

Chethan Kumar, Habeeb Ur Rahman Mohammed and Greg Peake

摘要

在过去的几十年里，雷达技术已经从导弹控制、地面监视、空中交通控制等军事用途发展到运用于许多汽车和工业领域，例如自适应巡航控制、泊车辅助、自动泊车、运动和存在检测、液位检测、人数统计等。为了使雷达传感器在这些应用中完美运行，应确保雷达天线罩或外壳的设计能够尽可能减少对雷达传感器天线的电气和环境干扰，这一点至关重要。本应用报告介绍了雷达天线罩设计，并重点介绍了在确保雷达传感器性能的情况下设计毫米波雷达天线罩的关键注意事项。除了雷达天线罩设计注意事项中的相关概念以及雷达天线罩测试和鉴定外，本应用报告还提供了不同雷达天线罩结构示例，并给出支持性的设计模拟和测量结果。

内容

1 引言和挑战	3
2 雷达天线罩设计要素	3
2.1 了解雷达天线罩和天线设计中的介电常数和损耗角正切.....	3
2.2 雷达天线罩边界处的阻抗失配.....	3
2.3 雷达天线罩壁厚.....	5
2.4 天线与雷达天线罩之间的距离.....	6
3 典型的雷达天线罩材料示例	7
4 与雷达天线罩角度相关的误差	7
4.1 与矩形雷达天线罩角度相关的误差.....	7
4.2 与球形雷达天线罩角度相关的误差.....	8
4.3 应用中角度误差的影响.....	9
5 雷达天线罩设计和仿真	10
6 雷达天线罩实验室实验	16
6.1 雷达天线罩实验 - 1：扁平塑料雷达天线罩.....	16
6.2 PTFE 材料矩形雷达天线罩.....	17
6.3 PTFE 弧形雷达天线罩.....	18
7 其他注意事项	19
7.1 天线校准.....	19
7.2 雷达天线罩近距注意事项.....	20
8 总结	20
9 鸣谢	20
10 参考文献	21

插图清单

图 2-1. 电介质之间的失配边界.....	3
图 2-2. 在电介质边界处发生的多次反射.....	4
图 2-3. 在雷达天线罩边界处发生的反射（假设雷达天线罩具有实心单壁）.....	5
图 2-4. 不同频率入射波的雷达天线罩最佳厚度与介电常数之间的关系.....	6
图 2-5. 不同电介质的雷达天线罩最佳厚度与频率之间的关系.....	6
图 4-1. 不同掠射角的矩形雷达天线罩壁中的行进距离.....	8
图 4-2. 信号在不同掠射角下在球形雷达天线罩壁中的行进距离.....	8
图 4-3. 矩形雷达天线罩角度估算误差的影响.....	9
图 4-4. 球形雷达天线罩角度估算误差的影响.....	9
图 5-1. 球形雷达天线罩 HFSS 模型：37.44mm 外半径.....	10
图 5-2. 球形雷达天线罩 HFSS 模型：18.24mm 外半径.....	10

图 5-3. 较小的球形 HFSS 模型：PCB 半透明视图的对应尺寸和放置.....	10
图 5-4. 较大的球形 HFSS 模型：PCB 半透明视图的对应尺寸和放置.....	10
图 5-5. 雷达天线罩曲率半径基于天线孔径和 FoV 要求.....	11
图 5-6. 未采用雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 方位角)	11
图 5-7. 采用半径为 18.24mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 方位角)	11
图 5-8. 采用半径为 37.44mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 方位角)	12
图 5-9. 采用半径为 32.64mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 方位角)	12
图 5-10. 未采用雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 方位角)	12
图 5-11. 采用半径为 18.24mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 方位角)	13
图 5-12. 采用半径为 37.44mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 方位角)	13
图 5-13. 采用半径为 32.64mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 方位角)	13
图 5-14. 未采用雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 仰角)	14
图 5-15. 采用半径为 18.24mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 仰角)	14
图 5-16. 采用半径为 37.44mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 仰角)	14
图 5-17. 采用半径为 32.64mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 仰角)	15
图 5-18. 未采用雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 仰角)	15
图 5-19. 采用半径为 18.24mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 仰角)	15
图 5-20. 采用半径为 37.44mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 仰角)	16
图 5-21. 采用半径为 32.64mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 仰角)	16
图 6-1. 壁厚为 2mm 的 ABS 塑料矩形雷达天线罩.....	16
图 6-2. 采用壁厚为 2mm 的 ABS 塑料矩形雷达天线罩情况下的天线辐射方向图 (方位角)	17
图 6-3. 未采用雷达天线罩情况下的天线辐射方向图 (方位角)	17
图 6-4. 壁厚为 1.524mm 的 PTFE 板材矩形雷达天线罩.....	17
图 6-5. 采用 PTFE 矩形雷达天线罩情况下的天线辐射测量.....	18
图 6-6. 未采用雷达天线罩情况下的天线辐射测量.....	18
图 6-7. 壁厚为 1.524mm 的 PTFE 弧形雷达天线罩.....	18
图 6-8. 未采用雷达天线罩情况下的天线辐射方向图.....	19
图 6-9. 未采用雷达天线罩情况下的方位角估算误差测量 - 有和没有相位校准.....	19
图 6-10. 采用弧形雷达天线罩情况下的仰角天线辐射方向图.....	19
图 6-11. 采用弧形雷达天线罩情况下的方位角估算误差测量 - 有和没有相位校准.....	19

表格清单

表 3-1. 不同雷达天线罩材料的介电常数和耗散因数.....	7
---------------------------------	---

商标

Teflon® is a registered trademark of Teflon.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言和挑战

雷达天线罩是一种电磁透明的保护罩，用于包围毫米波雷达传感器和天线。它提供结构性防风雨外壳，保护毫米波天线和电子设备免受雨、阳光、风等外部环境影响。雷达天线罩对天线发送或接收的电磁信号的衰减极小，因此对无线电波而言是透明的。

在某些情况下，雷达天线罩可以构造为可有意改变波束特性的透镜。这种雷达天线罩或透镜需要使用电磁仿真工具并结合天线和所需的视场进行设计。

根据特定终端设备的需求，雷达天线罩可以构造成多种形状，例如平面、球形和测地线，这些形状会对雷达传感器的辐射方向图或视场和最大可实现距离产生一定的影响。对雷达天线罩材料的选择（例如玻璃纤维、PTFE 涂层织物和聚碳酸酯）通常取决于在目标应用环境下的用途。

2 雷达天线罩设计要素

2.1 了解雷达天线罩和天线设计中的介电常数和损耗角正切

为了了解电磁波在材料中的传播，务必要知晓材料的本构参数，例如介电常数、磁导率和电导率。这些本构参数表征了材料的 EM 特性。根据这些参数，必须特别注意选择具有最佳相对介电常数 (ϵ_r) 或介电常数 (DK) 的雷达天线罩材料。（大多数雷达天线罩的设计采用了非磁性电介质材料，从而使相对磁导率 = 1，电导率 = 0。）由于雷达天线罩结构边界处的电磁波反射或由于雷达天线罩材料内部的多次反射，会发生信号衰减或“丢失”。这主要是雷达天线罩相对于空气的介电常数 (DK) 的不同造成的。介电常数 (DK) 代表材料的反射和折射特性。一般来说，与空气相比，电磁信号在通过雷达天线罩时可以被认为发生了“减速”。

损耗角正切的定义：介电损耗量化了电介质材料固有的电磁能耗散。可以根据损耗角 δ 或相应的损耗角正切 $\tan \delta$ 将其参数化。

介电常数和损耗角正切共同指定了雷达天线罩与天线系统相结合的传输效率，其中在预期的工作频率下对这两者进行理想测量。介电损耗量化了电介质材料固有的电磁能耗散。可以根据损耗角 δ 或相应的损耗角正切 $\tan(\delta)$ 将其参数化。介电常数和损耗角正切越小，雷达天线罩对天线性能的影响就越小。理想情况下，DK 应接近 1，因为自由空间 DK 为 1。但是，使用 DK=1 的材料（主要是聚苯乙烯泡沫塑料）是不切实际的，因为它们不利于实现雷达天线罩的其他目标（美观、低成本和抵御环境的影响）。请注意，不是天线设计，而是雷达天线罩材料特性和可用性会使得 $DK > 1$ 。

2.2 雷达天线罩边界处的阻抗失配

失配平面的边界处会发生电磁波反射。该失配平面可以看作是两种介电特性不同的介质（即介电常数不同的介质）的边界，如图 2-1 所示。

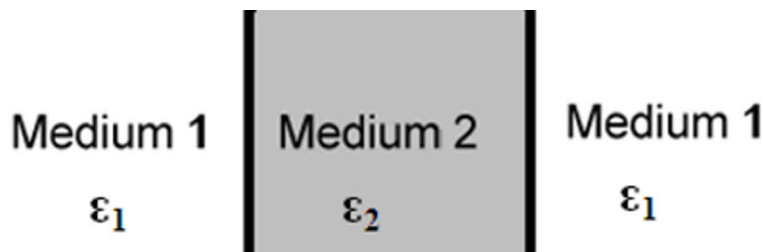


图 2-1. 电介质之间的失配边界

通过观察阻抗失配平面的电磁波相互作用，可以更好地理解阻抗失配导致的这些反射。电磁波在这些平面处的相互作用会导致电磁波在介质边界处发生反射和透射，其量值可以通过反射系数 Γ 和透射系数 τ 来确定。反射系数是反射 E_r 与入射 E_i 电场强度之比，透射系数是透射 E_t 与入射 E_i 电场强度之比，如方程式 1 和方程式 2 所示。

