

2021 华为远见论坛

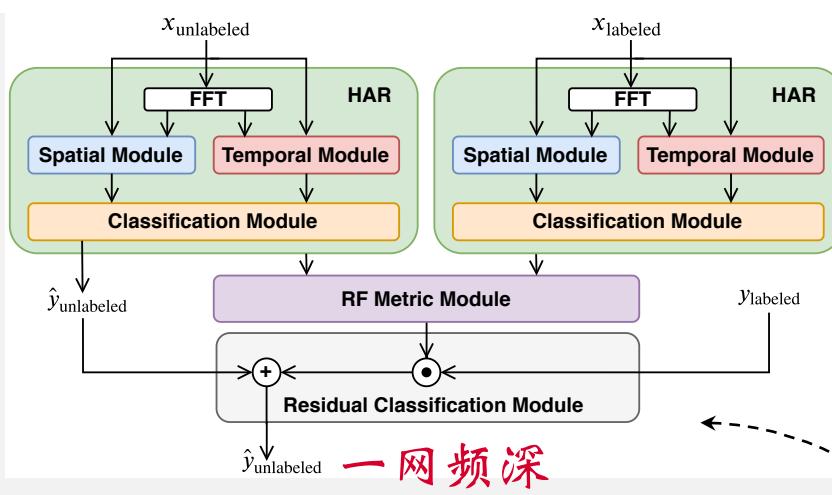
2021 Huawei Vision Forum

人工智能时代的实用射频感知

**Practical Radio-Frequency Sensing in the
Age of Artificial Intelligence**

报告人：罗骏

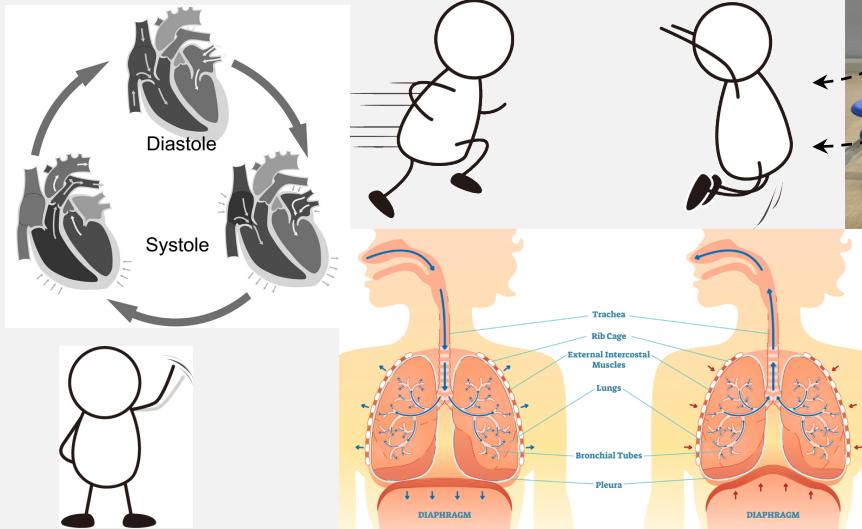
单位：新加坡南洋理工大学



RF-Net: A unified meta-learning framework to support activity recognition in a cross-environment manner

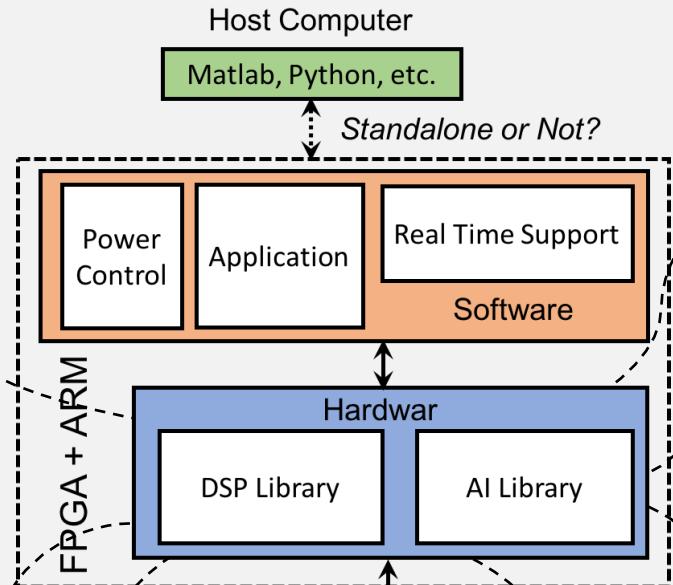
Motion-robust, continuous, and fine-grained vital signs monitoring

