

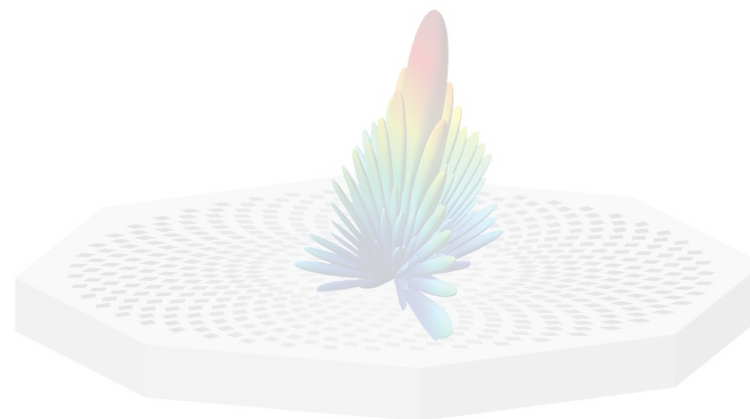
毫米波雷达感知

张粟桐



目录

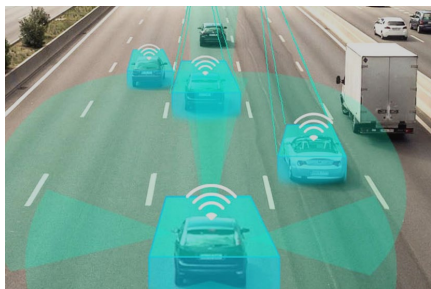
- **背景**
 - 毫米波雷达介绍
 - 毫米波雷达感知
- **毫米波雷达基础知识**
- **毫米波雷达感知任务**
 - 定位与追踪
 - 手势与动作识别
 - 生命体征
- **总结**



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



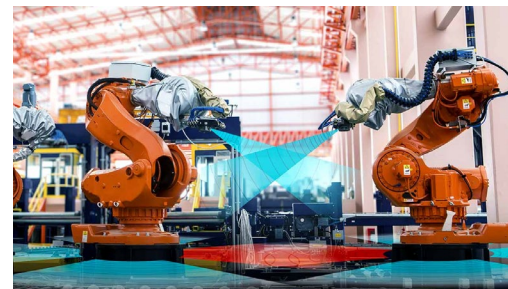
自动驾驶



智慧城市

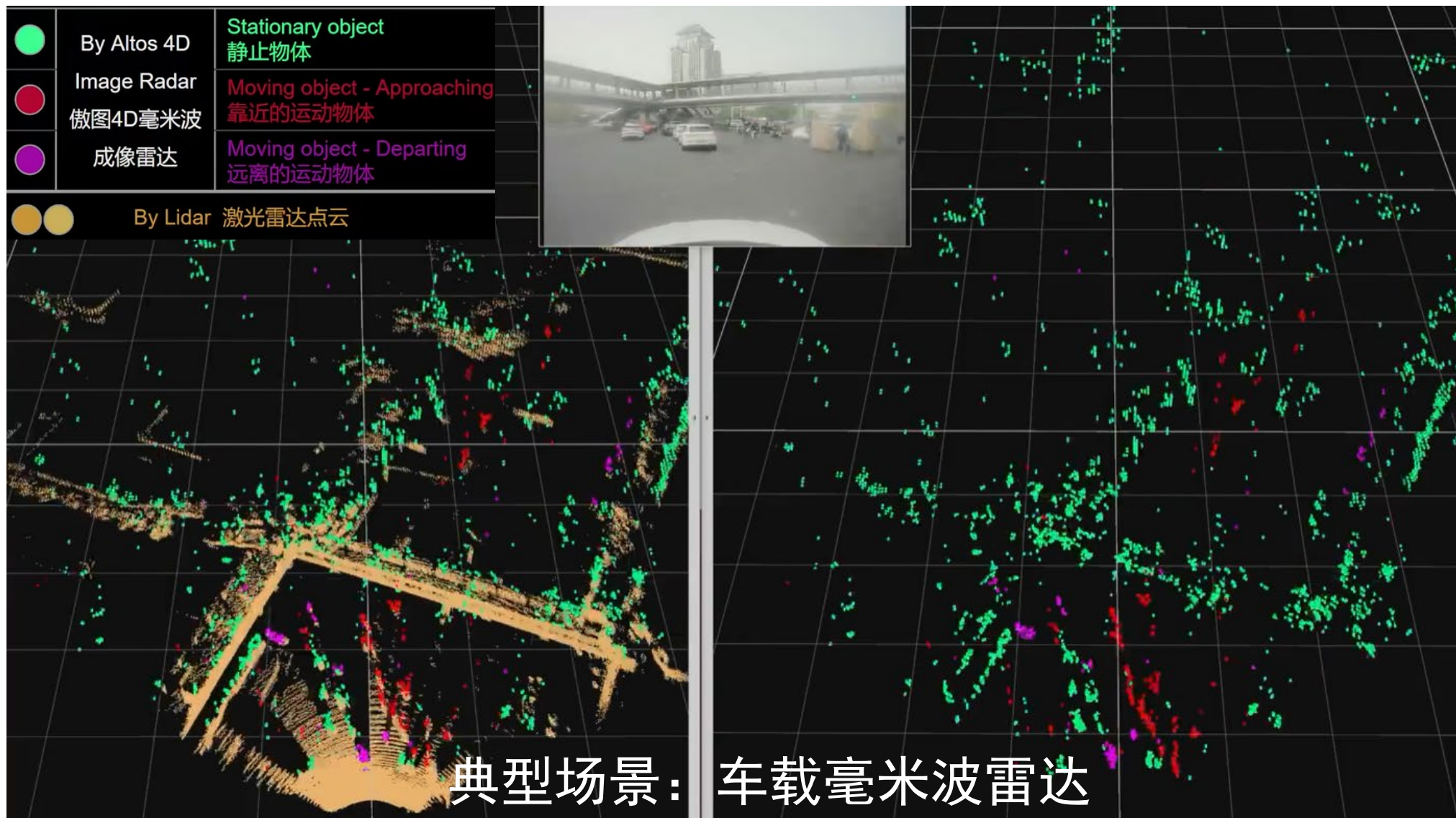


智能家居



智慧工厂

毫米波雷达介绍



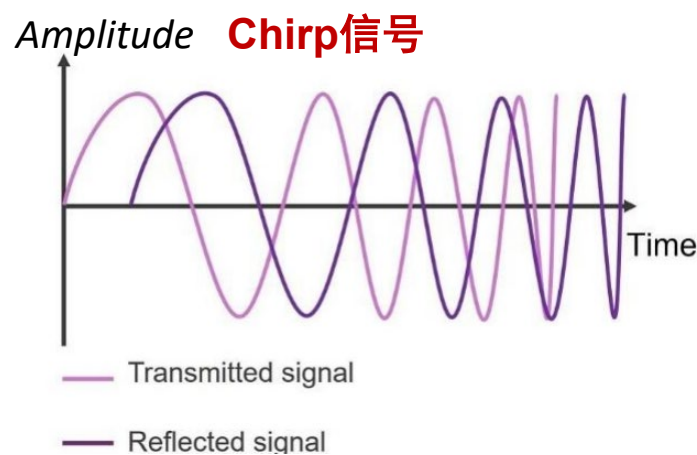
毫米波雷达介绍

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：

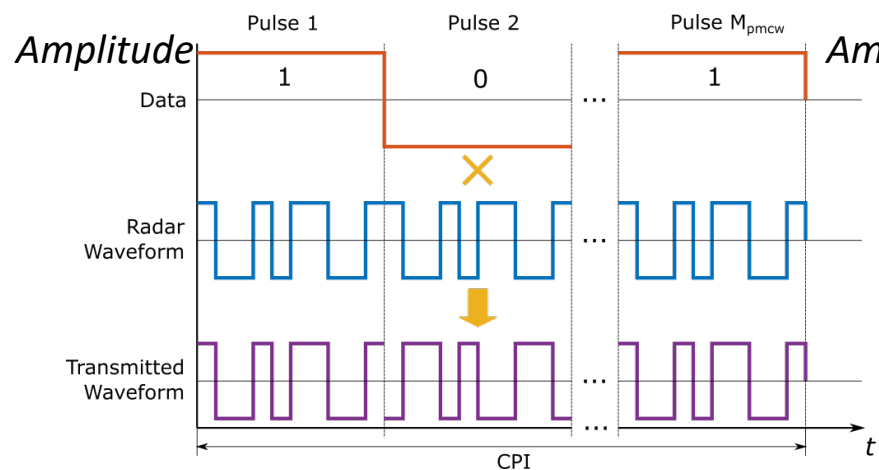
- 工作频段：常用的毫米波雷达频段为24GHz、60GHz和77GHz这三个频段
- 收发天线：收发一体雷达(Monostatic Radar)和收发分置雷达(Bistatic Radar)



