

Application Note

TI 毫米波雷达器件监管合规指南



摘要

本应用手册介绍了符合毫米波雷达器件监管标准的要求。其中详细介绍了 Radio Equipment Directive (RED) (欧洲销售设备标准) 和联邦通信委员会 (FCC) (美国标准)。本文档还介绍了 TI 为这些测试提供的工具、各种常见问题以及对应的解决方案。

雷达产品组合包括 60GHz 和 77GHz 器件，不过本文档主要介绍 60GHz 器件。文中信息同时适用于 60GHz 器件的 PCB 板载天线和 Antenna on Package (AOP) 变体。

备注

所有测试报告和证明文档都可以在 [TIREX](#) 页面上的认证包中找到。

内容

1 简介.....	3
2 典型的认证程序.....	4
3 监管合规概述.....	6
3.1 欧盟法规：Radio Equipment Directive (RED).....	6
3.1.1 短程雷达 (EN 305 550).....	6
3.1.2 短程液位探测雷达 (EN 302 729).....	8
3.1.3 射频暴露限制 - EN 62311.....	9
3.1.4 电气安全 - EN 62368.....	10
3.1.5 电磁兼容性 (EMC) — EN 301 489.....	10
3.2 联邦通信委员会 (FCC).....	11
3.2.1 终端设备和 FCC 条款.....	11
3.2.2 60GHz 雷达运行 (47 CFR § 15.255).....	12
3.2.3 液位探测雷达 (47 CFR § 15.256).....	15
3.2.4 模块化认证 (47 CFR § 15.212).....	16
3.2.5 辐射暴露要求.....	16
3.3 日本无线电法.....	17
3.3.1 带宽、指定频率和容差.....	17
3.3.2 带外和杂散发射.....	17
3.3.3 控制功能.....	18
3.4 无线规划与协调司 (WPC).....	18
3.4.1 允许的工作频率与批准.....	18
3.4.2 设备类型授权.....	18
3.5 联邦电信研究院 (IFT).....	18
3.5.1 基波发射水平和带宽.....	18
3.6 国家电信局 (ANATEL).....	19
3.6.1 基波发射水平、带宽与最大占空比.....	19
3.6.2 许可证.....	19
3.7 交通和通讯部 (MTC).....	19
3.8 国家通信管理局 (ENACOM).....	19
4 适用术语和公式.....	20
4.1 占空比因数.....	20
4.2 有效全向辐射功率 (EIRP).....	20
4.3 Friis 公式.....	20
4.4 远场边界.....	20

5 工具和设置	21
5.1 硬件设置	21
5.2 内部实验室测试环境搭建	21
5.2.1 近场电路探测	21
5.2.2 占用带宽测试	22
5.2.3 辐射方向图测量	22
5.3 MMWAVESTUDIO	23
5.3.1 运行 LUA 脚本	23
5.4 mmWave Visualizer	24
5.5 IWR6843ISK-ODS 测试案例	24
6 常见问题和解决方案	26
6.1 峰值功率	26
6.2 占用带宽	26
6.3 杂散发射	26
6.3.1 14.4GHz 谐波	27
6.3.2 建议的解决方案	28
6.4 过冲	30
6.5 频率稳定性	31
6.5.1 生成 CW 信号	31
6.5.2 温度和电压范围内的频率稳定性	31
6.6 EIRP 尖峰与频谱分析仪带宽	32
7 参考资料	34
8 修订历史记录	34

商标

Bluetooth® is a registered trademark of Bluetooth SIG, Inc.

WiFi® is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

备注

本文档仅作为入门指南，用于认证包含 TI 毫米波雷达器件的设备。本文档并非详尽参考，不得视为任何监管机构所制定标准的替代标准。有关认证需求和要求，请咨询相应的测试机构、监管机构或法律专家。

有意或无意发射辐射的产品销往世界各地；这些产品均必须符合适用于其运营区域的监管合规标准：

- FCC - 美国
- CE/RED - 欧洲
- TELEC/MIC - 日本
- ISSED - 加拿大
- KCC/MSIP - 韩国
- SRRC/CCC - 中国

所有测试报告和证明文档都可以在 [TIREX](#) 页面上的认证包中找到。

	60 GHz	77 GHz
USA FCC	57-71 GHz – Short-Range Field Disturbance Sensors (radars) for non-ADAS functions. License free under specified conditions 61-61.5 GHz – ISM band, reduced output power restrictions	75-85 GHz – Level Probing Radar (Downward-facing narrow beam) 76-81 GHz – Vehicular Radar, Airplane-installed wingtip radar 76-77 GHz – FOD at airports, Fixed infrastructure
European Common Market CE / RED	57-64 GHz – Open, restrictions on output power, Level Probing Radar, Tank Level Probing Radar 61-61.5 GHz – Open, reduced restrictions on output power See RED section for more details	75-85 GHz – Level Probing Radar, Tank Level Probing Radar 76-77 GHz – Vehicular Radar, Fixed Traffic Monitoring, Railroad crossings, manned rotorcraft 77-81 GHz – Vehicular Radar
China SRRC / CCC	59-64 GHz – Open for Radiolocation 61-61.5 GHz – Open according-ISM rules	76-77 GHz – Vehicular Radar
Korea KCC / MSIP	57-66 GHz – Open for low output power Rule Code: K176C 61-61.5 GHz – No regulations so far, possibly open according-ISM rules	75-85 GHz – Armature Satellite, Space Research, Radio astronomy, Astronomy Research, Geostationary Orbit Satellite 76-77 GHz – ADAS Automotive Radar (Rule Code: K37G)
Japan MIC / TELEC	60-61 GHz – Low Power Equipment Millimeter-Wave Radar 57-66 GHz – Millimeter Wave Image Transmission and Millimeter-Wave data Transmission	76-77 GHz – Open 77-81 GHz – Open, possibly for vehicular radar

* Certification within this band is on hold at the time of writing

图 1-1. 区域、应用和工作频率

这些监管机构的作用是验证各种器件可以协同工作，受测设备 (EUT) 可以处理来自其他器件的干扰而不会造成不可恢复的功能丧失，带内和带外功率在规定的限制范围内，杂散发射处于可接受的水平，并且射频暴露处于安全水平等等。

本文档简要介绍了 TI 公司为在 TI 毫米波短程雷达上设置和运行测试所做的一些测试和提供的工具。本文还详细讨论了 RED 和 FCC 合规性测试；然而，类似的工具和信息适用于其他监管测试。

2 典型的认证程序

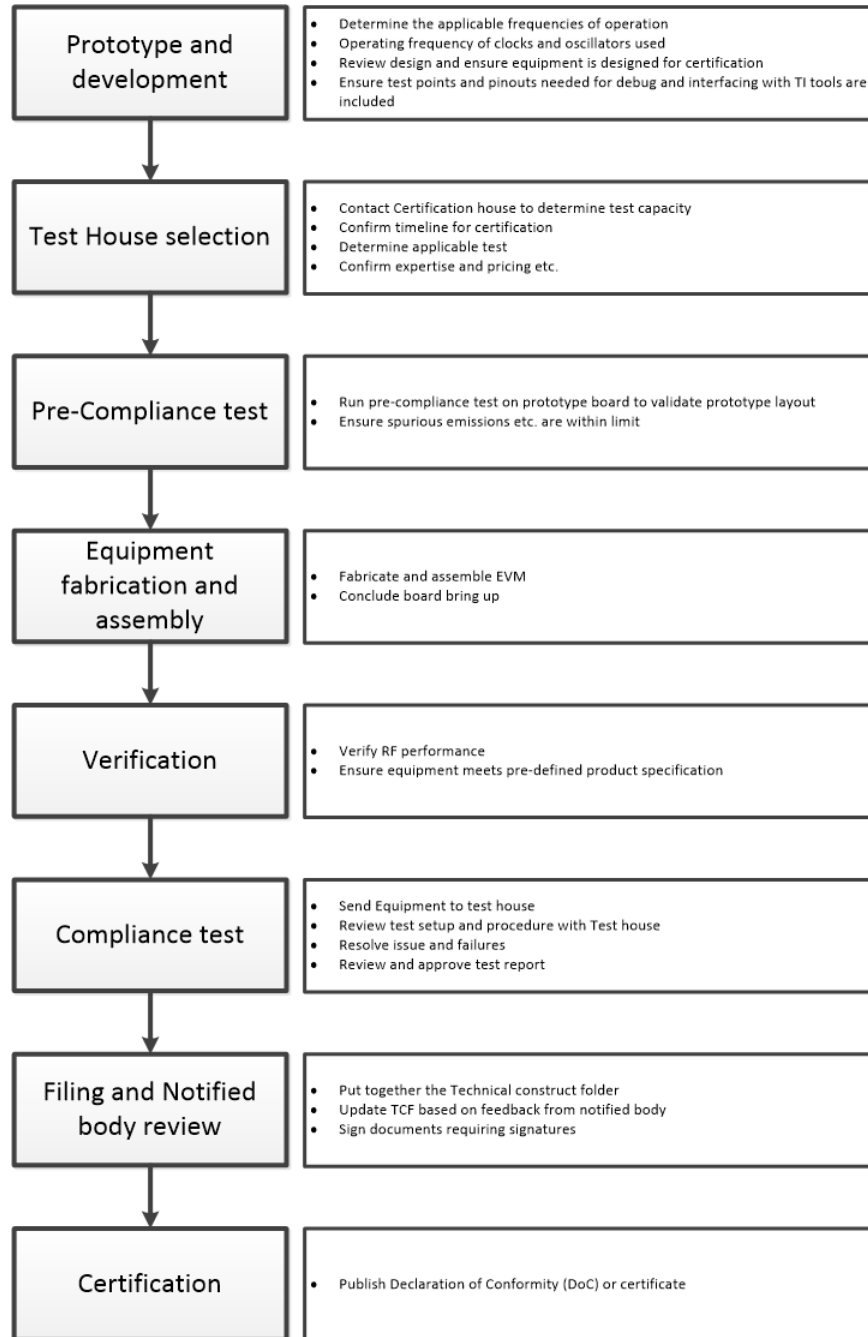


图 2-1. 构建和认证设备的典型流程

如图 2-1 所示，从原型设计和开发阶段开始就必须考虑到认证要求，以发现并避免产品生命周期后续阶段可预防的问题。在多个监管市场运营时尤其如此。

在选择测试机构时，不仅要考虑成本，还要考虑员工的技术能力、电信认证机构 (TCB) 的专业知识以及所提供服务的整体质量。与您所在地区声誉良好的测试机构和 TCB 合作也可能很有帮助，因为这样最容易与其建立良好的关系，以便于提出问题、调试问题和规划未来的项目。选择一个您信赖且能够顺畅合作的测试机构非常重要，因为测试开始后通常无法更换为其他测试机构。这是为了防止通过“挑选机构投机”来混过认证。

在设计过程中将测试样品送到测试机构进行预合规性测试（也称为“预扫描”）有时会非常有用。预扫描是由测试机构执行的一种初步测试，主要检测 EUT 的粗略发射量。这是器件常规合规性测试的第一步，使用峰值保持检

波器和宽带宽来搜索任何发射。如果检测到发射，且与限值间的裕度大于最小裕度，则无需进行最终扫描。不过，仅仅观察到杂散，并不意味着杂散幅度像预扫描期间报告的那样高。其往往可能会较低。如前所述，预扫描可用于发现可能违规的杂散。这是一种经济高效的选择，有助于在最终发布前改进电路板设计。

考虑预扫描结果，可以开始进一步的器件核实、验证和生产。然后，可提供终端设备的样品用于合规性测试。

在合规性测试期间，定期与测试机构工作人员保持联系非常重要。这有助于确保您能够在问题发生时迅速发现并解决问题，无论是因为 TCB 方面对终端设备缺乏了解，还是潜在的合规性缺陷。

在测试阶段完成后，TCB 通常要求在颁发认证之前提交并核验其他文档。尽早与 TCB 展开沟通，以便留出足够的时间提前准备好所有新文档，从而缩短认证周期并加快产品上市。通常，此文档需要由有权代表贵公司发表声明的授权人员签名。务必在内部协调一致，确定签署此类文件的人员。您还必须与测试机构的人员达成一致，明确您的器件必须遵循的标记标准。

审核通过后，TCB 将协助向监管机构提交相关文件。如果产品在欧洲共同市场销售，则需要向指定机构 (NB) 提交备案，对于 FCC，则需要从电信认证机构向其提交备案。

经 FCC 批准后，开发人员即可为产品加上 FCC 标识并在产品上标注 FCC ID。经 NB 批准后，开发人员可以将完整的标准添加到其符合性声明 (DoC) 中，并在其产品上贴上 CE 标志。DoC 必须向公众公开。

对于通过 CE 认证的产品，其 DoC 通常至少包含以下内容：

- 产品名称、类型、序列号或批号及用途
- 制造商的名称与联系信息
- 明确所使用协调法规与标准的合规性声明
- 指定机构的详细信息
- 签名

3 监管合规概述

3.1 欧盟法规：Radio Equipment Directive (RED)

2014 年 4 月 16 日欧洲议会和理事会关于协调成员国在市场上提供无线电设备相关的 2014/53/EU 指令以及废止的 1999/5/EC 指令第 3 条基本要求可在[此处](#)找到。

