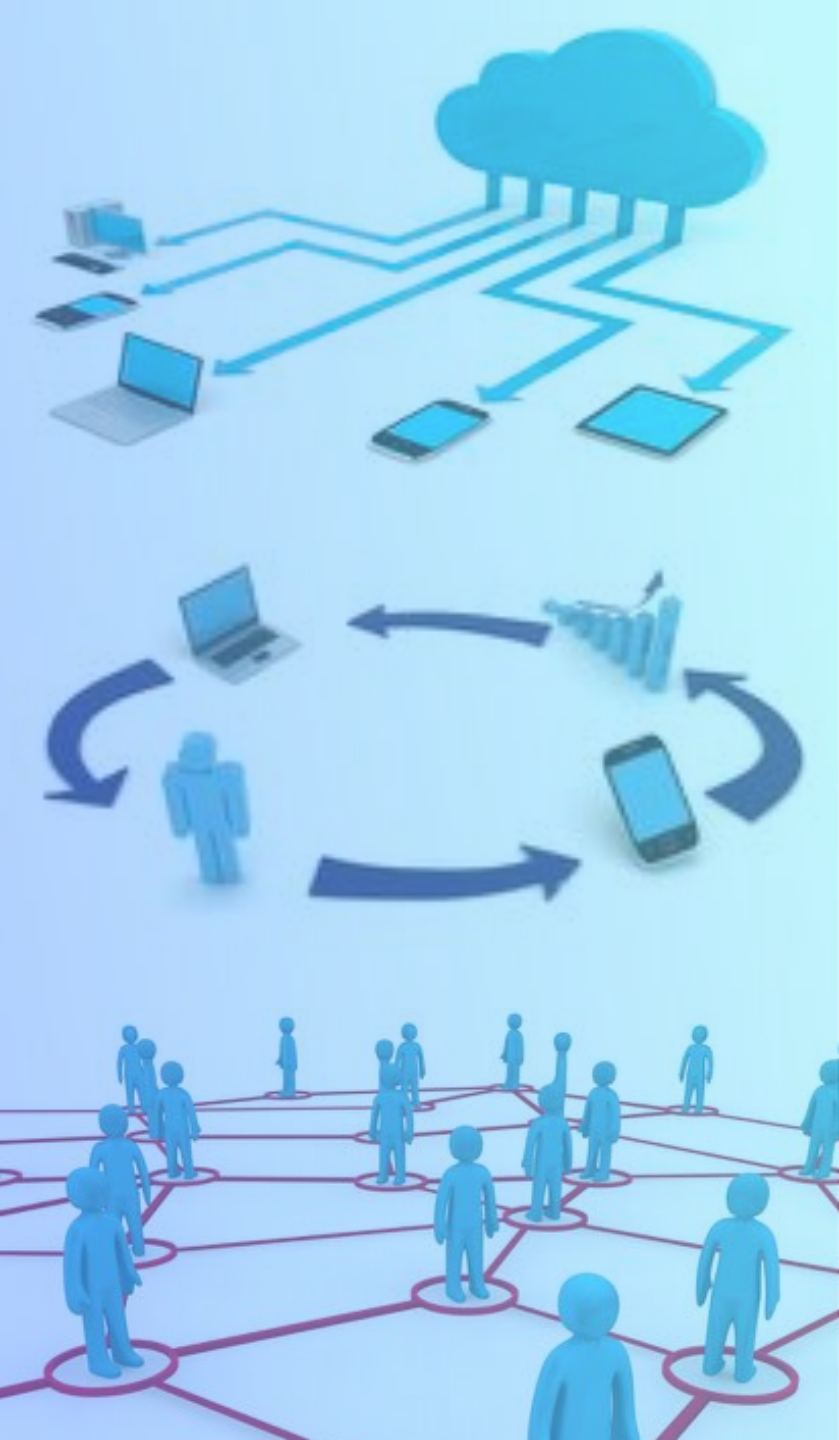


第二篇 感知模态

第3章 非传感器感知技术

《智能感知技术导论》



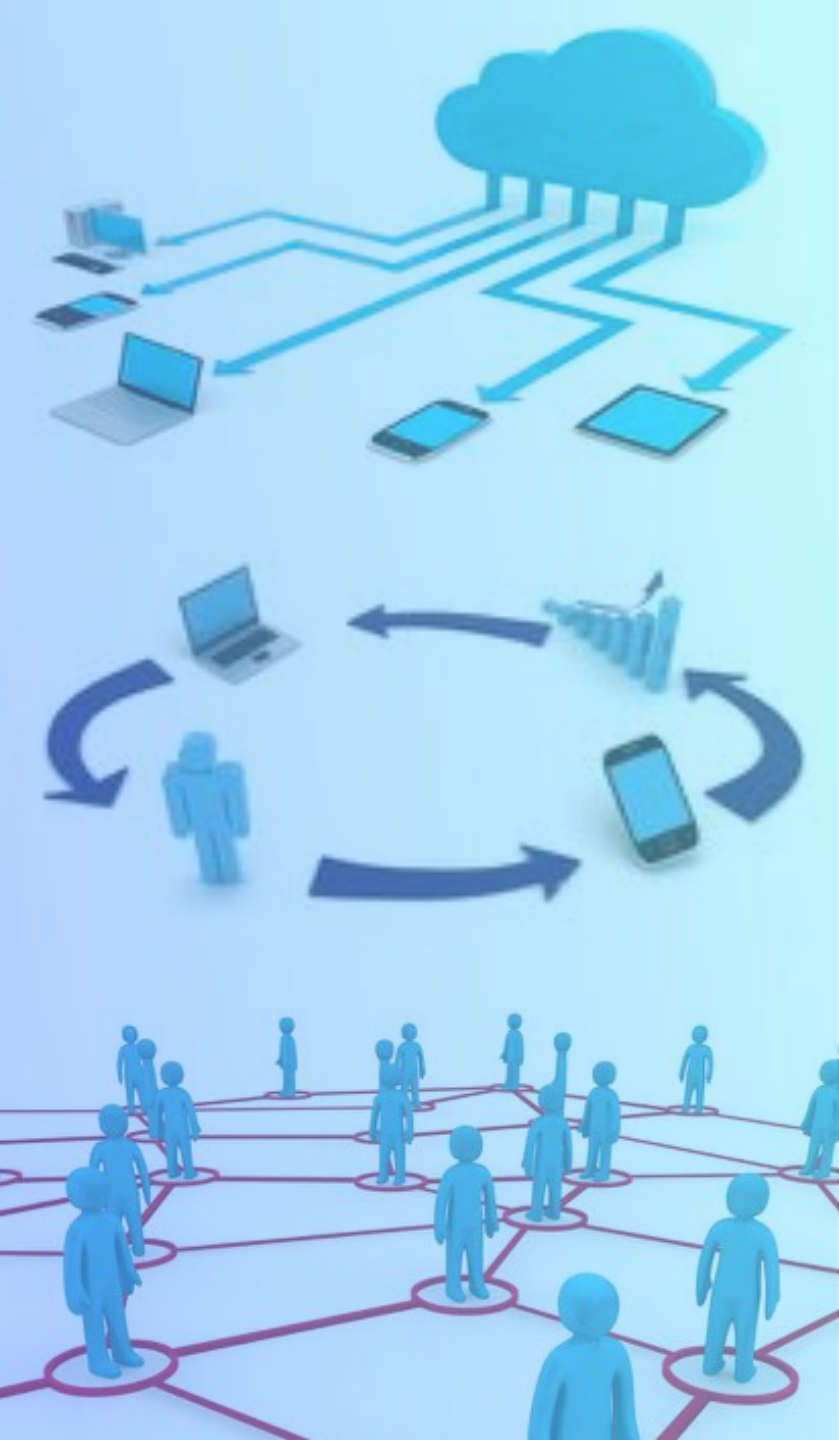
目录

1 非传感器感知基本原理

2 超声波感知技术

3 毫米波感知技术

4 RFID感知技术

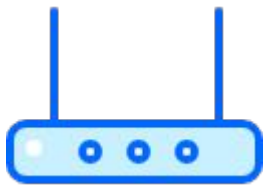


PART.1

非传感器感知 基本原理

非传感器感知基本原理

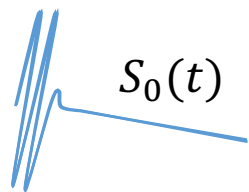
- **非传感器感知**主要指利用**无线信号**以及**声音信号**等在空间传播过程中的**信号变化**，对目标的**位置状态信息**等进行感知估算。
- **信号变化**主要可以通过构造**不同的（变化的）传输路径**，利用信号在不同传输路径上的差异构造，并用于感知。



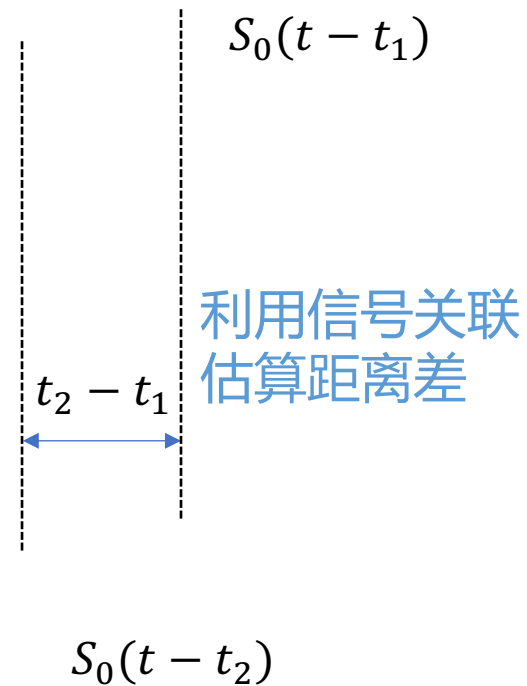
非传感器感知示意（侵入式）



发射器

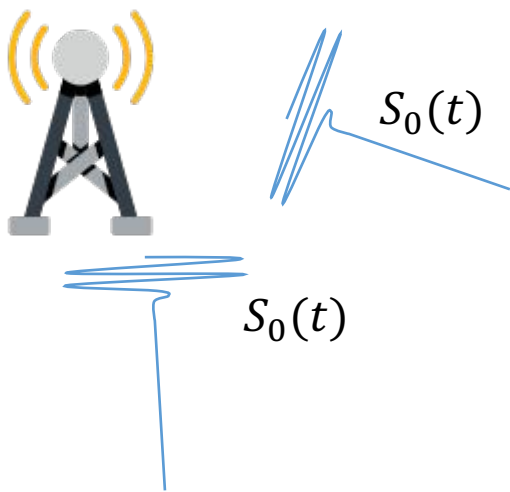


接收器



非传感器感知示意（非侵入式）

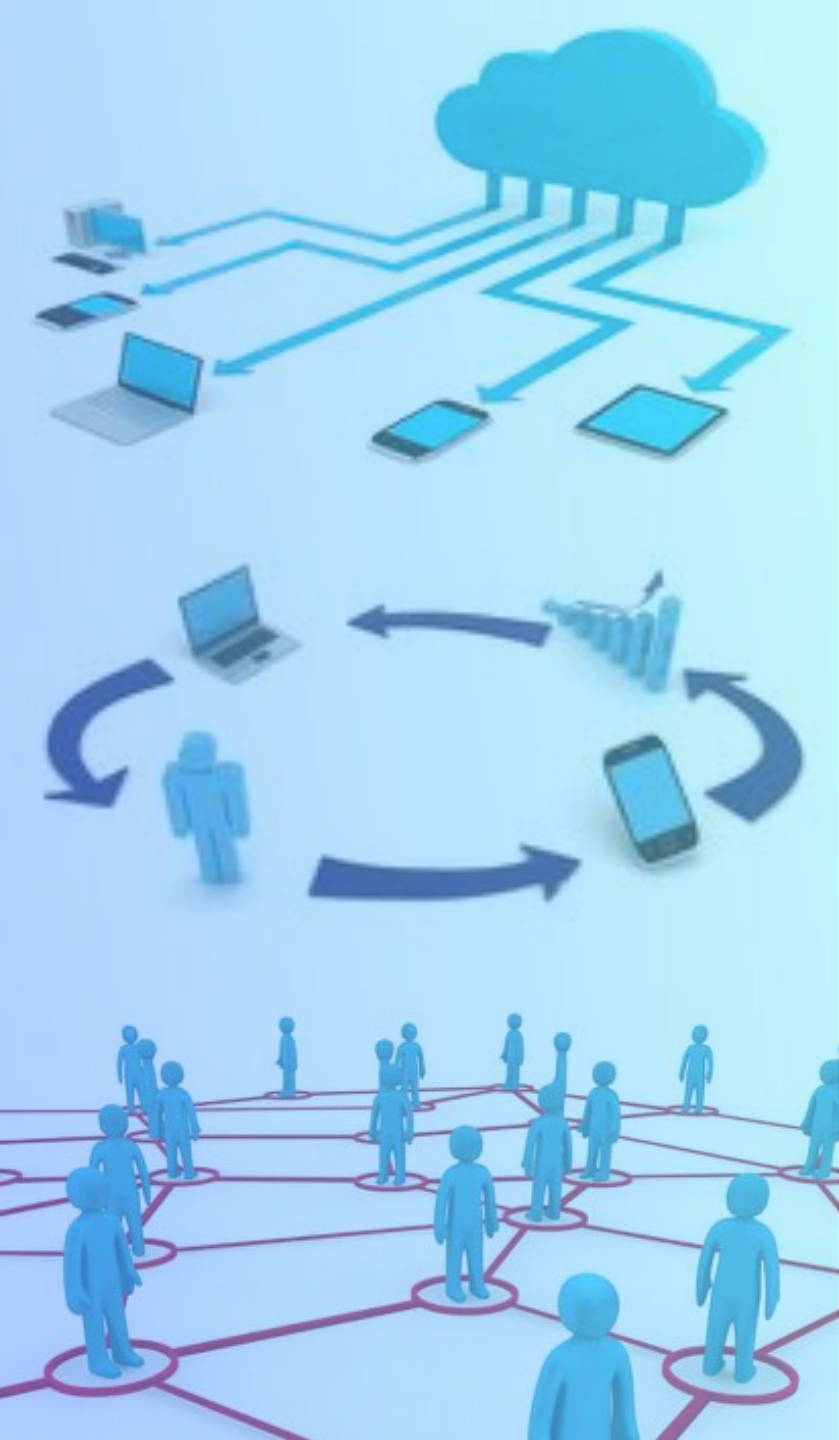
发射器



接收器

利用信号关联
估算反射距离
 $t_2 - t_1$

$S_0(t - t_2) + S_0(t - t_1)$

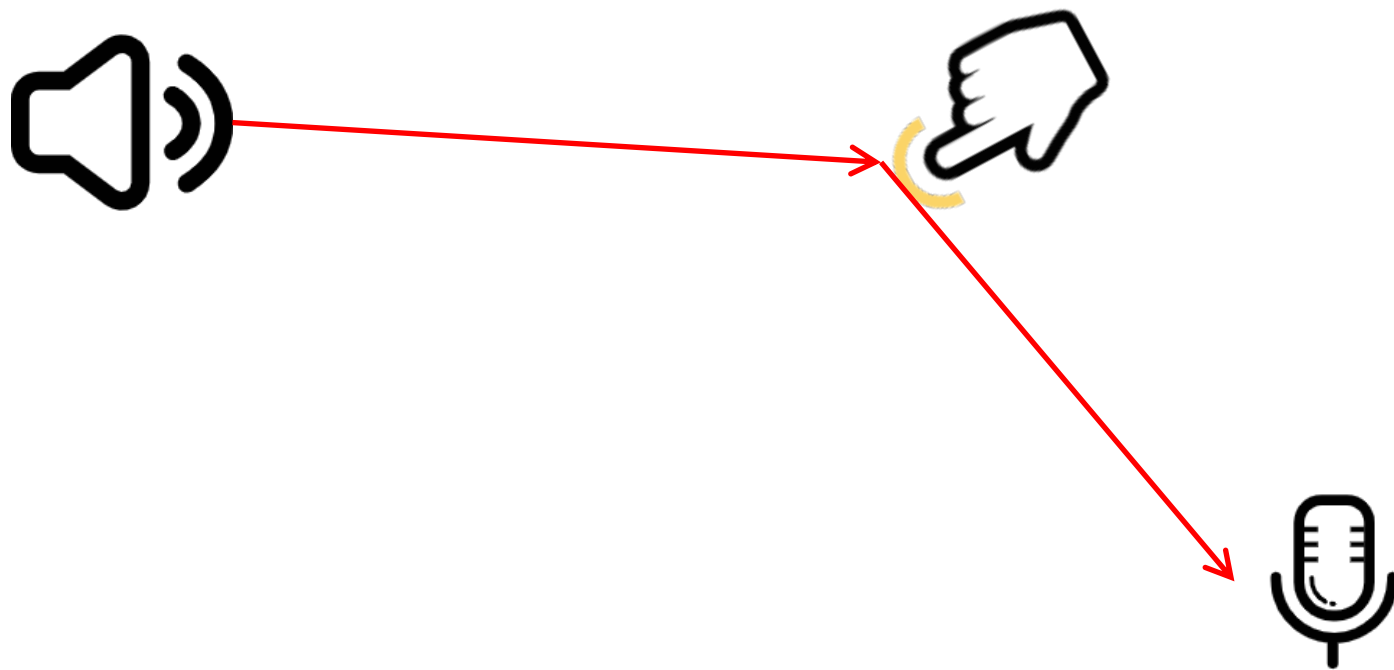


PART.2

超声波感知

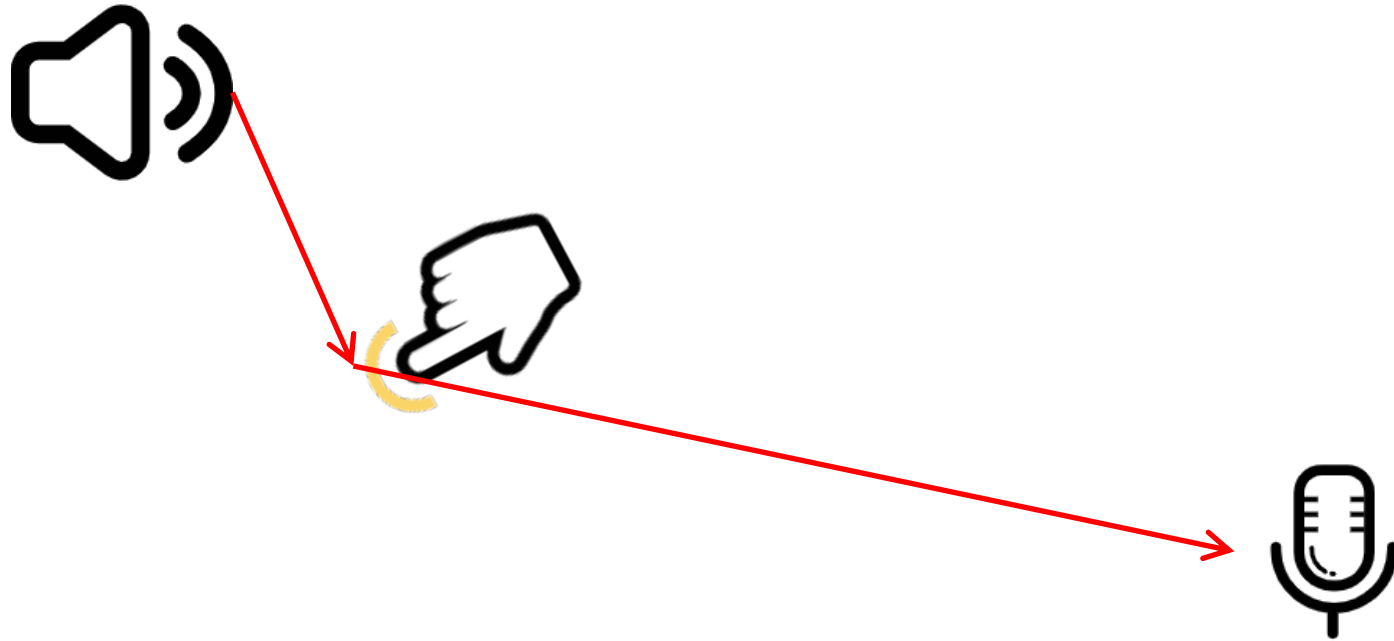
超声波感知技术基本原理

- 利用特定编码的声音信号在传播中的衰减特性，分析接收音频中的叠加关联，抽取相应的声音特征进行感知。



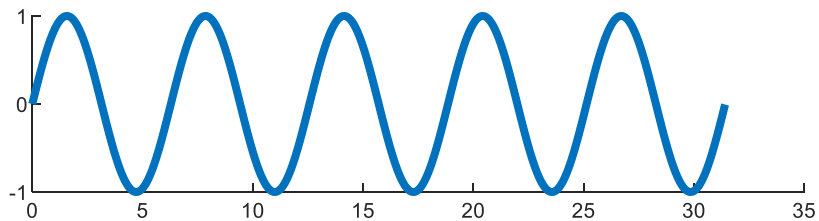
超声波感知技术基本原理

- 利用特定编码的声音信号在传播中的衰减特性，分析接收音频中的叠加关联，抽取相应的声音特征进行感知。

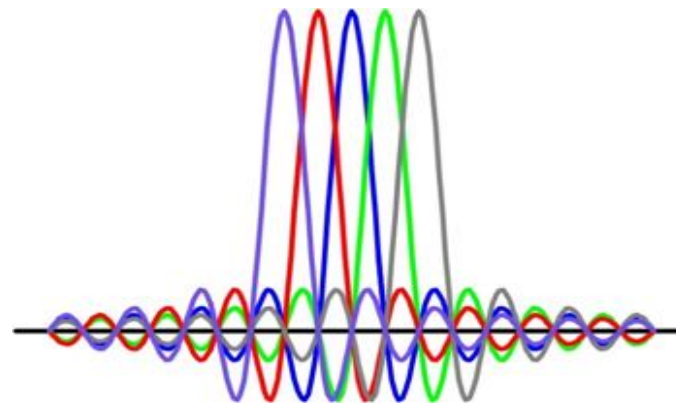


反射位置的变化
引起信号接收时间、
强度、相位、多普勒
等多种特征的变化

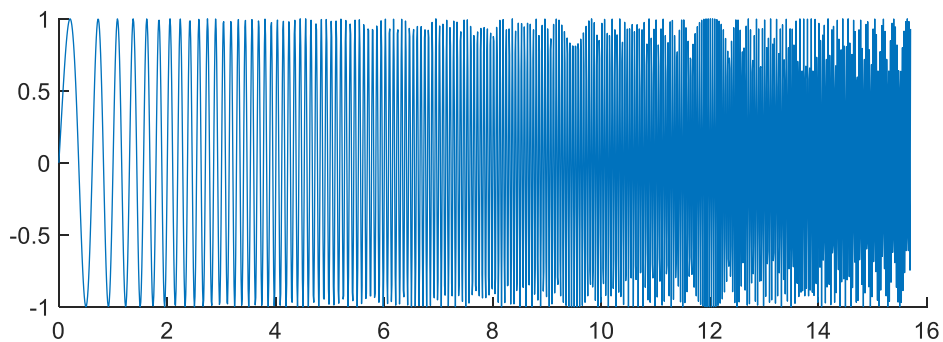
超声波感知常用的编码方式



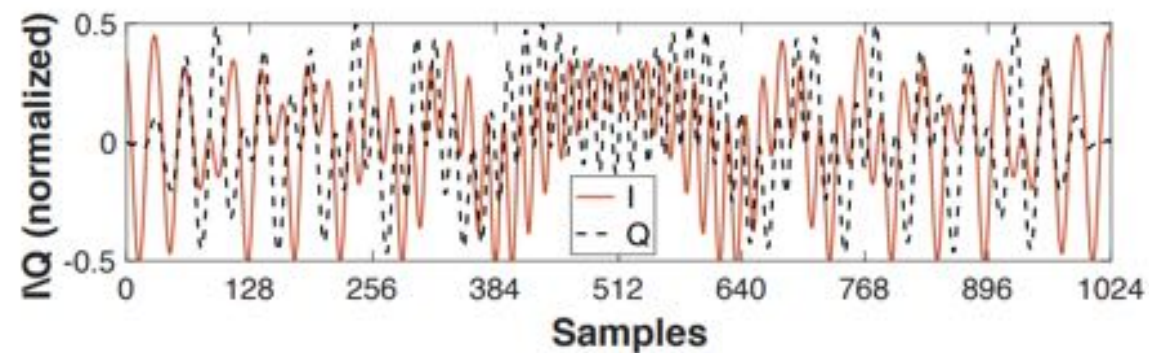
单频正弦波



OFDM



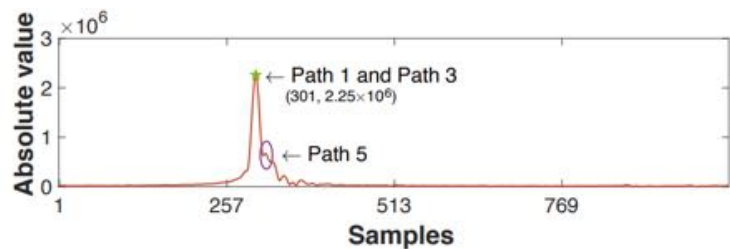
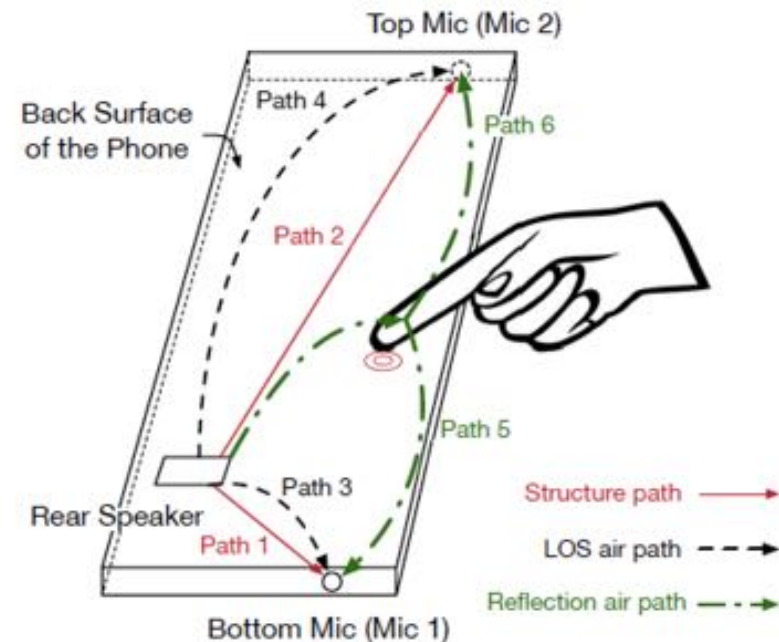
FMCW



