

Application Note

IWRL6432AOP 的自定义转向矢量



Nathan Block

摘要

IWRL6432AOP 是一款低功耗、高度集成的雷达芯片，使用 60GHz 辐射在大视场范围内有效地检测、定位、跟踪人类和非人类目标并进行分类。IWRL6432AOP 用于打开视频摄像头、打开空调电源或在机器人确定有人时防止机器人与人类碰撞。不过，为了准确检测人员是否在场，IWRL6432AOP 需要在 3D 空间中有效地定位人员。TI 提供两种到达角 (AOA) 估算算法来实现这一点。在功率受限的应用中，FFT 波束形成算法可提供 AOA 估算结果，在 $\pm 60^\circ$ FOV 内平均绝对误差为 8.5° 。或者，对于功率预算较高的器件，在 $\pm 70^\circ$ FOV 内，转向矢量波束形成算法的平均绝对误差为 2.9° ，并且每个检测点需要 0.15 毫秒的额外时间。本应用手册讨论了这两种方法背后的理论、这些方法之间的权衡以及在实验室和室外对这些方法进行测试时的结果。

内容

1 简介.....	2
1.1 到达角估算理论：FFT 波束形成器.....	2
1.2 到达角估算理论：转向矢量.....	3
2 其他信息.....	4
2.1 测量步骤.....	4
2.2 测试结果.....	5
2.3 处理时间.....	7
2.4 用途.....	8
2.5 扩展到其他平台.....	9
3 总结.....	10
4 参考资料.....	10
5 附录.....	11
5.1 每个配置文件的线性调频脉冲参数.....	11
5.2 人体受试者测试的点云数据.....	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

1.1 到达角估算理论：FFT 波束形成器

根据毫米波雷达传感器基础知识中的理论，可以使用方程式 1 和方程式 2 估算物体在雷达 FOV 中的到达角。

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi \Delta d}{\lambda} \quad (1)$$

如果所有天线都在平面波阵列中对齐，则基本几何形状显示 $\Delta d = l \sin(\theta)$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda \Delta \Phi}{2\pi l}\right) \quad (2)$$

但在实践中，MIMO 系统使用两根以上的天线，因此相位变化 ($\Delta \Phi$) 不仅是两根天线之间的相位变化，而是 N 天线之间的相位变化。空间范围内的相位变化称为空间频率 (ω)，这可以使用 FFT 进行估算。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda \Delta \Phi}{2\pi l}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda \omega}{2\pi l}\right) \quad (3)$$

FFT 通常用大量零填充，以增加候选角数量（在 X 轴上可见）。因此，角度 FFT 通常会产生宽峰值。因此，要估算物体的到达角，雷达会比较所有这些不同候选位置的 FFT 幅度，并选择与角谱中的最大值相对应的峰值（或峰值）。下图对这一点进行了说明，所选峰位于指数 11 的位置，因其幅度最高。

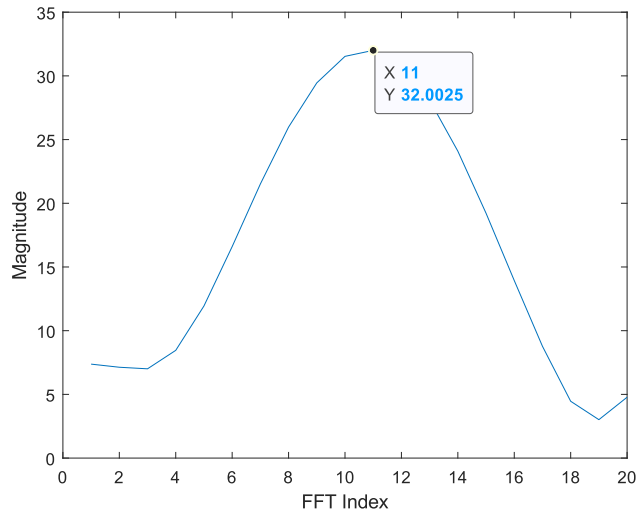


图 1-1. 指数 11 处具有最大峰值的宽 FFT 频谱

在 IWRL6432 上，使用雷达硬件加速器计算 FFT。然而，这从根本上相当于具有所有天线接收相位的 FFT 矩阵的矩阵矢量积。所选的 AOA 是与方程式 4 中 a_i 的最大值相对应的角度。

$$\begin{pmatrix} w^0 & w^0 & \dots & w^0 \\ w^0 & \omega^1 & \dots & \omega^{N-1} \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ w^0 & \omega^{N-1} & \dots & \omega^{(N-1)(N-1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_0 \\ \phi_1 \\ \dots \\ \phi_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_{N-1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\omega = e^{\frac{-j2\pi}{N}} \quad (5)$$

