

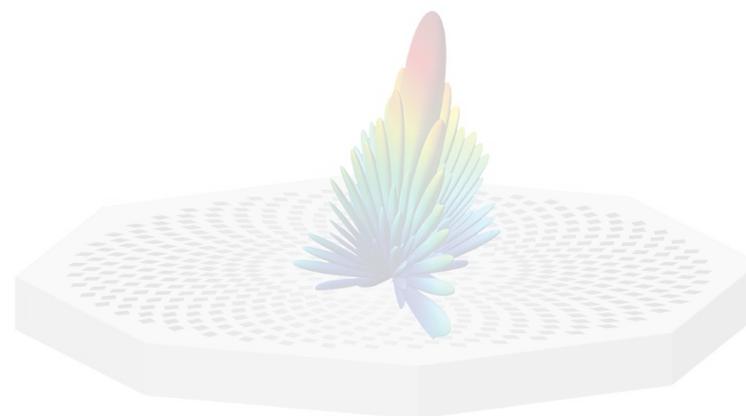
毫米波雷达感知

张粟桐



目录

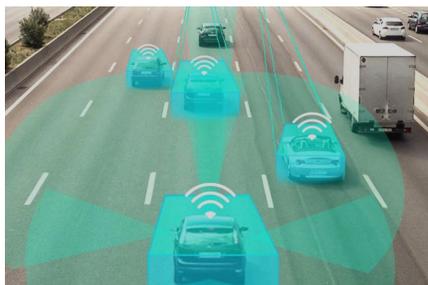
- **背景**
 - 毫米波雷达介绍
 - 毫米波雷达感知
- **毫米波雷达基础知识**
- **毫米波雷达感知任务**
 - 定位与追踪
 - 手势与动作识别
 - 生命体征
 - 成像与建图(SAR与SLAM)
 - 物体识别与语义分割
- **总结**



毫米波雷达介绍

毫米波雷达(Millimeter Wave Radar)是指工作在毫米波频段探测的雷达。工作频段一般为30GHz~300 GHz，波长1~10mm。得益于CMOS技术和天线封装技术的发展，小型化、高集成度的毫米波雷达芯片应运而生，并开始广泛应用于越来越丰富的场景：

- 自动驾驶：ADAS(先进辅助驾驶系统)、前向防撞报警、盲点检测、辅助停车
- 智慧城市：安防监控、智能交通系统、智能停车管理系统
- 智能家居：室内人员定位与追踪、心跳呼吸检测、手势识别
- 智慧工厂：无人机、机器人自主避障



自动驾驶



智慧城市

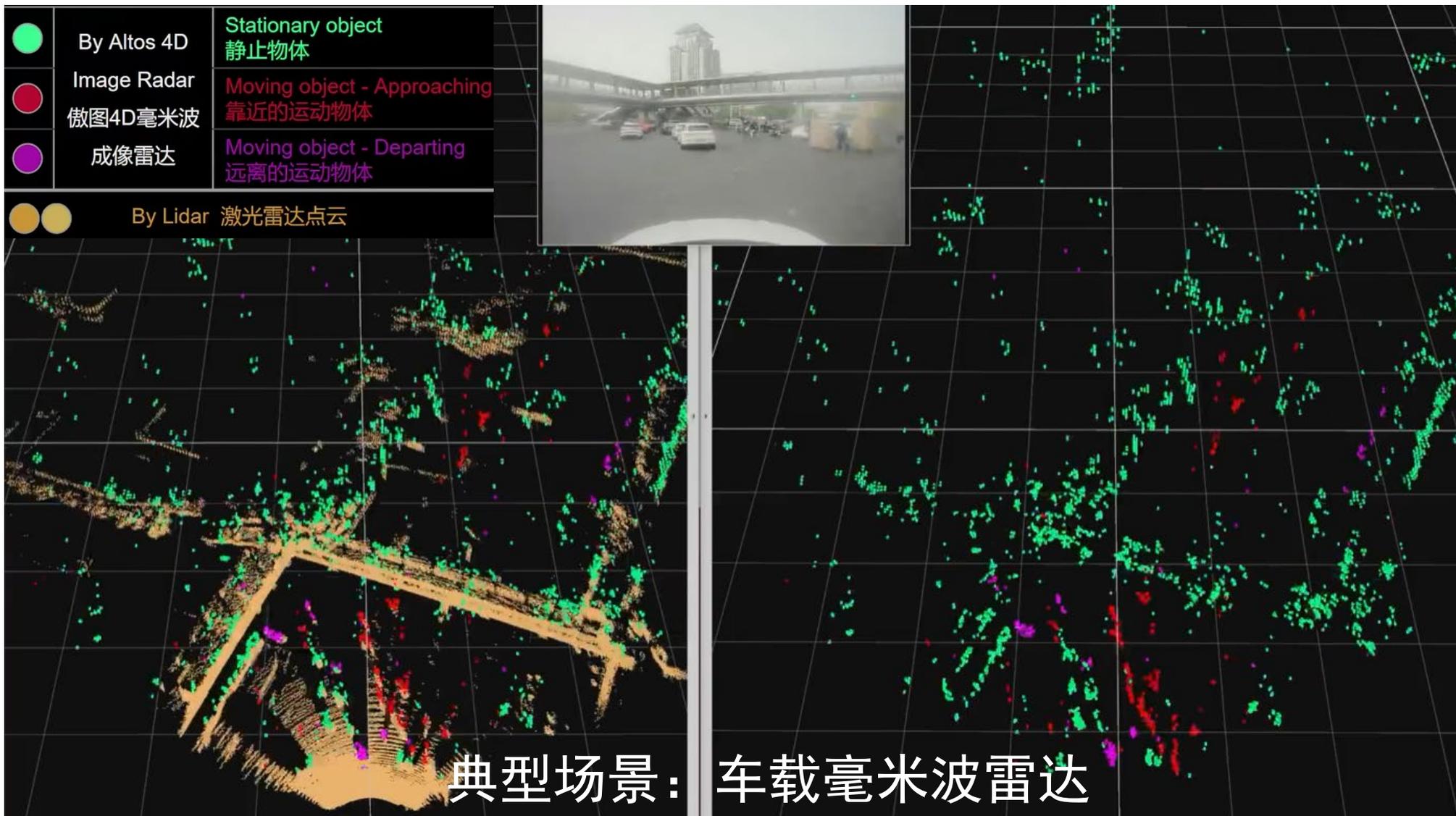


智能家居



智慧工厂

毫米波雷达介绍



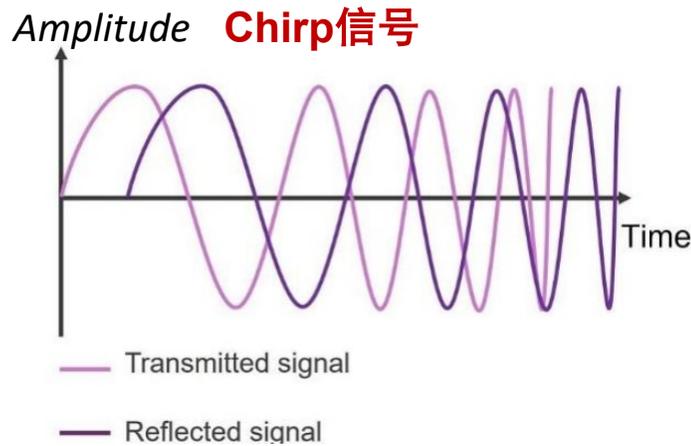
毫米波雷达介绍

毫米波雷达可以按照工作频段、收发天线、调制方式进行分类：

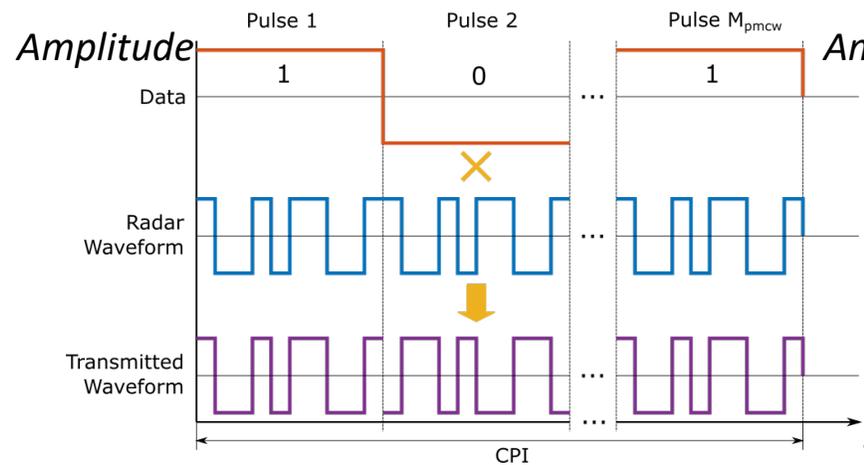
- 工作频段：常用的毫米波雷达频段为24GHz、60GHz和77GHz这三个频段
- 收发天线：收发一体雷达(Monostatic Radar)和收发分置雷达(Bistatic Radar)



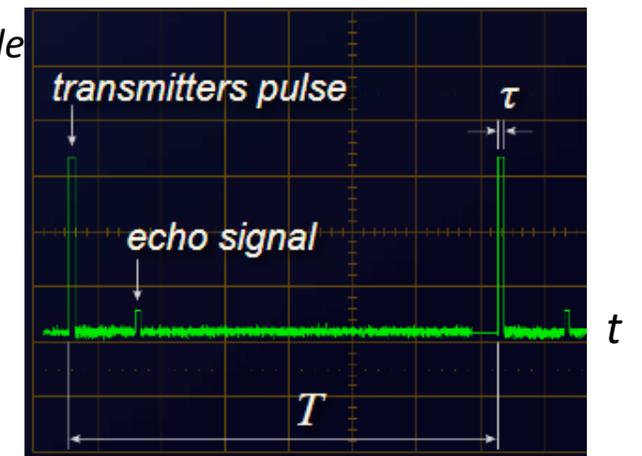
- 调制方式：根据调制电磁波方式的不同，毫米波雷达主要分为脉冲波调制和连续波调制，其中连续波调制雷达分为PMCW(调相连续波)雷达和FMCW(调频连续波)雷达



FMCW雷达



PMCW雷达



脉冲雷达

毫米波雷达感知

毫米波雷达与其他传感器(摄像头、Wi-Fi和激光雷达)相比具有众多优势:

- 与摄像头相比
 - ✓ 不受环境光线条件影响
 - ✓ 具有穿透障碍物的能力
 - ✓ 隐私保护
- 与Wi-Fi相比
 - ✓ 信号更加稳定, 抗干扰性强
 - ✓ 大带宽, 高精度
- 与激光雷达相比
 - ✓ 不受粉尘、颗粒物影响
 - ✓ 具有穿透障碍物的能力

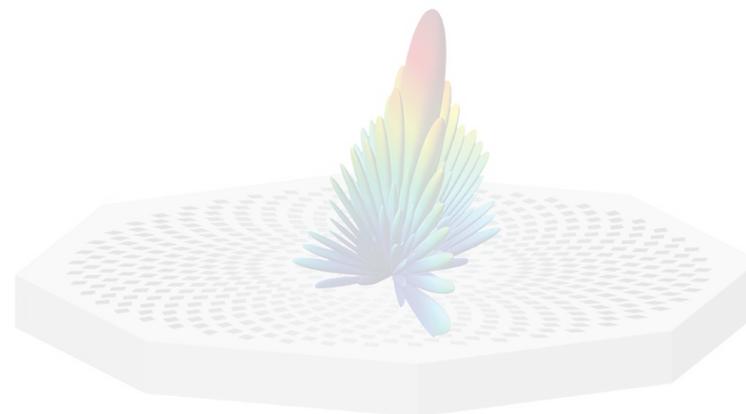
RF 信号的距离分辨率 $\Delta d \propto B^{-1}$

传感器名称	感知距离	价格	距离分辨率	角度分辨率	光照适应能力	气候适应能力
毫米波雷达	0-300m	~\$300	4-30cm	1°-30°	强	强
激光雷达	0.7-150m	~\$5000	2-10cm	0.1°-0.5°	中	中
摄像头	0-150m	~\$100	2-10cm	0.1°-0.5°	弱	弱
Wi-Fi	0-10m	~\$50	20-50cm	1°-30°	强	强

四者在感知任务中相辅相成, 缺一不可

目录

- **背景**
 - 毫米波雷达介绍
 - 毫米波雷达感知
- **毫米波雷达基础知识**
- **毫米波雷达感知任务**
 - 定位与追踪
 - 手势与动作识别
 - 生命体征
 - 成像与建图(SAR与SLAM)
 - 语义分割
- **总结**