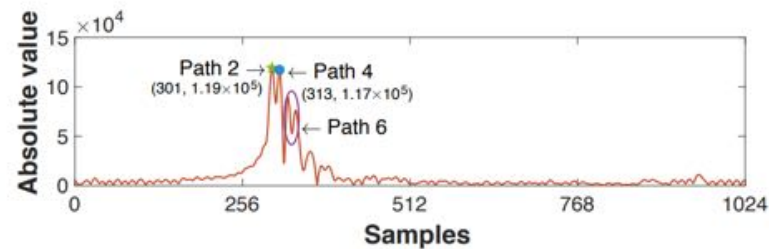
Zadoff-Chu

研究进展——声波在不同介质中的传播差异

- 利用**双麦克风**接收手指反射声音的到达时间差异，分析手指触摸的位置
- 利用声音在空气与手机壳中**传播的速度差异**，分析手指触摸的位置



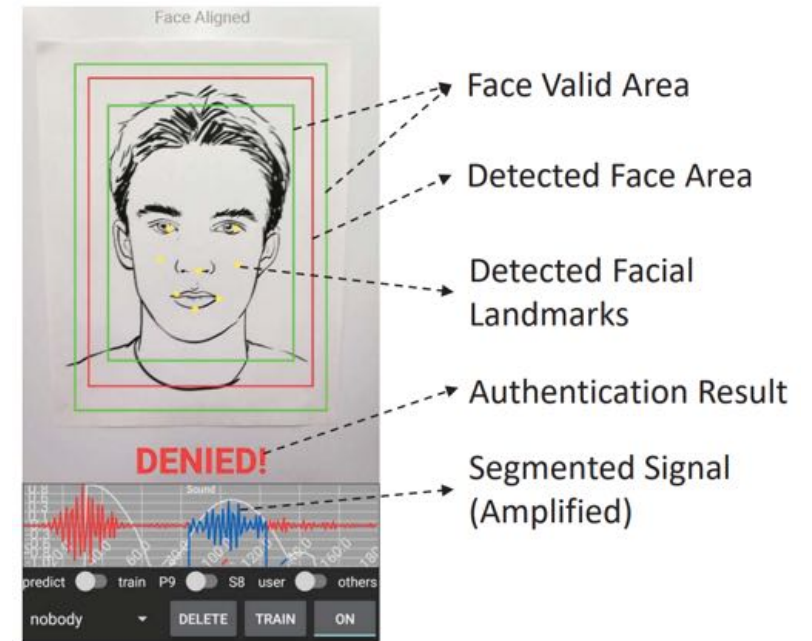
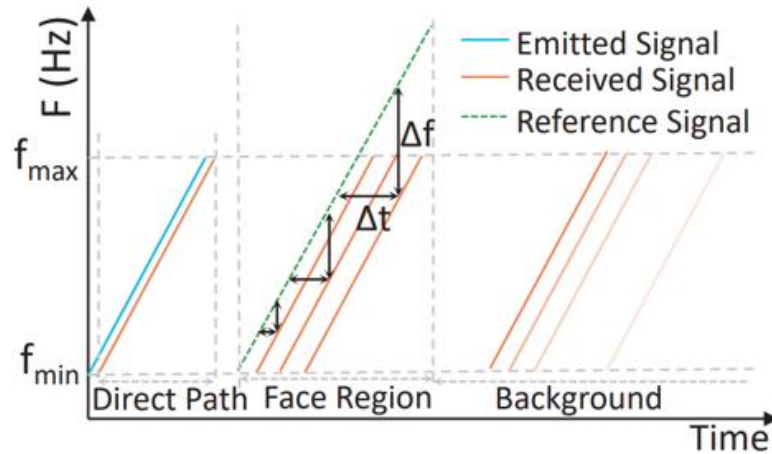
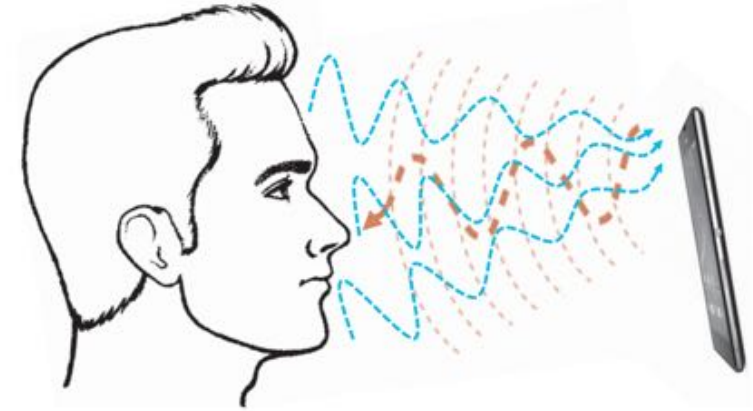
(a) Bottom microphone (Mic 1)



(b) Top microphone (Mic 2)

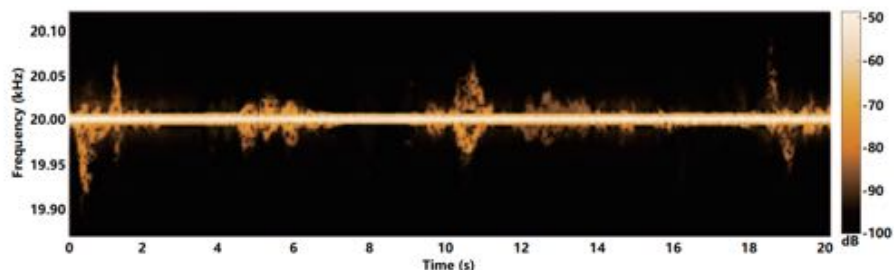
研究进展——声波的反射、衍射

- 测量人脸的不同位置对声音的反射影响，使用FMCW技术同时区分多个反射路径的传播特性，辅助基于视觉的用户认证

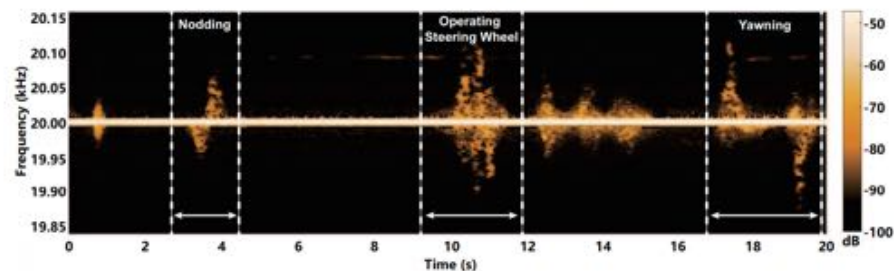


研究进展——声波的多普勒效应

- 利用用户的不同动作对于单频超声波信号的多普勒影响，对用户的不良驾驶习惯进行检测。



(a) Normal driving actions



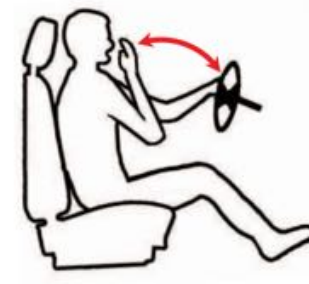
(a) Normal driving



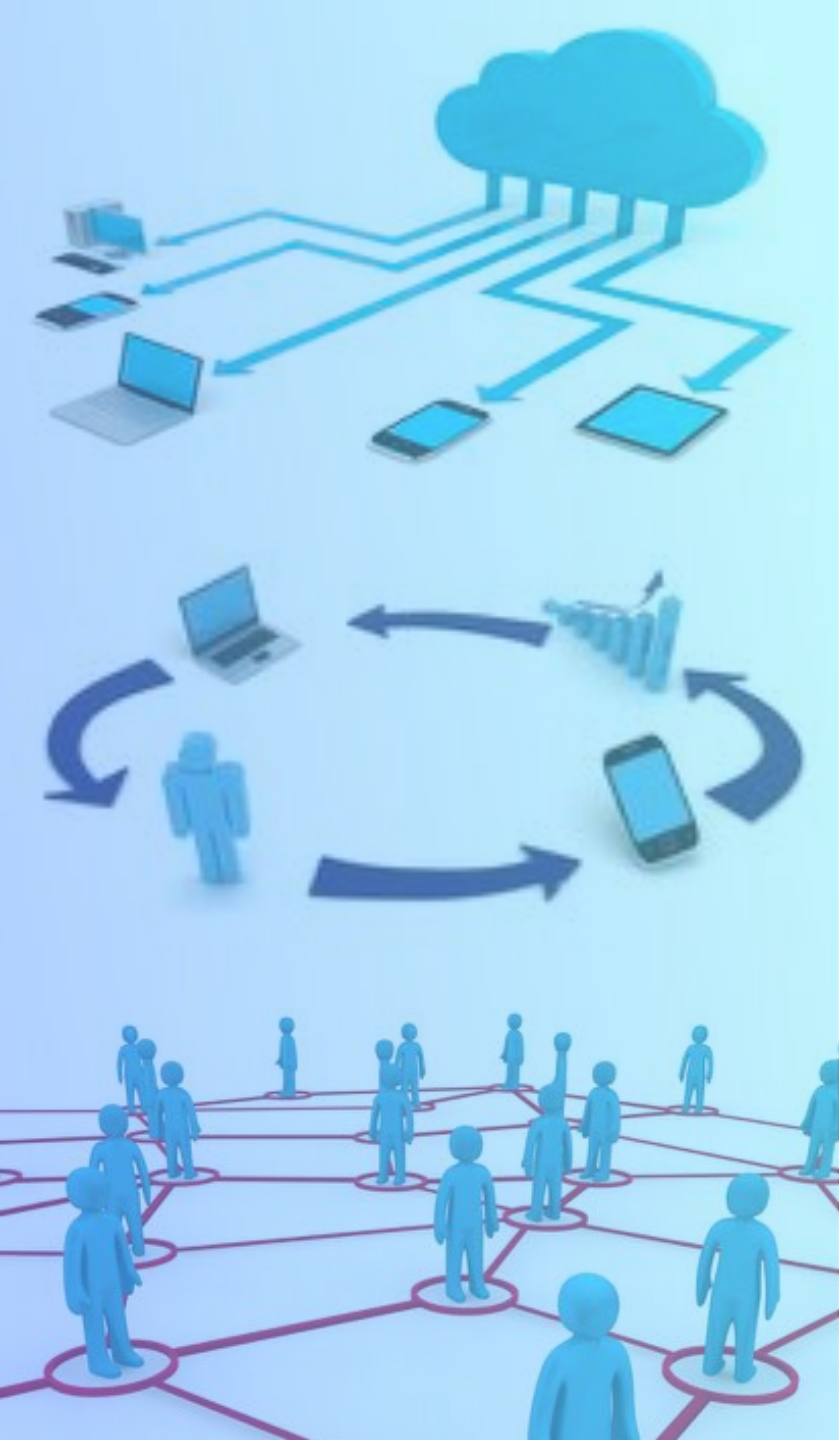
(b) Nodding



(c) Operating SW



(d) Yawning



典型案例介绍

典型案例介绍——手势微运动感知

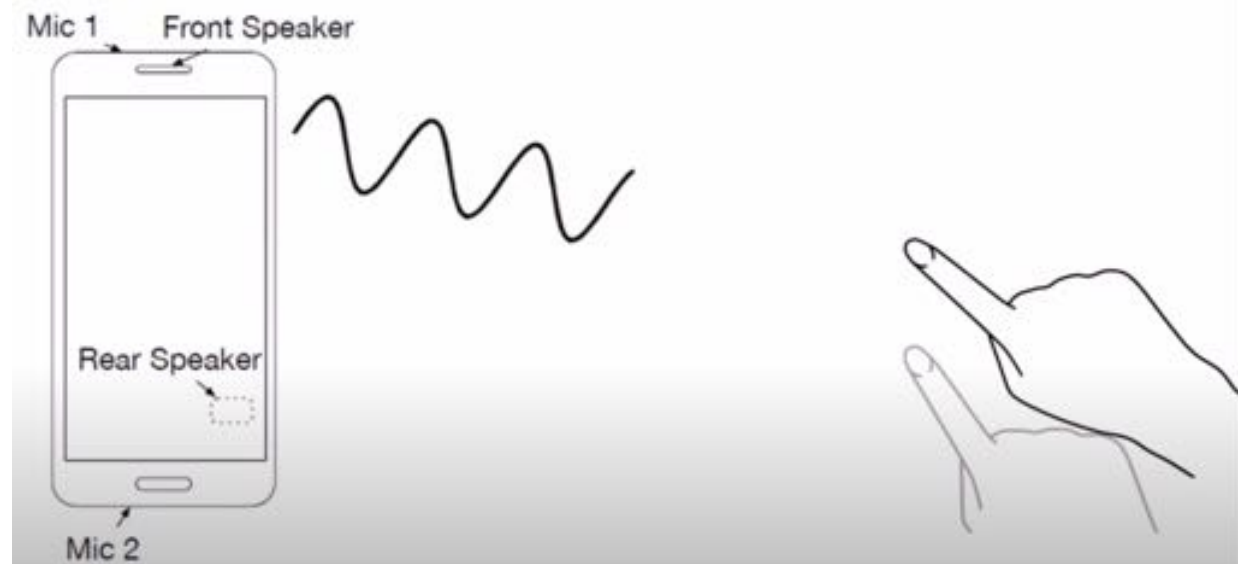
- 如何使用商用的设备搭配软件来实现手势的微动作感知？？



Google Soli 使用60GHz毫米波感知手势

典型案例介绍——手势微运动追踪

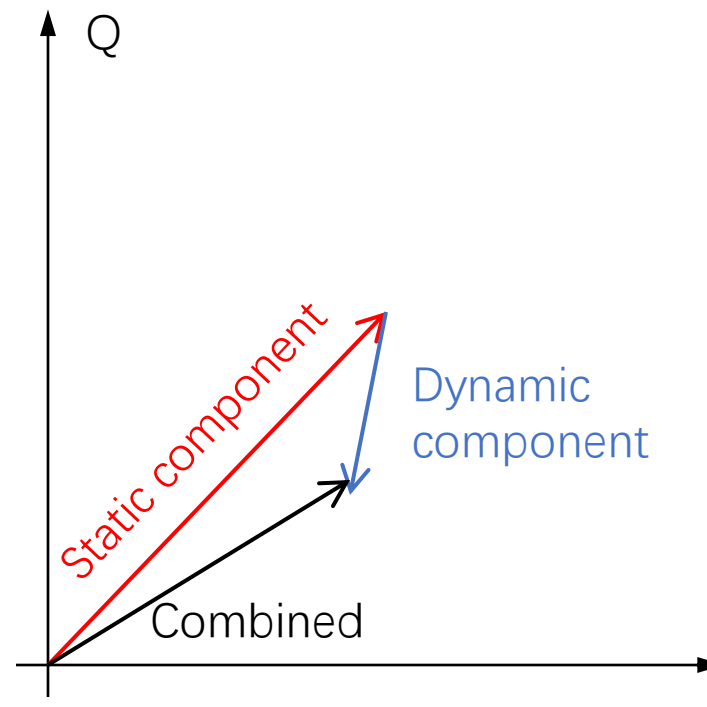
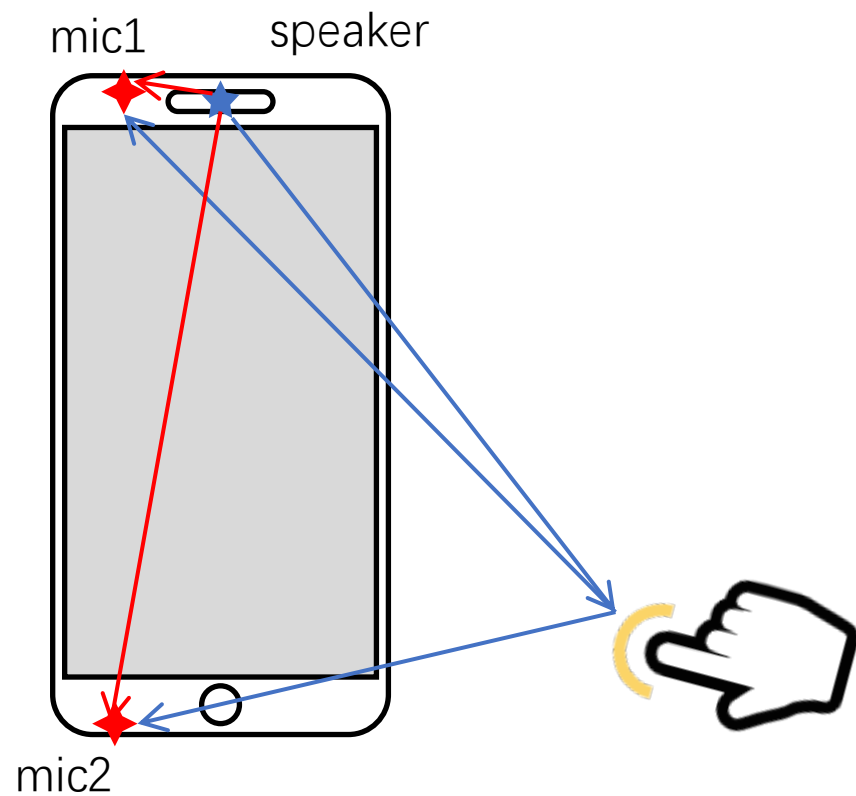
- 利用手指对声音信号的反射，实现毫米级运动追踪。
- 利用多个频率的正弦波信号，使用复平面信号相位分析感知



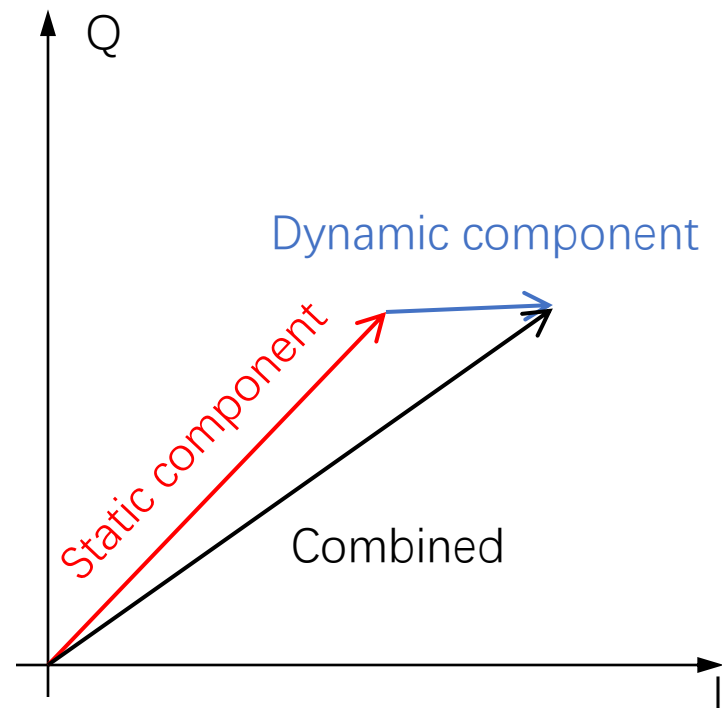
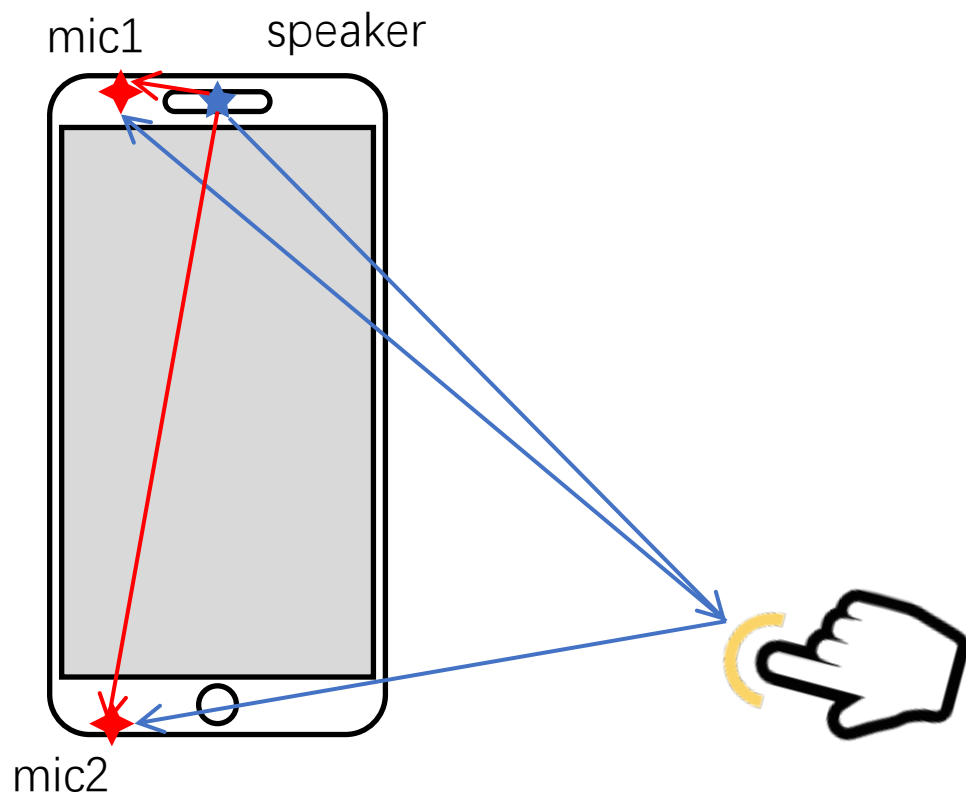
典型案例介绍——手势微运动追踪