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2 \cdot \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \tag{2}$$

备注

(1) 和 (2) 是仅在单个界面边界处发生的反射。

本质上，雷达天线罩材料内将发生多次反射，并导致如图 2-2 所示的累积。这导致通过入射波 (E_{ri}) 产生反射波 (E_{rT}) 和透射波 (E_{tT})。

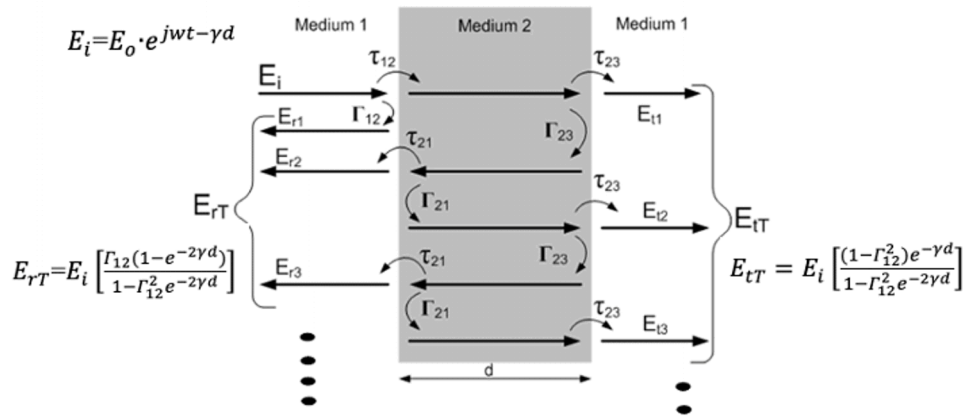


图 2-2. 在电介质边界处发生的多次反射

雷达天线罩内发生的反射可以得到简化，如图 2-3 所示。自由空间或空气波阻抗约为 377Ω ，因此雷达天线罩内的波阻抗由 $377/\sqrt{\epsilon_r}\Omega$ 给出。电磁波会同时从空气/雷达天线罩界面和雷达天线罩/空气界面反射回来。

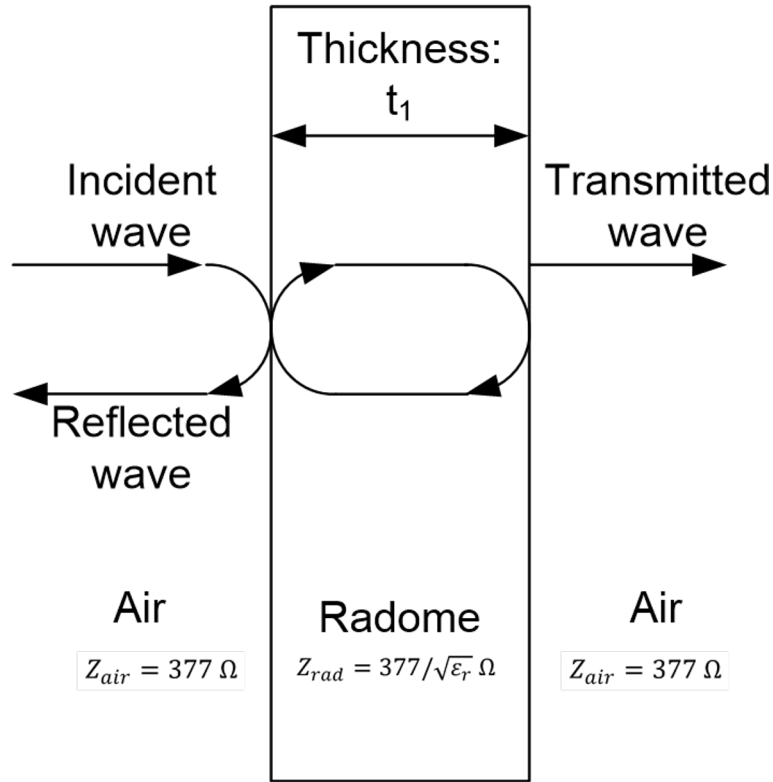


图 2-3. 在雷达天线罩边界处发生的反射 (假设雷达天线罩具有实心单壁)

2.3 雷达天线罩壁厚

雷达天线罩的壁厚在实现毫米波雷达传感器卓越性能方面起着关键的作用。务必确保雷达天线罩壁厚为雷达波长/2 的整数倍，以便雷达天线罩在预期的毫米波频率范围内变得“几乎透明”。可以通过方程式 3 计算雷达天线罩的厚度。波长在雷达天线罩材料中比在自然空气中短，并且是材料介电常数的反函数，如方程式 4 所示。

$$t_{optimum} = \frac{n^* \lambda_m}{2} \quad (3)$$

$$\lambda_m = \frac{C}{f^* \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

其中，

- $t_{optimum}$ = 雷达天线罩壁的最佳厚度或使雷达天线罩透明的目标厚度。
- N : 1、2、3...
- λ_m : 材料的波长
- C : 光速
- f : 使用的平均载波频率 (例如，对于 60-64 GHz 的典型带宽为 62 GHz)
- ϵ_r : 相对介电常数

一般来说，雷达天线罩的性能主要取决于使用频率、厚度、 ϵ_r 、入射角和形状。对于正常入射情况，图 2-4 和图 2-5 绘制了方程式 4 中给出的最佳厚度。

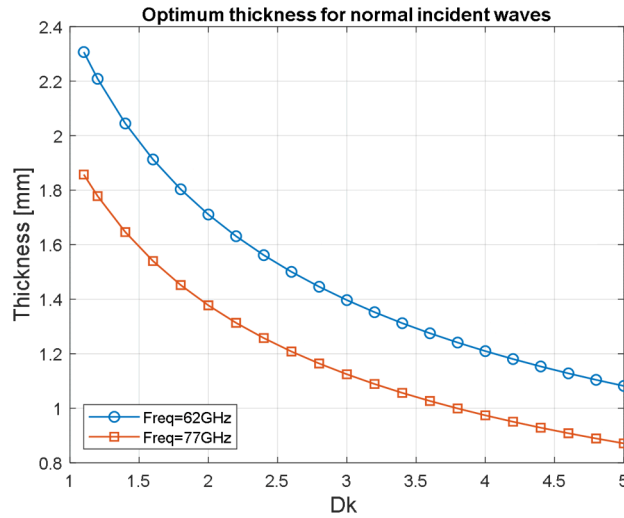


图 2-4. 不同频率入射波的雷达天线罩最佳厚度与介电常数之间的关系

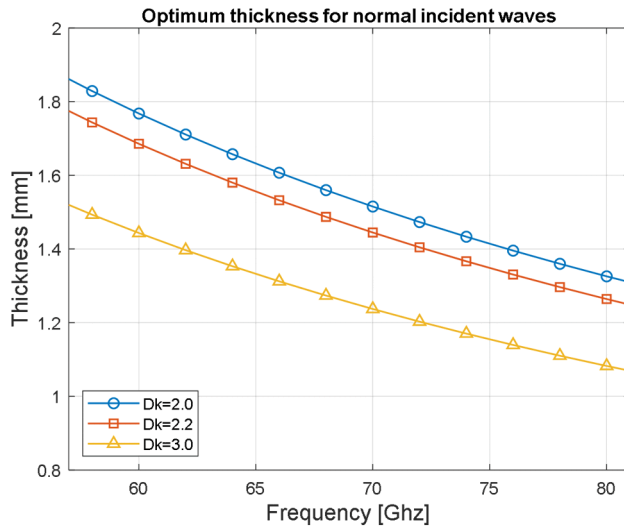


图 2-5. 不同电介质的雷达天线罩最佳厚度与频率之间的关系

2.4 天线与雷达天线罩之间的距离

天线与雷达天线罩内表面之间的最佳距离有助于最大限度地降低雷达天线罩造成的反射影响。如果返回到天线的波与透射波同相，那么这些影响将变得非常轻微。方程式 5 显示了天线和雷达天线罩之间的最佳距离

$$D = \frac{n \cdot \lambda_0}{2} \tag{5}$$

其中，

- N : 1、2、3...
- D : 天线和雷达天线罩之间的最佳距离
- λ_0 : 空气中的波长

3 典型的雷达天线罩材料示例

建议为雷达天线罩设计使用具有较低 Dk (介电常数) 和 Df (损耗角正切) 的材料。雷达天线罩中使用的典型材料是 PBT (聚对苯二甲酸丁二酯)、Plexiglas、聚碳酸酯、Teflon® (PTFE)、聚苯乙烯和 ABS。应避免使用金属固定件和涂层 (尤其是会显著降低信号强度的金属漆), 这一点非常重要, 具体请参阅 [10]。