步步精心

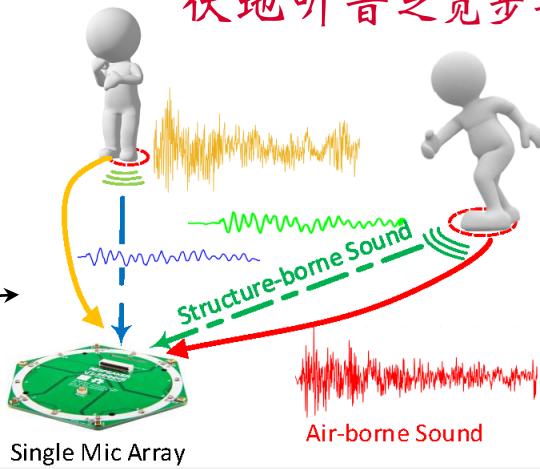


Octopus: 八方呼应

A versatile edge sensing platform with configurable front/back-ends



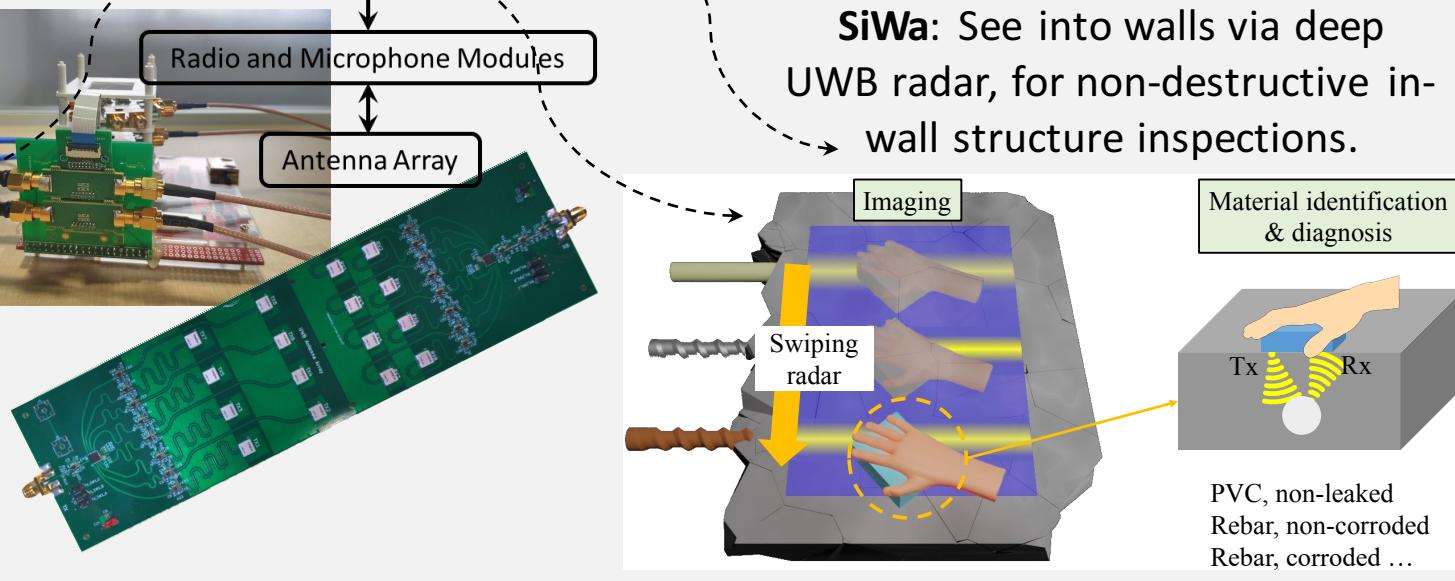
伏地听音之觅步寻踪



PACE: Passive acoustic localization of multiple walking people

慧眼开壁

SiWa: See into walls via deep UWB radar, for non-destructive in-wall structure inspections.



目录

CONTENTS

01 接触与无接触感知

02 射频(无接触)感知基础

03 深度解析的射频感知

04 应用实例



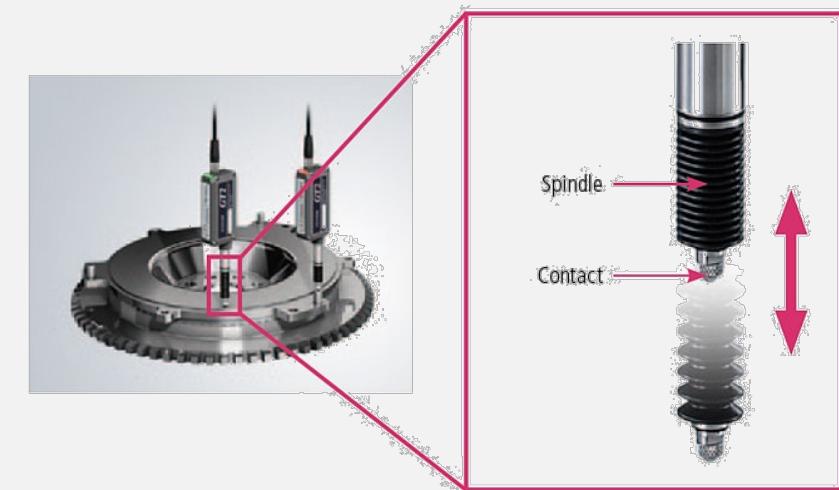
接触与无接触感知

感知技术的前世今生

- 感知技术 (Sensing) 与通信技术紧密相关，同样遵循一个从信号中提取信息并解析的推演过程
- 感知技术是解决大部分工程与实际问题不可或缺的组成部分
- 先进的感知技术是推进新一代智能系统的基本动力：信息驱动智能，而信息来源于感知（和网络通信）

根据传感设备与被测对象的关系，感知技术可分为两大类：

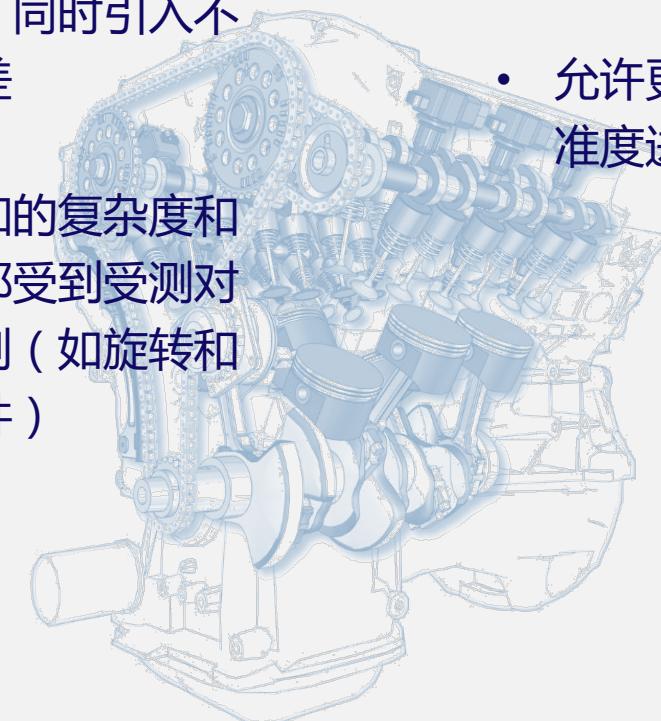
- 接触感知 (Contact Sensing)：两者紧密结合，融为一体
- 无接触感知 (Contact-free Sensing)：两者完全分离，被测对象几乎不受扰动



接触与无接触感知

孰优孰劣

- 虽然接触感知在大部分情况下可获得较高精度
 - 但接触可能干扰受测物理量，同时引入不可控误差
 - 接触感知的复杂度和可行性都受到受测对象的限制（如旋转和运动部件）
- 无接触感知与接触感知相辅相成：
- 对被测对象扰动程度低
 - 感知设备硬件复杂度均一，基本不因被测对象而改变
 - 允许更多的软件（智能算法）对感知精度进行调控



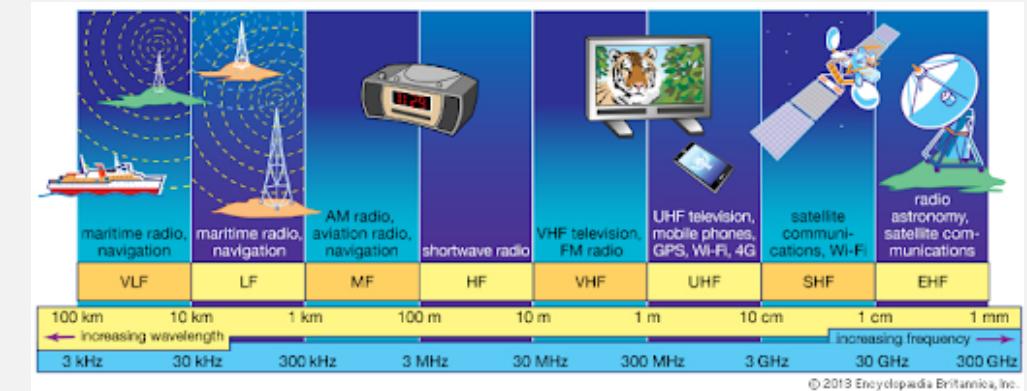
接触与无接触感知

无接触感知模式

- 无接触感知需要某种介质作为信息传导体，常见介质无非光、声、电（磁）三类
- 常见的光感知以红外和可见光为主，后者直接关系到照相技术及计算机视觉
- 常见的声感知以音频和超声波为主，由于依赖机械振动而相对能耗较高，但被动检测有前途