- 使用单频信号，路径长度变化等价于相位变化
- 17kHz以上超声波波长1.5cm~2cm
 - >手指移动1.25mm，信号反射路径变化2.5mm，相位变化 $\pi/4$
- 相位变化方向等价于目标移动方向

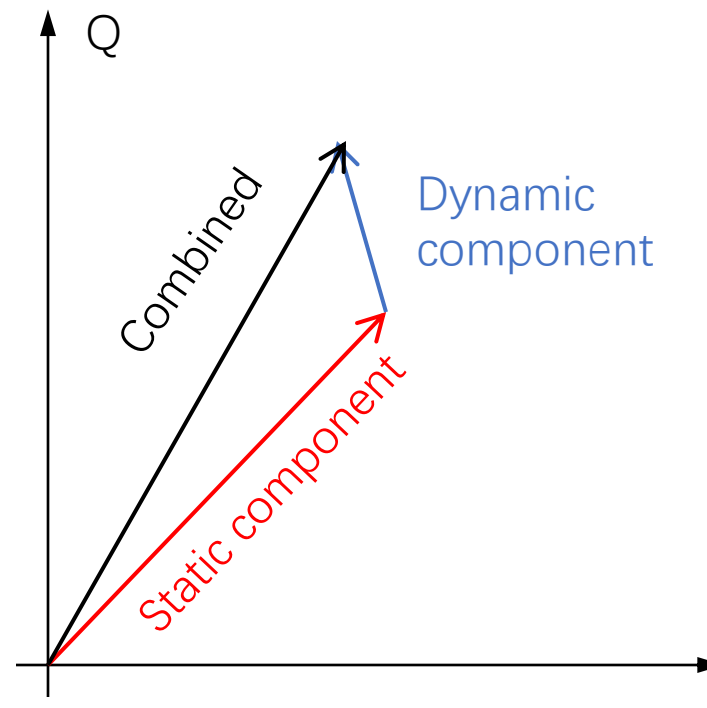
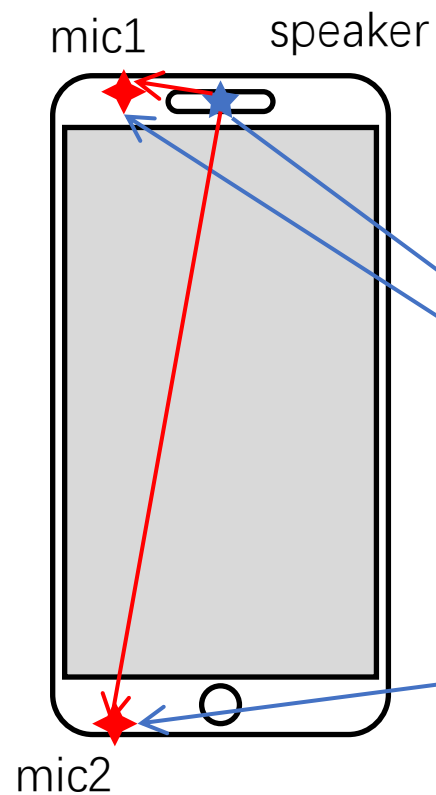
典型案例介绍——手势微运动追踪



典型案例介绍——手势微运动追踪



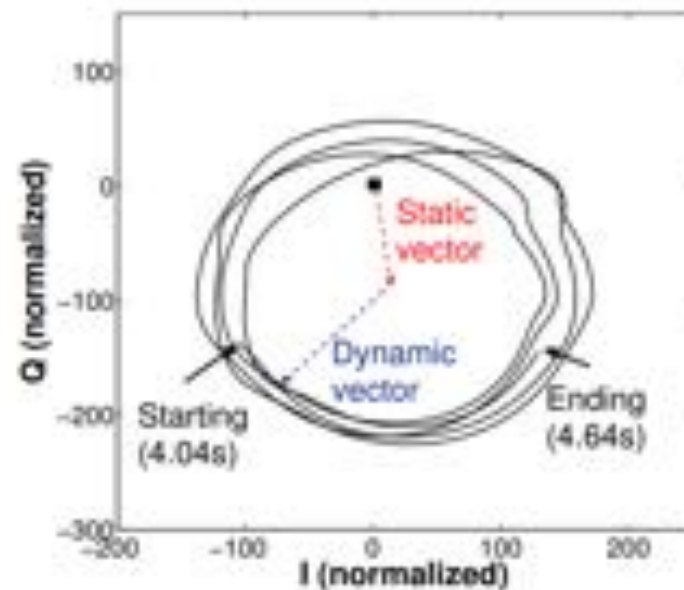
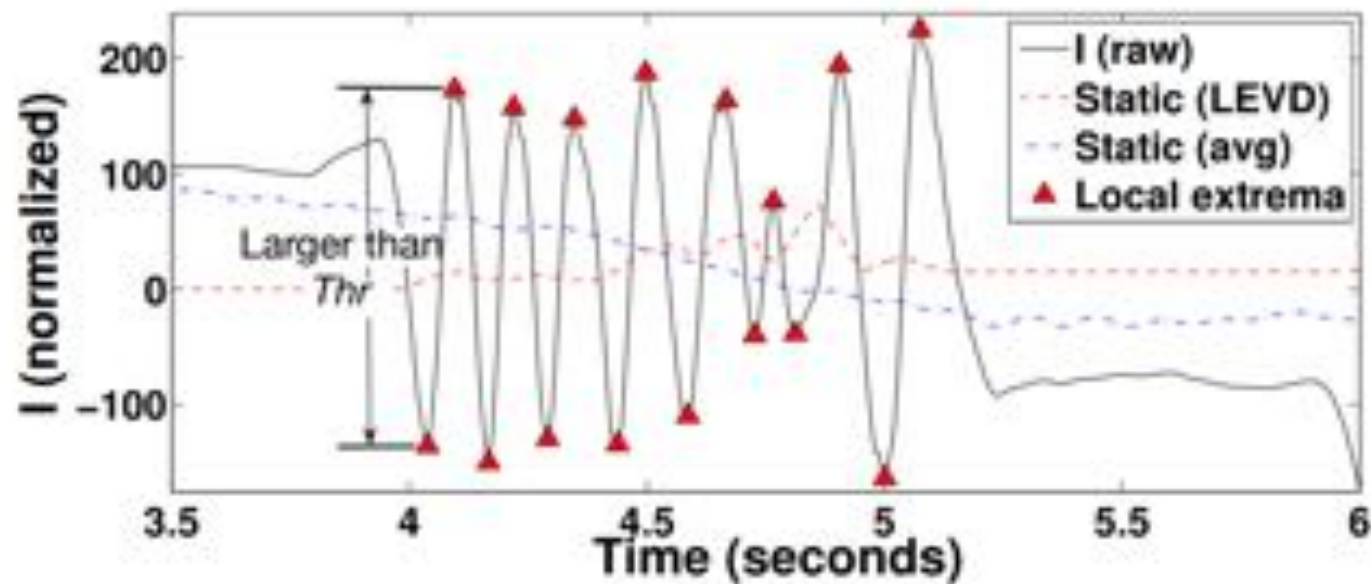
典型案例介绍——手势微运动追踪



运动距离变化导致IQ平面内信号旋转

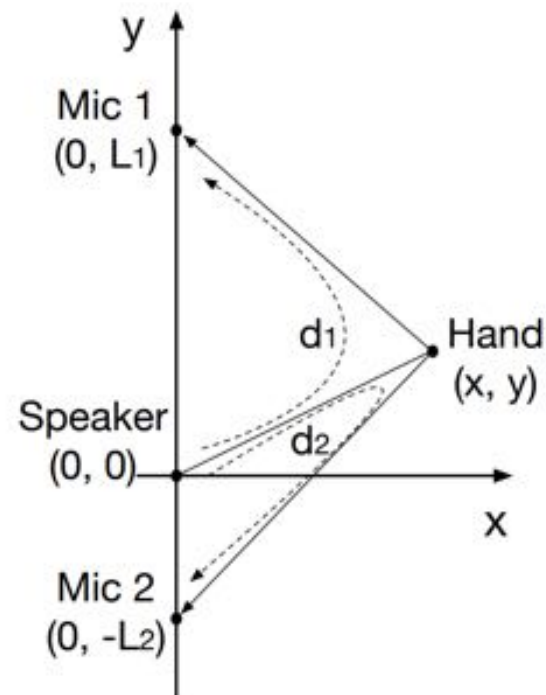
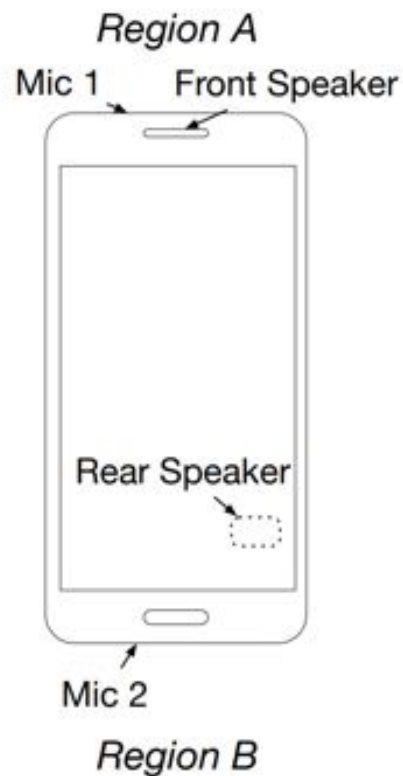
典型案例介绍——手势微运动追踪

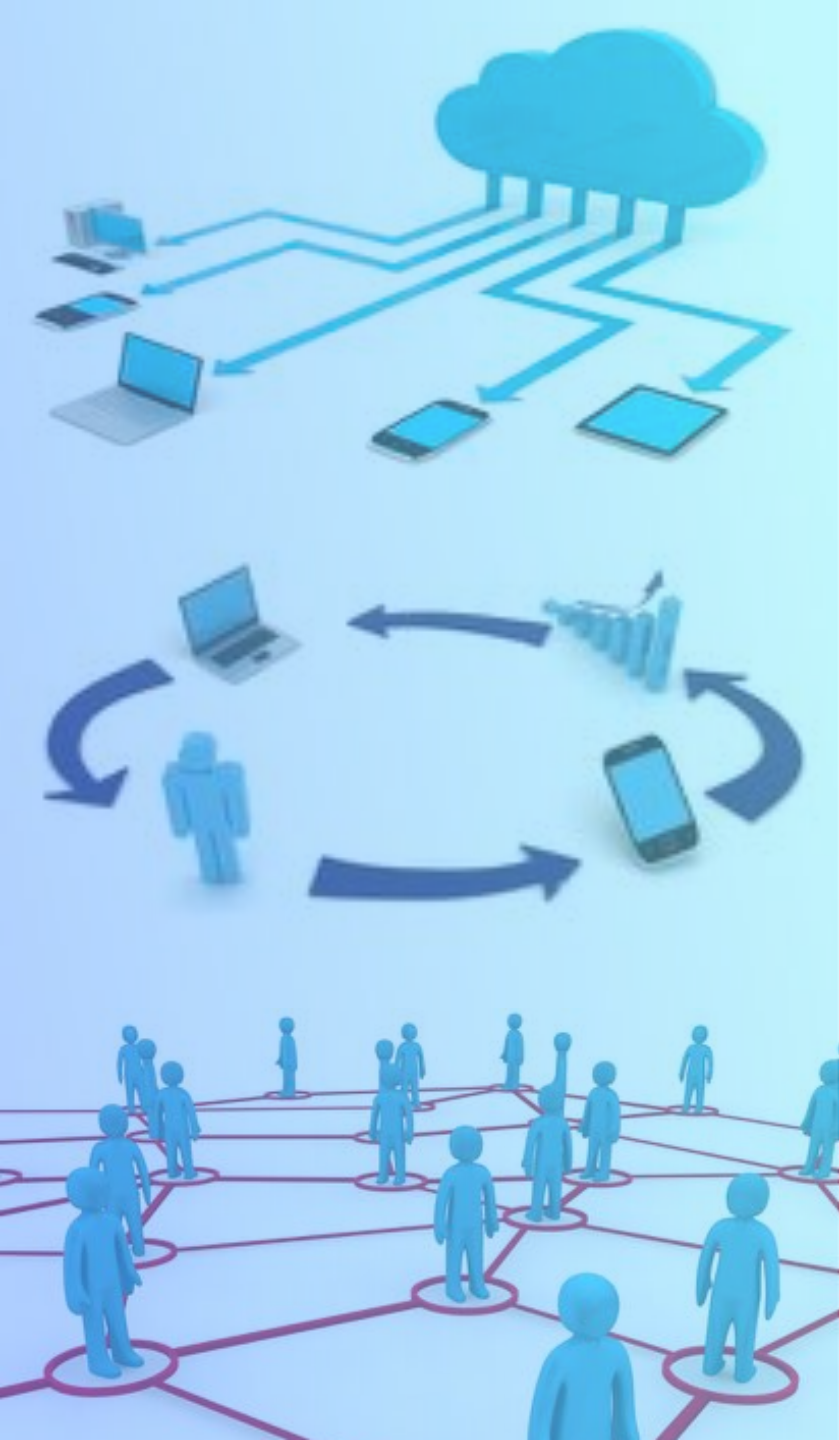
- 使用LEVD算法检测峰谷值，用于计算静态分量
- 从接收信号中去除静态分量来获得手势变化



典型案例介绍——手势微运动追踪

- 使用双麦克风来计算手在二维空间内的轨迹变化





PART.3

毫米波感知

发展简史

1880s
首次提出

- 赫兹任波恩大学教授期间，从事电动学研究，提出了毫米波这一概念。

1950s
缓慢发展

- 第二次世界大战后，由于基础材料和生产工艺不过关，毫米波实际应用很少。

1970s
掀起热潮

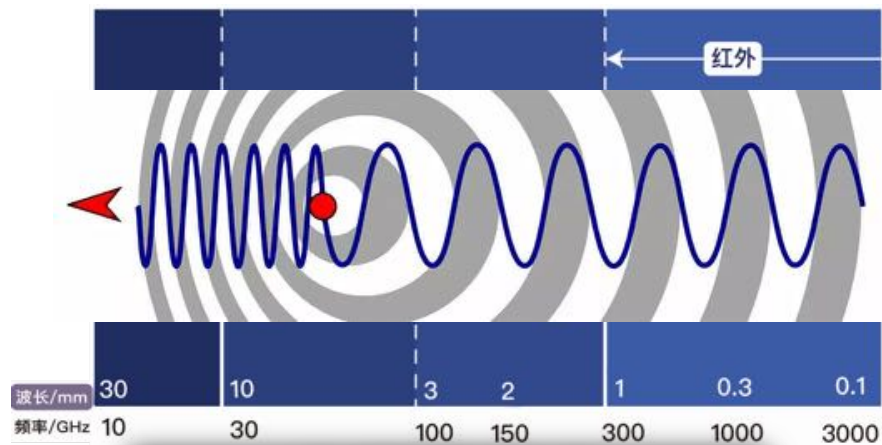
- 70年代后，基础技术发展，毫米波重新引起重视，复兴起来。

21世纪
重要技术

- 随着无人驾驶和5G技术的发展，毫米波作为其中关键得到了推广和应用。

毫米波特点

- 频带宽：30GHz~300GHz。
- 方向性强：具有很高的空间分辨率。
- 多普勒效应明显：用于测速时精度比较高。
- 全天候工作：毫米波的传播受雨霄雾霾等气候因素的影响小，不受昼夜光照变化影响。



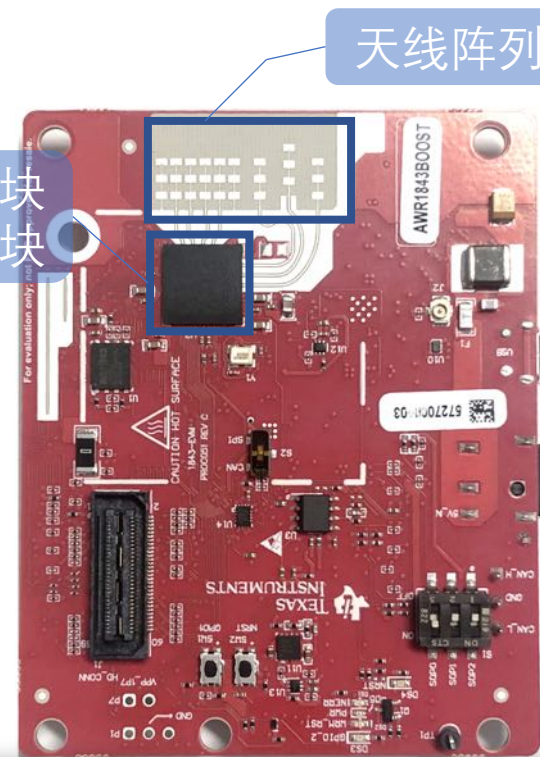
多普勒效应



全天候工作

通常用于感知的硬件平台

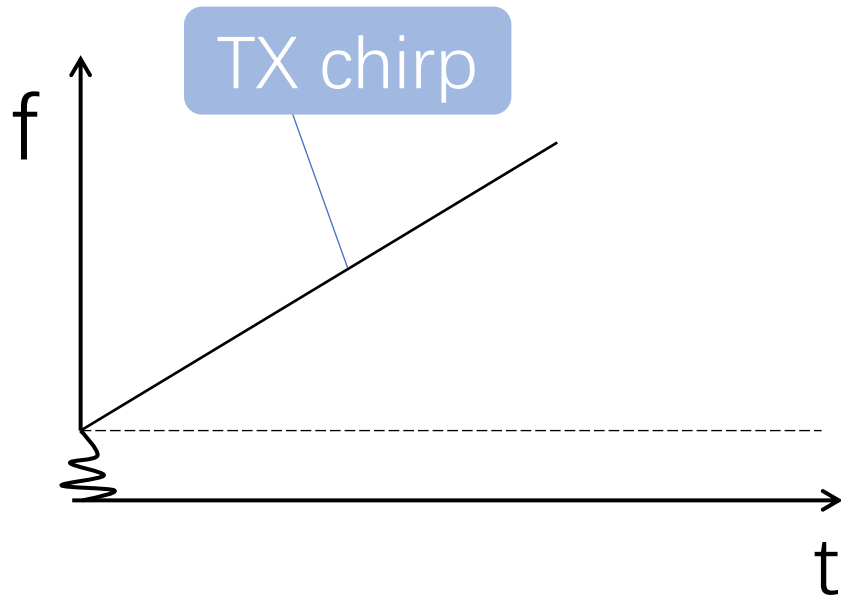
- 商用毫米波雷达：体积小、易集成、成本低、易部署
- 60GHz~80GHz Wi-Fi设备：成本更低，部署更简单
- 通常采用FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 信号调制，通过调频信号的处理技术进行感知



TI IWR1843毫米波雷达

毫米波感知技术基本原理

- 余弦信号 $S = \cos(2\pi ft + \varphi_0)$ 是余弦连续波 CW
- 若频率不是固定的，而是随时间线性变化的，则构成 FMCW：
 $f = f_0 + kt$ ，即 $S_{TX} = \cos[2\pi(f_0 + kt)t + \varphi_0]$ ， $t \in (0, T_c)$
- 一个周期的 FMCW 信号成为 1 个 chirp，周期长度是 T_c

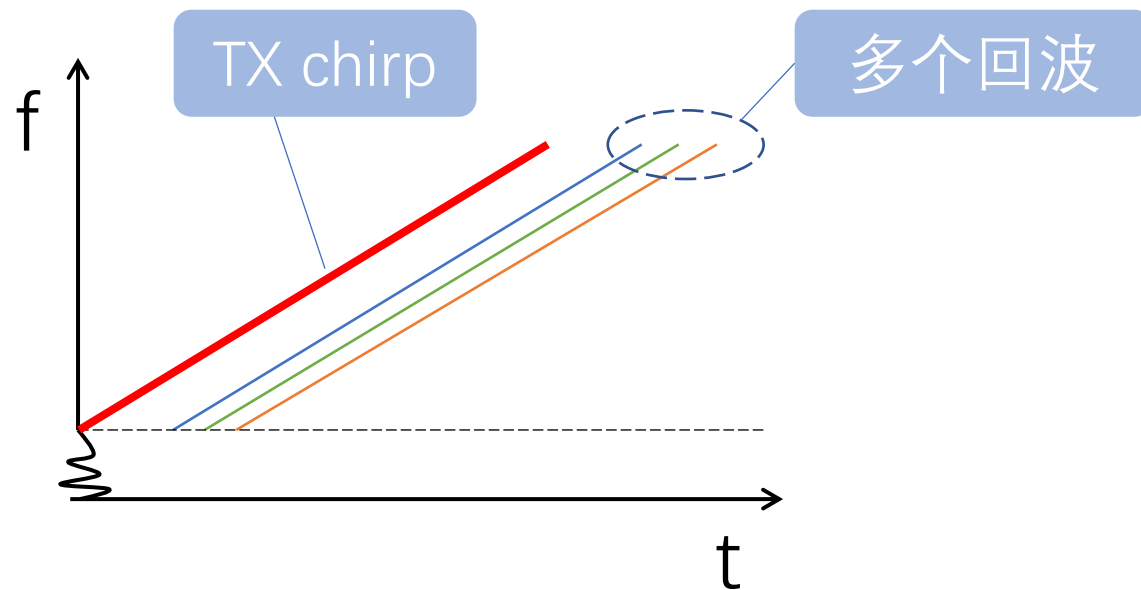


毫米波感知技术基本原理

- 接收信号为发送信号经过 Δt_1 延时后的信号，其中一路接收信号可以表示为

$$S_1 = \cos[2\pi(f_0 + k(t - \Delta t_1))t + \varphi_1], t \in (\Delta t_1, \Delta t_1 + T_c)$$