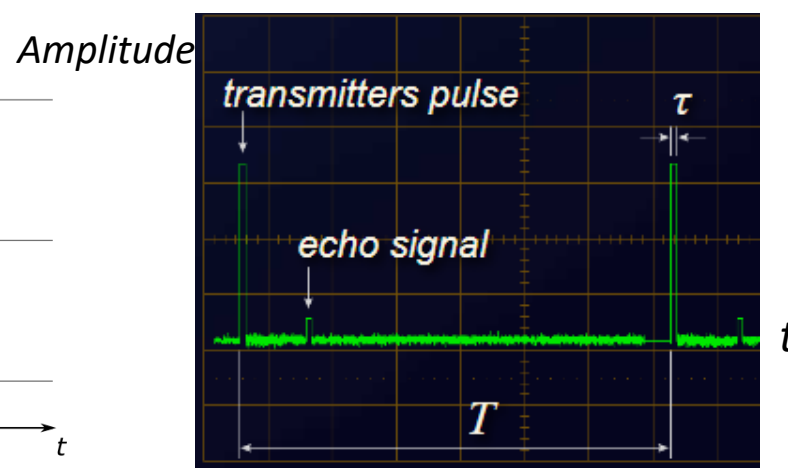
- 调制方式：根据调制电磁波方式的不同，毫米波雷达主要分为脉冲波调制和连续波调制，其中连续波调制雷达分为PMCW(调相连续波)雷达和FMCW(调频连续波)雷达



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

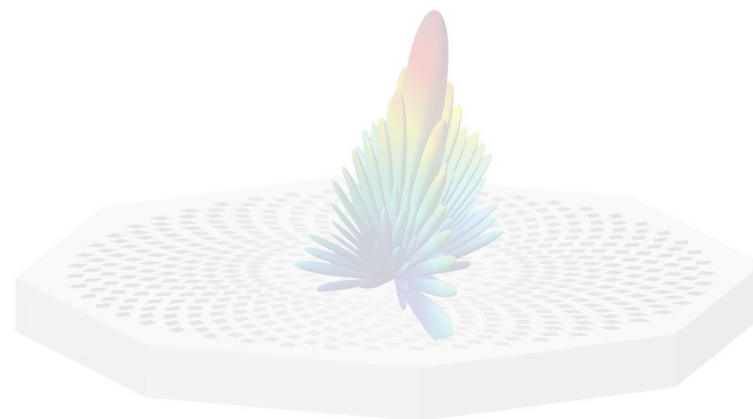
RF 信号的距离分辨率 $\Delta d \propto B^{-1}$

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

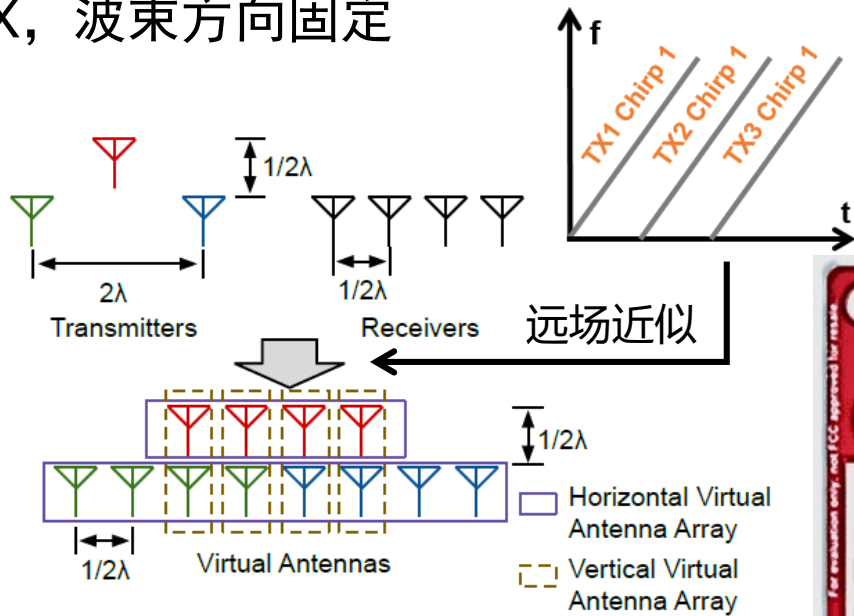
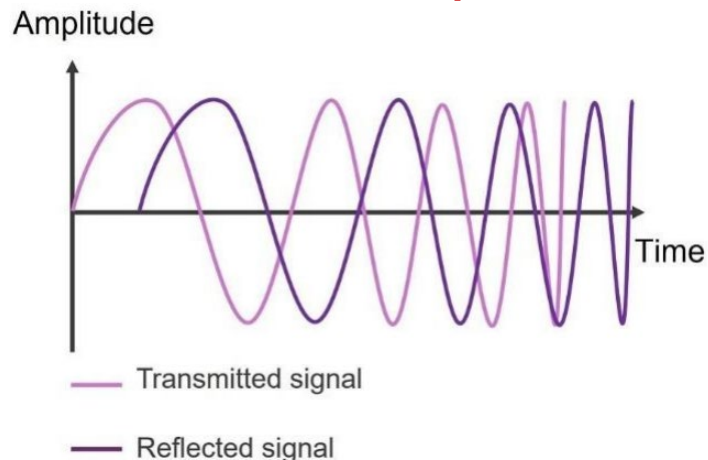
- 背景
 - 毫米波雷达介绍
 - 毫米波雷达感知
- 毫米波雷达基础知识
- 毫米波雷达感知任务
 - 定位与追踪
 - 手势与动作识别
 - 生命体征
- 总结



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

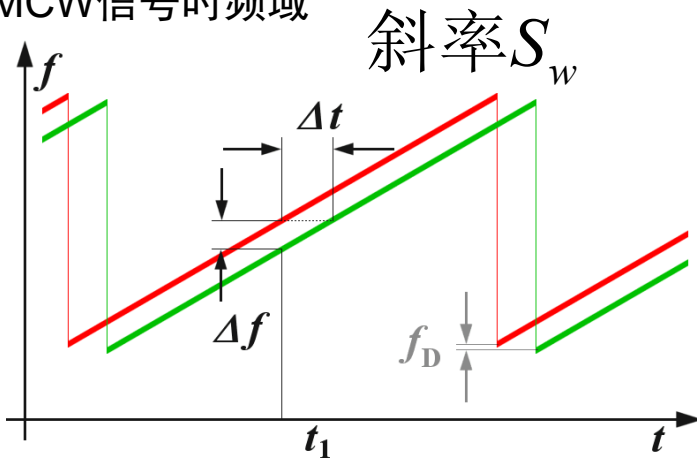
FMCW信号时域 Chirp信号



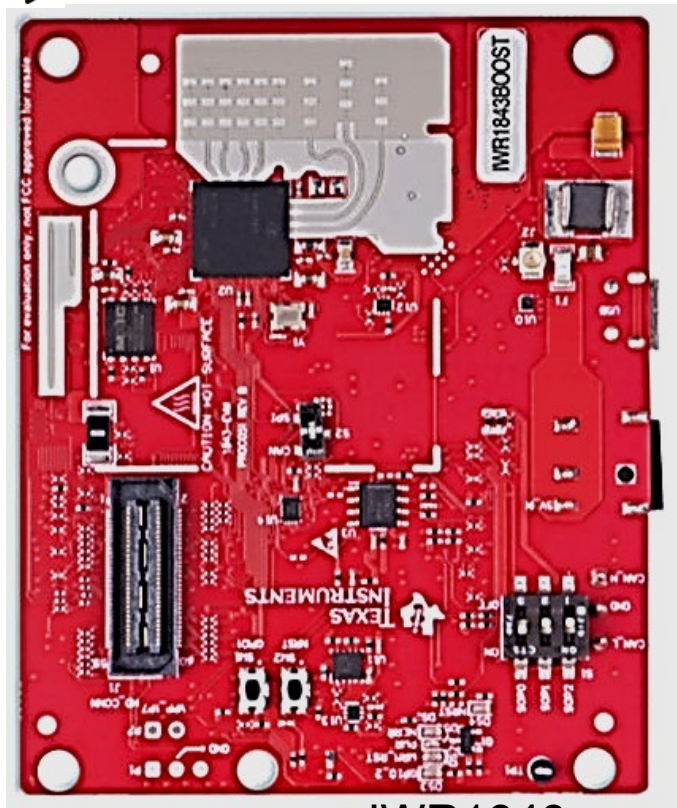
TX1, TX2, TX3发射TDM的FMCW信号和RX1, RX2, RX3, RX4通道构成12通道的MIMO虚拟阵列

