

Chethan Kumar, Adrian Ozer, Anil Kumar K.V.

### 摘要

本应用手册旨在作为采用 TI 雷达芯片的雷达传感器的测试指南。本文档可用作高级指南，为在生产过程中对雷达传感器单元进行设置测试提供帮助。本文描述了雷达测试的一般要求、实际测试设置和运行测试所需的软件（因雷达的实际应用而异）。用户应设计测试软件并根据雷达应用确定所有测试的适当限制条件。

### 内容

<b>1 传感器射频性能验证</b> .....	<b>2</b>
1.1 基本上电检查.....	2
1.2 工厂校准.....	2
1.3 参数测试.....	3
1.4 黄金传感器单元.....	4
<b>2 低成本制造设置</b> .....	<b>5</b>
2.1 硬件.....	5
2.2 软件.....	6
<b>3 高级测试设置</b> .....	<b>7</b>
3.1 目标模拟器设置.....	7
<b>4 参考文献</b> .....	<b>8</b>

### 插图清单

图 2-1. 示例测试环境.....	5
图 2-2. 用于基本雷达测试的硬件.....	5
图 2-3. 示例台座消声室.....	6
图 3-1. 用于使用目标模拟器的雷达测试的硬件.....	7

### 表格清单

### 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 传感器射频性能验证

下面简要介绍了在雷达模块上进行的基本生产检查：

- 基本上电检查
  - 在上电时汲取的电流
  - 数字接口检查
- 工厂校准
  - 天线波束倾斜测量
  - 范围偏差和接收器通道增益/偏移补偿
- 参数检查 - 角反射器设置
  - 发送器/接收器环回 SNR

传感器性能验证可涵盖整个传感器硬件和软件子系统。本文档的目的并非用作硬件启动或验证的参考。因此，本节仅简单介绍了在经过充分验证和表征的硬件上进行的产品线测试，以筛查生产就绪型传感器上的问题。这些问题通常是处理缺陷、环境因素、装配缺陷和制造缺陷导致的。

### 1.1 基本上电检查

组装完成后，传感器板通电。测量从电源汲取的启动电流并确保它在限制范围内。执行测试程序，使传感器板通过以下部分中所述的测试序列。

雷达测试 GUI 是用于控制雷达芯片并处理传感器所捕获数据的程序。它是由用户开发的定制程序，适用于其最终应用和可用的测试硬件接口。

### 1.2 工厂校准

下面介绍了关键性工厂校准，此类校准通过补偿制造过程中引入的缺陷来帮助提高传感器的性能。

#### 1.2.1 天线波束倾斜测量

设计用于在视轴处产生峰值功率的发射器天线在实践中可能会显示出偏离视轴的峰值功率，因此天线波束方向图可能会出现倾斜（偏斜）。倾斜的幅度取决于天线和馈电设计。倾斜可能会随着射频频率单调变化，并且倾斜也可能随着 PCB 的变化而变化。例如，某些 PCB 电介质材料中固有的玻璃织物图会与天线传输线几何形状相互作用，并可能导致辐射图（包括波束倾斜）发生变化。对于低成本 PCB 材料尤其如此。对于高增益天线，波束倾斜也更加明显。

与频率相关的倾斜可能是系统性的和可量化的，但由于 PCB 伪影造成的倾斜可能有些随机。最终传感器上的波束倾斜可能包括天线罩和外壳的影响。该波束倾斜可以是用作通过/失败标准的参数，也可以根据需要在雷达传感器的机械安装中进行校正，使得所安装传感器的波束倾斜实际上为零。

发射天线和接收天线都可能发生波束倾斜。通常使用下一节中的图 2-2 所示的环回测量设置，针对所需的 Tx 和 Rx 天线组合（或每个组合）进行测量。

步骤：以方位角或仰角进行波束倾斜测量。在本例中，假设光束倾斜是正被测试的传感器的仰角。该过程涉及逐步测量仰角并在每一步中测量信号强度。

将目标（角反射器）保持一定距离，以便产生大约 1MHz 的中频。选择适当的线性调频参数。选择会在频带中心进行扫描的窄带射频扫描。选择窄带以最小化与频率相关的波束倾斜。