- 所有接收信号为多路不同延时的接收信号之和，即 $S_{RX} = \sum_{i=1}^n S_i$



毫米波感知技术基本原理

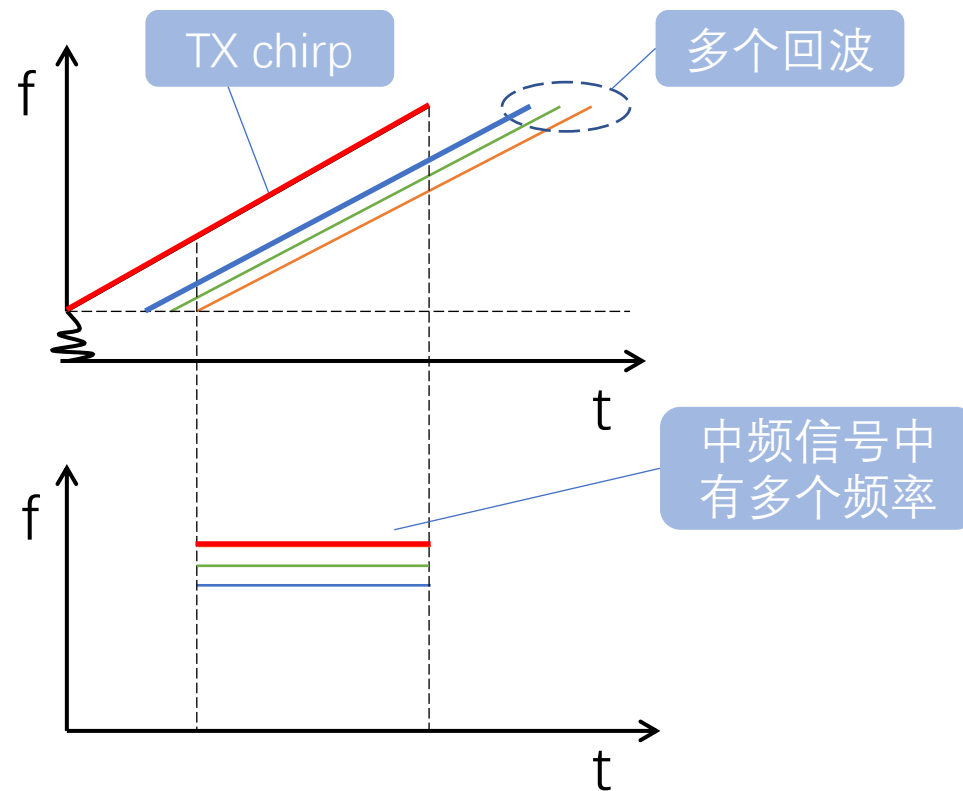
- 对接收信号进行混频，获得中频（IF）信号，其对应结果可以理解为其频率和相位分别做差。
- 以第一路接收信号为例，中频信号为

$$S_{IF-1} = \cos[2\pi(f_0 + kt + \varphi_0 - (f_0 + k(t + \Delta t_1)t + \varphi_1))]$$

$$= \cos[2\pi(k\Delta t)t + \varphi_0 - \varphi_1]$$

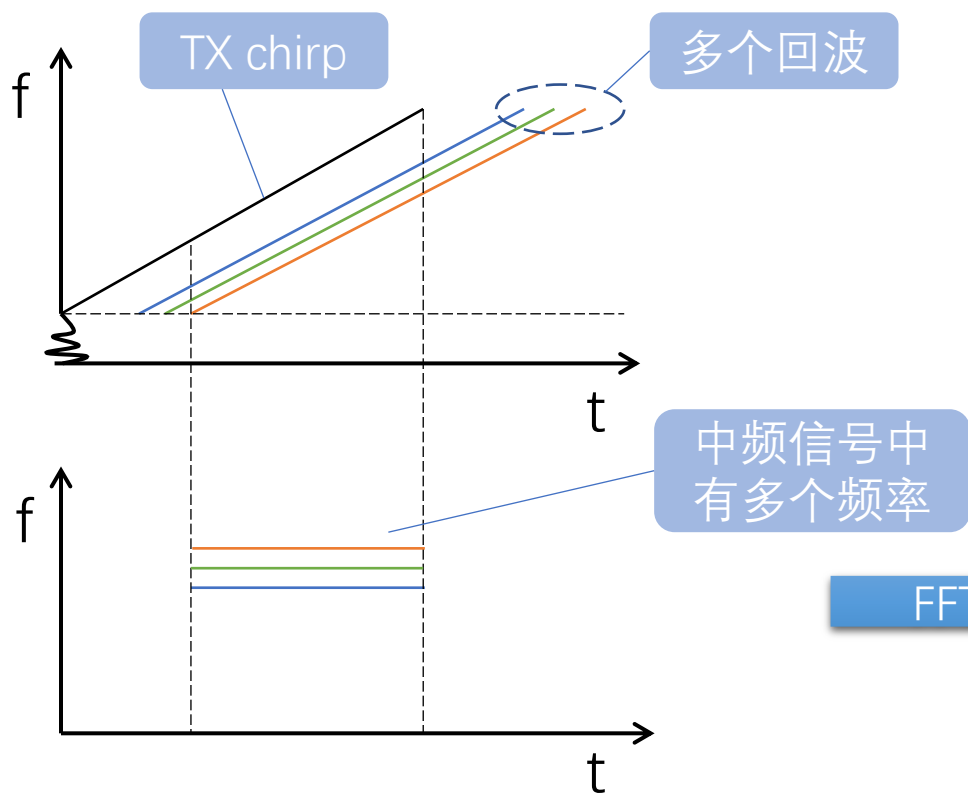
余弦信号

$$S_{IF} = \sum_{i=1}^n S_{IF-i}$$



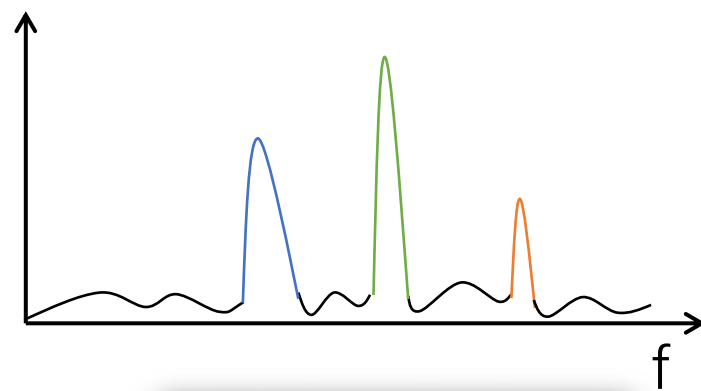
FMCW与距离分辨率

雷达前的多个目标 ==> 多个回波



中频信号的频谱将显示多个频率峰值，每个峰值频率与每个目标到雷达的距离成正比。

FFT



中频信号频谱

FMCW与距离分辨率

- 根据FFT的原理，它对于不同频率的分辨能力是有限的，FFT能够分辨的频率满足下式， T 为观测窗口长度，是一个chirp时长。

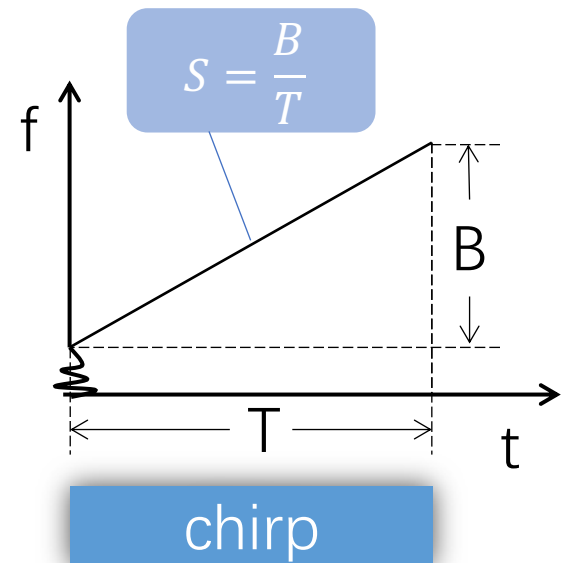
$$\Delta f > \frac{1}{T}$$

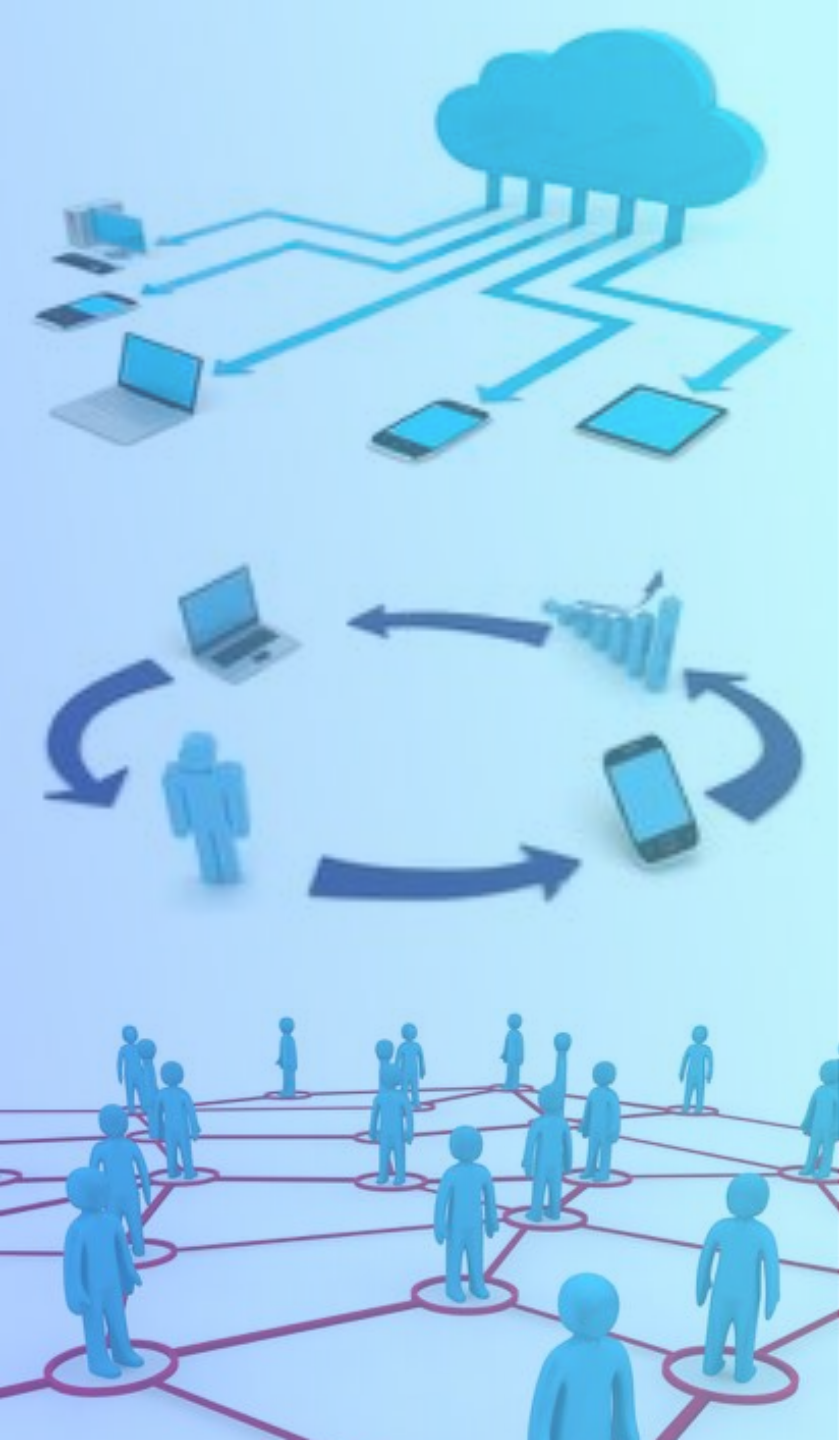
- 频率的分辨能力相应限制了距离分辨率。能分辨的距离差 Δd 与频率差 Δf 的关系为下式， c 为光速， S 表示chirp频率增长的斜率。

$$\Delta f = \frac{2S\Delta d}{c}$$

- 综上，毫米波雷达的距离分辨率 Δd 满足：

$$\Delta d > \frac{c}{2ST} = \frac{c}{2B}$$



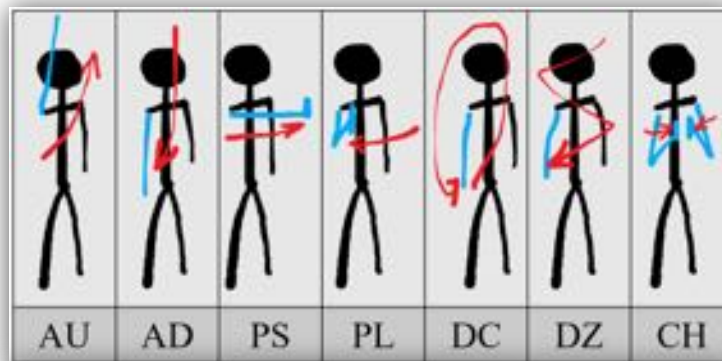


研究进展

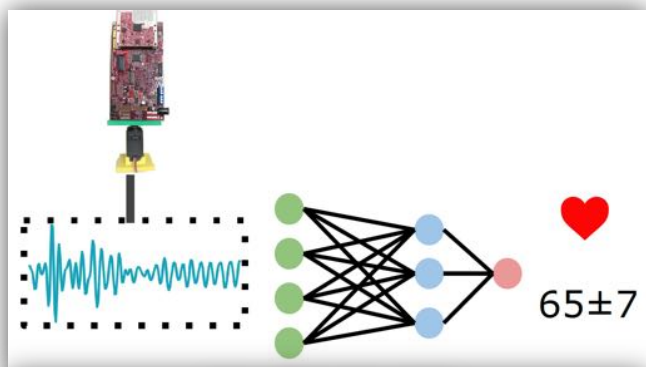
典型应用



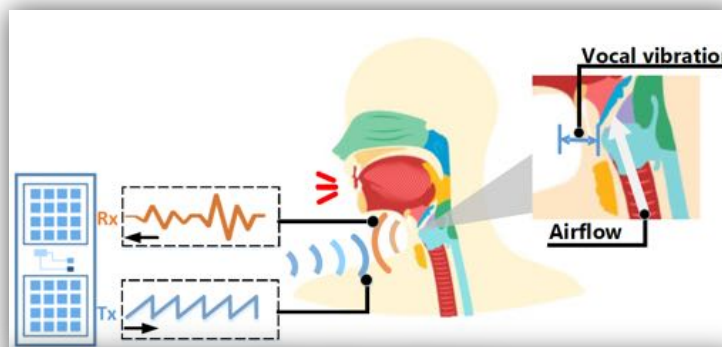
自动驾驶



手势识别



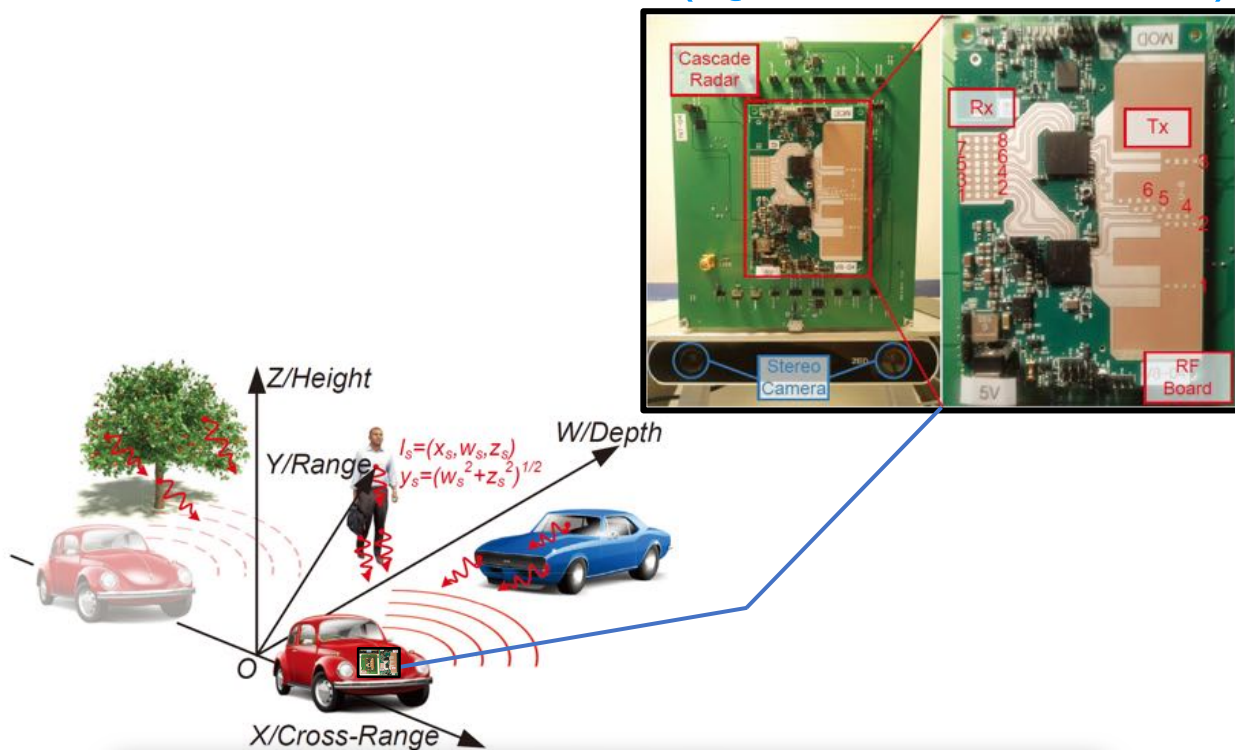
体征监测



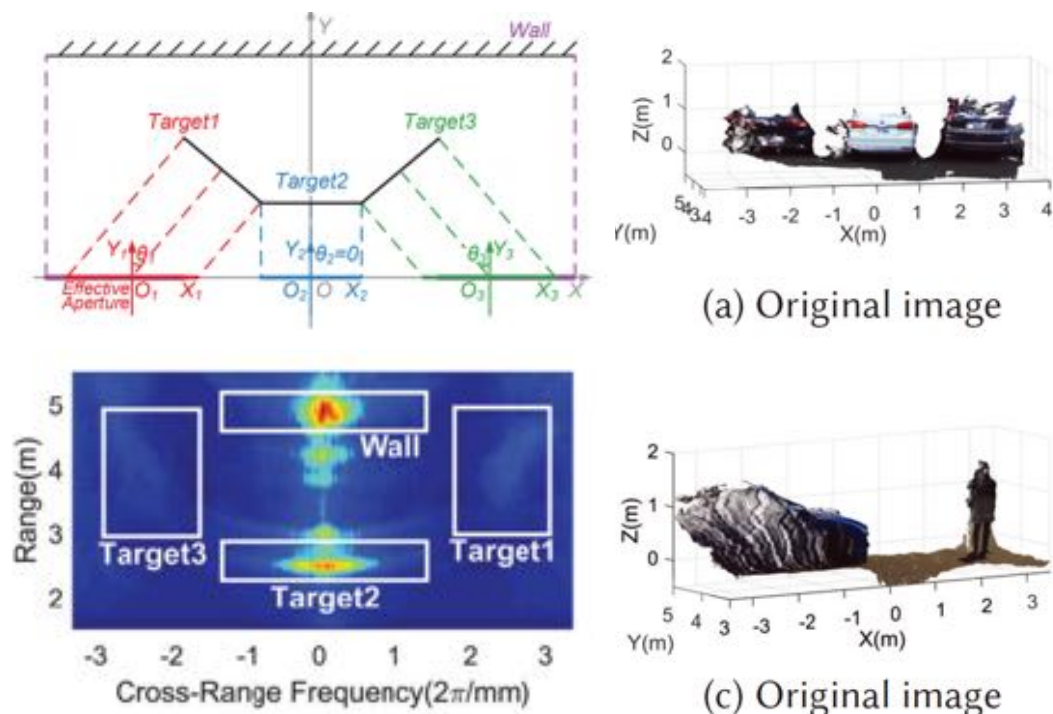
语音感知

研究进展——自动驾驶

- 动机：新兴的自动驾驶系统需要可靠的3D环境感知能力。
- 工作：MilliPoint(Qian et al., 2020)生成三维点云，提高雷达感知能力



部署场景

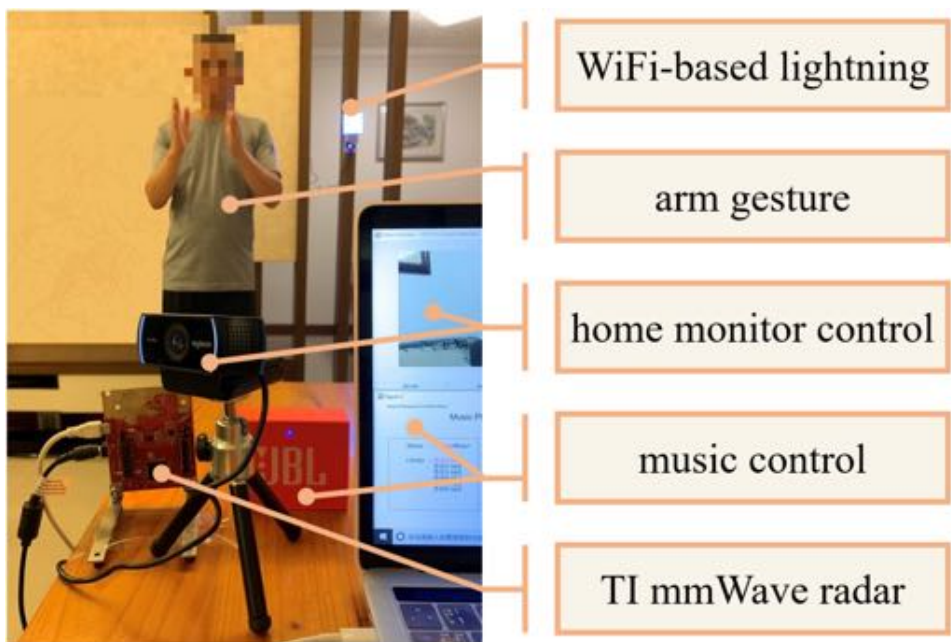


系统实现

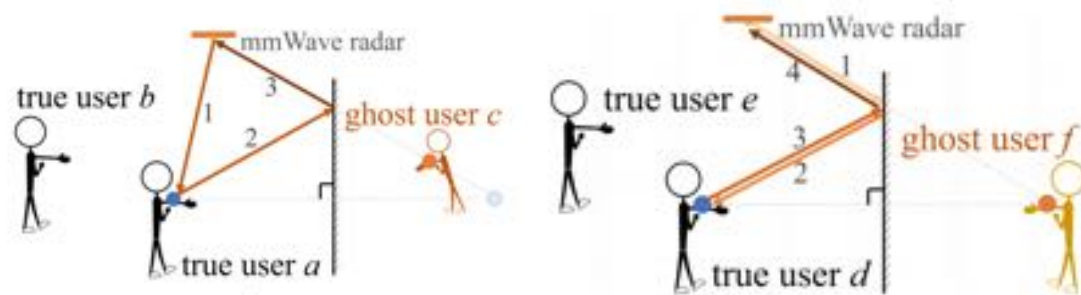
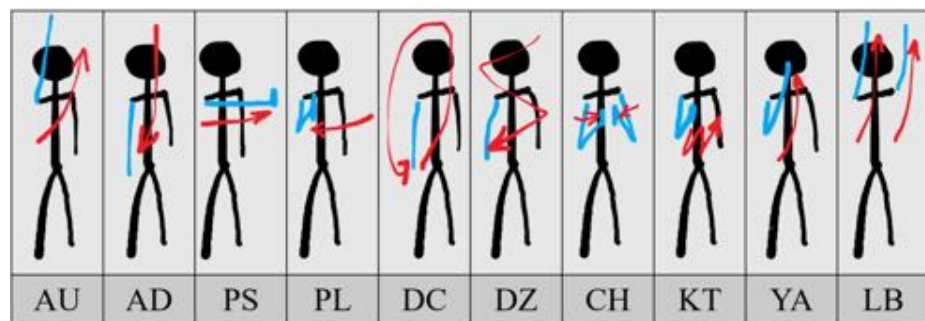
[1] Qian K, He Z, Zhang X. 3D Point Cloud Generation with Millimeter-Wave Radar. In Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2020, 4(4): 1-23.