从输出相关矢量 x 的矢量中，选择与 x_i 的最大值相对应的 FFT 索引。

$$idx_{est} = \operatorname{argmax}_i(a_i) \quad (6)$$

然后，使用 AOA 公式计算经估计的 AOA θ_{est} 。

$$if(idx_{est} \leq \frac{N}{2}) \rightarrow \theta_{est} = \text{asin}\left(\frac{2 \times idx_{est}}{N}\right) \quad (7)$$

$$if(idx_{est} > \frac{N}{2}) \rightarrow \theta_{est} = \text{asin}\left(\frac{N - 2 \times idx_{est}}{N}\right) \quad (8)$$

1.2 到达角估算理论：转向矢量

上面的公式和 FFT 是不同物体到达角的估算值。遗憾的是，如果雷达或天线存在非线性，或者每个单独天线中存在增益/相位失配，则上面的 FFT 矩阵和公式无法准确估算物体到达角。此处的另一种设计是通过实验重新计算 FFT 矩阵，采用的方法是测量扫描所有潜在到达角的目标雷达信号返回相位，并将这些系数用作接地真值矢量。这是 IWRL6432AOP 的转向矢量算法。

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-1,1} & x_{N-1,2} & \cdots & x_{N-1,N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_0 \\ \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{N-1} \end{pmatrix}$$

$$idx_{est} = \text{argmax}_i(a_i) \quad (9)$$

根据收集的数据集（以定期增量扫描 FOV），在将 a 指数映射到 θ 指数的查找表中引用 θ_{est} 。

表 1-1. 转向矢量查找表示例

a	θ
0	-80°
1	-75°
2	-70°
...	...
N-1	80°

2 其他信息

2.1 测量步骤

为了计算转向矢量系数矩阵，TI 测量了 IWRL6432 在多个 PCB 设计、器件和温度范围内的返回相位。TI 使用 [Millibox](#) 微型消声室和放置在距雷达已知距离处的角反射器，在方位角和仰角扫描过程中旋转雷达器件，并记录每个角度返回的 ADC 数据。

[图 2-1](#) 和 [图 2-2](#) 展示了 TI 在消声室一端与雷达以及在另一端与角反射器一起使用的设置。

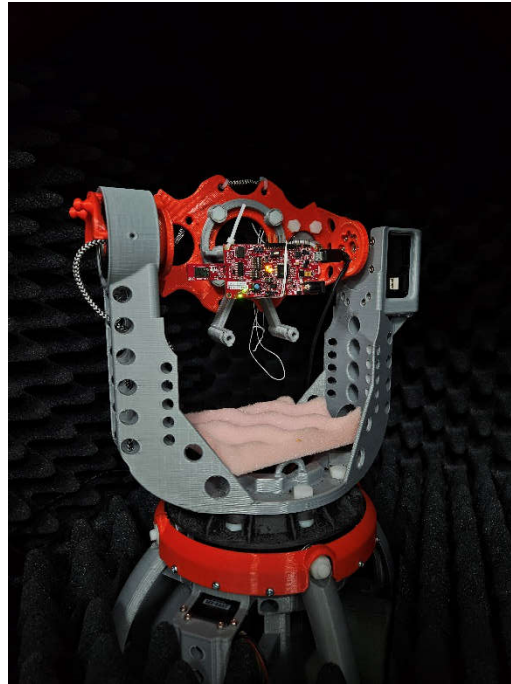


图 2-1. Millibox 消声室中的 IWRL6432AOPEVM

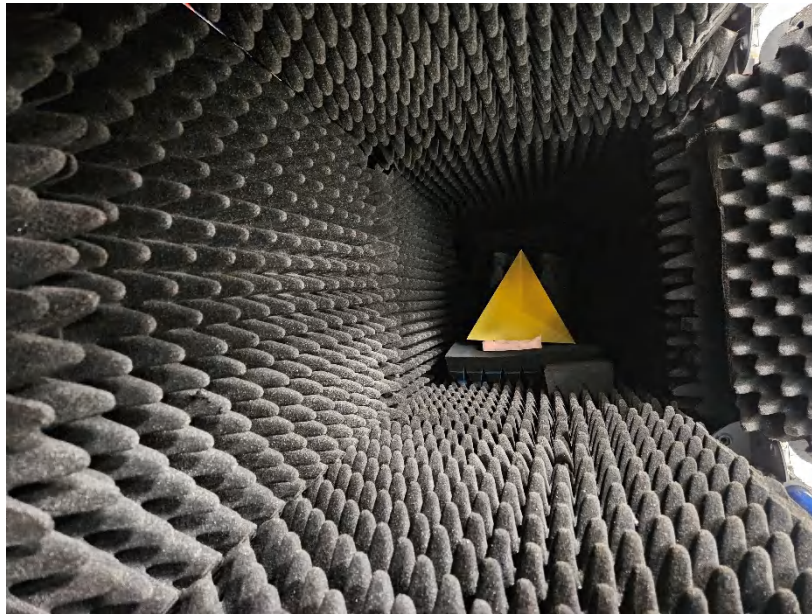


图 2-2. 位于 Millibox 消声室另一端的角反射器

2.2 测试结果

2.2.1 角反射器目标上的消声室测试

TI 使用 Millibox 测量结果开发了转向矢量算法以更高的精度解码到达角，并验证了不同 IWRL6432AOPEVM 器件的算法性能。TI 在两种环境下，采用四种不同带宽和起始频率，对这些器件进行不同线性调频脉冲曲线测试：首先是在角反射器上的消声室中，然后是在户外由真人走向雷达，再离开雷达。下表显示了线性调频脉冲参数。

