

Application Brief

了解毫米波雷达器件的距离和角分辨率



Kottyn Quintanilla, Nathan Block, Pedrhom Nafisi



图 1. 现代家庭在各种应用中对雷达技术的使用

在当今快速发展的世界中，传感技术正集成到各种应用中，从汽车和机器人到家庭中的 HVAC 装置和电视。这些应用需要精确检测，以便跟踪周围环境中的人员、车辆和物体。使毫米波雷达和激光雷达等各种检测技术的准确性对于功能和安全用途变得越来越重要。

雷达沿球坐标系确定空间中物体的位置，这意味着其可以根据物体的距离、方位角和仰角来检测物体。对于雷达而言，距离分辨率和角分辨率是两个参数，决定了雷达能否区分在距离上或角度上相近的两个物体。然而，相机和激光雷达等其他传感器对距离分辨率和角分辨率的定义不同，因此所有工程师都必须了解每种技术对这些术语的具体定义。

距离分辨率和距离精度

距离分辨率是指传感器区分沿距离轴紧密放置在一起的物体的能力，即物体沿传感器检测线的间距。对于雷达而言，较小的距离分辨率值代表着更好的性能，因为这能实现对特定距离处物体更精确的距离测量。这意味着雷达传感器可以区分彼此间距更近的物体。这种能力不一定是指雷达在空间中更精确地定位单个物体位置的能力。例如，假设有两个雷达传感器：一个距离分辨率为 10cm、另一个传感器距离分辨率为 5cm。第一个传感器只有在两个物体间距超过 10cm 时，才能将它们区分开；而第二个传感器则能区分开间距仅为 5cm 的物体。

请务必注意，距离分辨率与距离精度不同。当有多个物体时，距离分辨率表示物体之间的最小间隔。距离精度是指雷达测量目标真实距离的精确度，因此如果物体与雷达的实际距离为 1m，并且雷达测量该物体的距离为 0.95m，则雷达的距离精度在 0.05m 以内。