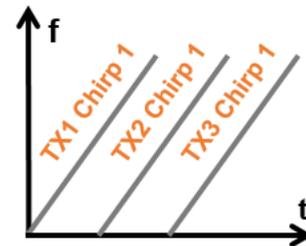
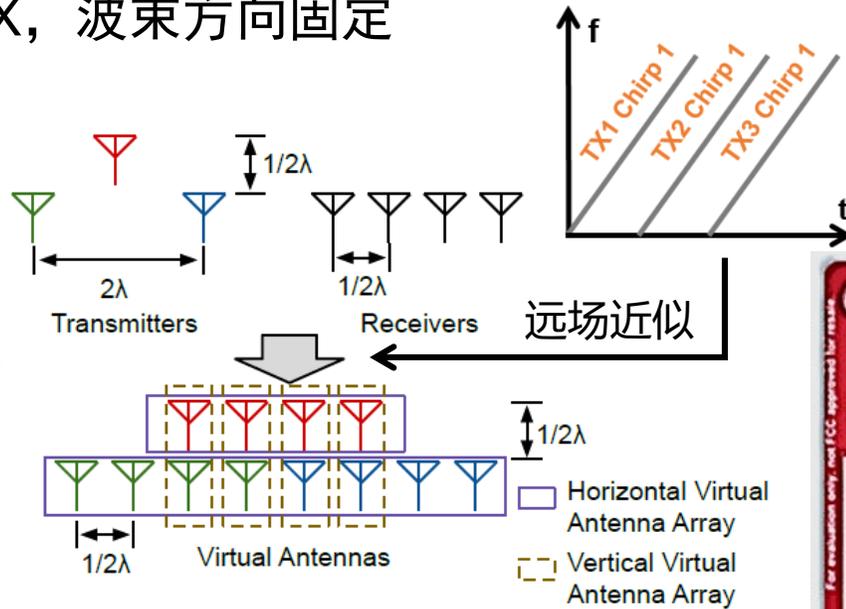
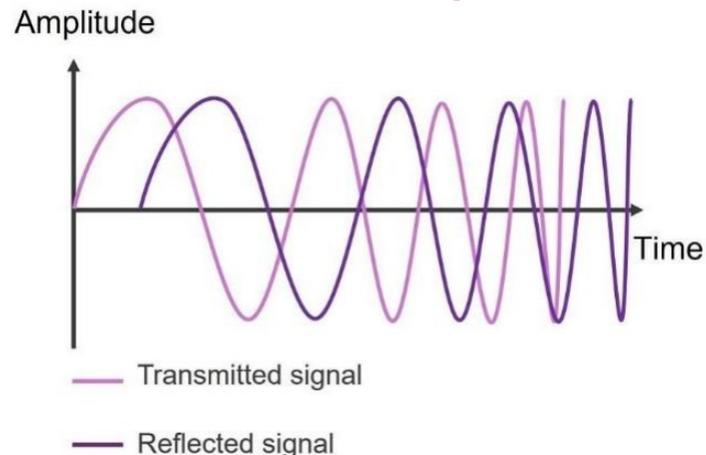


IWR1843雷达介绍

我们目前所用的这款雷达是工作在**77GHz**频段的**收发分置**的**FMCW**雷达，是TI公司的一款商用毫米波雷达IWR1843。3TX 4RX，波束方向固定

FMCW信号时域

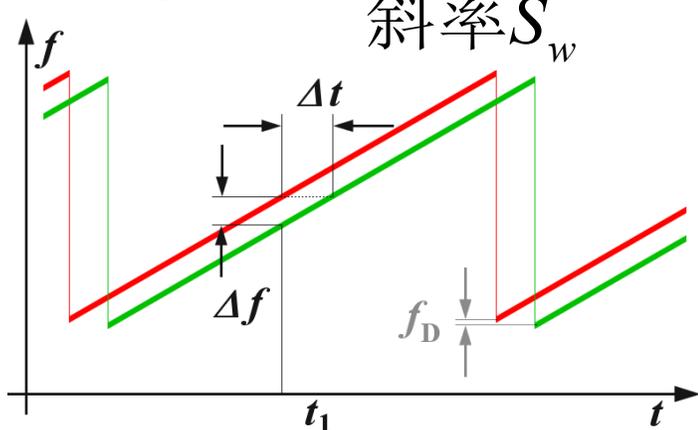
Chirp信号



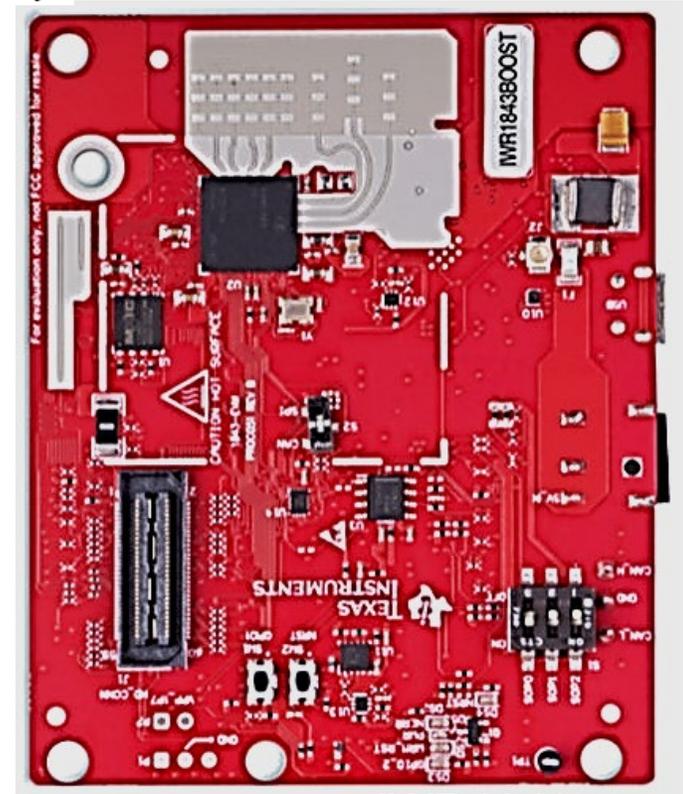
TX1, TX2, TX3发射TDM的FMCW信号和RX1, RX2, RX3, RX4通道构成12通道的MIMO虚拟阵列

4RX 3TX

FMCW信号时频域



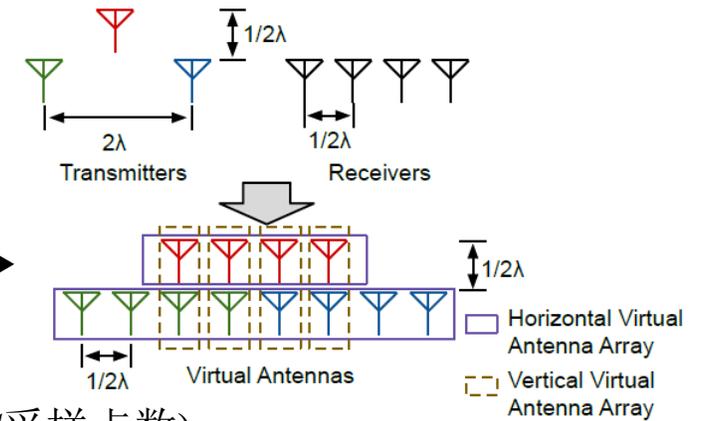
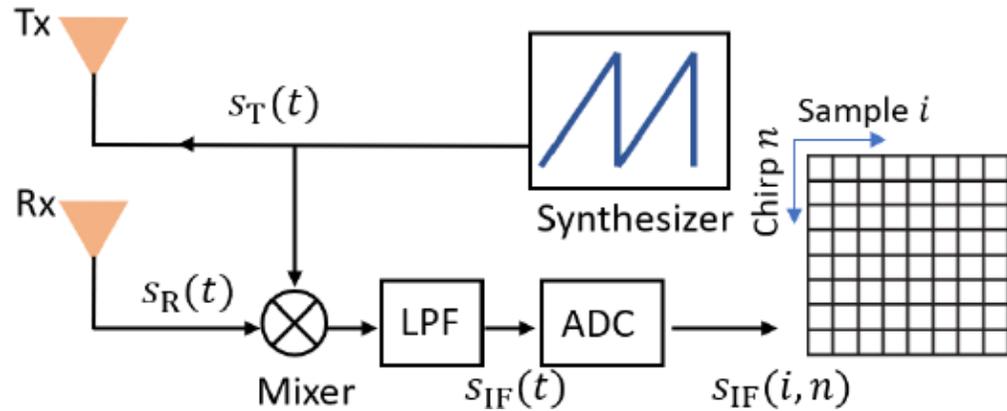
参数名称	参数范围
频段 (GHz) 记作 f_c	77-78.79892
带宽 (GHz)	1.79892
发射功率 (dBm)	12
发射波形	FMCW
斜率 ($MHz / \mu s$) 记作 S_w	29.982
发射天线数量	3
接收天线数量	4



IWR1843

雷达信号模型

首先以一个虚拟通道为例，发射N个Chirp信号，每个Chirp信号对应一个混频信号 $s_{IF}(t)$ 。对混频信号做ADC采样，一个混频信号 $s_{IF}(t)$ 的采样点数为I，即对每个虚拟通道能得到一个 $N \times I$ 的二维数组。然后我们将其扩展至12个虚拟通道，最终得到一个 $12 \times N \times I$ 的三维数组。



$i = 1, \dots, I$ (一个 s_{IF} 信号的ADC采样点数)

$n = 1, \dots, N$ (一帧内 s_{IF} 信号的数量)

$q = 1, \dots, Q = 12$ (虚拟通道数量)

$$s_{IF}(i, n, q) = \frac{A_T A_R}{2} \cos\left[2\pi\left(S_w \tau_n \frac{i}{f_s} + f_c \tau_n - \frac{1}{2} S_w \tau_n^2 + \frac{qd \cos \theta}{\lambda}\right)\right]$$

↑ 12个虚拟通道

$$s_T(t) = A_T \cos\left[2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2} S_w t^2\right) + \phi_0\right]$$

↓ 传播

$$s_R(t) = A_R s_T(t - \tau)$$

↓ 混频

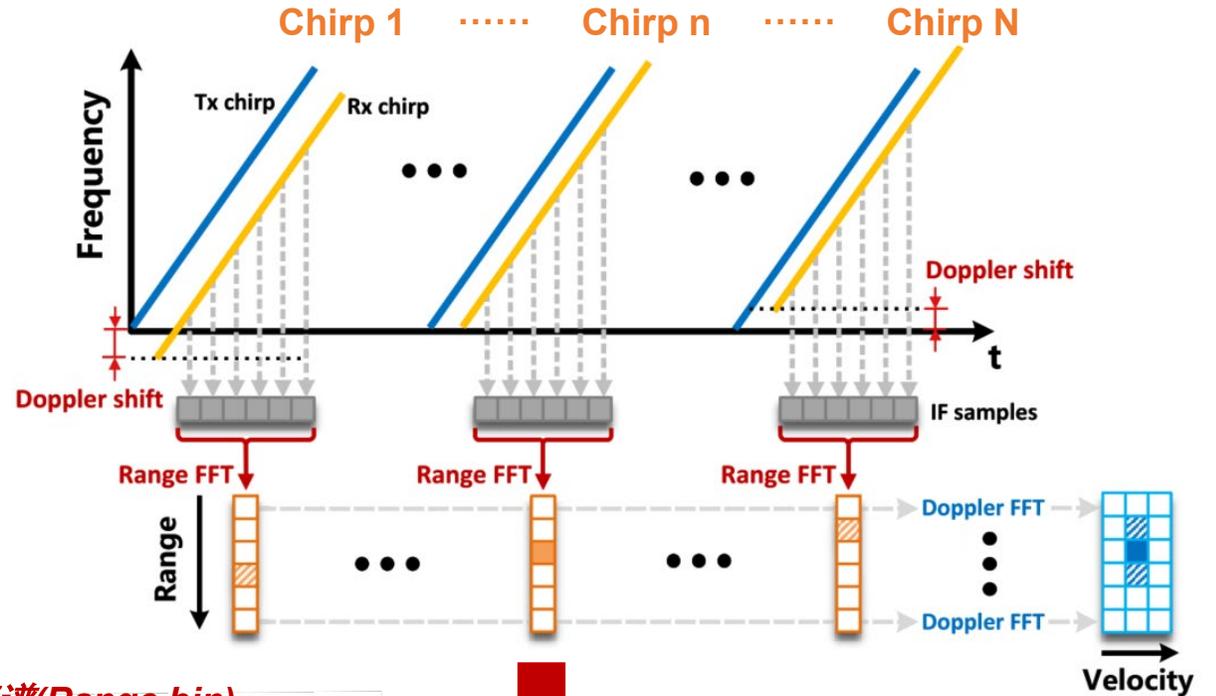
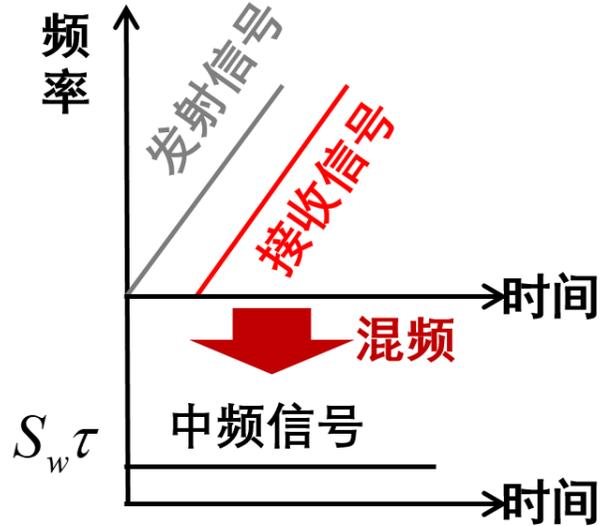
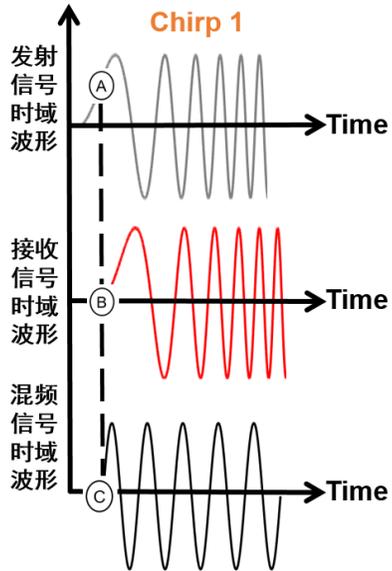
$$s_{IF}(t) = \frac{A_T A_R}{2} \cos\left[2\pi\left(S_w \tau t + f_c \tau - \frac{1}{2} S_w \tau^2\right)\right]$$

发射多个Chirp信号
ADC采样

$$s_{IF}(i, n) = \frac{A_T A_R}{2} \cos\left[2\pi\left(S_w \tau_n \frac{i}{f_s} + f_c \tau_n - \frac{1}{2} S_w \tau_n^2\right)\right]$$

