



Pedrhom Nafisi

摘要

随着雷达逐渐成为安全应用领域的一项新技术，安全标准应运而生，旨在定义雷达安全系统的安全标准。新制定的 IEC TS 61496-5:2023 规定了安全系统内的雷达保护器件必须满足的性能要求，以便保证雷达的安全。规定的要求适用于在工业制造环境（其包含必须进行安全监控的区域）中检测成年人。制定了功能测试，在其中，当尝试检测实际的人或额定为人类第 99 个百分位的角反射器时，会以不同的方式挡住传感器。本文档涵盖了 IEC TS 61496-5:2023 中列出的用于验证雷达针对成年人的性能的功能测试、标准中使用的许多术语及其定义，以及 IWR6843 和 IWR6843AOP 毫米波雷达传感器如何满足定义的要求。

内容

1 引言.....	2
2 TI 毫米波雷达与功能安全.....	2
3 IEC 61496-5 功能测试.....	2
3.1 使用静态残余移动进行测试.....	3
3.2 检测区域.....	4
3.3 容差区域.....	4
4 结果.....	6
4.1 响应时间.....	6
4.2 位置精度.....	6
4.3 多个 RPD 共存.....	7
4.4 检测区域外物体的干扰.....	8
4.5 检测区域内物体的干扰.....	8
4.6 人为干扰.....	10
5 环境测试.....	11
6 其他测试涵盖的内容.....	11
7 测试设置详细信息.....	11
7.1 检测算法.....	12
8 参考资料.....	13

插图清单

图 3-1. 三面角反射器的 RCS 公式.....	3
图 3-2. 雷达传感器的视点.....	3
图 3-3. 检测区域可视化示例.....	4
图 3-4. 容差区域的区域细分.....	5
图 4-1. 响应时间视频的屏幕截图，显示了静态残余移动开始之前和之后的情况.....	6
图 4-2. 在 5.5m 65° 处检测生成的点云.....	7
图 4-3. 用于多个 RPD 共存功能测试的设置的图像.....	7
图 4-4. 用于检测区域外物体的干扰功能测试的设置的图像.....	8
图 4-5. 干扰目标为静态（左）或动态（右）时的点云比较。在这两种情况下，感测测试目标的能力和准确性均不受影响。.....	8
图 4-6. 检测区域内物体干扰的设置的图像.....	9
图 4-7. 通过检测区域内干扰物体检测到人的点云可视化.....	9
图 4-8. 距离曲线比较，第一个检测点的相对功率从低于 100dB 变成高于 110dB.....	10
图 7-1. 线性传动器的图片，其中带有静态残余移动的指定尺寸角反射器.....	11
图 7-2. 三脚架上的 IWR6843AOP 的图片，三脚架指向角反射器，位于每次测试所需距离处的位置.....	12

表格清单

表 7-1. 硬件.....	11
表 7-2. 软件.....	12

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

在当今的许多安全系统中，压力传感器和光学/红外传感器等安全状态器件未能提供可靠的人类检测以实现安全操作并更大程度地延长正常运行时间。TI 的毫米波雷达传感器提供了强大的解决方案（尤其是集成到符合安全标准的系统中时），并能够通过适用的安全认证标准。

许多适用的安全标准由 [国际电工委员会 \(IEC\)](#) 制定，用于所有电气、电子和相关技术。[IEC TS 61496-5:2023](#) 是为使用雷达保护器件 (RPD) 的安全相关系统制定的新安全标准，该系统使用调频连续波 (FMCW) 传输来检测是否有人。该标准定义了一系列功能测试，以确保在指定条件下传感器功能正常和检测完整性。

功能测试用于检查 RPD 的各种关键能力，本文档侧重于提供 RPD 的检测能力和完整性的结果，以应对更具挑战性的测试。本文档中使用的 RPD 是 [IWR6843AOPEVM](#) 和 [IWR6843ISK](#)。检测区域设置在 RPD 需要认证的指定距离处，并且无论标准规定的冲突影响如何，仍然必须检测到所需的目标。

2 TI 毫米波雷达与功能安全

[IWR6843](#) 器件是 TI 的一款已通过功能安全认证的高性能毫米波雷达传感器。此传感器受多种评估工具的支持，包括 [IWR6843ISK](#) 和 [IWR6843AOPEVM](#) 等以评估模块 (EVM) 形式提供的硬件，以及通过 [雷达工具箱](#) 中的示例提供的软件，这些软件是开源的，可用于复制本文档的内容。

