

WIFI-CSI 室内定位学习周报

2025 年 9 月 1 日星期一

1. 学习目标

- 1、总结对比历年 CSI 室内定位的发展以及技术关键、硬件要求；
- 2、尝试使用双天线进行椭圆定位；

2. 学习进展

2.1 基于模型的 CSI 室内定位方法历年发展

2013 年 ArrayTrack^[1]是较早利用 CSI 信息实现室内定位的工作，其主要使用了目标反射的角度信息，利用较大规模的天线阵列（8 个接收天线）结合 MUSIC 超分辨算法进行目标的角度估计。通过多径分离识别反射路径，再使用多个点位的测量结果，几何交叉实现目标的室内定位，最终实现了亚米级的室内定位。

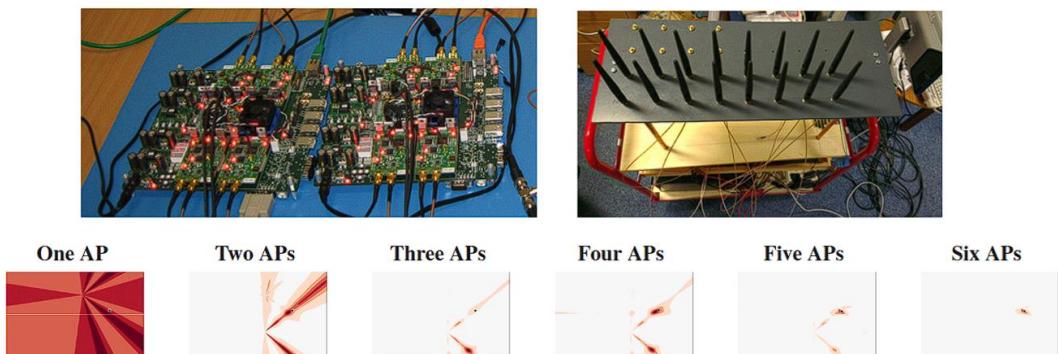


图 1 ArrayTrack 系统硬件与主要定位方法示意图

2015 年 Spotfi^[2]系统使用 Intel 5300 Wi-Fi 网卡并配备 3 根接收天线，利用了不同天线下不同子载波信息，将感知阵列从 3 个拓展至虚拟的 3*30 个阵列，并利用平滑处理实现 AOA-TOF 的联合估计。然而该 TOF 并非实际的反射路径时延，系统中利用联合估计的结果进行直射与反射路径的分离，利用多个接收点的 AOA 与 TOF 信息，利用几何方法实现了位置的分米级定位。

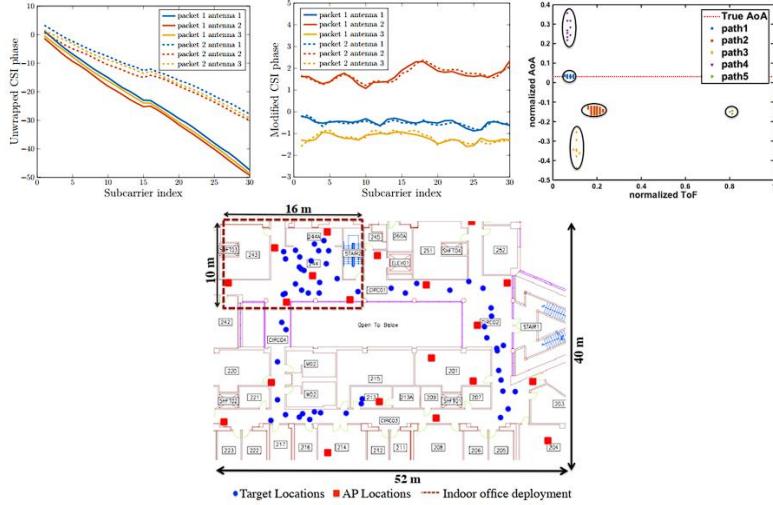


图 2 Spotfi 输出处理方法与定位示意图

2016 年 Dynamic-MUSIC^[3]对传统的 MUSIC 超分辨算法进行了改进，构建起时域的 CSI 协方差矩阵，在谱图计算时加入了关于时间维度的权重与滤波，减少了噪声引起的伪峰，提高了角度估计的稳定性。实验使用 Intel 5300 Wi-Fi 网卡并配备 3 根接收天线，同样利用多接入点的角度信息几何求解目标位置，实现分米级定位。