距离估计

发射信号与接收信号混频，对混频的ADC数据做FFT进行距离估计

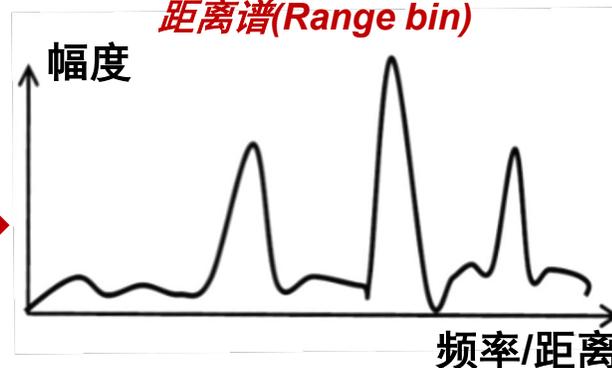


$$s_{IF}(t) = \frac{A_T A_R}{2} \cos[2\pi(S_w \tau t + f_c \tau - \frac{1}{2} S_w \tau^2)]$$

$$\Rightarrow f_{IF} = S_w \tau = S_w \frac{2d}{c} \Rightarrow d = \frac{c f_{IF}}{2 S_w}$$

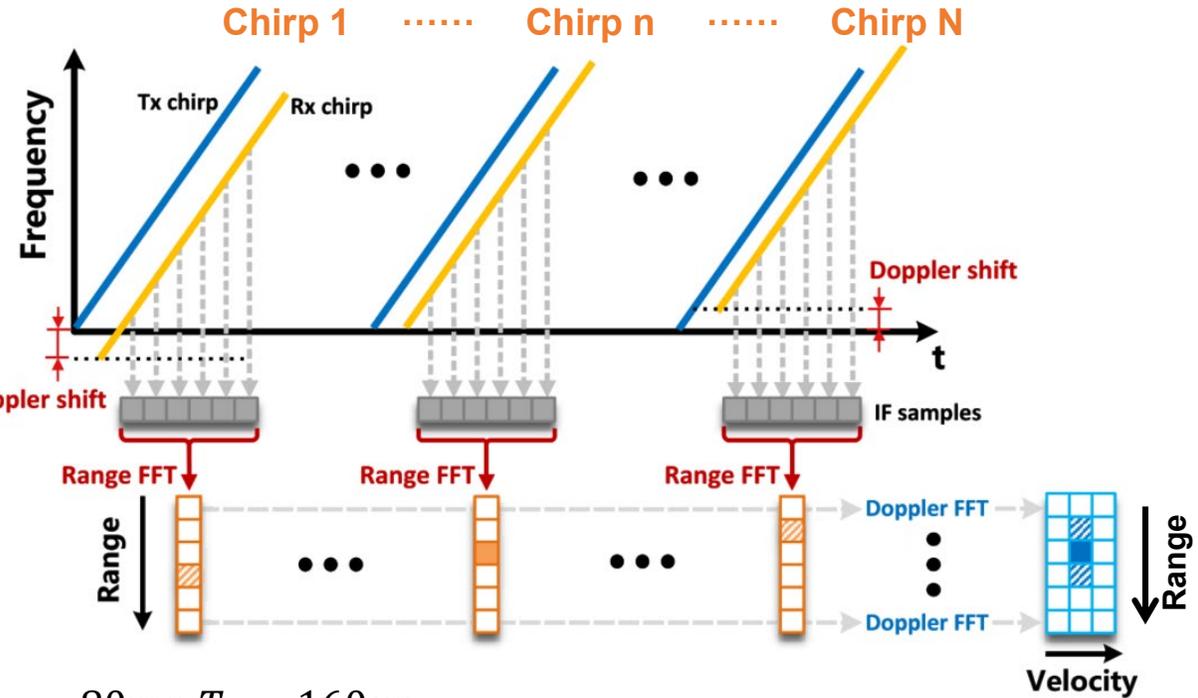
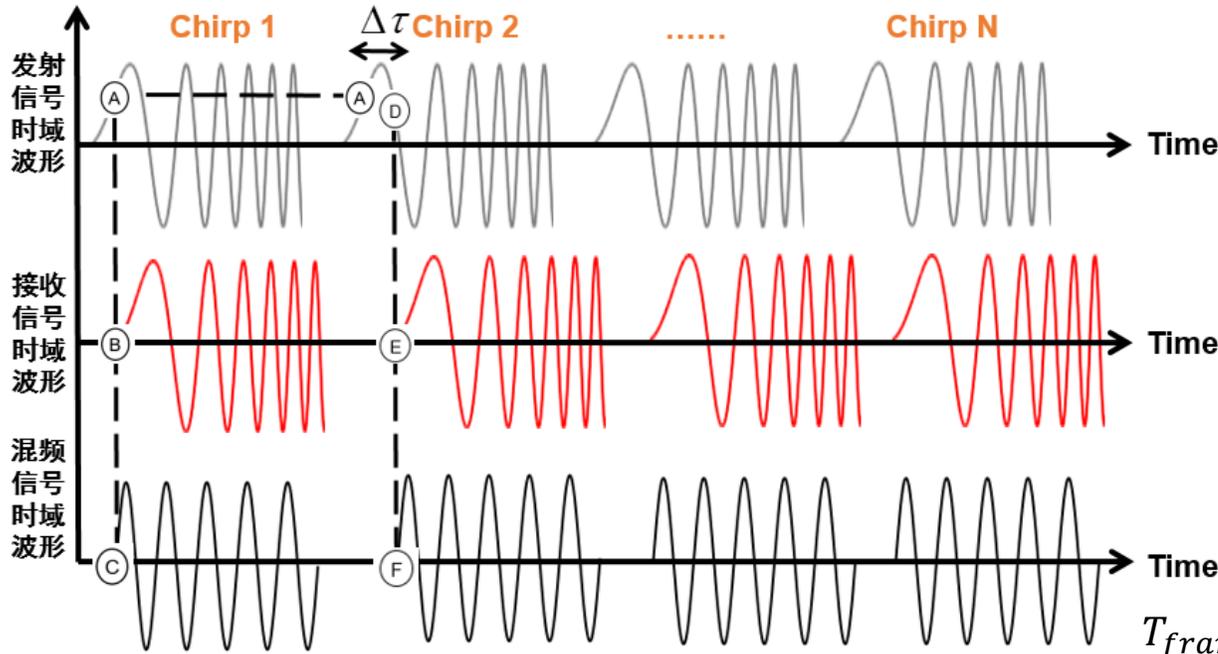
对中频信号 $s_{IF}(i, n, q)$ 的 i 维度(ADC维度)做FFT, 即可得到**距离谱(Range bin)**

距离维=ADC维=Range维
距离谱=Range bin



速度估计

对多个Chirp信号的距离谱做FFT得到距离-速度谱



$$T_{frame} = 80ms, T_C = 160\mu s$$

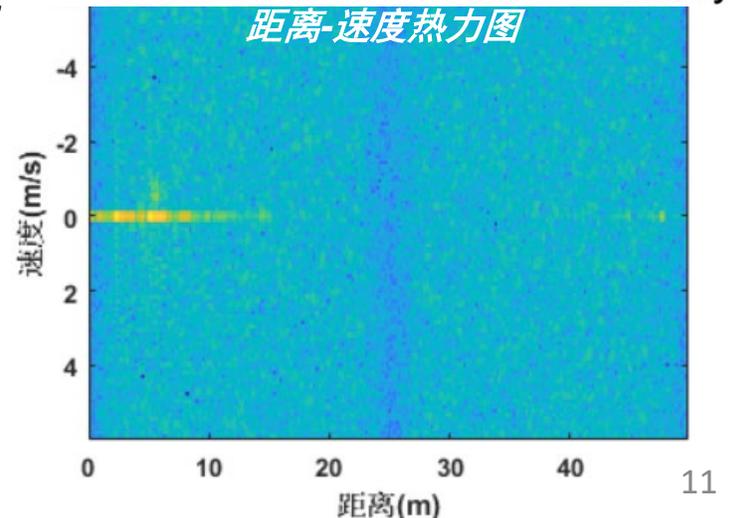
$S_{IF,Chirp1}(t)$ 与 $S_{IF,Chirp2}(t)$ 之间的时间差为 $\Delta\tau = \frac{2\Delta d}{c} = \frac{2vT_C}{c}$, T_C 是Chirp信号之间的间隔。

因此两个中频信号 $S_{IF}(t)$ 之间的相位差为: $\Delta\phi = 2\pi f_c \Delta\tau = \frac{4\pi\Delta d}{\lambda} = \frac{4\pi v T_C}{\lambda} \Rightarrow v = \frac{\lambda \Delta\phi}{4\pi T_C}$

相位差 $\Delta\phi$ 和多普勒频率 f_d 存在关系: $\Delta\phi = 2\pi f_d T_C \Rightarrow v = \frac{f_d \lambda}{2}$, 因此可以通过 $S_{IF}(i, n, q)$ 中 n 维度(Chirp维度)的FFT计算多普勒频率 f_d , 从而计算速度 v

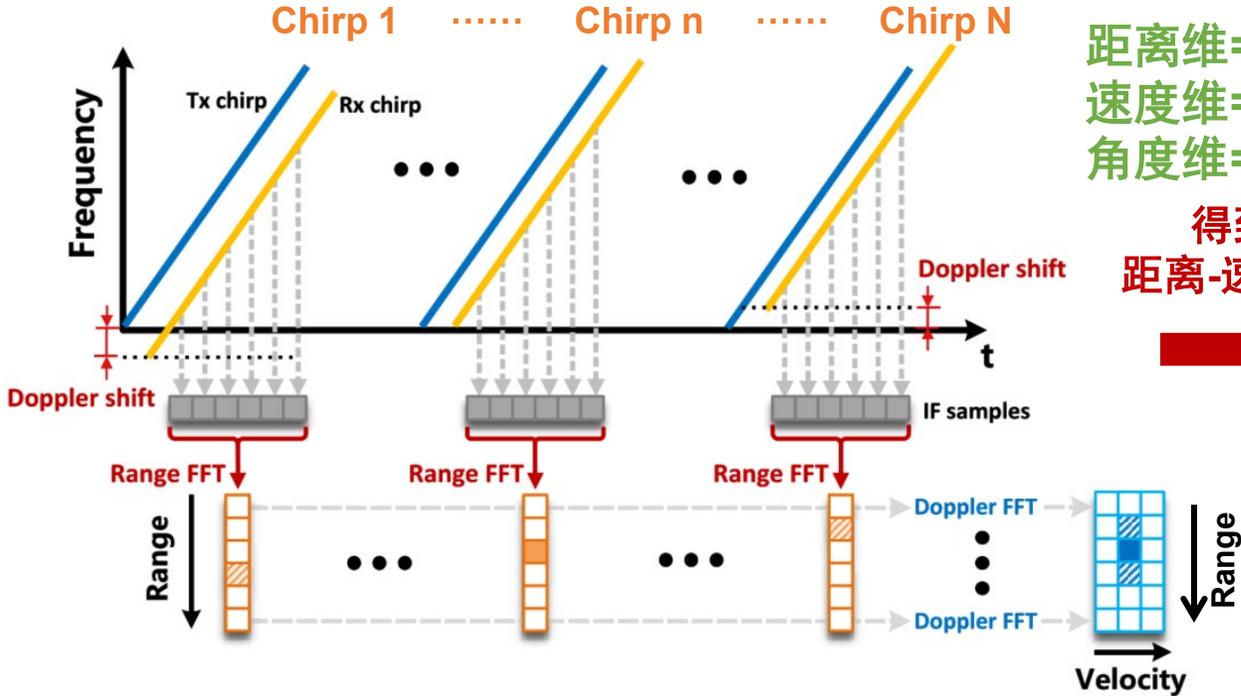
距离维=ADC维=Range维
距离谱=Range bin

速度维=Chirp维=Doppler维
距离-速度谱=Range-Doppler bin



角度估计

通过虚拟通道间的相位差，进行角度估计



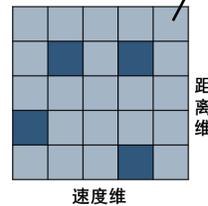
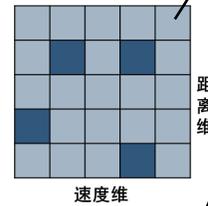
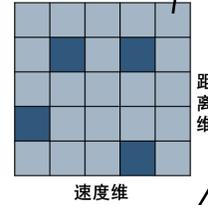
距离维=ADC维
速度维=Chirp维
角度维=天线维

得到12个
距离-速度热力图

12个通道的距离-速度谱中第*i*个距离索引和第*n*个速度索引对应的值

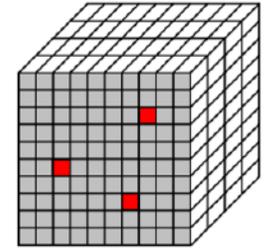
--	--	--	--	--

 1 × 12的数组

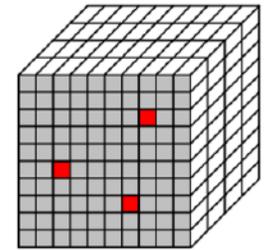


角度估计

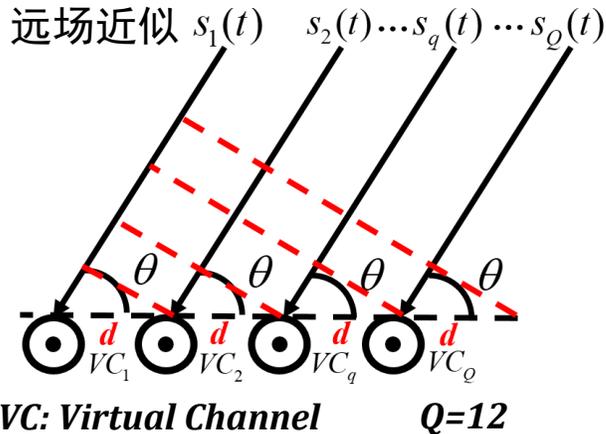
距离-速度-方位角立方体



距离-速度-俯仰角立方体



4D毫米波雷达信号处理基本流程



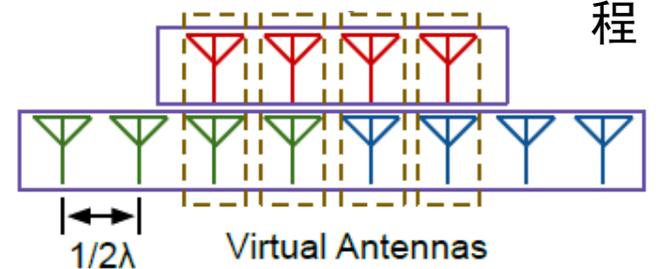
以线阵天线为例，相邻虚拟通道之间的接收信号存在相位差 $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos\theta \Rightarrow \theta = \cos^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\phi}{2\pi d}\right)$