除了可用于 TI 毫米波产品的硬件和软件工具之外，[IWR6843](#) 还通过了 TÜV SÜD 认证，硬件完整性达到 SIL 2 级，系统功能达到 SIL 3 级，并且符合 [IEC 61508](#) 标准的要求。[IEC 61508](#) 是一项基于风险的标准，这意味着除了要检测和控制随机性硬件故障并减轻其影响之外，还要评估危险环境中的危险程度，并制定适当的安全措施来避免或控制系统故障。相比之下，[IEC 61496-5](#) 适用于非接触式电敏防护设备 (ESPE) 中的调频连续波 (FMCW) 雷达器件，并确保实现适当的安全相关性能。[IEC 61496-5](#) 是一种基于雷达性能的标准，因此本文档中的测试遵循其范围，并且不涉及 [IEC 61508](#) 中要求的某些主题。因此，进行的测试未使用特定的诊断和监视器，也没有使用 [IWR6843AOPEVM](#) 的安全变体版本。

有关功能安全、[IEC 61508](#) 以及为开发功能安全系统而采取的一般步骤的更多信息，请参阅 [使用毫米波雷达传感器的功能安全合规型系统设计指南](#)

3 IEC 61496-5 功能测试

[IEC 61496-5](#) 安全标准列出了一系列需要满足的测试和标准，以确定正确的感测功能和检测能力的完整性。标准中列出的测试包括但不限于：

- 检测功能
- 响应时间
- 位置精度
- 其他 RPD 共存
- 检测区域内物体的干扰
- 检测区域外物体的干扰
- 人为干扰

这些测试还列出了测试目标必须处于相对于 RPD 的范围，以及测试目标的大小和速度。检测难度各不相同，从简单的检测（例如以 1.6m/s 的速度垂直于 RPD 行走的行人）到较难的检测（[三面角反射器 \(CR\)](#) 的静态残余移动，其三个面的边长约为 3.173cm）不等。

标准要求您为系统指定用于测试和认证的最大检测距离。对于这些测试，选择了 5.5 米的最大检测距离。大多数测试都在 8 米范围内通过，而不需要对软件或硬件进行任何更改。如果进一步优化检测算法和天线设计，也许可以在更远的距离通过所有测试。

3.1 使用静态残余移动进行测试

速度为 0m/s 的人是静态的，但由于人的呼吸和心跳，整个身体仍有微小移动，可被 RPD 检测到。静态残余移动通过这些微小移动定义。为了使用三面目标角反射器模拟静态残余移动，第 5.2.3.5 节规定角反射器需要以 2mm/s 的速度向前移动 2mm，向后移动 2mm。为了确保人在检测区域内做出哪怕是最小的微小移动，角反射器测试目标的 RCS 必须为 0.17m²。

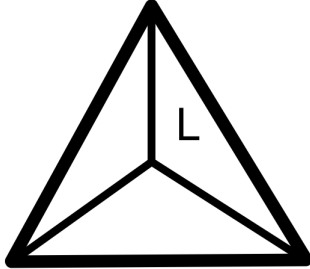
$$\sigma_{\max} = \frac{4\pi L^4}{3\lambda^2}$$


图 3-1. 三面角反射器的 RCS 公式

根据三面角反射器的 RCS 公式 (L 为边长，λ 为 RPD 的波长 60GHz)，其边长必须为 3.173cm 才能实现 0.17m² 的 RCS。对于此处记录的测试，使用了半径为 3cm 的角反射器，从而使 RCS 为 0.14m²，这意味着所用目标的检测难度比标准要求更大。