研究进展——手势识别

- 动机：手势识别在人机交互智能家居中的应用
- 工作：mHomeGes(Liu et al., 2020),实时的毫米波手臂手势识别系统



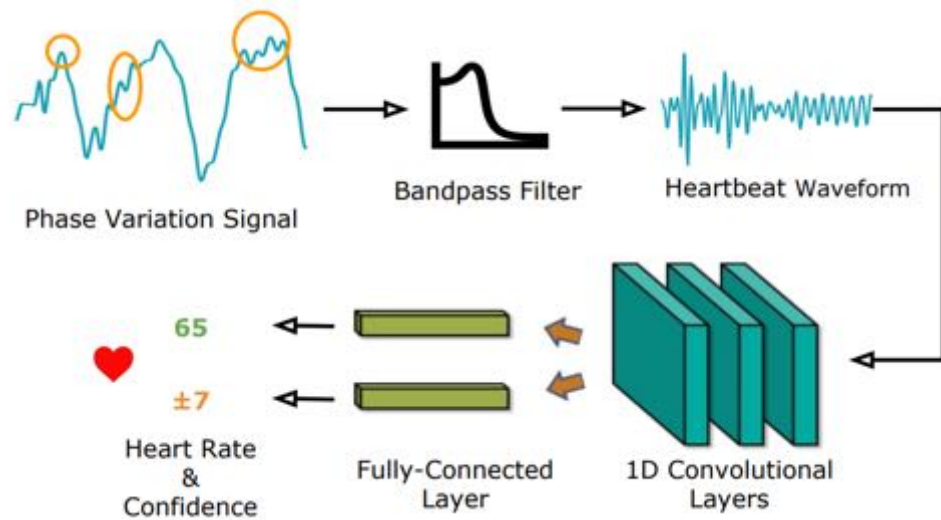
部署场景



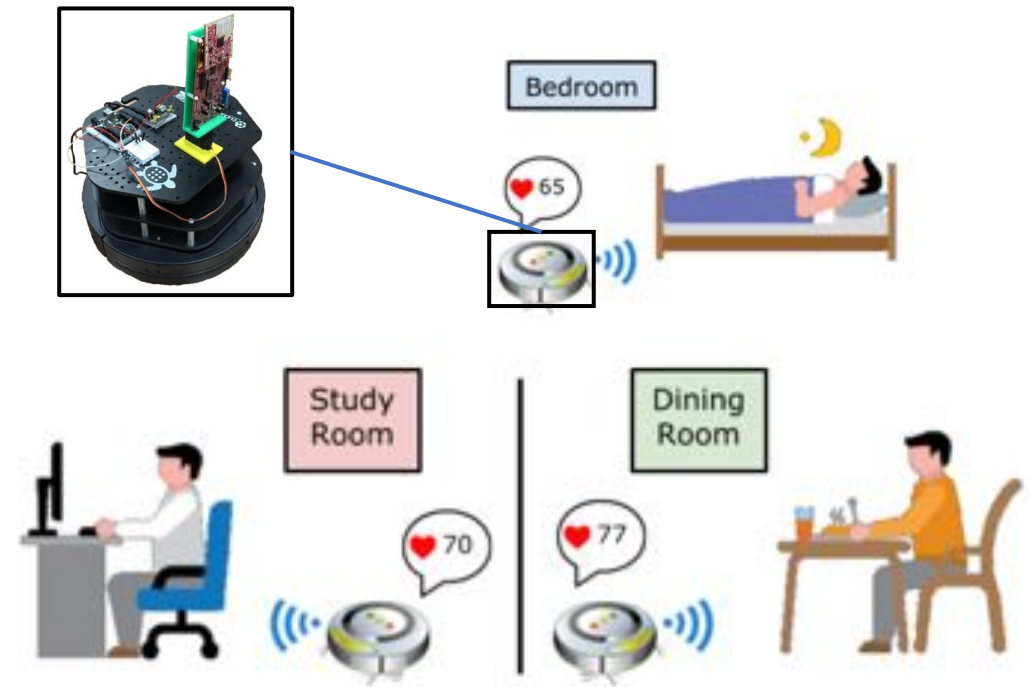
识别手势与感知模型

研究进展——体征监测

- 动机：监测心率是评估健康的一个有用的指标
- 工作：mBeats(Zhao et al., 2020)安装在机器人上的毫米波雷达系统，监测心率。



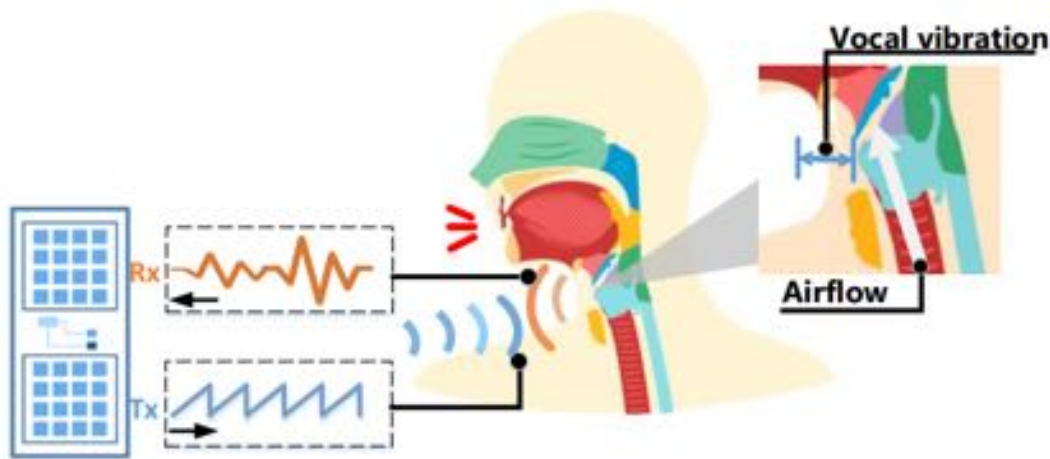
心率感知框架



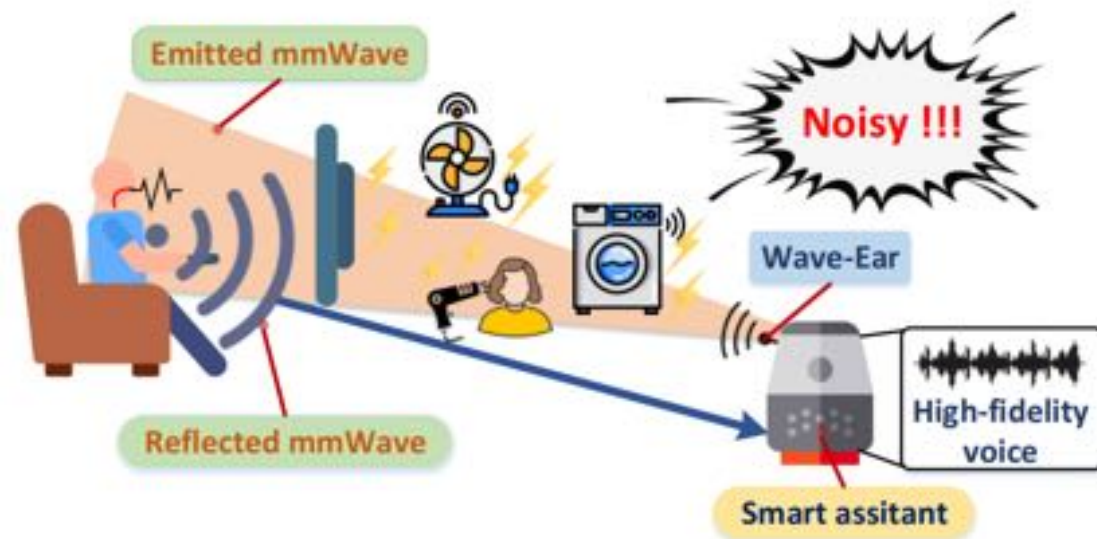
心率感知场景

研究进展——语音感知

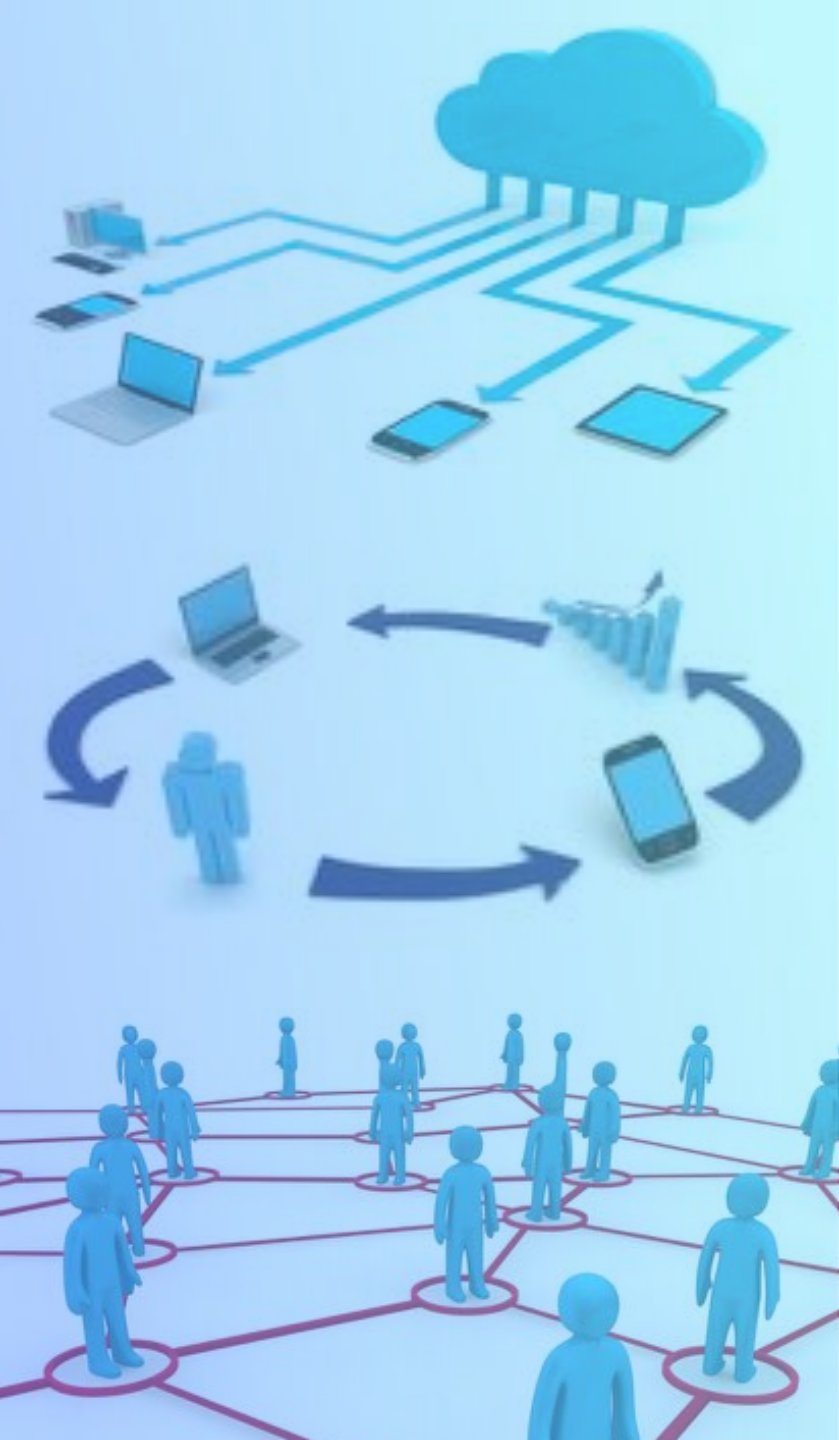
- 动机：语音用户界面(VUI)已经成为人机交互不可或缺的组成部分
- 工作：WaveEar(Xu et al., 2019)，一个端到端抗噪声语音感知系统。



声带振动模型



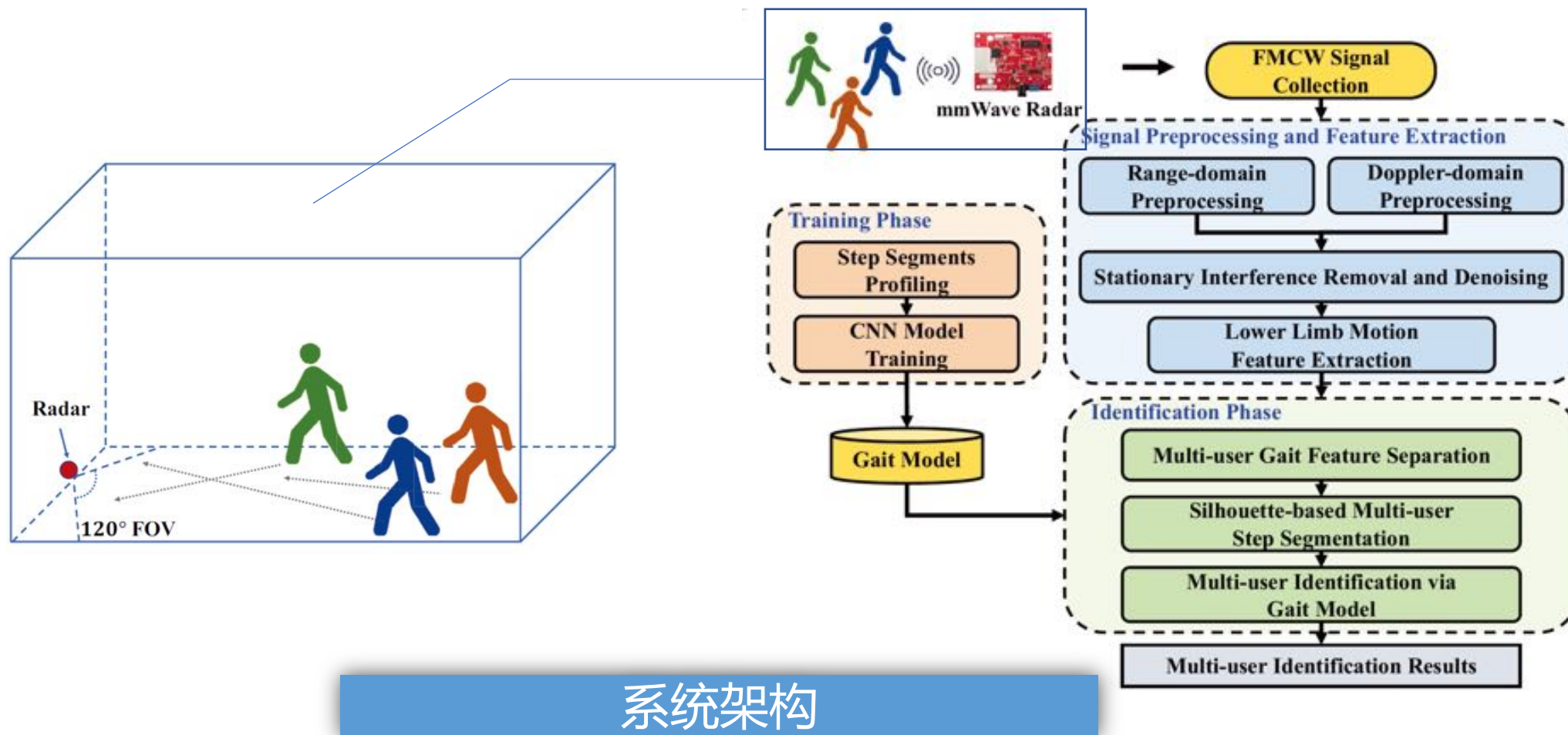
声音感知应用场景



典型案例介绍

步态识别-系统概述

- MU-ID(Yang et al., 2020), 基于步态使用毫米波进行多用户识别



步态识别-基于FMCW的毫米波雷达背景知识

- Range

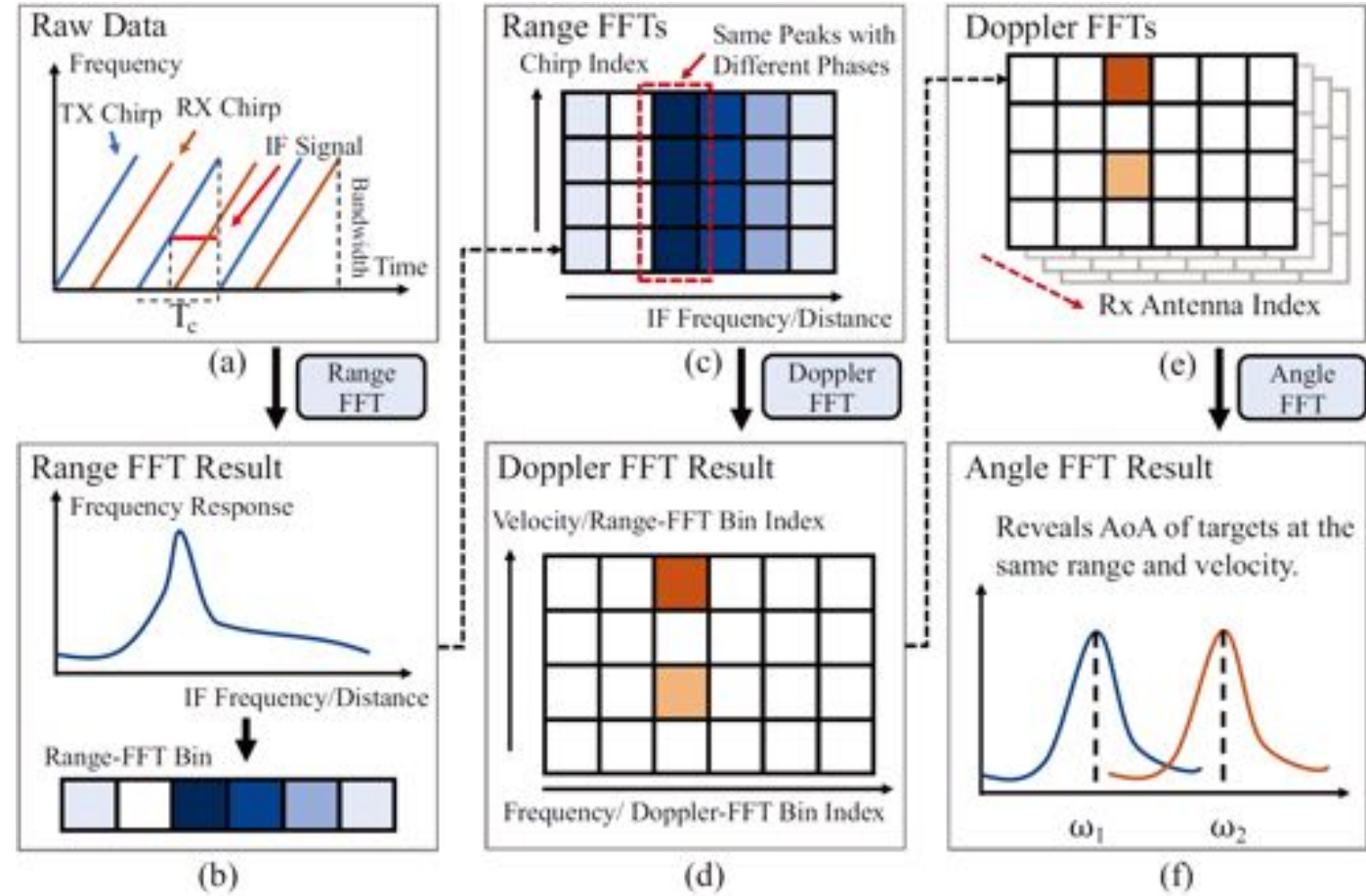
$$d = \frac{f_{IF} \cdot c}{2 \cdot S}$$

- Velocity

$$v = \frac{\lambda \cdot \omega}{4\pi \cdot T_c}$$

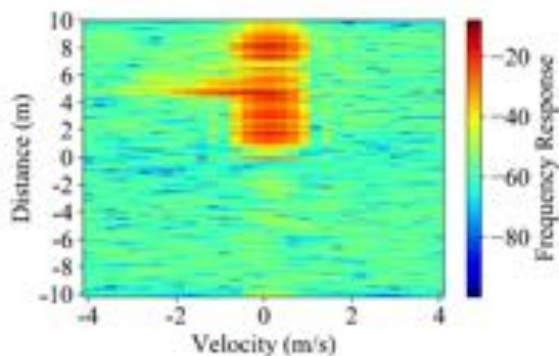
- Angle of Arrival

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda \cdot \omega}{2\pi \cdot d_{inter-Rx}} \right)$$

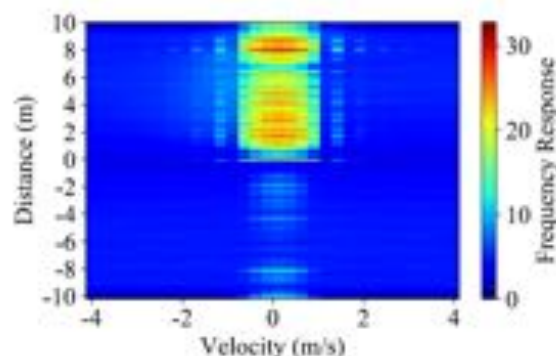


步态识别-去除静态环境影响

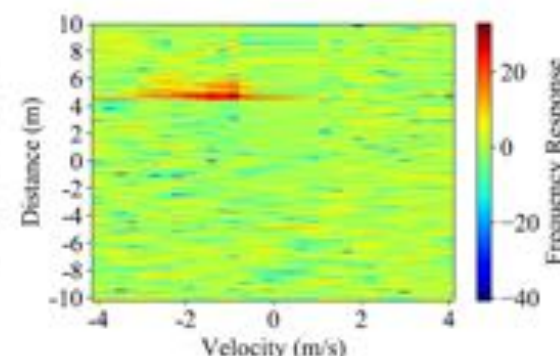
- 在Range-Doppler域建立环境频率响应模型
 - 消除由静止物体反射的无关信号，如椅子、桌子、墙壁。
 - 累积频率响应减轻了行走的用户相关反射