请注意，转向矢量算法在 IWRL6432AOP 器件的整个 57-63.5GHz 带宽内运行。选择下面的线性调频脉冲作为此频带内潜在线性调频脉冲的样本。

表 2-1. 用于测试的线性调频脉冲带宽

配置 #	起始频率 (GHz)	结束频率 (GHz)
1	60.5	61.35
2	57	57.85
3	58.5	61.05
4	60	63.4

在消声室中，转向矢量算法降低了整个视场中的 AOA 估算误差。

表 2-2. FFT 和 SV 算法的 AOA 误差与方位角间的关系、消声室中的角反射器、仰角 = 0°

	-70°	-60°	-45°	-30°	0°	+30°	+45°	+60°	+70°
CFG # 1 (FFT)	44.5°	-5.2°	-3.4°	-6.8°	-0.5°	-0.9°	-5.8°	12.1°	-13.2°
Cfg #1 (转向矢量)	1.2°	1.7°	3.9°	-1.0°	0.2°	1.6°	3.1°	10.4°	-4.9°
Cfg #2 (FFT)	-20°	-10.4°	-4.4°	-6.9°	-2.9°	-2.5°	-5.3°	-10.1°	-10°
Cfg #2 (转向矢量)	0.4°	-3.2°	-1.4°	-3.1°	-1.8°	0.2°	4.1°	-5.3°	-6.7°
Cfg #3 (FFT)	-9.5°	-1.2°	-6.2°	-6.0°	-1.9°	-1.3°	-2.7°	-13.1°	-15.2°
Cfg #3 (转向矢量)	7.4°	5.7°	1.5°	-0.1°	0.1°	5.4°	5.6°	0.7°	-3.9°
Cfg #4 (FFT)	-4°	-4.8°	-4.1°	-6.2°	-1.4°	-1.2°	-5.0°	-45.4°	-13.8°
Cfg #4 (转向矢量)	3°	1.7°	1.3°	-1°	-0.1°	1.9°	4.5°	1.7°	-3.8°

2.2.2 人体受试者户外测试

在户外环境中对人体受试者进行了类似的实验，以确保转向矢量包在现实场景中也能准确估算 AOA。实验者从一系列已知的角度朝雷达走去，再离开雷达，并为每次试验收集点云。所有点的平均 AOA 误差如 图 2-3 和图 2-3 所示，所有试验图如附录所示。

表 2-3. 人体受试者在户外行走时 FFT 和 SV 算法的 AOA 误差与方位角间的关系

	-70°	-60°	-45°	-30°	0°	30°	45°	60°	70°
Cfg #1 (FFT)	-12.5°	5.5°	6.6°	3.7°	1.5°	2.2°	7.1°	6.3°	-12.5°
Cfg #1 (转向矢量)	-6.5°	-2.6°	-2.3°	-2.1°	1.4°	0.8°	-0.7°	3.1°	-6.5°
Cfg #2 (FFT)	7.4°	9.9°	5.3°	6.0°	5.0°	2.0°	8.5°	5.7°	10.8°
Cfg #2 (转向矢量)	0.9°	4.2°	2.1°	3.3°	3.5°	-2.1°	-0.6°	-0.6°	3.2°
Cfg #3 (FFT)	2.4°	11.1°	10.5°	6.8°	3.5°	1.2°	9.3°	10.1°	2.4°
Cfg #3 (转向矢量)	-4.2°	0.3°	2.3°	0.2°	2.4°	-0.5°	1.4°	1.2°	-4.2°
Cfg #4 (FFT)	-16.7°	6.7°	6.1°	5.3°	3.6°	3.8°	9.7°	8.7°	9.4°
Cfg #4 (转向矢量)	-4.1°	-1.2°	-3.8°	-0.1°	2.8°	1.7°	0.3°	0.1°	2.7°