根据欧盟所售的无线电和电气设备的基本要求，以下协调标准可适用于 60GHz 和 80GHz 雷达设备：

- EN 62311. 安全、射频暴露 — 评估与电磁场人体暴露限制相关的电子电气设备 (0Hz 至 300GHz)。此标准涵盖了 2014/53/EU 指令第 3.1(a) 条的基本要求
- EN 62368-1. 音频/视频、信息和通信技术设备 - 第 1 部分：安全要求、电气安全；这也涵盖了 2014/53/EU 指令第 3.1(a) 条的基本要求
- EN 301 489-3. 无线电设备和服务的电磁兼容性 (EMC) 标准；第 1 部分：常见技术要求。此协调标准涵盖了 2014/53/EU 指令第 3.1(b) 条的基本要求，以及 2014/30/EU 指令第 6 条的基本要求。
- EN 305 550. 在 40GHz 至 246GHz 频率范围内使用的短程设备 (SRD) 无线电设备；用于接入无线电频谱的协调标准。此标准涵盖了 2014/53/EU 指令第 3.2 条的基本要求。
- EN 302 729. 在频率范围内运行的短程设备 (SRD) 液位探测雷达 (LPR) 设备...57GHz 至 64GHz、75GHz 至 85GHz。协调标准涵盖了 2014/53/EU 指令第 3.2 条的基本要求。
- EN 302 264. 在 77GHz 至 81GHz 频段内运行的短程设备 (SRD) 运输和交通远程信息处理 (TTT) 设备。协调标准涵盖了 2014/53/EU 指令第 3.2(a) 条的基本要求。
- EN 301 091. 短程设备 (SRD) 运输和交通远程信息处理 (TTT)；在 76GHz 至 77GHz 范围内运行的雷达设备。协调标准涵盖了 2014/53/EU 指令第 3.2(a) 条的基本要求。

通常，终端设备设计人员必须将 CE 标志放置在成品终端设备的外部。高度通常为 5mm，但如果没有足够的空间，可以缩小其尺寸，只要肉眼能够清晰辨认该标记即可。如果完全没有可用空间，则可以省略外壳上的 CE 标记，但需要向 NB 说明理由。此外，必须在成品设备的包装和用户指南中标注 CE 标志和 WEEE 标志。

3.1.1 短程雷达 (EN 305 550)

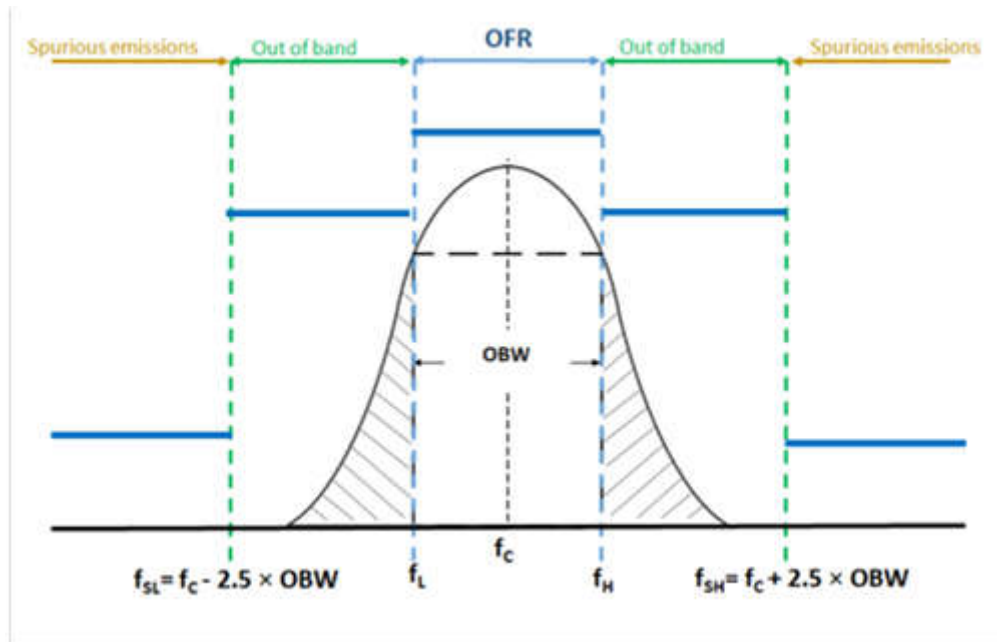


图 3-1. OFR、带外和杂散辐射频率限制

以下限制和测试适用：

- 占空比：使用功率计时，占空比将计入平均功率测量；请参阅关于占空比的章节（节 4.1）。
- 允许的工作频率范围：请参阅 EN 305 550V2.1.0 的章节 4.3.1（EN 305 550-1V1.2.1 的章节 7.3）。这是允许器件运行的授权频率范围。

- 工作频率范围 (OFR)：请参阅 EN 305 550V2.1.0 的章节 4.3.2。这是器件的目标工作频率范围。IWR6843 毫米波器件的频段为 57GHz 至 64GHz，其也可以在 61.0GHz 至 61.5GHz 带宽内工作。占用带宽 (OBW) 是指在工作频率范围内占用总功率 99% 的带宽。

表 3-1. 工作频率范围

带宽 (GHz)	FL (GHz)	FH (GHz)
57 - 64	> 57	< 64
61.0 - 61.5	> 61	< 61.5
122 - 123	> 122	< 123
244 - 246	> 244	< 246

- 平均功率：请参阅 EN 305 550V2.1.0 的章节 4.3.3 (EN 305 550-1V1.2.1 的章节 7.2)。平均功率是辐射功率或平均等效全向辐射功率 (EIRP) 的度量；是指在传输周期内最高的传输功率等级。57GHz 至 64GHz 范围内的限制为 100mW EIRP (20dBm EIRP)，同样的限制也适用于 61.0GHz 至 61.5GHz 范围。使用信号分析仪进行测量时，使用的信道功率函数如下：

$$20\text{dBm EIRP} = 115.23\text{dBuV/m at } 3\text{m} \quad (1)$$

- 平均功率频谱密度：请参阅 EN 305 550V2.1.0 的章节 4.3.4 (EN 305 550-1V1.2.1 的章节 7.1)。其定义为最大天线增益方向上发送带宽上发射功率频谱密度。57GHz 至 64GHz 范围内的限制为 13dBm/MHz EIRP。61.0GHz 至 61.5GHz 范围没有限制。
- 带外 (OOB) 辐射：请参阅 EN 305 550V2.1.0 的章节 4.3.5 (EN 305 550-1V1.2.1 的章节 7.4)。OOB 带宽计算如方程式 2 所示。

$$F_{sl} = f_c - 25 \times \text{OBW} \quad (2)$$

$$F_{sh} = f_c + 25 \times \text{OBW} \quad (3)$$

表 3-2 展示了毫米波器件在整个 4GHz 带宽和 500MHz 带宽下的带外和杂散发射的限制和带宽。

占用带宽 (OBW) 是包含 99% 总平均功率的有意信号平均功率宽度。低于和高于此限值的功率 (带外发射) 必须等于平均功率的 0.5%。这相当于信号的 -23dBc 带宽。

表 3-2. 带外和杂散发射带宽

OBW/OFR	允许的工作频率范围	fsl	fl	fc	fh	fsh	OOB 限制
4GHz	57GHz 至 64GHz	52	60	62	64	72	-20dBm/MHz
500MHz (如果在 61GHz 至 61.5GHz 的范围外工作，则适用类似于 4GHz 的限制)	61.0GHz 至 61.5GHz	60	61	61.25	61.5	62.5	-10dBm/MHz

- 辐射杂散发射：请参阅 EN 305 550V2.1.0 的章节 4.3.6 (EN 305 550-1V1.2.1 的章节 7.5)。杂散辐射频率范围包括 OOB 限制以外的频率。杂散辐射的测量值高达基频的二次谐波；IWR6843 工作频率为 60GHz 至 64GHz，二次谐波为 128GHz。
- 接收器杂散：请参阅 EN 305 550V2.1.0 的章节 4.4.2 (EN 305 550-1V1.2.1 的章节 8)。根据第 4.4.2.1 条，仅当器件以只接收模式工作时，才适用接收器杂散。该测试不适用于毫米波器件，因为该器件采用同时发送/接收模式工作。
- 接收器干扰信号处理：请参阅 EN 305 550V2.1.0 的章节 4.4.3。此指标衡量该器件与在带内、带外 (OOB) 和远程宽带频率限制内传输的其他无线电应用共存的能力。在带内频率条件下，干扰源必须以 10dBm 等效 EIRP 传输，而在带外和远程宽带频率下，必须以 20dBm 等效 EIRP 传输。

$$\text{In band frequency} = \text{center frequency (fc)} \quad (4)$$

$$\text{OOB} = \text{Fc} \pm \text{OBW} \quad (5)$$

$$\text{Remote band} = \text{Fc} \pm 10 \times \text{OBW} \quad (6)$$

3.1.2 短程液位探测雷达 (EN 302 729)

液位探测雷达是一种广泛应用于各行业过程控制的雷达，支持对填充在指定存储空间内的液体（通常情况）以及其他颗粒或物体进行非接触式测量。这使客户能够监测静态液位，同时还能监测填充/输送速率并检测溢出或泄漏。LPR 必须包含组合的发送器和接收器。其必须配备专用天线和窄视场，以减少散射。这些系统可采用 FMCW、脉冲雷达或类似技术。

3.1.2.1 允许的频率范围和工作带宽

ETSI 允许使用四个不同的频率范围。其中较高的两个频段可以实现更高的目标分辨率水平，这是因为其具有更高的频率和更大的带宽。因此，许多客户已开始向这两个频段迁移。但需要注意的一点是，虽然 ETSI 围绕 57GHz 至 64GHz 频段制定了特定的 LPR 法规，但 FCC 尚未制定相关法规，因此对于同时在 FCC 和 ETSI 监管市场寻求市场准入的应用，75GHz 至 85GHz 频段可能是更有利的选择。ETSI 允许的 LPR 频段及其相关带宽详见表 3-3。

为了确定 LPR 的工作范围，ETSI 定义了 F_L 和 F_H（功率相比最大值下降 20dB 时的下限频率和上限频率）。F_L 和 F_H 必须完全位于允许的工作带宽范围内。

表 3-3. 工作频率

频段起始频率 (GHz)	频段停止频率 (GHz)	可用带宽 (GHz)
6	8.5	2.5
24.05	26.5	2.45
57	64	7
75	85	10

- 平均功率频谱密度：MPSD 设定了所使用频段范围内可以辐射的功率限值。这些限制同时适用于主瓣和半球。

表 3-4. 最大平均功率频谱密度

工作频段 (GHz)	主波束内的最大平均 EIRP 频谱密度 (dBm/MHz)	半球上的最大平均 EIRP 频谱密度
6-8.5	-33	-55
24.05-26.5	-14	-41.3
57-64	-2	-41.3
75-85	-3	-41.3

- 最大峰值功率：ETSI 还设定了 50MHz 频段工作带宽的峰值 EIRP 限制。

表 3-5. 最大峰值功率

工作频率带宽 (GHz)	最大 EIRP (dBm)	3m 处的等效最大 EIRP 场强度水平 (dB μV/m)
6-8.5	7	102.26
24.05-26.5	26	121.26
57-64	35	130.26
75-85	64	129.26

- 6GHz 至 8.5GHz 以及 24.05GHz 至 26.5GHz 频段的辐射功率还有其他限制。本文档中未讨论这些限制。您可以在 EN 302 729 第 4.3.83 节中找到相关内容。
- 对于 57GHz 至 64GHz 以及 75GHz 至 85GHz 频段内的雷达，以下限制适用于主波束内允许的工作频段之外：最大平均功率频谱密度必须比允许的带内最大平均功率频谱密度低 20dB。

3.1.2.2 天线要求

与 EN 305 550 标准不同，LPR 标准包含对天线视场的严格要求。然而，这被主瓣内非常大的许可增益所抵消。这对于验证高储罐中以及穿过厚门户或插入物辐射时是否具有良好的 SNR 非常重要。

要操作 LPR，天线只能朝下，而不能处于任何特定的倾斜或角度。

表 3-6 介绍了允许的天线波束宽度和旁瓣抑制（当旁瓣角度低于 60 度时）。图 3-2 展示了如何测量该值。ETSI 使用天线波束宽度的标准定义，即半功率波束宽度 (HPBW)，指增益从峰值降低 3dB 的点。

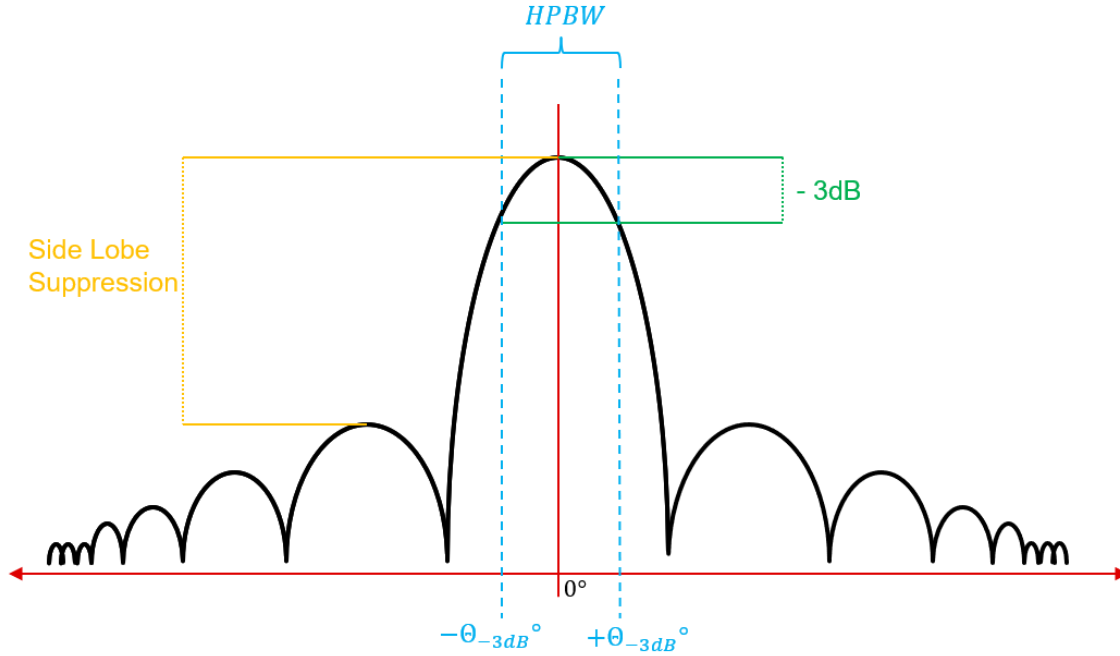


图 3-2. 天线辐射方向图定义

表 3-6. 最大天线波束宽度

允许的工作频段 (GHz)	最大天线波束宽度 (度)	天线旁瓣抑制 (dB)
6-8.5	12	-22
24.05-26.5	12	-27
57-64	8	-39
75-85	8	-38