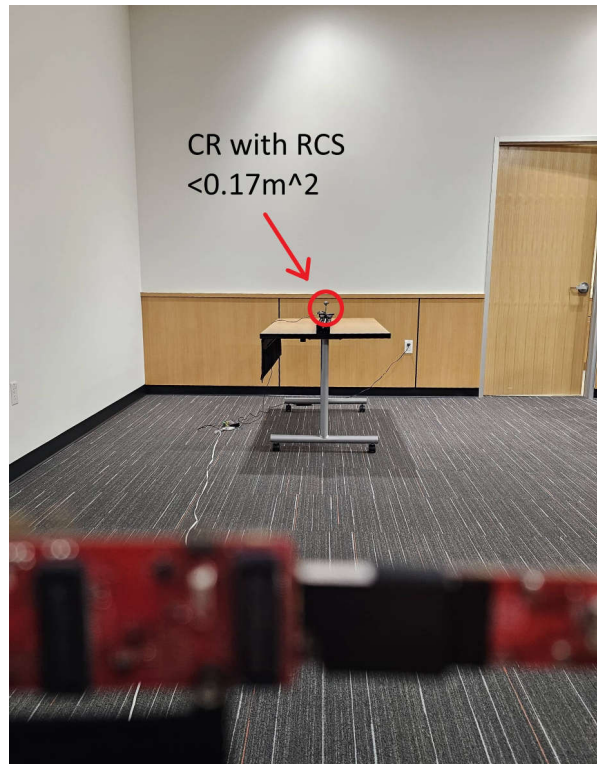


图 3-2. 雷达传感器的视点

3.2 检测区域

IEC 61496-5:4.2.12.2

根据标准第 4.1.3 节中的定义，当目标位于检测区域内时，输出信号切换装置 (OSSD) 必须将电敏防护设备 (ESPE) 切换到关闭状态。导致 ESPE 检测能力下降的单一故障必须创建至少 5 秒的锁定条件。由于在这些测试中使用的 IWR6843 同时执行感测和切换，因此该芯片既充当 OSSD 又充当 ESPE。

要对此进行模拟，使用应用程序可视化工具¹ 将检测区域的大小和状态可视化。当该区域为绿色时，表示没有检测到任何目标，也没有危险。当该区域为红色时，表示检测到目标，必须关闭连接到 OSSD 的任何电子设备以创建锁定状态。请注意，区域大小和状态的所有处理和确定都是在 IWR6843 芯片本身上完成的，可视化工具仅显示传感器点云输出，不进行任何额外的处理。在芯片上完成的处理包括配置的静态干扰消除，其中任何多普勒为 0 的检测均不报告。这可以防止检测完全静态的物体，例如会干扰点云的墙壁和地板。

在本文档中雷达输出的可视化中，偶尔会在没有目标或没有移动时出现一两个单点检测。这些是简单的反射，也称为噪声或幻象点，并不能表示在实际目标可见时点云的样子。重要的是，这些幻象点只会导致过度检测，而不会导致检测不足。即使在 0.17m^2 CR 代表成人的第 99 个百分位 (根据 ISO 7250-1) 的情况下，CR 也会出现超过 20 个紧密聚集在一起的检测。

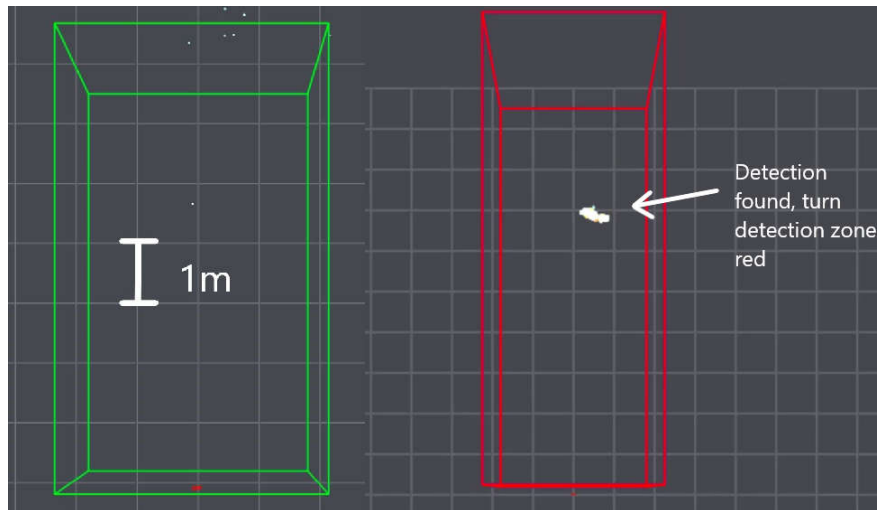


图 3-3. 检测区域可视化示例

3.3 容差区域

IEC 61496-5:4.2.12.2

根据第 3.507 节的定义，容差区域是供应商指定检测区域之外且与其邻接的区域。有限位置精度区域是仍可检测到测试目标但检测概率低于要求概率的区域。根据第 4.2.12.2 节的定义，在整个检测区域内，测试目标的最小检测概率应为 1×10^{-7} 至 2.9×10^{-7} 。计算检测概率所基于的数学原理不在本文档的涵盖范围内，但可以在标准的附件 BB 中找到。

