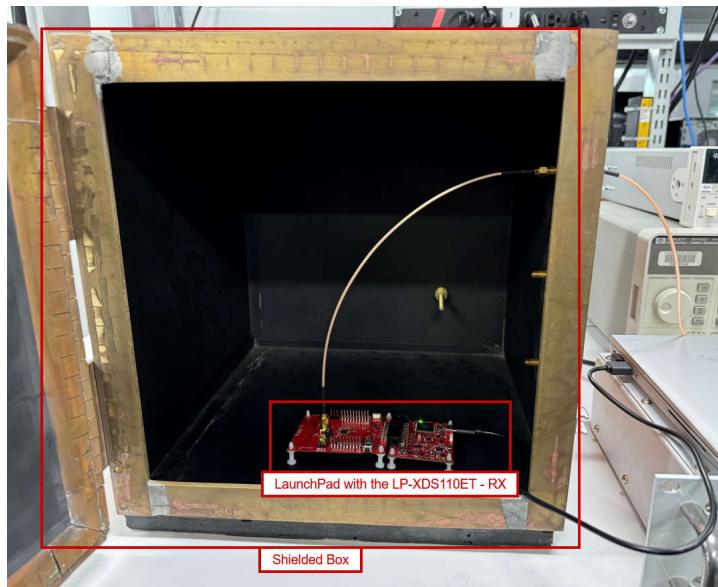


图 8-3. 接收器灵敏度测试工作台设置 - 屏蔽箱

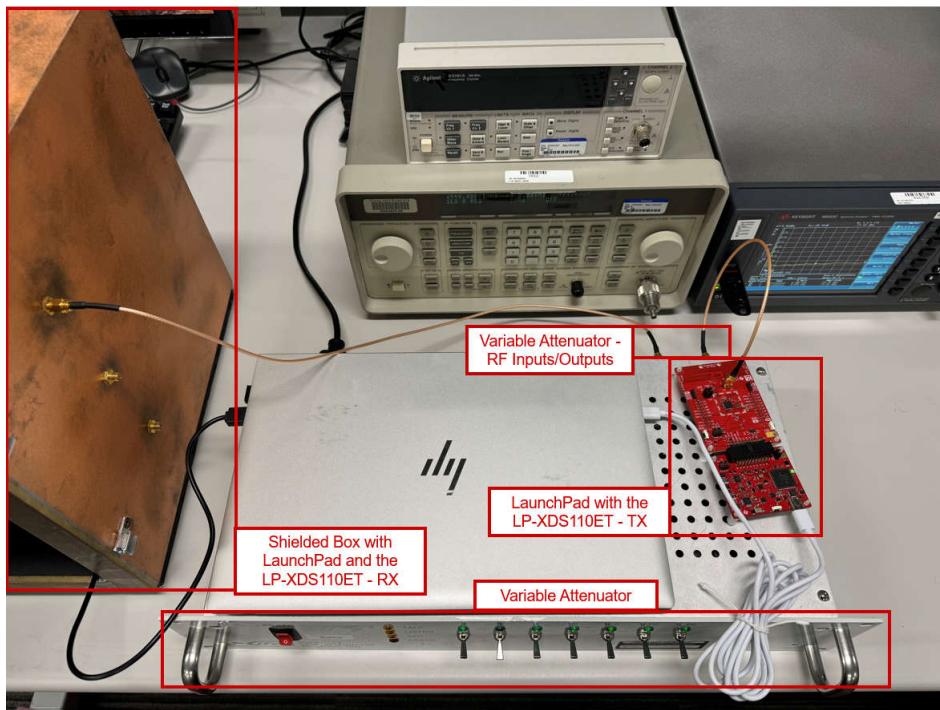


图 8-4. 接收器灵敏度测试工作台设置 - 顶部正面

步骤：

- 第 1 步：如图 8-1、图 8-2、图 8-3 和图 8-3 所示，连接仪器。
- 第 2 步：使用适当的射频设置配置 TX 端和 RX 端。为相应器件选择“Packet TX”（数据包 TX）或“Packet RX”（数据包 RX）选项卡，并选择适当的数据包格式。
- 第 3 步：首先启动接收器。确保选中（启用）*Seq number included in payload*（有效载荷中包含的序列号）框。
- 第 4 步：单击 **Start.**（启动）启动发送器。
- 第 5 步：RX 端的 RSSI 读数提供了信号强度的相对指标
- 第 6 步：PER 使用以下公式计算得出：
