

Design Guide: TIDEP-01035

使用 TI 毫米波雷达的视频监控摄像头参考设计



说明

此参考设计重点展示了 IWRL6432AOP 检测家庭摄像头、可视门铃和自动控制等室外监控系统的运动和存在的能力。IWRL6432AOP 通过高效的天线设计，可以远距离、高角度检测人员和物体，通过循环进入深度睡眠模式来降低功耗，并通过先进的算法滤除几乎所有的误报。多级架构让雷达可以同时实现所有三个特性（长检测距离、低功耗、低误报率）。采用 IWRL6432AOP 的器件可以受益于远距离检测、较长的电池寿命和更少的误报。

资源

TIDEP-01035	设计文件夹
IWRL6432AOP	产品文件夹
IWRL6432AOPEVM	工具文件夹



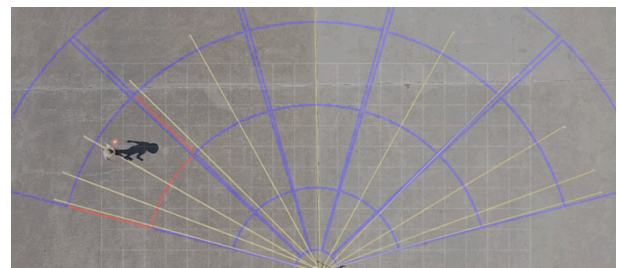
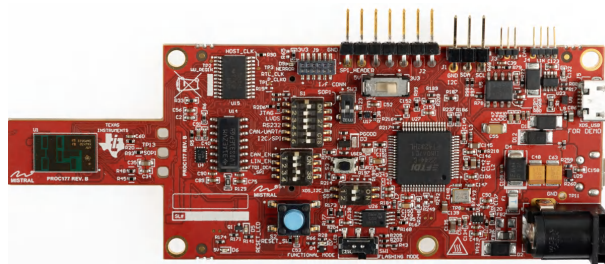
请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

特性

- 使用 IWRL6432AOP 检测运动并唤醒视频摄像头系统的演示硬件和软件
- 集成天线、在 160MHz 下运行的完全可编程 M4F 和在 80MHz 下运行的专用硬件加速器 (HWA)，适用于复杂的雷达操作
- 默认软件提供长检测距离、低功耗和接近零的误报率
- 检测实验结果
- 在不同条件下进行进一步测量的方法

应用

- 可视门铃
- 无线安防摄像头
- 运动检测器
- 区域景观照明
- 空调室外机



1 系统说明

随着消费电子技术变得越来越小型化和低功耗，可视门铃和视频摄像头越来越多地通过电池供电，而不是直接连接电源。虽然这种转变使得在不同地方部署更多监控设备变得更容易，但这一过程也带来了延长设备电池寿命的挑战。在监控设备的典型运行情况下，最耗电的事件是录制和流式传输视频。录制和流式传输要求设备通过摄像头捕获数据、运行图像信号处理算法以及通过 WiFi 流式传输到云。为了减少设备流式传输数据所用的时间，智能监控系统内置了存在检测器件，可减少系统检测到的误报数，从而在不错过任何真实检测事件的情况下延长电池寿命。

几乎所有存在检测技术都需要在低功耗、大检测范围和低误报率之间进行权衡。TI 的 IWRL6432AOP 毫米波雷达可通过高传输功率、多种检测模式以及 M4F 内核和硬件加速器 (HWA) 上的无缝可编程性，有效地平衡这些因素。

1.1 检测原理

对 TI 雷达器件中的线性调频脉冲参数进行编程应用手册中的雷达公式从数学角度说明了长检测距离、低功耗和低误报率之间的权衡。

$$\text{Range}_{\max} \text{ based off SNR} = 4 \sqrt{\frac{P_T \times G_{RX} \times G_{TX} \times c^2 \times \sigma \times N \times T_R}{f_c^2 \times (4\pi)^3 \times kT \times NF \times \text{SNR}_{\det}}} \quad (1)$$

P_T	Tx 输出功率 (mW)
G_{RX} 、 G_{TX}	RX 和 TX 天线增益 (线性)
σ	物体的雷达散射截面 (平方米)
N	线性调频脉冲数 x 虚拟天线数
T_R	线性调频脉冲时间 (秒)
NF	接收器的噪声系数 (线性)
SNR_{\det}	检测物体的算法所需的最小 SNR (线性)
k	玻尔兹曼常数 (J/K)
T_{\det}	环境温度 (K)

P_t 和 T_r 是与功耗相关的函数 - 当这两个函数的值增加时，功耗也会增加。 SNR_{\det} 是误报率的函数 - 随着 SNR_{\det} 增大，误报率会降低。在保持所有其他条件不变的情况下，可以得出以下关系：检测距离与功耗和误报率的乘积成正比。

$$\text{Detection Range} \propto \text{Power Consumption} \times \text{False Positive Rate} \quad (2)$$

也可以通过更广泛的统计视角来理解这一点。一个已知的事实是，雷达系统的噪声可以用复数高斯分布的幅度来建模，这被称为 **瑞利分布**。如果目标对象接收到的信号建模为高斯分布，其中心在某个非零的返回功率附近，那么返回到雷达系统的功率的检测阈值需要设置在这两个分布之间的某个位置。检测物体是否存在可简化为两个分布的假设检验。

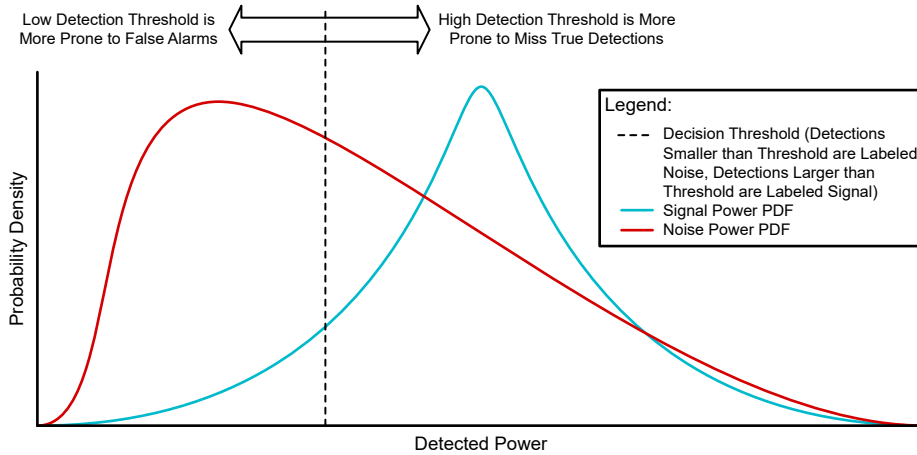


图 1-1. 信号和噪声功率分布

如果将检测阈值设置得较低，则会有更多误报（不必要地唤醒雷达），但漏报（雷达遗漏真实检测）更少。相反，如果将检测阈值设置得更高，那么误报就会减少，但雷达可能会出现一些漏报。由于监控系统漏过真实检测的代价可能非常高，因此通常采取的策略是降低检测阈值，并为了降低漏过真实检测的可能性，可以接受一定数量的误报。