可以使用FFT/MUSIC等DOA估计算法得到角度

1 × 12的数组 角度估计

--	--	--	--

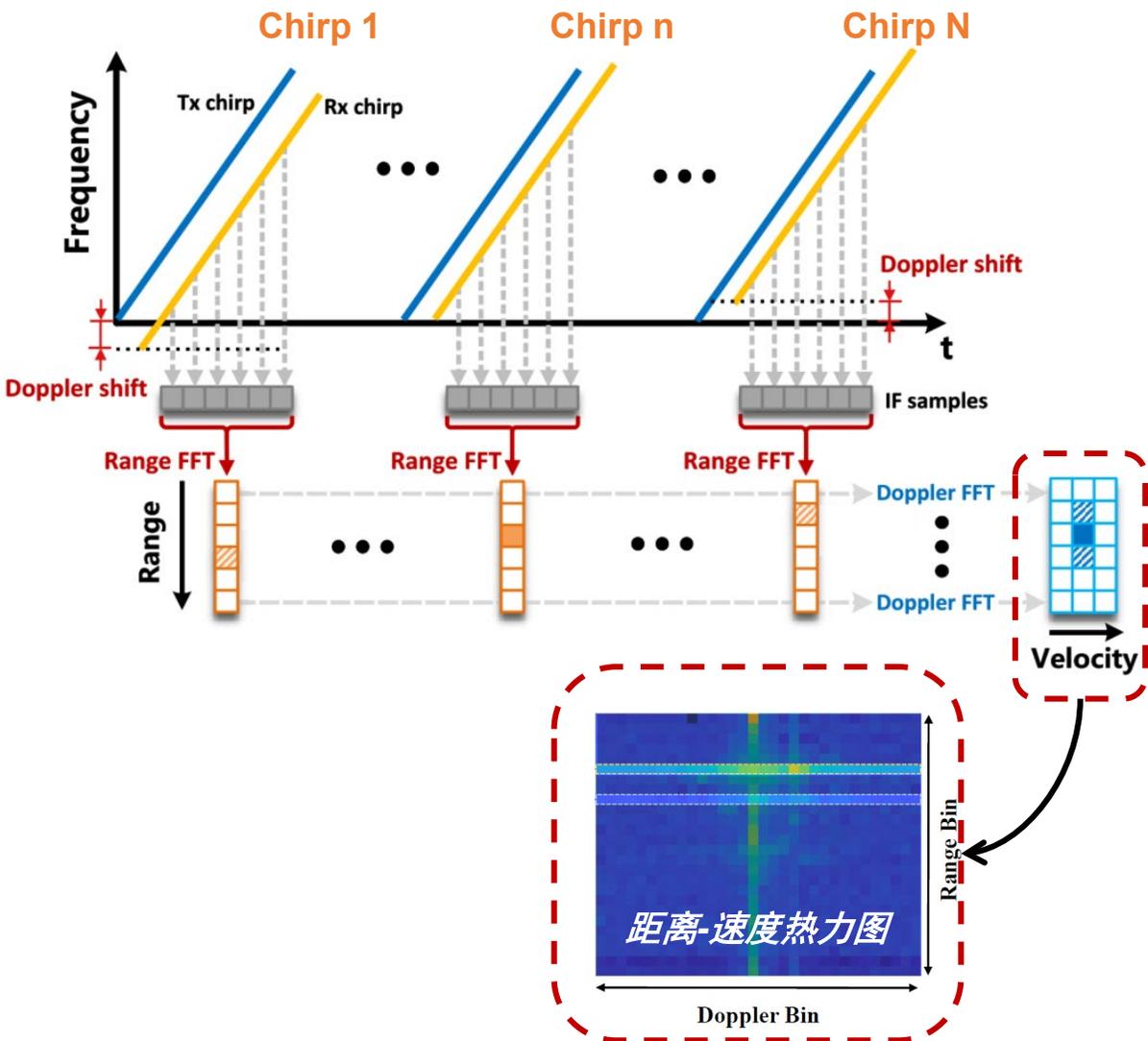
第*i*个距离索引和第*n*个速度索引对应的角度是多少



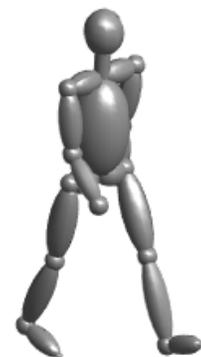
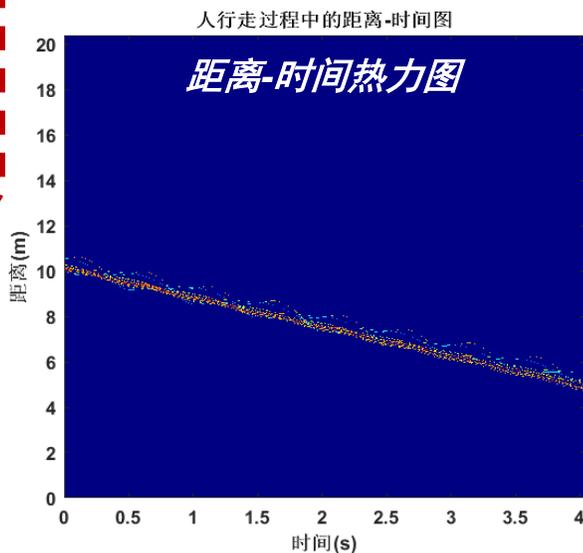
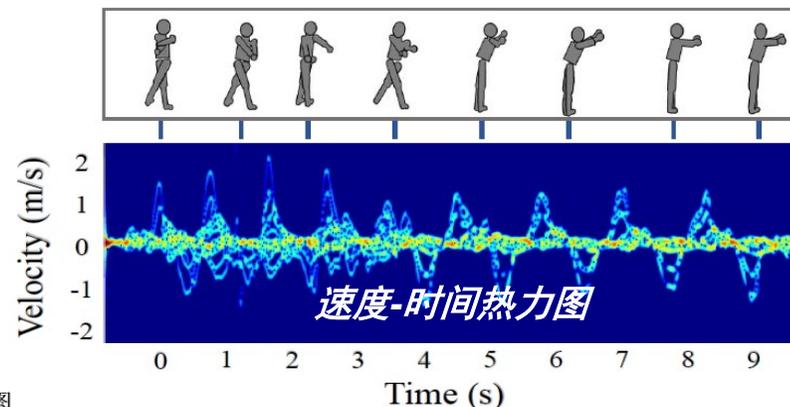
哪4D: 距离(Range)、速度(Doppler)、方位角(Azimuth)、俯仰角(Elevation)

距离-速度热力图、距离-时间热力图、多普勒-时间热力图

对混频的ADC数据做2D FFT得到**距离-速度热力图**

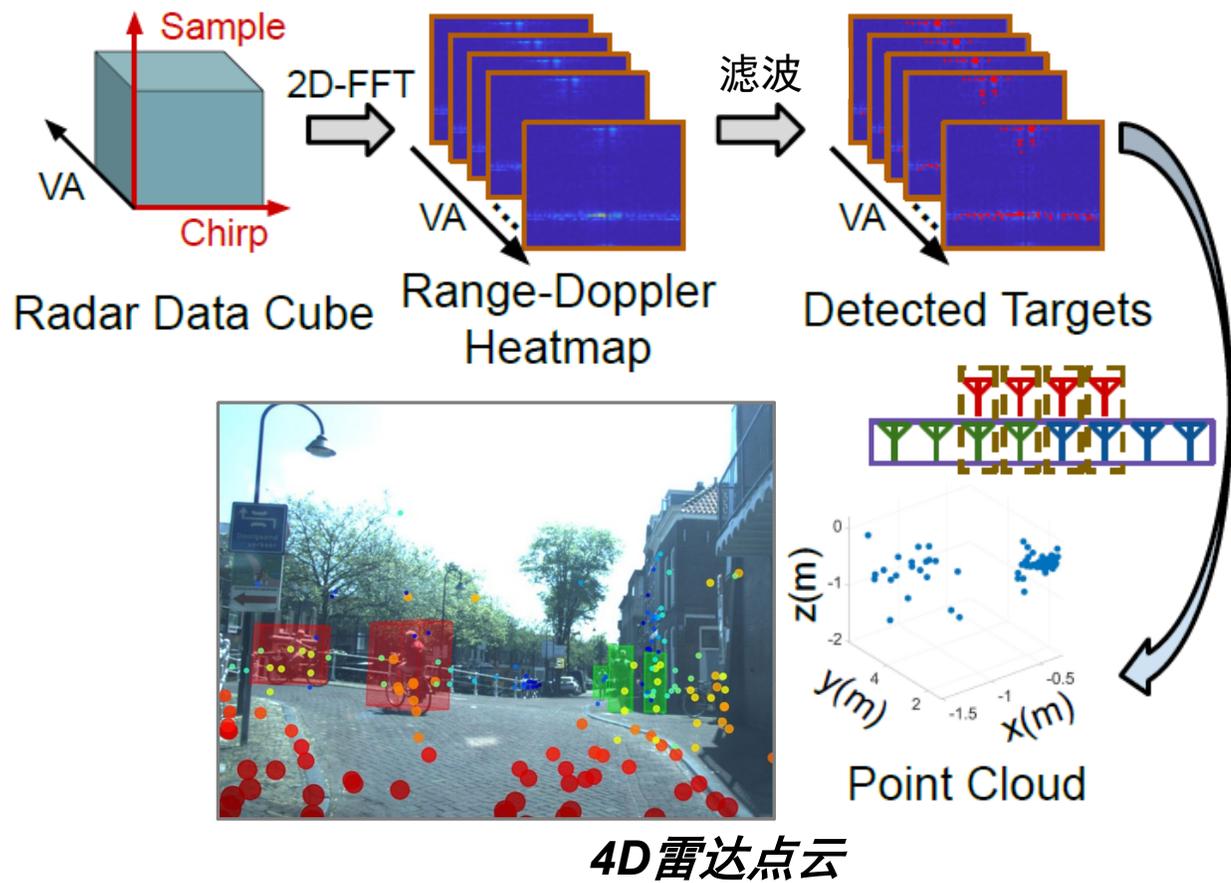


对每帧得到的距离-速度热力图分别在速度维和距离维压缩后，**将所有帧的距离谱和速度谱进行拼接**，得到**距离-时间热力图**和**速度-时间热力图**（也称作**微多普勒图**）表示目标在雷达照射下的运动特性随时间的变化

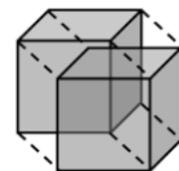


4D 点云图、4D热力图、2D热力图

对ADC数据进行2DFFT求得**Range-Doppler Heatmap**，对Range-Doppler Heatmap做滤波得到二维点云，对二维点云做方位角(Azimuth)和俯仰角(Elevation)的估计，得到**4D点云**(距离, 速度, 方位角, 俯仰角)

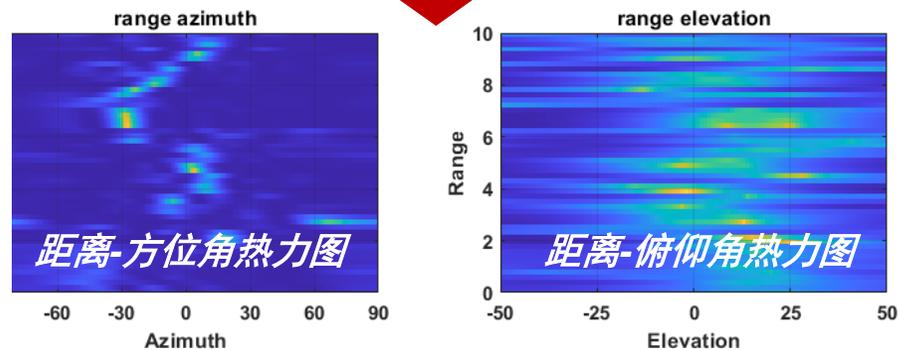


如果我们中间不做滤波的话，得到的就是4D的热力图



4D热力图/张量/tensor

从4D热力图的不同角度观察它



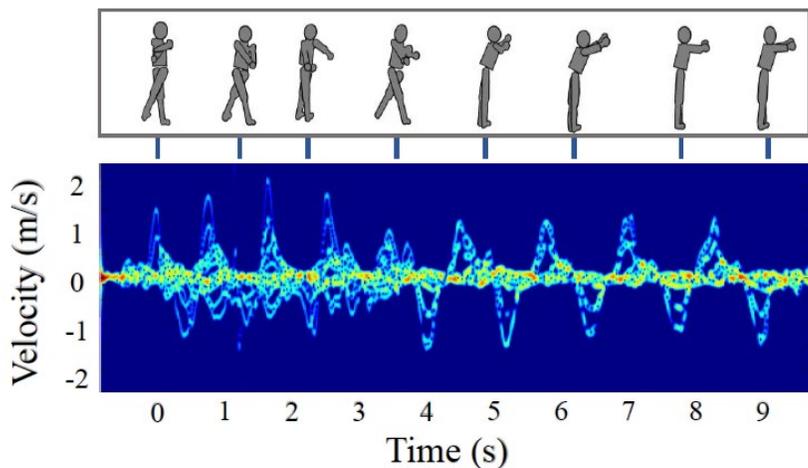
2D热力图

[1] 3-D Motion Capture of an Unmodified Drone with Single-chip Millimeter Wave Radar. ICRA2021