 - $\text{PER \%} = (\text{丢失的数据包数}/\text{数据包总数}) \times 100$
- 第 7 步：增加衰减直到 RX 端显示的 PER 达到 1%。该值定义灵敏度阈值。但情况并非总是如此。取决于标准/数据包大小等

表 8-2. 接收器灵敏度测试结果

	灵敏度 (dBm), PER < 1%			设计规格 (dBm)	通过/失败 ?
	频率 1 (MHz)	频率 2 (MHz)	频率 3 (MHz)		
1					
2					

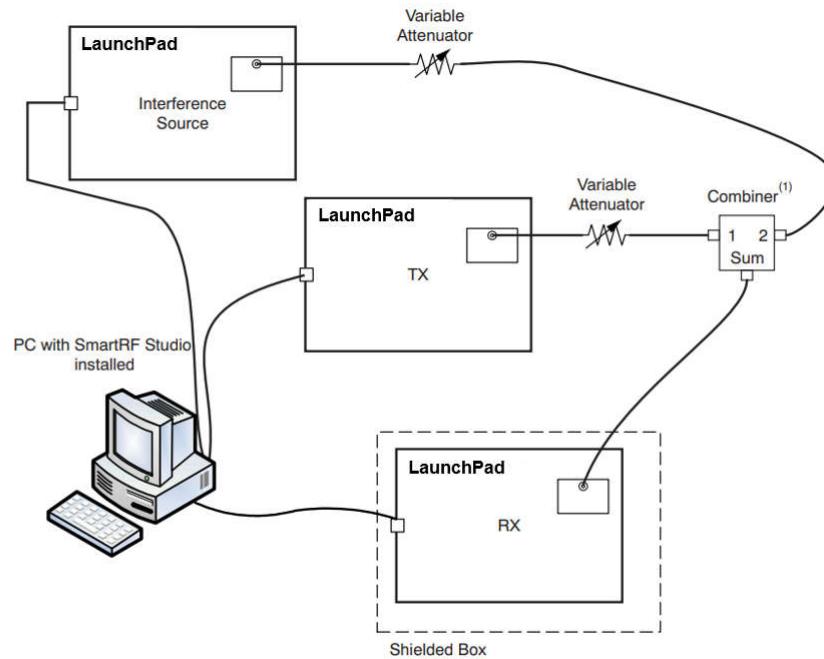
测试结果：

8.2 干扰测试

目的：验证接收器灵敏度是否符合已发布的标准。

通过条件：有关规范和通过条件，请参阅相应的标准文档。

测试环境：图 8-5 说明干扰测试设置。



(1) 3-dB loss in signal on each input path through the combiner.