1.2 多通架构

虽然良好的检测系统具有所有这三项特性（低功耗、远距离、低误报率），但我们仍建议在特定场景中优先考虑其中一些特性，从而实现出色的总体系统性能。IWRL6432AOP 使用多种检测模式来实现这种平衡。本设计指南假设使用了三种模式，但该逻辑可应用于两种模式，必要时甚至可应用三种以上的模式。

第一遍模式是雷达的默认选项。在第一遍模式下，IWRL6432AOP 以尽可能低的功率配置运行，同时仍保持远距离检测的能力。IWRL6432AOP 确实会有一些误报，即使在低噪声条件下也能以尽可能低的功耗实现长检测距离。为了获得出色效果，第一遍模式也需要实现尽可能低的功耗，即使会出现一些误报。

当在第一遍模式下进行检测时，雷达会切换到第二遍模式，该模式使用功率更高的线性调频脉冲来降低雷达的误报率，并实现与第一遍模式相同的检测距离。因为第一遍模式触发了第二遍模式，所以与第一遍模式相比，第二遍模式在检测远距离物体方面没有优势。第二遍模式没有第一遍模式那么多的误报，但偶尔因风、灌木和树木的影响而唤醒是可以接受的。

最后，可使用第三遍模式来消除在第二遍模式下仍检测到的所有误报。在可能的情况下，第三遍模式不会有任何误报，因为第三遍模式可用于唤醒摄像头，这种模式的功耗比雷达高 10-100 倍。

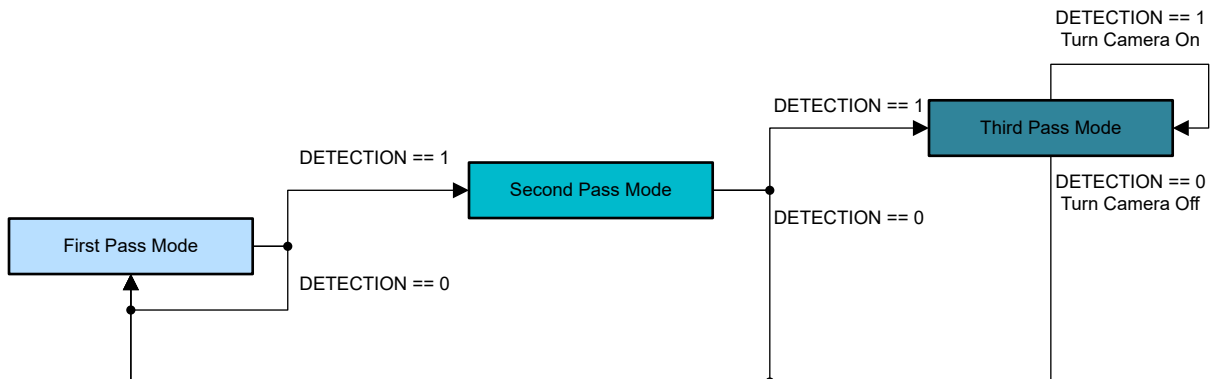


图 1-2. 多通架构状态机

通过在三种功耗模式之间循环切换，IWRL6432AOP 能够在环境运动非常小的情况下利用第一遍模式的最低功耗，同时还能受益于第三遍模式的最小误报率。第二遍模式用于确保在场景中存在较大的环境运动时（此时第一遍模式可能过于灵敏而无法有效工作），雷达仍然可以保持相对低功耗的模式。

表 1-1. 各种模式的功率、范围和误报率

	第一遍模式	第二遍模式	第三遍模式
功耗	低	中	高
误报率	很高，即使在运动很小情况下也是如此	中等，仅在在有风、树木或灌木时	低
检测范围	同样	同样	同样
各模式下所用时间百分比	高	中	小

2 系统概述

2.1 系统设计原理

以下三个部分详细说明了多通架构中的每一个模式如何实现长检测距离、低误报率和低功耗。通过硬件、软件和算法设计的组合来实现此过程，从而更大程度地提高每种模式下的性能。

2.1.1 长检测距离

2.1.1.1 长检测距离的天线设计

通过有效的电路和天线设计，IWRL6432AOP 器件可在宽视场范围内实现非常远的检测距离。如 [IWRL6432AOP](#) 数据表中所示，IWRL6432AOP 的单个发送器有效全向辐射功率 (EIRP) 为 15dBm。EIRP 是传导功率和天线增益之和在整个天线视场内的最大值。EIRP 指的是器件能够辐射的最大功率，通常是在 0° 方位角和仰角处，称为“视轴”。大 EIRP 表明，在视轴上，雷达可以检测到非常远的物体。

虽然 EIRP 提供了最大辐射功率，但 [IWRL6432AOP](#) 数据表还展示了 RX 和 TX 天线在方位角和仰角上的辐射图。IWRL6432AOP 具有宽视场 (FOV)，并可实现 ±70 度的方位角和 ±40 度的仰角。

IWRL6432AOP 兼具高 EIRP 和宽 FOV，因而能够在所有环境中有效工作。例如，在拥挤的城市中，住宅到街道的距离较短，但房子前面的人行道会很长，这种情况有利于短距离检测和宽视场。但在农村，通往住宅的路可能很长，这种情况有利于长检测距离和更窄的视场。为了打造适用于所有场景的设计，可视门铃提供商需要具有宽视场和较长的正面检测范围。IWRL6432AOP 能够在各种功率级别下实现这些规格。

2.1.1.2 长检测距离的 SNR 补偿

IWRL6432AOP 在宽视场范围内提供强大的发送链，从而能够检测远处物体，而且该雷达器件还可以通过减小阈值来检测天线信号开始衰减的点，从而进一步扩大检测范围。这一点在远距离检测和大角度探测时都能体现出来。在这两种情况下，可视门铃应用都会选择性地降低检测 SNR 阈值，从而实现更远的检测距离。