3.1.3 射频暴露限制 - EN 62311

设定此限制是为了防止由于射频暴露而对人体组织或体表造成有害作用。

表 3-7. 频率范围

频率范围	等效平面波功率密度 (W/m2)
2GHz 至 300GHz	10

$$\text{Power density} = \frac{\text{MeanPower(WEIRP)}}{4\pi R^2} \quad (7)$$

其中

- R = 最短间隔距离

3.1.4 电气安全 - EN 62368

本标准涵盖额定电压低于 600V 的各种设备的安全，包括音频和视频、信息与通信技术以及商用和办公机器。本安全标准和保护措施旨在防止和减少因使用设备而导致火灾爆发，进而造成的疼痛、人身伤害、火灾和财产损失。有关更多详情，请单击[此处](#)。

3.1.5 电磁兼容性 (EMC) — EN 301 489

以下标准适用于依据 EMC 辐射和抗扰度标准执行的测试。

表 3-8. EMC 辐射和抗扰度性能标准

标准	测试期间	测试后
A	如期运行。无功能丧失。无意外响应	如期运行。无功能丧失。无性能下降。储存数据或用户可编程功能不会丢失。
B	可能出现功能丧失。无意外响应	如期运行。丧失的功能可自行恢复。无性能下降。储存数据或用户可编程功能不会丢失。

EN 301 489-1 中的以下条款适用于 TI IWR6843 和 MMWAVEICBOOST 评估板组合。由于设备需要直流电源且并非电信设备，因此部分测试不适用。用户必须确定哪种测试适用于其终端设备。

表 3-9. EN 301 489-1 中的第 8 条 - 测量方法和 EMC 发射结果限值

环境现象		判定
独立测量的辅助设备的外壳 - 第 8.2 条	辅助设备在 EN 55032 中规定的 B 类限制	通过
辅助设备在测量距离 3m 处的辐射干扰在 1GHz 以上		通过
仅用于电信中心的辅助设备在 EN 55032 中规定的 A 类限制		不适用
仅用于电信中心的辅助设备在测量距离 3m 处的辐射干扰在 1GHz 以上		不适用
直流电源输入/输出端口 - 第 8.3 条	根据 EN 55032 的 B 类限制	通过
仅用于电信中心的设备		不适用
交流电源输入/输出端口 - 第 8.4 条	EN 55032 中规定的 B 类限制	不适用
仅用于电信中心的设备在 EN 55032 中规定的 A 类限制		不适用
谐波电流发射 (交流输入端口) - 第 8.5 条	EN 61000-3-2/A1 中关于谐波电流辐射的相应要求适用于每相输入电流高达 16A 及以下的设备。对于每相输入电流大于 16A 的设备，则适用 EN 61000-3-12。	不适用
电压波动与闪变 (交流电源输入端口) - 第 8.6 条	EN 61000-3-3 中关于电压波动与闪变的相应要求适用于每相输入电流高达 16A 及以下的设备。对于每相输入电流大于 16A 的设备，则适用 EN 61000-3-11 [13]。	不适用
电信端口 - 第 8.7 条	EN 55032 中规定的 B 类限制	不适用
仅用于电信中心的设备在 EN 55032 中规定的 A 类限制		不适用

表 3-10. EN 301 489-1 中的第 9 条 - 测试方法与抗扰度测试结果等级

环境现象	测试端口	基本标准	判定
射频电磁场 (80MHz 至 1000MHz 和 1000MHz 至 6000MHz) - 第 9.2 条	外壳	EN 61000-4-3	通过
静电放电 - 第 9.3 条	外壳	EN 61000-4-2	通过
共模快速瞬态 - 9.4 条	交流电源端口	EN 61000-4-4	不适用
信号端口、电信端口、控制端口		不适用	
直流电源端口		通过	
共模射频 (0.15MHz 至 80MHz) - 第 9.5 条	交流电源端口	EN 61000-4-6	不适用
信号端口、电信端口、控制端口		不适用	
直流电源端口		通过	
瞬态和浪涌 - 第 9.6 条	移动无线电设备和辅助设备 (也用于车辆上的移动用途) 的 12V 和 24V 直流电源电压输入端口。	ISO 7637-2	不适用
电压骤降和中断 - 第 9.7 条	交流电源端口	EN 61000-4-11	不适用

表 3-10. EN 301 489-1 中的第 9 条 - 测试方法与抗扰度测试结果等级 (续)

环境现象	测试端口	基本标准	判定
线间浪涌和线地浪涌 - 9.8 条	交流电源端口	EN 61000-4-5	不适用
电信端口		不适用	

除了 EN 301 489-1 之外，还有一些标准将 EN 301 489-1 应用于特定的终端设备。这些标准具有说明性质，针对如何应用 EN 301 489-1 中所包含的标准提供了更细致的说明。对于大多数 60GHz 雷达，将使用 EN 301 489-3。该标准阐明了应如何解释 EN 301 489-1。此处适用四项关键规定。

第一项是，器件必须采用能代表实际使用情况的发射信号进行测试；对于辐射抗扰度测试，接收信号必须比最小可用信号高 30dB。此外，也对定义的信号导致接收器饱和的情况作出了相应规定。

第二项是识别不同的工作模式，如“断电”、“待机”等。这些模式通常通过阅读工作原理来确定。器件在非发送模式期间不应发生计划外发送。

第三项是明确特定端口的辐射和传导发射何时适用。EN 301 489-3 的表 4 对此进行了介绍。根据表 4，辐射发射通常适用于所有设备；所有非便携式使用设备都需要直流电源输入/输出端口传导发射；最后，交流电源输入/输出和有线网络传导发射仅适用于固定位置设备。

最终，EN 301 489-3 不应添加任何额外的测试；相反，EN 301 489-3 只是明确了适用于雷达及其他特定 SRD 细分领域的 EN 301 489-1 要求。

3.2 联邦通信委员会 (FCC)

自 1934 年《通信法案》制定以来，联邦通信委员会一直负责管理无线频谱的使用，以使其尽可能供美国境内所有人员获取和使用。通过更新《联邦法规汇编》第 47 篇完成 FCC 的规则制定。这些规则对美国及其领土内的所有运营均具有约束力。FCC 工程技术办公室 (OET) 发布知识数据库 (KDB) 更新，用于阐明 FCC 法规的实施细则。虽然 KDB 不会修改或取代法规，但大多数 TCB 将遵循这些更新。虽然第 47 篇内容庞大，但本文仅重点介绍与 60GHz 雷达和 TLPR 相关的部分。

测试和认证完成后，设备制造商可自愿在其器件外壳上标注 FCC 标志，以表明其符合适用法规。在所有情况下，FCC 都要求批准的硬件包含 FCC ID，格式为“FCC ID：XXXXXX”。必须在设备的包装和用户指南中标注相同的标志。FCC 允许对器件进行电子标记。

3.2.1 终端设备和 FCC 条款

表 3-11 展示了根据标准解释的关键终端设备类别、允许的频段及相应的 FCC 条款。

表 3-11 显示了本文撰写时的理解，可能并不是最新的。建议通过 FCC 确认您的应用场景的具体细节。

表 3-11. 终端设备

终端设备	频段	FCC 条款
用于区域占用的区域扫描仪	60GHz	FCC 15.255 - 固定场扰动传感器
自动门	60GHz	FCC 15.255 - 固定场扰动传感器
手势识别	60GHz	FCC 15.255 - 用于交互式运动传感的短程设备
高精度电平感测	60GHz 或 77GHz	FCC 15.255 固定场扰动传感器 FCC 15.256 - 电平探测雷达
远程人员检测	60GHz	FCC 15.255 - 固定场扰动传感器
人数统计	60GHz	FCC 15.255 - 固定场扰动传感器
机器人	77GHz	FCC 第 95 部分 (如果机器人用于移动人员或物品)
交通监控	60GHz	FCC 15.255 - 固定场扰动传感器
生命体征	60GHz	FCC 15.255 - 固定场扰动传感器

表 3-11. 终端设备 (续)

终端设备	频段	FCC 条款
车内感应	60GHz	FCC 15.255 - 固定场扰动传感器 (车辆停住时)
汽车感应	77GHz	FCC 第 95 部分

3.2.2 60GHz 雷达运行 (47 CFR § 15.255)

2023 年 8 月, 联邦通信委员会 (FCC) 更新了 (54GHz 至 71GHz) 频段 60GHz 雷达的相关法规。这些新法规是 FCC 推动全球 EMC/EMI 法规协调使命的一部分, 并为工业和消费类应用以及非 ADAS 汽车应用场景中的 60GHz 雷达应用创造了极具包容性的许可空间。

FCC 主要按带宽对 §15.255 进行了梳理。每个可用带宽都有特定的频率、EIRP、位置和潜在的占空比限制。我们将简要介绍这些限制, 并提供一些潜在应用场景的示例。

最常用的频段之一是工业、科学和医疗 (ISM) 频段。ISM 频段是一个 500MHz 的频段, 频率范围为 61GHz 至 61.5GHz。由于带宽较窄, 因此获得了较为宽裕的 36dBm 的平均电流和峰值 EIRP 许可。

一个令人兴奋的新进展是允许将 60GHz 雷达用于液位检测应用, 即液位探测雷达 (LPR) 或储罐液位探测雷达 (TLPR)。这是朝着与 ETSI 协调一致迈出的一步。但与 ETSI 不同的是, FCC 尚未制定具体的 60GHz LPR/TLPR 法规。根据 §15.255 申请 LPR/TLPR 系统认证的设计人员必须全部满足前述限制条件。这样做的好处是, 无需使用具有低功耗旁瓣的窄视场 FOV 天线。

但这确实给希望利用相同硬件同时通过 FCC 和 ETSI 法规认证的 LPR/TLPR 系统设计人员带来了挑战。这是因为 ETSI 确实要求 60GHz LPR/TLPR 使用具有低功耗旁瓣的窄视场 FOV 天线。其难点在于, 对于寻求大于 500MHz 带宽的设计人员来说, 峰值 EIRP 的相关法规存在不一致。实际上, 设计人员可能会遇到这样一种情况: 在使用较高的带宽时, 其所需的天线增益会超出 FCC 法规允许的限制。因此, 对于需要 FCC 和 ETSI LPR/TLPR 法规之间互操作性的设计人员来说, 使用 80GHz 频段可能会更容易。对于 FCC 而言, 该频段受 47 CFR 15.256 法规约束。

传统上, 液位探测雷达由 FCC 根据 47 CFR 15.256 进行监管。此法规为向下探测的液位探测系统开放了 75GHz 至 85GHz 频段。该频段与欧洲监管机构 ETSI 的 EN 302 729 标准基本一致, 为 LPR/TLPR 应用提供了理想的互操作性。

3.2.2.1 基波发射水平、带宽与最大占空比

在新的 § 15.255 中, 不仅规定了基波发射的限制, 还规定了带宽限制和 TX 有效发送时间限制。具体而言, § 15.255(c)(2) 至 § 15.255(c)(3) 涵盖了 FDS 的限值, 使其能够避免最大峰值传导功率限制。这些限制和带宽与特定应用场景相关, 旨在降低使用中 FDS 之间发生冲突的可能性。

就 § 15.255 而言, 发送器占空比限制实际上使用发送器关断时间间隔定义。在这种情况下, 发送器在任意 33ms 窗口内的关断时间必须满足最小累计时长要求。此情况可以使用任何任意且连续的 33ms 窗口, 且必须满足最小值。此外, 只有发送器关断至少 2ms 的间隔才会计入最小值。通常, 线性调频脉冲间的空闲时间太短, 无法计入该限制。看待此情况的另一种方式是考虑帧结构。一个帧由固定数量的突发组成, 而每个突发又包含固定数量的线性调频脉冲。通常, 线性调频脉冲间空闲时间和突发间周期都远短于 2ms。因此, 帧间周期或深度睡眠周期必须至少为 2ms, 且在任何 33ms 窗口内, 这些 2ms 周期的总和不得小于 16.5ms 或 25.5ms。

§ 15.255(c)(2) 涵盖了带宽、EIRP 和工作周期其他相关限值, 总结详见下表。下面的链接提供了一个有用的决策树, 可帮助确定应遵循的适当带宽与限值。

频段 (GHz)	平均辐射 TX 功率	峰值辐射 TX 功率	占空比 (关断时间)	要求	法规
57.0-59.4	未指定限制	20dBm	未指定限制	室内; 更改模式前须保持当前模式至少 33ms	§ 15.255(c)(2)(i)
57.0-59.4	未指定限制	30dBm	未指定限制	室外; 更改模式前须保持当前模式至少 33ms	§ 15.255(c)(2)(i)

频段 (GHz)	平均辐射 TX 功率	峰值辐射 TX 功率	占空比 (关断时间)	要求	法规
57.0-61.56	未指定限制	3dBm	未指定限制	更改模式前须保持当前模式至少 33ms	§ 15.255(c)(2)(ii)
57.0-61.56	未指定限制	20dBm	50%	更改模式前须保持当前模式至少 33ms	§ 15.255(c)(2)(ii)
57.0-64.0	未指定限制	14dBm	77.3%	更改模式前须保持当前模式至少 33ms	§ 15.255(c)(2)(iii)(A)
57.0-64.0	未指定限制	20dBm	50%	户外以及临时或固定应用；更改模式前须保持当前模式至少 33ms	§ 15.255(c)(2)(iii)(B)(1)
57.0-64.0	未指定限制	20dBm	50%	适用于户外和车辆外部移动应用；更改模式前须保持当前模式至少 33ms	§ 15.255(c)(2)(iii)(B)(2)
61.0-61.5	40dBm	43dBm	未指定限制	无	§ 15.255(c)(2)(iv)