[2] RaTrack: Moving Object Detection and Tracking with 4D Radar Point Cloud. <https://arxiv.org/pdf/2309.09737.pdf>. 2024.2.24

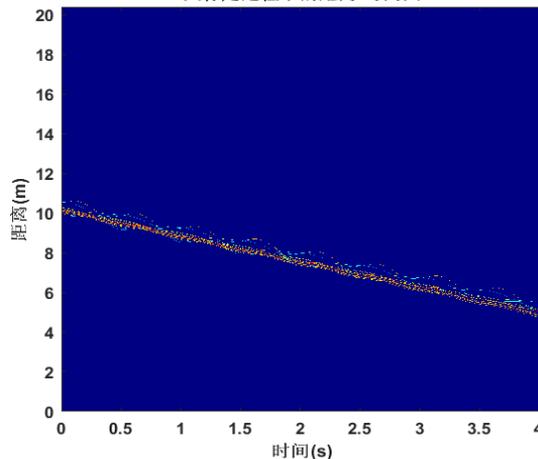
毫米波雷达常见数据形式总结

速度-时间热力图

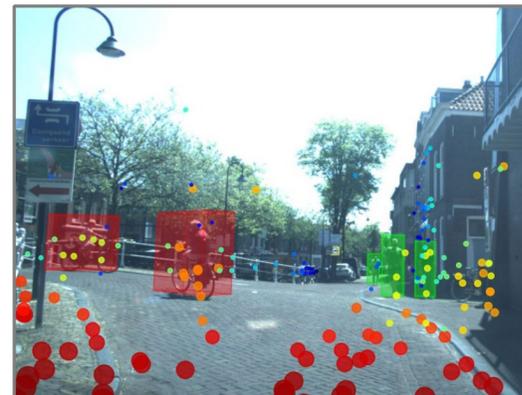


距离-时间热力图

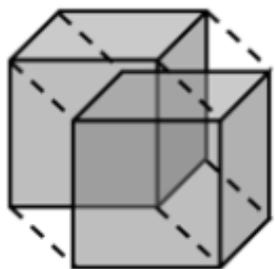
人行走过程中的距离-时间图



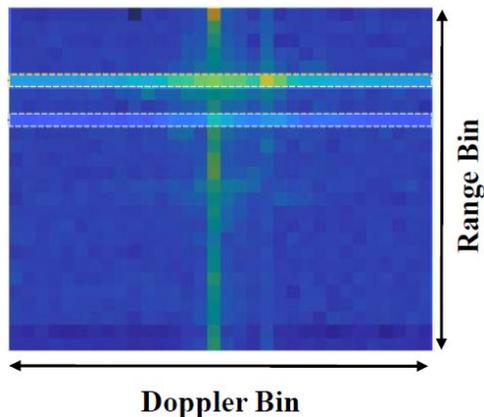
4D点云



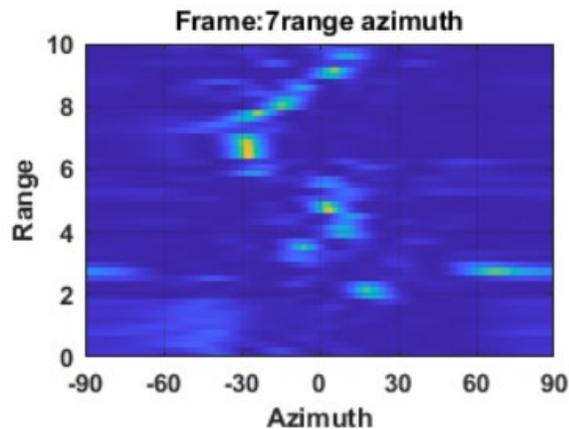
4D热力图



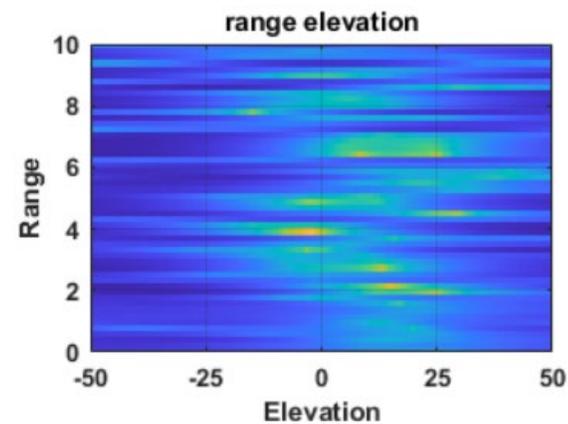
距离-速度热力图



距离-方位角热力图



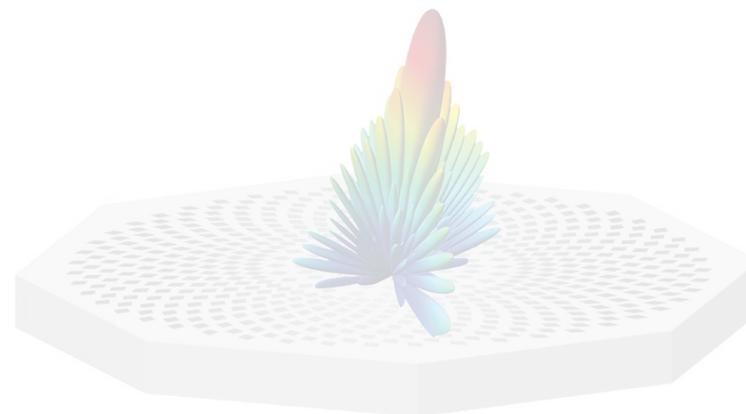
距离-俯仰角热力图



[1] 3-D Motion Capture of an Unmodified Drone with Single-chip Millimeter Wave Radar. ICRA2021

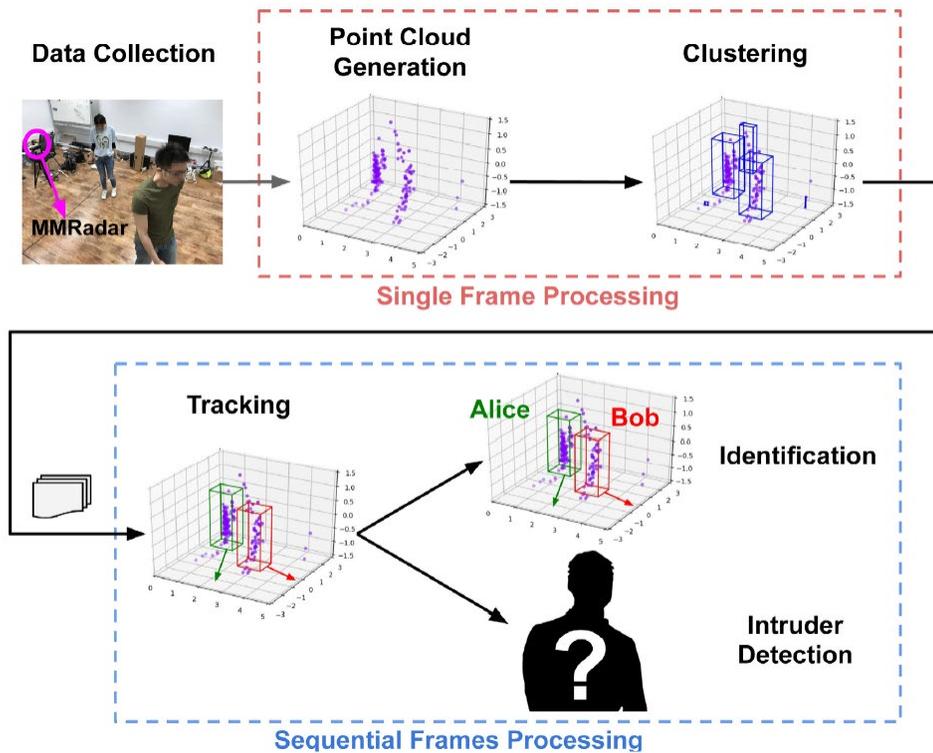
目录

- **背景**
 - 毫米波雷达介绍
 - 毫米波雷达感知
- **毫米波雷达基础知识**
- **毫米波雷达感知任务**
 - 定位与追踪
 - 手势与动作识别
 - 生命体征
 - 成像与建图(SAR与SLAM)
 - 物体识别与语义分割
- **总结**



定位与追踪-人体

室内人体定位与追踪



多人定位与追踪

关键：从雷达视场中提取出动目标

毫米波雷达一般通过**动目标检测算法MTI**(Moving Target Indication)检测人体、汽车等动目标，常见的动目标检测算法有以下三种：

- ❑ 零速度通道置零法。在**距离-速度热力图**中将速度通道中的零速度通道置零，从而将静止物体去除

$$\text{Range_velocity}[:, \text{velocity} == 0] = 0$$

- ❑ 帧间差分法。**两帧之间的原始ADC数据相减**，消除静止不动的物体的相位，保留运动物体的相位变化。1帧通常由128个Chirp信号组成，1帧的时间一般为80ms。

$$\text{Dynamic_Data}[\text{frame}] = \text{Raw_Data}[\text{frame}] - \text{Raw_Data}[\text{frame} - 1]$$

- ❑ 相量均值相消法。首先对所有Chirp信号求出平均参考值，然后**所有Chirp减去这个均值**

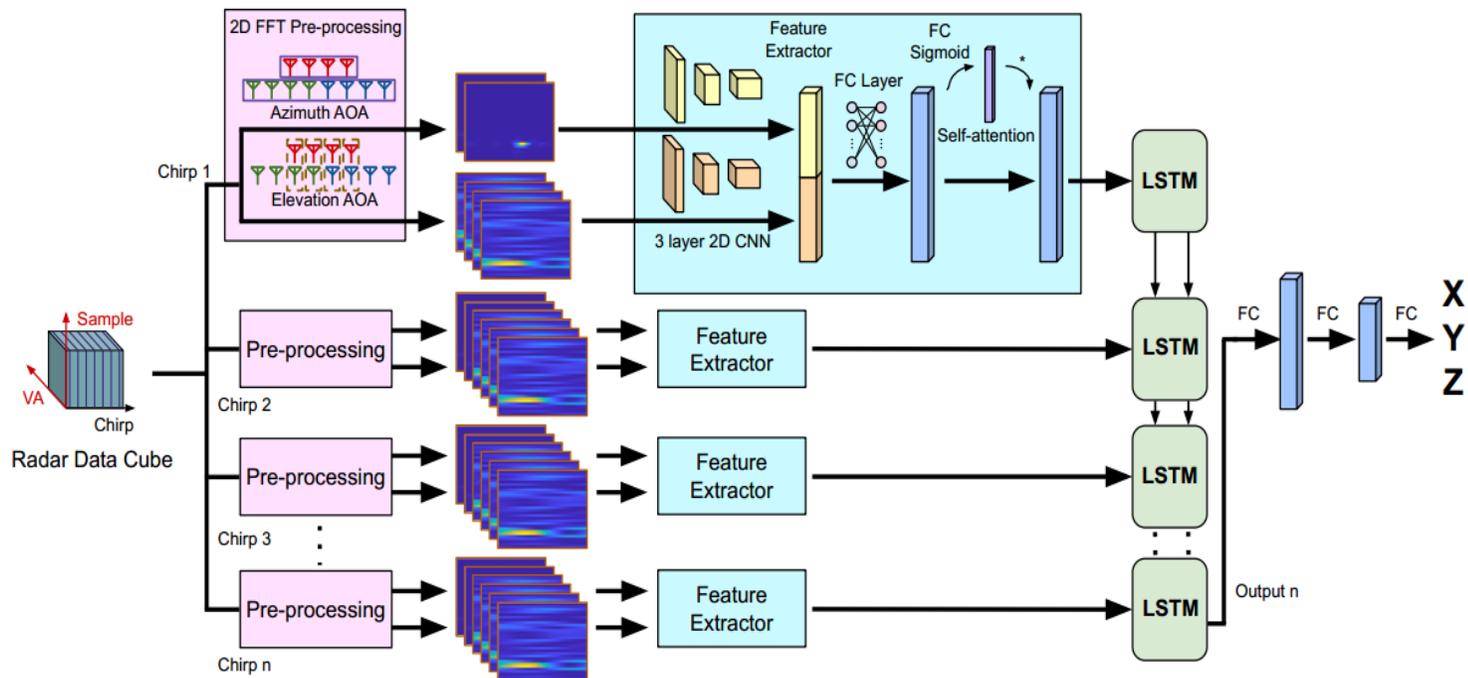
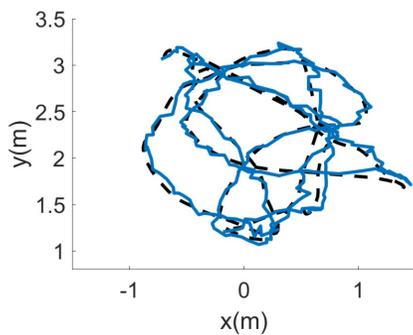
$$\text{Range_velocity}[i, n] = \text{Range_velocity}[i, n] - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{Range_velocity}[i, n]$$

[1] P. Zhao et al., "mID: Tracking and Identifying People with Millimeter Wave Radar," 2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Santorini, Greece, 2019, pp. 33-40, doi: 10.1109/DCOSS.2019.00028.