4RX 3TX

FMCW信号时频域



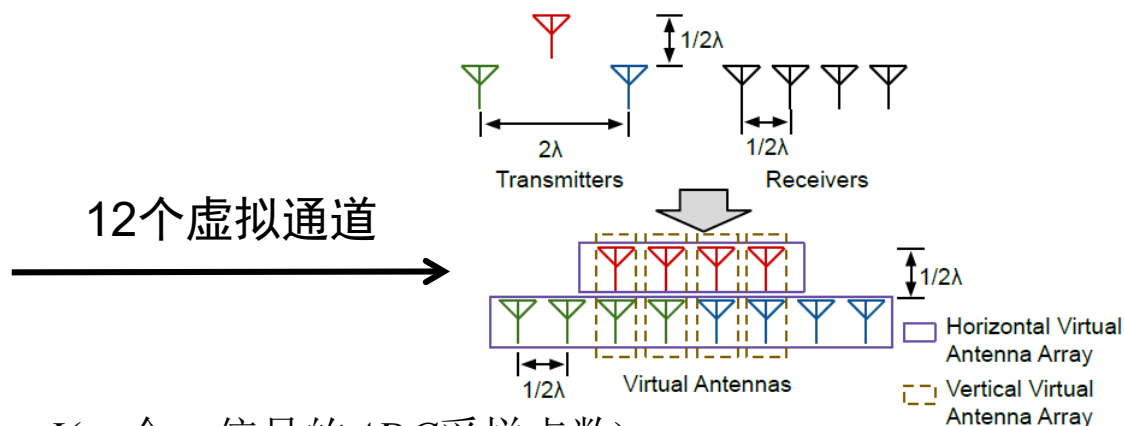
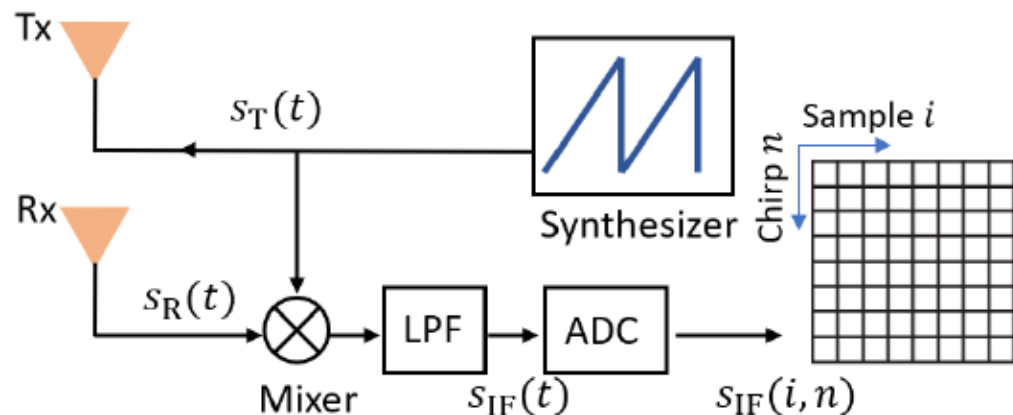
参数名称	参数范围
频段 (GHz) 记作 f_c	77-78.79892
带宽 (GHz)	1.79892
发射功率 (dBm)	12
发射波形	FMCW
斜率 (MHz / μs) 记作 S_w	29.982
发射天线数量	3
接收天线数量	4



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)

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

↓ 传播

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

↓ 混频

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

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

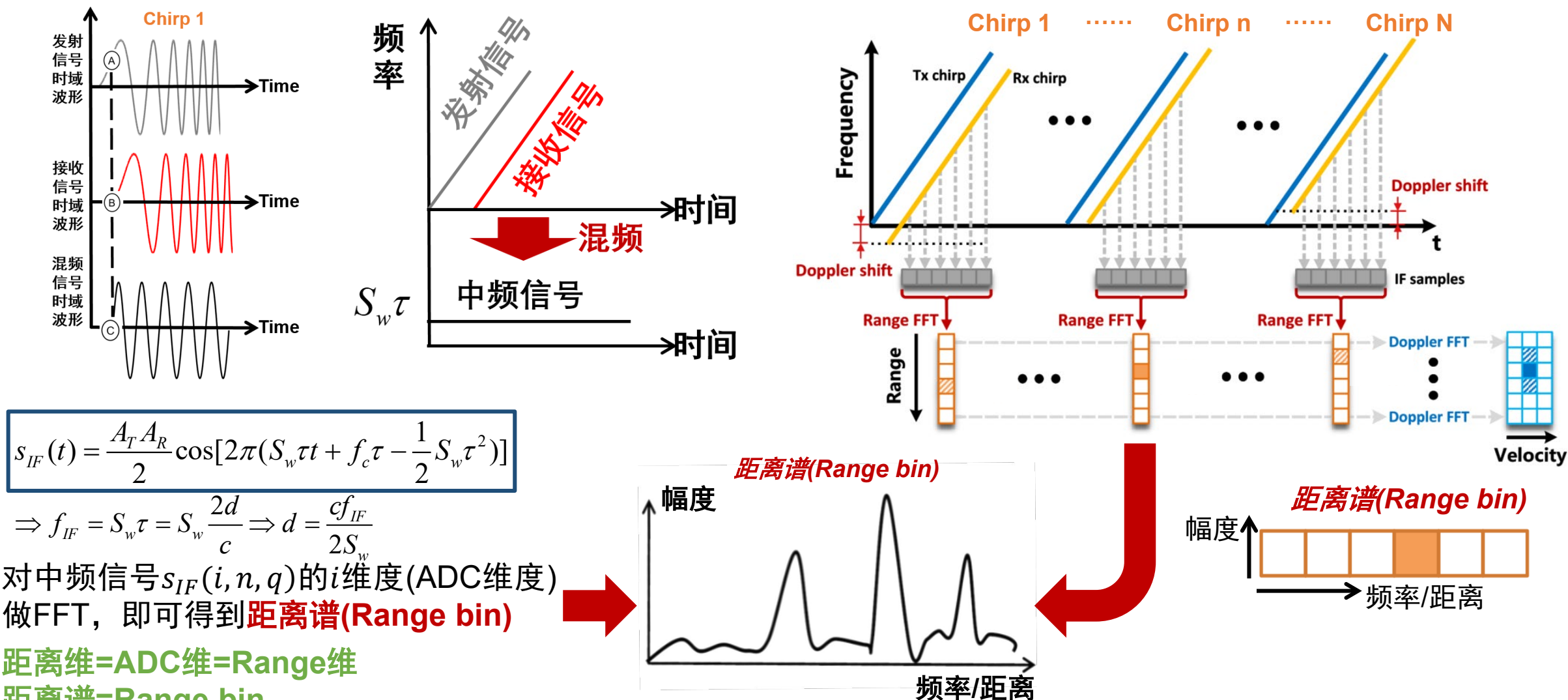
↑ 12个虚拟通道

发射多个Chirp信号
ADC采样

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

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



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

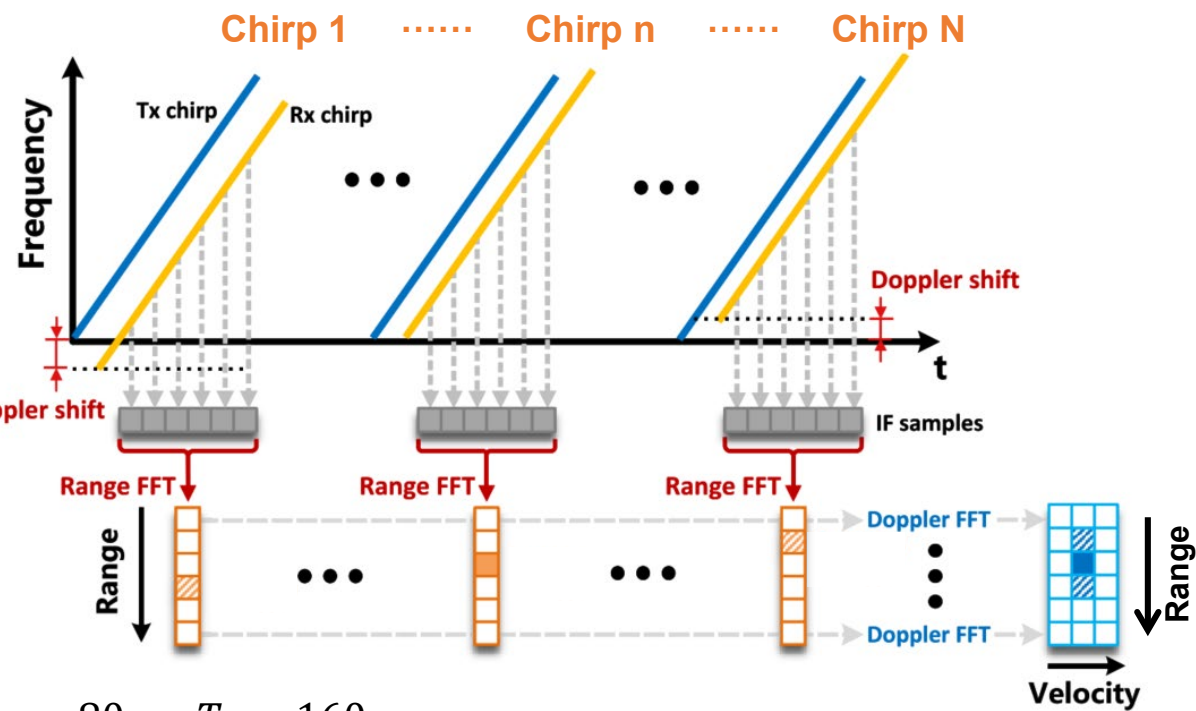
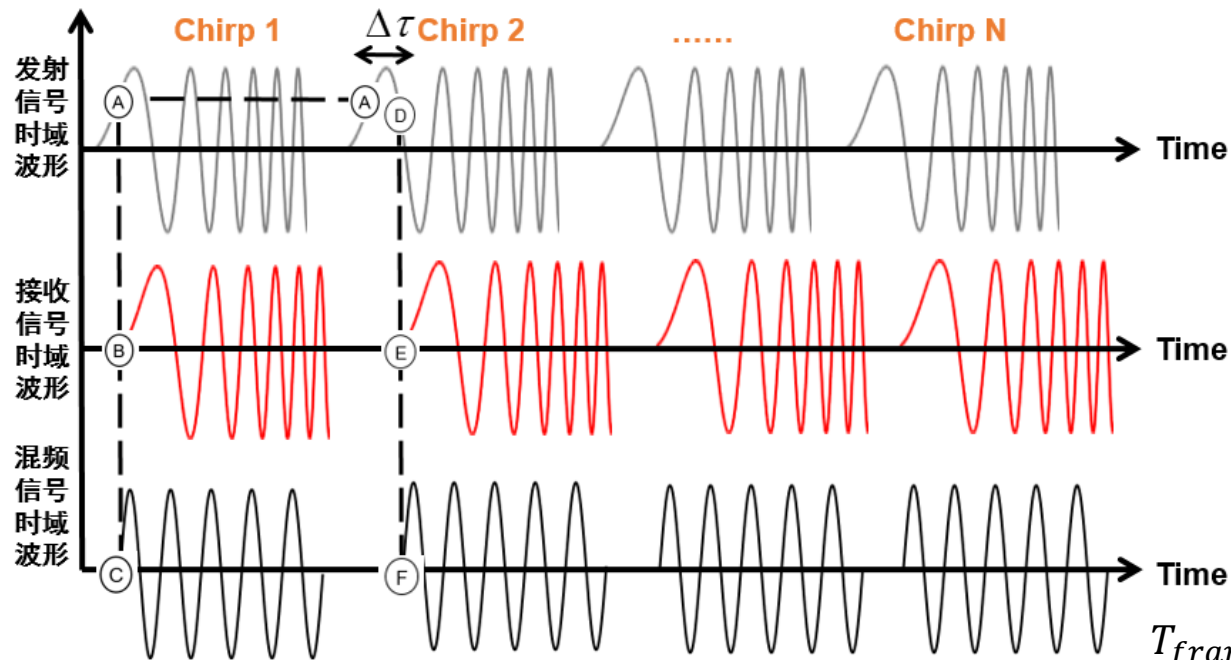
$$\Rightarrow f_{IF} = S_w \tau = S_w \frac{2d}{c} \Rightarrow d = \frac{c f_{IF}}{2 S_w}$$