此外, 使用的材料本质上应该是均质的, 以免在雷达天线罩内产生任何额外的 Dk 边界, 设计旨在实现实心的壁, 其内部没有气泡或其他材料碎片。有些雷达天线罩设计采用不同材料的夹层结构, 这样做主要是为了提高强度和可能的带宽, 但本文档未涵盖这些类型。

表 3-1. 不同雷达天线罩材料的介电常数和耗散因数

材料	介电常数 (ϵ_r)	耗散因数 ($\tan \delta$)
聚碳酸酯	2.9	0.012
ABS	2.0-3.5	0.0050-0.019
PEEK	3.2	0.0048
PTFE (Teflon®)	2	<0.0002
Plexiglass®	2.6	0.009
玻璃	5.75	0.003
陶瓷	9.8	0.0005
PE	2.3	0.0003
PBT	2.9-4.0	0.002

4 与雷达天线罩角度相关的误差

信号在雷达天线罩材料中行进的距离与角度有关, 具体取决于雷达天线罩的类型。对于矩形雷达天线罩距离, 在更高的掠射角下, 会穿过更厚的雷达天线罩壁。在弧形雷达天线罩中, 无论是在视轴上还是在较高的掠射角下, 穿过雷达天线罩的行进距离都是相同的; 因此, 与角度相关的误差会更小。

4.1 与矩形雷达天线罩角度相关的误差

在视轴上通过雷达天线罩的电气距离等于雷达天线罩壁的厚度。然而, 该距离随着到达角的增加而增加, 并导致更大的角度估算误差。图 4-1 显示了该影响。

这种现象背后的理论是, 如果雷达天线罩壁厚设计为 $\lambda/2$ (半波长), 那么雷达信号通过内壁表面, 然后从外壁表面反射回来的往返行程引入了从内壁发出的 180° 净相移 ($180^\circ - 180^\circ + 180^\circ$)。

因此, 在矩形雷达天线罩的视轴上, 内壁的反射将因异相而抵消, 从而实现低净反射。然而, 当从视轴移动到更高的掠射角时, 毫米波信号传播的距离大于“最佳厚度”或“半波长”。这会导致在雷达天线罩界面边界处多次发生反射, 从而导致天线辐射方向图中的纹波并导致零点。这些纹波和零点会导致检测处于较高掠射角的物体时产生不一致, 从而导致角度估算误差。可以通过将雷达天线罩壁向雷达 FoV 的范围逐渐变细来抵消这种影响, 但是, 这也会降低雷达天线罩的强度。

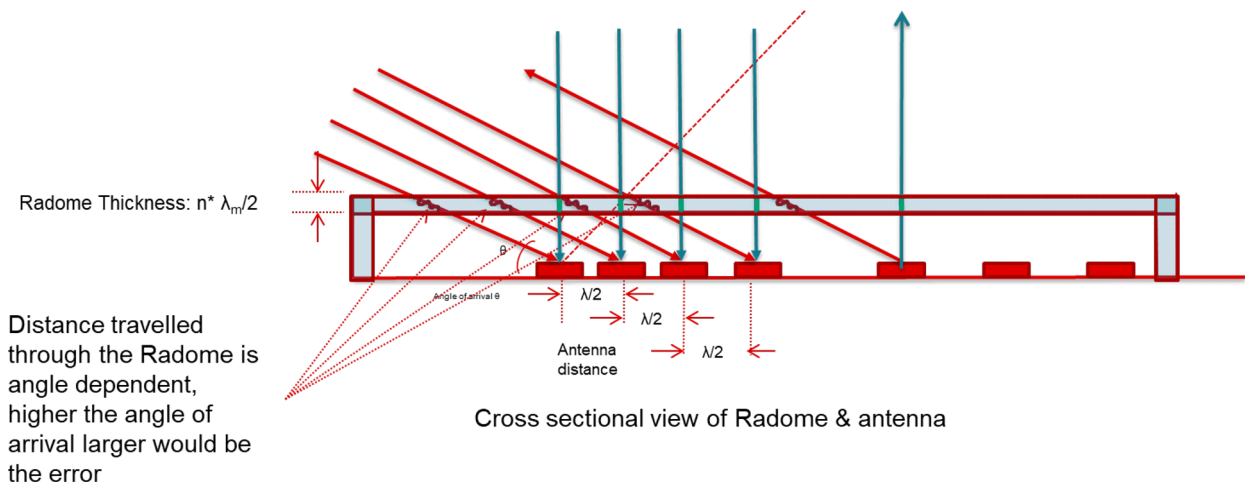


图 4-1. 不同掠射角的矩形雷达天线罩壁中的行进距离

4.2 与球形雷达天线罩角度相关的误差

图 4-2 显示了信号穿过球形雷达天线罩的行进距离。在这种情况下，雷达天线罩的性能在不同的掠射角下与在视轴上相似。

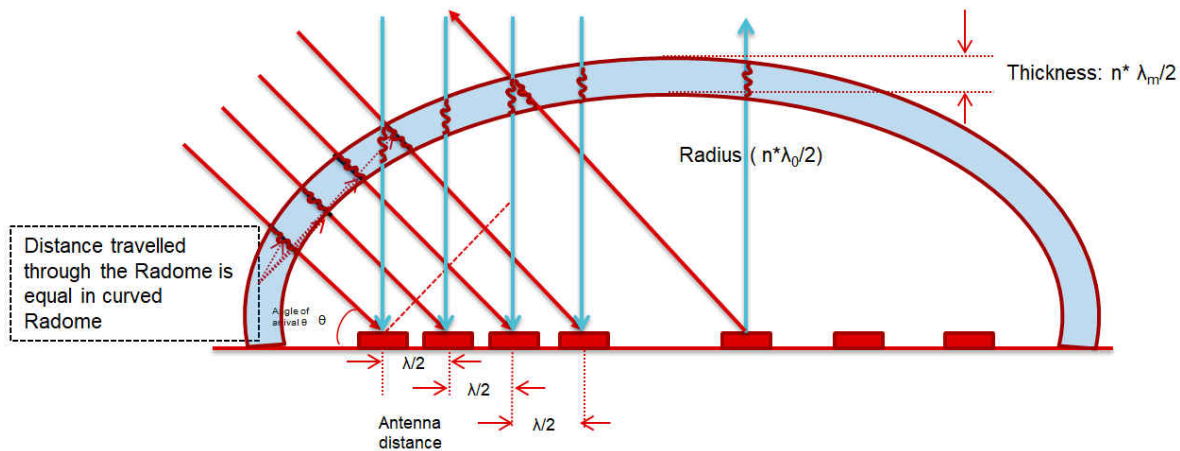


图 4-2. 信号在不同掠射角下在球形雷达天线罩壁中的行进距离

4.3 应用中角度误差的影响

图 4-3 和图 4-4 显示了矩形和球形雷达天线罩导致的角度估算误差对检测物体的影响。在矩形雷达天线罩中以更高的掠射角行进的距离更大，因此后者相对于球形天线罩结构而言更容易产生角度估算误差。物体似乎相对于原始位置发生了移动。随着物体与雷达之间距离的增加，这种角度估算误差会变得更加严重。