2.1.1.3 智能检测逻辑

如 [MMWAVE-L-SDK](#) 中的运动和存在文档所示，IWRL6432AOP 通过以下步骤来检测点：

1. 对传入数据计算距离、多普勒、方位角和仰角 FFT
2. 计算多普勒维度和仰角维度上的总和或最大值
3. 在范围-方位角热图的范围维度上运行 CFAR
4. 对检测到的点进行滤波来抑制旁瓣 (由不同方位角箱的能量溢出到相邻方位角箱中而导致同一范围箱中出现的错误峰值)

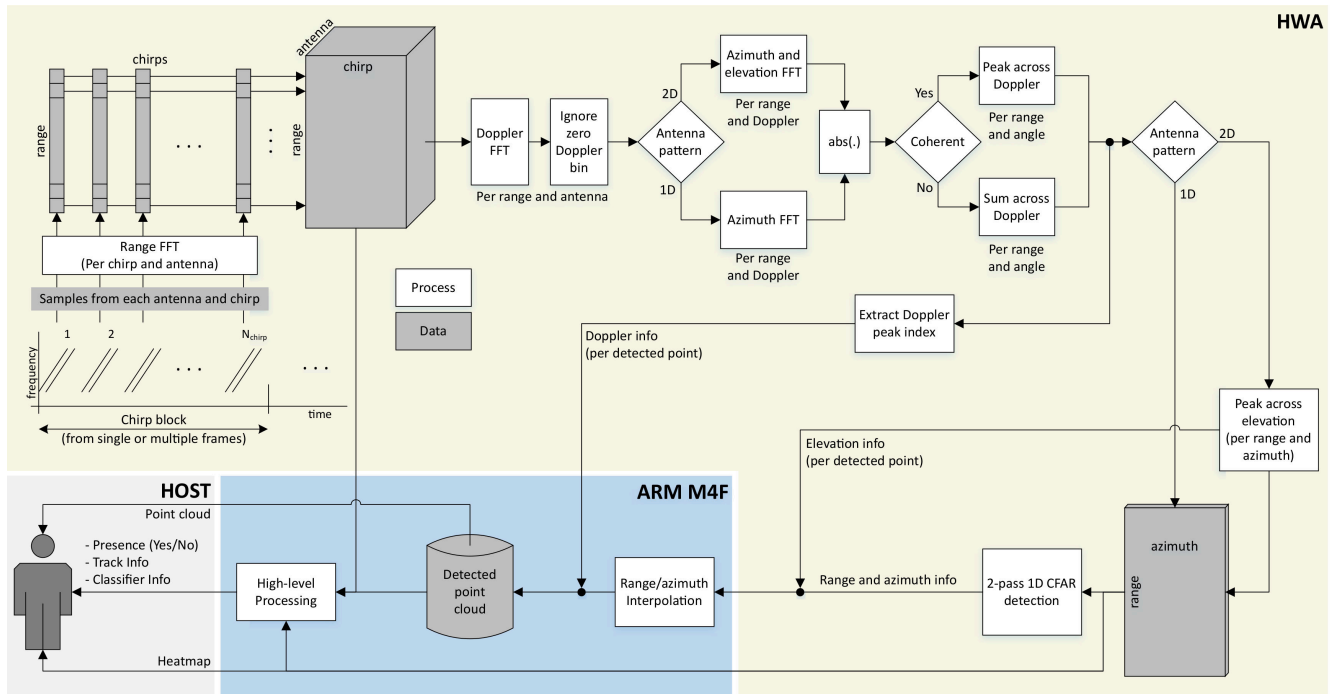


图 2-1. 运动和存在检测方框图

检测到点后，可视门铃参考设计会将这些点传递到状态机中，以便确定是否在某个区域中检测到存在。此状态机基于 MPD 状态机，MMWAVE-L-SDK 中也对此进行了介绍。状态机会检查所有点，使用 DBSCAN 算法将这些点聚类在一起，并计算聚类中的点数和 SNR 统计数据。状态机根据该信息来确定某个区域是否被占用。以下顺序说明了一个区域如何从未占用状态转换为已占用状态。有关状态机流程的完整说明，请参阅 MMWAVE-L-SDK 的 docs/ 文件夹中的调优指南。

一般来说，当人更靠近雷达时，检测到的点数比这些点的 SNR 更能有效指示目标的存在。但是，当目标远离雷达时，检测到的点的 SNR 比点的数量更能有效指示目标的存在。可视门铃参考设计提供了一种方法，在短距离和远距离都能实现可靠的检测：在短距离时，优先考虑检测到的点数；而在远距离时，优先考虑检测 SNR。

2.1.2 低功耗

2.1.2.1 高效的线性调频脉冲设计

当雷达发送和接收信号时，线性调频脉冲是在 IWRL6432AOP 上消耗最大功率的状态。建议尽可能缩短此时间。然而，线性调频脉冲时间还在很大程度上决定了检测距离和最小可检测速度。因此，有效的低功耗雷达系统需要在足够长的时间内发出线性调频脉冲，以便在所需的距离、速度和误报率下检测物体，而且绝对不能超过这个时间。使用毫米波传感估算器，工程师可以根据所需的检测距离计算雷达需要发出多长时间的线性调频脉冲。方程式 3 结合对 SNR 检测阈值和人体雷达散射截面的适当估计，可以估算在目标范围内进行检测所需的积分时间 ($N \times T_R$)。确保此时间等于线性调频脉冲时间 (ADC 样本/采样速率) 与毫米波传感估算器中每个 TX 的线性调频脉冲数的乘积。然后，将斜坡结束时间缩短至所需的最小值。毫米波传感估算器本身存在限制，会需要一些额外的时间来使线性调频脉冲稳定并变为线性，因此斜坡结束时间始终会略长于所需的线性调频脉冲时间。在这些限制内更大限度地减少线性调频脉冲，可以确保器件不会花费不必要的时间来发出线性调频脉冲。

例如，为了以低功耗预算实现 17 米的检测距离，工程师可以将 SNR 检测阈值设置为 4dB，并估算典型目标的 RCS 为 -6dB sqm。然后，工程师可以计算达到这些标准所需的积分时间 (133 微秒，或 4 个线性调频脉冲且每个脉冲为 33.28 μs)。

$$R = \sqrt[4]{\frac{31.62 \times 10^{-3} W \times 3.16 \times (3 \times 10^8)^2 \left(\frac{m}{s}\right)^2 \times 0.25 \times 4 \text{ chirps} \times 33.28 \times 10^{-6} \frac{\text{sec}}{\text{chirp}}}{(62.49 \times 10^9)^2 (\text{Hz})^2 \times (4 \times \pi)^3 \times 1.38 \times 10^{-23} \left(\frac{J}{K}\right) \times 293.15 K \times 41.68 \times 2.51}} \quad (3)$$