¹ 可在[雷达工具箱](#)中找到可视化工具和源代码。

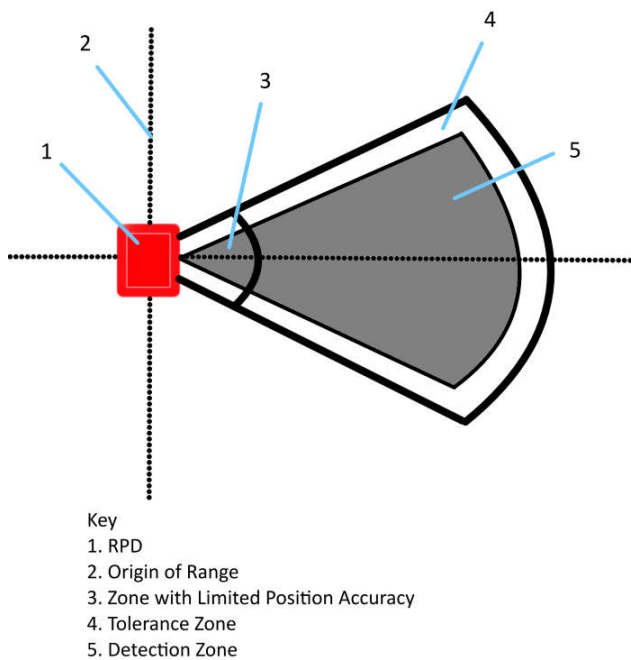


图 3-4. 容差区域的区域细分

4 结果

下面几节介绍在多个功能测试中使用 IWR6843ISK 和 IWR6843AOP 的结果。

4.1 响应时间

IEC 61496-5:5.2.2.1

IEC 61496-5:5.2.2.2

安全传感器必须能够快速报告在安全区域内检测到目标。必须使用最坏情况和移动来验证此测试中的响应时间是否低于规范声明的响应时间。在本测试中，将 $0.14\text{m}^2 \text{CR}^*$ 与静态残余移动搭配使用。标准规定记录的时间必须低于供应商声明的响应时间。这意味着您必须为您的系统指定最短响应时间。

大约需要 100 毫秒的响应时间才能有足够的点来触发实际检测并将区域快速改变为有人状态。所有处理都在 IWR6843 芯片上完成。在低噪声环境下，并且由于将区域更改为有人状态所需的时间是可配置的，此响应时间可以进一步缩短至 100 毫秒以下。如需此测试的视频脚本，请访问[本文档的雷达工具箱版本](#)（其中包含嵌入视频）。