- 对于在 61.0GHz 至 61.5GHz 频段内工作的固定场扰动传感器，超出此带宽但在 57GHz 至 71GHz 范围内的发射平均功率不得超过 10dBm，峰值功率不得超过 13dBm。

2. 超出 61.0GHz 至 61.5GHz 频段的有意设置应用场景必须满足 57GHz 至 71GHz 频段的相关限制，而不是满足 61.0GHz 至 61.5GHz 带外应用场景的额外限制。

此流程图可协助选择控制线性调频脉冲、突发脉冲和帧配置的适用法规。

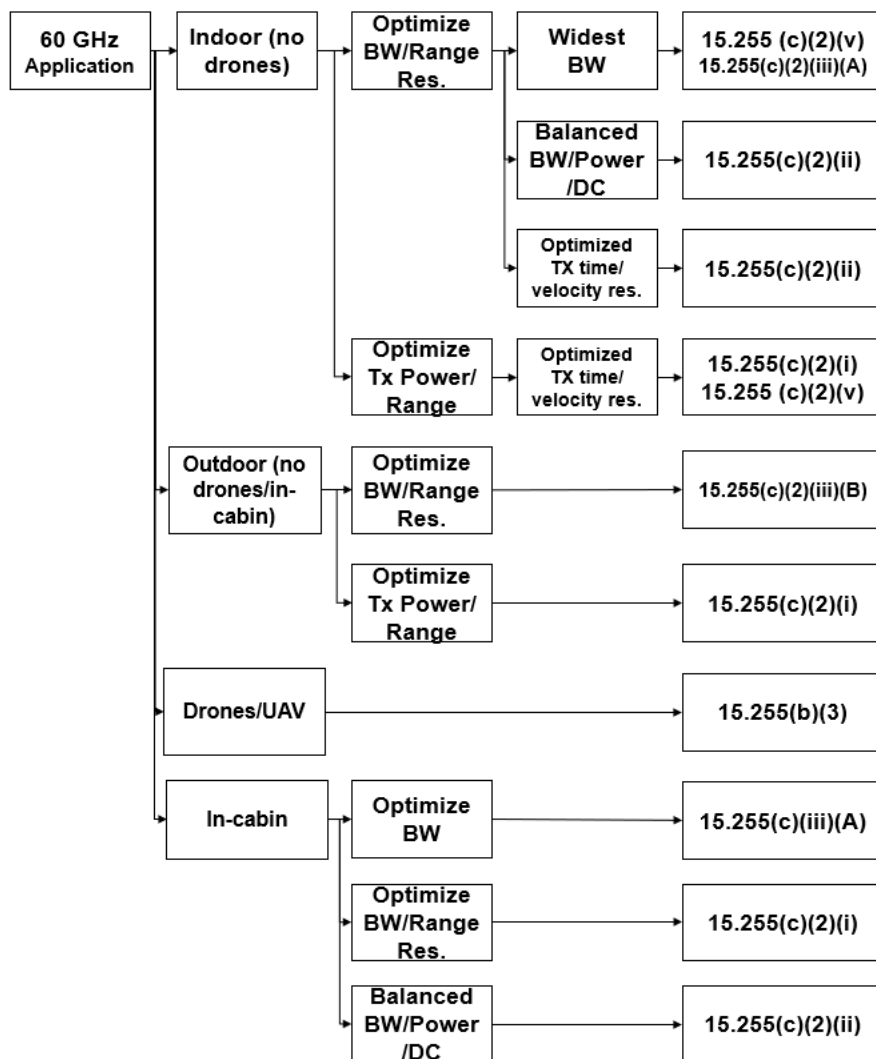


图 3-3. FCC § 15.255 应用特定线性调频脉冲建议

3.2.2.2 杂散发射

杂散发射在 § 15.255(d) 下介绍。在 40GHz 以下，杂散发射必须满足 FCC § 15.209 中给出的限制。在 40GHz 至 200GHz 之间，57GHz 至 71GHz 范围以外的杂散发射在 3 米距离处不得超过 90pW/cm²。见 表 3-12。

表 3-12.

频率 (MHz)	场强度 (mV/m)	测量距离 (m)
0.009-0.490	2400/F(kHz)	300
0.490-1.705	24000/F(kHz)	30
1.705-30.0	30	30
30-88	100**	3
88-216	150**	3
216-960	200**	3
960-40000	500	3

表 3-12. (续)

频率 (MHz)	场强度 (mV/m)	测量距离 (m)
40000-57000	20000	3
71000-200000	20000	3

一般来说，杂散发射不得超过基波发射水平。

3.2.2.3 频率稳定性

频率稳定性限制根据 § 15.255(f) 进行设定。基波发射必须保持在 § 15.255(c)(2) - §15.255(c)(4) 中提到的允许频段内，且在温度范围为 -20°C 到 50°C 以及输入电压波动范围为额定输入电压 85% 至 115% 时必须保持在此频段内。

一些测试机构更愿意以连续波 (CW) 测量的形式执行此测量。这是因为其比 FMCW 测量替代方案更简单。可以通过将器件连接到 mmWAVESTUDIO 来实现 CW 测量，但未必直观简便。作为系统集成商，最简单的选择是让测试机构将其作为 FMCW 测试进行测量。

3.2.2.4 FCC 豁免及其他相关信息

过去，FCC 对在特定应用场景和条件下的某些应用授予了豁免，这些豁免允许在 FCC § 15.255 标准的先前解释之外使用。可以在[此处](#)找到第 15 部分的豁免请求示例，该请求已通过短程交互式运动传感器的批准。

随着更新的 § 15.255 法规的发布，对豁免的需求已几乎（甚至完全）消失。不过，如果客户有意申请豁免，则需要产品设计的早期阶段开始申请流程，因为豁免流程的申请周期并不确定。

3.2.3 液位探测雷达 (47 CFR § 15.256)

虽然可以使用 60GHz 雷达根据 § 15.255 构建储罐液位探测雷达，但与 § 15.256 相比，存在一些严重的劣势。§ 15.256 的主要优势在于，它允许的功率远高于 § 15.255，这使其对于较高的塔架或筒仓而言更为实用。幸运的是，TLPR 和 LPR 系统的系统设计人员可以利用 ETSI 与 FCC 在液位探测雷达法规方面的全球协调，从而降低开发和部署成本。

3.2.3.1 使用限制

根据 §15.256 规定，不得向居民用户销售液位探测雷达 (LPR)。LPR 通常用于商业或工业用途。此外，LPR 还必须安装在固定位置，且不得在运动或运输过程中运行，即使在受限空间中也是如此。LPR 还必须配备专用或集成天线，且天线的主波束须垂直向下。尽管这些要求大多未包含在 §15.255 中，但如下所示，基波发射功率要高得多。

3.2.3.2 基波发射带宽

无论 LPR 在哪个频段下运行，LPR 都必须保持不低于 50MHz 带宽。对于本部分，FCC 将带宽定义为（外部功率下降 10dB 时）高于和低于中心频率的两点之间的宽度。这与使用 20dB 压降的 ETSI 法规不同。

表 3-13. LPR 基波发射限值

允许的工作频段 (GHz)	平均 EIRP (dBm, 任意 1MHz 内)	峰值 EIRP (dBm, 任意 50MHz 内)
5.925-7.250	-33	7
24.05-29.00	-14	26
75-85	-3	34

FCC 对 LPR 的平均和峰值 EIRP 均设定了限制。与其他操作相比，其采用特殊方式完成。FCC 并未像 ETSI 那样使用频谱密度。相反，对于平均 EIRP，FCC 要求在使用功率平均检波器时，计算并报告任意 1MHz 带宽内发现的最大功率水平，从而计算出平均 EIRP。您可以将其想象为：使用一个具有 1MHz 窗口的平均值检波器在带宽内滑动，并仅报告其检测到的最高功率及检测到的对应频率。

对于峰值功率，FCC 使用峰值功率检波器，以检测到的最高平均功率频率位置为中心，在 50MHz 带宽范围内进行检测。此 50MHz 带宽必须完全位于上面所示的授权带宽范围内。如果检波器的 RBW 小于 50MHz（通常属于

此类情况)，则根据下表降低峰值 EIRP 限制。请注意，RBW 不得低于 1MHz 或高于 50MHz。VBW 不得小于 RBW。

表 3-14. 基于检波器 RBW 的峰值 EIRP 降低

检波器 RBW (MHz)	EIRP 限制降低
50	不适用
$1 \geq \text{RBW} > 50$	$20 \times \log(\text{RBW}/50)\text{dB}$

3.2.3.3 天线限制

如前所述，用于 LPR 的天线必须为专用或集成到设计中，并且天线的主波束（视轴）必须垂直向下。此外，FCC 对天线旁瓣进行了限制。为了测量此限制和上面所示的基波发射，可通过找出检波器与天线之间的最高耦合角度来确定真实（而非理论）视轴的位置。

有关天线 HPBW 和旁瓣抑制的图示，请参阅图 3-2。表 3-15 描述了 FCC 为 LPR 规定的 HPBW 和旁瓣抑制。除了 FCC 尚未批准将 57GHz 至 64GHz 雷达用于 LPR 之外，这些值与 ETSI 法规完全相同。

表 3-15. HPBW 和旁瓣抑制

频段 (GHz)	HPBW (度)	旁瓣抑制 (dB)
5.925-7.250	12	-22
24.05-29.00	12	-27
75-85	8	-38

3.2.3.4 非预期发射

非预期发射仅为 § 15.209 中列出的发射。

3.2.4 模块化认证 (47 CFR § 15.212)

对于某些雷达用户而言，开发一种只需认证一次、随后即可集成到多个不同主机系统中的雷达模块，而无需让每个最终产品都进行带内 (§ 15.255) 测试，这可能更具优势。这种解决方案称为“模块化认证”雷达。该雷达由单个 PCB 组成，其中包含雷达芯片、晶体振荡器和电源，所有这些元件都必须被屏蔽层覆盖。该模块化认证流程在 47 CFR §15.212 中进行了介绍，并在 KDB 44637 中详细说明。其主要优势在于，公司或其客户可以通过减少整体测试负担来节省时间和金钱。

这与用于创建 Bluetooth® 和 WiFi® 模块等的流程相同。该流程非常灵活，既可以开发供公司内部及其自身产品使用的模块，也可以开发销售给其他企业用于集成到其最终产品中的模块。

作为获得模块化认证雷达的一部分，必须提交一些关键的文件，即面向客户的文档。需要让客户确切了解如何将模块集成到其主机系统中，以及建议进行哪些测试以确保不会产生意外发射。对于仅供内部使用的模块，这一要求较为宽松。但需要注意的是，此流程仅消除了最终集成系统执行带内测试的需求，并不能免除任何安全或 EMC 测试要求。

与其他 FCC 文件一样，您需要设立一个 FCC 注册码来识别文件的联系人，同时还需要一个 FCC ID。FCC ID 包含 3 到 5 个字符的前缀，后跟由制造商选择最多的 15 个字符。前 3 到 5 个字符由 FCC 分配，称为“授权人代码”。在申请模块化授权之前，您需要先申请授权人代码并支付相关费用。这与其他 FCC 设备认证流程相同。

遗憾的是，只有 FCC 允许雷达模块化认证，其他监管机构不允许。但在其他监管环境（如 ETSI 或 JRL）中，可以对模块执行一次带内测试，然后在未来的主机集成中利用这些测试来减轻总体测试负担。有关这些法规的最新解释，请咨询您的测试机构或法律顾问。

3.2.5 辐射暴露要求

FCC 标准中有许多适用于辐射暴露的章节，并且根据具体用例，必须符合所有相关要求。

1. [1.1307\(b\)](#) — 可能对环境产生重大影响的行为，必须为其准备环境评估 (EA)。
2. [1.1310](#) - 射频辐射暴露限制。
3. [2.1091](#) - 射频辐射暴露评估：移动设备。

4. 2.1093 - 射频辐射暴露评估：便携式设备。

3.3 日本无线电法

在日本销售或进口到日本的终端设备均受日本无线电法 (JRL) 约束。这项法律通过以下多项法规和通知予以实施和执行：《无线电法实施法规》、《无线电设备监管条例》(ORE) 以及《特定无线电设备技术法规认证相关条例》。JRL 及所有随附法规均进一步纳入 ARIB 标准 T-73。JRL 的法规和执行工作由内务和通信部 (MIC) 负责。

已成功证明合规性的设备将获得 MIC 注册号，该编号必须与 Giteki 符号一同显示。如果器件包含电信调制解调器，则该器件还可以获得技术法规符合性认证编号，该编号必须与 MIC 注册号一同显示。Giteki 符号的直径通常为 3mm。该符号可以缩小尺寸，只要符号和注册号依然肉眼清晰可见。如果空间不足，可以在电子标签或用户手册中显示 Giteki 标记。在器件外壳上无法显示 Giteki 标记的任何情况下，必须将 Giteki 标志加到产品包装上。

3.3.1 带宽、指定频率和容差

日本无线电法允许毫米波雷达在 57GHz 至 64GHz 频段，或 61GHz 至 61.5GHz 的公认 ISM 频段内运行。表 3-16 对此进行了总结。与 FCC 类似，JRL 要求对发出的信号进行占空比控制，使每 33ms 间隔的 TX 导通时间不超过 3.0ms。这样做的目的是确保其他雷达系统有充裕的时间进行不间断的信号发射。

表 3-16.