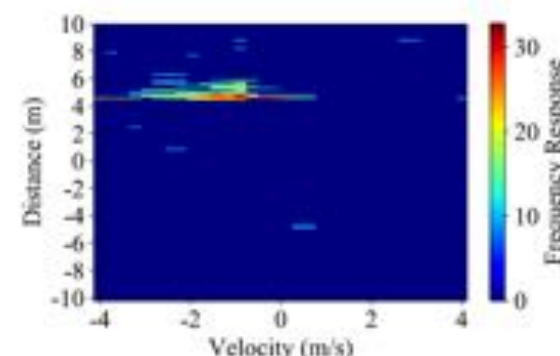
a. Range-Doppler



b. 静态干扰



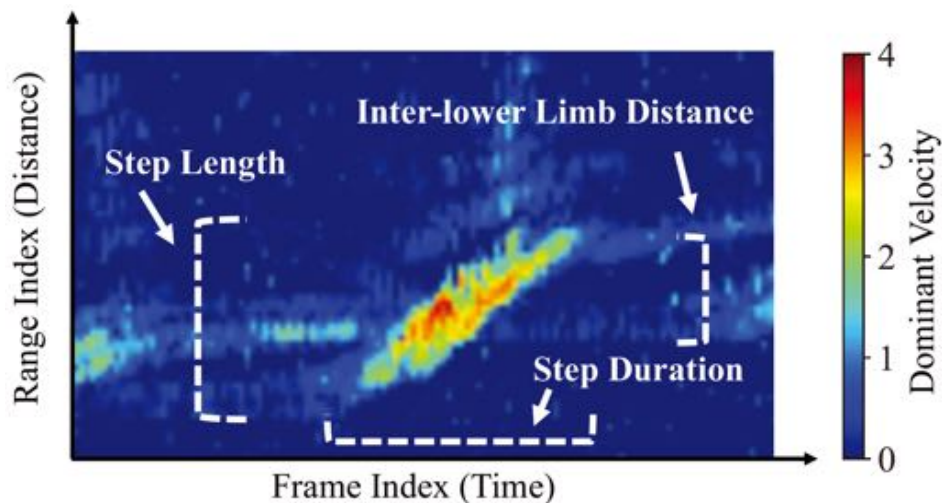
c. 干扰消除



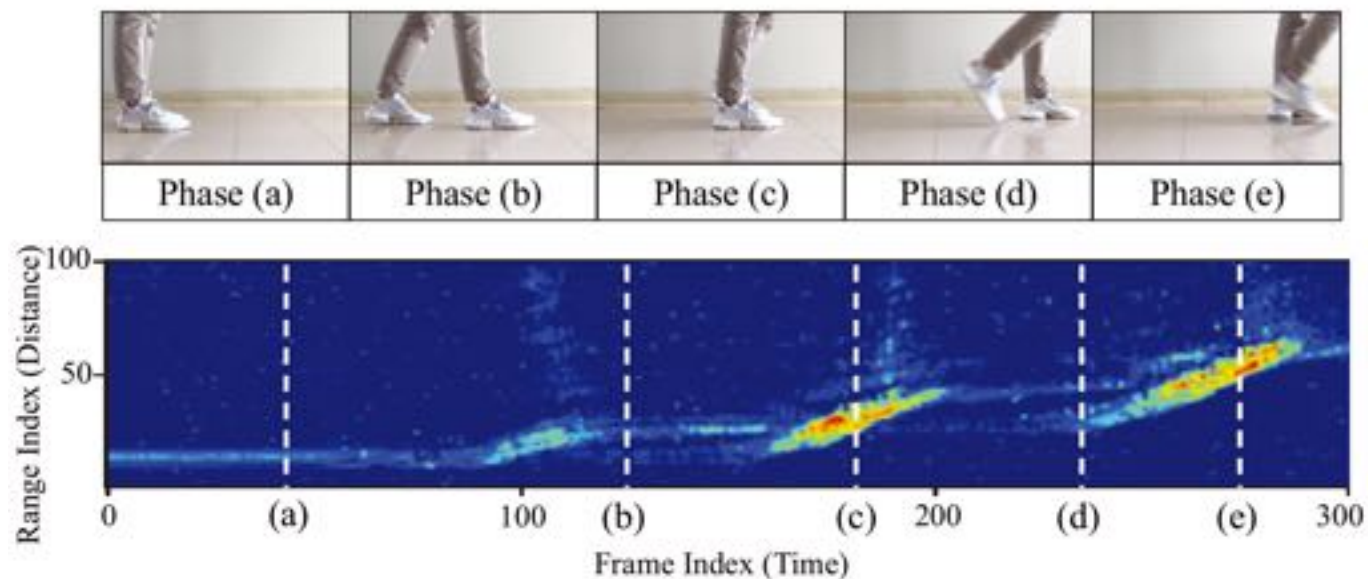
d. 去噪后的Range-Doppler

步态识别-肢运动特征提取

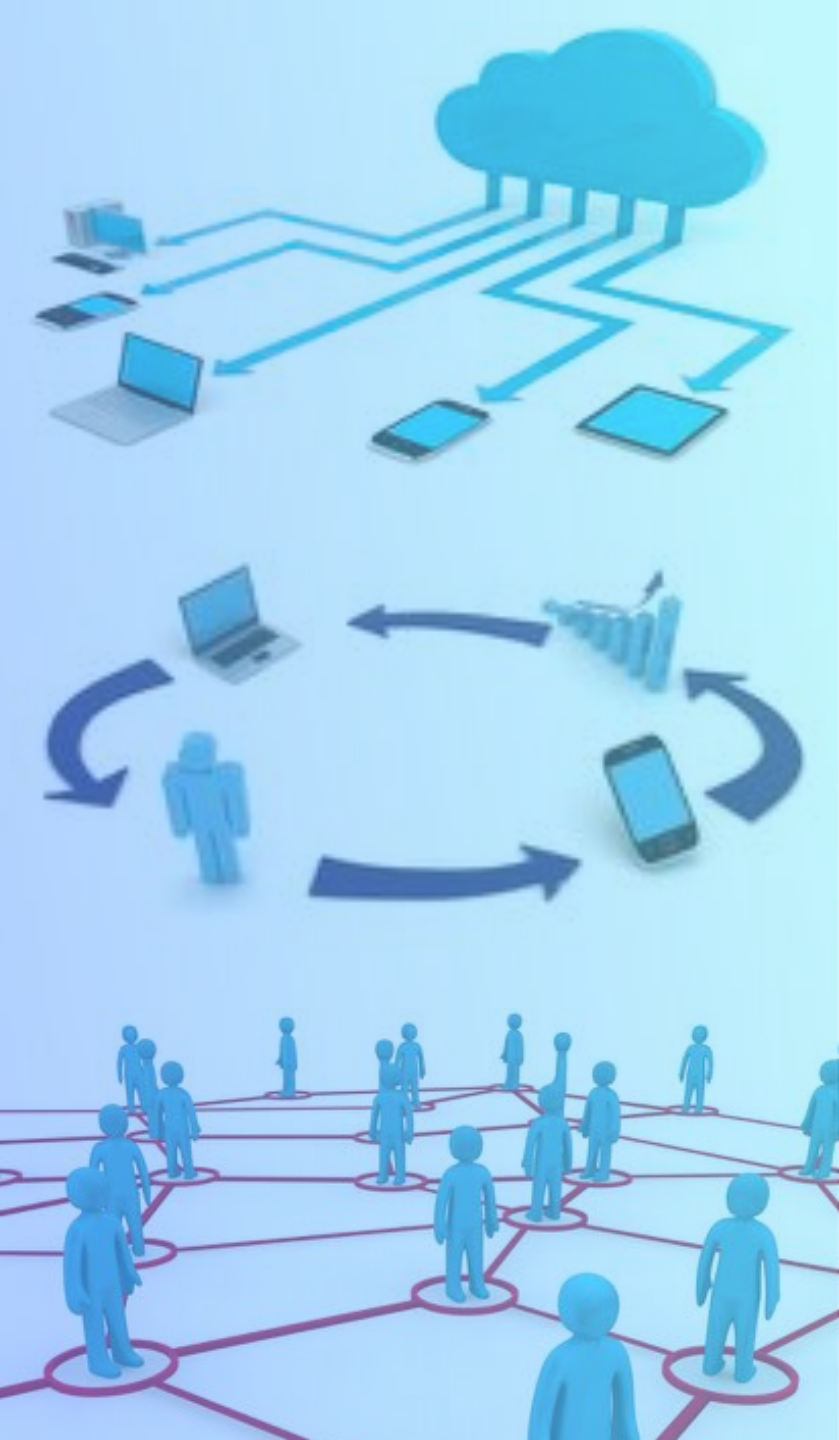
- 下肢步态特征图包含用户的步态特征
- 基于热图的用户在时空域中行走特征的图示



下肢步态特征



实际步态和特征图之间的对应



PART.3

RFID感知

RFID通信原理

RFID是一种非接触式的自动识别技术。

RFID系统有三个基本器件：阅读器，天线和标签。

1-阅读器以广播方式向周围发送连续射频信号，用于激活标签

2-被激活的标签通过反向散射将射频信号返回，并携带调制好的相应信息



RFID标签



主要特点

非接触式的自动快速识别

永久存储一定数量的数据

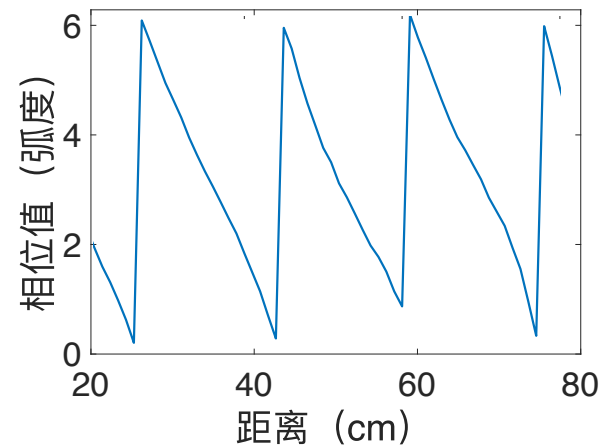
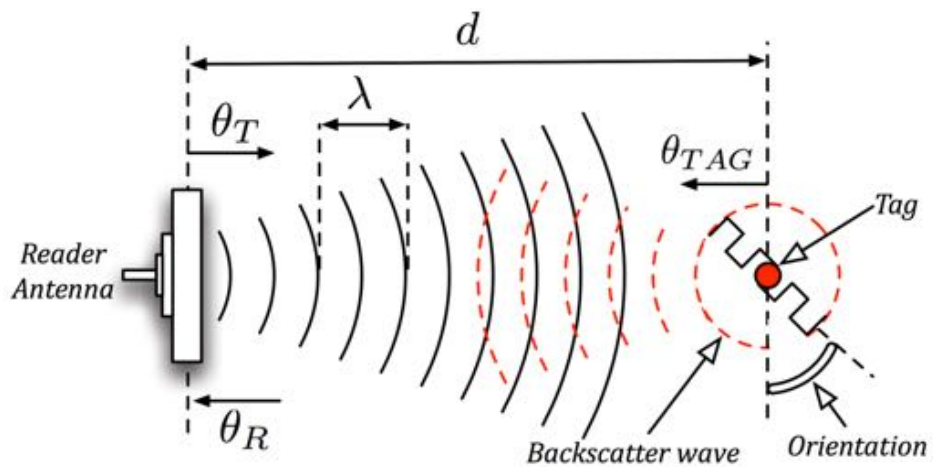
进行简单的逻辑处理

反射信号强度容易受干扰

成本低廉、可以大量部署

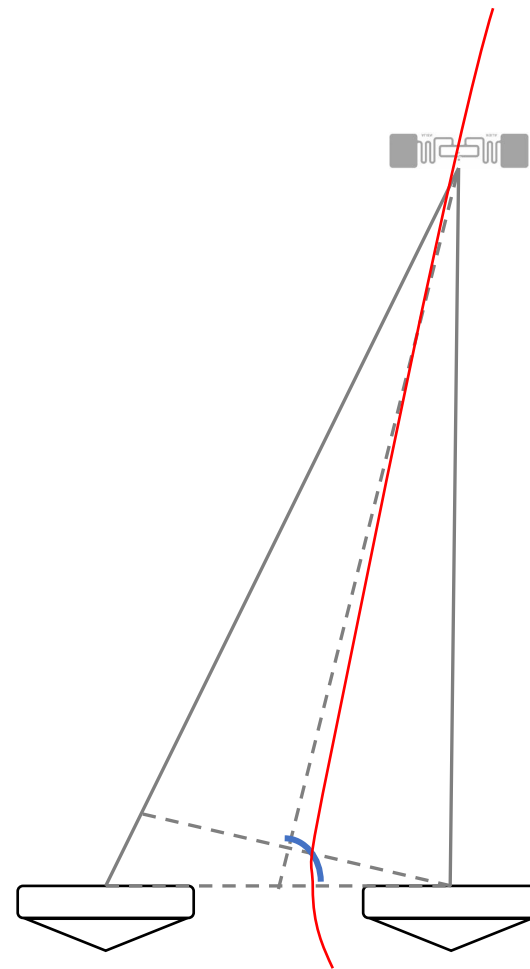
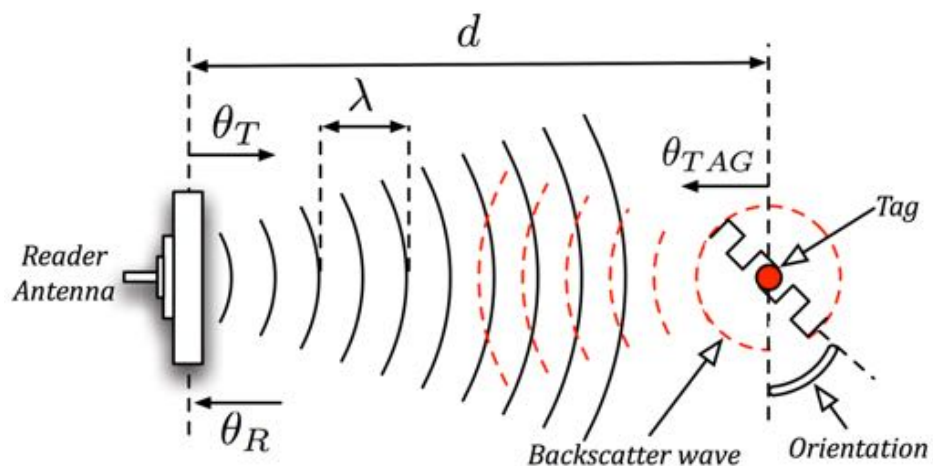
信号特征

- 主要使用相位信号，信号强度
- 相位和距离呈现周期性线性变化



AoA基本原理

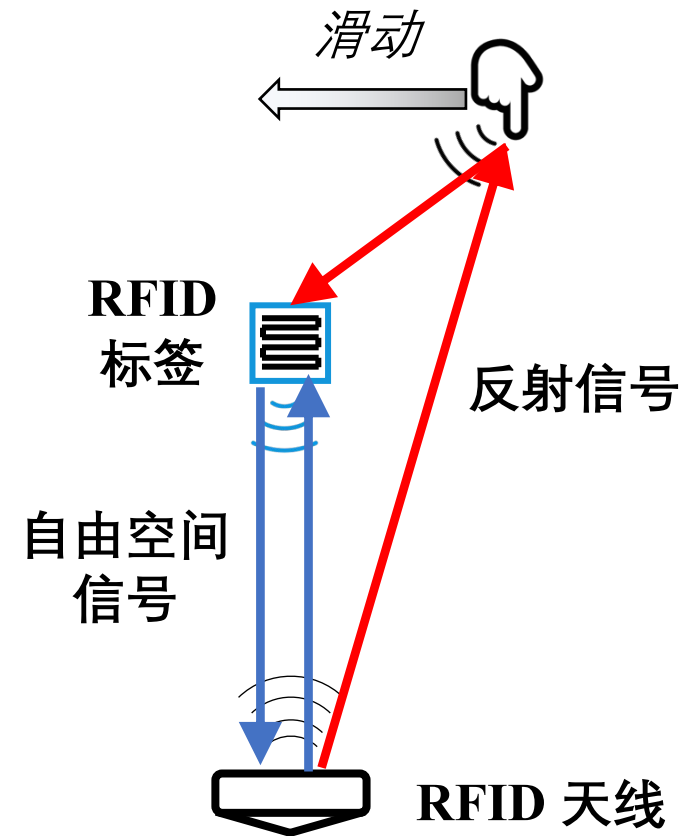
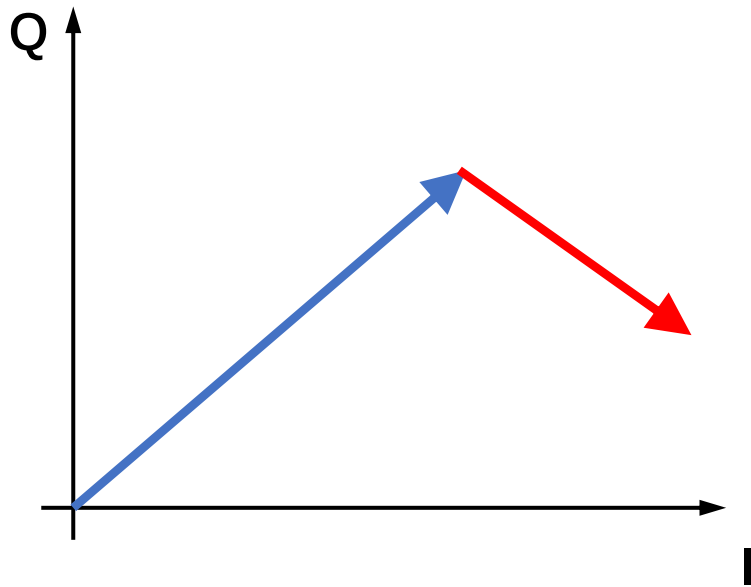
- 利用多个天线测量单个标签的相位之差，构建AoA模型
- 反之亦然，使用多个标签对单个天线位置感知



利用相位差构建AoA模型定位

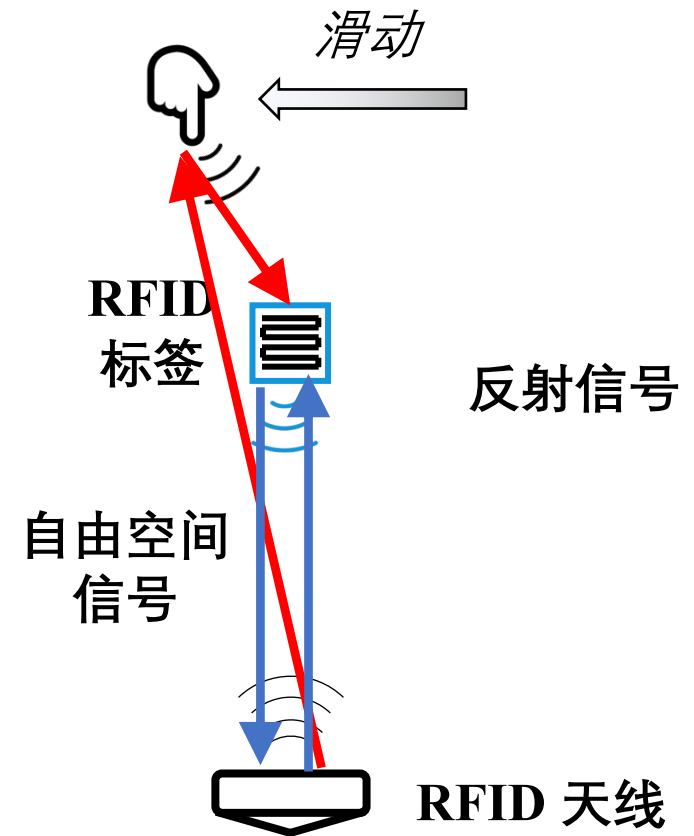
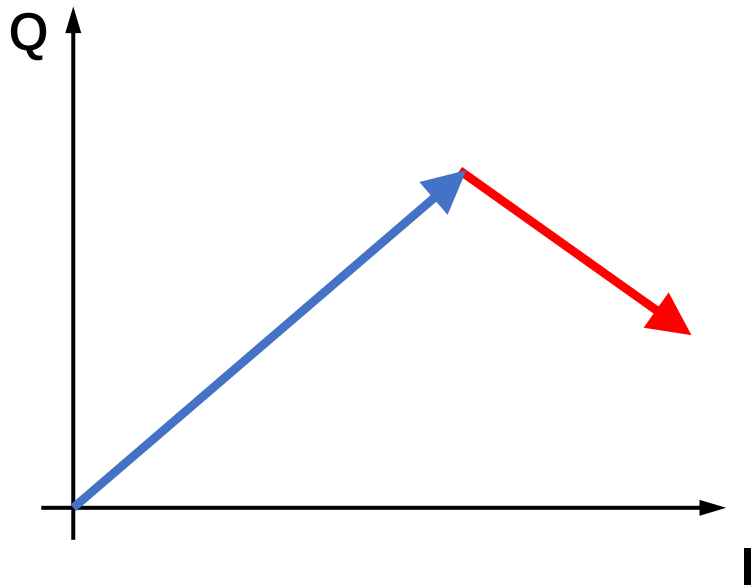
信号反射基本原理