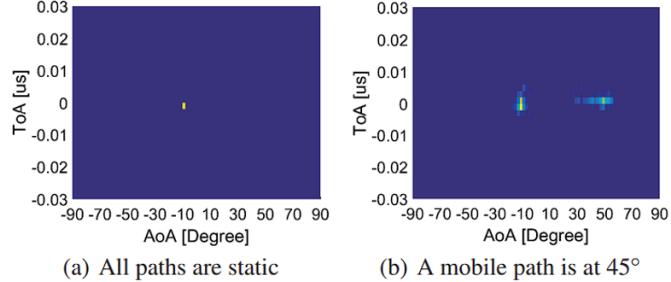


图 3 Dynamic-MUSIC 算法路径识别与定位示意图

2017 年 Widar 不再拘泥于传统 TOF 与 AOA 的测量，而是通过监测速度来实现定位，从多普勒频移提取目标的速度，使用多个链路合成实际的二维速度，再对速度进行积分从而实现目标的定位。实验中使用 Intel 5300 Wi-Fi 网卡配备 3 个天线以及多个接收点，实现分米级定位。

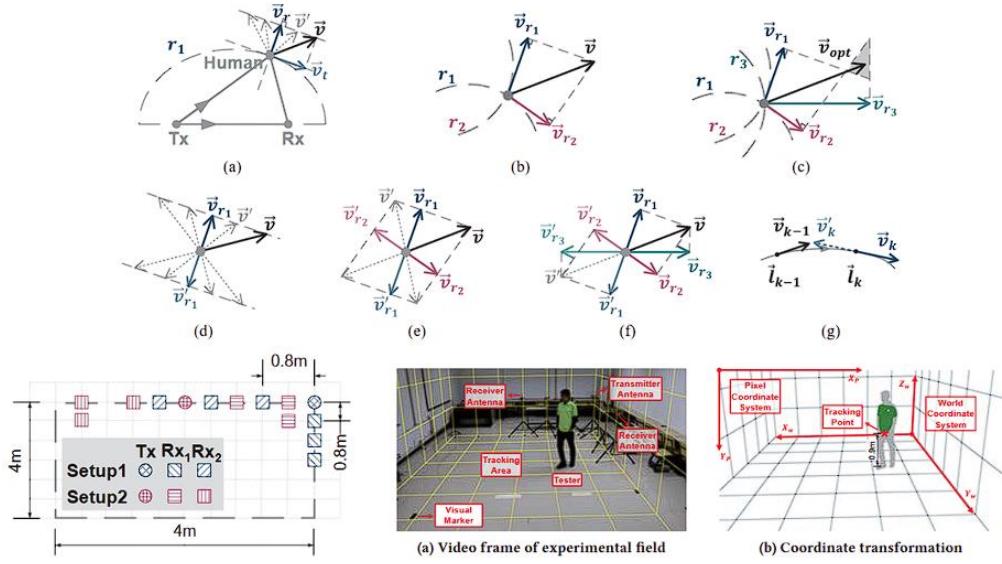


图 4 Widar 速度合成与实验环境设置

2018 年 Widar2.0^[5]在 widar 的基础上, 使用 SAGE 算法估计路径参数, 得到目标的 TOF、AOA、DFS 三种信息, 使用路径匹配算法从杂波中提取运动目标信息, 再使用卡尔曼滤波融合 TOF 与 DFS 实现距离的准确估计, 最后结合 AOA 实现目标的定位。实验采用了 Intel 5300 Wi-Fi 网卡配备 3 个天线, 可以在单个链路下工作, 也可以融合多个链路, 实现了分米级的定位精度。