ISM 频带	全频段
61GHz 至 61.5GHz	57GHz 至 64GHz

JRL 要求在 CW 而非功能 (FMCW) 模式下测试频率容差。必须制定计划以支持此类测试。不过，可以向 MIC 申请制定替代测试计划。用户必须与其测试机构对此进行讨论。频率容差非常简单，即任何 FMCW 线性调频脉冲的中心频率不得偏离指定的频段，如上所示。

与 ETSI 或 FCC 法规相比，JRL 允许相对较低的 TX EIRP，仅为 13dBm 或更低。此外，天线的输入功率限制为 10dBm。此设计不仅限制整个系统的输出功率，而且限制发送器的输出功率。此外，TX EIRP (称为“天线功率”) 仅允许相对于认证值向上偏离 50%，向下偏离 70%。但不允许违反 13dBm 的最大 TX EIRP。表 3-17 对此进行了总结。

表 3-17.

限制	功率容差
上限	+50% 天线功率
下限	-70% 天线功率

3.3.2 带外和杂散发射

与所有其他监管法案一样，JRL 也保持杂散和带外发射的标准。但与 ETSI 不同的是，这些频段更多是根据绝对频率而不是 99% OBW 来确定。表 3-18 中列出了杂散和带外发射的适用限制。

表 3-18.

频率	最大场强度	域
> 55.62GHz	-30dBm/MHz	杂散
55.62GHz 至 57GHz	-26dBm/MHz	带外
64GHz 至 67.5GHz	-26dBm/MHz	带外
< 67.5GHz	-30dBm/MHz	杂散

除了对 TX 杂散和 OOB 发射的限制外，JRL 还对不干扰其他无线电设备的源产生的发射进行了限制。这些发射使用伪天线电路测得，该电路设计为保持与接收天线相同的电气特性。这些二次发射限制为 20nW。

3.3.3 控制功能

为防止来自同一外壳中的其他无线电设备的干扰，雷达必须通过调制方法或其他方式确定检测到的波是来自相关雷达还是其他无线电器件。获得这些信息后，雷达必须能够停止其发射。ORE 第 14-2-1-1 条和第 14-2-2-1 条对此进行了论述。

3.4 无线规划与协调司 (WPC)

无线规划与协调司 (WPC) 隶属于印度通信部下属的电信局。与其他国家/地区不同，WPC 将频谱接入与频谱分配职能合二为一。但是，与其他国家/地区一样，使用电磁频谱需要获得 WPC 的许可。

3.4.1 允许的工作频率与批准

撰写本文时，WPC 仅允许使用工业、科学和医疗 (ISM) 频段。该频段在《Use of Low Power and Very Low Power Short Range Radio Frequency Devices (Exemption of Licensing) Rules, 2018》(G.S.R.1047(E)) (刊载于 2018 年 10 月 18 日 The Gazette of India 特别版第 II 部分第 3(i) 节) 第 3 条发布后获批准。

第 3 条表 IX 第 15 行允许在 61.0GHz 至 61.5GHz 频率范围内无许可运行，峰值功率限制为 100mW EIRP (20dBm EIRP)。第 15 行进一步列明 ETSI 标准 EN 305 550 为该频段的控制标准。

目前，WPC 尚未授权在 ISM 频段之外使用 57GHz 至 64GHz 频段。但其已发布意向通知，表明有意根据全球标准探索未来使用该频段的可能性。

满足 RED 要求、在产品上标记 CE 标志并出具 DoC，足以满足 WPC 关于证明合规性的要求。

3.4.2 设备类型授权

此外，根据 G.S.R.1047(E) 第 5 条，所有无线电设备在进口到印度之前必须获得 WPC 的设备类型授权。未获得 ETA 可能导致无线电设备在海关边境被扣押。同样，在印度销售的无线电设备也需要获得 WPC 的 ETA。ETA 适用于进口同款设备的所有公司，无论哪家公司申请 ETA。

只要其集成产品的线性调频脉冲带宽与针对同款器件的 TI EN 305 550 报告中所示相同，进口商就可以在其 ETA 申请时使用 TI 的报告，从而顺畅地将其产品进口到印度市场。TI 将这些报告公开存储在 TI [Radar Toolbox](#) (mmWave radar sensors → Hardware kits and boards → <EVM Name> → Emissions Certification → Red Certification Collateral → Report Name) 中。

3.5 联邦电信研究院 (IFT)

IFT 是负责监管墨西哥合众国境内射频器件使用的监管机构。IFT 一直保持针对毫米波独立的监管规定，其中包括对 ISM 频段的认可。

3.5.1 基波发射水平和带宽

IFT 允许在某些限制下使用 ISM 频段和其他带宽。通过申请豁免 (即转而遵循 FCC 或 ETSI 法规)，可以获得 IFT 允许偏离这些标准的许可。

按照规定，IFT 设定了以下带宽和 EIRP 限制：

表 3-19. 允许的系统 EIRP

频段 (GHz)	最大带宽 (MHz)	平均 EIRP (dBm)	峰值 EIRP (dBm)
61-61.5	500	40	43
57-64	500	10	13
57-64	--	-10	10

与 FCC 不同，IFT 没有对占空比实施任何限制。此外，IFT 对发送器功率进行了限制，这些限制详见表 3-20。

表 3-20. 最大许可发送器功率

BW	最大发送器功率
> 100MHz	500mW (27dBm)
< 100MHz	BW (MHz) × 500 (mW) / 100 (MHz)

3.6 国家电信局 (ANATEL)

巴西联邦共和国的相关监管机构是 ANATEL。ANATEL 负责颁布法规并对国民议会颁布的法律进行解释。毫米波雷达器件属于其管辖范围。

3.6.1 基波发射水平、带宽与最大占空比

ANATEL 近期已将其法规与 FCC 的 47 CFR 15.255 法规协调一致。这意味着符合 FCC 法规的器件也会自动符合巴西法规。

3.6.2 许可证

ANATEL 许可证只能颁发给当地代理商，并且必须在进口或销售雷达器件之前获得。这些许可证必须每 12 至 24 个月续期一次，具体取决于器件类型。评估模块无需许可。

3.7 交通和通讯部 (MTC)

秘鲁监管机构 MTC 最近已取消对 57GHz 至 64GHz 频段的管制。唯一的要求是，包含雷达的系统必须经过 EIRP、OBW 和周期性测试，并通过扫描最终产品上的嵌入式二维码提供该测试数据，同时申请人必须向 MTC 申请设备类型批准。ETA 证书颁发后永久有效。拟向秘鲁进口无线电器件的相关方必须在进口前取得 ETA。

3.8 国家通信管理局 (ENACOM)

ENACOM 是阿根廷共和国的无线电器件监管机构。与 FCC 或 ETSI 非常相似，ENACOM 被赋予通过制定法规来实施国家法律的权力。对于毫米波雷达，ENACOM 允许在 57GHz 至 71GHz 频段内运行，但限制为平均功率不超过 40dBm，峰值功率不超过 43dBm。

值得称道的是，ENACOM 允许使用境外生成的测试报告。这可以重复使用其他测试报告，例如 FCC 或 ETSI 的测试报告。

4 适用术语和公式

4.1 占空比因数

占空比因数计算为整个突发脉冲的占空比乘以每个突发脉冲内的占空比。

$$\text{Duty Cycle Factor(dB)} = 10\log\left(\frac{1}{X}\right) \quad (8)$$

其中 X = 占空比

表 4-1. 使用突发脉冲内和突发脉冲间的占空比计算得出的占空比校正值

BW 模式	导通时间	周期	占空比	导通时间	周期	占空比	占空比线性	占空比	占空比校正值
	突发脉冲间			突发脉冲内			总计		
1300	4.29	16.06	0.267	29.66	33.33	0.890	0.24	23.76	6.24

4.2 有效全向辐射功率 (EIRP)

EIRP 定义为发射功率和天线增益之和，当已知这两个参数时，EIRP 可以计算如[方程式 9](#) 所示。EIRP 表示非全向天线在峰角处的最大辐射功率。

$$\text{EIRP} = P_t - L_c + G_a \quad (9)$$

其中

- P_t 为 TX 功率
- L_c 为电缆或布线损耗
- G_a 为天线增益

4.3 Friis 公式

在测试设置中，使用功率计测量接收功率 (P_r)，已知接收天线的增益 (G_r)，测量工作频率以及接收天线到 EUT 的距离。使用 Friis 公式计算 EUT TX 链的未知发射功率，如[方程式 10](#) 所示。

$$\text{EIRP(Friis)} = P_T \times G_T = \frac{P_R}{G_R} \times \left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad (10)$$

其中

- P_R 为测量的功率
- G_R 为接收测量天线的增益
- D 为测量距离
- λ 是波长

4.4 远场边界

远场边界如[方程式 11](#) 中所示。顾名思义，远场边界是指远离天线的区域。由于电磁场的特征（例如天线图）在 EUT 的远场中不会发生变化，因此基波信号的测量超出了这一边界。

$$R(\text{far-field}) = \left(\frac{2 \times L^2}{\lambda}\right) \quad (11)$$

其中

- L 是最大天线尺寸，单位为米
- λ 是波长，单位为米

5 工具和设置

TI 的 **MMWAVESTUDIO** 专为评估和表征 TI 毫米波传感器而设计。**MMWAVEVISUALIZER** 支持毫米波软件开发套件 (SDK) 和毫米波低功耗 SDK 开箱即用演示的数据输出实时点云图。这两个工具均允许配置测试所需的啁啾参数。

5.1 硬件设置

对于 EUT 的认证、测试和表征，TI 建议新增一个选件来包含供与 MMWAVEICBOOST 兼容的 60 引脚 SAMTEC 连接器。MMWAVEICBOOST 承载卡可通过 USB 连接进行调试和仿真，还可直接连接到毫米波工具，例如 MMWAVESTUDIO 和 mmWave Visualizer。通过将 MMWAVEICBOOST 与 DCA1000EVM 实时数据采集适配器配对，可以采集原始模数转换器 (ADC) 数据。要配置 MMWAVEICBOOST，请参考用户指南。

对于无法包含 60 引脚连接器的客户，图 5-1 展示了与 mmWave studio 和 mmWaveVisualizer 连接来进行测试和认证所需的基本外设。这是为了验证可以使用某些监管标准所需的功能（如连续波模式）。

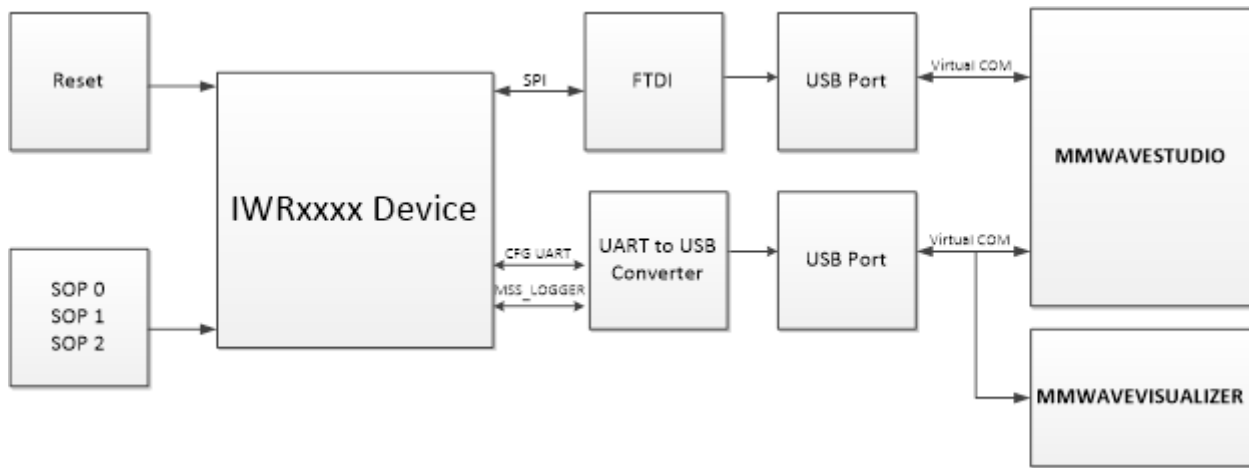


图 5-1. 与 TI 工具连接

5.2 内部实验室测试环境搭建

通常，可能需要对设计进行内部评估，以确定系统能够通过认证。按照与 TCB 相同的详细程度在内部执行相同的测量往往过于繁琐、成本高昂且非常耗时。这是因为暗室、电缆、天线、校准、验证和认证等环节既昂贵又复杂。

但这并不意味着无法采取更简单的措施来帮助调试系统，并为其预扫描或认证做好准备。本节讨论了一些重要的技术和环境搭建，可用于准备认证或调试发射报告。

5.2.1 近场电路探测

如果检测到发射，有时可能难以找到发射源。一种可以提供辅助的技术称为近场探测。近场探测也称为“嗅探”，是指使用特定尺寸的探测天线来追踪辐射发射源。通常会使用以下设备：

- 探测天线
 - 天线必须经过调谐或调整尺寸，以检测特定的频率范围，特别是目标频率范围
- 线缆
- 频谱分析仪
 - 分析仪的频率范围必须大于目标信号的频率范围
- 屏蔽室或暗室
 - 选择以防止其他外部信号干扰测量

过程通常如下：

- EUT、SA、天线和配套设备均已装入测试室。除 EUT 和 SA 外的电子设备均留在测试室之外，以防止污染测量数据。

- 将 SA 的迹线设置为最大保持模式，与峰值检波器配合使用。这会导致 SA 保持在其屏幕上检测到的最高功率尖峰。
- 然后，将探测天线缓慢地、系统性地穿过整个 EUT，不接触元器件或载物台，而是保持在元器件上方约 1 至 2 厘米处。
- 发现尖峰后，可以清除并重置屏幕以确认发射位置

找到发射源后，就可以根据辐射位置及其频率直观推断出其来源。这可以通过考虑迹线的长度或已组装金属元件的尺寸来实现。当其尺寸接近发射波长的四分之一时，便会开始有效地充当天线。