电磁感知覆盖余下的频率范围：

- 以千赫至太赫 (kHz~THz) 范围的射频感知为主导，与射频通信几乎共享频段
- 在功耗及抗环境干扰方面明显优于声感知：电磁波 vs 机械波
- 在视距与视界方面非光感知可比：允许超视距 / 界感知，但是并非“穿墙”



射频 (无接触) 感知

射频感知基础

- 射频感知已有百年历史，起源于一战时期的雷达 (Radar : radio detection and ranging)
- 射频感知与光感知的类比相似于昆虫复眼相比人眼：精度低但反应快
- 在军事上发展迅速，如上世纪末出现的美国海军宙斯盾系统

主流射频感知有两种（时频）对偶模式：

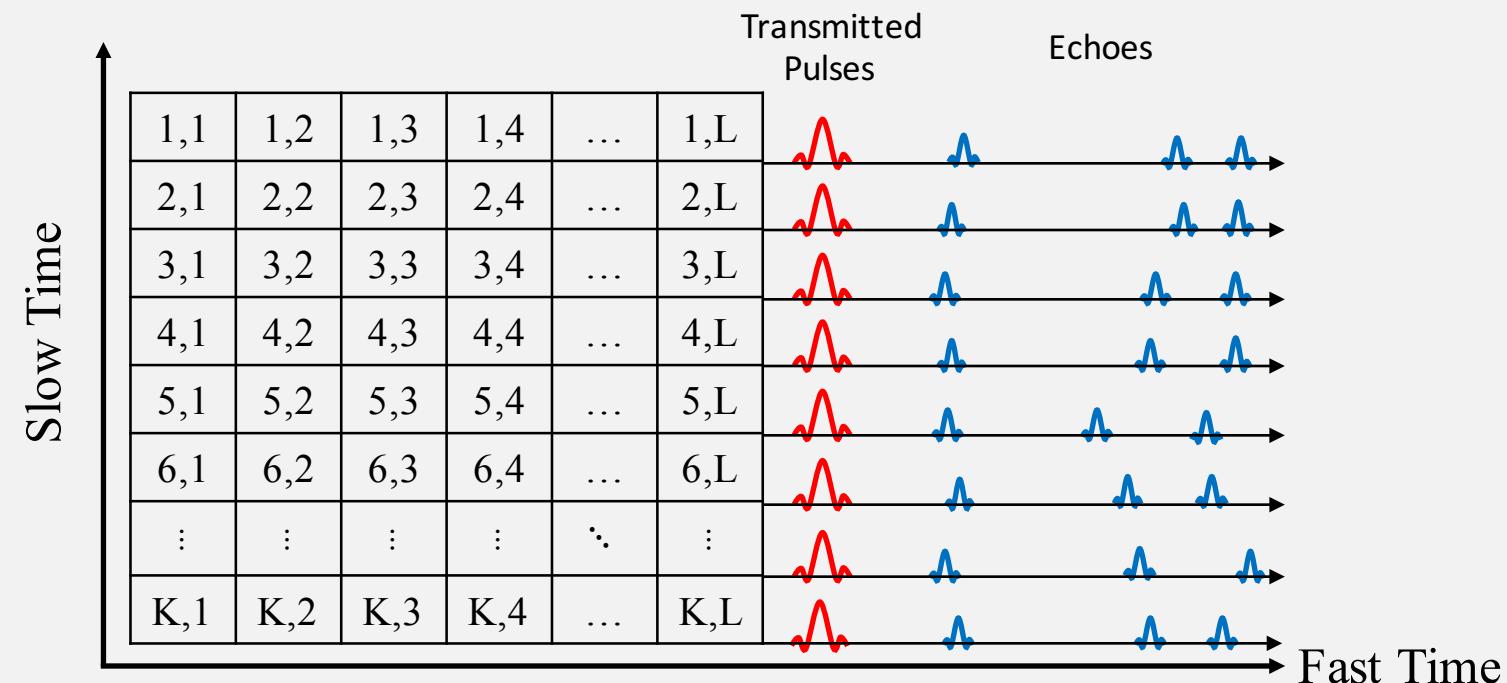
- 脉冲雷达 (IR-UWB: Impulse Radio Ultra Wideband)
- 调频连续波雷达 (FMCW: Frequency-Modulated Continuous-Wave)



射频 (无接触) 感知

射频感知原理

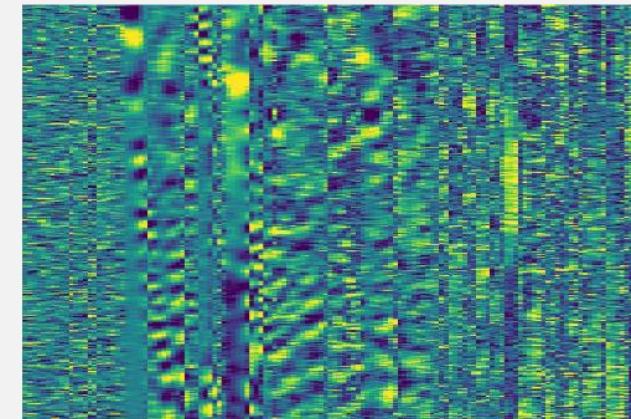
- 时、频、空 三维感知系统：时域分快、慢时间两个维度，分别代表距离与速度
- 感知精准度受频率和带宽限制
- 以脉冲雷达的 CIR 为例