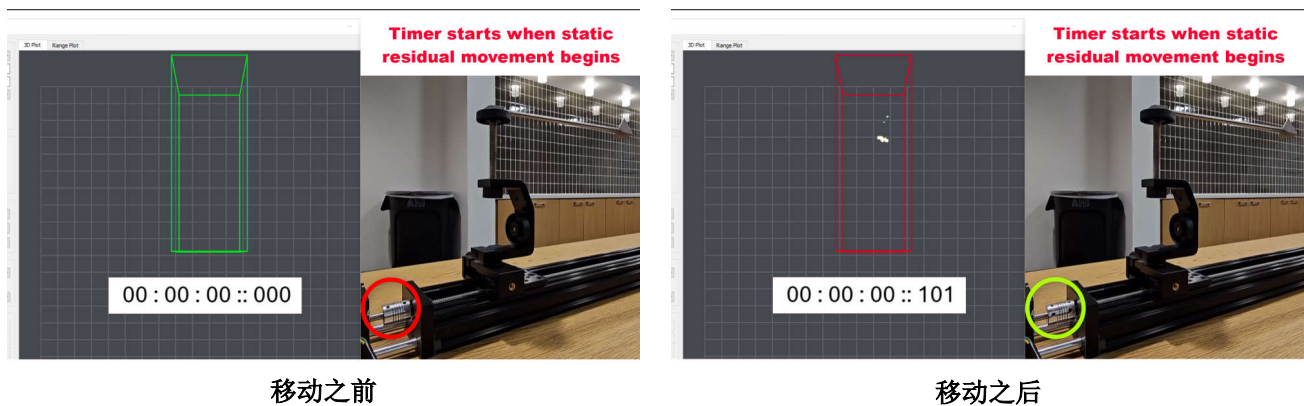


图 4-1. 响应时间视频的屏幕截图，显示了静态残余移动开始之前和之后的情况

4.2 位置精度

IEC 61496-5:5.2.10

尽管安全传感器最重要的方面是了解安全区域是否有人，但了解人在 RPD 中所处的位置也很重要。根据雷达的基本原理，在最大 FOV 处以及在待测试 RPD 的最小检测距离处以及之前位置，距离和角度精度会下降。标准在第 3.508 节和第 4.1.6 节中将有限位置精度定义为发生前述下降的区域。

4.2.1 角度精度误差裕度

在 -40° 和 40° 的角度之间，预计角度精度误差约为 $\pm 1^\circ$ 。在处于约为 60° 的最大视域时，预计误差约为 5° 。这是一般情况，角度精度可能会因天线设计、处理算法、校准和测试目标反射率等多种因素而异。

有关角度和距离精度以及测量方法的更多详细信息，请参阅[使用毫米波传感器进行系统性能测量](#)。

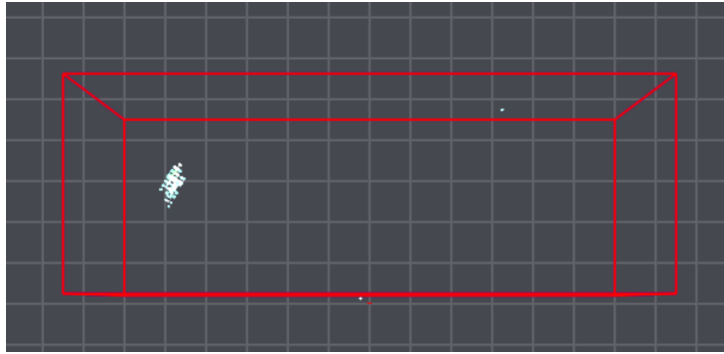


图 4-2. 在 5.5m 65° 处检测生成的点云

只要目标不是完全位于第一个距离区间中，距离的精度就会基于 Chirp 配置的距离分辨率。仅当检测到的物体小于 Chirp 配置的距离分辨率（可低至 3cm）时，目标才会完全位于第一个距离区间中。

4.3 多个 RPD 共存

IEC 61496-5:5.4.6.2

由于 FMCW 毫米波雷达的物理特性和干扰缓解技术，其他信号干扰 RPD 的信号的可能性极低。不过，标准在第 5.4.6 节中要求进行测试，测试内容是将四个 RPD 作为干扰目标，其设计与待测试的 RPD 完全相同。CR 必须经历静态残余移动，同时检测能力不能下降。在测试过程中，干扰 RPD 需要在两小时内至少进行 10 次下电上电循环。这是为了切换 Chirp 的时序。

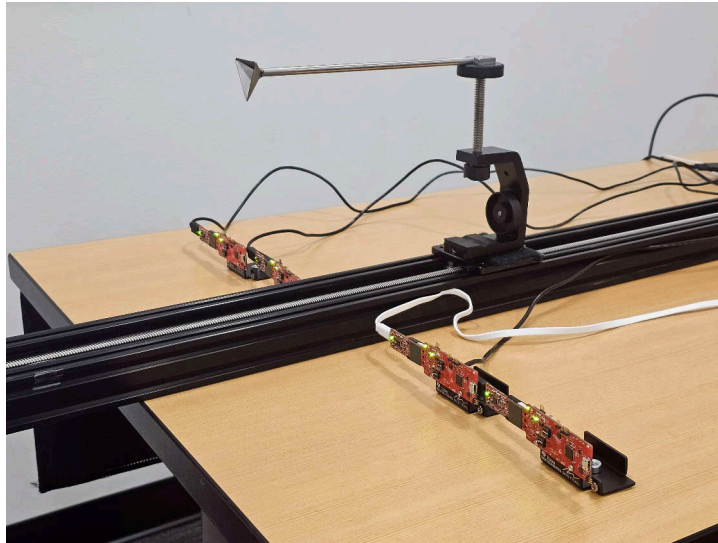


图 4-3. 用于多个 RPD 共存功能测试的设置的图像

生成的点云与完全没有干扰 RPD 时的情况完全相同。这是因为配置的静态干扰消除算法会消除任何 0 多普勒检测。静态干扰消除不是必需的，但它有助于仅可视化移动的目标。此外，当目标位于检测区域内时，检测区域永远不会变为无人区域。