虽然这项技术有助于找到发射，但必须认识到，并非所有近场发射都会导致远场发射。因此，并非所有近场发射都存在 EMC 问题。出于此原因，该技术通常最适合作为反应性或调试性措施使用。虽然本节讨论了手动测量技术，但也有一些自动化测试解决方案可供使用，只是需要一定的成本。

5.2.2 占用带宽测试

许多现代频谱分析仪都将占用带宽测试作为可选软件包或标配功能提供。这对于确定雷达是否符合 FCC 或 ETSI 的 99%OBW 测试要求或峰值 EIRP 测试要求非常有用。这可通过两种方式实现：

- 校准测量
 - 这是测量的黄金标准，但实现起来不仅耗时且成本高昂，因为必须测量和计算系统损耗，然后将其从系统中进行去嵌处理。
- 相对测量
 - 当不需要 EIRP 真实值时使用。此时频率成分及其相对功率较重要

需要注意的是，并非总能使用每个频谱分析仪来测量雷达的带内单音信号。因此，通常需要使用下变频器或频率扩展模块。这通常是一个控制良好且经过校准的下变频混频器，用于将带内信号降频至频谱分析仪能够解析的频率。使用频率扩展模块时的一个关键问题是，其可能会在频谱中引入杂散，因此在测量 EUT 之前正确表征任何频率扩展模块非常重要。

要正确进行此测量，请采取以下步骤：

1. 将频谱分析仪设置为最大保持模式和峰值检波器模式
2. 将分辨率带宽设置为 1MHz (这符合 ANSI 标准)
3. 将扫描时间设置为较大的值，例如 600 秒 (这是为了留出充足时间，让检波器上产生可观的线性调频脉冲功率)
4. 配置雷达，允许其发出线性调频脉冲并填满频谱分析仪的显示画面

由此得到的数据可用于确认所需的配置在监管限制范围内发生，且功率平坦，没有明显的功率尖峰。如果使用相对测量，请务必注意，功率水平将与测量值有所不同。

5.2.3 辐射方向图测量

在设计定制天线或评估雷达天线罩和镜头系统性能时，非常需要测量辐射方向图和视场。辐射方向图测量对于法规备案也很有用，尤其是对于 JRL。本节将介绍一种测量辐射方向图的简单方法。

此类测量需要以下各项：

- 高频暗室
- 自动单轴或双轴云台
- 角反射器和支架

暗室无需是大型房间，冰箱大小即可。同样，自动化云台和暗室的成本也不需要很高。Millibox.org 是一家提供高性价比方案的供应商。

以下程序用于获得天线辐射方向图：

1. 将角反射器和 EUT 置于暗室的另一端。
2. 确定要执行的线性调频脉冲扫描。
 - a. 通常为 500MHz 或 1GHz，中心频率为目标频率。可以在不同的线性调频脉冲起始频率多次重复该测试，以提供整个频率范围内更全面的天线性能信息。

3. 配置雷达并设置云台，以所需的步长扫描方位角或仰角。
 - a. 更精细的步长可获得更多的细节，但代价是增加测试时间。
 - b. 如果需要，也可以进行离轴测量，但同样会增加测试时间。
4. 在每个角度步长，让雷达发送线性调频脉冲并使用 DCA1000 执行原始 ADC 捕获；或者，如果器件支持，也可以使用 SPI-ADC 捕获。

测试结束时，收集所有 ADC 文件并进行后处理。数据将形成雷达立方体。可以使用 MATLAB、python 或其他计算系统对数据进行后处理。搜索雷达立方体以获得反射器引起的强峰值。每个虚拟天线都应该有一个结果（启用 RX × 启用 TX）。根据相关角度绘制峰值功率水平图，即可得到虚拟天线辐射方向图。

如果发送和接收天线对具有相同的增益，则可根据需要进一步将其分解为天线增益。

要找到视轴，只需找到峰值增益。在这种情况下，半功率波束宽度定义为：功率从峰值下降 6dB 时，视轴任一侧的角度范围。这与传统的 HPBW 定义（-3dB 点）形成对比。这是因为该图代表虚拟天线对，因此 HPBW 必须指示两根天线，而不是一根天线。

还有其他用于测量 CW 辐射方向图的技术，但该主题较为复杂，将留待其他应用手册介绍。

5.3 MMWAVESTUDIO

mmWave Studio 提供了一个易于使用的平台来设置和配置认证所需的啁啾。利用 LUA 脚本可以实现一定程度的自动化。有关使用 mmWave Studio 的更多信息，请参阅 [DCA1000EVM 数据采集卡用户指南](#)。

5.3.1 运行 LUA 脚本

要运行脚本，请单击 **browse**，导航到包含 LUA 脚本的目录，选择该脚本，然后选择 **Run**。用于对 IWR6843 EVM 进行认证的 LUA 脚本示例包含在认证包中。

需要下载并安装 TIREX 包，才能访问 LUA 脚本

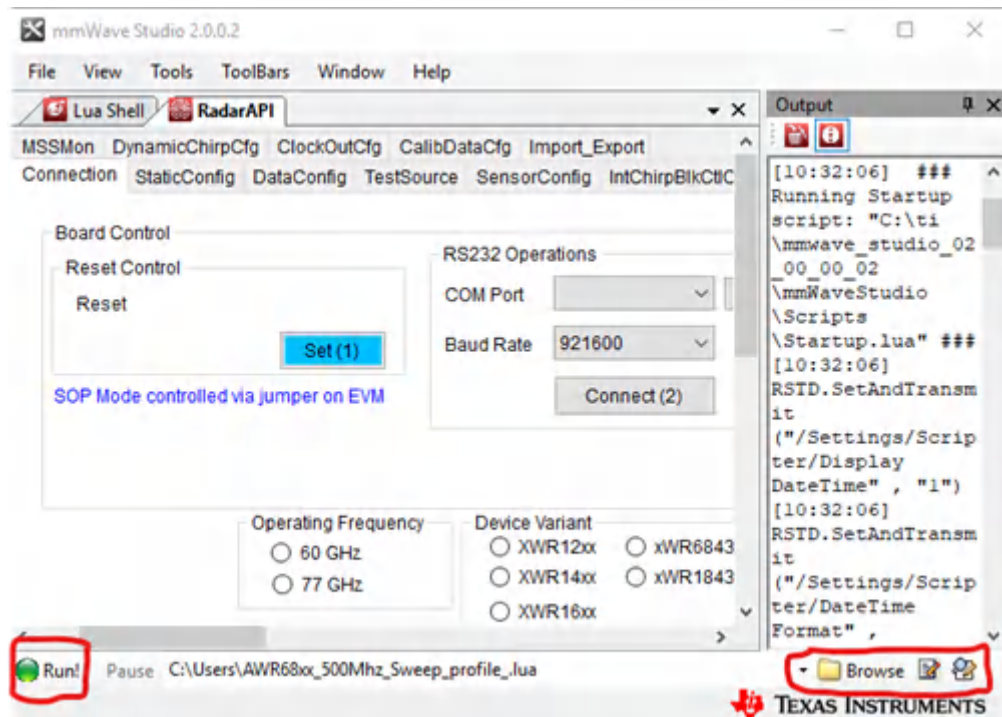


图 5-2. 运行 LUA 脚本

5.4 mmWave Visualizer

可以使用 [mmWave Visualizer](#) 测试 EMC 和干扰的影响。在已知距离处使用角反射器，证实了 EUT 的正常工作和干扰后行为。有关 SDK 开箱即用演示的更多信息，请参考 [TIREX 页面](#)。mmWave Visualizer 也可用于配置毫米波器件来发送测试所需的各种线性调频脉冲。

5.5 IWR6843ISK-ODS 测试案例

对于 IWR6843 测试，mmWave Studio 用来生成线性调频脉冲并执行与 [节 3.1.1](#) 相关的测试，而 mmWave Visualizer 和开箱即用演示则用于 [节 3.1.5](#)。

此处测试了三种不同的啁啾配置；LUA 脚本可以在认证包中找到。

表 5-1. 啁啾配置

带宽	工作频率范围	查看
300MHz	61-61.5GHz	ar1.ProfileConfig(0, 61.1, 2, 3.4, 18, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 16.693, 1, 128, 10000, 0, 131072, 30)
		ar1.ChirpConfig(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1)
		ar1.FrameConfig(0, 0, 0, 128, 16, 0, 1)
1300MHz	57-64GHz	ar1.ProfileConfig(0, 60.25, 3.6, 3.5, 29.7, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 43.995, 1, 256, 10000, 0, 131072, 30)
		ar1.ChirpConfig(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1)
		ar1.FrameConfig(0, 0, 0, 128, 16, 0, 1)
4000MHz	57-64GHz	ar1.ProfileConfig(0, 60.25, 7, 5.0, 69.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 53.265, 1, 256, 4000, 0, 131072, 30)
		ar1.ChirpConfig(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1)
		ar1.FrameConfig(0, 0, 0, 128, 16, 0, 1)

[表 5-1](#) 展示了配置参数的分解图。通过输入“`help ar1.command`”，可以找到脚本中所使用的 Ar1 命令的详细信息；例如，mmWave studio 的 Lua shell 中的“`help ar1.ProfileConfig`”。有关支持的 ar1 命令的完整列表，请在 lua shell 中输入“`help ar1`”。

- 配置文件配置 API，定义线性调频脉冲配置文件参数 — `ar1.ProfileConfig(UInt16 profileId, Single startFreqConst, Single idleTimeConst, Single adcStartTimeConst, Single rampEndTime, UInt32 tx0OutPowerBackoffCode, UInt32 tx1OutPowerBackoffCode, UInt32 tx2OutPowerBackoffCode, Single tx0PhaseShifter, Single tx1PhaseShifter, Single tx2PhaseShifter, Single freqSlopeConst, Single txStartTime, UInt16 numAdcSamples, UInt16 digOutSampleRate, UInt32 hpfCornerFreq1, UInt32 hpfCornerFreq2, Char rxGain)`。
- 线性调频脉冲配置 API，定义帧内每个线性调频脉冲要使用哪个配置文件 — `ar1.ChirpConfig(UInt16 chirpStartIdx, UInt16 chirpEndIdx, UInt16 profileId, Single startFreqVar, Single freqSlopeVar, Single idleTimeVar, Single adcStartTimeVar, UInt16 tx0Enable, UInt16 tx1Enable, UInt16 tx2Enable)`。
- 帧配置 API，定义包含线性调频脉冲后续发送顺序的帧构成 — `ar1.FrameConfig(UInt16 chirpStartIdx, UInt16 chirpEndIdx, UInt16 frameCount, UInt16 loopCount, Single periodicity, Single triggerDelay, UInt16 TriggerSelect)`。

1300MHz 测试案例重点：

- 如表 4-1 所示，突发脉冲内的导通时间约为 `rampEndTime` 周期，即 `rampEndTime` 与 `idleTimeConst` 之和。在突发脉冲之间，周期为帧配置中所示的周期。
- 使用方程 11 计算远场边界。当最大天线尺寸为 13mm 时，远场值如表 5-2 所示。所有射频测试均在远场区域完成。

表 5-2. 远场边界

中心频率	L (m)	Lambda (m)	远场 (m)
60.85	0.0130	0.0049	0.0690

- 有关测试结果、标准以及测量的更多详情，请参阅 节 3.1，并可在 TIREX 上的认证包中找到。

6 常见问题和解决方案

6.1 峰值功率

问题说明：峰值功率超出规定限制。

解决方案：实现 TX 功率回退

ar1.ProfileConfig (0, 60.25, 7, 5.0, 69.5, TXBO, TXBO, TXBO, 0, 0, 0, 53.265, 1, 256, 4000, 0, 131072, 30)

功率回退，TXBO = 3、6、9、12 ... (有关受支持的值，请参阅 [SDK 文档](#))

深入研究：

- IWR6843ISK TX 功率 = 10dBm/TX 天线
- TX 增益 = 8dBi

对于同时 3 个 TX 用例：

$$\text{TX power} = 10\log(10^{10} + 10^{10} + 10^{10}) \quad (12)$$

$$\text{Total TX Power} = \text{TX power} + \text{TX gain} = 14.8 + 8 = 228\text{dB} \quad (13)$$

当使用 mmWave Visualizer 和随附的配置文件，而不使用 LUA 脚本时，通过在 ProfileCFG 参数中设置 TX 回退来规定 TX 功率回退，其中每个 8 位值分别对应于 TX1、TX2 和 TX3。

例如，对于所有 TX 通道上的 6dB 回退，TX 功率控制字将为 0x060606，即 394758 (使用此十进制值)。下面是对应的 profileCfg 命令：

profileCfg 0 62.00 30 10 69.72 **394758** 0 28.42 1 128 2180 0 0 24

这是在 mmwavelink html 文档中定义的。

6.2 占用带宽

问题说明：设备不在允许的 ISM 占用带宽内传输。

解决方案：根据需要更新信号带宽。

深入研究：

根据 ETSI EN 305 550V2.1.0 草案，占用带宽被定义为频段的宽度，在下限频率以下和上限频率以上，平均发射功率各等于给定发射总平均功率的 0.5%。这大概相当于信号的 - 23dBc 带宽。

对于更大的带宽，例如 4GHz 带宽，存在较大的频率跃变 (从 64GHz 到 60GHz)，这会导致下冲，影响趋稳时间，并可能导致 - 23dBc 带宽限制失效。

例如，如表 6-1 所示确定该带宽的 1300MHz 应用场景：可以通过改变线性调频脉冲配置中的斜率或线性调频脉冲参数来更改该应用场景。

表 6-1. ProfileCFG

带宽	ProfileCFG
1300MHz	ar1.ProfileConfig(0, 60.25, 3.6, 3.5, 29.7, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 43.995, 1, 256, 10000, 0, 131072, 30)

$$\text{Bandwidth} = \text{Frequency slope (MHz/uS)} \times \text{Ramp end time(uS)} \quad (14)$$

$$= 43.983 / 29.70 \quad (15)$$

$$= 1306.3\text{MHz} \quad (16)$$

6.3 杂散发射

问题说明：杂散发射测量显示在某些频率上出现峰值，导致失败。

解决方案：在器件上增添金属屏蔽层，并确保其正确接地。

深入研究：嵌入式系统设计通常由以不同频率工作的各种时钟和时钟源组成。根据布局的不同，这些时钟可能会在基频或基频倍数处引入噪音（辐射）。在器件和时钟源周围增添充分接地的屏蔽层，形成法拉第笼来保持电磁场封闭。