术语	定义	值
距离分辨率	区分两个相近物体的能力	~ 3cm
距离精度	雷达如何精确测量目标的真实距离	~ 1mm

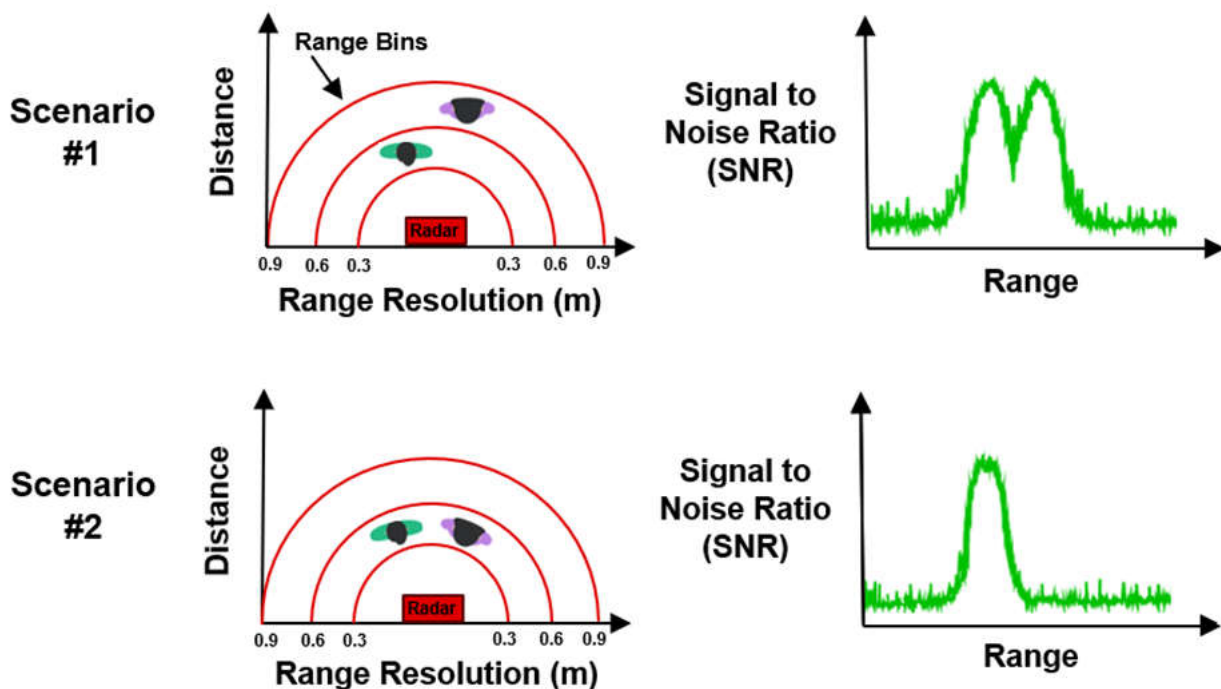


图 2. 雷达利用距离分辨率区分两个物体的俯视图

德州仪器 (TI) 的毫米波雷达传感器无需修改硬件或固件, 即可实现精细到 3cm 的距离分辨率。在实际情况中, 考虑到人体的宽度和深度都明显大于 3cm, 因此人体在雷达探测中会呈现为密集的探测点集群, 而其具体分布则取决于雷达的距离分辨率以及角度精度/分辨率。这使得雷达能够根据物体间不同的距离, 借助距离分辨率, 轻松探测到物体并区分距离较近的物体。

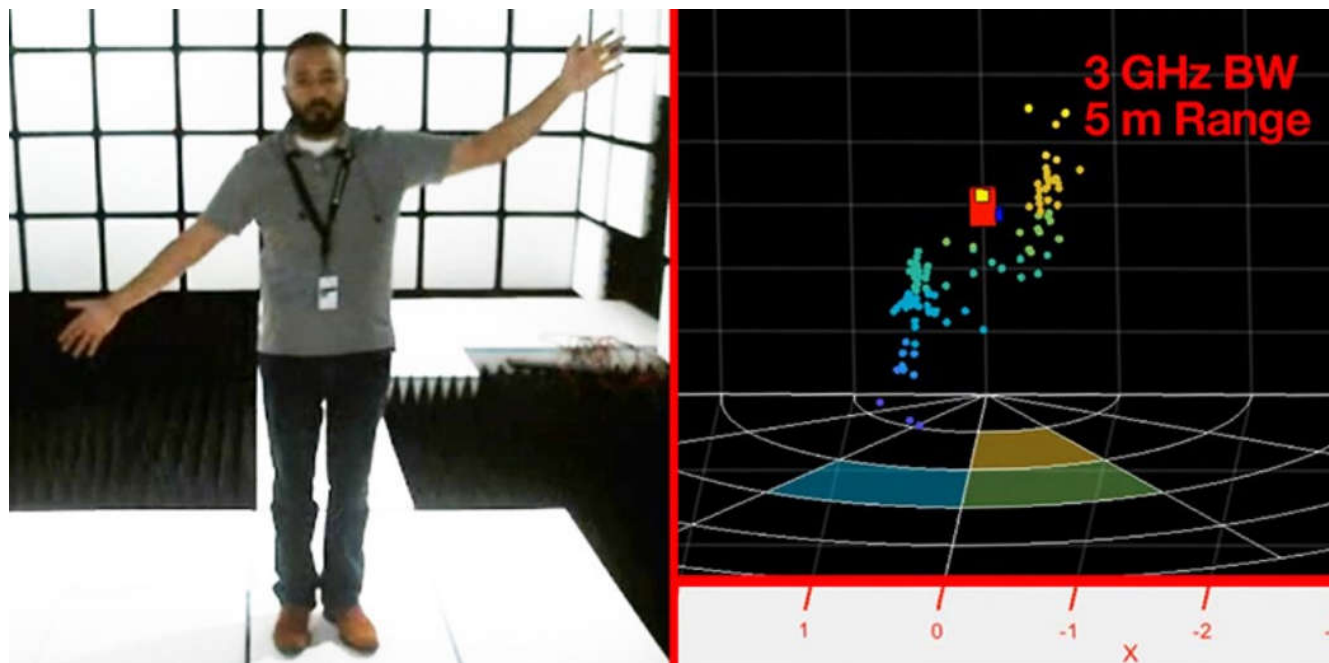


图 3. 雷达利用距离分辨率呈现出人体的密集点云

了解角分辨率和精度

雷达传感器的角分辨率决定了其区分两个处于相同距离处的探测目标的能力。这意味着只有当两个物体的间距小于距离分辨率所能区分的范围时，角分辨率才适用。在引用角分辨率时，雷达系统的传统角分辨率仅考虑处于完全相同距离的静止物体。这是一种纯粹基于每个角度维度中天线数量的简单计算。

$$\Delta \theta = \lambda / (d * (N))$$

其中：

- $\Delta \theta$ 是角分辨率（以弧度为单位）
- λ 是雷达信号的波长
- d 是天线之间的间距（假设采用均匀的线性阵列）
- N 是虚拟天线数量（方位角或仰角方向）