表 2-1. SNR 计算中的变量来源

数据表参数	配置文件参数	常量/杂项
$P_T \times G_{TX} = 15\text{dBm} = 31.62\text{mW}$ $G_{RX} = 5\text{dB} = 3.16$ 线性 $NF = 16.2\text{dB} = 41.68$ 线性	$SNR_{det} = 4\text{dB} = 2.51$ 线性 $F_c = 62.49\text{GHz}$ $N =$ 通过 1 个虚拟天线发出 4 次线性调频脉冲 $T_R = 33.28 \mu\text{s}$	$C^2 = (3E8)^2$ $K = 1.28E-23$ $T = 293.15\text{K}$ $\sigma = -6\text{dB} = 0.25$ (由于不同体型的不同人具有不同的雷达散射截面, 因此建议在一个范围内进行选择, 以找到最糟糕的情况。)

这将生成以下配置文件

```
channelCfg 1 1 0
chirpComnCfg 13 0 0 256 1 37 2
chirpTimingCfg 50 24 0 25 62
frameCfg 8 0 811 1 333 0
cfarCfg 2 8 4 3 0 4.0 0 0.8 0 1 1 1
```

工程师必须估算公式中的一些参数, 尤其是 SNR 检测阈值 (可以确定误报率)、目标的雷达散射截面 (可能因人而异) 以及雷达天线罩、湿度和温度引起的任何杂项损耗。

为了缩短开发时间, TI 建议根据可视门铃软件中给出的候选线性调频脉冲配置来实现基准性能, 并根据结果增加或减少积分时间。例如, 如果设计为产生 10 米检测距离的配置仅产生 8 米的距离, 则将积分时间增加到约为原来的 $(10/8)^4 = 2.44$ 倍, 可能会得到预期的结果。

2.1.2.2 深度睡眠电源模式

IWRL6432AOP 在深度睡眠模式下的功耗非常低, 在不使用雷达时可实现小于 0.5mW 的功耗。[xWRL6432 低功耗雷达 - 功耗优化技术](#) 应用手册详细介绍了这一点, 本节会重点介绍降低功耗而不影响检测距离或误报率的方法。

IWRL6432AOP 器件可以减少深度睡眠模式中保留的存储器容量, 从而在深度睡眠时节能。在 IWRL6432 上, 存储器实例在关断保持模式下的功耗约为 45 μW 或 64kB。如果不保留集群内的存储器内容, 则 IWRL6432 功耗约为 20 μW /64kB。为了在不保留存储器内容的情况下进一步节省功耗, IWRL6432 上的一些存储器集群组合在一起, 并且电源开关部署在相应的 SRAM 电源轨上。如果某个组中的所有集群都不用在深度睡眠期间保留内容, 则该组的开关会断开, 该组会完全关断, 而且存储器完全关闭 (不保留) 且功耗为 0 μW /kB。

这些开关可以在 sysconfig 中设置。表 2-2 说明了哪些集群与存储器中的哪些段相对应。

表 2-2. 每个集群的存储器地址

集群编号	存储器段	集群名称	尺寸 (kB)	起始存储器位置	注释
APPSS 集群 1	RAM_1	RAM1A	64	0x00400000	
APPSS 集群 3	RAM_1	RAM1B	64	0x00410000	
APPSS 集群 4	RAM_1	RAM1C	128	0x00420000	
APPSS 集群 2	RAM_2	RAM2A	16	0x00440000	
APPSS 集群 5	RAM_2	RAM2B	112	0x00444000	
APPSS 集群 5	RAM_3	RAM3	128	0x00460000	
APPSS 集群 6	APP_SHMEM_1	共享 RAM 1	128	0x00480000	从 HWA 访问时, 从 0x60000000 开始
APPSS 集群 6	APP_SHMEM_2	共享 RAM 2	128	0x004A0000	从 HWA 访问时, 从 0x60000000 开始

linker.cmd 文件可用于指定数据在存储器中的存储位置。高效的设计可将每帧都会复位的变量 (例如主要运动点云) 存储在不在深度睡眠期间保留的集群中。但是, 需要将未在每帧中复位的其他变量 (例如每个检测区域中的占用状态) 放置在深度睡眠期间保留的存储器库中。在可视门铃演示中默认实现这种高效设计。

2.1.2.3 硬件加速器

IWRL6432AOP 上的硬件加速器支持超高效地计算雷达信号处理所需的关键操作, 包括窗函数、FFT、对数幅度和 CFAR 矢量运算。使用 HWA 可显著减少计算时间, 从而使雷达传感器能够在更长时间内处于深度睡眠模式, 而用于计算的时间更少。由于 HWA 使用流式输入和输出, 因此 FFT 序列所需的周期数为 $(1 + \text{NumFFT}) * \text{FFTSize}$, 比典型的 $O(N \log N)$ 实现快得多。为了说明 IWRL6432AOP [雷达硬件加速器](#) 的一些典型计算时间, 用户指南 (表 5) 已针对 80MHz HWA 时钟进行了修改, 如表 2-3 所示。

表 2-3. FFT 计算时间 (80MHz HWA 时钟)

示例	FFT 大小	背对背迭代次数	时钟周期数 (初始延迟 + 计算)	总持续时间 (假设为 80MHz 时钟)
1	256	4	$256 + (256 \times 4)$	16 μ s
2	128	4	$128 + (128 \times 4)$	8 μ s
3	8	64	$8 + (8 \times 64)$	6.5 μ s

2.1.3 低误报率

2.1.3.1 误报的典型原因

在监控系统中使用雷达的其中一项主要好处是可以减少误报。住宅环境中发生误报的最常见原因包括:

- 汽车在街上行驶
- 树木和灌木丛随风飘荡
- 邻居们走在人行道上
- 附近的加热器或冷凝器造成温度差异
- 视场中的小动物
- 虫巢非常靠近雷达

通常, 在这些系统中, 用户可以选择一个检测区域 (即用户希望检测运动的地方) 和一个排除区域 (即用户不希望检测运动的地方)。因此, 这个误报列表可分为两类: 由预期检测区域内的运动引发的误报, 以及预期检测区域外的运动引发的误报