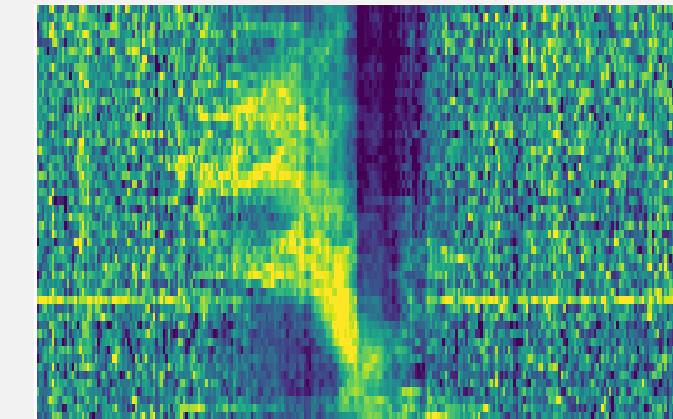
射频 (无接触) 感知

射频感知原理

- 时、频、空 三维感知系统：时域分快、慢时间两个维度
- 感知精准度受频率和带宽限制，但不一定越精越好
- 两类雷达实例图谱



脉冲雷达：单人行走



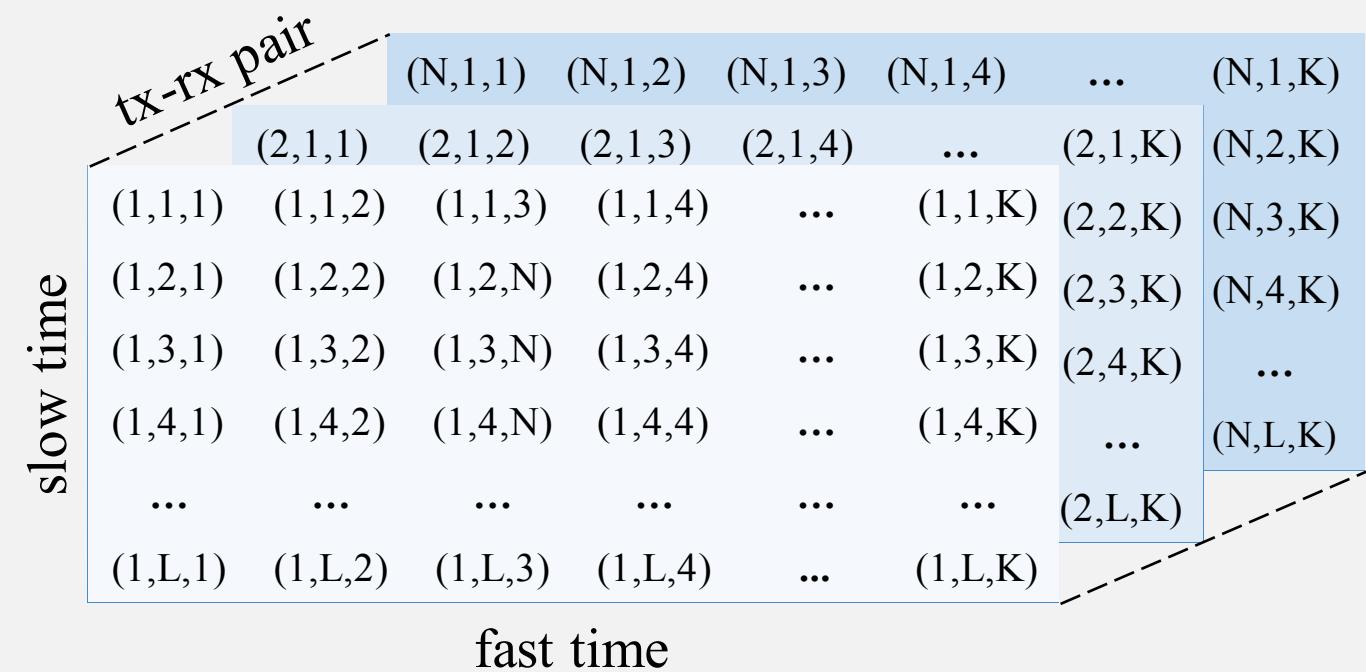
调频连续波雷达：单人行走



射频 (无接触) 感知

射频感知原理

- 时、频、空 三维感知系统：空间维度由天线复杂度决定
- 感知精准度受频率和带宽限制
- 以脉冲雷达的 CIR 为例

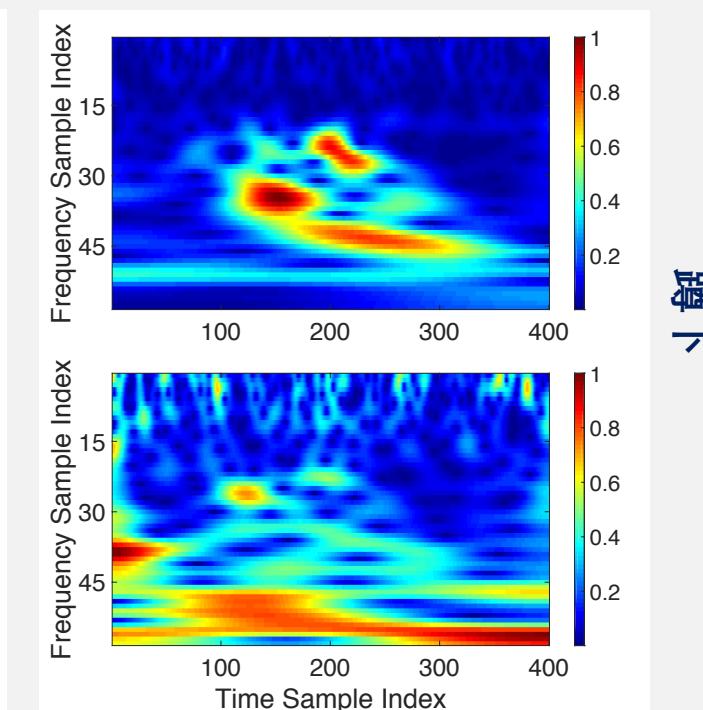
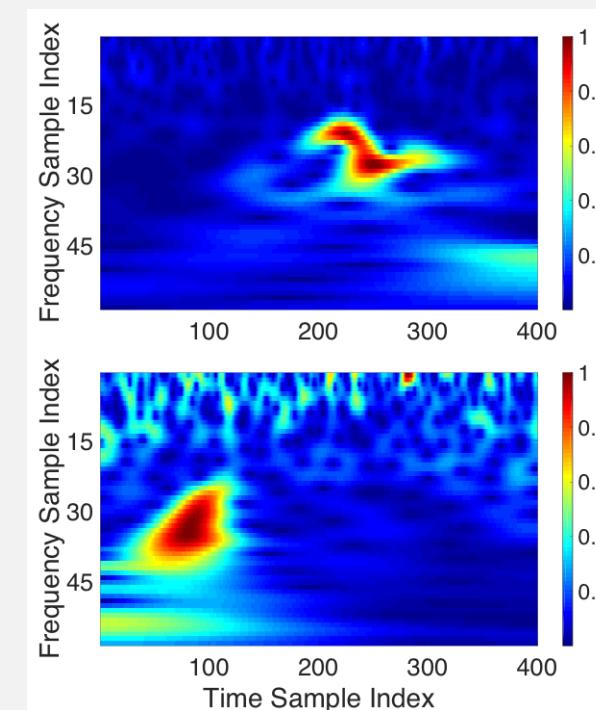


射频 (无接触) 感知

射频感知原理

- 时、频、空 三维感知系统：快 / 慢时间维度可分别进行时频分析
- 以脉冲雷达两个不同快时间帧为例，体现相似动作在射频感知意义上的区别
- 图谱直观解释性差，深度解析势在必行

坐下



站起



射频 (无接触) 感知

商用射频感知 发展

- 受限于设备复杂度，商用射频感知起步于本世纪初
- 前 15 年左右学界以 Wi-Fi 感知作为雷达的替代品
- 商用雷达仅于近 5 年内出现在市场上
- 通信 - 感知一体化对于个体用户的实用性尚不明朗