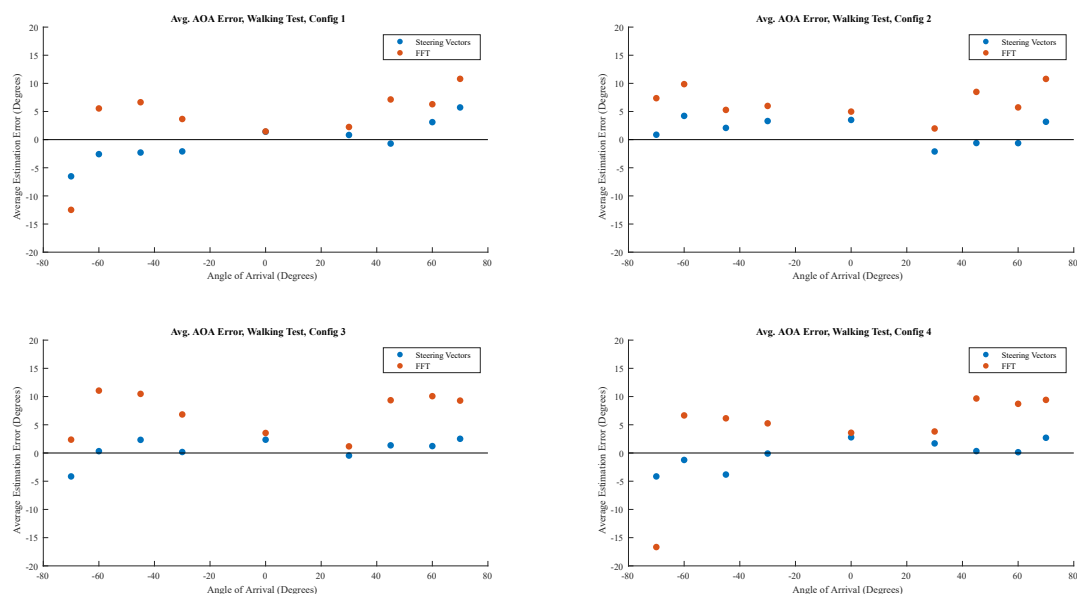


图 2-3. 步行测试 AOA 误差

图 2-4 显示了采集数据时的设置。

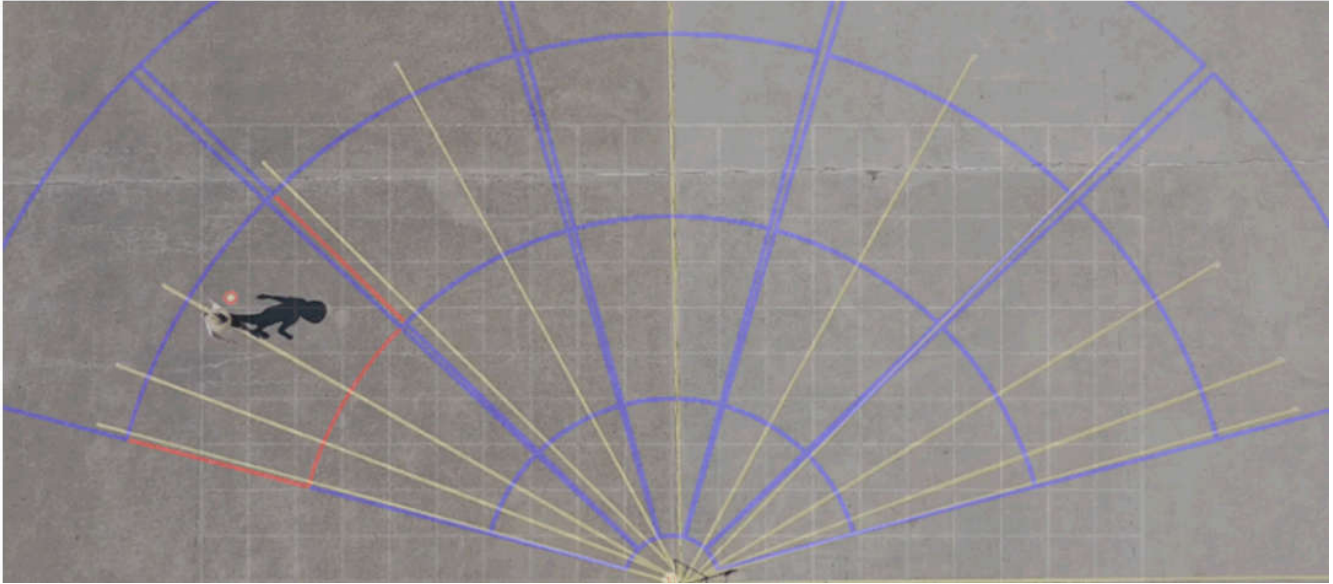


图 2-4. 步行测试环境 (鸟瞰图)

2.3 处理时间

在使用转向矢量封装改善 AOA 时，为达到最佳性能，需要进行一些额外的处理。因为转向矢量封装仅在检测到点的距离区间上运行，因此，可以针对每个检测点量化处理时间的增量。下面显示了该时序的细分情况，由此可见，每个检测点大约用时 $150 \mu\text{sec}$ ，在初始化时会增加 $676 \mu\text{sec}$ 的固定处理时间。因为这会延长器件处于处理模式 (80-120mW) 而非深度休眠模式 (0.48-0.67mW) 的时间，从而导致功耗增加。可以测量所增加的确切功耗量，具体取决于线性调频脉冲参数、帧速率和休眠设置。