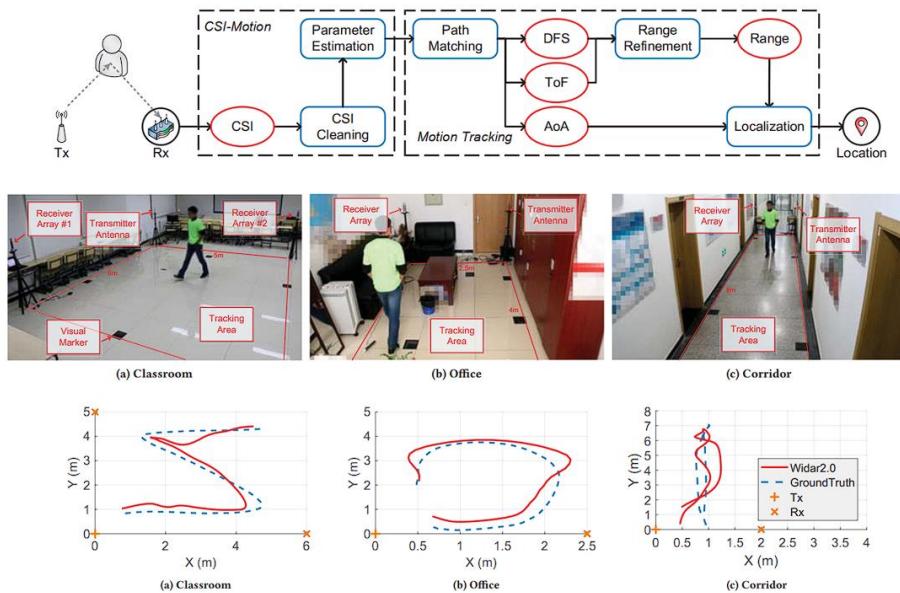


图 5 Widar2.0 定位过程、实验设置与定位结果

2021 年 WiTraj^[6]使用同一接收点的不同天线 CSI 商作为参数估计基础信号, 从中提取运动目标的多普勒信息, 计算目标移动的相对距离, 根据菲涅尔区的变化, 联合两个接收点求解椭圆方程实现目标的定位。实验采用 Intel 5300 Wi-Fi

网卡配备 3 个天线，利用 3 个接收点实现了分米级定位。

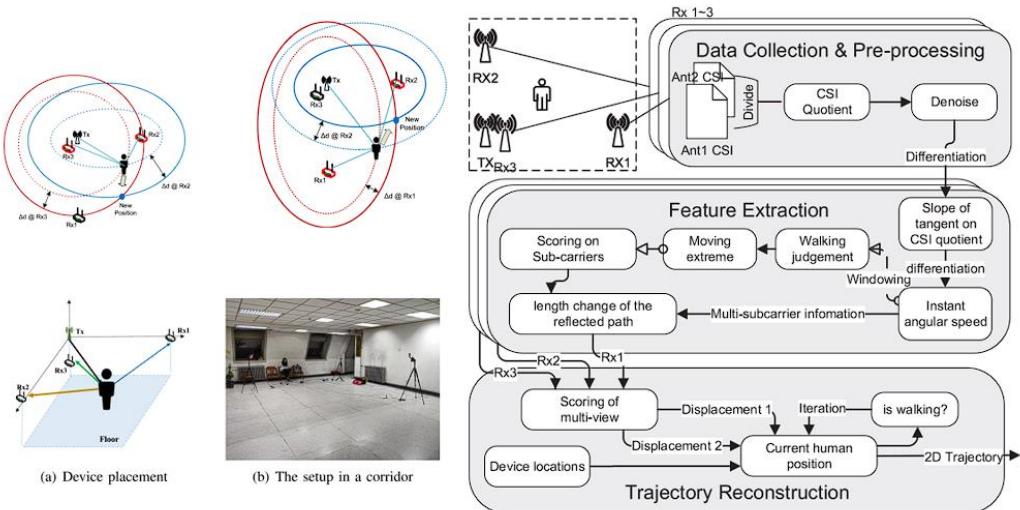


图 6 WiTraj 定位示意图、实验设置与处理流程

2022 年 PITrak^[7]系统是从 CSI 中提取多普勒频移的室内定位方式，这项工作重新思考了 WIFI 接收信号中 DFS 的物理模型含义，并推导出了使用发射角-到达角-多普勒频移三种信息估计目标真实速度的闭式解。同时发现不同距离和角度下的速度估计准确性不同，在系统中设置了多个接收点，通过动态选择合适的接受点实现了更加精准的速度估计与定位。实验采用 Intel 5300 WiFi 并配备 3 根天线，设置了多个接收点，设计设备选择算法动态选择 2 个接收设备进行位置估计，定位误差中值约 31 厘米。