Wi-Fi 感知的商业应用前景暗淡：

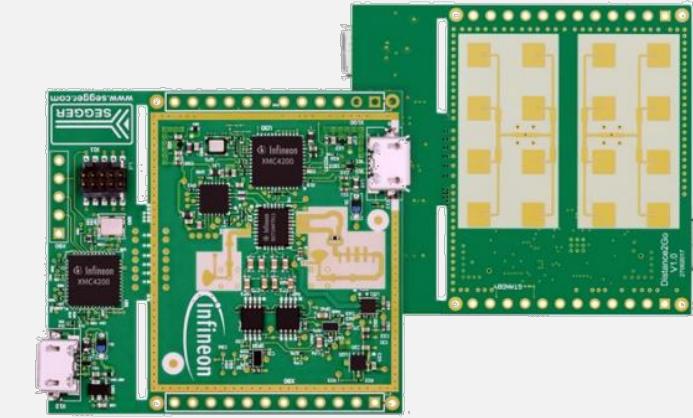
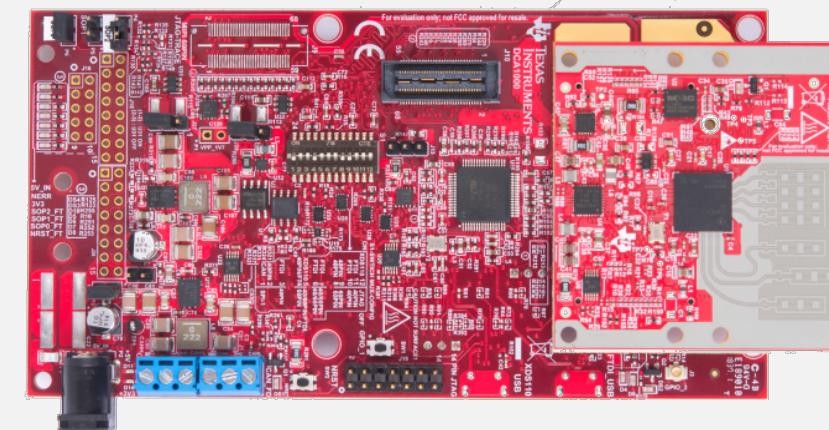
- 20 ~ 40MHz 的带宽无法满足感知分辨率的需求： $\delta = \frac{\lambda f}{2B} = \frac{c}{2B}$
- 设备自身的（主要）通信功能有可能随时阻断感知
- 其他同频带系统（如其他 Wi-Fi 或者蓝牙）会严重干扰感知



射频 (无接触) 感知

商用射频感知 发展

- 主流大规模商用感知设备受移动厂商（如高通和华为）垄断，而且体积功耗都过大
- 微型商用雷达近几年有长足发展，包括德州仪器（TI）的 60~81GHz 毫米波雷达（mmWave），英飞凌科技（Infineon）的 24GHz 亚厘米波雷达，以及诺维尔达（Novelda）的 X4 微波脉冲雷达。



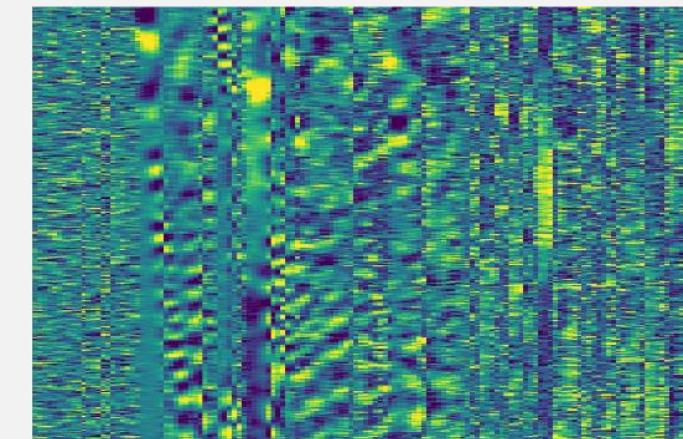
深度解析的 射频感知

与传统视觉 解析的关系

- 拥有二维图像表达，计算机视觉的方法（如卷机网）可以直接运用，但是 ...
- 射频数据更高维度，内嵌空间（深度，入墙）信息，可作时频拓展
- 人眼不可解析，无法进行离线标注，但优点是不涉及隐私与安全
- 分辨率有限，可能需要进行信息分检

随之而来的后果：

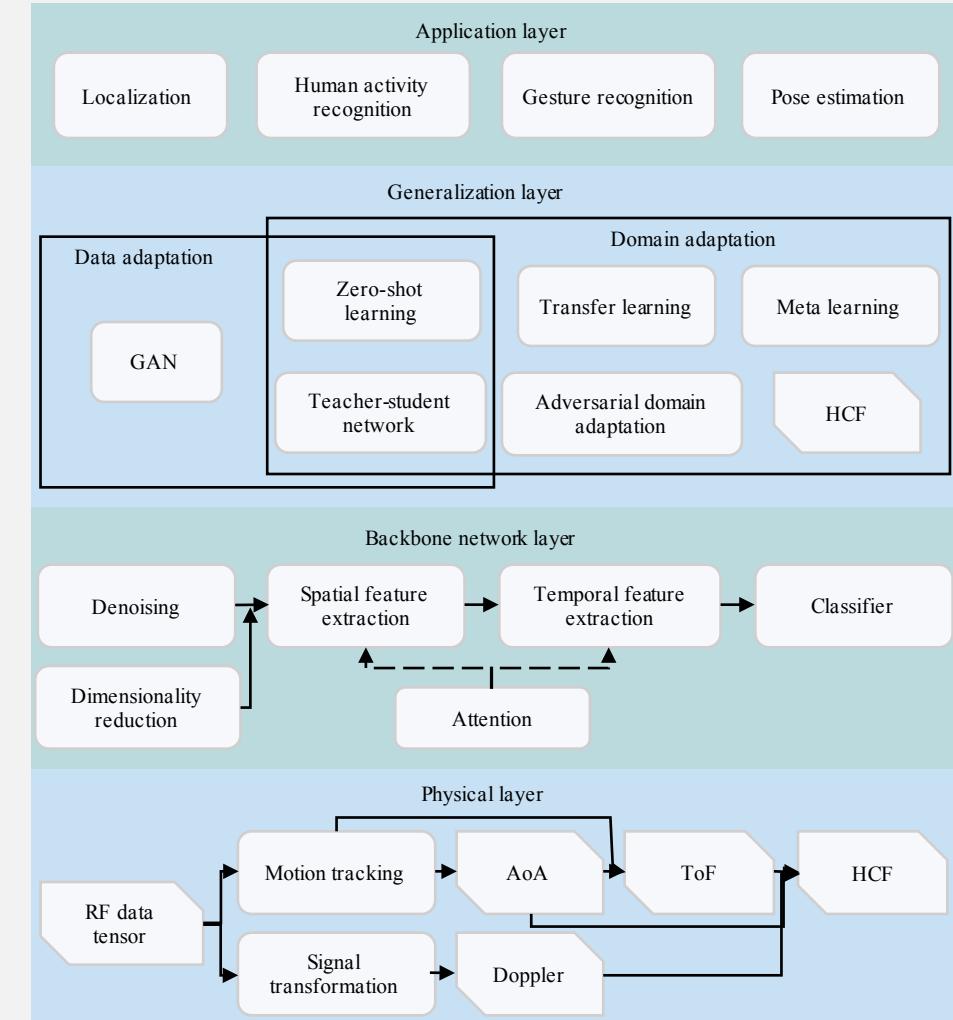
- 需要更有效的深度学习网络及训练方法来完成信息解析
- 无法离线标注使得训练数据的获得难度急剧提升，需要对数据量要求低的先进训练方式