接下来，扫描仰角。在本例中，我们以 40 度进行扫描。使用转台，将传感器定位在仰角扫描的一端，角度为 +20 度。使用其中一个发射器产生线性调频脉冲。同时捕获和处理来自所有接收器链的 ADC 输出，以测量信号强度。将来自接收器的信号振幅取平均值。通过以某个增量值（例如 0.5 度）逐步测量仰角来重复此过程，直到仰角扫描在 -20 度处结束。最大接收信号强度对应的角度即是该发送器的波束倾斜。

针对每个发送器重复上述过程。可重新安排顺序以优化该过程。例如，在改变仰角位置之前，对每个仰角位置进行 Tx 1-3 测量。这能够减少 Tx 之间测量的光束倾斜的失配。进行足够的平均值计算，以提高准确度。

#### 1.2.2 范围偏差和接收器通道增益/偏移补偿

由于 PCB 制造过程中存在缺陷，射频路径会出现延迟，从而引入范围偏差及接收器增益和相位偏差，在这种情况下，可应用 SoC 校准进行补偿。整体而言，此过程的目标是确定所有 Tx-Rx 路径共用的范围偏差，以及放置在视

轴处 ( 在远场中固定已知距离 ) 的物体的每个虚拟 Tx-Rx 对的增益和相位失配。从此过程生成的校准系数可用于后处理, 以补偿 Rx 路径之间的相对延迟, 以便每个接收器将放置在视轴处的物体视为处于零角度, 并消除检测范围内的任何偏差。每个 PCB 和传感器的延迟都是唯一的, 因此每个板/传感器对都有一组唯一的校准系数。根据天线的放置和方向, 应用的校正可以校正方位角或仰角。例如, 如果接收器天线水平放置, 则在此校准期间将方位角归零。

步骤: 对于此示例, 假设雷达传感器具有四个水平布置的接收器天线, 以便零角校准消除方位角误差。图 2-2 中显示了所使用的设置。角反射器是用于此测试的首选目标, 因为它显示为单个点, 而金属板可以解释为多个点, 这会影晌校准的准确性。将目标保持足够远的距离, 以便从目标到四个接收器中每一个的方位角差异可以忽略不计。选择合适的线性调频脉冲参数, 以产生大约 1MHz 的中频。在雷达的指定工作范围内选择射频扫描。将其中一个发送器用于校准。同时捕获每个接收器链的 ADC 输出。

首先, 使用转台补偿仰角光束倾斜 ( 如有 ), 使传感器光束保持水平。接下来, 在雷达传感器与目标之间保持零度方位角。捕获并处理 ADC 输出, 以获得 FFT 以及每个 Rx 路径之间的相对相位差。基于峰值位置和 X 的已知目标距离计算范围偏差系数。计算每个虚拟 Tx-Rx 对之间的增益和相位失配并生成系数, 使得视轴处物体的每个虚拟通道强制为零相位。然后, 可将系数存储在 LUT 中并用于计算到达角。进行足够的平均值计算, 以提高准确度。在零两侧的几个已知角度处获取确认读数, 以确认校准有效。

毫米波 SDK 提供了一种通过开箱即用演示在命令行界面上生成校准系数的方法。更多详细信息, 请参阅《毫米波 SDK 用户指南》。此外, 可以在毫米波 SDK 安装文件夹 ( 位于 `mmwave_sdk_<ver>\packages\ti\datapath\dpccobjectdetection\<chain_type>\docs\doxygen\html\index.html` ) 中找到数据路径处理链中校准例程的过程和实现。用户可直接使用 OOB 执行校准, 也可以将提供的源代码移植到其自定义应用中。

### 1.3 参数测试

下面介绍了在生产过程中完成的关键参数测试。

#### 1.3.1 发送器/接收器环回 SNR

在此测试中, 目标物体的 SNR 在辐射 Tx-Rx 环回中进行测量, 并根据链路预算分析进行验证。此测试将 Tx 输出功率和 Rx 噪声系数组合到一个测试中, 有助于将传感器与计算出的链路预算相关联。此测试可以检测发送器增益、输出功率或接收器增益方面的任何问题。此外, 此测试有助于验证系统的双向路径损耗和噪声系数。