图 8-5. 干扰测试设置示意图

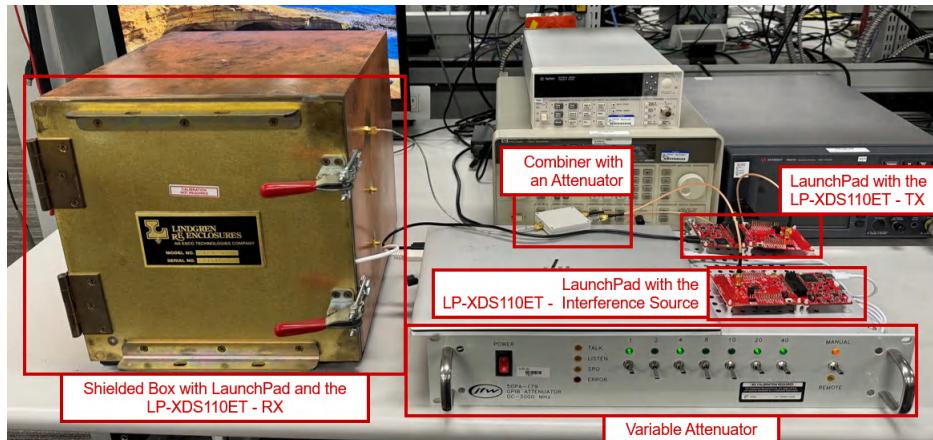


图 8-6. 干扰测试工作台设置 - 概述

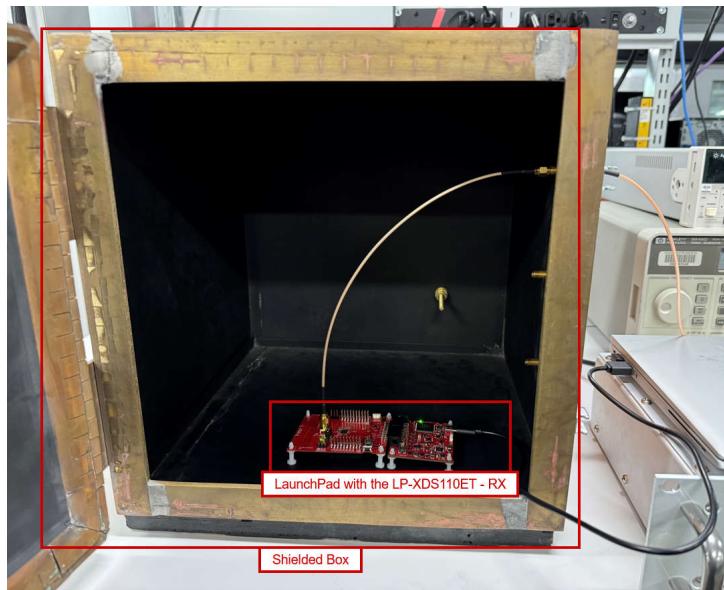


图 8-7. 干扰测试工作台设置 - 屏蔽箱

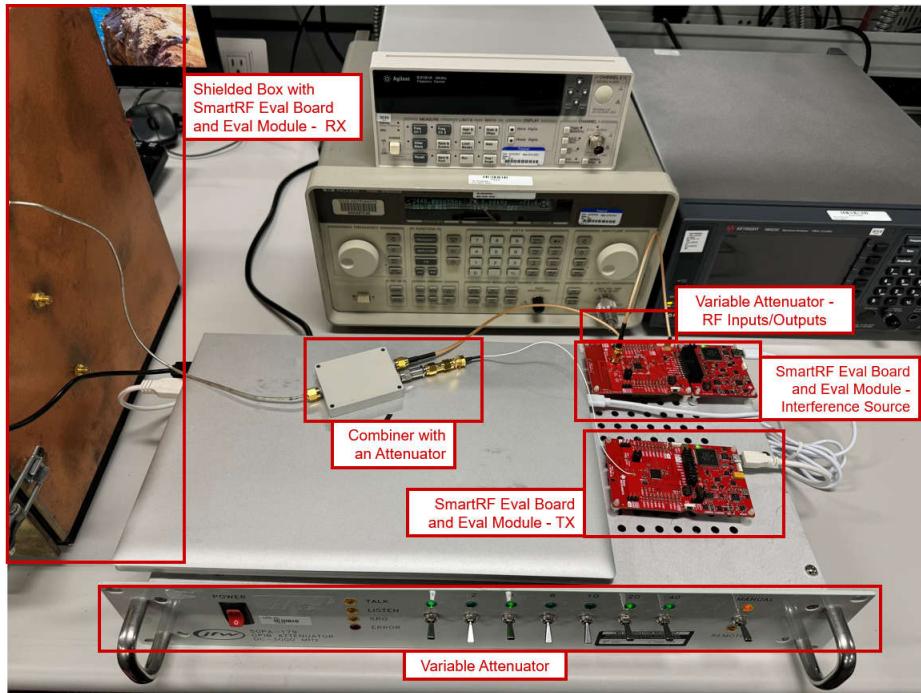


图 8-8. 干扰测试工作台设置 - TX 和干扰源连接

备注

如果没有可变衰减器，可以改用一系列固定衰减器。此外，可以组合使用可变衰减器和固定衰减器以增加衰减因子，如图 8-8 所示。图 8-8。

步骤：

- 第 1 步：如图 8-5、图 8-6、图 8-7 和图 8-8 所示，连接仪器。
- 第 2 步：对 TX 和 RX 板，使用灵敏度测试 8.1 中的相同配置。
- 第 3 步：将 INT (干扰) 板设置为发送器；但是，频率可以和 TX 和 RX 信号的频率不同。如果测试同通道干扰，则频率应相同，否则频率应不同。此外，与发送数据包的 TX 不同，INT 连续发送 (即，它是连续调制信号) 。

- 第 4 步：设置 TX 的输出功率，使 RX 端的接收功率比从灵敏度测试获得的灵敏度阈值高 10dB。这也取决于标准。（完成灵敏度测试后，消除衰减器提供的 10dB 的衰减。）
- 第 5 步：首先，将 INT 板的输出功率设置为可能的最低输出功率设置并开始发送。
- 第 6 步：在 RX 和 TX 板之间执行灵敏度测试并记录 PER。继续增加 INT 的输出功率，直到 RX 端侧显示的 PER 大于 1%。在 RX 端侧测得的 TX 和 INT 功率之间的差异表明 CCxxxx 器件能够克服干扰。