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: $\Delta\phi = 2\pi f_c \Delta\tau = \frac{4\pi\Delta d}{\lambda} = \frac{4\pi v T_C}{\lambda} \Rightarrow v = \frac{\lambda \Delta\phi}{4\pi T_C}$

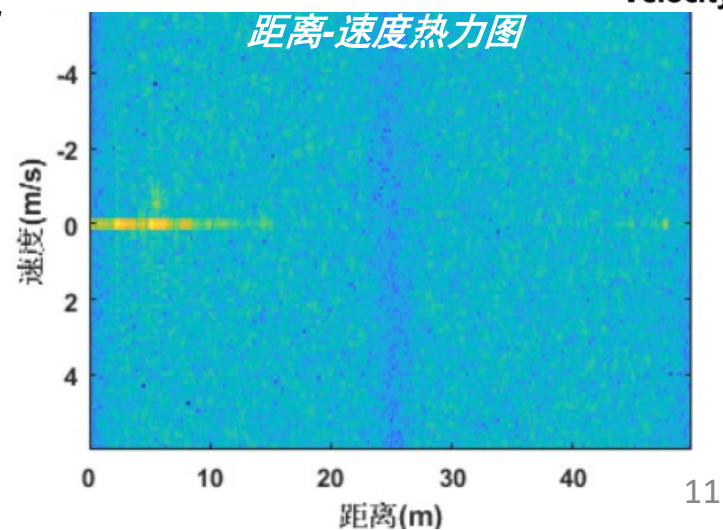
相位差 $\Delta\phi$ 和多普勒频率 f_d 存在关系: $\Delta\phi = 2\pi f_d T_C \Rightarrow v = \frac{f_d \lambda}{2}$, 因此可以通过 $s_{IF}(i, n, q)$ 中 n 维度(Chirp维度)的FFT计算多普勒频率 f_d , 从而计算速度 v

距离维=ADC维=Range维

距离谱=Range bin

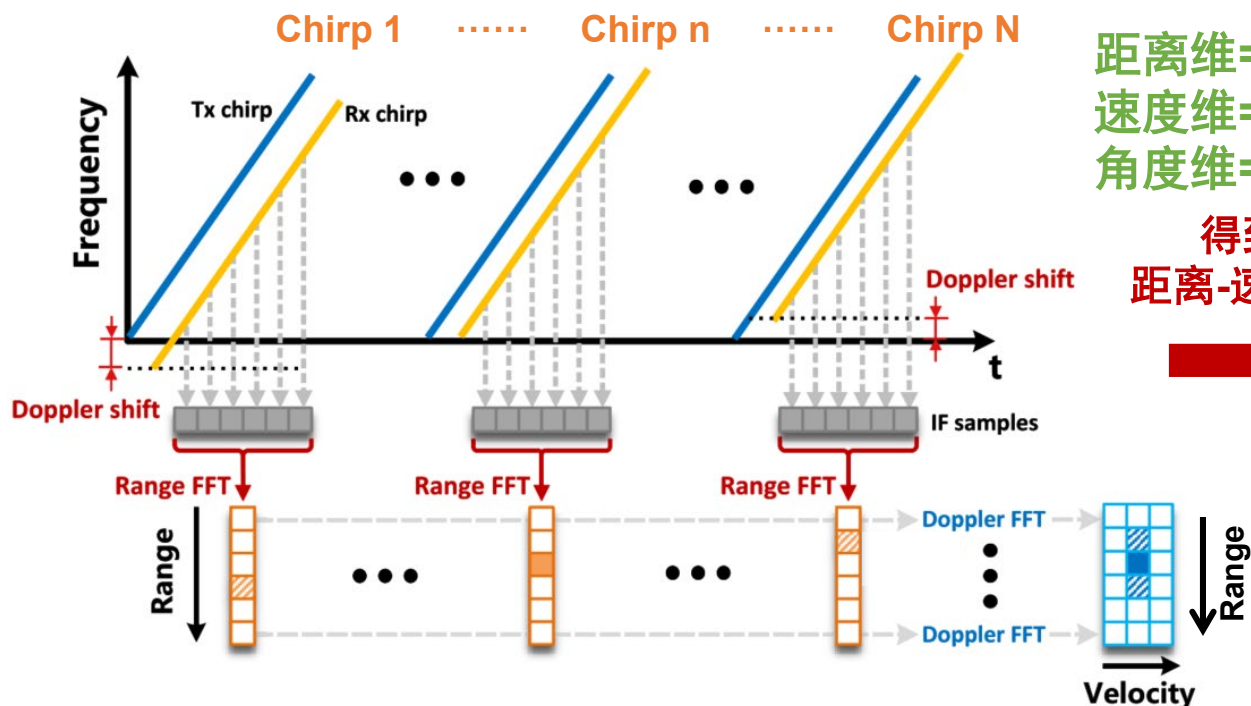
速度维=Chirp维=Doppler维

距离-速度谱=Range-Doppler bin



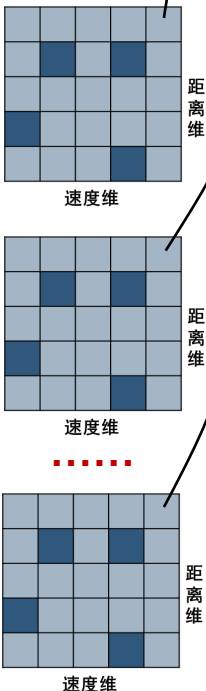
角度估计

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

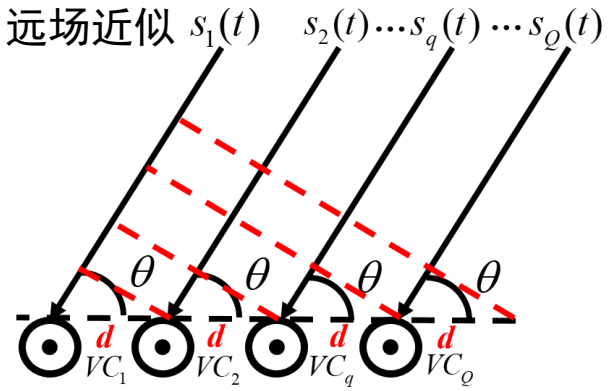
1x12的数组

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



VC: Virtual Channel Q=12

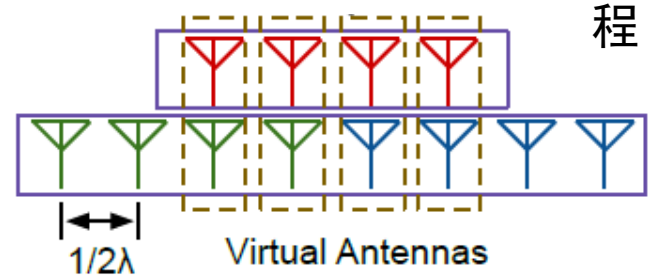
以线阵天线为例，相邻虚拟通道之间的接收信号存在相位差 $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos\theta \Rightarrow \theta = \cos^{-1}(\frac{\lambda \Delta\phi}{2\pi d})$