深度解析的射频感知

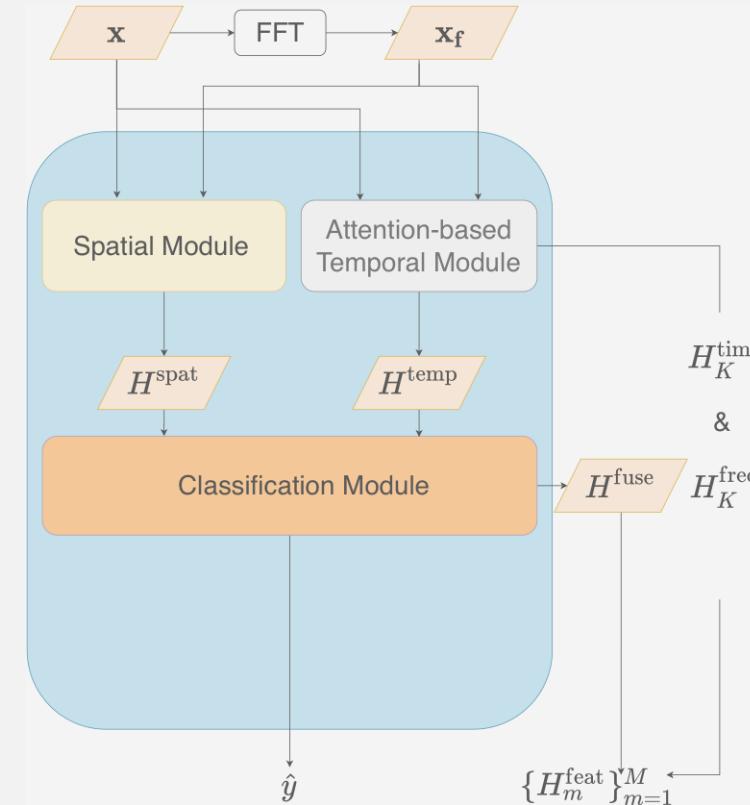
深度射频解析 的分层设计

- 针对所有类型射频数据的统一底层预处理流程
- 专用的主干深度网络设计，艺术而非科学
- 与应用相适配的训练方式，受传统优化原理指导

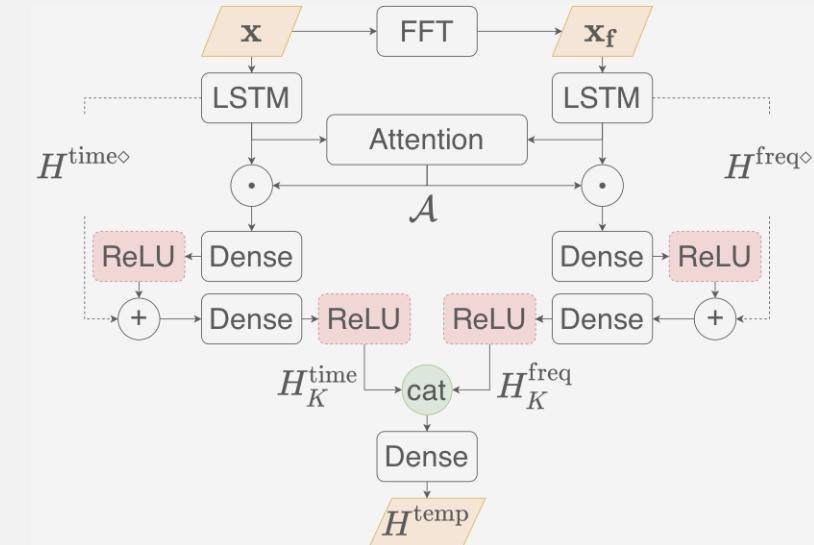


深度解析的射频感知

专用于信号处理的主干网络设计



- 输入时频预分离，降低网络复杂度
- 时频分别进行二维空间（卷积）解析
- 时频一维序列的深度相关分析（基于LSTM及Attention）



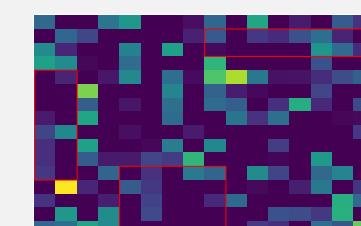
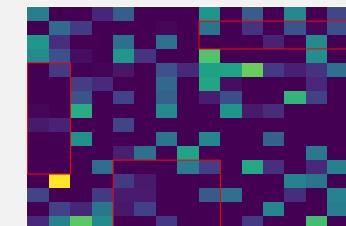
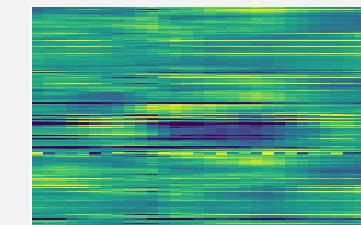
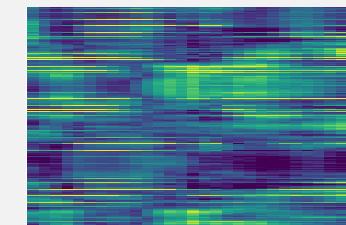
深度解析的 射频感知

跨环境感知 解析的需求

- 与视觉解析类似，射频解析亦会受到背景（环境）的干扰
- 但视觉解析采用的语义分隔（Segmentation）不再适用
- 鉴于训练数据的稀缺，需要训练能满足跨环境解析

跨环境（域）解析的常见方法：

- 迁移学习（Transfer Learning）
- 域适配（Domain Adaptation）
- 基于元学习（Meta-Learning）的小样本学习（Few-shot Learning）