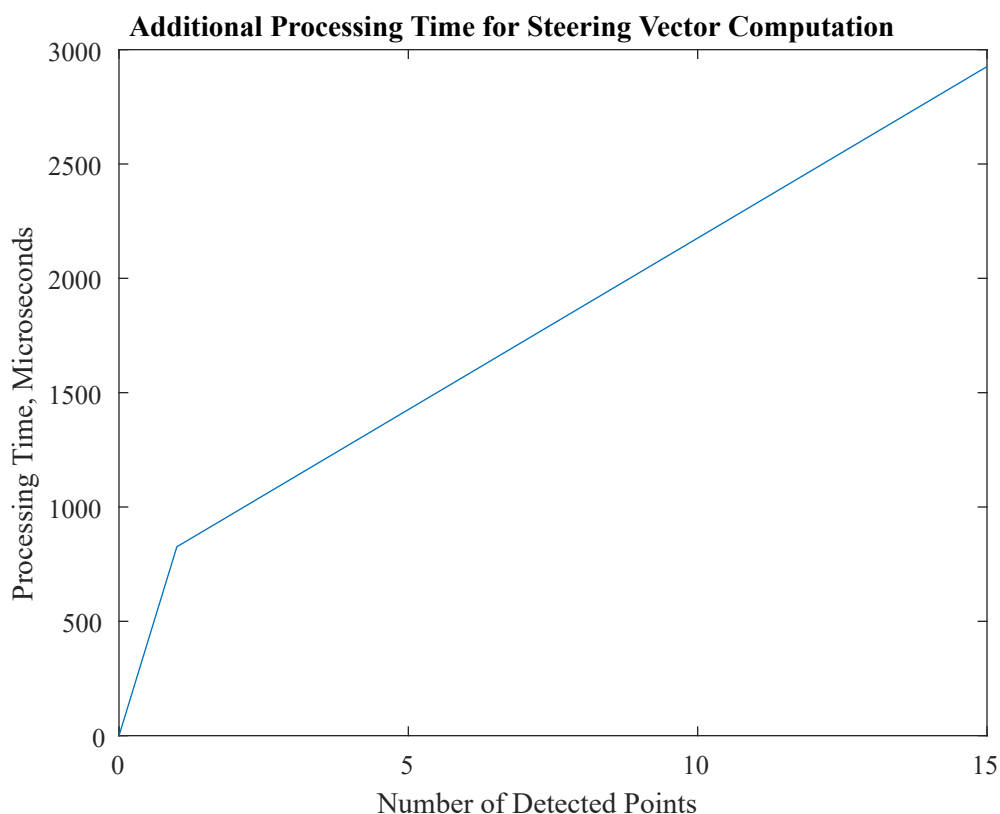


图 2-5. 处理时间与检测到的点数间的关系

2.4 用途

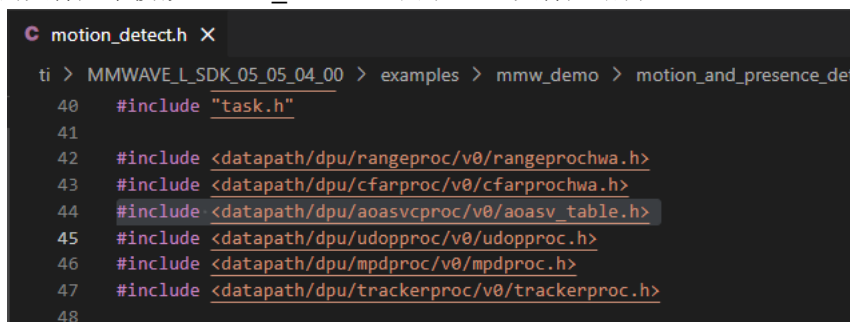
TI 开发了一款软件工具，其能在给定带宽和线性调频脉冲频率下计算 IWRL6432AOP 的转向矢量系数。可在 MMWAVE-L-SDK 中的 `tools/steering_vector_generation_tool/` 目录下找到该工具。可以使用该命令运行：

```
generateSteeringVectors.exe --filename
"path\to\config.cfg" --azimSpacing %Azimuth_Spacing% --elevSpacing
%Elevation_Spacing%
```