步骤: 将角反射器放置在消声室内的远场距离处, 如图 2-2 所示。选择合适的线性调频脉冲参数, 以便产生大约 1MHz 的中频。在雷达的指定工作范围内选择射频扫描。首先选择一个发送器和所有接收器。为每个接收器测量对应于目标的 FFT 信号的 SNR。对所有发送器重复进行此操作。可以根据下面的雷达方程式计算预期的 SNR。

$$SNR = (P_t * G_{Rx} * G_{Tx} * c^2 * \sigma * N * T_r) / (f_c^2 * (4\pi)^3 * kT * NF * R^4) \quad (1)$$

$P_t$  = TX 输出功率

R = 物体的距离

$G_{Rx}, G_{Tx}$  = RX 和 TX 天线增益

$\sigma$  = 物体的 RCS

$f_c$  = 线性调频脉冲斜升的中心频率

N = 线性调频脉冲数

$T_r$  = 线性调频脉冲斜坡时间 ( 以秒为单位 )

NF = 接收器的噪声系数

SNR = 信噪比

k = 玻尔兹曼常数

T = 有效噪声温度

雷达方程式有助于估计指定物体在给定 RCS 下的预期 SNR。必须知道测试中使用的角反射器的正确 RCS。在计算中应考虑任何可能影响 SNR 的变量，例如天线罩外壳或汽车保险杠。温度也会影响雷达性能，因此测试应在受控环境中进行。

应针对不同的射频频率进行 SNR 测试，以覆盖所有工作频率。应比较基于链路预算分析计算出的 SNR 和测得的 SNR，以确认雷达在指定范围内运行。

#### 1.4 黄金传感器单元

在生产校准设置中，拥有可用作参考的“黄金”单元和校准测试设置非常重要。黄金单元是一种经过测试并证明可提供准确结果的传感器，因此有助于发现测试设置中的问题或帮助校准测试设置。应使用 Tx-Rx 环回 SNR 测试中所述的过程将黄金单元的链路预算与测量的 SNR 相关联。

当黄金单元经过测试并经验证可提供准确结果时，此单元可用于定期校准测试设置或帮助调试测试设置中的任何潜在问题。例如，如果许多传感器开始时测试失败，则可测试黄金单元；如果黄金单元失败，则表明测试设置本身可能存在问题。在某些情况下，黄金单元可能已损坏，从而难以校准测试设置或调试任何测试设置问题。出于这个原因，在原始黄金单元已损坏的给定情况下，拥有多个黄金单元可能大有益处。

## 2 低成本制造设置

在测试任何射频参数或执行校准时，必须确保测试是在无杂波环境中进行的。理想情况下，测试应在消声室中进行，以最大限度地减少杂波并确保角反射器易于识别。但是，只要杂波产生的噪音足够低，则无需使用竞争物体进行校准，也就不一定需要消声室。如果在校准中意外使用环境物体，则可能会导致传感器出现故障并且在现场达不到预期性能。本节介绍雷达生产测试环境所需的典型硬件。