可以使用FFT/MUSIC等DOA估计算法得到角度

1x12的数组 角度估计



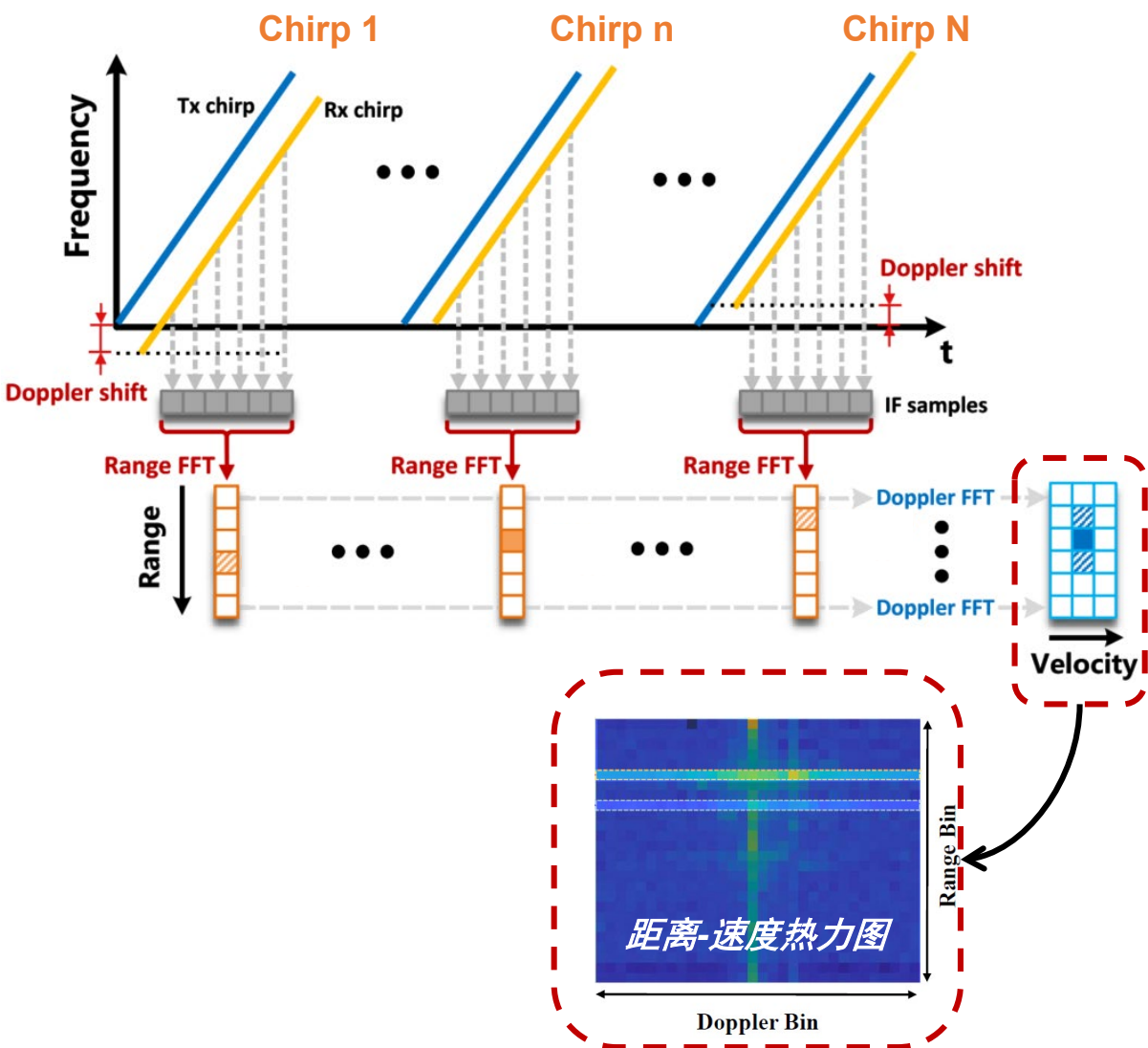
第i个距离索引和第n个速度索引对应的角度是多少



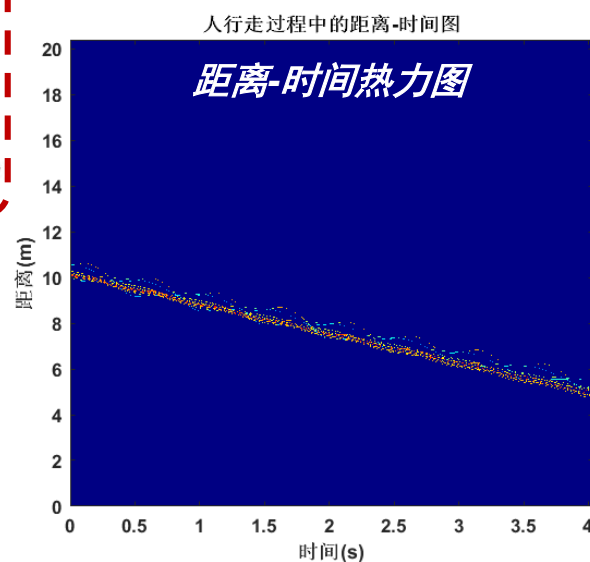
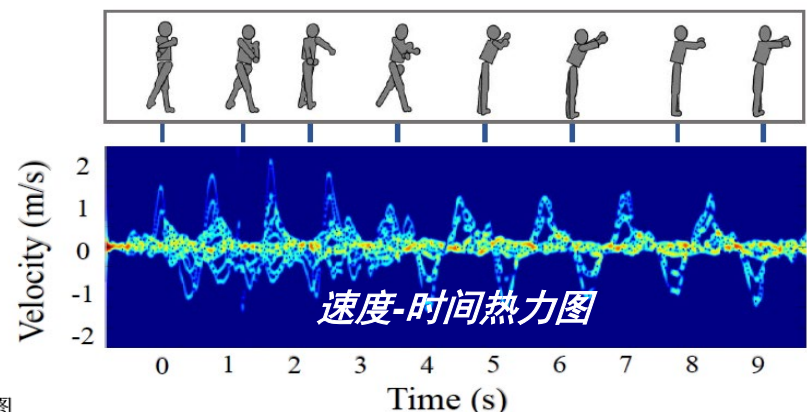
哪4D: 距离(Range)、速度(Doppler)、方位角(Azimuth)、俯仰角(Elevation)

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**

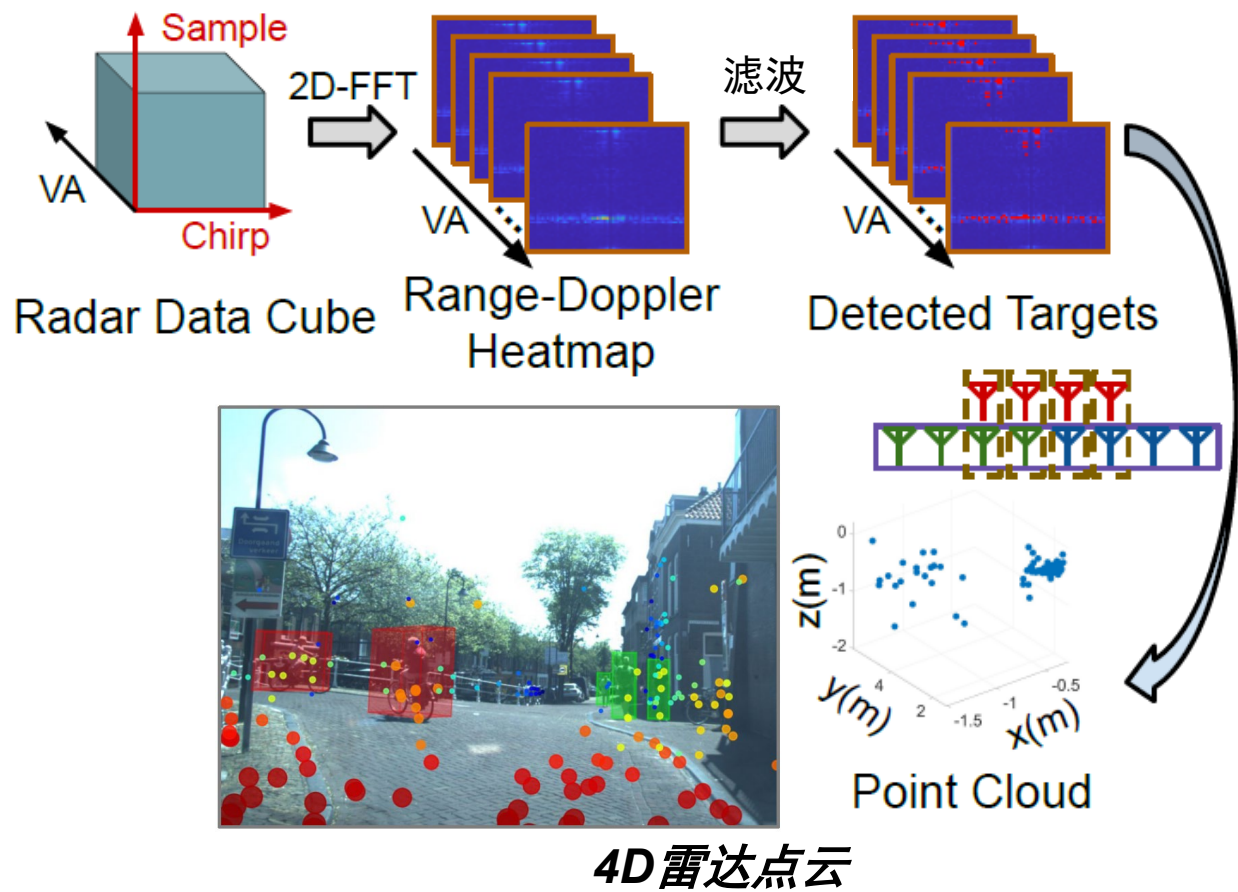


对每帧得到的距离-速度热力图分别在速度维和距离维压缩后，**将所有帧的距离谱和速度谱进行拼接**，得到**距离-时间热力图**和**速度-时间热力图**（也称作微多普勒图）表示目标在雷达照射下的运动特性随时间的变化