假设间距 $d = \lambda / 2$ 的天线呈均匀线性阵列，我们可以看到角分辨率与系统中使用的天线数量成反比。例如，如果天线阵列在方位角方向有 4 根天线，在仰角方向有 2 根天线（如 IWRL6432AOP），则其方位角分辨率为 28.6° ，仰角分辨率为 57.3° 。

但请记住，这些数值仅适用于采用传统 FFT 波束赋形处理时、处于完全相同距离处的静态点目标。如果物体处于不同的范围，或以不同的速度移动，或使用更复杂的方法进行处理，则这些分辨率限制将不再适用。

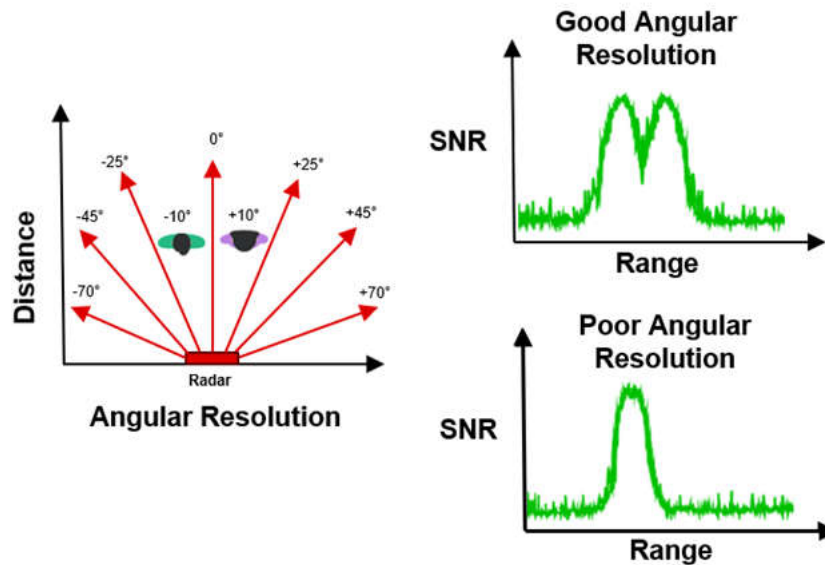


图 4. 雷达利用角分辨率区分两个目标的俯视图

角度精度是用于确定雷达或传感器能够确定物体所在正确角度的精确程度。例如，若将一个物体位于传感器视轴正 45° 方向，而雷达测定其角度为 46° ，则角度精度为 1° 。

术语	定义	值
角分辨率	区分同一距离范围内两个物体的能力	方位角 25° 仰角 30°
角度精度	雷达如何精确测量物体的真实角度	$\pm 1^\circ$

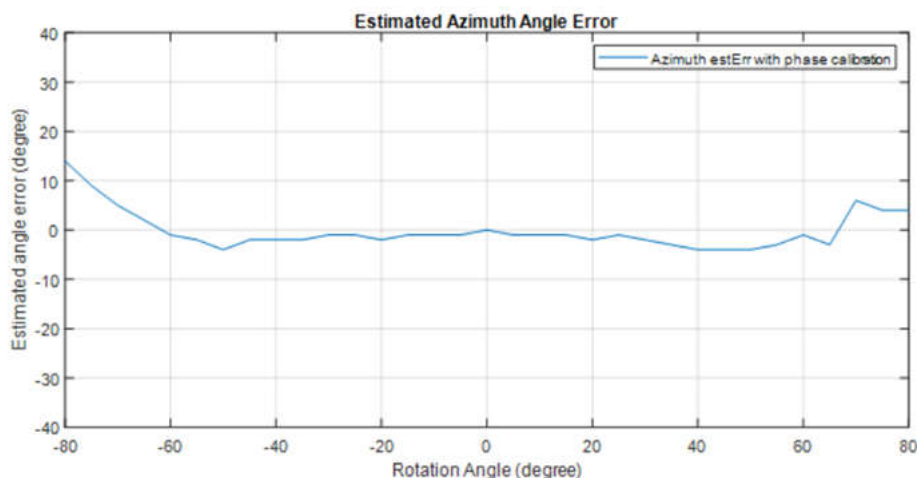


图 5. TI IWR6844 相对于角度的角度精度误差裕度

在 TI 的毫米波雷达器件上，视轴处的角度精度约为 1 度，最大视场处的角度精度高达 5 度（ ± 70 度）。角度精度还取决于许多系统参数，例如天线数量、每帧线性调频脉冲数（或一般 SNR）、天线方向图，而这些参数均可进行配置和更改。