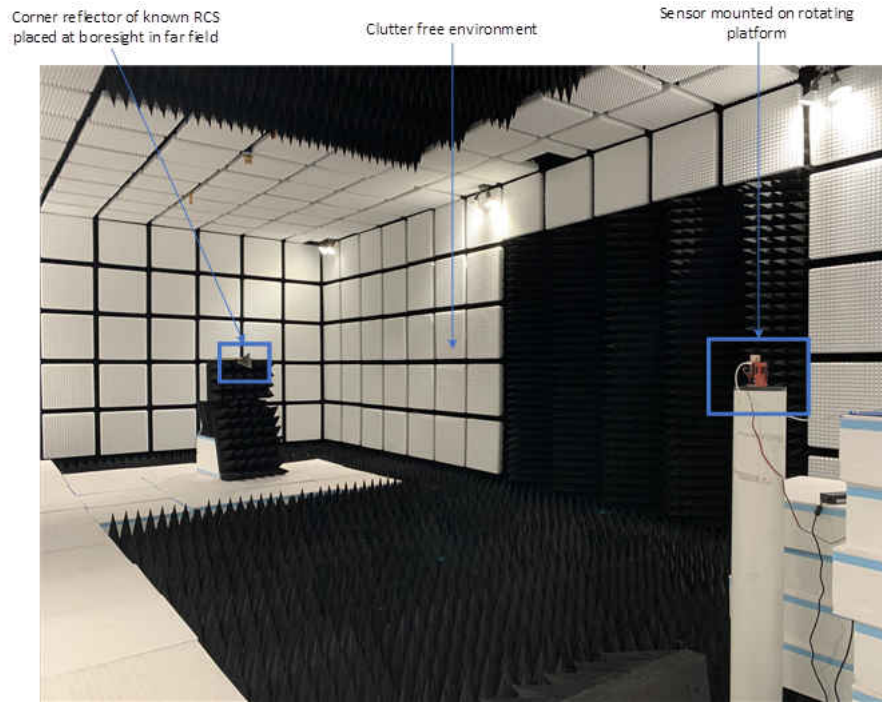


图 2-1. 示例测试环境

### 2.1 硬件

用于测试雷达的硬件如下所示。它包含以下组件：

- 带有转台的消声室
- 角反射器
- 具有电流表的直流电源
- 用于连接雷达装置的数据和控制接口以及用于控制转台的计算机

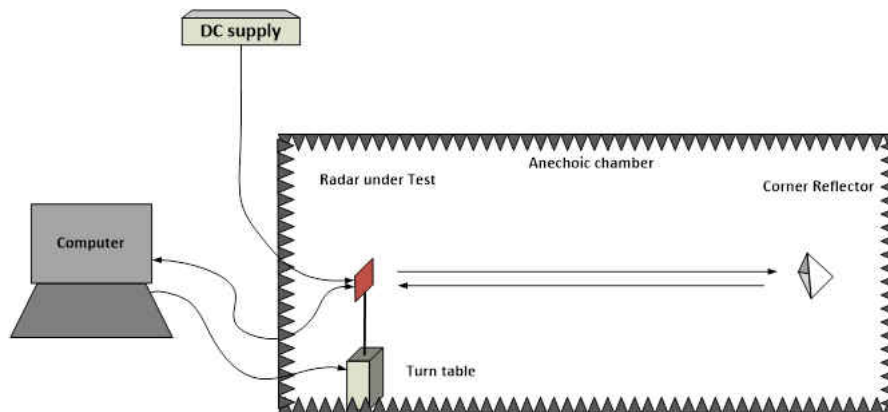


图 2-2. 用于基本雷达测试的硬件

消声室的宽度和高度通常可以用  $W \times H = 60\text{cm} \times 60\text{cm}$  来测量。消声室的长度应满足以下要求：能够将角反射器很好地放置在远场区域。下面提供的公式可用于计算远场区域。



最小远场距离， $d = 2.D^2 / \lambda$

其中， $D$  是天线阵列的最大尺寸，

$\lambda$  是空中信号的波长。

例如，使用在 76-77GHz 频段工作的单个毫米波传感器设计的雷达，其天线阵列跨度为 24mm， $d = 295\text{mm}$ 。在为转台、角反射器和电缆留出空间后，一个 60mm 长的消声室应该足以测试该雷达。

### 2.1.1 低成本台座消声室

若要实现低成本生产测试环境，可选择使用毫米波吸收材料构建定制的台座消声室。消声室应衬有毫米波吸收材料，进行充分吸收，从而达到所需的工作频率。Milliwave Silicon Solutions 生产名为 MilliBox 的预制消声室，旨在标称入射角下以 60GHz 和 77GHz 频率提供 -50dB 的吸收。这些消声室是模块化的，可通过配置以满足各种不同远场距离要求，并且尺寸可小至 4 英寸 x 3 英寸 x 2 英寸，以适应空间受限的环境或实验室台座。消声室可安装云台，沿水平和垂直轴旋转 DUT  $\pm 180$  度。可通过 USB 串行接口使用测试 PC，以实现 Gimbal 自动化。喇叭柱可以安装在消声室的另一侧，以提供安装喇叭天线或角反射器目标的位置。