表 2-4. 误报的来源

检测区域内的误报	检测区域外的误报
<ul style="list-style-type: none"> • 树木和灌木丛随风飘荡 • 附近的加热器或冷凝器造成温度差异 • 视场中的小动物 • 虫巢非常靠近雷达 	<ul style="list-style-type: none"> • 汽车在街上行驶 • 邻居们走在人行道上

2.1.3.2 检测区域外的误报

IWRL6432AOP 使用的 FMCW 编码方案可确保定位比同类技术明显更准确。由于 IWRL6432AOP 可在 5° 内实现近 4cm 的距离分辨率和角度精度，因此 IWRL6432AOP 可轻松抑制来自检测区之外的误报。

60GHz 雷达能够比同类检测技术更准确地定位目标。如果事先不了解目标 PIR 传感器正在检测的目标，则 PIR 传感器无法自主判断目标与传感器之间的距离。对于 PIR 传感器，远距离发射大量能量的物体与短距离发射较少能量的物体看起来相同。因此，当一辆大型汽车在较远距离经过 PIR 传感器的范围时，PIR 会将这辆车误认为是在较近距离走过 PIR 的相对较小的人类个体。由于 IWRL6432AOP 使用 FMCW 雷达进行定位，因此距离估算不是基于器件接收到的功率大小，而是基于器件接收波形的估计频率，这是一个更加可靠的指标。如需了解有关雷达如何估算距离的更多信息，请参阅 [毫米波雷达传感器基础知识](#) 营销白皮书。

此外，60GHz 雷达的定位精度远高于频率为 2.4GHz、5GHz 或 24GHz 的低频雷达。更高频率的雷达可以在固定区域内安装更多的天线，从而实现更高的角分辨率、更高的角度精度和更宽的视场。IWRL6432AOP 在 10.9mm × 6.7mm 封装尺寸内装入了 2 个 TX 和 3 个 RX 天线。因为这种尺寸的设计需要更大的天线，所以在较低的频率下无法实现该设计。

2.1.3.3 检测区域内的误报

使用同样的 SNR 补偿技术来增加在距离和角度上的检测范围，还用于抑制雷达附近因树木和灌木等导致的误报。树木和灌木是持续的噪音源，尤其是在安装了监控设备的区域。假设通过使用静态杂波去除选项，来排除雷达返回信号中的静止物体，那么树木和灌木的雷达散射截面 (RCS) 通常远小于人的 RCS。因此，在距雷达指定距离处，可以通过 SNR 将一个人在行走和一棵树在风中飘动的点分隔开（前提是考虑了整个范围内的功率降级）。

2.1.3.4 自适应状态机

由于 IWRL6432AOP 易于编程，因此用户可以使用 IWRL6432AOP，根据所需的视场来为区域占用设置更高和更低的阈值。这样，用户就能够为可能有树木、灌木或动物持续移动的区域设置更高的占用标准。这也可以通过自适应方式实现，用户或计算机视觉算法可以滤除误报，从而向雷达提供有关视场中问题区域的信息。通过这些信息，雷达可以了解有关场景的更多信息，并在不同区域自动调整检测阈值。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

TI 已开发以下测试及相关工具来衡量 IWRL6432AOP 的性能。这些说明详细介绍了在典型应用环境中测量器件的长检测距离、低误报率和低功耗的步骤。

3.1 硬件要求

运行测试套件需要以下材料：

- IWRL6432AOPEVM
- 三角架或支架，用于将器件竖立放置
- 开放区域或停车场，用于测试检测距离
- PC，用于运行可视化工具软件
- 长 USB 电缆，用于将 IWRL6432AOPEVM 轻松连接到 PC

3.2 软件要求

运行测试套件需要将以下软件下载到 PC：

- [MMWAVE-L-SDK \(最新版本\)](#)
- [Radar Toolbox \(最新版本\)](#)
 - 可视门铃预编译二进制文件
 - 应用可视化工具可执行文件
- 有关如何对器件进行编程和运行可视化工具的详细信息，请分别参阅可视门铃示例的用户指南和应用可视化工具的用户指南。

3.3 测试设置

TI 建议进行以下一系列测试，以便评估雷达在最大检测范围、低功耗和最小误报率方面的性能。

表 3-1. 雷达监控测试套件

测试 ID	测试名称	待测试参数	结果
1	检测范围	远距离检测	检测距离 (以米为单位)
2	空场景误报率	低误报率	每种模式下的时间百分比, 误报数
3	功耗	功耗	功耗 (mW)

在每次测试中，TI 建议按照雷达的预期运行方式，在不同的高度和角度安装雷达。两种常见的安装方式是门铃配置（器件安装在约一米的高度，且朝向水平面）和视频摄像头配置（器件安装在更高的位置并略微向下倾斜，让摄像头获得更广阔的视野）。

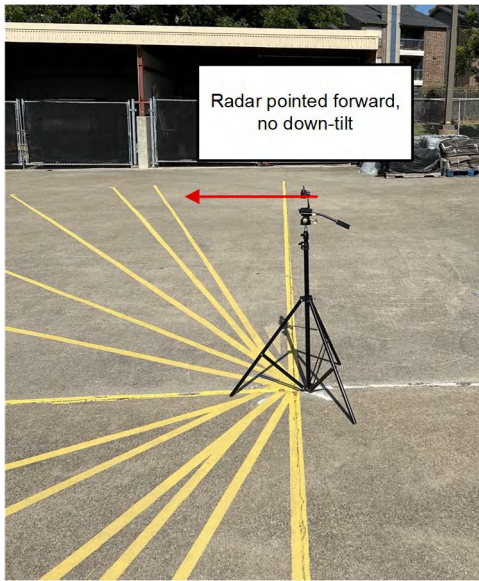


图 3-1. 雷达安装门铃配置

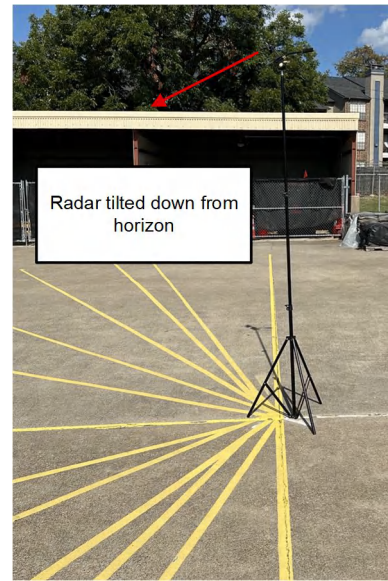


图 3-2. 雷达安装摄像头配置

3.3.1 测试 1 - 检测范围

在测试 1 中，一个人从雷达检测范围之外以各种角度接近雷达。这个人以正常的步行速度行走，手臂自然地放在身体两侧。雷达会记录检测到人员时的距离。用户对每个角度重复测试三次。