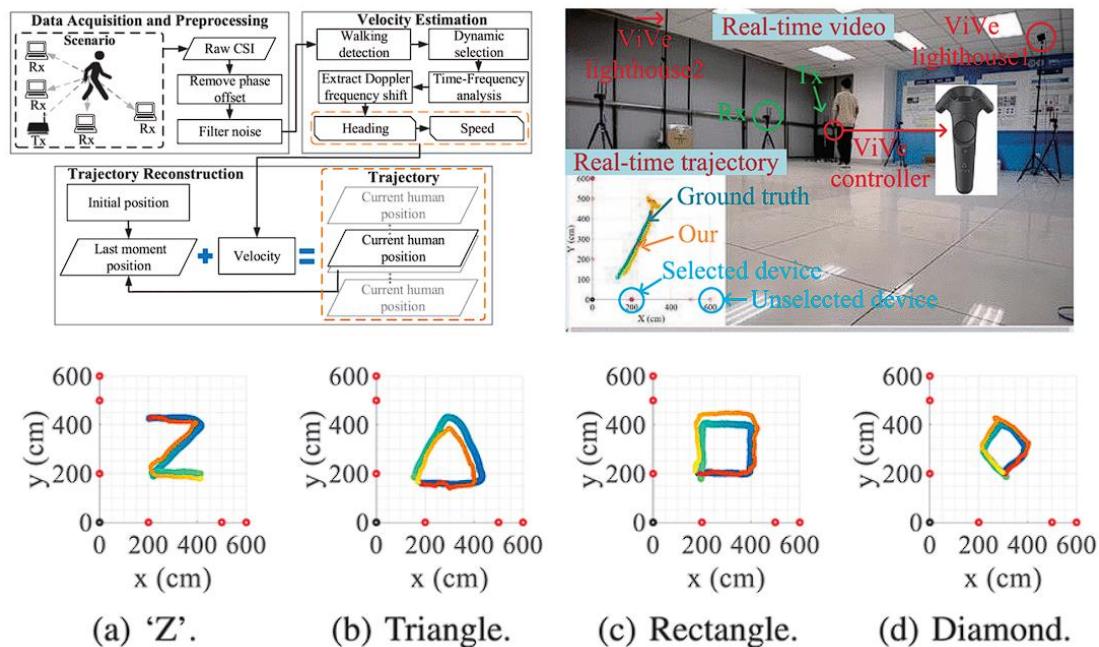


图 7 PITrak 系统处理流程与实验结果

2024 年 TD-CSI^[8]不再从 CSI 本身进行多普勒频移的提取，而是采用不同时间点下 CSI 差分的结果作为分析基础，从而消除了静态缓慢变化的成分，并综合利用幅度和相位信息从中提取多普勒速度，TD-CSI 大大减少了进行 DFS 估计所需的样本量，理论上仅需 3 个样本即可实现 DFS 的估计。实验采用 **Intel 5300 WiFi** 并配备 3 根天线，设置了 2 个接收点，最低 CSI 采样率为 50Hz 时，定位精度为 **33.70 厘米**。

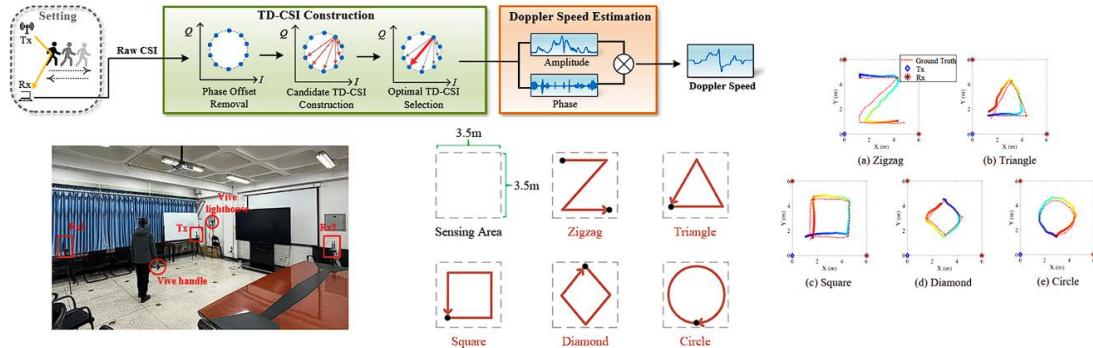


图 8 TD-CSI 处理流程与实验设置

➤ 总结：

从 WIFI CSI 室内定位各年的发展变化可以发现，近些年学术上使用较多的设备是 Intel5300 网卡，单个接收点配备 3 根天线。定位的关键在于对相关参数的估计，如：飞行时间(TOF)、到达角(AOA)、多普勒频移(DFS)等。