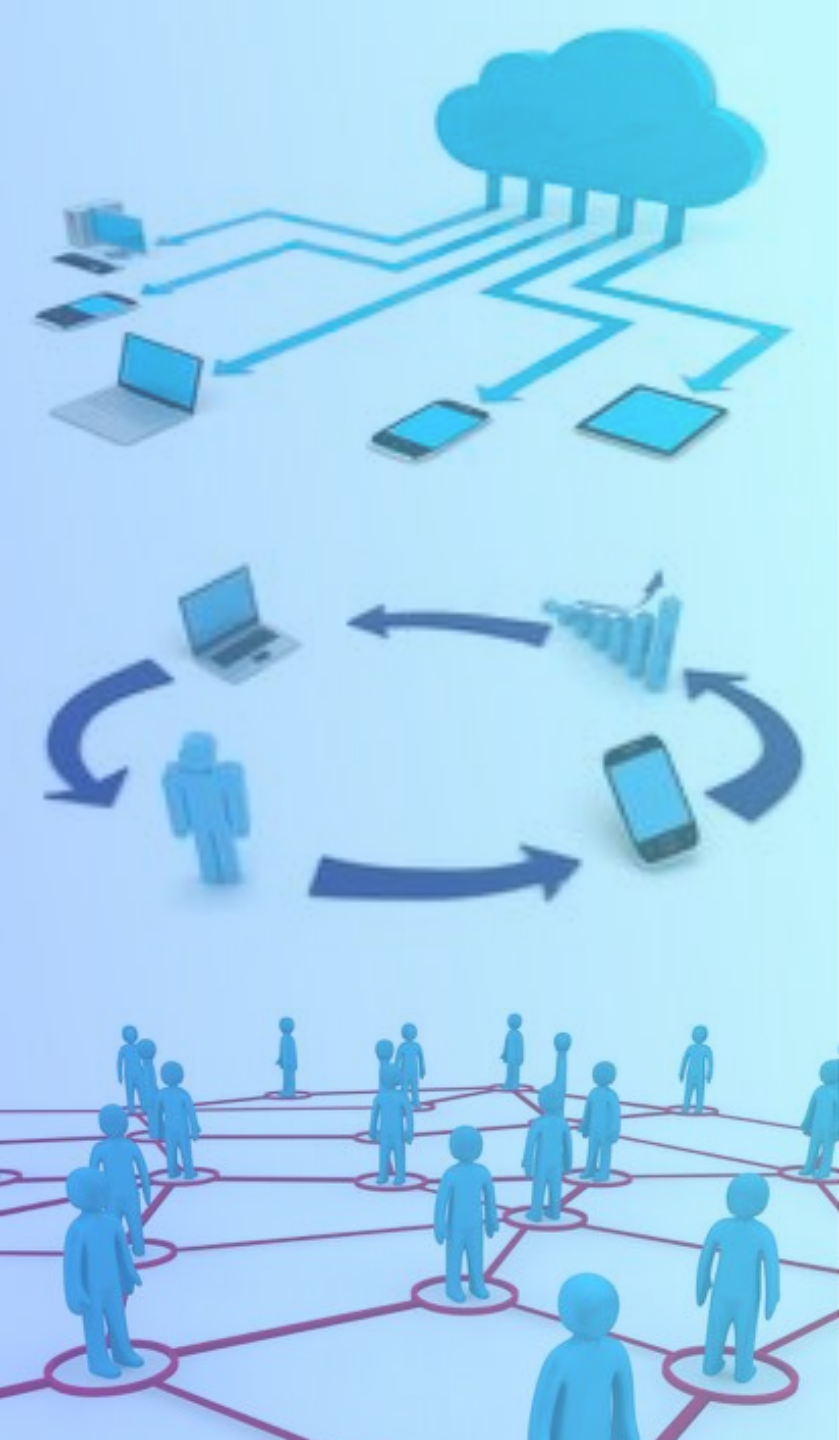
- 除了直接对RFID标签进行定位，RFID标签还能够对周围的物体运动进行感知



信号反射基本原理

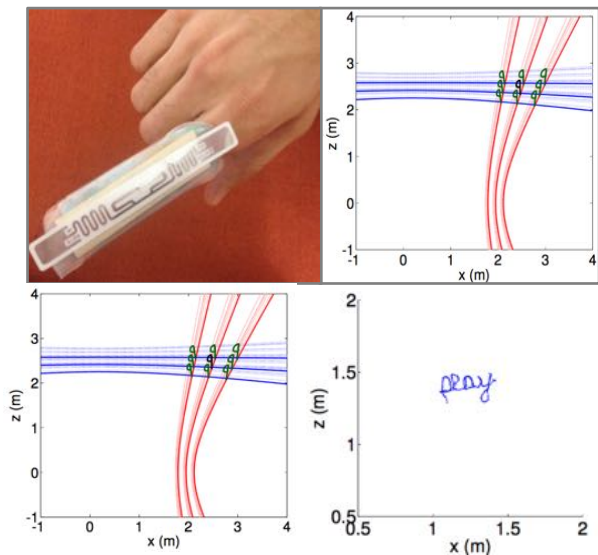
- 除了直接对RFID标签进行定位，RFID标签还能够对周围的物体运动进行感知



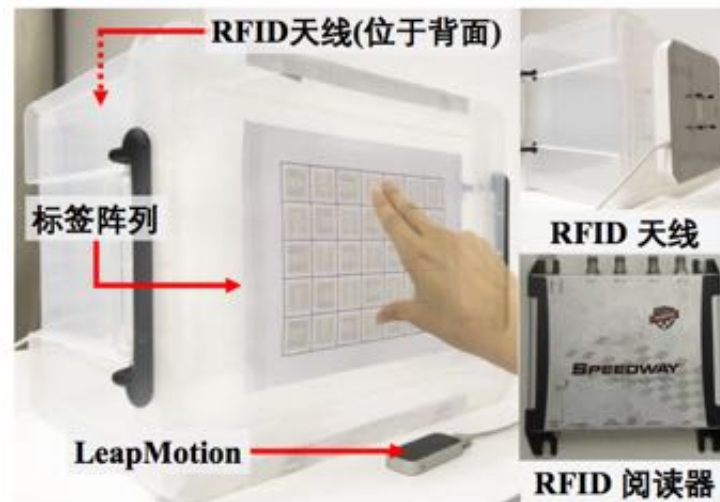


研究进展

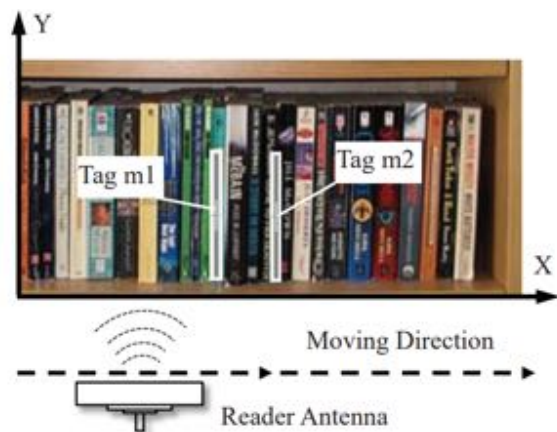
研究进展



手指追踪



手势识别



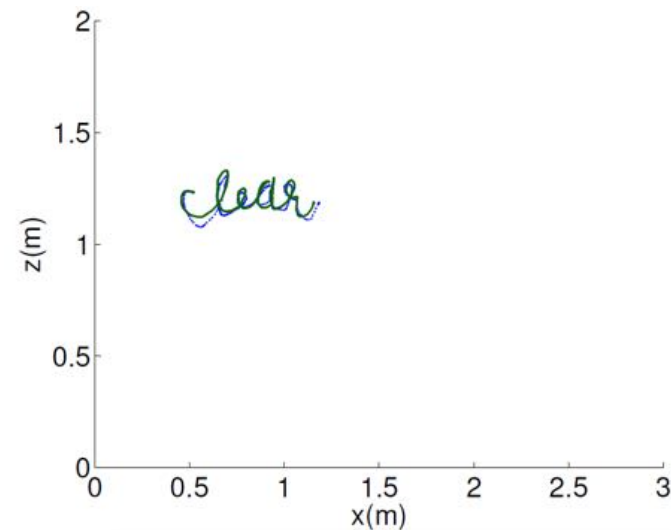
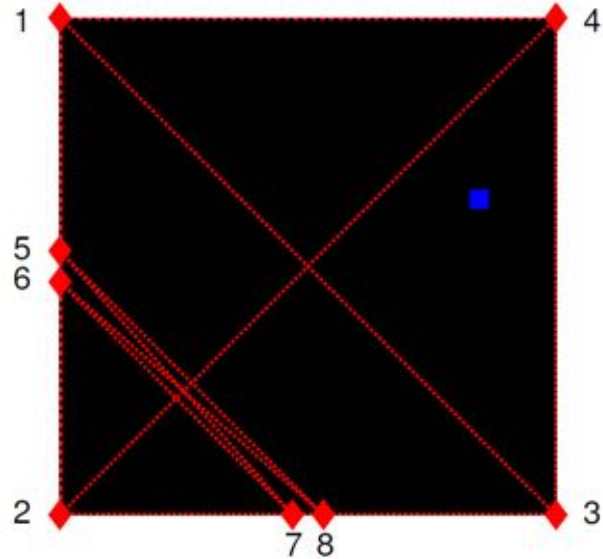
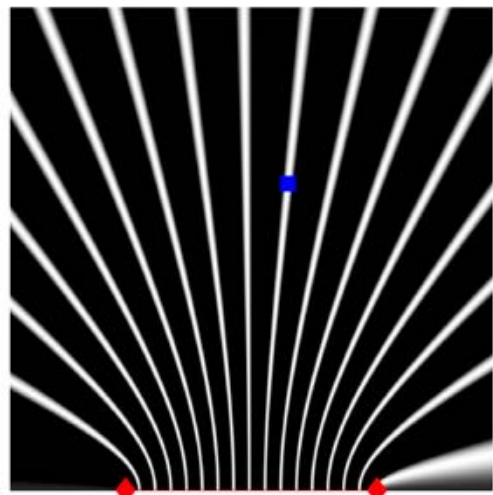
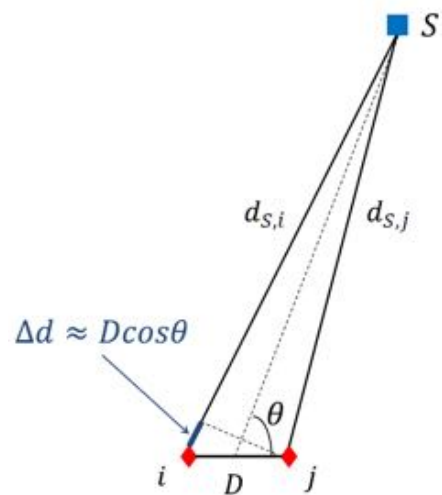
图书盘点



现实增强

研究进展——手势追踪

- 动机：隔空手指运动追踪在智能交互中的应用
- 工作：RFIDraw(Wang et al., 2014),实现手指运动追踪

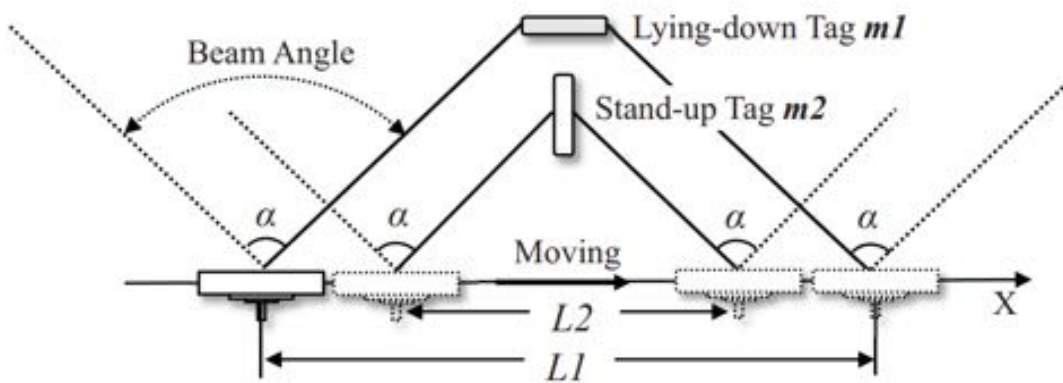


AoA模型原理

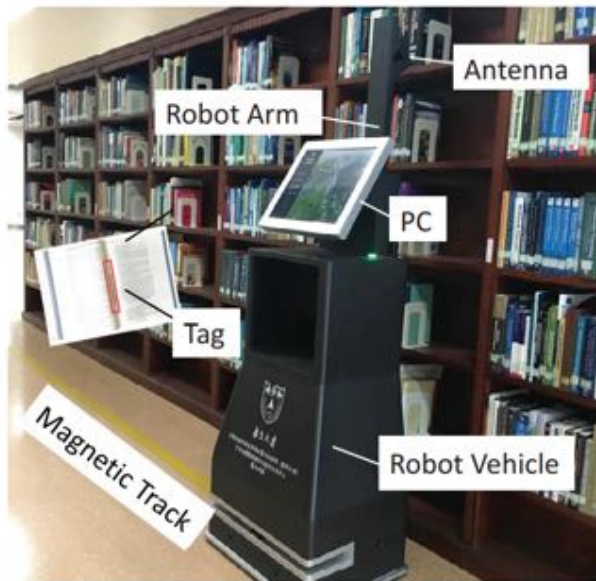
还原轨迹

研究进展——图书盘点

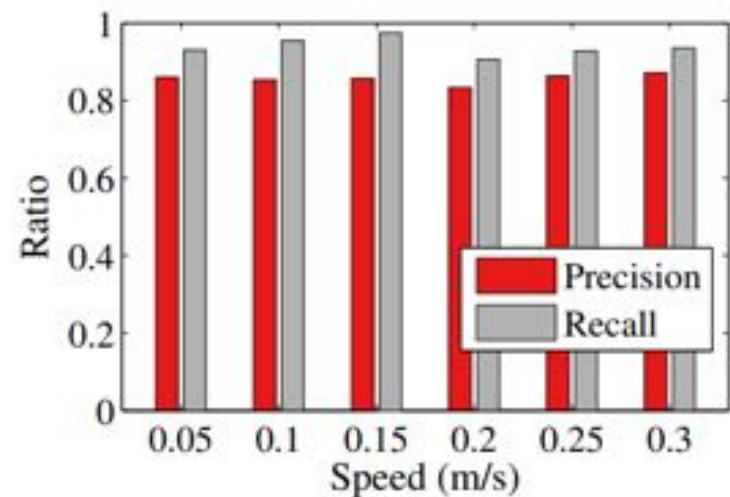
- 动机：自动化校对错架图书
- 工作：RF-Scanner(Liu et al., 2017),实现自动图书盘点