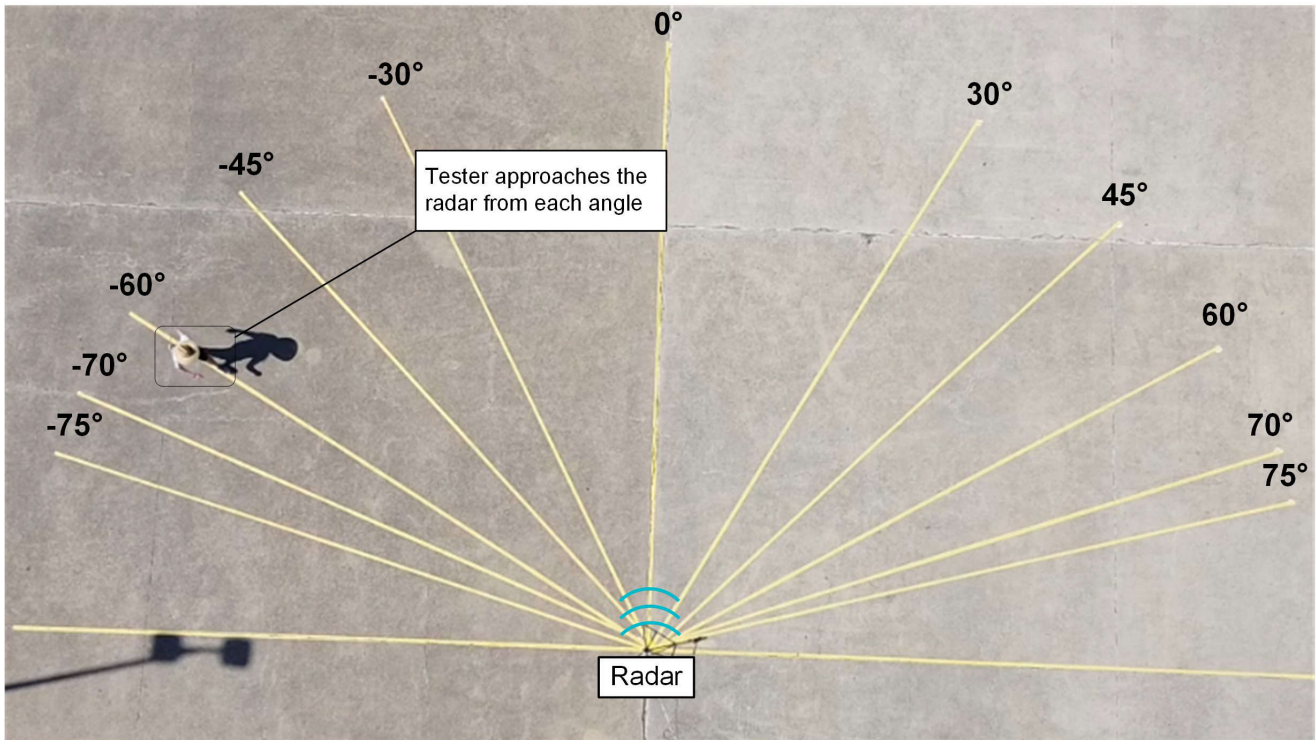


图 3-3. 检测范围测试 - 鸟瞰图

工业可视化工具中的检测范围窗格会标记不同检测模式的检测距离，从而可简化此测量。对于总体检测距离，请使用模式 3 检测范围（目的是在经过精心设计的系统中打开视频摄像头）。