定位与追踪-低慢小目标

低慢小目标定位与追踪

- “低”使得雷达必须在复杂杂波背景干扰下检测目标，且在较为严重的多径效应下跟踪目标
- “慢”使得目标易受背景杂波影响，难以通过**动目标检测算法MTI**将其和背景杂波区分开
- “小”使得物体的雷达散射截面小，难以与背景噪声区分开来

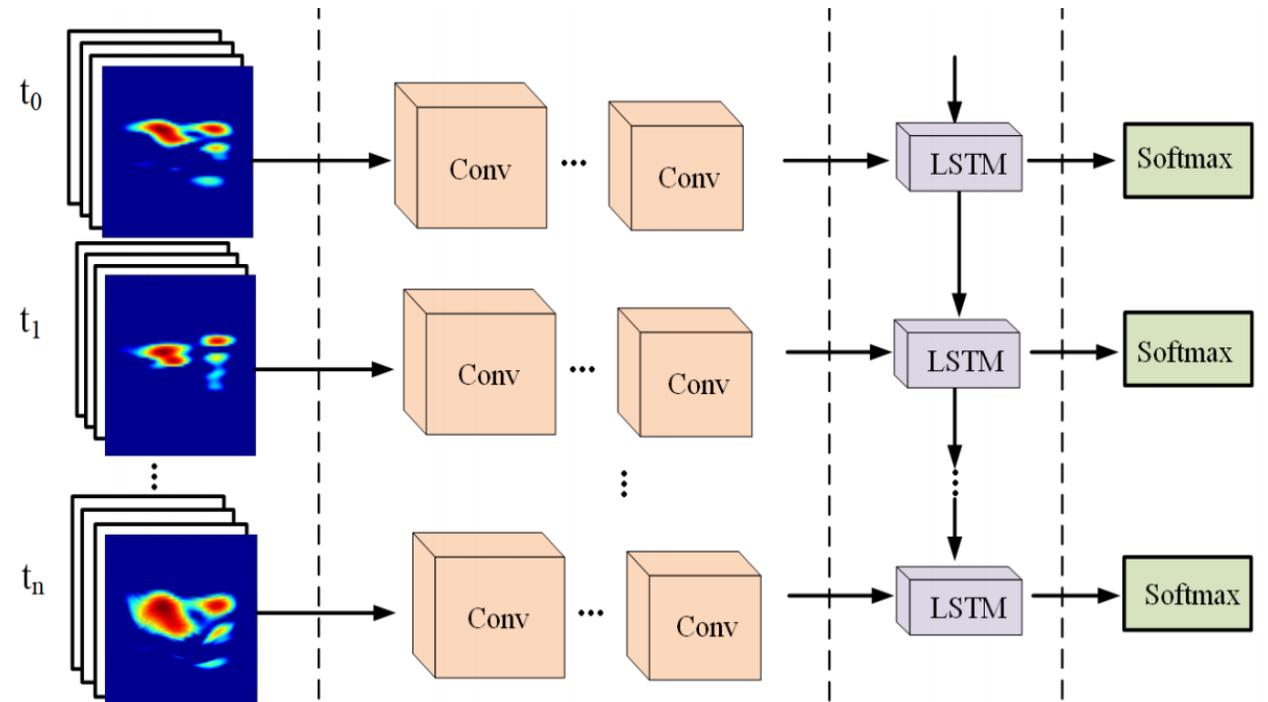
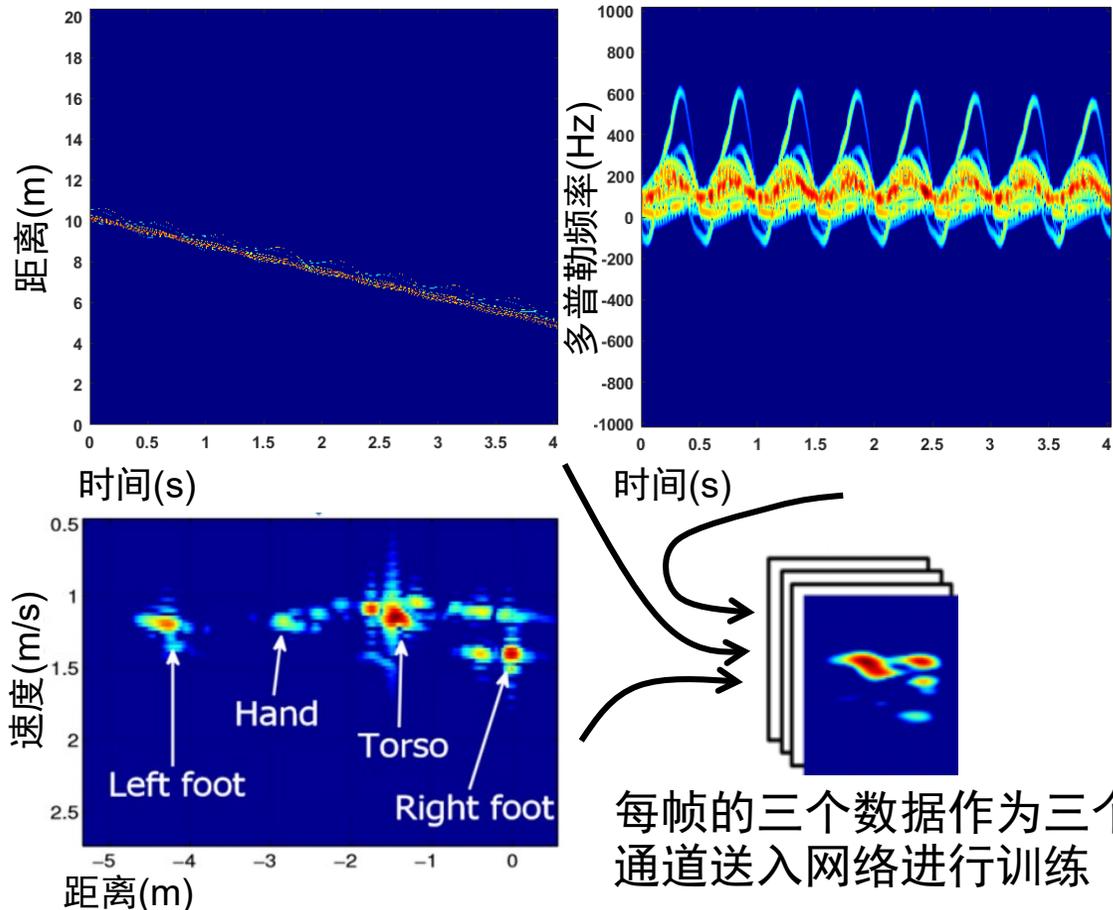


对于每个Chirp，生成**两个距离-方位角热力图**和**四个距离-俯仰角热力图**，分别利用CNN提取特征，并利用自注意力机制提取有用信号消除噪声，每一个Chirp得到一个特征向量。一帧中多个Chirp的特征向量输入到LSTM网络，用于估计3D位置。

关键：通过深度学习从背景杂波中提取出低慢小目标

手势与动作识别

通过计算不同手势和动作的**距离-时间热力图**、**速度-时间热力图**和**距离-速度热力图**直接作为神经网络的训练集，经过训练，即可完成识别任务，较简单

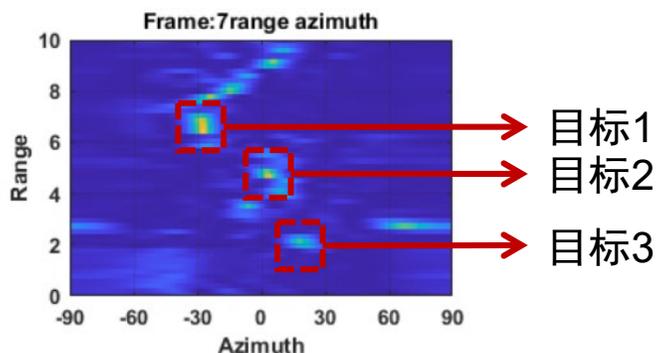


关键：从动作的热力图以及热力图间的时序关系识别出动作

[1] Baiju Yan, Peng Wang, Lidong Du, Xianxiang Chen, Zhen Fang, Yirong Wu. mmGesture: Semi-supervised gesture recognition system using mmWave radar. Expert Systems With Applications. 2023, 213: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119042>.

生命体征

首先通过人体目标检测的算法将不同的检测目标分离



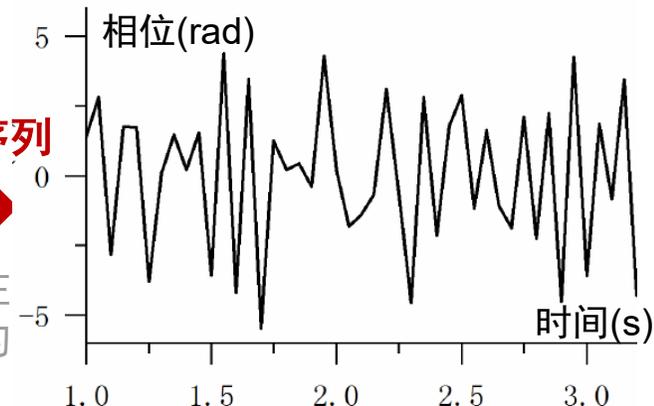
无需FFT等操作，直接通过反正切函数求Range-Azimuth bin中的复数的相位即可：

提取相位信息

$$\varphi = \text{unwrap}[\arctan(\frac{Q}{I})]$$

得到相位时间序列

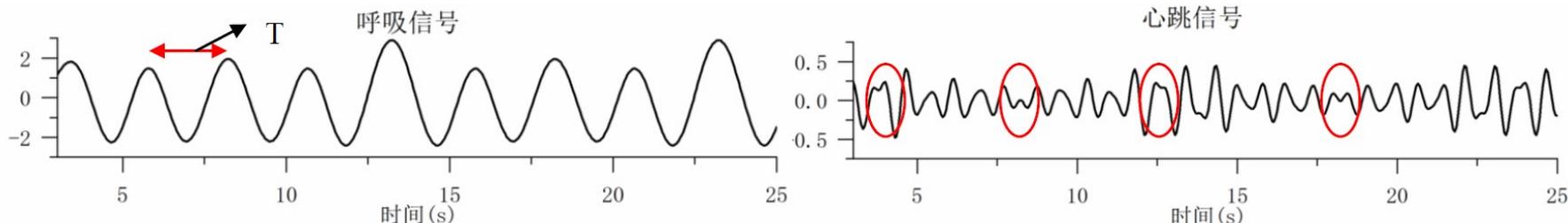
Unwrap函数实现了相位解缠绕。相位缠绕是指角度在通过 π 时发生突然的 2π 跳变变为 $-\pi$ ，使得连续变化的角度出现不连续的现象。



相位为何会变化：每次呼吸与心跳引起的微动 Δd 导致了 $\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta d}{\lambda}$ 。因此通过相位时间序列的周期性变化，我们可以提取出呼吸和心跳速率。由于人体呼吸和心跳频率范围不同，所以设计两个带通滤波器即可得到呼吸和心跳：

成人典型体征信号幅度和频率值

生命体征信号	幅度	频率 (Hz)
呼吸	1-12mm	0.1-0.5Hz
心跳	0.1-0.5mm	0.8-2Hz



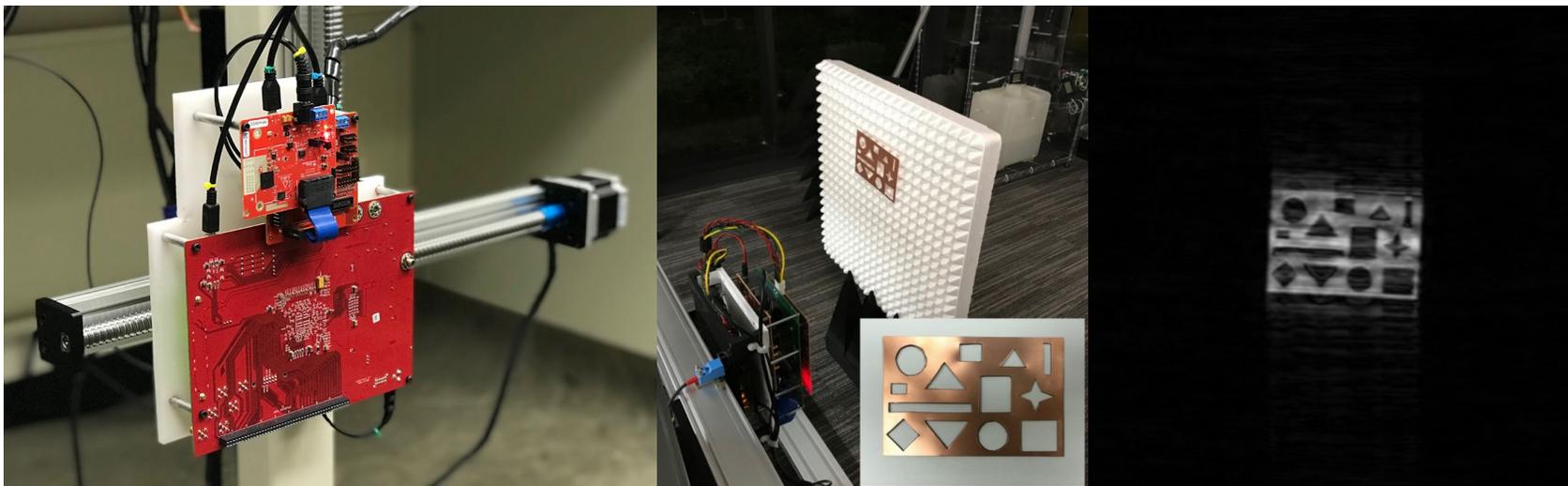
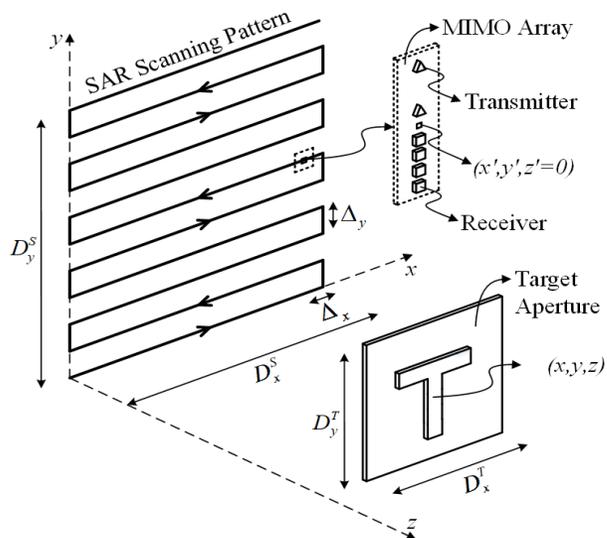
关键：从相位时间序列中提取出呼吸和心跳的频率

[1] F. Wang, X. Zeng, C. Wu, B. Wang and K. J. R. Liu, "Driver Vital Signs Monitoring Using Millimeter Wave Radio," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 13, pp. 11283-11298, 1 July 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3128548.