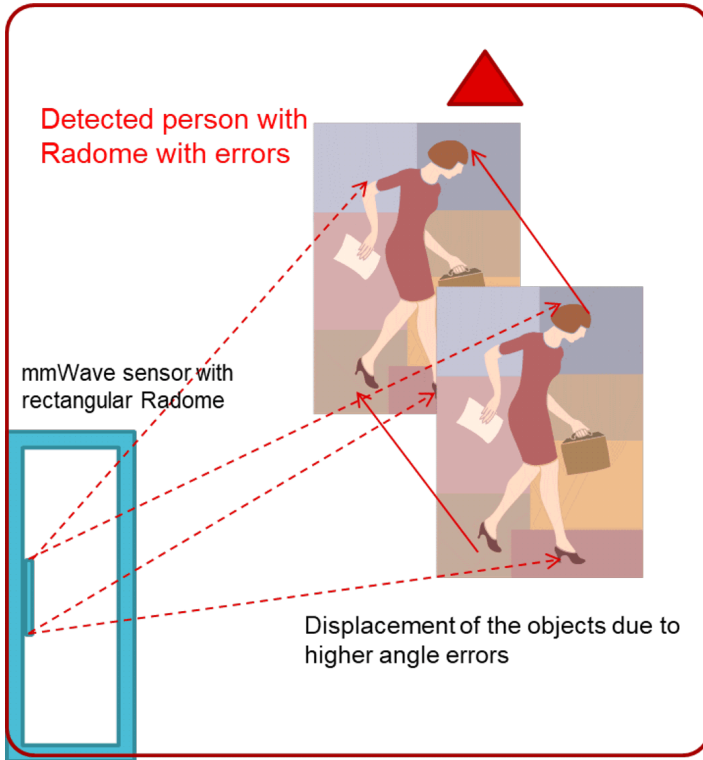


图 4-3. 矩形雷达天线罩角度估算误差的影响

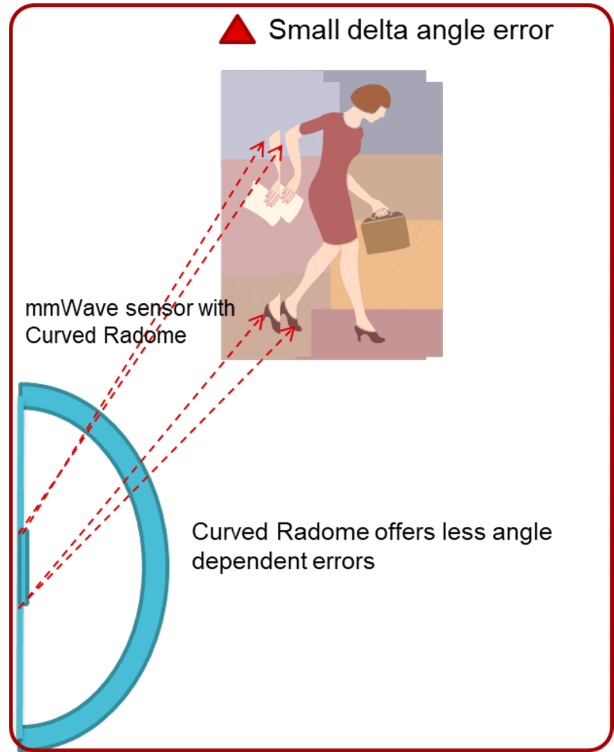


图 4-4. 球形雷达天线罩角度估算误差的影响

5 雷达天线罩设计和仿真

本节重点介绍了使用 IWR6843 ISK 型天线执行的一些雷达天线罩设计和仿真，其中以球形雷达天线罩为例进行研究。本节比较了采用和未采用雷达天线罩的远场天线辐射方向图。此仿真使用 IWR6843 ISK EVM 的派生设计。

图 5-1 至图 5-4 显示了 3D EM 场求解器工具 (例如 Ansys 的 HFSS) 中的雷达天线罩仿真图片。

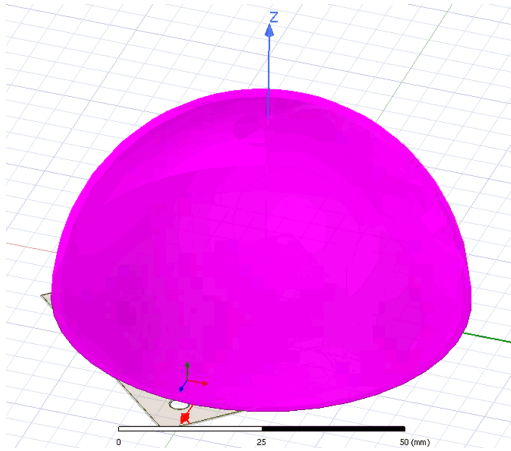


图 5-1. 球形雷达天线罩 HFSS 模型 : 37.44mm 外半径

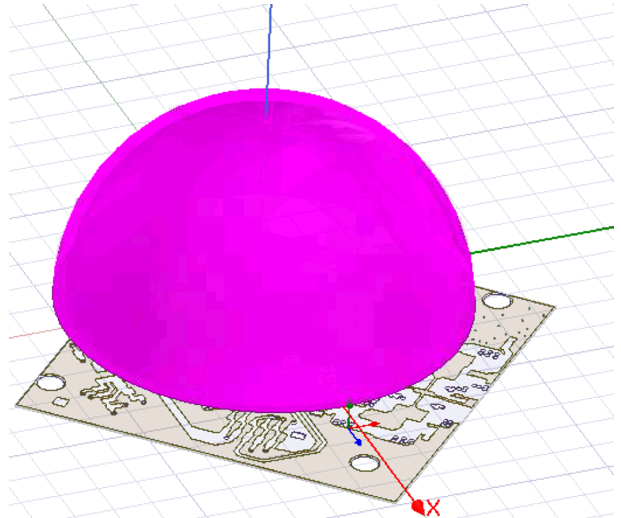


图 5-2. 球形雷达天线罩 HFSS 模型 : 18.24mm 外半径

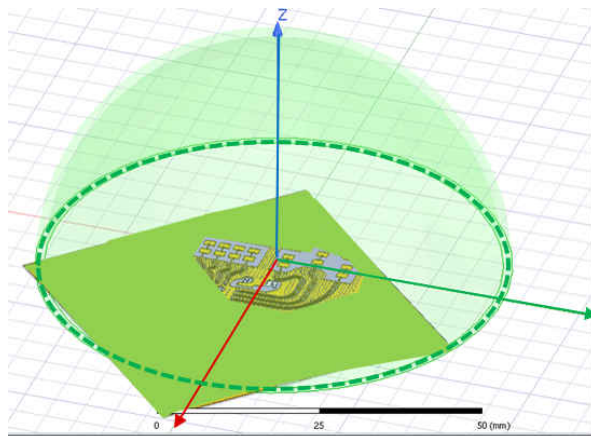


图 5-3. 较小的球形 HFSS 模型 : PCB 半透明视图的对应尺寸和放置

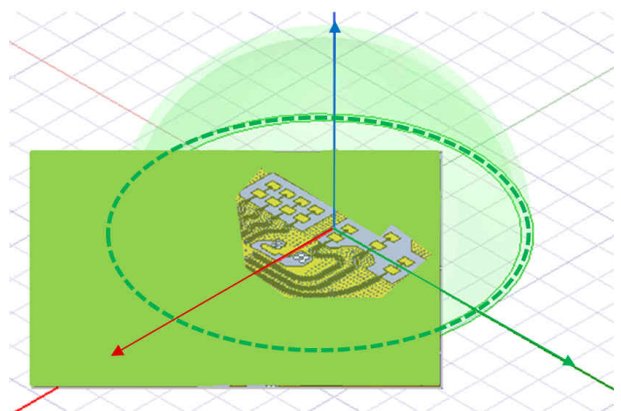


图 5-4. 较大的球形 HFSS 模型 : PCB 半透明视图的对应尺寸和放置

图 5-5 显示了球形雷达天线罩设计，其半径是根据天线孔径尺寸和所需的视场要求进行选择的。在本例中，设计针对 $\pm 70^\circ$ 方位角和 $\pm 40^\circ$ 仰角视场进行了优化。所选曲率半径针对 $\lambda_0/2$ 的整数倍进行了优化。于分析目的，使用了 ABS-HG_FR 材料，Dk 为 2.8，Df 为 7.90E-03。

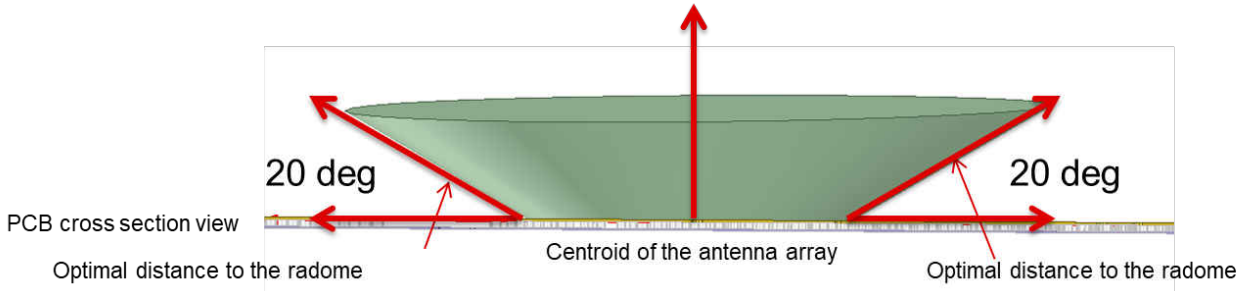


图 5-5. 雷达天线罩曲率半径基于天线孔径和 FoV 要求

以下各图显示了大小为 $\lambda_0/2$ 整数倍 (18.24mm、31.2mm、37.44mm) 的各种外半径的仿真天线辐射方向图 (具有最佳厚度)，并与未采用雷达天线罩情况下的方向图进行了比较。对于 TX 图，显示了 IWR6843 的三个发送器，同样，对于 RX 图，以不同的颜色显示了四个接收器。比较时还分析了方位角和仰角等方面。根据在 FoV 边缘的天线方向图和天线增益中看到的纹波，31.2mm 的半径似乎是该设计的最佳选择。预计会有大约 2-3dB 的双向损耗，需要在系统链路预算分析中加以考虑。

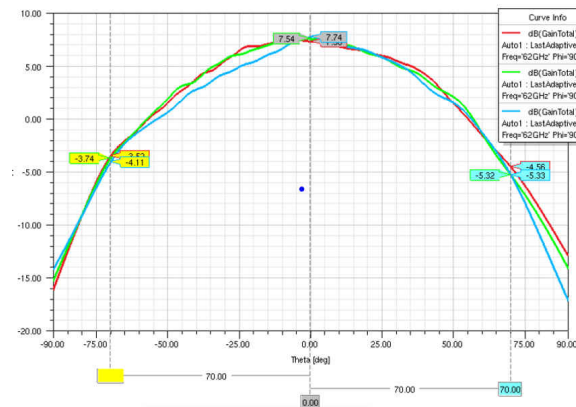


图 5-6. 未采用雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx，方位角)