6.3.1 14.4GHz 谐波

问题说明：非 AOP 评估套件上在 14.4GHz 的倍数处显示杂散 EMI。

解决方案：使用金属屏蔽或射频吸收器。

深入研究：

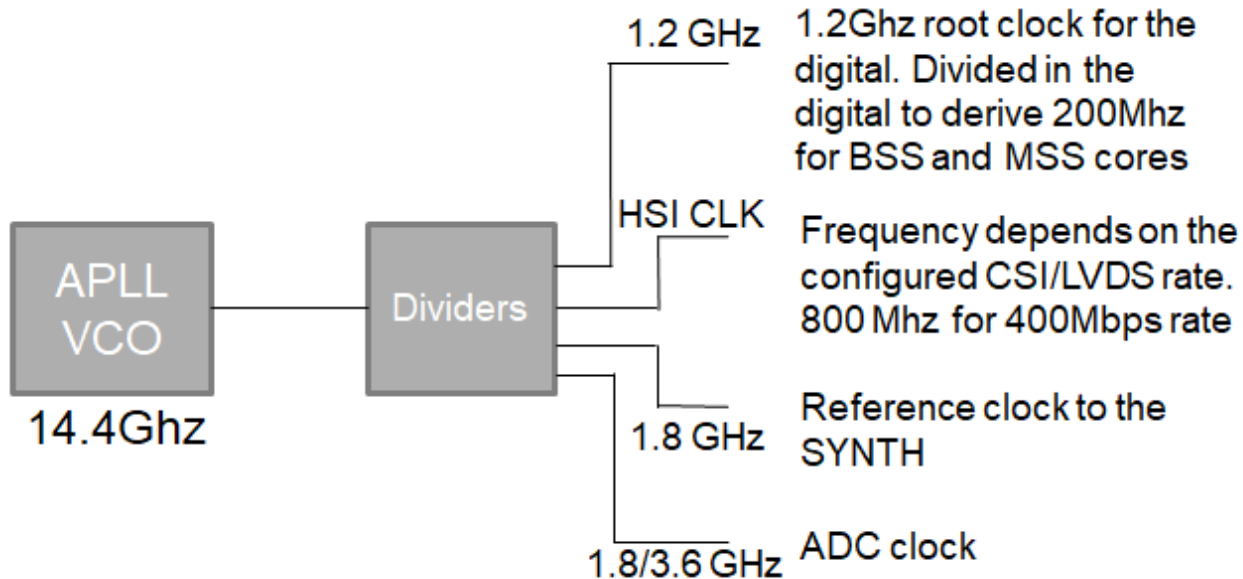


图 6-1. APLL VCO 时钟

系统中的所有时钟均来源于 14.4GHz APLL。图 6-1 示出了雷达器件内的根时钟树。在测试和认证期间，此频率的 14.4GHz 峰值和谐波可能会出现杂散发射，如图 6-2 中所示，而 14.4GHz 的二次谐波 (28.8GHz) 会导致辐射发射超出规定限制。

6.3.2 建议的解决方案

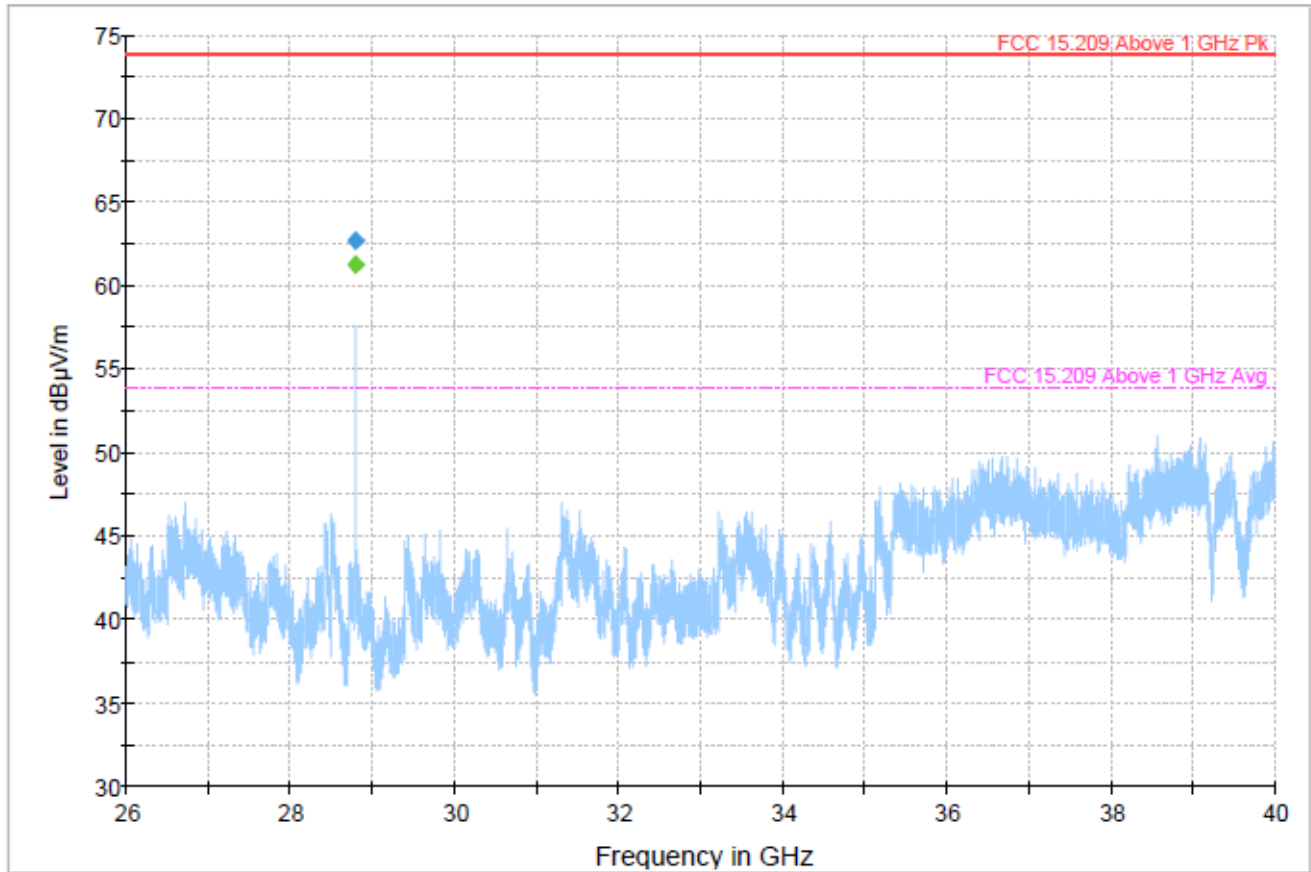
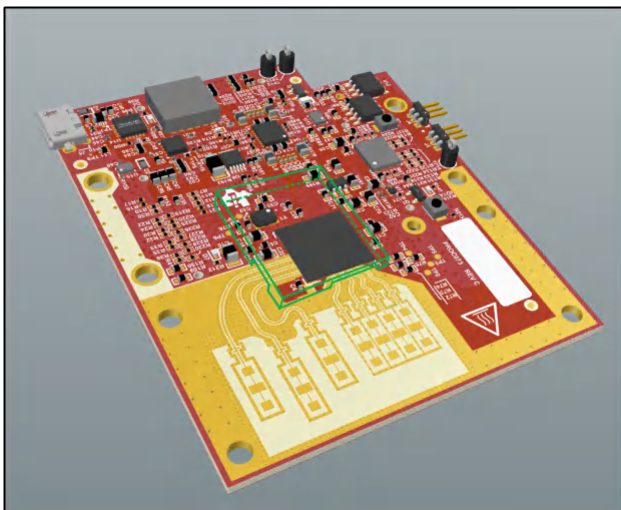


图 6-2. 28.8GHz 杂散 EMI

6.3.2.1 硬件测量

- 屏蔽层或吸收器必须按照图 6-3 和图 6-4 所示放置。
- 适用的毫米波器件、去耦电容、晶体和周围的 PCB 区域均必须使用屏蔽层或吸收器盖住。
- 屏蔽层必须良好接地，盖住重要组件，且吸收器必须正确地粘附到 PCB 和重要组件上。
- 确保屏蔽层距 PCB 的距离大于或等于射频引线上方 2mm；否则，射频传输线路可能与屏蔽层耦合，进而干扰射频匹配。必须考虑到制造公差、磨损和屏蔽组件等，以便始终保持距电路板 2mm 以上的高度。
- 使用射频吸收器，不得遮盖天线；在放置吸收器时，不得超出 IC 上 TX 和 RX 迹线区域的边缘。
- Cuming Microwave (GDX/PPGA 0.03") 就是一个用于抑制辐射的吸波器示例。



所有射频迹线均必须至少离屏蔽盖 2mm。

图 6-3. 屏蔽层放置位置

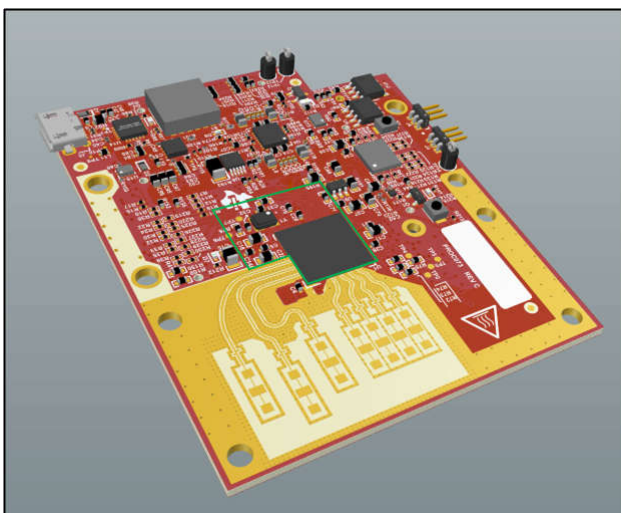


图 6-4. 射频吸收器放置位置

6.3.2.2 软件测量

6.3.2.2.1 APLL 占空比控制

降低 14.4GHz 和 28.8GHz 杂散的一种方法是对 APLL 进行占空比控制。通过将 APLL 置于断电模式即可实现控制。此控制可通过以下方式执行：首先处理所需的系统时钟，然后禁用 APLL。通过根据用户需求启用或禁用 GPADC，可完成 RFAFE 和 APLL 断电。然后，在发出线性调频脉冲之前重新启用 AFE 和 APLL。

APLL 占空比不能完全消除杂散，但可以大幅降低 APLL 引起的平均发射。与 RTRIM 更改等更激进的选项相比，APLL 占空比控制是更可取的第一选项。这是因为 RTRIM 更改可能会导致合成器不稳定，因此只能在绝对需要时执行。有关 APLL 占空比控制的更多信息，请参阅在 [TI 毫米波传感器中实现功耗优化的软件策略应用手册](#)。

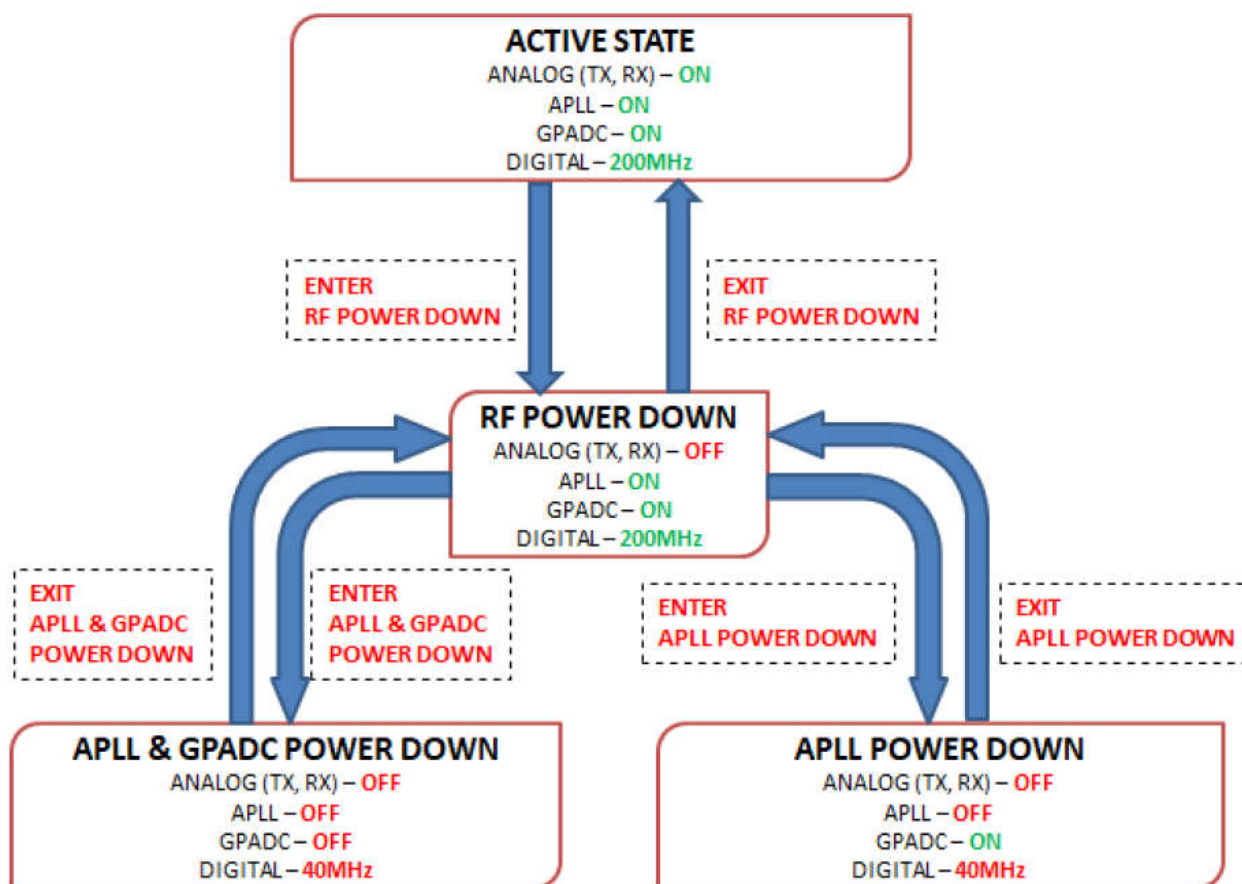


图 6-5. 模拟域电源状态

6.3.2.2.2 BSS 固件中的 APLL VCO RTRIM 设置

BSS 固件中的 APLL VCO RTRIM 设置：

- 通过改变适用毫米波器件上的 APLL VCO 的设置，可以减少 14.4GHz 及其谐波的辐射。适当的 APLL VCO RTRIM 设置可以减小 14.4GHz 和 28.8GHz 处的杂散发射幅度
- 有关如何修改应用软件来更改 APLL VCO RTRIM 设置及允许值的详细说明，请参阅毫米波工业工具箱中的以下指南：