TOF 由于采样频移、时间不同步以及噪声的影响误差较大往往无法直接使用，多数实验中除消除噪声外还使用了多个接收点，来弥补 TOF 无法准确估计的缺点；AOA 在多天线半波长间隔的情况下可以较为准确的估计，在多径效应明显的环境下需要额外的拓展来解决；DFS 反映的是反射路径长度的变化，而非目标实际运动速度，可以利用 2 个正交的链路来合成真实的速度，但不同位置下的估计准确度也不同，因此也有相关工作提出动态选择有效链路。

基于模型驱动使用单个链路的里程碑式的工作：Widar2.0，融合了 TOF-AOA-DFS 三种信息，但其本质依然对三种关键参数的估计，利用几何关系进行求解。在角度混叠的情况下仍要依靠模型的方法进行定位，可能难以实现。近些年基于学习的方式不断突破 WIFI 室内定位的精度，或许结合深度学习可以实现更加精细的定位，但需要大量数据，近些年工作泛化性一般，因此还需进一步考虑。

2.2 双天线椭圆定位

单个天线下的 CSI 子载波相位受到时延的影响将随子载波编号而变化，通过一个发射天线两个接收天线分别计算反射链路长度，组成两个椭圆求解交点，或许可以实现定位，定位示意图如下：

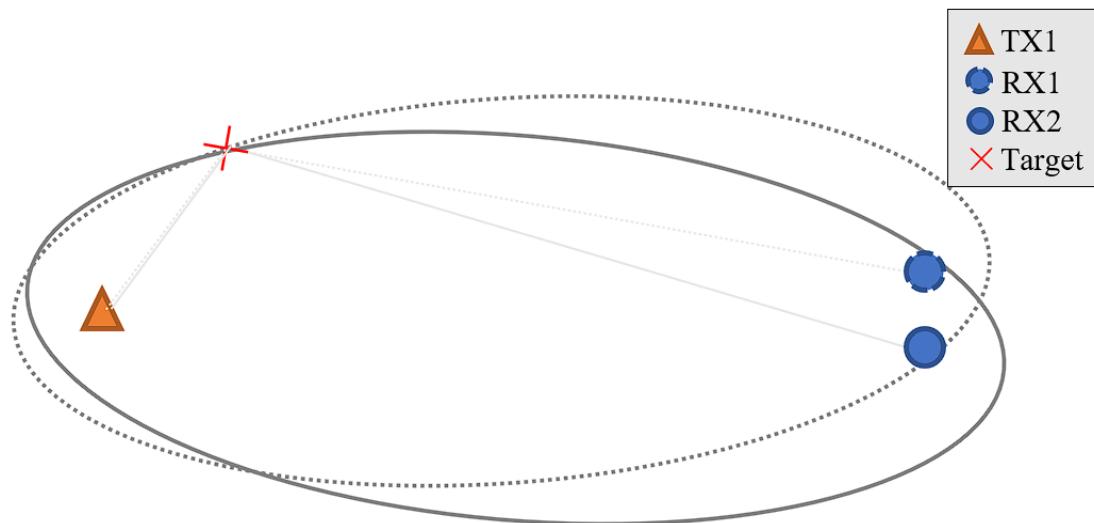


图 9 双天线椭圆定位示意图

例如，当发射天线位置为 $(-1.5,0)$ ，接收天线位置为 $(1.5,0.06)$, $(1.5,-0.06)$ ，反射路径长度分别为 3.0m 与 3.05m 时，可以求解到交点如下图：