有关用法的更多详细信息，请参阅同一文件夹中的自述文件。

生成转向矢量文件 (`aoasv_table.c`) 后，可通过以下两种方式中的任一方式在 CCS 工程中使用：

1. 可以将其复制（以及 AOASVCDPU 文件夹中的所有文件）到 CCS 工程中，并作为 CCS 工程的一部分构建。请注意：用户可以将 `.c` 文件从 `aoasv_table6432.c` 重命名为 `aoasv_table.c`，并更改 AOASVCDPU 和 CCS 工程中的部分文件路径以指向新的 DPU。在 MMWAVE-L-SDK 5.5.4 上，需要一个名为 `datapath/dpu/aoasvcp/v0/` 的文件夹来模拟 `motion_detect.h` 中的 DPU 文件夹结构



```

C motion_detect.h X
ti > MMWAVE_L_SDK_05_05_04_00 > examples > mmw_demo > motion_and_presence_de
40 #include "task.h"
41
42 #include <datapath/dpu/rangeproc/v0/rangeprochwa.h>
43 #include <datapath/dpu/cfarproc/v0/cfarprochwa.h>
44 #include <datapath/dpu/aoasvcp/v0/aoasv_table.h>
45 #include <datapath/dpu/udopproc/v0/udopproc.h>
46 #include <datapath/dpu/mpdproc/v0/mpdproc.h>
47 #include <datapath/dpu/trackerproc/v0/trackerproc.h>
48
```

图 2-6. motion_detect.h 中的 DPU 结构

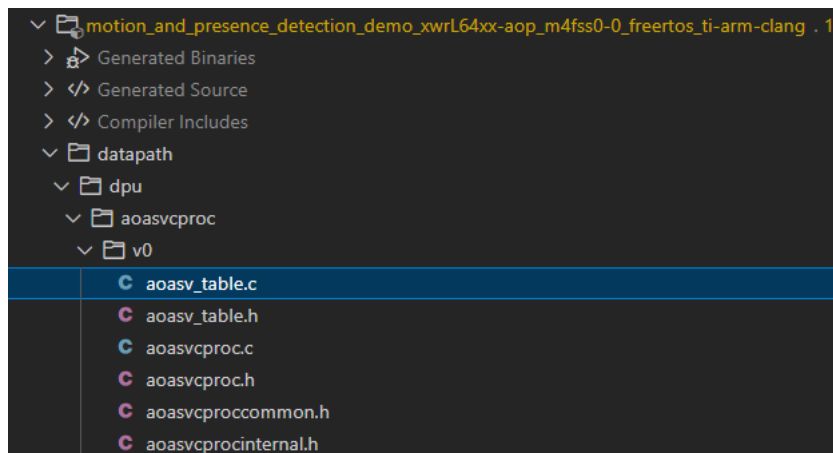


图 2-7. Motion_and_Presence 工程中包含 AOASVCDPU 的文件夹结构

2. 可以使用 makefile 作为数据路径 DPU 的一部分构建并链接到 CCS 工程。

2.5 扩展到其他平台

TI 提供的转向矢量软件包仅与 IWRL6432AOP 器件相关。这是因为这些系数是根据特定于 IWRL6432AOP 天线设计的增益和相位失配而得出的。这些系数与 IWRL6432 (FCCSP 和 WCSP 封装)、AWRL6432、IWRL1432 或 AWRL1432 的其他型号不兼容。TI 不支持调取特定电路板设计和外壳的转向矢量系数。

3 总结

IWRL6432AOP 有两种角度估算器方法。FFT 角度估算算法可在合理的视场内提供良好的角度估算性能并具有较短的处理时间，而转向矢量角度估算算法可在更宽的视场中提供更好的角度估算，但代价是处理速度较慢。在较宽的带宽和频率范围内针对静止目标和行走的人体受试者，测试了转向矢量算法，确保在多种条件下都能保持稳健的性能。

在这两种角度估算算法中，设计人员均能使用 IWRL6432 来检测远距离人员和物体。未来它们甚至可以在多通检测架构中一起使用。在视场中未检测到人员时、FFT 角度估算方法可以降低雷达的功耗，而一旦检测到人员，转向矢量算法可以提供更精细的定位，以验证雷达是否根据检测位置做出正确反应。

4 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [毫米波雷达传感器的基础知识](#), 营销白皮书。

5 附录

5.1 每个配置文件的线性调频脉冲参数

表 5-1. 每个配置的完整线性调频脉冲参数

配置 1	channelCfg 7 3 0 chirpComnCfg 23 0 0 256 1 68 2 chirpTimingCfg 9.9 24 0 12.5 60.5 frameCfg 2 0 280 8 500 0
配置 2	channelCfg 7 3 0 chirpComnCfg 23 0 0 256 1 68 2 chirpTimingCfg 9.9 24 0 12.5 57.0 frameCfg 2 0 280 8 500 0
配置 3	channelCfg 7 3 0 chirpComnCfg 23 0 0 256 1 68 2 chirpTimingCfg 9.9 24 0 37.5 58.5 frameCfg 2 0 280 8 500 0
配置 4	channelCfg 7 3 0 chirpComnCfg 23 0 0 256 1 68 2 chirpTimingCfg 9.9 24 0 80 58 frameCfg 2 0 280 8 500 0