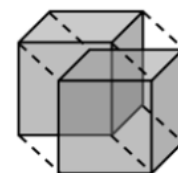


4D 点云图、4D热力图、2D热力图

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)

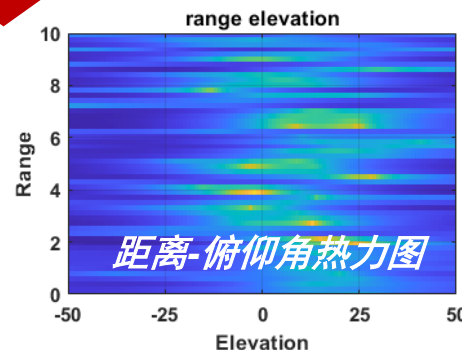
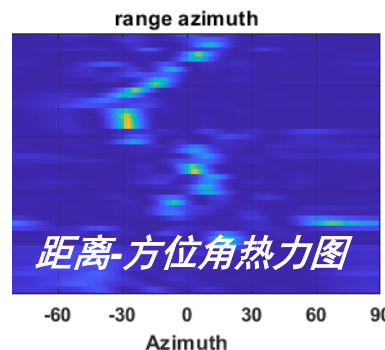


如果我们中间不做滤波的话，得到的就是4D的热力图



4D热力图/张量/tensor

从4D热力图的不同角度观察它



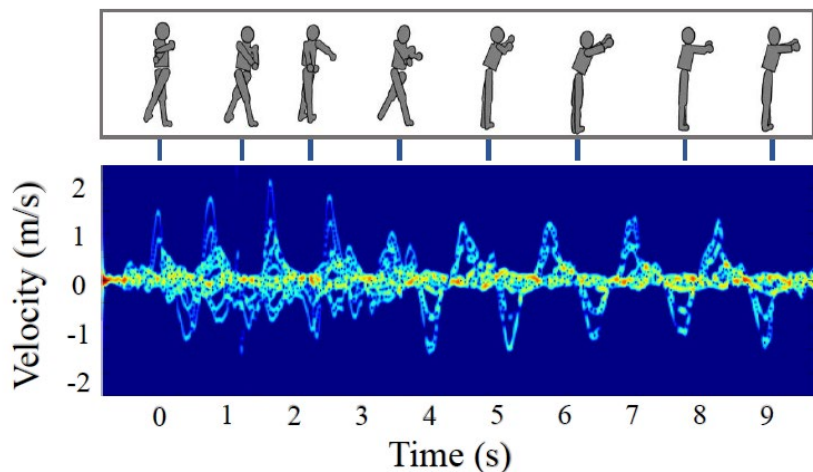
2D热力图

[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

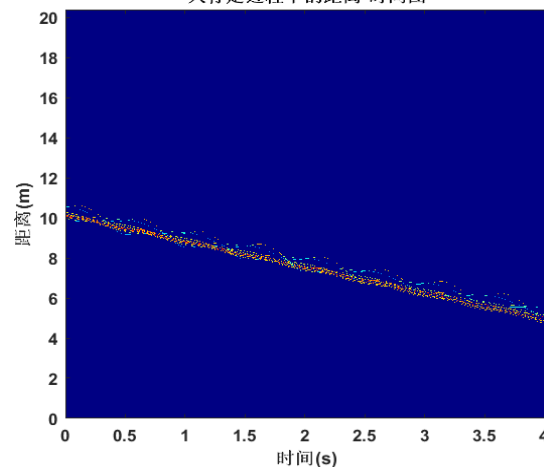
毫米波雷达常见数据形式总结

速度-时间热力图

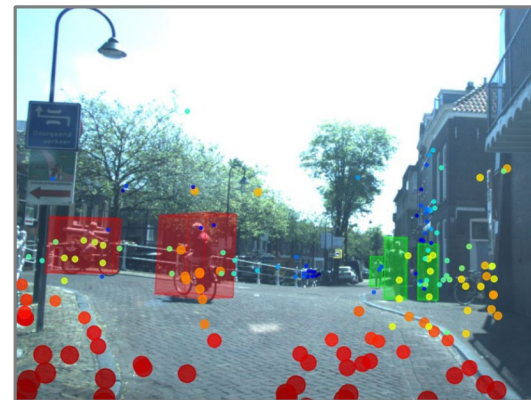


距离-时间热力图

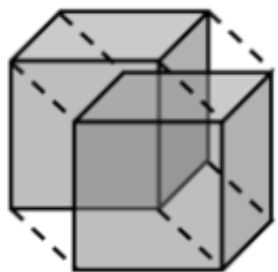
人行走过程中的距离-时间图



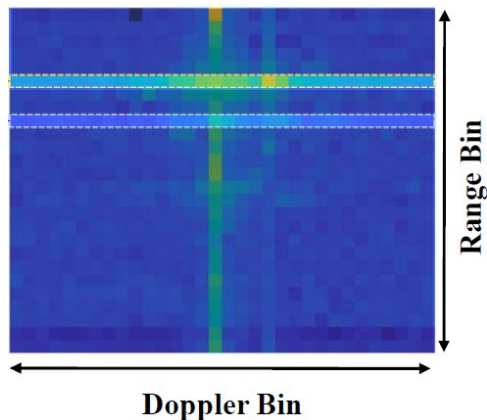
4D点云



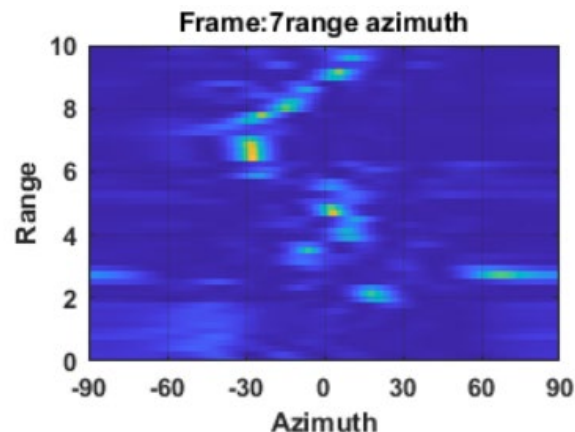