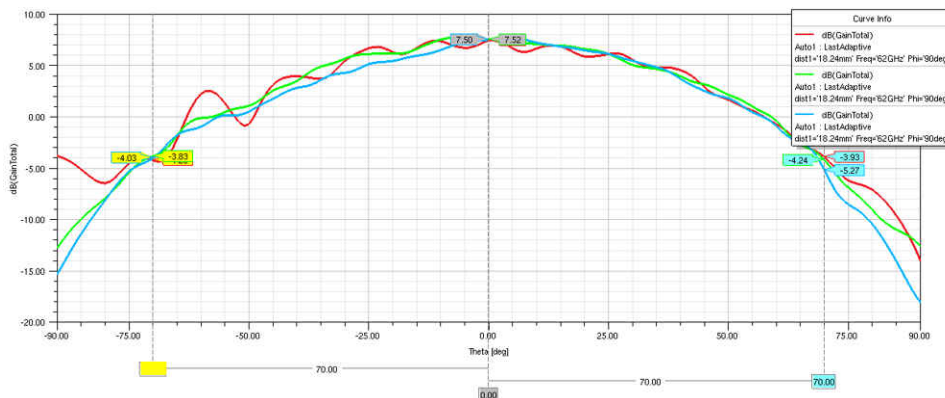


图 5-7. 采用半径为 18.24mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx，方位角)

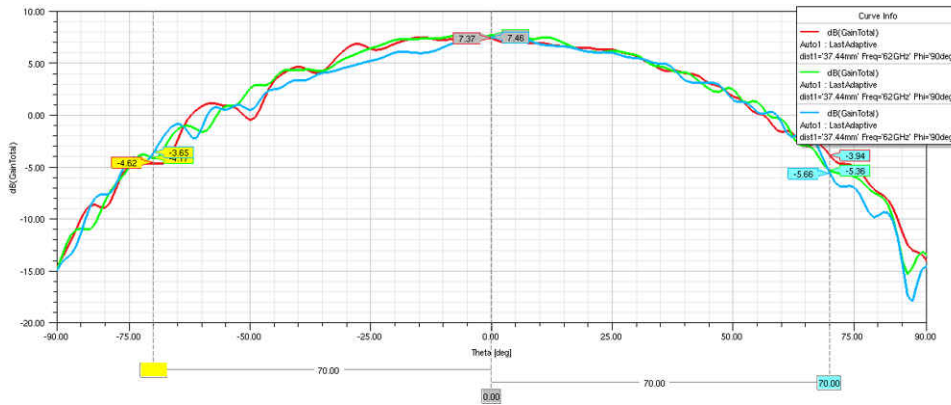


图 5-8. 采用半径为 37.44mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 方位角)

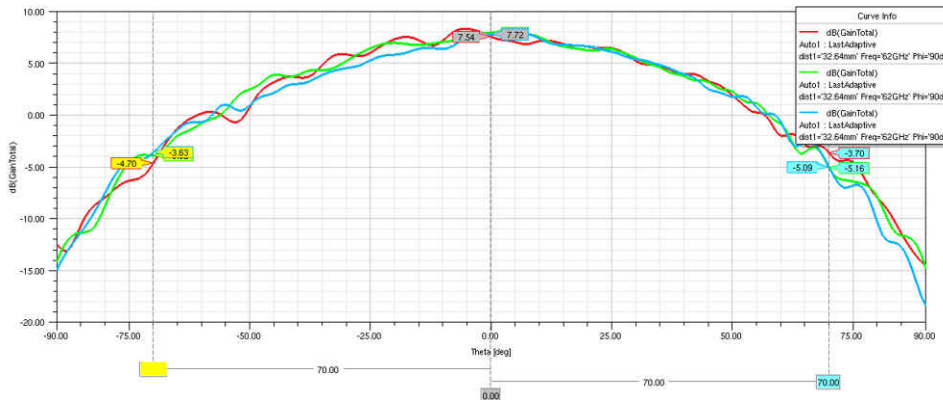


图 5-9. 采用半径为 32.64mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 方位角)

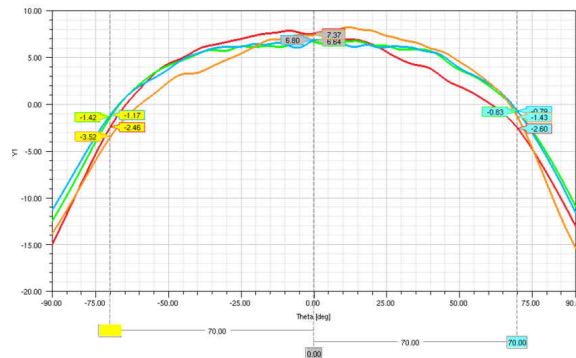


图 5-10. 未采用雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 方位角)

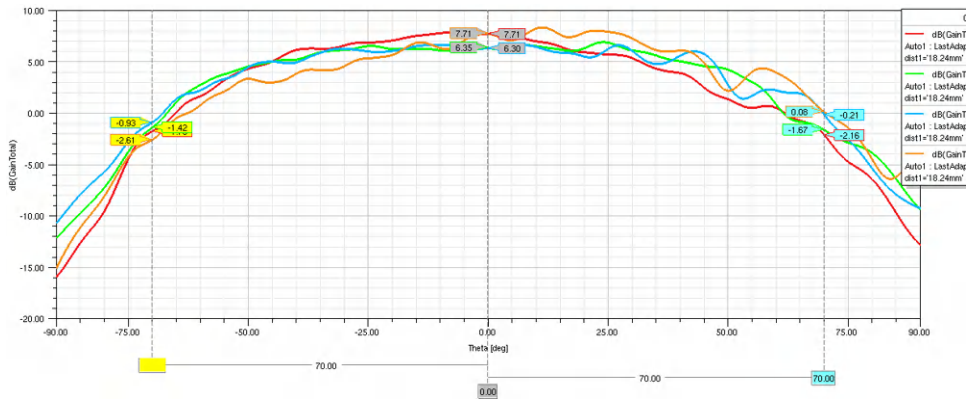


图 5-11. 采用半径为 18.24mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 方位角)

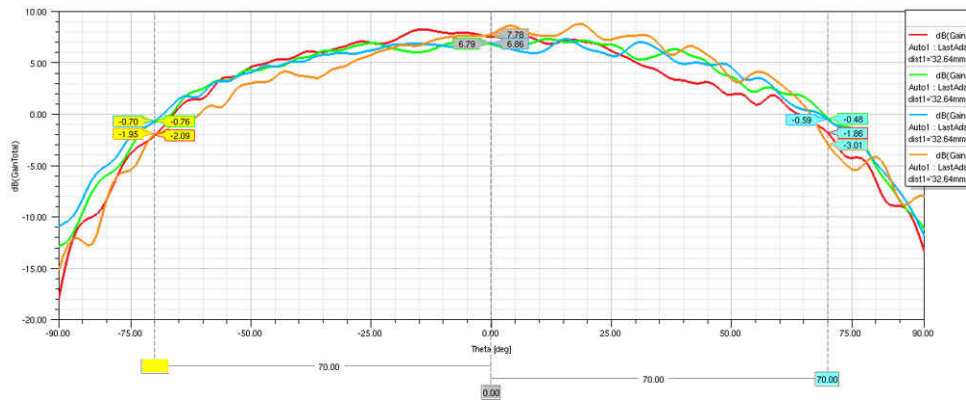


图 5-12. 采用半径为 37.44mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 方位角)

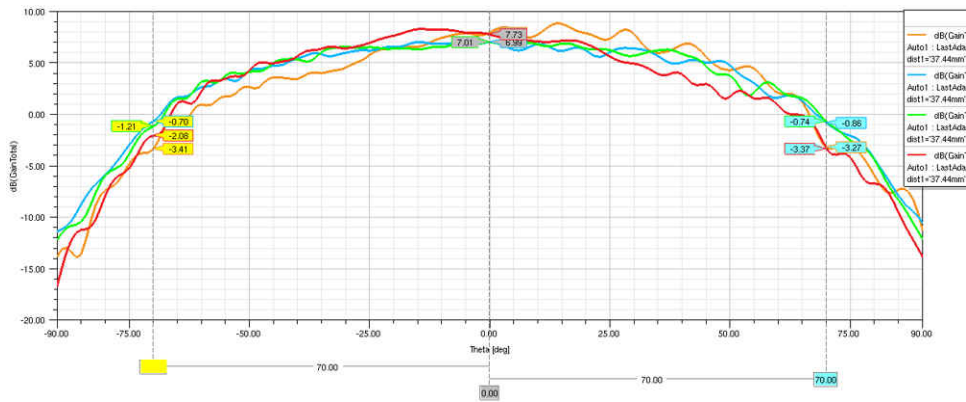


图 5-13. 采用半径为 32.64mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 方位角)