5.2 人体受试者测试的点云数据

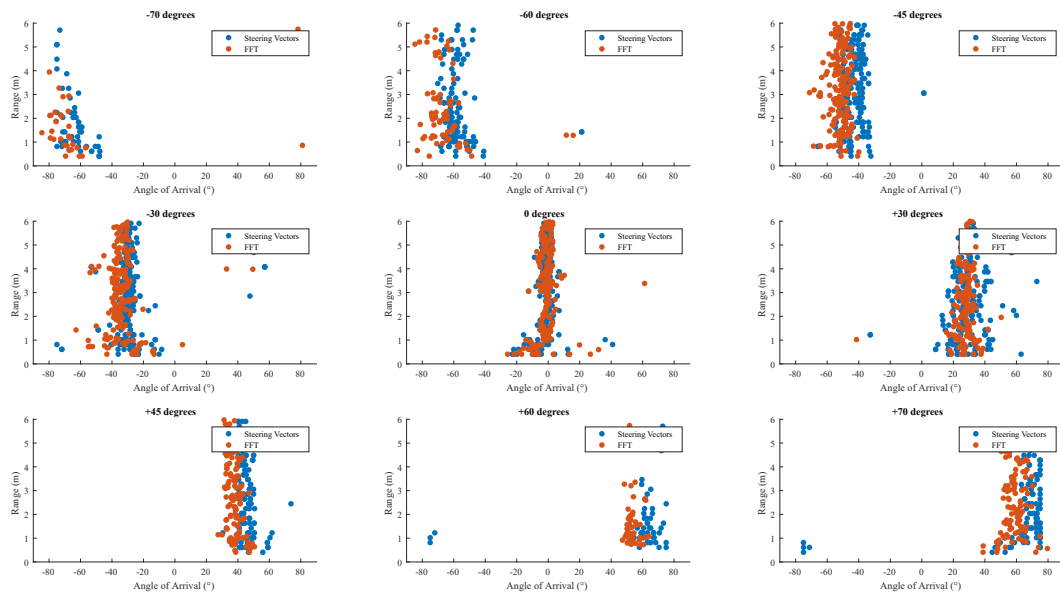


图 5-1. 步行测试、检测到的所有点、配置 1

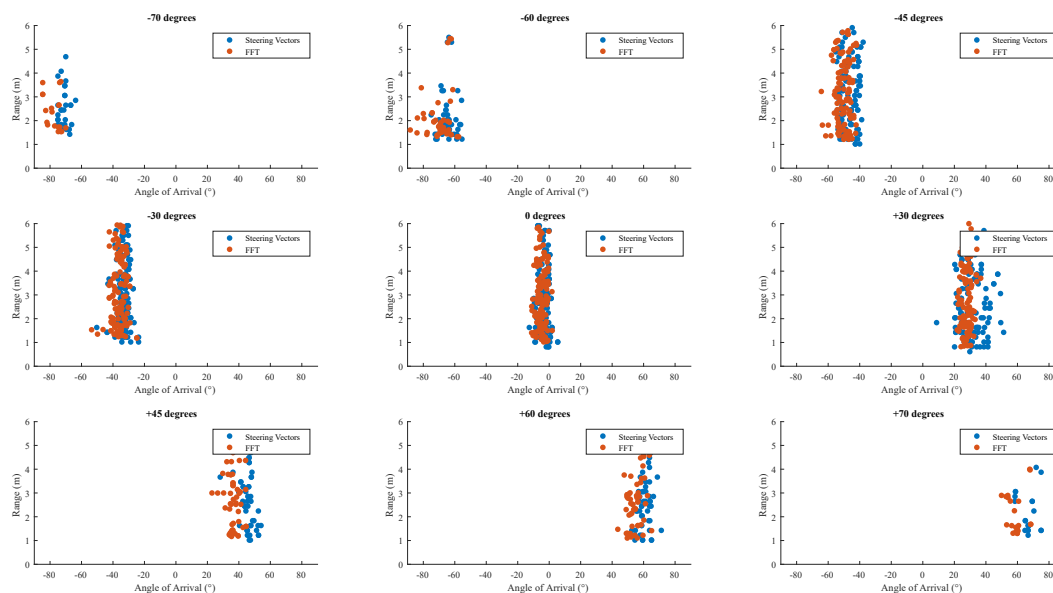


图 5-2. 步行测试、检测到的所有点、配置 2