表 8-3. 相邻通道测试结果

	通道	频率 (MHz)	差值 (dB)	设计规格 (dB)	通过/失败 ?
1					
2					
3					

表 8-4. 备用信道测试结果

	通道	频率 (MHz)	差值 (dB)	设计规格 (dB)	通过/失败 ?
1					
2					
3					

测试结果：

8.3 使用射频发生器的干扰测试

目的：验证接收器灵敏度是否符合已发布的标准。

通过条件：有关规范和通过条件，请参阅相应的标准文档。

测试环境：图 8-9 展示了使用射频发生器的干扰测试设置。

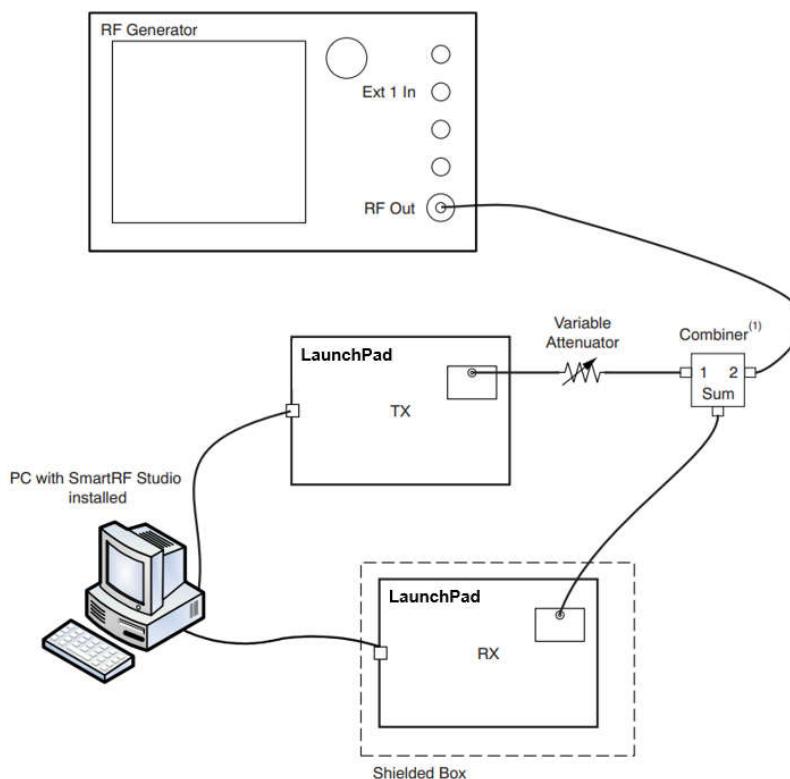


图 8-9. 使用射频发生器的干扰测试设置示意图

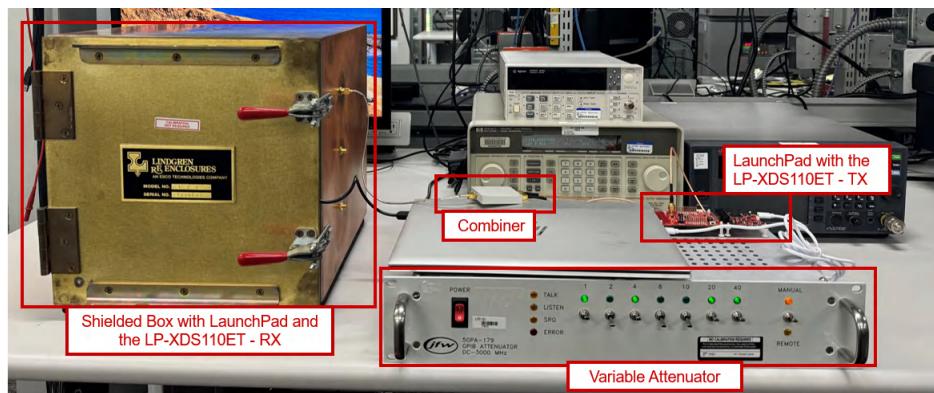


图 8-10. 使用射频发生器的干扰测试工作台设置 - 概述

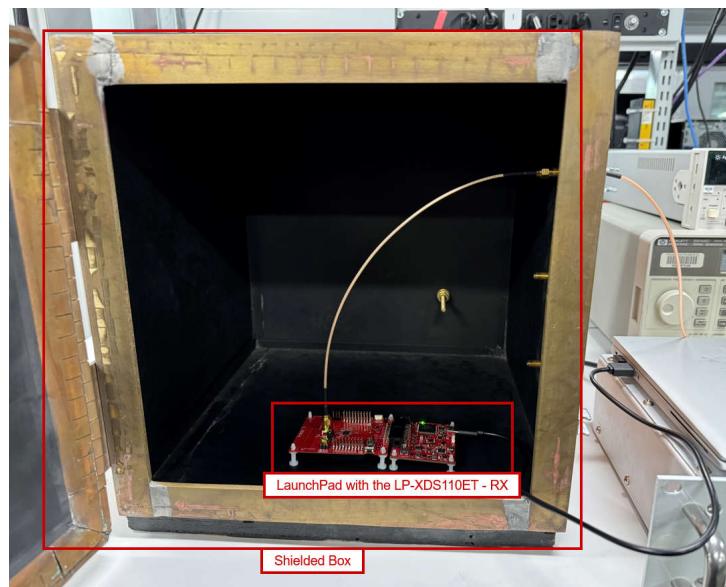


图 8-11. 使用射频发生器的干扰测试工作台设置 - 屏蔽箱

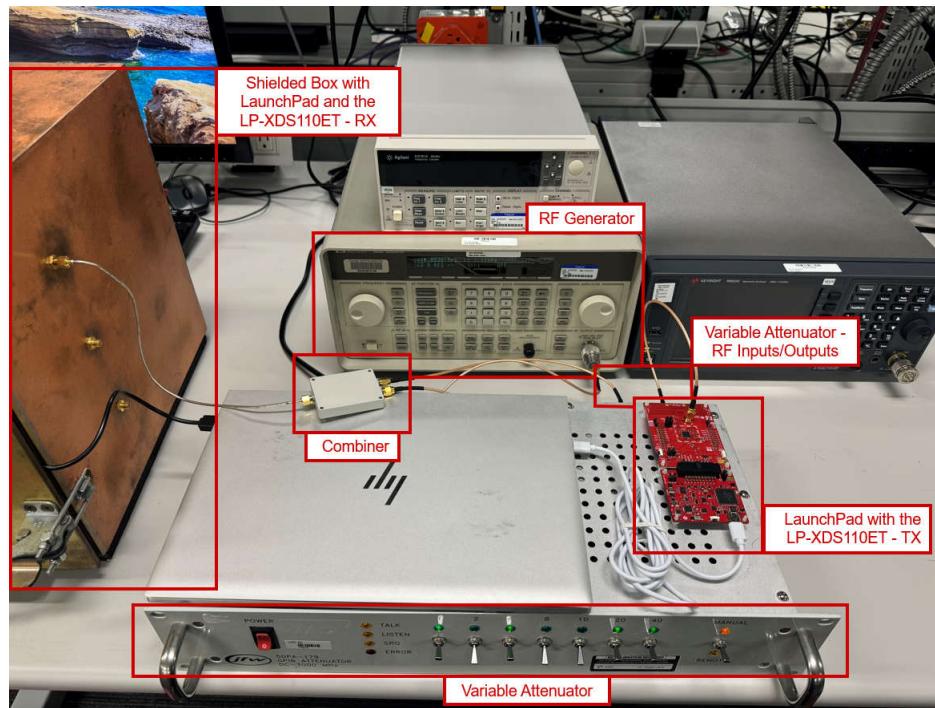


图 8-12. 使用射频发生器的干扰测试工作台设置 - TX 连接。

步骤：

- 第 1 步：如图 8-9、图 8-10、图 8-11 和图 8-12 所示，连接仪器。
- 第 2 步：必须针对灵敏度测试对 TX 和 RX 板进行设置。
- 第 3 步：干扰信号是通过使用连续未调制信号设置的，除非测试同通道干扰，否则频率在 TX 和 RX 端可以不同。