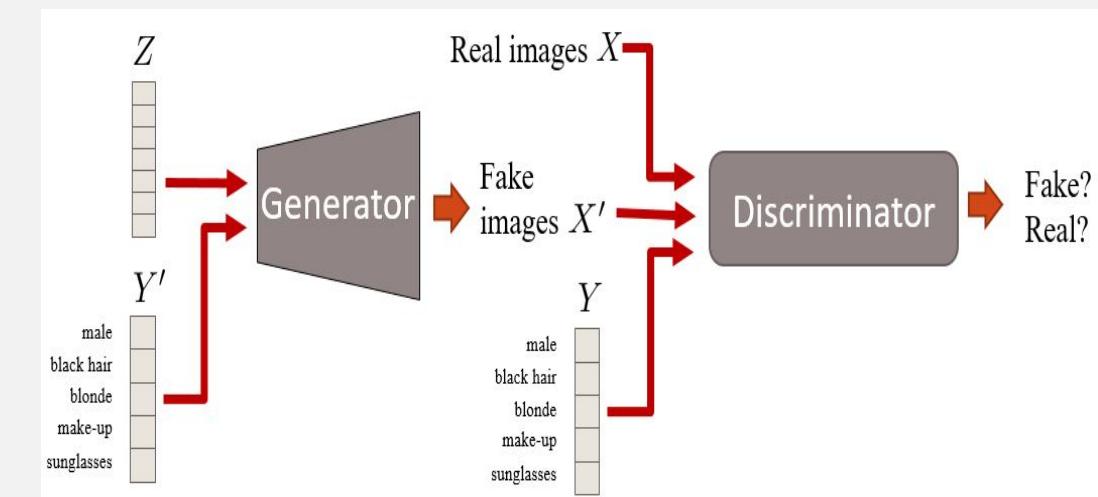
深度解析的 射频感知

基于生成模型 的信号分离法

- 生成对抗网络 (GAN) 因其“无中生有”的能力在近年来名声大噪
- 基于先验知识的条件生成对抗网络 (cGAN) 具有“大海捞针”的神奇效果
- 变分推演 (Variational Inference) 在特定条件下可突破传统信号处理的信干噪比 (SINR) 局限，从而实现混合信号近乎完美地分解。

低信噪比下的信号解析是射频感知的特点：

- 运动条件下的体征监测 (过拟合？)
- 多人行为识别中的人 - 人分离
- 多声源分辨中的物 - 物 (振动信号) 分离



应用实例

我们的研发理念

- 依靠中新合作平台，如中新广州知识城
- 产、学、研相辅相成，推广先进感知技术及深度智能方法的民用普及
- 以人为本，重点服务于居家与社区（企业）的生命体态监测
- 基于边缘设备的轻量级感知，方便大规模布署与推广

具体产品与方案：

- 无接触复合感知网关：物联网、边缘计算、深度射频感知的结合
- 可二次开发的开放智能感知平台，适于企业与院校推进智能产品研发
- 融合中新技术优势，促进双边技术交流与合作



应用实例

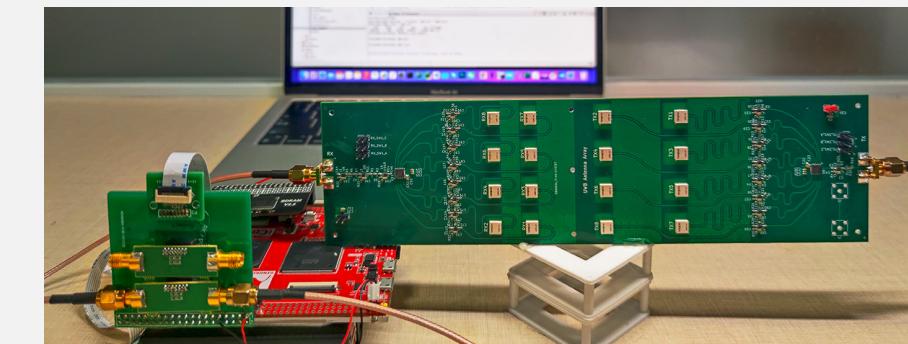
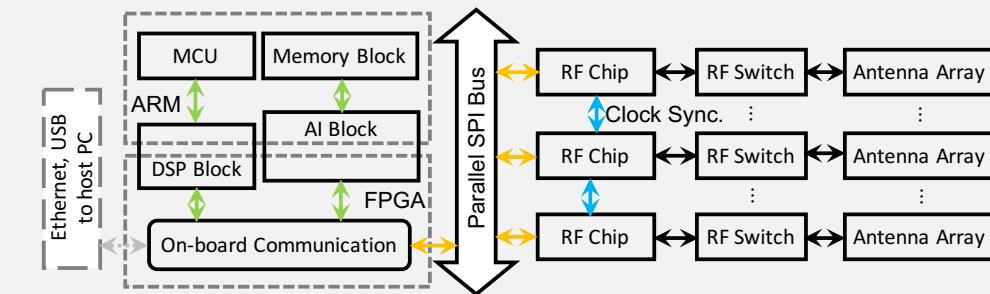
紧凑型开放
感知平台：

八方呼应

- 紧凑的边缘感知系统使能大规模部署
- 开放平台允许加载各类用户自开发应用
- 宽带 (UWB) 感知前端提供足够精细切稳健的感知分辨率
- 多天线阵列 (MIMO) 便于获取空间多维感知数据
- 基于异构 / 可重构计算的模块提供了灵活的应用开发与加载

产品 / 原型展示：

- 世界上首个开放智能射频感知平台：Walabot 与 MTI 的产品均为闭源
- 兼容其他感知模式，比如 FMCW 和音频感知



Octopus: A Practical and Versatile Wideband MIMO Sensing Platform, ACM MobiCom, 2021



应用实例

无接触体征 与姿态监测：

车前之鉴

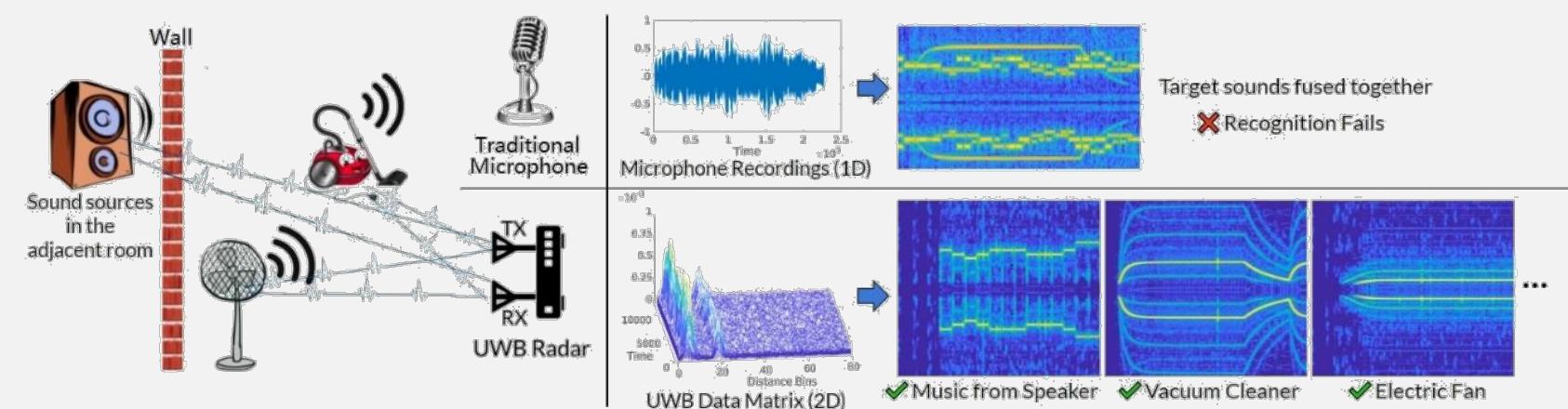
- 室内体征姿态（如摔倒）监测，适用于老幼监护，已在社区推广
- 车内人员体征监测，促进健康安全驾驶
- 运动状态下的体征监测，以及体征精细波形的恢复是我们的目前重点探索方向