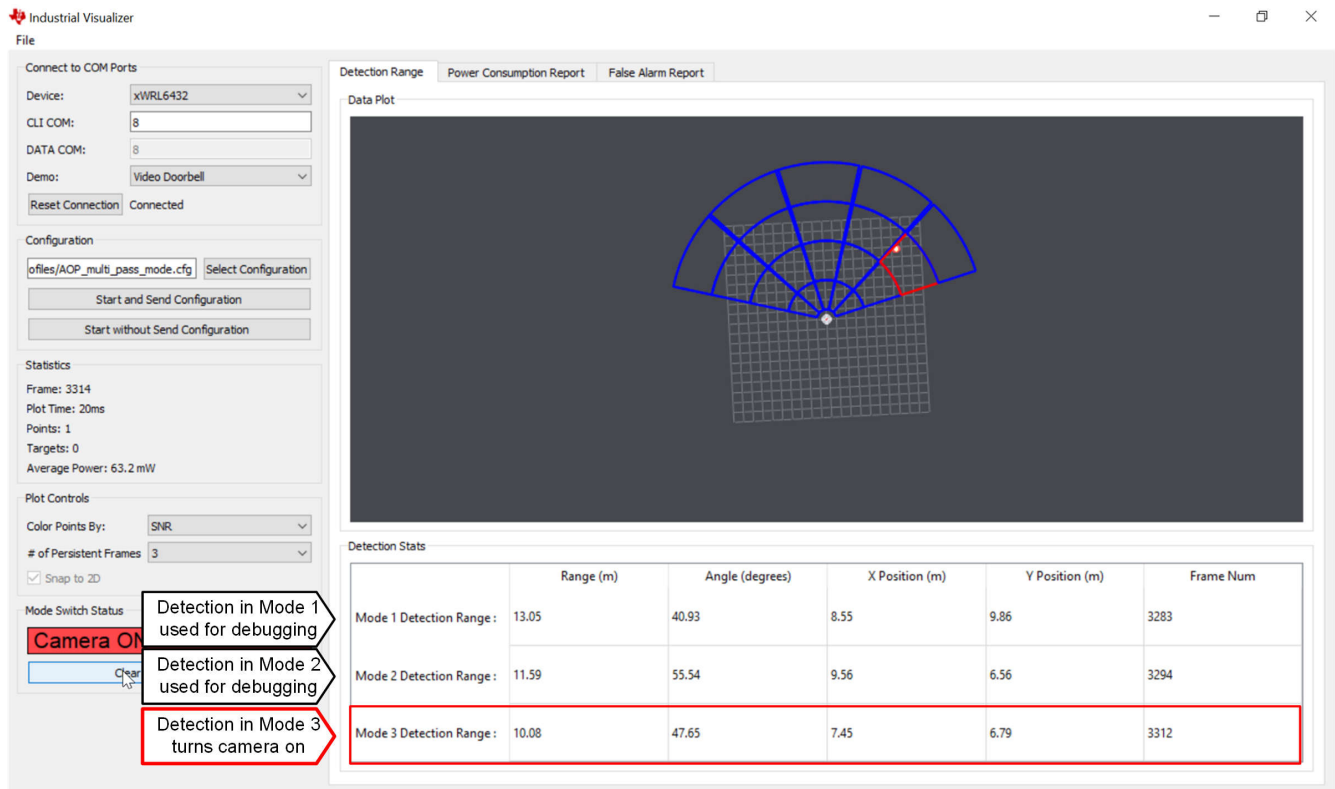


图 3-4. 检测范围测试 - 可视化工具视图

3.3.2 测试 2 - 误报率

此测试在一个大的空旷空间中进行，该空间可以是停车场、开阔的原野或一个大房间。牢固地安装雷达和测试装置，防止设备在风中移动。记下在每种模式下花费的时间百分比，以及雷达错误唤醒摄像头的次数。



图 3-5. 误报率测试 - 空场景

工业可视化工具中的误报屏幕在底部的表中显示相关信息。顶部的阴影表示来自该区域的误报部分（颜色越红 = 误报的百分比越高）。

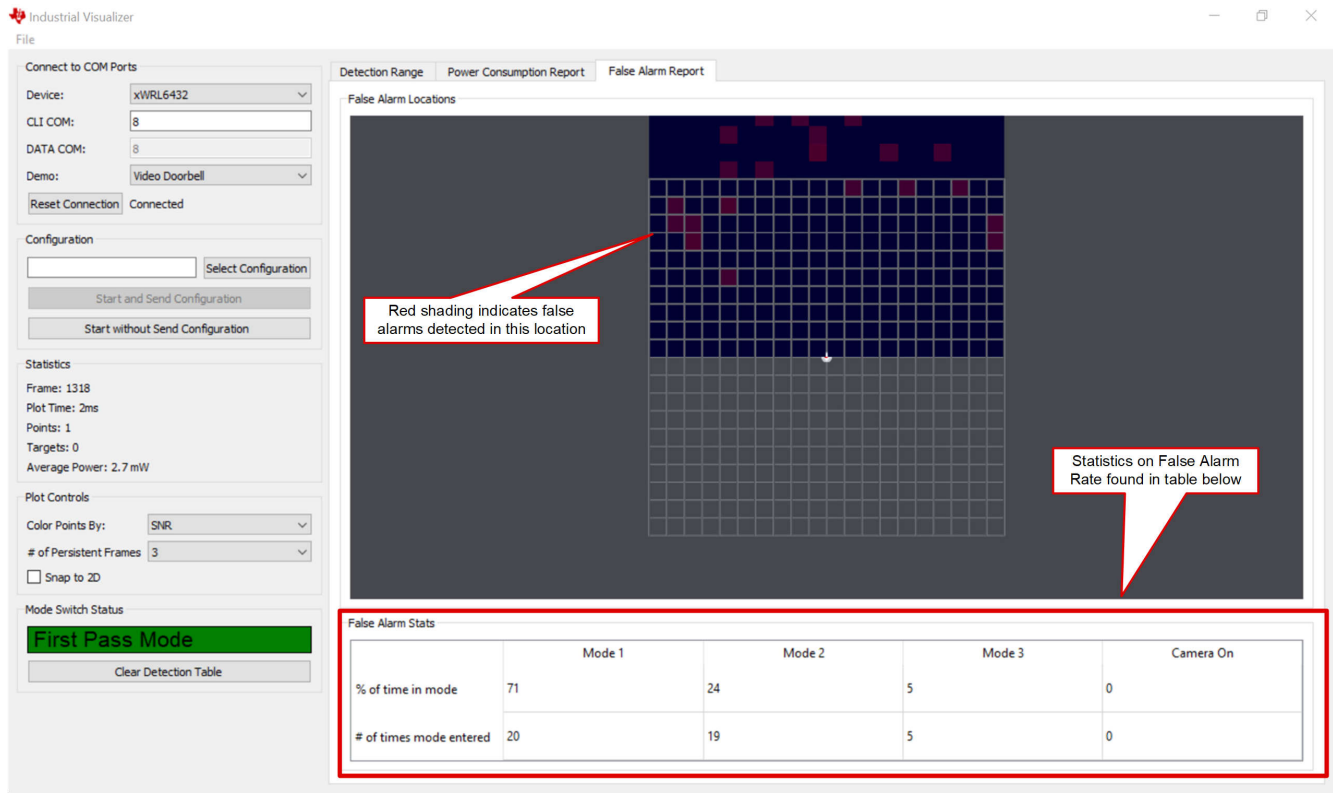


图 3-6. 误报率测试 - 可视化工具视图

在有更多物体、人员或干扰因素存在的环境中测试性能会导致出现更多误报。TI 发现，速度、SNR 和高度滤波器的组合在更密集的场景中尤为有效。

3.3.3 测试 3 - 功耗

如果可能，需要在可视门铃的典型工作环境下进行功耗测量。TI 建议分别测量每种模式的功耗，并在典型运行期间根据每种模式下的预期时间估算总功耗。

为了限制功耗测量期间从雷达输出的调试信息量，TI 提供了一些预定义的符号，可根据需要选择是否定义这些符号，以便在不同状态下启用功耗测量。表 3-2 展示了在每种模式下定义哪些符号来测量功耗。

表 3-2. 为在每种模式下测量功耗而定义的符号

测量模式 1 功率	测量模式 2 功率	测量模式 3 功率
REMOVE_TRACKER	REMOVE_TRACKER	REMOVE_TRACKER
LOW_MEM	LOW_MEM	LOW_MEM
POWER_REDUCTION_MODS	POWER_REDUCTION_MODS	POWER_REDUCTION_MODS
POWER_MEASUREMENT_CFG	POWER_MEASUREMENT_CFG	POWER_MEASUREMENT_CFG
STAY_IN_FIRST_PASS_MODE	STAY_IN_SECOND_PASS_MODE	STAY_IN_THIRD_PASS_MODE