有关涉及多个 RPD 的干扰的更多详细信息，请参阅文档 [针对 AWR/IWR 器件的干扰缓解](#)。

4.4 检测区域外物体的干扰

IEC 61496-5:5.4.7.1

当检测区域内有目标物体时，检测区域外的干扰目标不得干扰目标物体的检测能力。对于此测试，第 4.2.13.4 节提到使用 40m^2 CR 作为干扰目标，以确保它不会吞没 0.17m^2 小 CR 的可见性。测试要求干扰目标在一个测试中是静态的，在另一个测试中是动态的。在动态测试中，干扰目标以与测试目标相同的静态残余移动速度移动。干扰角反射器不应干扰检测 CR 的可见性，从而确保不会受到外部物体的干扰。



图 4-4. 用于检测区域外物体的干扰功能测试的设置的图像

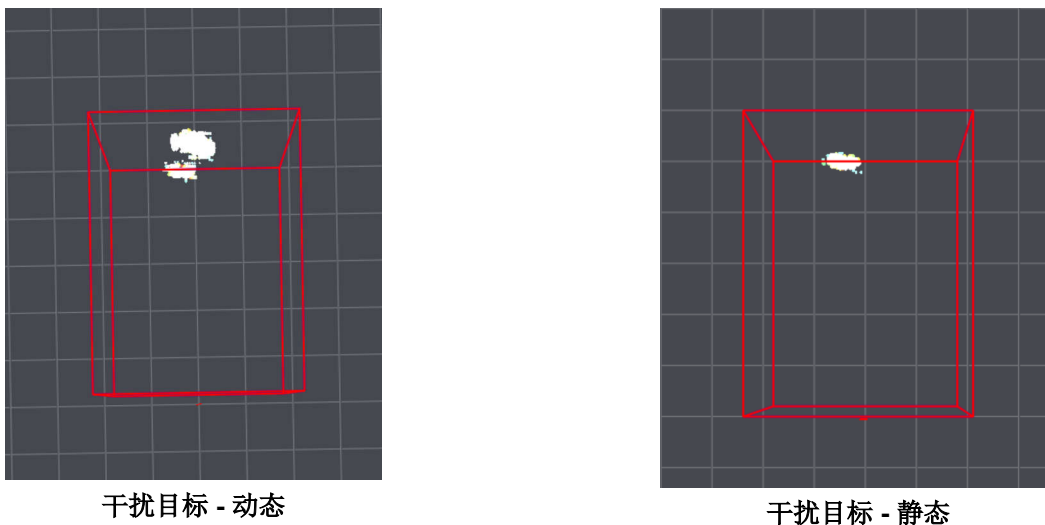


图 4-5. 干扰目标为静态（左）或动态（右）时的点云比较。在这两种情况下，感测测试目标的能力和准确性均不受影响。

如上所示，干扰目标不会干扰测试目标的检测能力。虽然干扰物体是动态的，但它与测试目标之间仍然有明显的区别，从而确保目标被识别为在区域内。

4.5 检测区域内物体的干扰

IEC 61496-5:5.4.7.2

当有金属干扰物体在小于传感器最小距离的范围内时，必须确保检测区内目标的检测能力不会受到影响。标准在第 5.4.7.2.1 节中提到，干扰物体需要位于传感器的有限位置精度区域内。