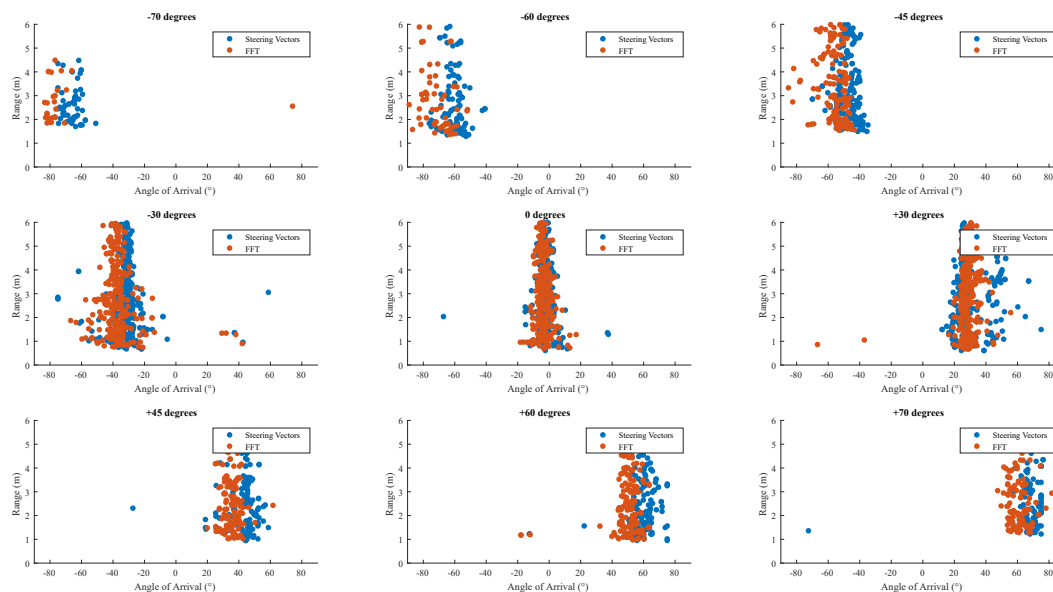


图 5-3. 步行测试、检测到的所有点、配置 3

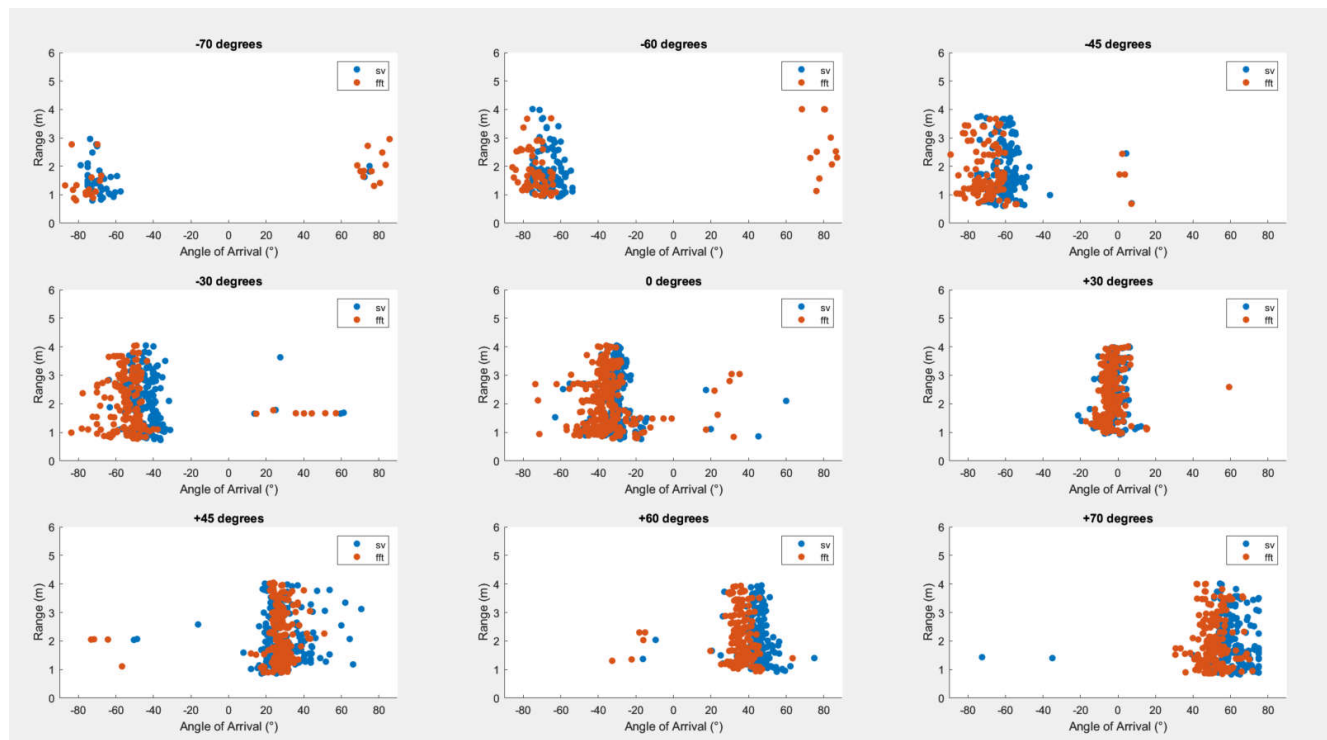


图 5-4. 步行测试、检测到的所有点、配置 4

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司