以下各图显示了对仰角视场进行的类似分析。对于 $\pm 40^\circ$ 仰角视场，由于存在雷达天线罩，可以看到极小的纹波影响。

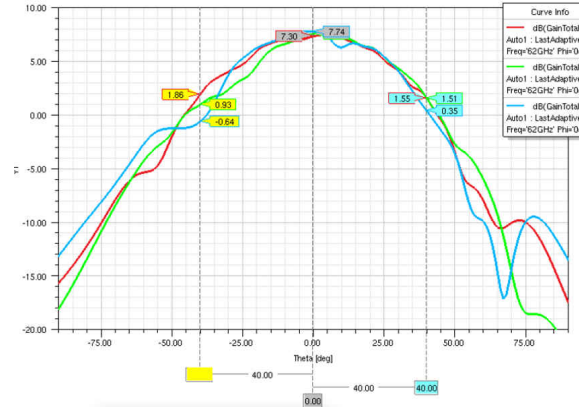


图 5-14. 未采用雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 仰角)

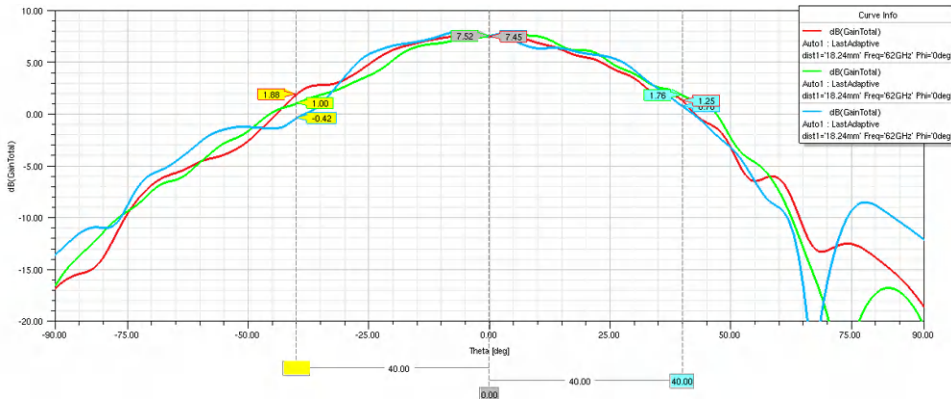


图 5-15. 采用半径为 18.24mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 仰角)

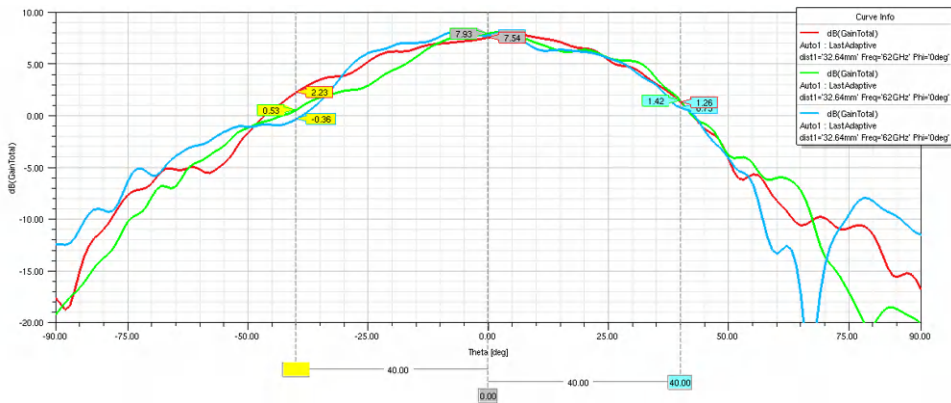


图 5-16. 采用半径为 37.44mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 仰角)

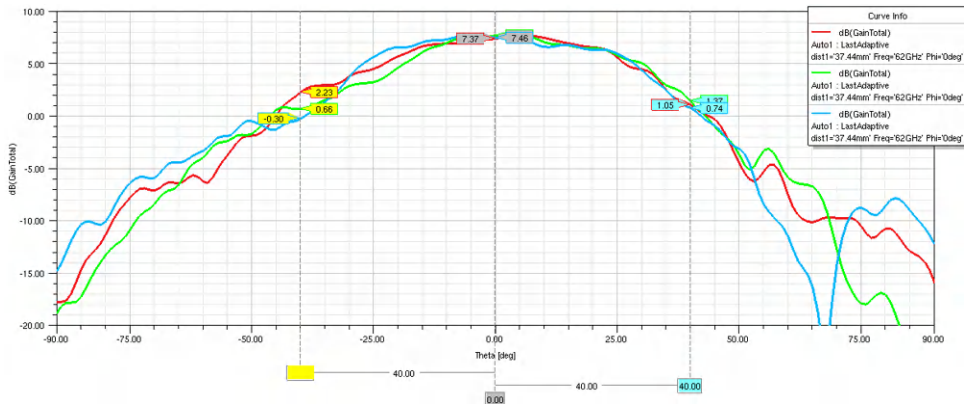


图 5-17. 采用半径为 32.64mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Tx, 仰角)

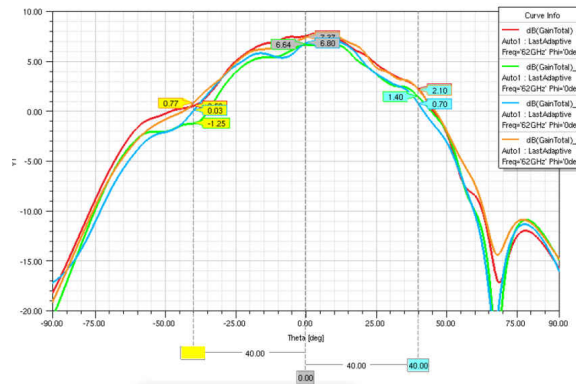


图 5-18. 未采用雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 仰角)

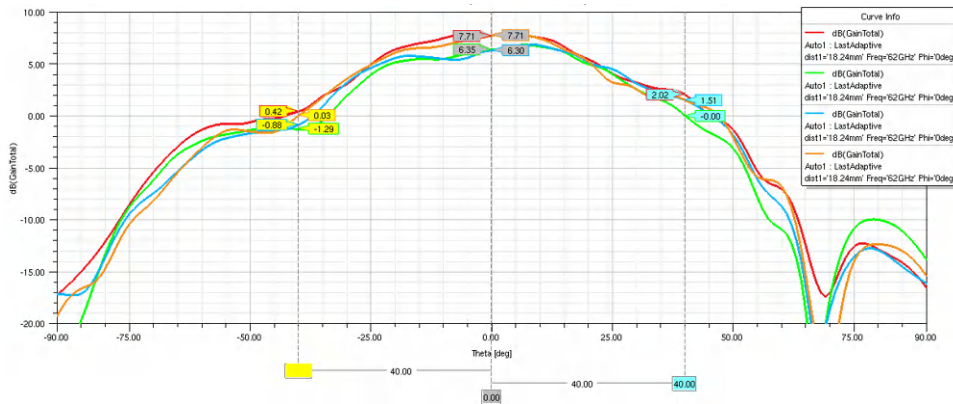


图 5-19. 采用半径为 18.24mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 仰角)

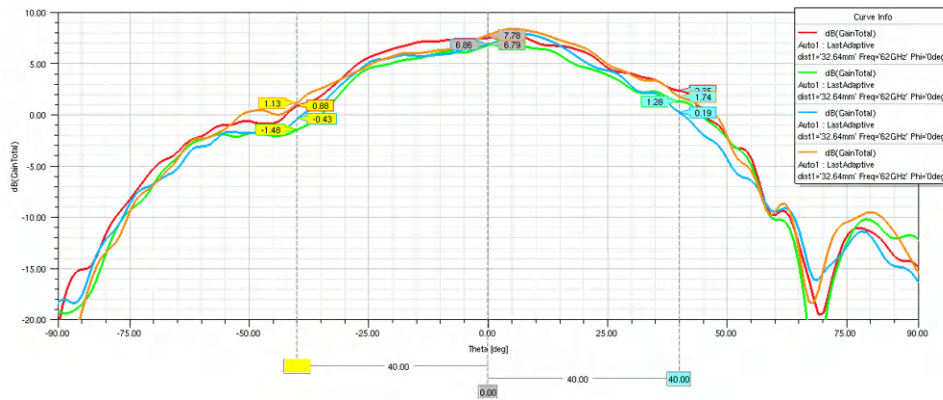


图 5-20. 采用半径为 37.44mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 仰角)