成像与建图-SAR(Synthetic Aperture Radar)

关键：用不断移动的天线阵元合成一个完整的大孔径阵列

传统的雷达方位向分辨率 = $\frac{\text{目标距离} \times \text{波长}}{\text{天线尺寸}}$ ，假设需要0.1m的分辨率，1GHz信号波长0.3m，距离100m，那么就需要300m的天线尺寸。但我们无法制造300m的天线，因此用不断移动的天线阵元合成一个完整的阵列，这就是**合成孔径雷达**



滑轨位置: x', y' , 目标位置: x, y, z

雷达和滑轨

待成像物体

$p(x, y, z)$

在滑轨的 (x', y') 处从 3D 目标接收到的散射数据: $s(x', y', k) = \iiint p(x, y, z) \frac{e^{j2kR}}{R} dx dy dz, R^{-2} \approx (z_0 R)^{-1}$

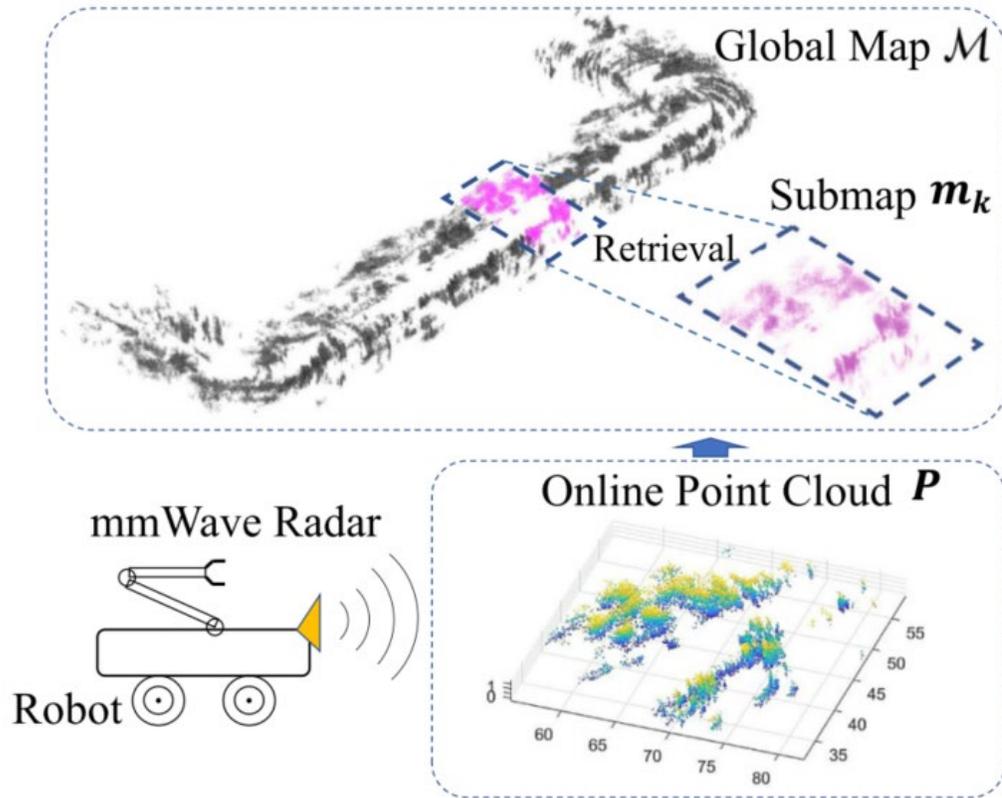
$p(x, y, z)$ 是物体的散射系数分布，SAR成像的目的就是从雷达收到的散射数据 $s(x', y', k)$ 中恢复出 $p(x, y, z)$

大致的计算公式: $p(x, y, z) = IFT_{3D}^{k_x, k_y, k_z} \left[Stolt^{(k)} \left(FT_{2D}^{(x, y)} [s^{(*)}(x', y', k)] \right) \right]$

[1] M. E. Yanik, D. Wang and M. Torlak, "3-D MIMO-SAR Imaging Using Multi-Chip Cascaded Millimeter-Wave Sensors," 2019 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), Ottawa, ON, Canada, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/GlobalSIP45357.2019.8969133.

成像与建图-SLAM(Simultaneous localization and mapping)

毫米波雷达生成点云实现**场景重建**与**自身定位**



当前时刻生成点云: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $p_i = [r_i, v_i, \phi_i, \theta_i]$
对于静止的点, 其速度可表示为:

$$v_i = [\sin\theta_i \cos\phi_i \quad \cos\theta_i \cos\phi_i \quad \sin\phi_i] \begin{bmatrix} v_x^b \\ v_y^b \\ v_z^b \end{bmatrix}$$

其中 v_x^b, v_y^b, v_z^b 是雷达在三个方向上的移动速度

可通过大量的 $[v_i, \phi_i, \theta_i]$ 进行回归得到 v_x^b, v_y^b, v_z^b , 从而计算雷达自身的轨迹, 实现**自身定位**

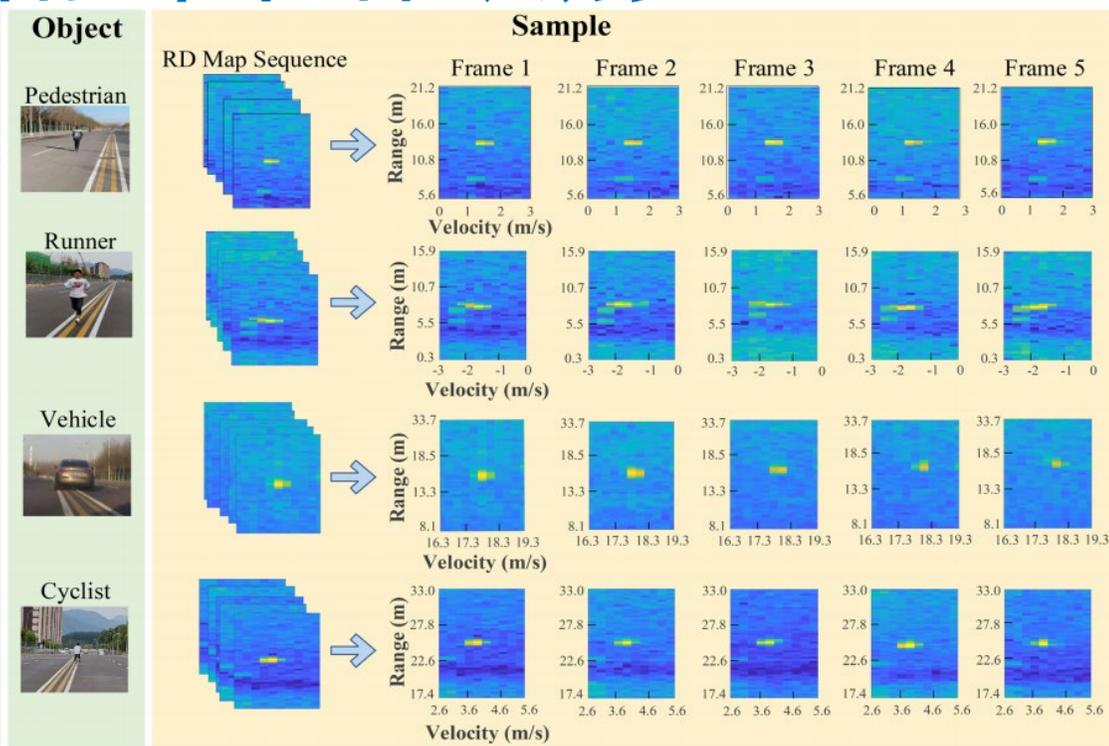
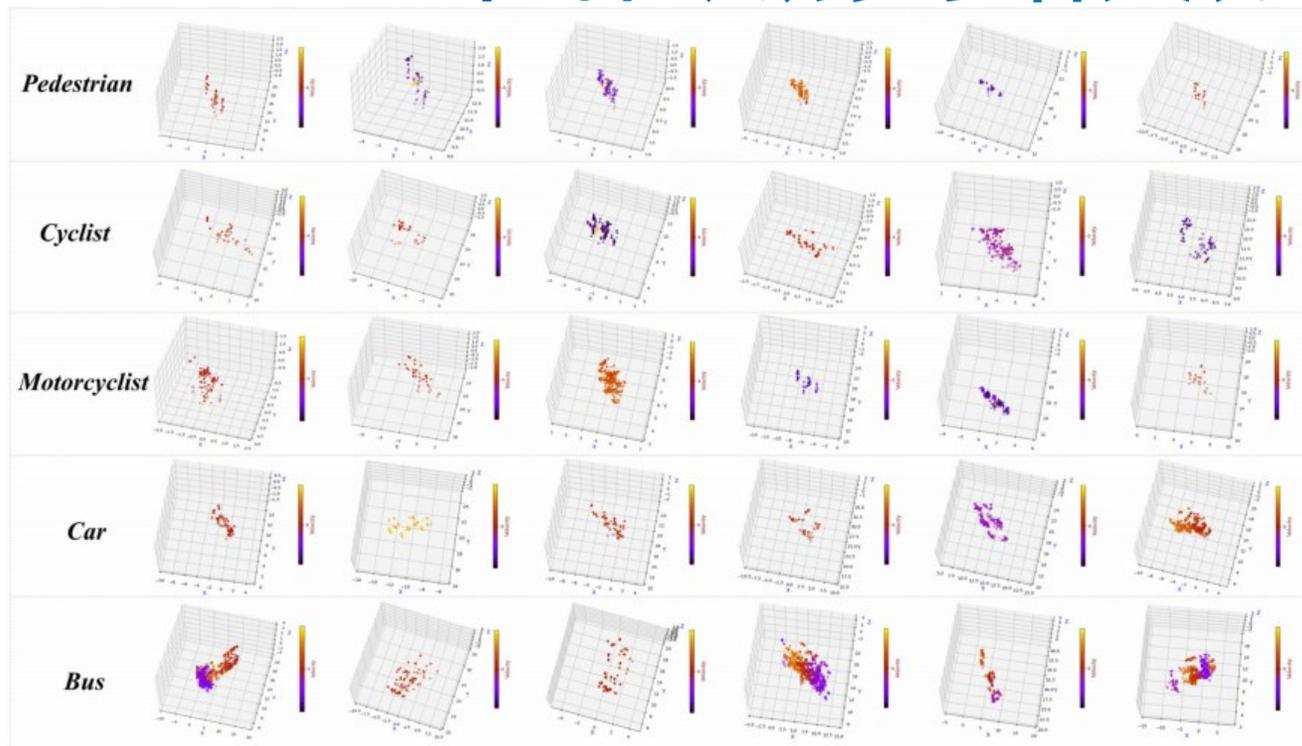
场景重建, 大致分为两步:

1. 将当前时刻生成的点云 P 中的典型特征与已经建立好的点云图库 M 中的典型特征进行匹配, 来更正当前点云整体姿态
 2. 将更正姿态后的 P 纳入点云图库 M 中
- 不断迭代1和2, 实现场景重建**

关键: 根据当前时刻点云估算自身的速度以达到自身定位的目的, 融合不同时刻的点云以实现场景重建

[1] Cheng, Y., Pang, C., Jiang, M. & Liu, Y. (2023) Relocalization based on millimeter wave radar point cloud for visually degraded environments. Journal of Field Robotics, 40, 901–918. <https://doi.org/10.1002/rob.22162>.

物体识别与语义分割-单物体识别



对不同物体的4D点云进行训练，实现物体识别

对不同物体的距离-速度热力图进行训练，实现物体识别

仅需识别单物体场景中的物体，无需识别同一场景中的多个物体

关键：对单个物体的点云/热力图进行训练，无需打语义标签，只需标注某个点云/热力图是什么类别即可

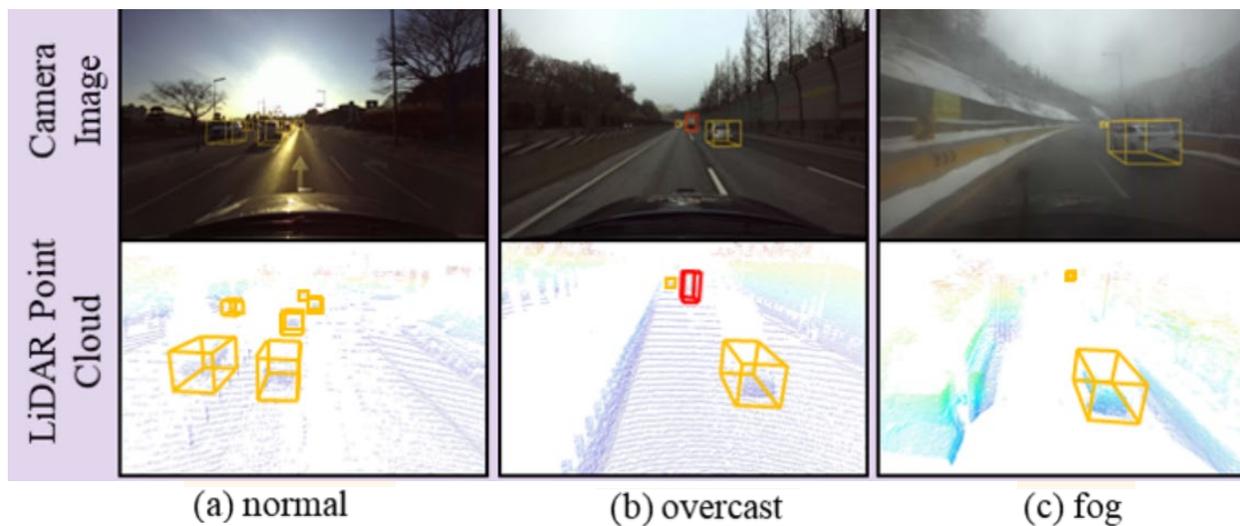
[1] Wang Y, Han C, Zhang L, Liu J, An Q, Yang F. Millimeter-wave radar object classification using knowledge-assisted neural network. Front Neurosci. 2022 Dec 22;16:1075538. doi: 10.3389/fnins.2022.1075538. PMID: 36620441; PMCID: PMC9815772.