比较雷达、相机和激光雷达：精度更重要

相机和激光雷达通常拿来与雷达进行比较，但这些技术在分辨率和精度的定义可能有所不同。相机基于视觉数据运行，具有非常高的角分辨率，但不能直接测量速度或距离。激光雷达具有出色的角分辨率和高精度，但成本更高、功耗更大，且对天气和光照较为敏感。

传统雷达角分辨率定义为区分同一距离单元中物体的能力，现代雷达处理技术可通过多普勒分离和先进的 MIMO 算法提高角分辨率。与相机或激光雷达不同，雷达可独特地测量距离、角度和速度。这意味着，即使两个物体的距离和角度相同，通过不同的多普勒特征也能将其区分开来。TI 的毫米波雷达器件具有精细的距离精度（ $\sim 1\text{mm}$ ）和角度精度（ $1 - 5^\circ$ ），非常适合人员跟踪、物体检测和自动化任务，而且成本只是激光雷达的一小部分。

此外，虽然传统的基于 FFT 的角度估算算法能够以 X 精度区分物体，但在相同天线数量下，也可通过更为复杂的到达角 (AOA) 估算方法实现更高的分辨率。例如，MVDR（即 Capon 波束形成算法）通常可以通过对接收信号进行更复杂的分析，将 FFT 波束形成器的分辨率提高一倍（即分辨率数值减少一半）。这种算法可以在很多 TI 雷达器件（包括 IWR6432 和 IWR6844）上高效运行，能使用更少的天线来提供更密集的点云，并能更清晰地区分物体。

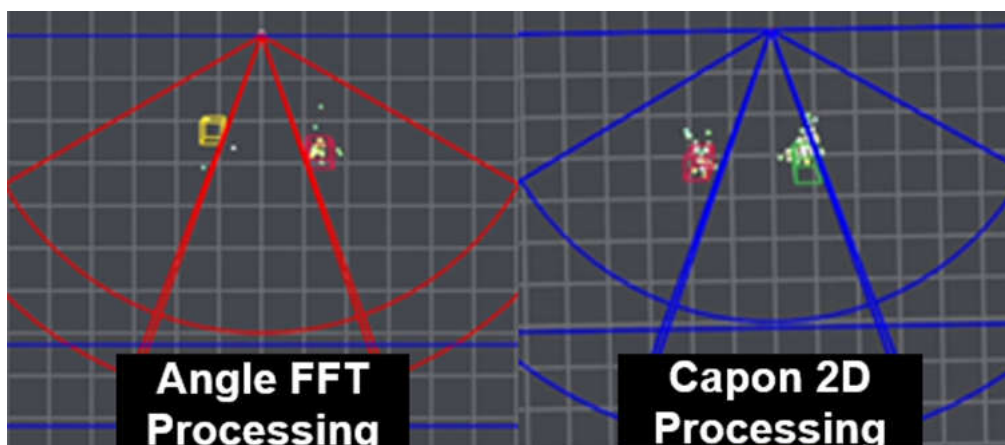


图 6. 两种不同的雷达数据处理方式，表明使用 Capon 2D FFT 处理方法能生成密度明显更高的点云

结语

随着各种传感需求的不断发展，现在已出现比以往更可靠、更具成本效益且效率更高的传感解决方案。与激光雷达或相机不同，雷达可同时测量距离、角度和速度，为在现实环境中区分物体提供了更丰富的信息集合。凭借精细的距离精度（毫米级）、强大的角度精度以及利用多普勒分离和高级处理算法的能力，雷达能够实现远超其“纸面”参数所展示的可靠性能。

TI 的毫米波雷达是一种极具吸引力的替代方案，不但具备以高精度在多种环境下运行的能力，还能通过先进的天线配置灵活提升角分辨率。通过利用雷达的优势（精细的距离分辨率、基于多普勒技术的物体区分能力），从人员检测到目标追踪等各类应用均能以极低的成本实现强大的传感能力。

资源：

- 订购 [IWR6432AOPEVM](#) 或 [IWR6843AOPEVM](#)
- 通过 [Radar Academy](#) 详细了解雷达技术
- 立即在 [Radar Toolbox](#) 上探索更多演示案例

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月