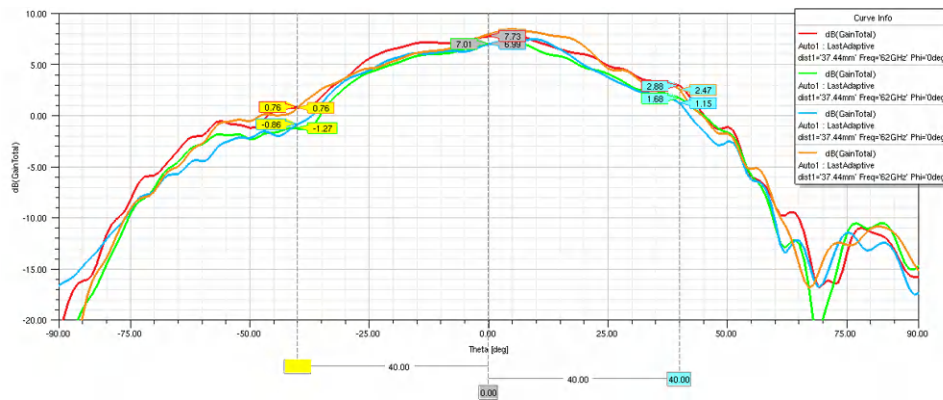


图 5-21. 采用半径为 32.64mm 的雷达天线罩情况下的辐射方向图 (Rx, 仰角)

6 雷达天线罩实验室实验

本应用报告使用多个具有不同材料、形状和厚度的雷达天线罩进行了实验室测量。本节提供了不同雷达天线罩的测量结果。

6.1 雷达天线罩实验 - 1：扁平塑料雷达天线罩

本实验选用厚度为 2mm 的 ABS 塑料雷达天线罩。图 6-1 显示了该雷达天线罩的图片。在 IWR6843ISK EVM 板上围绕 62 GHz 频率进行实验。

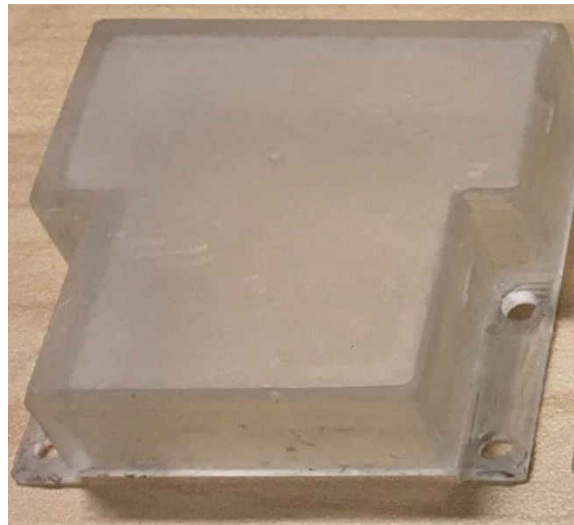


图 6-1. 壁厚为 2mm 的 ABS 塑料矩形雷达天线罩

图 6-2 显示了使用 ABS 塑料矩形雷达天线罩的两个图。图 6-3 显示了未采用雷达天线罩情况下的天线辐射方向图，相应地，图 6-2 显示了采用天线罩情况下的天线辐射方向图。从图中可以看出，该雷达天线罩使天线辐射方向图中出现显著的性能降低。

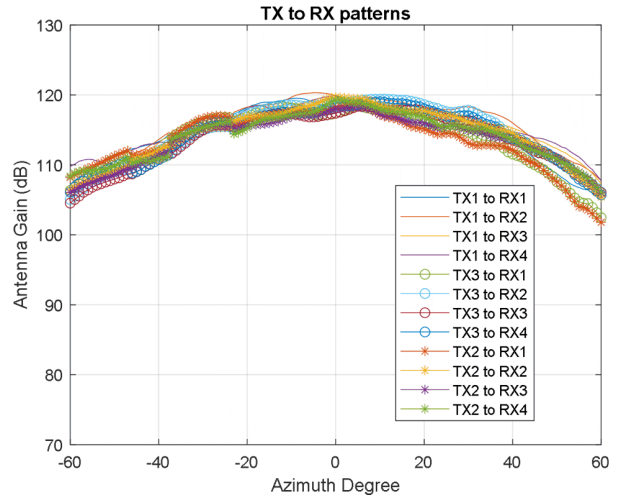
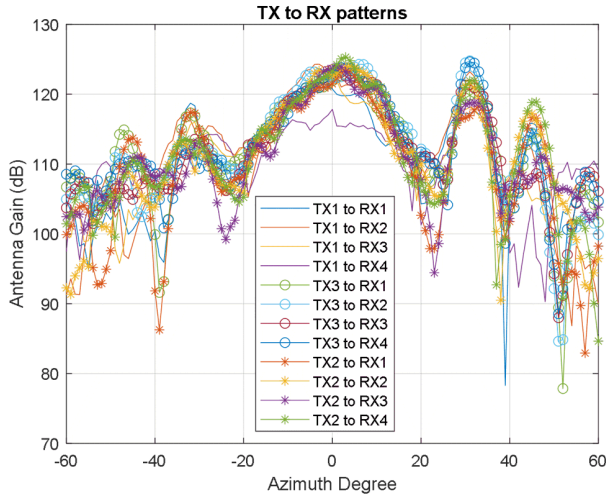


图 6-2. 采用壁厚为 2mm 的 ABS 塑料矩形雷达天线罩情况下的天线辐射方向图 (方位角)

图 6-3. 未采用雷达天线罩情况下的天线辐射方向图 (方位角)

6.2 PTFE 材料矩形雷达天线罩

在第二个实验中，选择了壁厚为 1.524mm 且采用 PTFE 板材的矩形雷达天线罩。图 6-4 显示了该雷达天线罩的图片。



图 6-4. 壁厚为 1.524mm 的 PTFE 板材矩形雷达天线罩

图 6-5 和图 6-6 显示了采用和未采用 PTFE 矩形雷达天线罩的天线辐射方向图。从图中可以看出，与常规 ABS 雷达天线罩相比，使用 PTFE 材料可减少失真量或波纹振幅。在这种情况下，失真较小，因为选择的雷达天线罩厚度和材料可以优化整个视场中的穿透性。

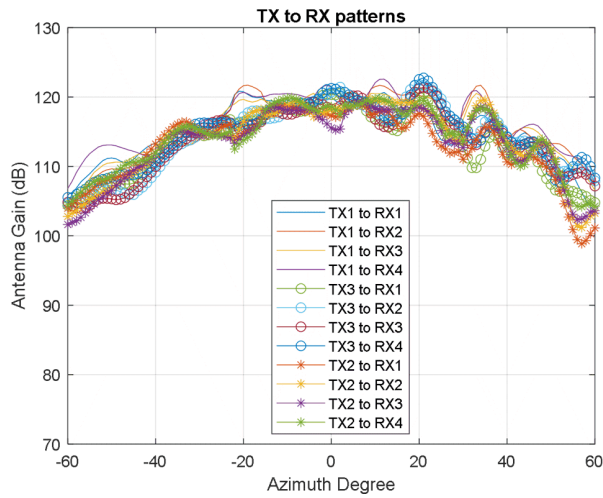


图 6-5. 采用 PTFE 矩形雷达天线罩情况下的天线辐射测量

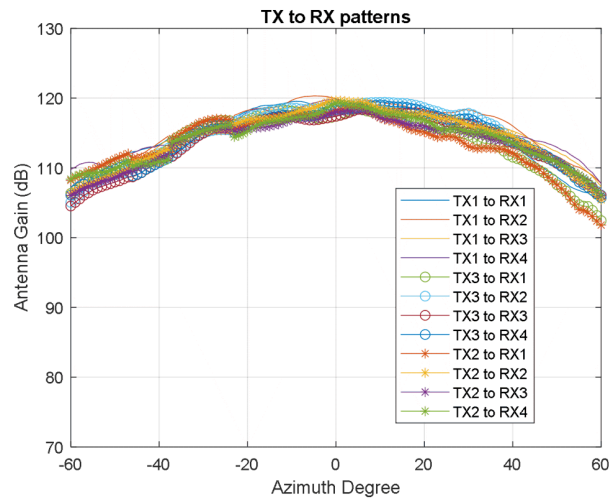


图 6-6. 未采用雷达天线罩情况下的天线辐射测量

6.3 PTFE 弧形雷达天线罩

第三个实验是使用壁厚为 1.524mm 且制造材料为 PTFE 的弧形雷达天线罩进行的，如图 6-7 所示。



图 6-7. 壁厚为 1.524mm 的 PTFE 弧形雷达天线罩

图 6-8 至图 6-11 显示了弧形 PTFE 材料雷达天线罩天线辐射方向图和角度估算。与矩形雷达天线罩相比，弧形雷达天线罩显示出更好的结果，天线辐射方向图的失真或波纹更少，并且在更宽的 FoV 角度下具有更低的角度估算误差。节 7.1 中讨论了在图 6-9 和图 6-11 中应用的相位校准，从图中可以看出，它移动了角度误差曲线，使得估算的角度在天线视轴处被调整为零。