图 4-6. 检测区域内物体干扰的设置图像

当干扰物体的距离在 5cm 处时，检测会受到影响，但在 5m 处不会受到影响。点更稀疏，没有那么聚集，但整体检测足以将该区域归类为有人区域。

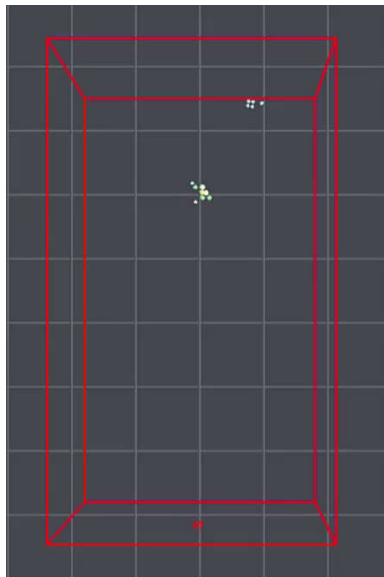


图 4-7. 通过检测区域内干扰物体检测到人的点云可视化

除了有限位置精度测试之外，还应在非常相似的条件测试检测区域内的遮挡抗扰度。不同之处在于：干扰目标是一个金属干扰物体，遮挡了行人测试目标的 50%。从根本上说，此测试更为简单，因为示例中的干扰目标遮挡了目标的约 90%。

4.6 人为干扰

IEC 61496-5:5.4.8

为了安全起见，传感器不能受覆盖物的影响。标准第 5.4.8 节要求进行一项测试，其中 50% 的发射天线被一片铝箔盖住，传感器要知道有东西盖住它。

由于测试的性质，天线耦合导致点出现在第 0 个距离区间中，因此点云并不是结果的最佳可视化。不过，观察距离曲线的第 0 个距离区间时，如果放置铝箔覆盖物，功率始终至少增加 20dB。这表明天线耦合与具有反射覆盖物的天线耦合之间存在很大的差异。