[2] Arab H, Ghaffari I, Chioukh L, Tatu S, Dufour S. Machine Learning Based Object Classification and Identification Scheme Using an Embedded Millimeter-Wave Radar Sensor. Sensors (Basel). 2021 Jun 23;21(13):4291. doi: 10.3390/s21134291. PMID: 34201765; PMCID: PMC8272183.

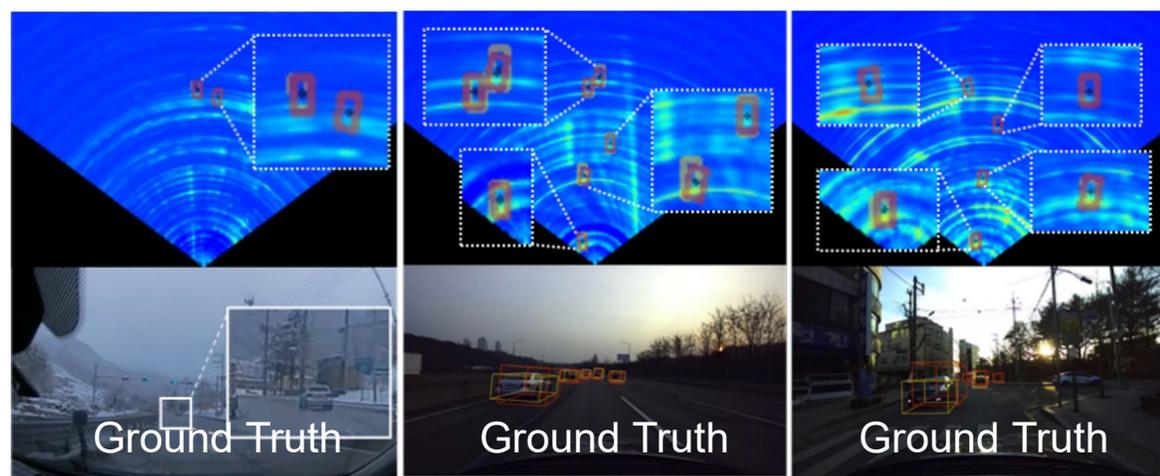
物体识别与语义分割-基于4D热力图与4D点云的多物体识别

通过采集大量场景的4D热力图数据，并配合激光雷达和视觉进行跨模态监督。即激光雷达和摄像头的的数据仅在训练阶段使用，在推理阶段仅使用4D毫米波雷达

三个场景下相机和激光点云所对应的语义标签



4D热力图检测结果 4D热力图检测结果 4D热力图检测结果

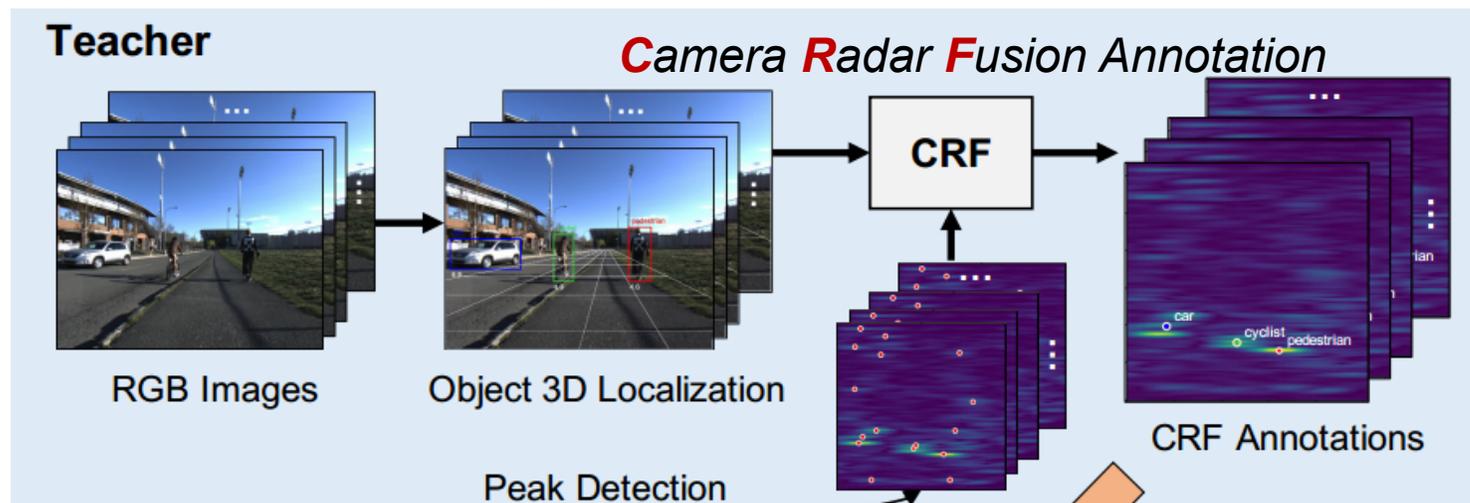


关键：需要通过跨模态监督打语义标签。在点云场景中，要标明每个位置的点云是什么物体的概率为多大。在热力图场景中就是要标明热力图中每个像素点是什么物体的概率为多大

如何跨模态打语义标签

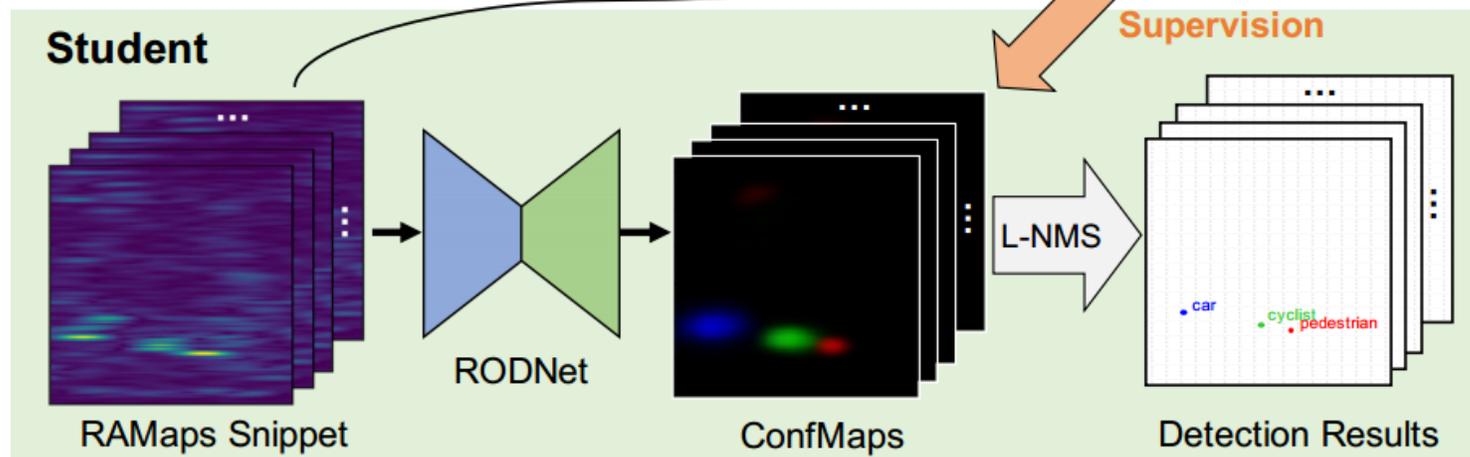
RODNet: Radar Object Detection using Cross-Modal Supervision

利用摄像头进行跨模态监督



得到雷达-视觉联合语义标签

距离-方位角
热力图



语义分割结果

[1] Y. Wang, Z. Jiang, X. Gao, J. -N. Hwang, G. Xing and H. Liu, "RODNet: Radar Object Detection using Cross-Modal Supervision," 2021 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), Waikoloa, HI, USA, 2021, pp. 504-513, doi: 10.1109/WACV48630.2021.00055.

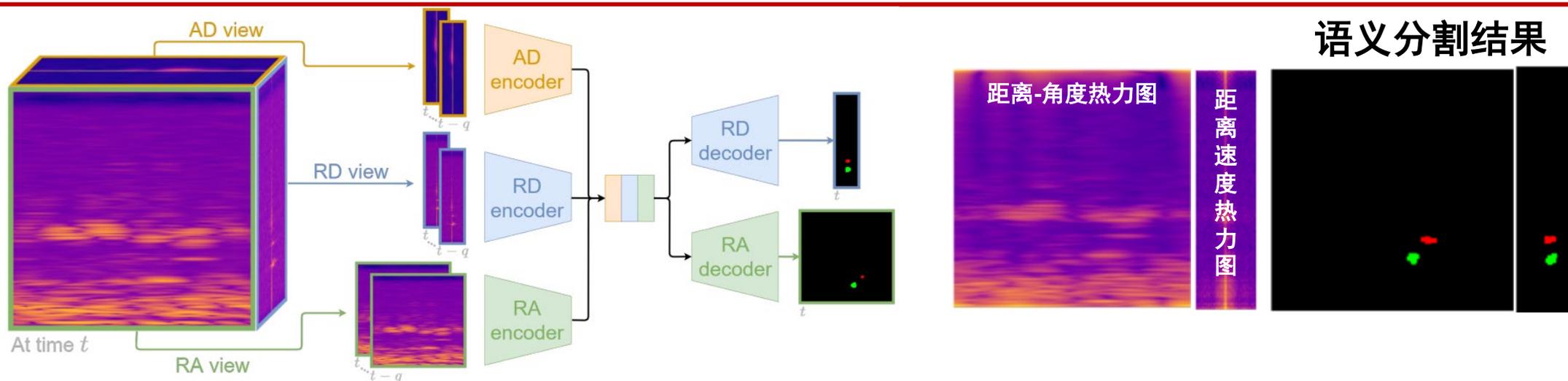
物体识别与语义分割-基于2D热力图的多物体识别

但不论是4D热力图还是4D点云在物体识别场景中都存在一定缺陷

❑ 4D热力图需要的计算资源过大

❑ 4D点云图丢失了部分有用信息；并且需要预处理，这对于扩展数据集，增强泛化能力是不利的

解决方法：从4D热力图的不同视角得到**距离-速度热力图**、**距离-方位角热力图**、**距离-俯仰角热力图**进行联合估计，这样既保证了原始数据的相对完整性，又保证了数据处理的效率，达到了性能和效率之间的trade off。对2D热力图按照物体类别进行分割，这种应用场景被称作毫米波语义分割。

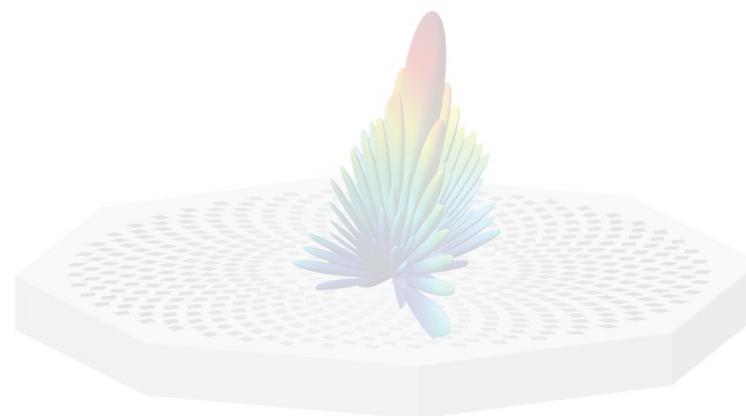


[1] A. Ouaknine, A. Newson, P. Pérez, F. Tupin and J. Rebut, "Multi-View Radar Semantic Segmentation," 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 15651-15660, doi: 10.1109/ICCV48922.2021.01538.

[2] Paek, Dong-Hee et al. "Enhanced K-Radar: Optimal Density Reduction to Improve Detection Performance and Accessibility of 4D Radar Tensor-based Object Detection." 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (2023): 1-6.

目录

- **背景**
 - 毫米波雷达介绍
 - 毫米波雷达感知
- **毫米波雷达基础知识**
- **毫米波雷达感知任务**
 - 定位与追踪
 - 手势与动作识别
 - 生命体征
 - 成像与建图(SAR与SLAM)
 - 物体识别与语义分割
- **总结**



总结

背景

- 介绍毫米波雷达
- 毫米波雷达与其他感知器的对比

毫米波雷达基础知识

- 4D毫米波雷达信号处理的基本流程
- 距离-时间热力图、多普勒-时间热力图、4D点云图、4D 热力图、距离-速度热力图、距离-方位角热力图、距离-俯仰角热力图共7种常见的毫米波数据形式

毫米波感知场景具体介绍

- 定位与追踪
- 手势与动作识别
- 生命体征
- 成像与建图(SAR与SLAM)
- 物体识别与语义分割

室内分布式毫米波语义分割DIMSSNet

- 语义分割模块
- 虚假目标消除模块

Thanks for your attention