每个符号的作用如下。

表 3-3. 低功耗模式符号定义

符号	用途
REMOVE_TRACKER	从工程中删除跟踪器以节省存储器空间
LOW_MEM	将雷达立方体的大小缩减到满足所有三种模式所需的最小值，从而节省存储器空间，这要求用户修改链接器文件
POWER_REDUCTION_MODS	从示例中移除 GPIO 以降低功耗。用户还需要在 sysconfig 中删除 GPIO
POWER_MEASUREMENT_CFG	仅在每 100 帧时输出一功耗数据，以减少 UART 对功耗的影响
STAY_IN_FIRST_PASS_MODE	防止演示退出第一遍模式，以便于调试
STAY_IN_SECOND_PASS_MODE	防止演示退出第二遍模式，以便于调试
STAY_IN_THIRD_PASS_MODE	防止演示退出第三遍模式，以便于调试

当每种模式运行时，工业可视化工具中的功耗选项卡会将功耗显示为时间的函数。

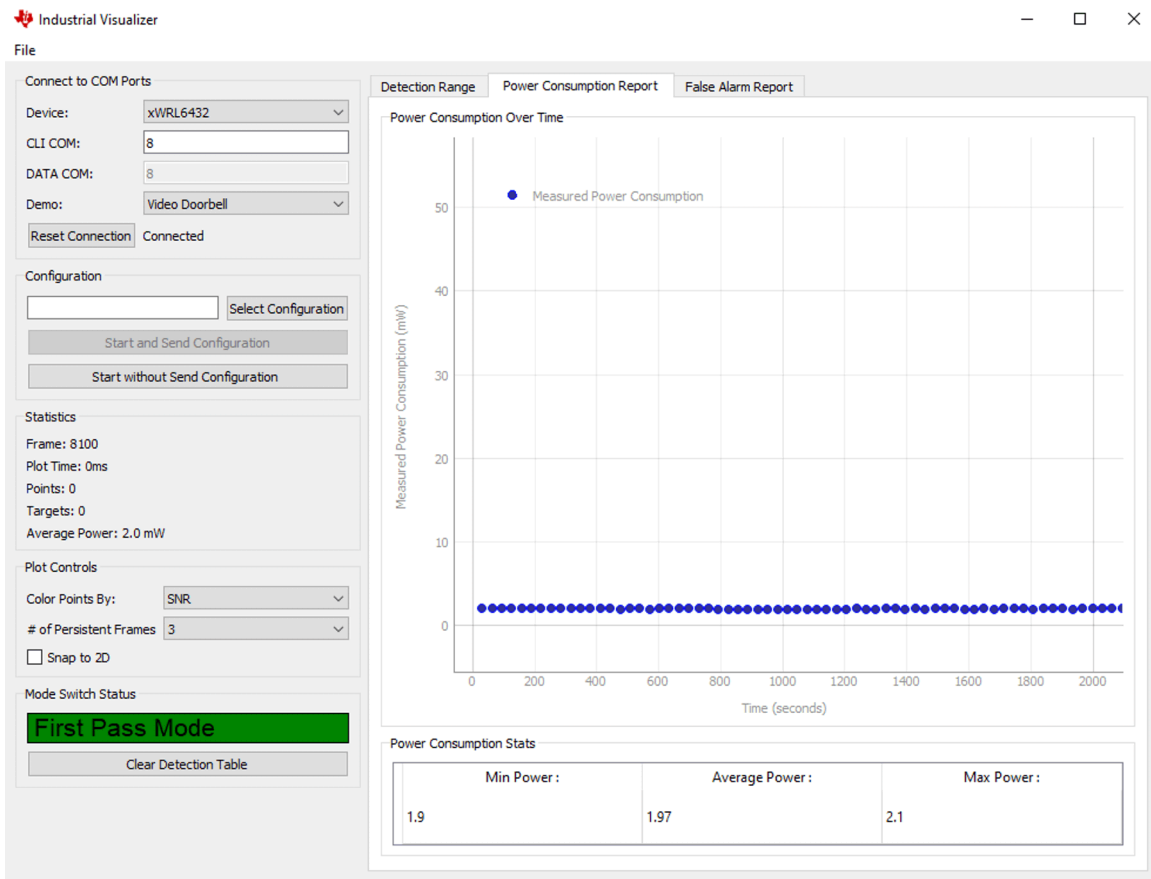


图 3-7. 功耗测试 - 可视化工具视图

3.4 测试结果

TI 使用 Reference Design 文件夹中的可执行文件和可视化工具，能够为指定的每个测试实现以下结果。需要使用相同的软件和工具对结果进行重复验证，并可通过对软件进行后续更新来加以改进。

表 3-4. 测试 1 - 检测范围

角度 (度)	检测距离 (5 次试验的平均值)
-70	6.06
-60	9.72
-45	12.02
-30	13.39
0	14.37
+30	11.97
+45	9.82
+60	8.69
+70	8.62

表 3-5. 测试 2 - 误报率

参数	值
测试时长 (秒)	1800 (30 分钟)
环境	露天停车场
摄像头开启的次数	0
摄像头开启的时间百分比	0%
处于模式 3 的时间百分比	8%
处于模式 2 的时间百分比	17%
处于模式 1 的时间百分比	75%

表 3-6. 测试 3 - 功耗

平均功耗 (模式 1)	平均功耗 (模式 2)	平均功耗 (模式 3)
1.97mW	4.4mW	30.5mW

4 设计文件

4.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDEP-01035](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDEP-01035](#) 中的设计文件。

5 工具与软件

工具

[TI Resource Explorer](#)

[Radar Toolbox](#)

软件

适用于 [xWRL1432](#) 和
[xWRL6432](#) 的毫米波软件开发
套件 (SDK)

毫米波低功耗软件开发套件 (SDK) 是一个软件包集合，支持在我们的低功耗毫米波传感器上进行应用评估和开发。此工具包括 [MMWAVE-L-SDK](#) 和支持客户设计需求的配套包。

6 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[IWRL6432AOP 单芯片 57GHz 至 64GHz 工业雷达传感器封装天线 \(AOP\)](#) 数据表。
2. 德州仪器 (TI)，[xWRL6432 低功耗雷达 - 功耗优化技术](#) 应用手册。
3. 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](#) 应用手册。
4. 德州仪器 (TI)，[雷达硬件加速器](#) 用户指南。
5. 德州仪器 (TI)，[毫米波雷达传感器基础知识](#) 营销白皮书。

7 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

8 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

9 关于作者

Nathan Herschel Block 是德州仪器 (TI) 工业毫米波雷达团队的应用工程师。

Bhaskar Raj Upadhyay 是德州仪器 (TI) 毫米波雷达团队的结构工程师。

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