运动模型



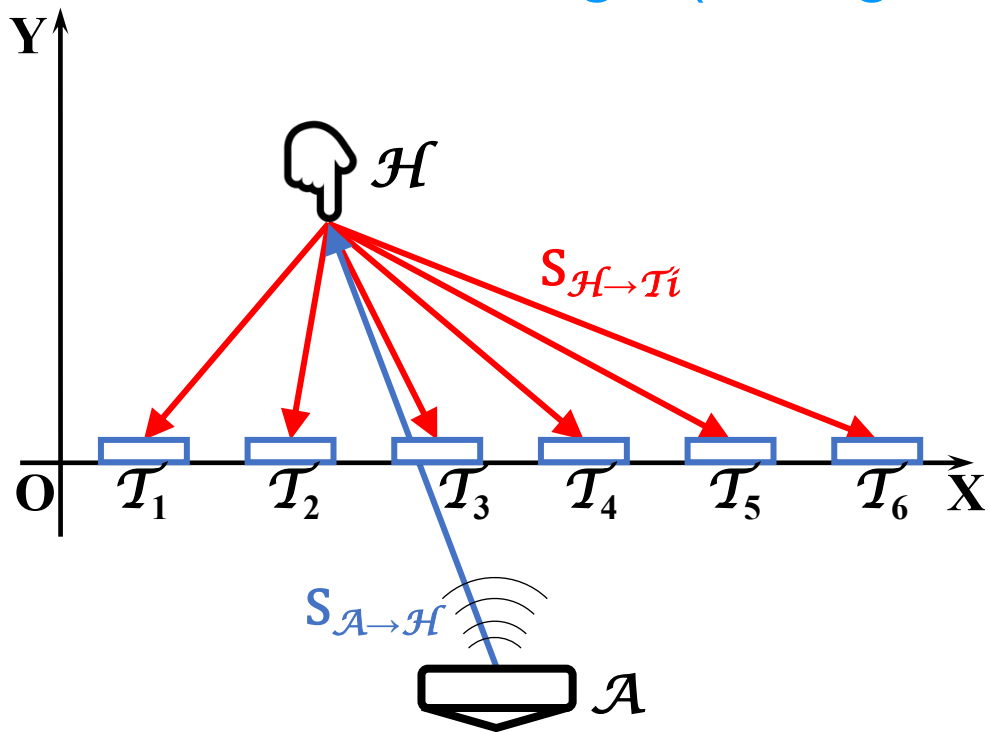
系统原型



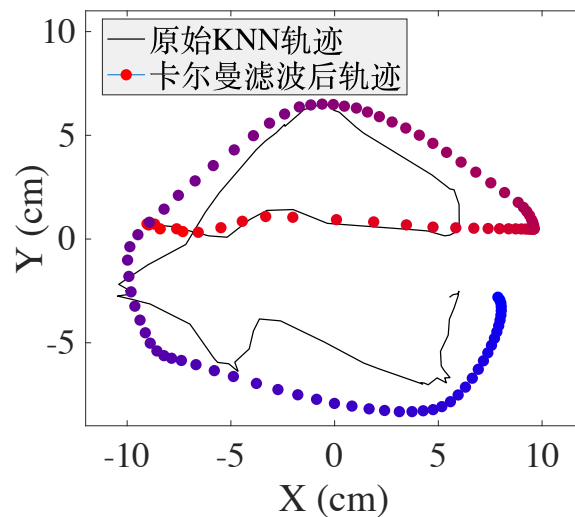
盘点性能

研究进展——手势识别

- 动机：隔空手势识别在智能交互中的应用
- 工作：RF-finger(Wang et al., 2018),实现非绑定式手指追踪



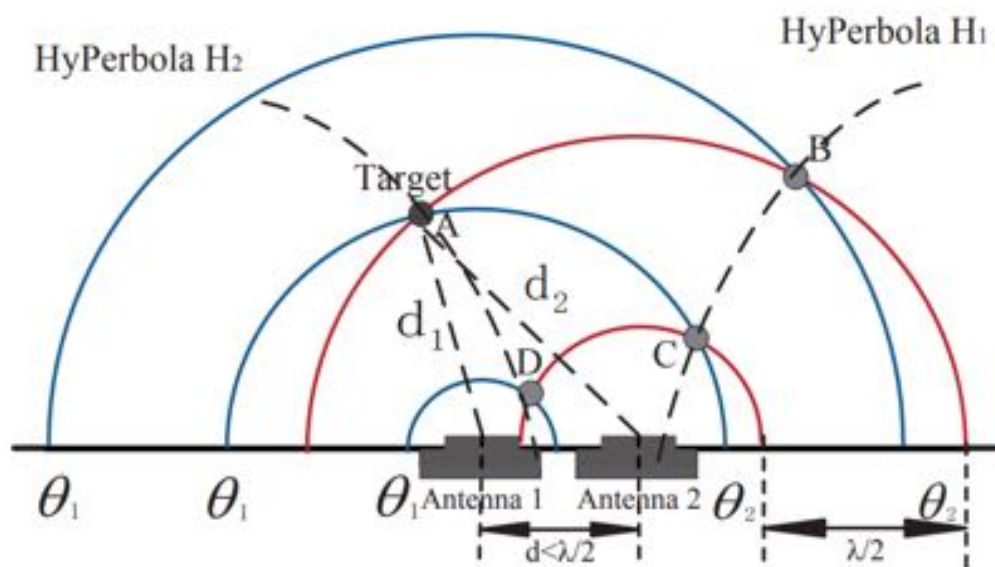
反射模型



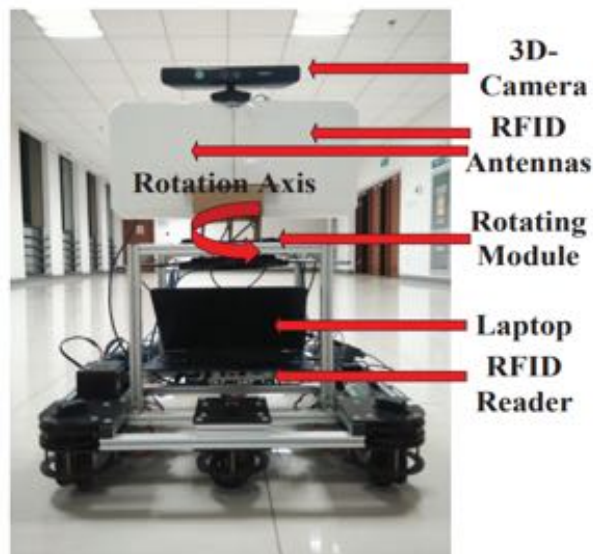
手指轨迹

研究进展——现实增强

- 动机：对环境中的物体增强，显示物体特征信息
- 工作：TaggedAR (Xie et al., 2019)，实现所见即所得



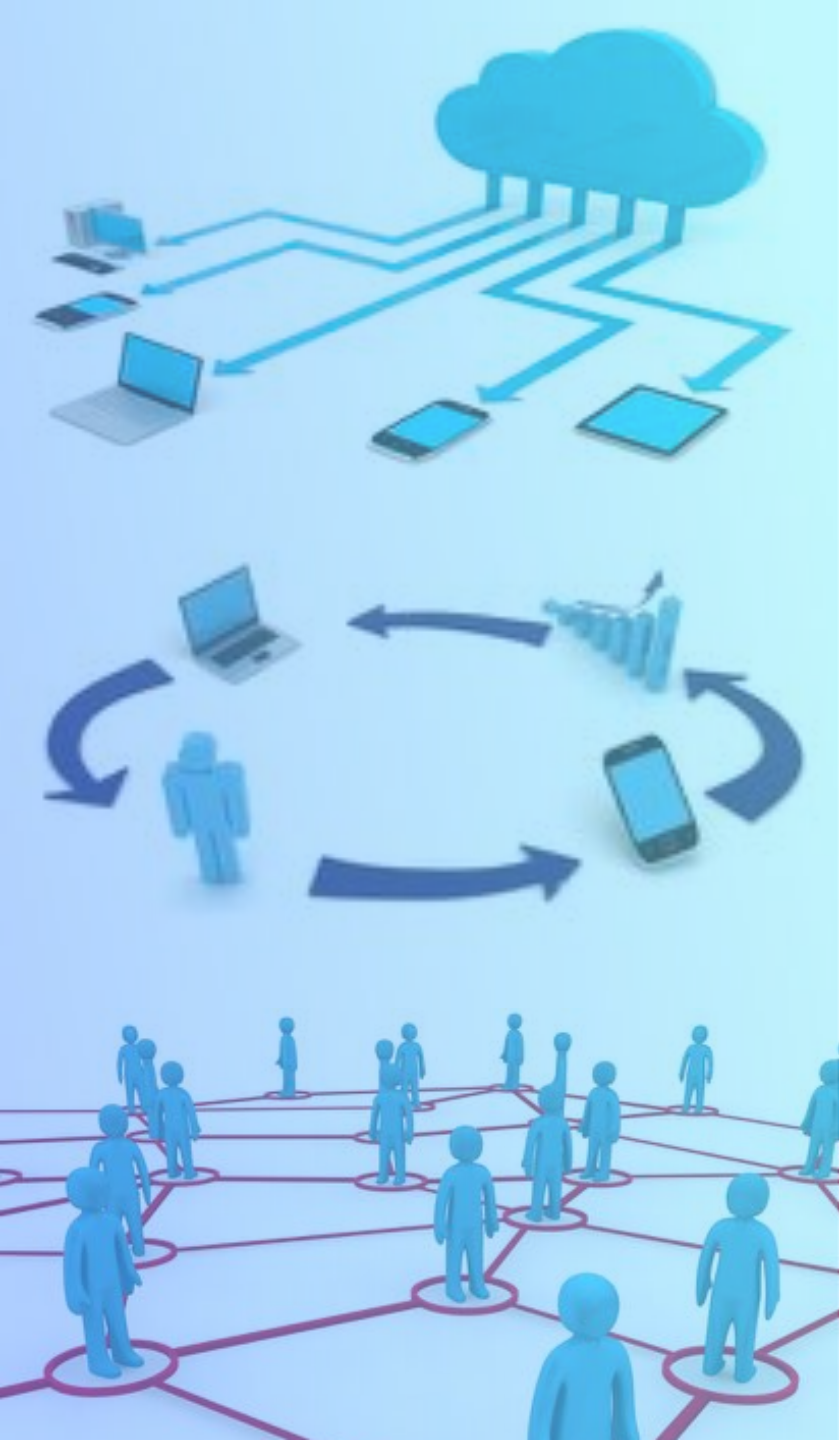
感知模型



系统原型



应用场景



典型案例介绍

定位追踪——研究动因

- Tagoram(Yang et al., 2014), 基于RFID的高精度定位



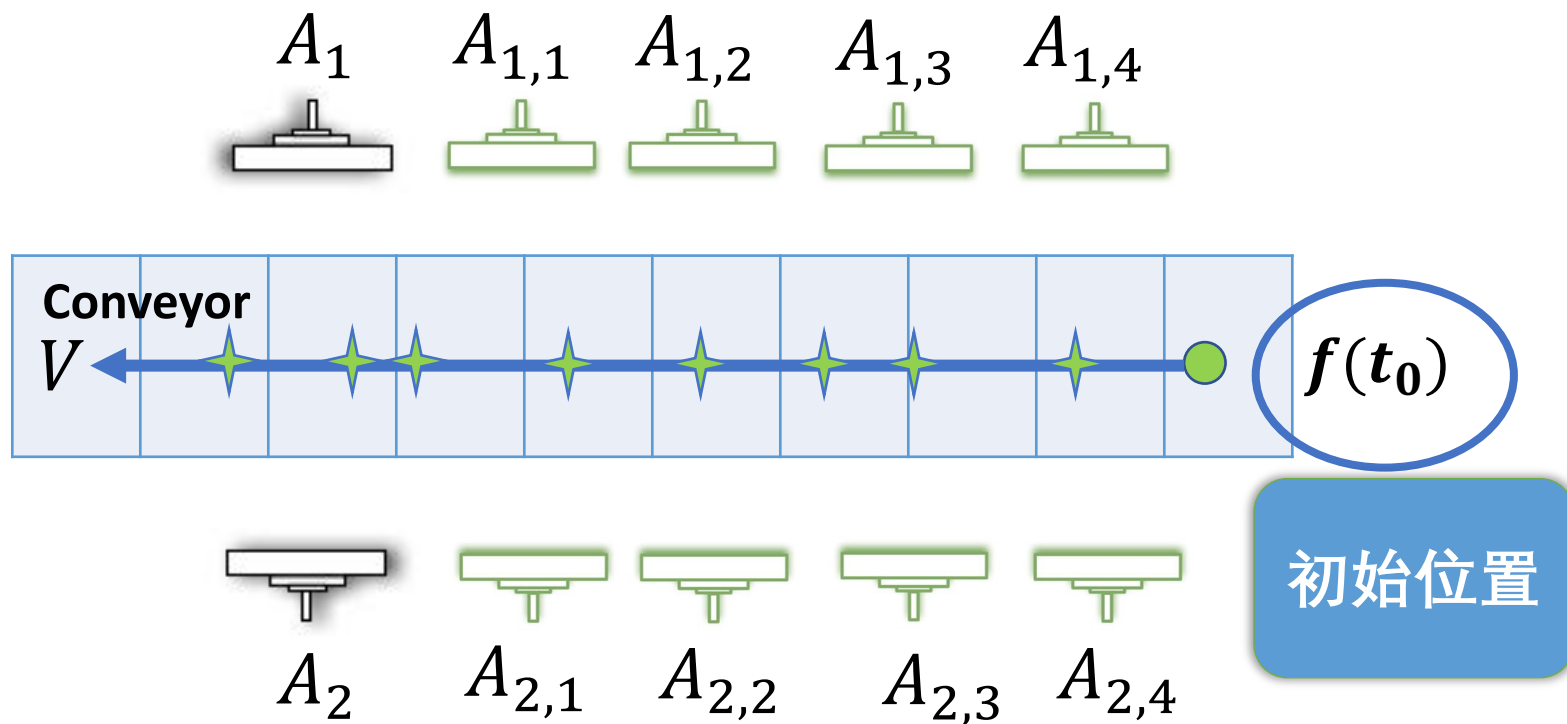
行李定位



手势追踪

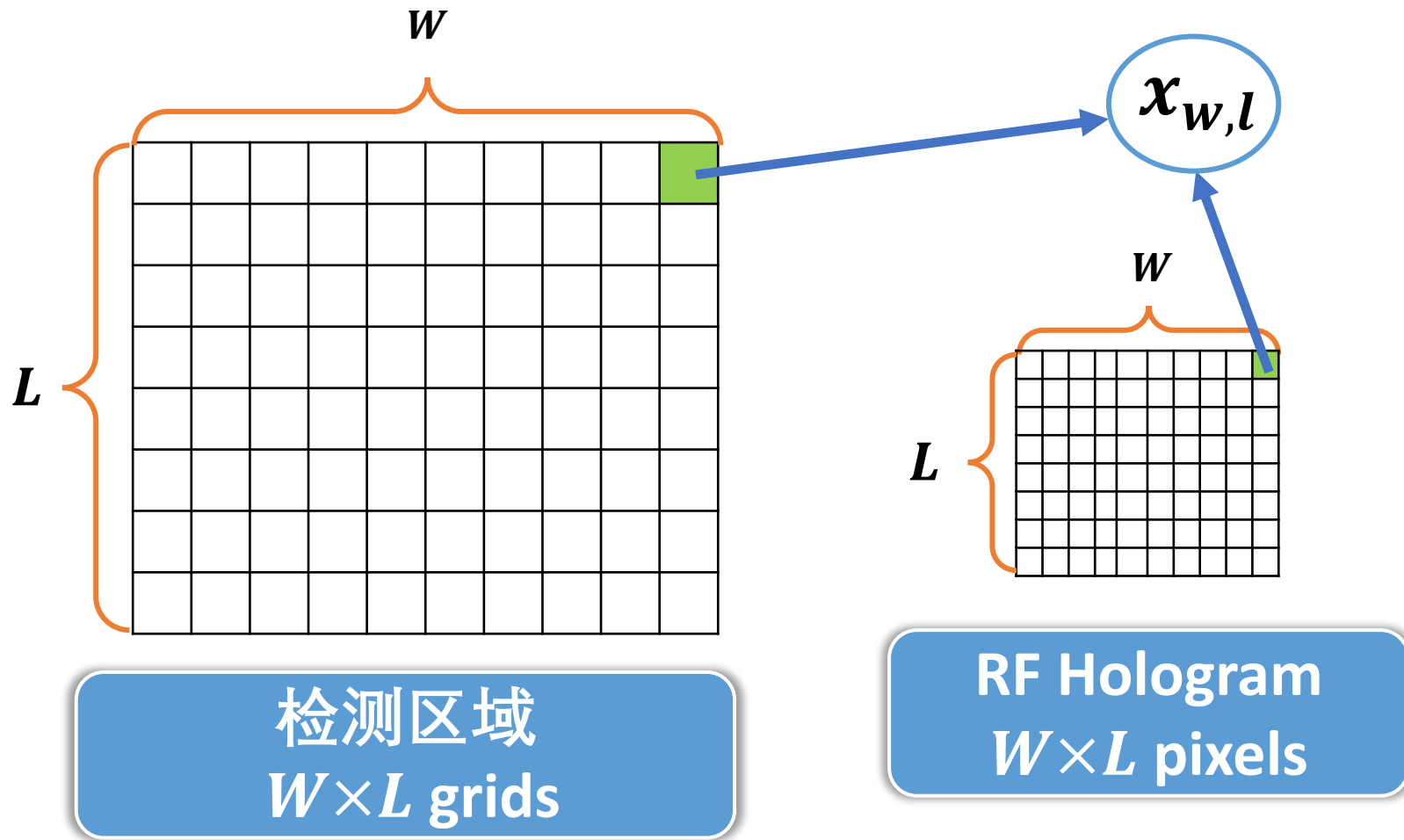
标签定位

- 对已知运动轨道的标签位置追踪，可以转化为多个天线对标签的初始位置进行定位



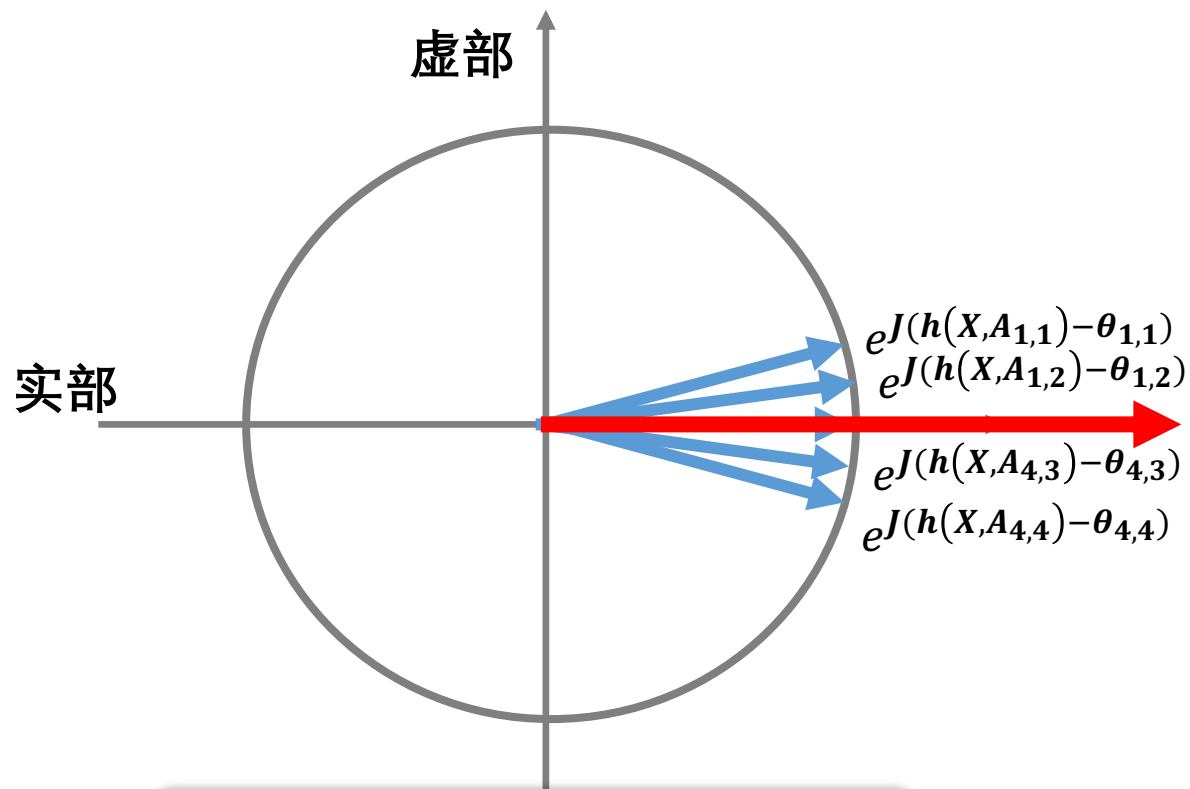
标签定位

- 将检测区域分块，并对标签在每一个小块的具体概率进行计算

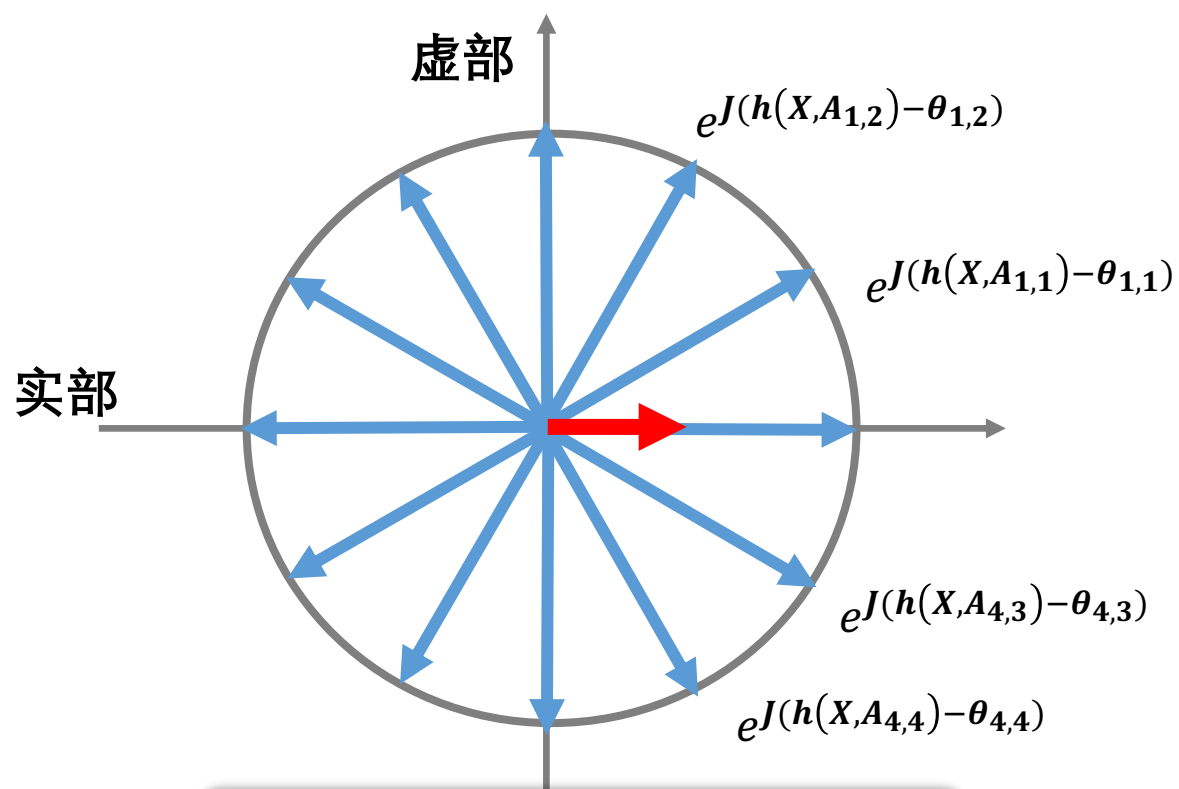


计算位置概率

- 对于任一位置，假设标签在此位置，计算理论相位，并与真实相位比较

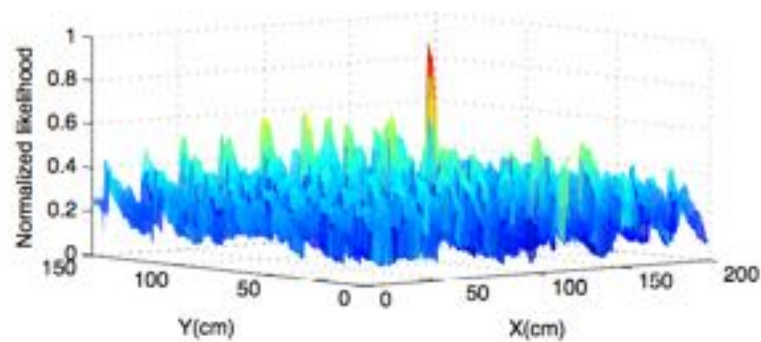
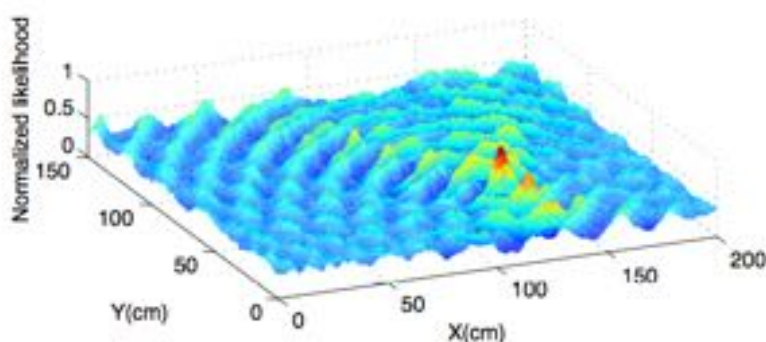
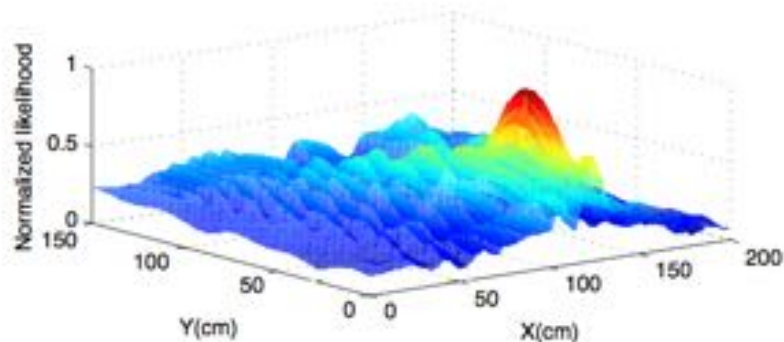
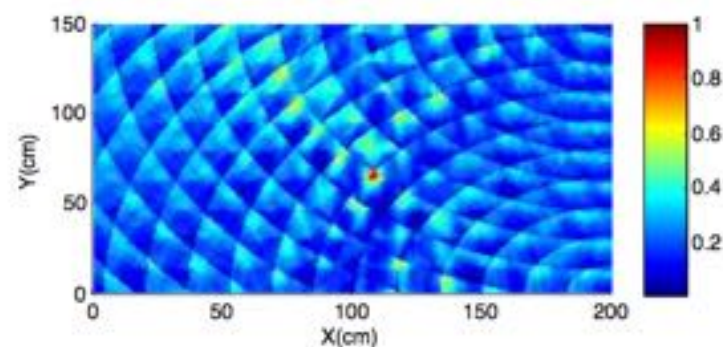
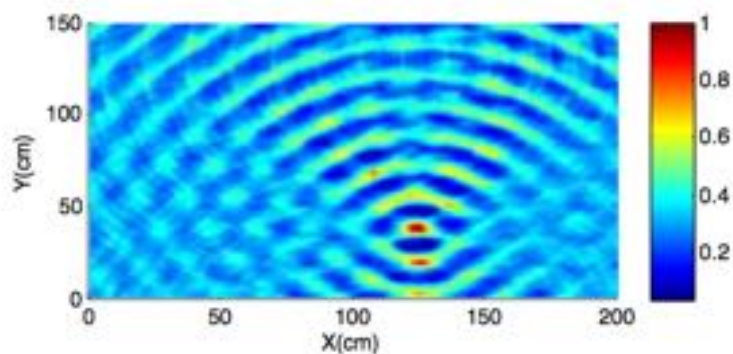
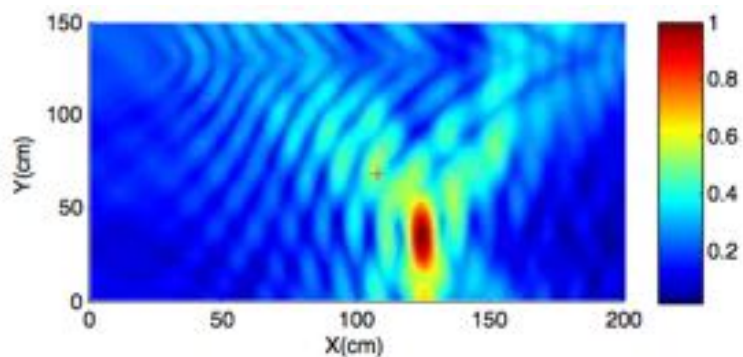


若标签在此位置



若标签不在此位置

计算位置



直接计算理论与真实相位差
原始全息图

考虑相位高斯分布的热噪声
增强全息图

考虑标签的硬件噪声
增强差分全息图

定位结果

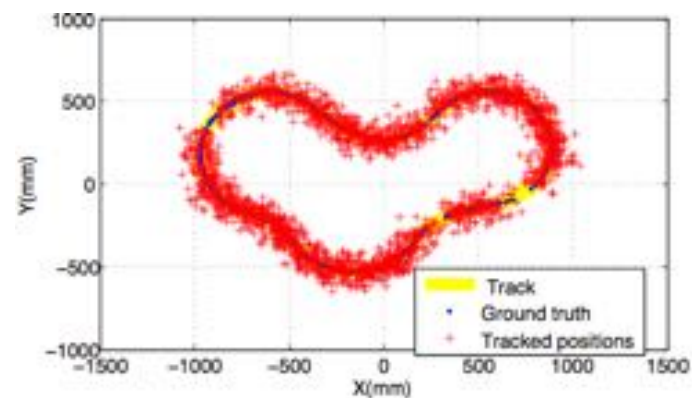
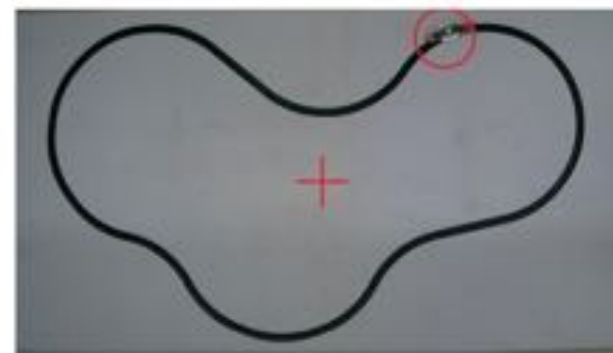
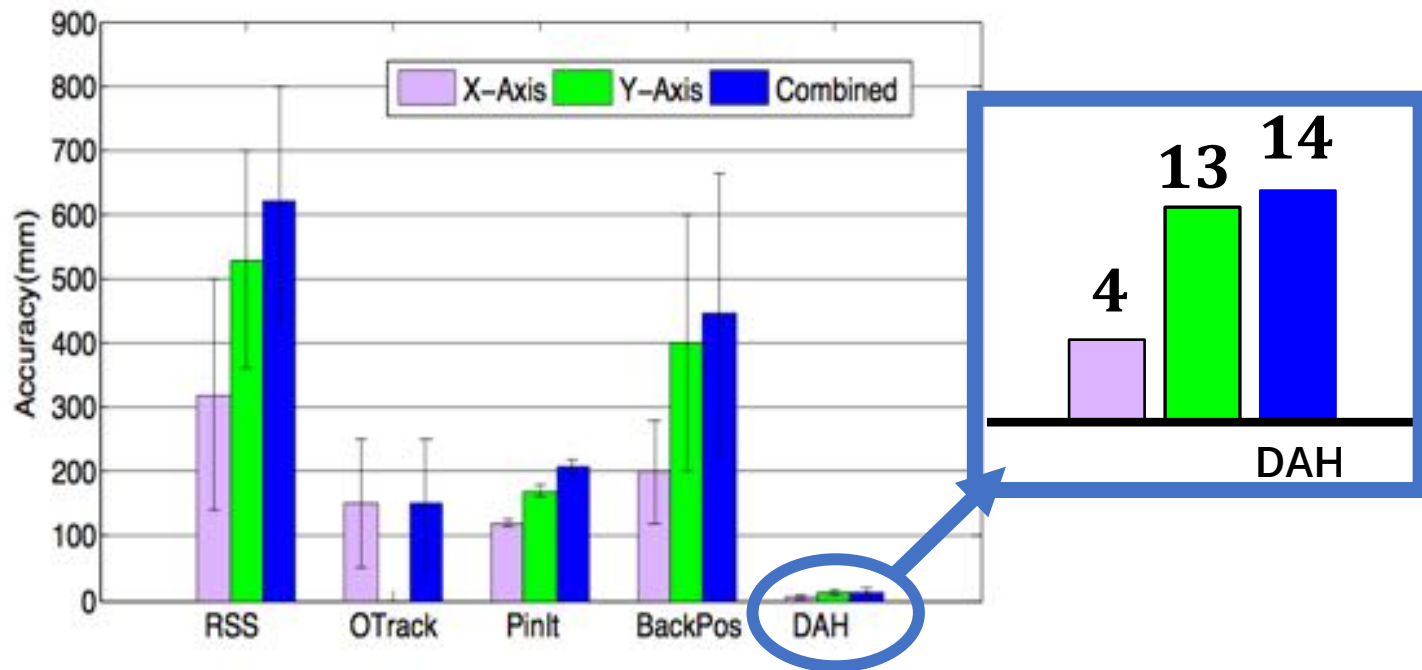


Figure 17: Fitted trajectory

大幅度提升现有的定位精度

对运动轨迹精确追踪



本章完