4D热力图



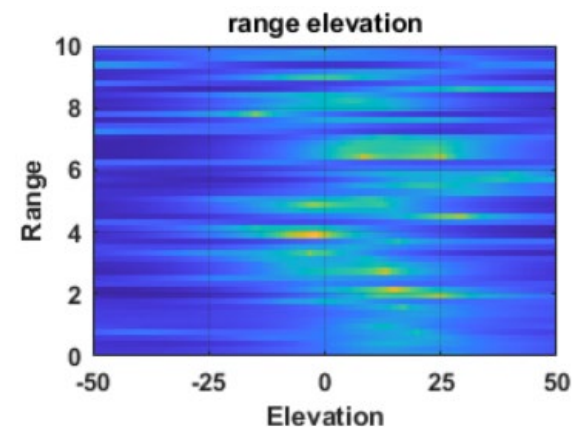
距离-速度热力图



距离-方位角热力图

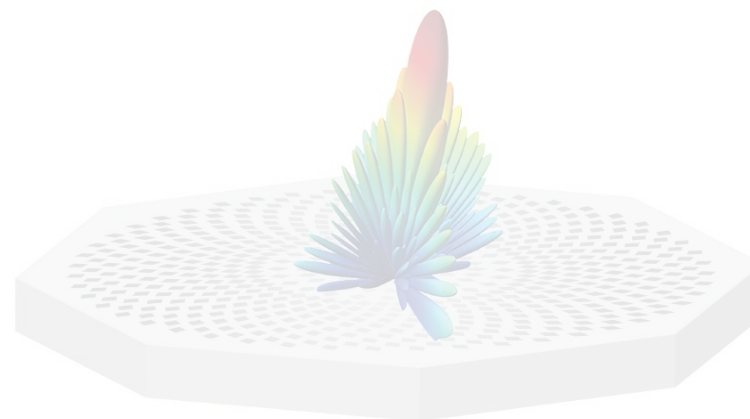


距离-俯仰角热力图



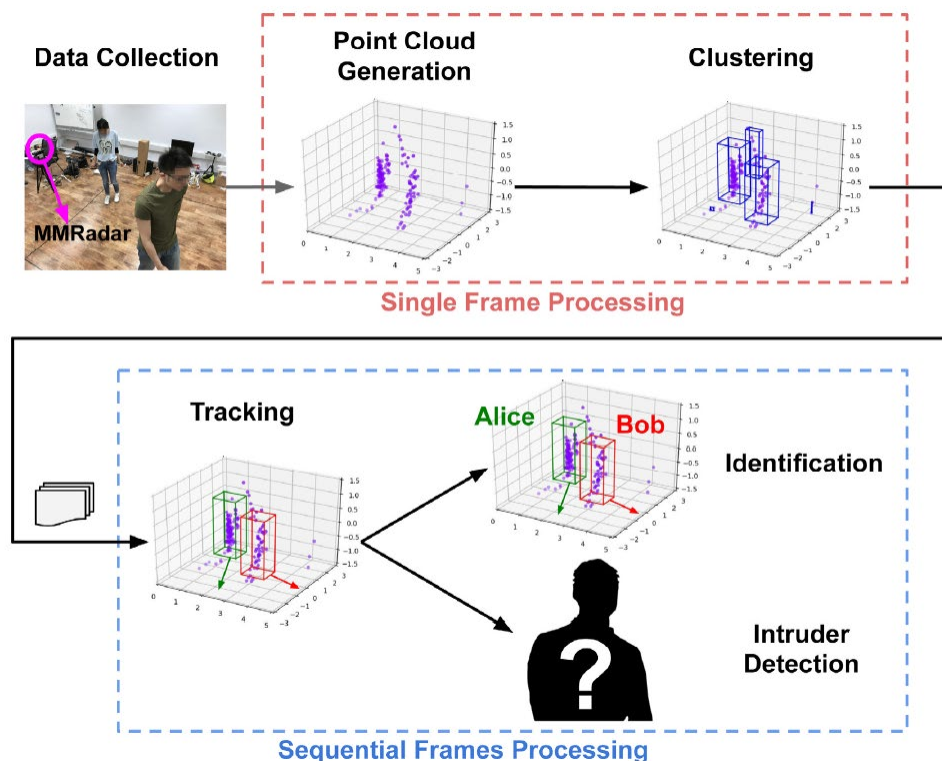
目录

- 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
- 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

$$Range_velocity[:, velocity == 0] = 0$$

- ❑ 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。

$$Dynamic_Data[frame] = Raw_Data[frame] - Raw_Data[frame - 1]$$

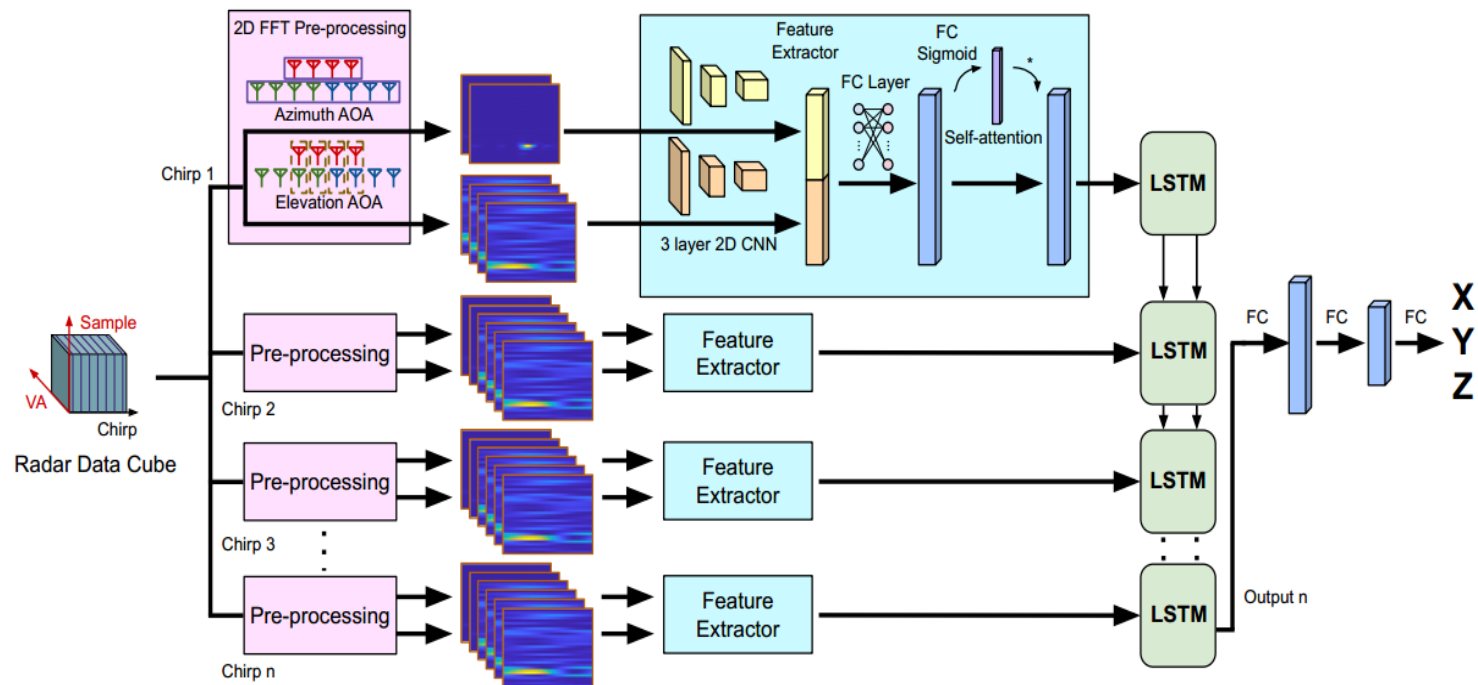
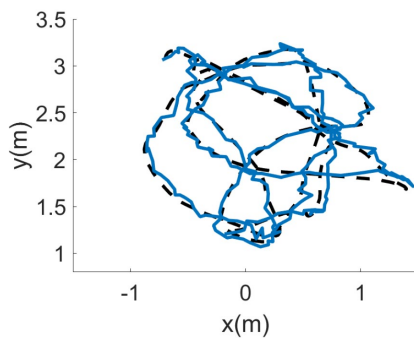
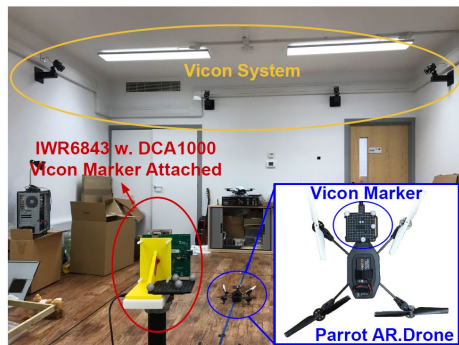
- ❑ 相量均值相消法。首先对所有Chirp信号求出平均参考值，然后**所有Chirp减去这个均值**