- 第 4 步：设置 TX 的输出功率，使 RX 端的接收功率比从灵敏度测试获得的灵敏度阈值高 10dB。（完成灵敏度测试后，消除衰减器提供的 10dB 的衰减。）
- 第 5 步：首先，将 INT 板的输出功率设置为可能的最低输出功率设置并开始发送。
- 第 6 步：在 RX 和 TX 板之间执行灵敏度测试并记录 PER。继续增加 INT 的输出功率，直到 RX 端侧显示的 PER 大于 1%。在 RX 端侧测得的 TX 和 INT 功率之间的差异表明 CCxxxx 器件能够克服干扰。

表 8-5. 相邻通道测试结果

	通道	频率 (MHz)	差值 (dB)	设计规格 (dB)	通过/失败？
1					
2					
3					

表 8-6. 备用信道测试结果

	通道	频率 (MHz)	差值 (dB)	设计规格 (dB)	通过/失败？
1					
2					
3					

测试结果：

附录 A 偏移 EVM 与 EVM

偏移 EVM 和 EVM 都是误差矢量幅度的测量值；换句话说，是实际信号位置与理想信号位置的距离。

偏移 EVM 和 EVM 之间的差异在于何时获得这些测量值。在偏移 EVM 测量中，在信号开始时计算同相信号分量 (I) 的 EVM，在信号中段计算正交相信号分量 (Q) 的 EVM。使用此方法，用户可以从解调器尝试解码时所做的实际决策点获取 EVM。此方法是测量 EVM 的正确方法，因为它反映了 CCxxxx 器件中的实际解调器。

对于理想信号，使用偏移 EVM 还是或 EVM 并不重要。对于 I 相和 Q 相在相应转换中的噪声比决策点更大的频谱，执行常规 EVM 测量会产生较差的结果，但不会影响接收信号的能力。

9 参考资料

除非另有说明，否则以下参考资料可从德州仪器 (TI) 网站下载。[\(www.ti.com\)](http://www.ti.com)

1. [Rohde and Schwarz](#)。 (2005). [Rohde & Schwarz 新闻](#)，185:1. 产品信息公告。
2. [欧洲电信标准化协会](#)。欧洲政府监管委员会。
3. [美国联邦通信委员会](#)。美国政府监管委员会。
4. [无线行业企业协会](#)。贸易协会网站。
5. [SmartRF Studio](#)。www.ti.com 上的产品文件夹

10 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 * (September 2011) to Revision A (December 2025)	Page
• 更新了链接，添加了时钟调优部分，删除了对 LabView 的引用，添加了更详细的说明和图片，并添加了辐射测量参考。	1

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出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 © 2025 , 德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期 : 2025 年 10 月