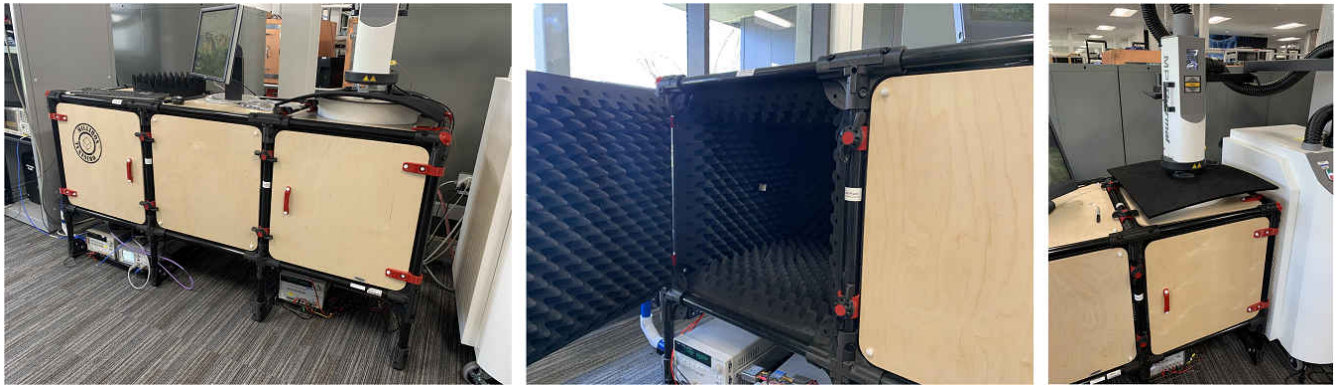


图 2-3. 示例台座消声室

## 2.2 软件

在设置过程中需要执行以下软件程序：

- 雷达测试 GUI：用于对雷达器件进行编程并分析数据的应用软件。这是特定于传感器的定制 GUI。
- Gimbal 应用：用于控制转台的应用软件。

### 3 高级测试设置

#### 3.1 目标模拟器设置

使用雷达目标模拟器，可以测试其他参数，例如远距离 SNR。目标模拟器接收来自 DUT 传感器的 TX 信号，并以特定距离和速度模拟目标，然后将信号发送回 DUT 传感器。目标模拟器可在多个到达角度模拟一个或多个物体。目标模拟器还能够使用各种不同的场景进行编程，这些场景可用于测试目标检测和分类算法。

对于某些应用（如远距离雷达）而言，在生产测试中可能必须测试远距离 SNR。图 3-1 显示了使用目标模拟器的硬件测试设置。

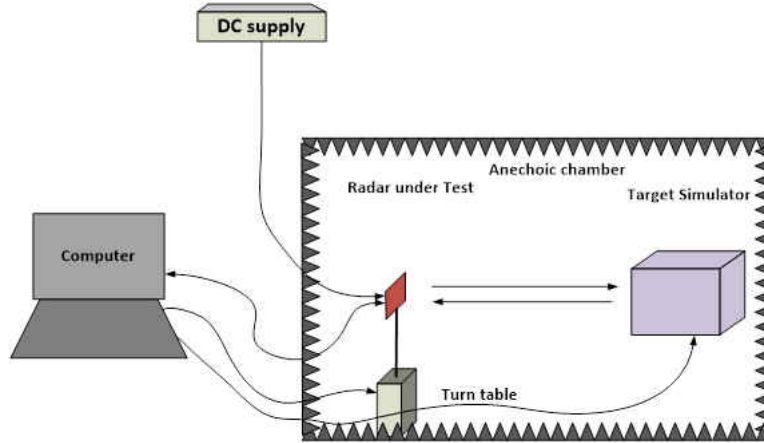


图 3-1. 用于使用目标模拟器的雷达测试的硬件

## 4 参考文献

1. 《对 TI 雷达器件中的线性调频脉冲参数进行编程》
2. 《TI 毫米波雷达传感器射频 PCB 设计、制造和验证指南》
3. [Milliwave Silicon Solutions](#)



## 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