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

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

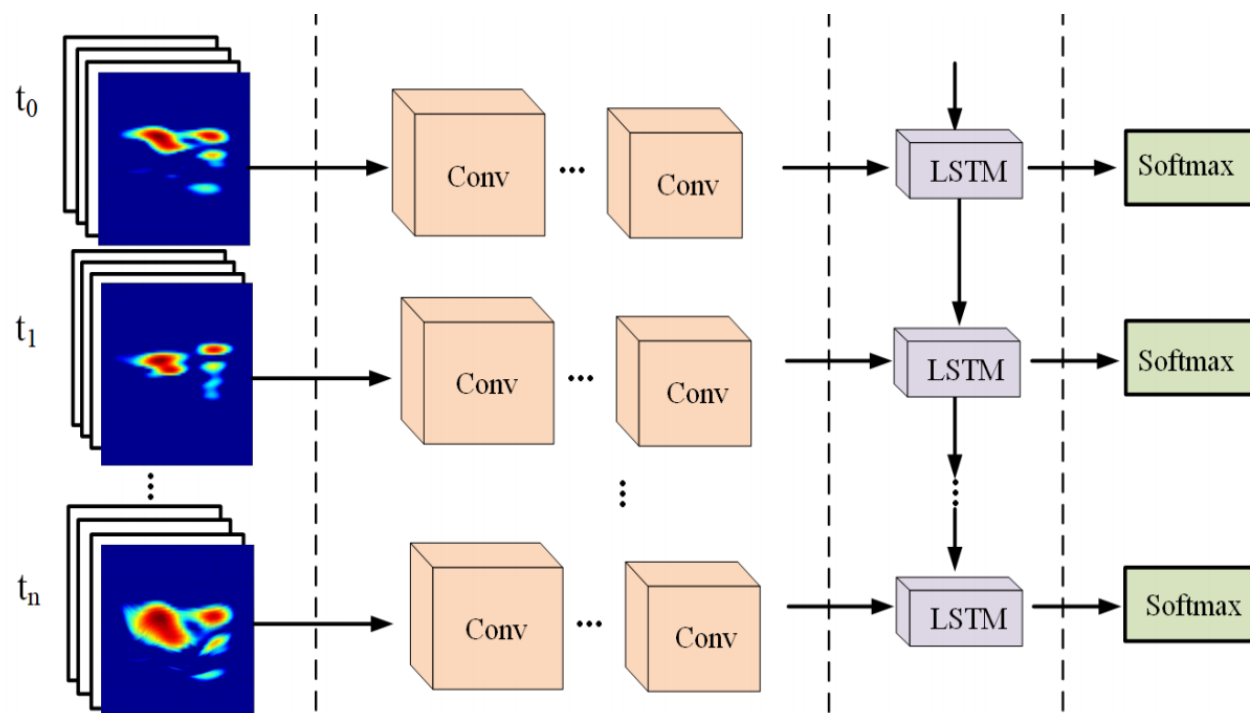
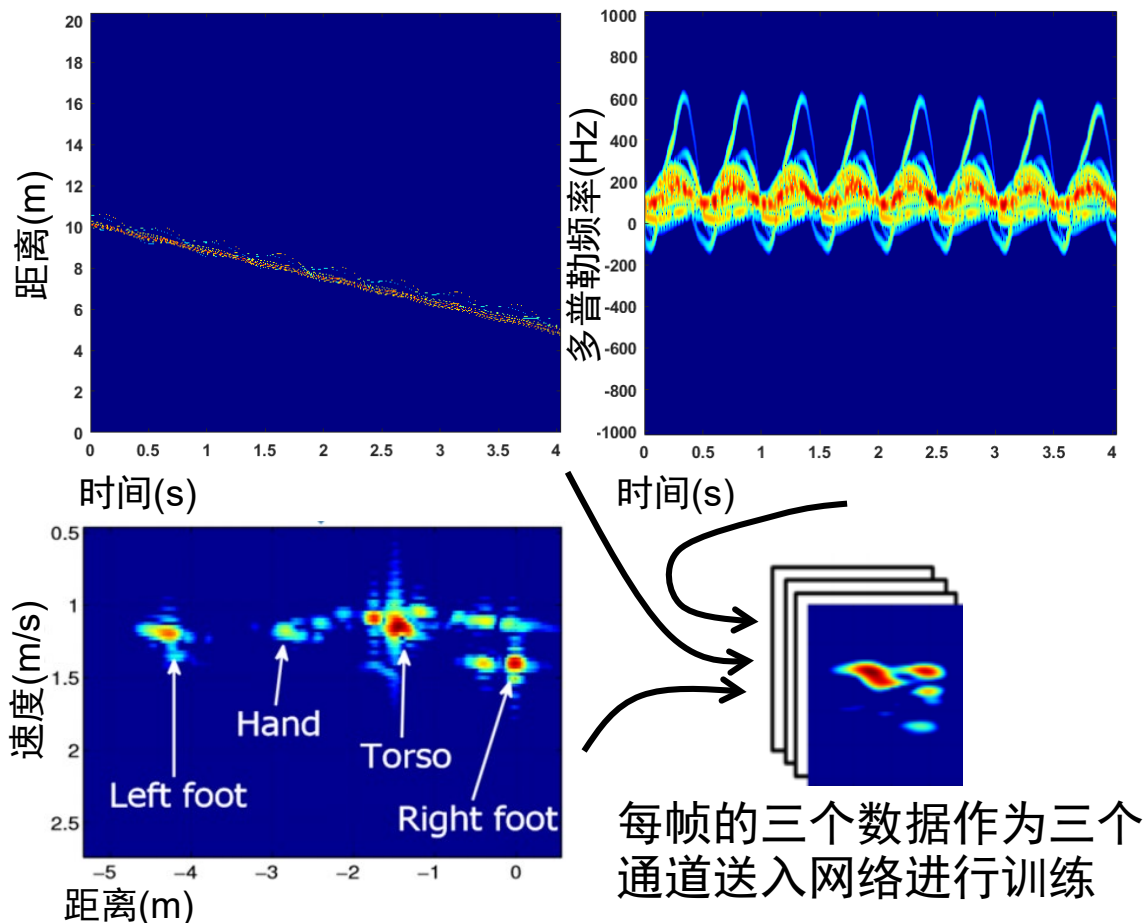


对于每个Chirp，生成**两个距离-方位角热力图**和**四个距离-俯仰角热力图**，分别利用CNN提取特征，并利用自注意力机制提取有用信号消除噪声，每一个Chirp得到一个特征向量。一帧中多个Chirp的特征向量输入到LSTM网络，用于估计3D位置。

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

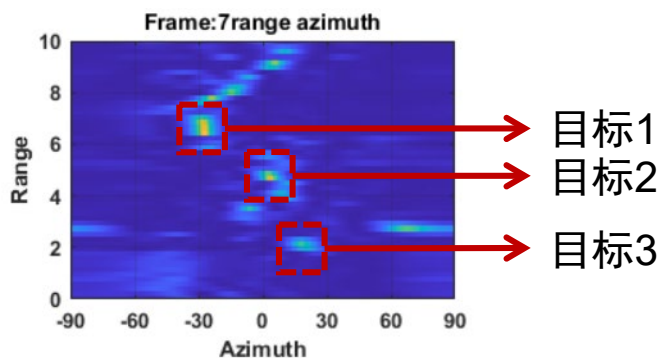
通过计算不同手势和动作的**距离-时间热力图**、**速度-时间热力图**和**距离-速度热力图**直接作为神经网络的训练集，经过训练，即可完成识别任务，较简单



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

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



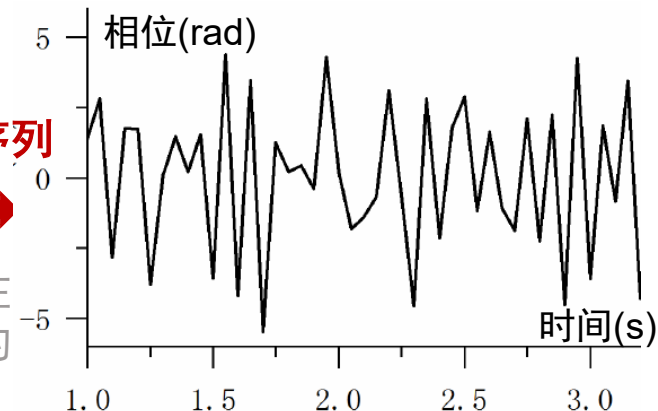
无需FFT等操作，直接通过反正切函数求Range-Azimuth bin中的复数的相位即可：

提取相位信息

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

得到相位时间序列

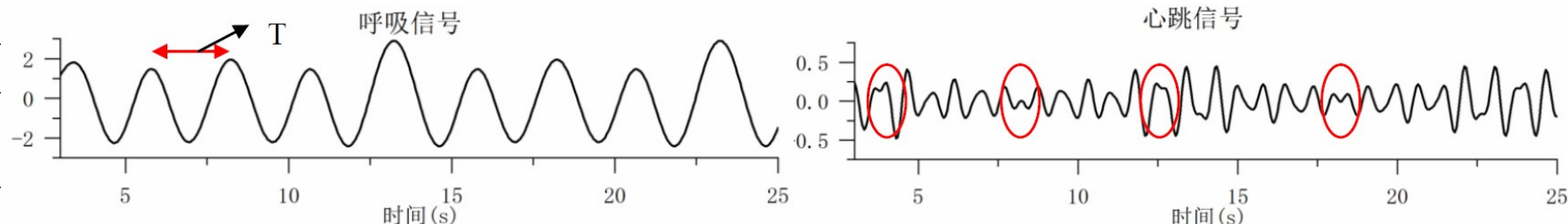
Unwrap函数实现了相位解缠绕。相位缠绕是指角度在通过 π 时发生突然的 2π 跳变变为 $-\pi$ ，使得连续变化的角度出现不连续的现象。



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

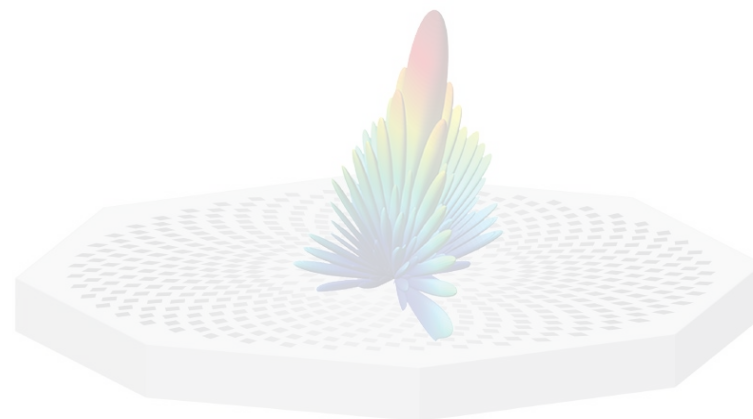
生命体征信号	幅度	频率 (Hz)
呼吸	1-12mm	0.1-0.5Hz
心跳	0.1-0.5mm	0.8-2Hz



关键：从相位时间序列中提取出呼吸和心跳的频率

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
- 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

Thanks for your attention