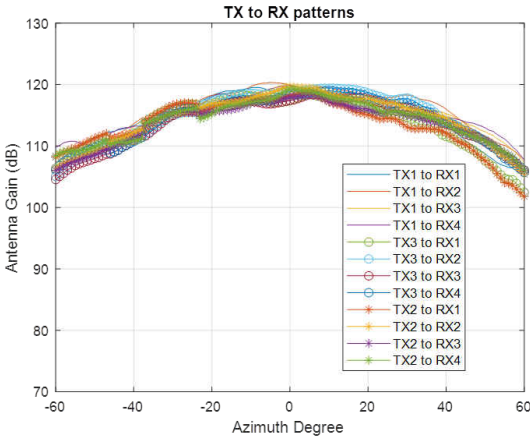


图 6-8. 未采用雷达天线罩情况下的天线辐射方向图

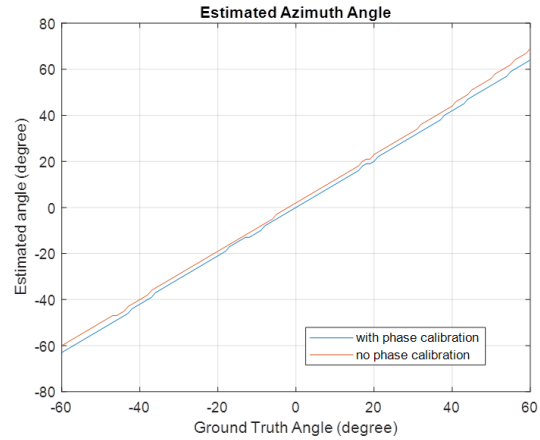


图 6-9. 未采用雷达天线罩情况下的方位角估算误差测量 - 有和没有相位校准

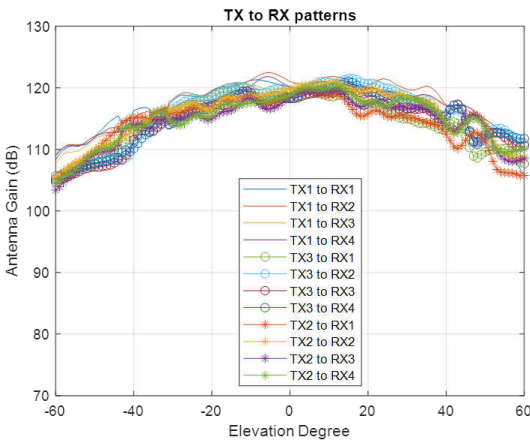


图 6-10. 采用弧形雷达天线罩情况下的仰角天线辐射方向图

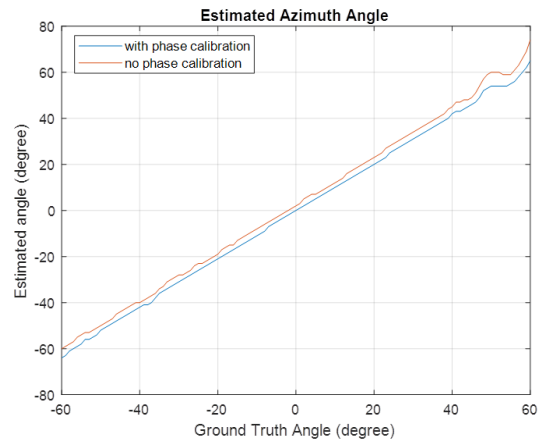


图 6-11. 采用弧形雷达天线罩情况下的方位角估算误差测量 - 有和没有相位校准

7 其他注意事项

7.1 天线校准

为了提高雷达天线罩内的天线性能，可以应用 SoC 级天线校准来补偿射频路径延迟导致的距离和接收器增益以及相位偏差。整体而言，此过程的目标是确定所有 Tx-Rx 路径共用的距离偏差补偿，以及放置在视轴处（在远场中固定已知距离）的参考物体的每个虚拟 Tx-Rx 对的增益和相位失配。更多有关该主题的信息，请参阅 [4]。

毫米波 SDK 提供了一种通过开箱即用 (OOB) 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](#) 并查找 `compRangeBiasAndRxChanPhase` 过程。此外，可以在毫米波 SDK 安装文件夹 (位于 `mmwave_sdk_<ver>\packages\ti\datapath\dpcc\objectdetection\<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。用户可以使用 OOB 演示执行校准，也可以将提供的源代码移植到定制应用中。

此外，在使用相同的 OOB 演示应用和读取源时，还可以获取用于从空气/雷达天线罩边界去除近场反射的过程。在距离 FFT 输出中的直流附近，靠近雷达的距离库中会存在天线耦合特征信号 (请参阅 SDK 用户指南中的 `calibDcRangeSig`)。相同的校准过程也可用于消除雷达天线罩引起的任何近场反射。

7.2 雷达天线罩近距注意事项

雷达天线罩会自然提供一个形成其他环境层的外表面，继而影响系统的性能。本文档未讨论此主题，但下面列出了其中一些示例挑战：

- 湿草/泥浆沉积物 (对于割草机)
- 灰尘和泥浆沉积物 (对于越野车)
- 金属粉尘和其他粉尘沉积物 (对于工厂车辆)
- 雷达天线罩的吸水性是一个重要的干扰因素，因为会导致电气特性发生变化。
- 在汽车和户外车辆的雷达天线罩上或监视雷达传感器外部形成的冰雪会显著降低雷达检测能力的动态范围。当将雷达部署在会直接暴露在雨水下的区域中时，通常通过在雷达天线罩中嵌入加热器来处理该问题。

为了应对上述的一些挑战，需要使用手动或内置清洁系统，雷达系统可以在使用定制内置诊断功能检测到射频可见性受影响后将其触发。

如果外壳采用金属作为结构的一部分，该金属也可以用作散热器，则金属部分不应在天线的视场中突显。

在某些情况下，在雷达天线罩内，为了防止从雷达天线罩壁多次反射到 PCB，最好在可行的情况下使用吸收材料。在覆盖天线元件时，应避免使用其他技术，例如传统使用 PCB 灌封来防止受到环境的影响。这些材料往往具有可变的厚度，具有未知的 D_k 特性，可能会严重降低天线的性能。不过，如果需要额外的保护，可以在天线结构上使用非常薄 (大约 $1\ \mu\text{m}$) 的低损耗涂层材料 [11]。

8 总结

高效雷达天线罩设计的目标是在进行信号传输和接收时减少其表面的反射，同时最大限度地减小损耗和波束失真。用于覆盖传感器辐射侧的通用外壳的材料应具有均匀的厚度，并且还必须具有良好的表面光滑度。

建议使用具有较低 D_k 和 D_f (介电常数和损耗角正切) 的材料。雷达天线罩中使用的典型材料是聚碳酸酯、Teflon (PTFE) 和聚苯乙烯。用于增强雷达天线罩美观度的涂料 (尤其是金属基涂料) 可能会进一步降低天线的性能。因此，在雷达天线罩顶部表面覆加涂料时要小心。应执行雷达天线罩和天线仿真以确定辐射方向图中是否出现性能降低。

研究发现，薄壁设计适合在电磁波长相对较大的低微波频率下使用。但是，此类型的壁对于许多微波应用而言结构完整性不足。可提供足够强度和刚度的厚壁设计允许在雷达天线罩调节到的相对较窄的带宽内传输电磁能，但是，电气性能在高于和低于调节壁厚的频率下会迅速下降。

TI 通过 TI 毫米波雷达传感器和相关服务，与多家公司合作提供各种解决方案。这些公司可使用毫米波雷达加速生产流程。在该合作伙伴网络中，您可以找到能够设计雷达天线罩和镜头的公司。若要快速浏览我们的第三方解决方案并找到合适的第三方以满足您的需求，请使用该搜索工具：<https://www.ti.com.cn/tool/cn/MMWAVE-3P-SEARCH>。

9 鸣谢

作者要感谢 Brian Ginsburg、Eunyoung Seok、Gondalia Akash、Meysam Moallem、Chloe Shay、Anil Kumar KV 和 Howard Jiang 以及整个团队为本应用报告所做的贡献。

10 参考文献

1. Mashury Wahab, Radar Radome and Its Design Considerations, Instrumentation, Communication, Information Technology and Biomedical Engineering (ICICI-BME), 2009 International Conference.
2. Habeeb Ur Rahman Mohammed, [Understanding Ripples in RF Performance Measurement](#), EDN
3. 德州仪器 (TI) : [TI 毫米波雷达传感器射频 PCB 设计、制造和验证指南](#)
4. 德州仪器 (TI) : [毫米波生产测试概述](#)
5. [The New Requirements of Plastic Performance for Intelligent Driving of Autocar, PBT Has Great Potential](#)
6. 雷达天线罩材料供应商 :
 - [Radome Grades](#)
 - [Introducing Materials and Technologies for ADAS Parts - Sensor Edition](#)
7. 各种材料类型的 DK/DF
 - [Dielectric Constant, Strength, & Loss Tangent](#)
8. 参考 : [Unravelling Polymers](#)
9. 使用的一些雷达天线罩材料 :
 - [Radome Grades](#)
 - [Introducing Materials and Technologies for ADAS Parts - Sensor Edition](#)
 - [Electrical Properties of Plastic Materials](#)
 - [Electrical Properties of Plastics](#)
10. 参考 : [Reflection, Refraction, and Self-Jamming](#)
11. 涂覆/灌封材料 : [Certonal FC-742](#)
12. [Near Field and Far Field Regions of an Antenna](#)
13. [Joint Antenna-Array Calibration and Direction of Arrival Estimation for Automotive Radars](#)

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

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