<MMWAVE_INDUSTRIAL_TOOLBOX_INSTALL_PATH>/certification/RTRIM Modification Guide

路径示例：[工业工具箱](#)，或者从“毫米波传感器”导航到“工业工具箱”

6.4 过冲

问题说明：测试结果显示在啁啾开始时出现过冲或下冲。

解决方案：增加 TX 开始时间

```
ar1.ProfileConfig (0, 62.10, 2, 3.4, 18, 0, 0, 0, 0, 0, 16.693, 1, 128, 10000, 0, 131072, 30))
```

上方高亮显示的参数表示 TX 开始时间为 1μs。

深入研究：

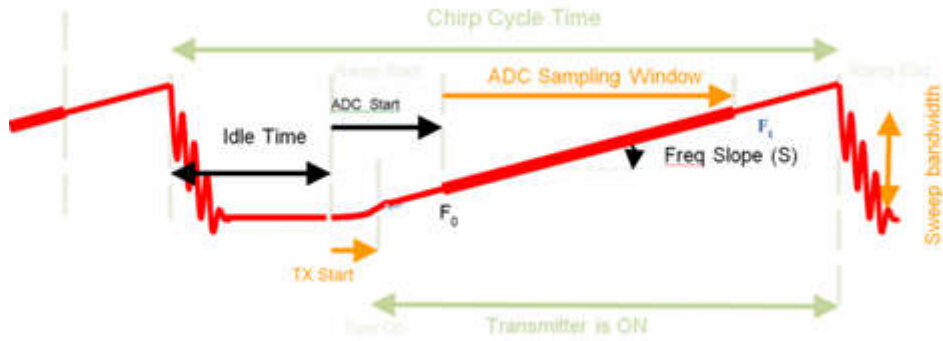


图 6-6. 啁啾框图

TX 开始时间表示从频率斜升开始到发送器开启时经过的时间。在图 6-6 中以斜坡启动标示的斜升开始时，合成器、HPF 模拟滤波器和抽取滤波器等被打开，并可能需要一些趋稳时间。如果 TX 在瞬变期间打开，这可能会导致发送信号中出现过冲或下冲。

6.5 频率稳定性

6.5.1 生成 CW 信号

问题说明：生成 CW 信号，以进行频率稳定性测量。

解决方案：使用 DCA1000EVM 和 MMWAVESTUDIO 发送 CW 信号。

深入研究：认证包中包含的连续波 LUA 脚本 (AWR68xx_xxGHz_CW_profile.lua) 可用于生成 CW 信号。使用 ar1.ContStrConfig API 生成的频率是设定频率的单频。

6.5.2 温度和电压范围内的频率稳定性

问题说明：频率不在温度和电压的限制范围内。

解决方案：调整时钟上的电容器以确认室温条件下偏差约为 0PPM。

深入研究：FCC 第 15.255 部分“频率稳定性”：在所有工作条件下，基波辐射必须包含在本章节规定的频带内。假定设备在 -20°C 至 $+50^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内工作，则输入电压波动范围为额定输入电压的 85% 至 115%，除非有理由证明并非如此。

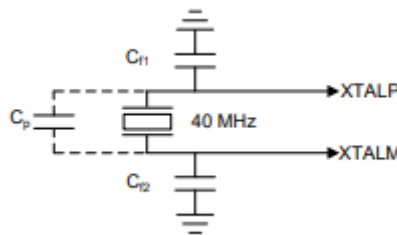


图 6-7. 40MHz 晶体电容

$$\text{LoadCapacitor } C_L = C_{f1} \times \frac{C_{f2}}{C_{f1} + C_{f2}} + C_p \quad (17)$$

其中

- C_p 是寄生电容
- C_{f1} 和 C_{f2} 为并联的电容器

IWR6843 需要 40MHz 晶体或外部振荡器连接到 CLK_P 引脚；这用于初始启动，并作为内部 APLL 及其他时钟的基准。对于 IWR6843ISK EVM，晶体的实现方法如图 6-7 所示。所选电容器需要满足表 6-2 中所示的要求。

表 6-2. 电容器要求

名称	说明	最小值	典型值	最大值	单位
F _p	并联谐振晶体频率		40		MHz
C _L	晶体负载电容	5	8	12	pF
温度范围	预期工作温度范围	-40		105	°C
频率容差	晶体频率容差	-50		50	ppm

为了满足 FCC 要求，必须对电容器进行调谐，使得振荡器在室温条件下的频率偏差为 0ppm，而且频率偏差保持在电压和温度的频段范围内。

6.6 EIRP 尖峰与频谱分析仪带宽

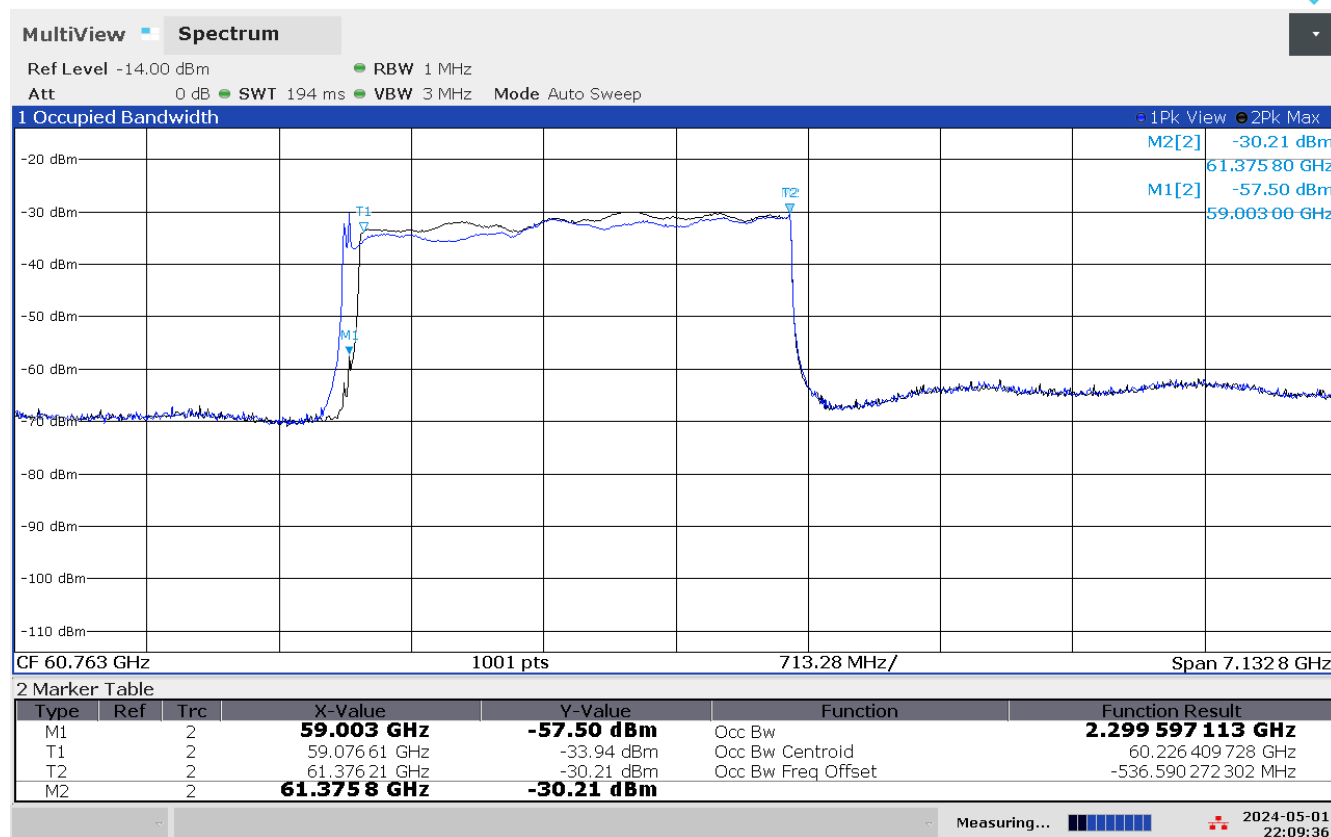
根据 EN 305 550 或 47 CFR 15.255 执行峰值功率测量时，可能会在载波中看到明显的 EIRP 尖峰。这通常可以在线性调频脉冲的起始频率和停止频率处看到。线性调频脉冲起始频率尖峰通常是两者中较高的功率。实际上，这些 EIRP 尖峰并非真实存在，而是测量伪影。这些尖峰源于频谱分析仪的测试带宽。

在此有必要简要说明一下背景：在理想情况下，频谱分析仪的带宽将远大于目标信号的带宽，且采样率应足够高，以便在首次测试时就能采样完整信号。但对于许多信号（例如多 GHz FMCW 雷达线性调频脉冲）来说，这不切实际或不可能实现。此外，并非所有法规申请者都具备统一的测试条件。为了寻求测试的一致性，ANSI 建议将频谱分析仪的带宽固定在 1MHz。

这会导致测量性能发生显著变化。想象一下，如果目标信号以极快的速度掠过检波器，检波器将没有足够的时间来累积能量。这会导致辐射功率被严重低估，称为降敏。为了解决这个问题，ANSI 提供了可执行的计算来补偿这种检测到的功率降低。这通常称为降敏校正因数。

线性调频脉冲开始和结束时，由于 VCO 和合成器正在为下一个线性调频脉冲复位，因此可能会出现过冲和下冲事件。虽然发射的总功率实际上并未违反规定，但降敏的检波器此时能够从非 FMCW 过冲和下冲收集额外的能量。这会导致载波中出现明显的尖峰，而测试机构将对其应用校正因数。这将显著侵蚀裕量，在某些情况下会导致不符合法规要求。由于这种情况发生在起始频率和停止频率处，因此很难证明其并非 FMCW 信号的一部分。故而我们建议增加 TX 启动时间，直到表观 EIRP 尖峰消失。这会略微减小带宽；但能降低尖峰的功率，并将尖峰压低至杂散区域，从而大幅提升裕量并通过测试。通常，TX 启动时间延迟 1.5 μs 至 2 μs 即可实现。

图 6-8 显示了这方面的一个示例。示波器被置于 1MHz RBW 条件，导致检波器降敏。蓝色迹线显示了具有 EIRP 尖峰的线性调频脉冲，这可能导致无法通过 FCC 法规测试。黑色曲线显示相同的线性调频脉冲配置，但有 1us TX 导通时间。请注意，EIRP 尖峰仍然存在，但现在位于 OOB 区域。



10:09:37 PM 05/01/2024

图 6-8. EIRP 尖峰和解决方案示例

7 参考资料

- [Radio Equipment Directive \(RED\)](#)
- ISM-Band and Short Range Device Regulatory Compliance Overview, Matthew Loy, Raju Karingattil, Louis Williams
- 欧洲议会和理事会 2014/53/EU 指令
- 在 40GHz 至 246GHz 频率范围内使用的短程设备 (SRD) 无线电设备；用于接入射频频谱的协调标准
- 无线电设备和服务的电磁兼容 (EMC) 标准；第 1 部分：常见技术要求；涵盖 2014/53/EU 指令第 3.1(b) 条基本要求，以及 2014/30/EU 指令第 6 条基本要求的协调标准
- 短程设备：适用于汽车和监视雷达设备的测量技术
- 1999/519/EC：1999 年 7 月 12 日理事会关于限制公众暴露于电磁场 (0Hz 至 300GHz) 的建议
- 无线电设备和服务的电磁兼容 (EMC) 标准；第 1 部分：常见技术要求；涵盖 2014/53/EU 指令第 3.1(b) 条基本要求，以及 2014/30/EU 指令第 6 条基本要求的协调标准
- 德州仪器 (TI)，对 TI 雷达器件中的线性调频脉冲参数进行编程，应用报告。
- FCC 第 15 部分
- FCC 第 95 部分
- ARIB T-73 标准
- IFT 法规
- ANATEL 法规
- 《Use of Low Power and Very Low Power Short Range Radio Frequency Devices (Exemption of Licensing) Rules, 2018》(G.S.R.1047(E))，2018 年 10 月 18 日 The Gazette of India 特别版第 II 部分第 3(i) 节。

8 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 C (December 2021) to Revision D (August 2026)	Page
• 文档全面更新。	3
Changes from Revision B (February 2021) to Revision C (December 2021)	Page
• 更新了“建议的解决方案”章节。	28

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