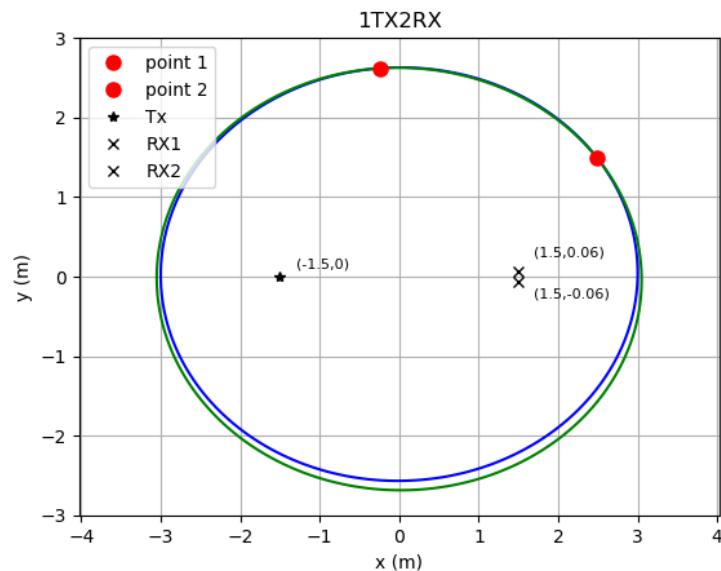


图 10 双椭圆求解

解得交点位置分别是 $(-0.2368, 2.6187)$ 与 $(2.4893, 1.4923)$ ，再根据实际情况进行取舍得到唯一的定位点。

然而, 虽然理论上可行, 但由于天线间隔相对于反射路径较小(0.12 米), 要想两个椭圆有交点, 需要保证两个反射路径的长度差小于 0.12 米, 这对反射路径的估计精度提出了很严格的要求 (目前使用 WIFI 进行定位精度最高的工作也仍未达到这一精度)。在使用单个天线进行路径估计时受噪声和硬件设备的影响, 几乎达不到这种要求。在两个接收天线下单独估计反射路径长度结果如下图所示:

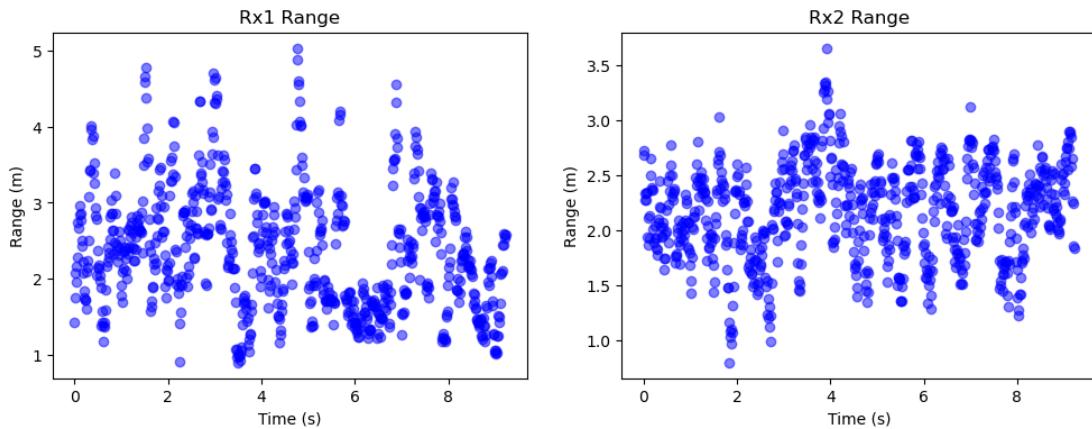


图 11 各天线发射路径距离分布

从上图中可以发现, 独立地从单个接收天线提取路径反射信息包含大量噪声, 从中选取真实的反射路径并满足双椭圆的求解条件是难以实现的。

3.参考文献

- [1] Xiong J, Jamieson K. ArrayTrack: A Fine-Grained indoor location system[C] //10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 13). 2013: 71-84.
- [2] Kotaru M, Joshi K, Bharadia D, et al. Spotfi: Decimeter level localization using wifi[C]//Proceedings of the 2015 ACM conference on special interest group on data communication. 2015: 269-282.
- [3] Li X, Li S, Zhang D, et al. Dynamic-MUSIC: Accurate device-free indoor localization[C]//Proceedings of the 2016 ACM international joint conference on pervasive and ubiquitous computing. 2016: 196-207.
- [4] Qian K, Wu C, Yang Z, et al. Widar: Decimeter-level passive tracking via velocity monitoring with commodity Wi-Fi[C]//Proceedings of the 18th ACM international symposium on mobile ad hoc networking and computing. 2017: 1-1

0.

- [5] Qian K, Wu C, Zhang Y, et al. Widar2.0: Passive human tracking with a single Wi-Fi link[C]//Proceedings of the 16th annual international conference on mobile systems, applications, and services. 2018: 350-361.
- [6] Wu D, Zeng Y, Gao R, et al. WiTraj: Robust indoor motion tracking with WiFi signals[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 22(5): 3062-3078.
- [7] Niu K, Wang X, Zhang F, et al. Rethinking Doppler effect for accurate velocity estimation with commodity WiFi devices[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(7): 2164-2178.
- [8] Li W, Gao R, Xiong J, et al. WiFi-CSI difference paradigm: Achieving efficient doppler speed estimation for passive tracking[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2024, 8(2): 1-29.