图 4-8 显示了距离曲线是使用浏览器毫米波演示可视化工具完成的。

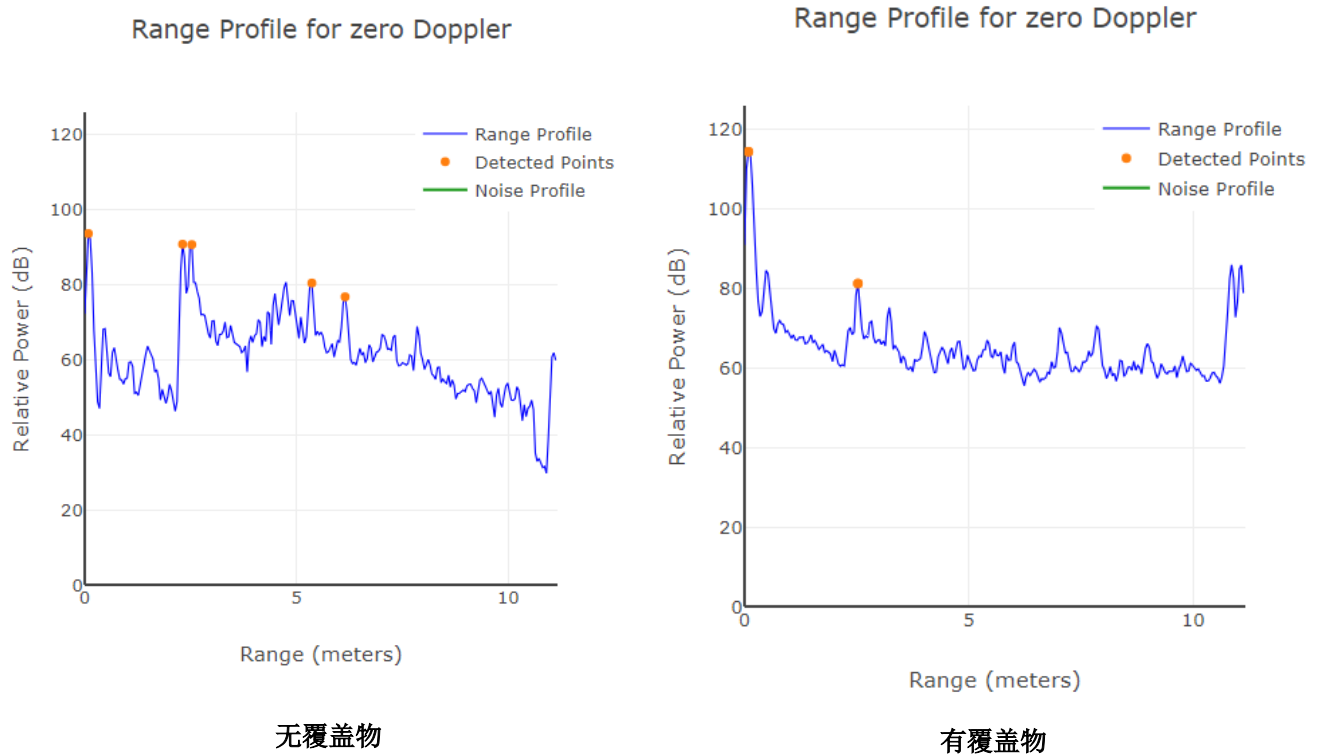


图 4-8. 距离曲线比较，第一个检测点的相对功率从低于 100dB 变成高于 110dB

由于在有覆盖物和无覆盖物的设置之间看到的前几个距离区间的增量很大，因此监控这几个距离区间并寻找反射功率的任何大幅跳跃是通过此测试的有效解决方案。

5 环境测试

本文档未涵盖环境测试，但 IEC 61496-5 中列出了这些测试，如下所示：

- 温度变化和湿度测试
- 冷凝测试
- 电源电压变化和电源电压中断
- 除了电源电压变化和电源电压中断之外的电气干扰
- 振动
- 冲击

6 其他测试涵盖的内容

本文档显示的结果已涵盖的 IEC 61496-5 中的测试如下所示：

- 来自其他无线电来源的干扰
- 灵敏度和稳定性
- 高 RCS 目标的检测

许多硬件和系统级别测试因集成传感器芯片的系统而异。本页中显示了对高 RCS 目标的检测，对于本文档的范围而言，该检测是多余的。有关干扰的详细信息，请参阅 [针对 AWR/IWR 器件的干扰缓解](#)。借助该文档中显示的干扰缓解技术，即使存在其他信号发射器件，性能也将保持稳健可靠。

7 测试设置详细信息

表 7-1. 硬件

工具	详细信息
C-Beam® 线性传动器	1000mm - 使用 NEMA 23 电机
IWR6843AOPEVM 或 IWR6843ISK	两个评估模块 (EVM) 都用于测试
DM542T 数字步进驱动器	一个步进电机，用于提供精确的转速以用作静态残余移动
微控制器	用于将 NEMA 23 电机 的转速设置为静态残余移动
摄像机三脚架	用于将 EVM 安装到所需高度
角反射器	0.14m ² 和 40m ² 的 RCS。使用的是不锈钢，不过铝也能正常工作。



图 7-1. 线性传动器的图片，其中带有静态残余移动的指定尺寸角反射器



图 7-2. 三脚架上的 IWR6843AOP 的图片，三脚架指向角反射器，位于每次测试所需距离处的位置

表 7-2. 软件

请注意，列出的版本是最新版本，也是在创建本文档时使用的版本。它们不一定是重现本文档中看到的结果所需的确切要求。

工具	版本	下载链接
MMWAVE-SDK	3.6	SDK 下载链接
雷达工具箱	2.10.00.04	dev.ti.com 工具箱链接
应用程序可视化工具	2.1	用户指南链接
毫米波演示可视化工具	3.6	可视化工具链接

7.1 检测算法

对于本文档中显示的所有测试，均将默认的 3D 人员跟踪演示与默认配置文件的 Chirp 设计搭配使用。配置文件设计的一个必需方面是使用精密移动算法来检测目标的静态残余移动。有关精密移动的更多详细信息，请参阅 3D 人员跟踪演示的[检测层参数调优指南](#)。

8 参考资料

- 更多资源可在以下文档中找到：
 - 如需本文档的网页版本（其中包含几个移动视频），请访问[雷达工具箱](#)
- 有关 Chirp 设计参数的定义，请参阅“MMWAVE-SDK 用户指南”文档 (<MMWAVE_SDK3_INSTALL_DIR>\docs\mmwave_sdk_user_guide.pdf)
- 有关在本文档中使用的算法的详细信息，请参阅 3D 人员跟踪演示的[检测层参数调优指南](#)
- 德州仪器 (TI)：有关功能安全的更多信息，请参阅 [使用毫米波雷达传感器的功能安全合规型系统设计指南](#)
- 有关雷达基础知识和功能安全雷达的培训和指南，请参阅 [Radar Academy](#) 库
- 德州仪器 (TI)：[使用毫米波传感器进行系统性能测量](#)
- 德州仪器 (TI)：[针对 AWR/IWR 器件的干扰缓解](#)
- 在[毫米波 E2E 论坛](#)上搜索您的问题或发布新问题

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司