应用实例

基于振动检测的声源分辨： 频风辨器

- 由声源分辨驱动的事件 / 行为推断在各种应用中被广泛采用，如噪声源发现与消除
- 传统基于混合音频的方法由于音频已在传播过程中混叠，必须先进行信号分检，事倍功半
- 射频感知直接探测声源振动，天然地具有声源（空间）分辨能力
- 但此类技术不适于分辨信源重合的情况，比如呼吸与心跳



应用实例

动态无接触 体征监测：

步步精心

- 现有无接触体征监测缺点假设静态体位

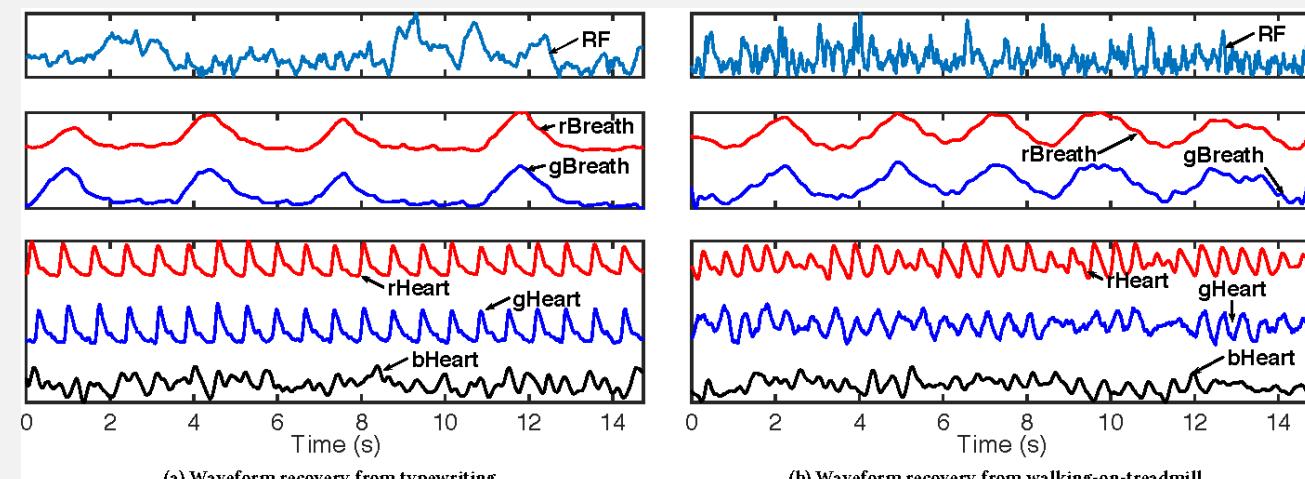
- 而实际应用中体动不可避免，有时甚至是必须

- 我们的单雷达动态无接触体征监测应属世界首创：创造性地运用了

深度对比学习
机制，使能信号的盲分解，从而在大幅度体动的干扰中提取感知体征的微弱信号

对比学习 (Contrastive Learning) 行之有效：

- 信号盲分解一直以来均缺省假设线性混叠
- **非线性混叠**的分解一直困扰学界，而体动与体征、呼吸与心跳，均属非线性混叠
- 对比学习的**自监督训练**能力使得在有限训练数据的条件下完成非线性盲分解成为可能



MoVi-Fi: Motion-robust Vital Signs Waveform Recovery via Deep Interpreted RF Sensing, ACM MobiCom, 2021



应用实例

人体行为与 姿态辨识：

一网频深

- 虽然射频信号人眼无法辨识，但深度学习机制可完美提取特征以完成行为与姿态的辨识
- 其复杂度大大低于视觉解析方法，而且具有超视界 / 视距能力，且不会涉及隐私与安全
- 但由于射频训练数据的缺乏，急需小样本训练的机制支持跨环境辨识

我们采纳元学习（Meta learning）理念，即“学习如何学习”（Learning to learn）：

- 源于人类“举一反三”的自然学习方式
- 将原有大数据集分散为多个小样本集合，反复训练以提升能力
- 在目标环境中以 k 近邻（kNN）方式完成无训练分类（辨识）

Training task 1

Support set



K=2
N=3
Query set



Training task 2 . . .

Support set



Query set



Test task 1 . . .

Support set



Query set



应用实例

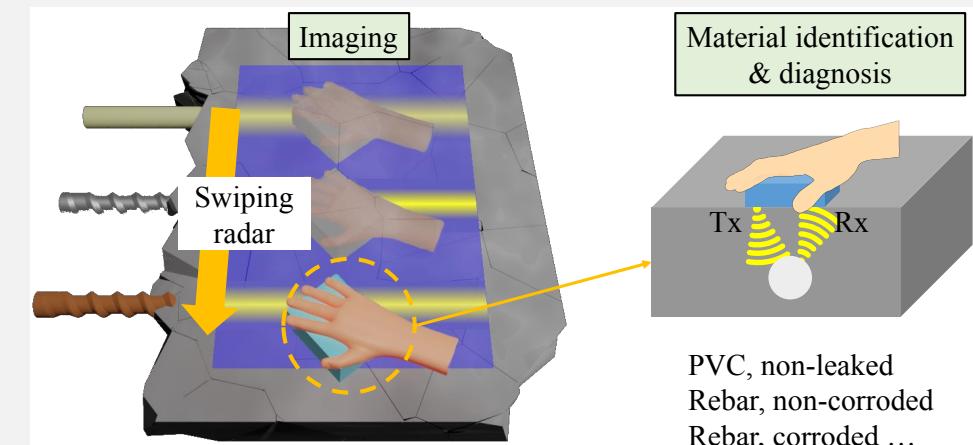
墙体内嵌结构的无损检测：

慧眼开壁

- 混凝土墙体的内嵌结构随着时间推移终会受到环境侵蚀
- 新加坡这类热带国家的建筑（尤其是地铁隧道）此类问题更甚
- 我们的第一代微波无损墙体结构检测雷达，有效运用了深度域适配提供的鲁棒性，可在无参数校准的前提下探测墙内渗水通道，并检测钢筋结构的锈蚀状态

此系统也为学界提供了一下经验教训：

- 虽然长波利与透射进入固体，但过长的波长导致衍射干扰，反而不利于精细检测
- 7 ~ 8GHz 的高频段微波可能是对于墙体透射最为有效的波段
- 现今大部分“穿墙”实验纯属学术诈骗：所谓穿墙乃是“绕墙”而已



SiWa: See into Walls via Deep UWB Radar, ACM MobiCom, 2021



2021 华为远见论坛

2021 Huawei Vision Forum

有问有答

报告人：罗骏

单位：新加坡南洋理工大学

