

WIFI-CSI 室内定位学习周报

2025 年 8 月 24 日星期日

1. 学习目标

- 1、对 WIFI CSI 的相位信息进行矫正，去除频率偏移；
- 2、去除直射分量，尝试对目标进行定位；

2. 学习进展

2.1 相位信息的矫正

理想环境下，仅有直射路径下，接收的 CSI 信号可表示为：

$$H_n = e^{-2j\pi f_n \tau} \quad (1)$$

其中， H_n 为第 n 个子载波载波的 CSI 数据， f_n 为第 n 个子载波的频率， τ 为直射路径的时延。当环境中含有 K 个路径时，子载波上的 CSI 数据可表示为：

$$H_n = \sum_{k=1}^K \alpha_k e^{-2j\pi f_n \tau_k} \quad (2)$$

其中， α_k 为第 k 个路径的增益， τ_k 为第 k 个路径的时延。由于 WIFI 各个子载波的频率间隔一定，所以 CSI 相位在子载波维上表现着线性变化。

➤ SFO 引起的相位线性漂移

WIFI 发射和接收是异地设备，由于时钟不同步，发射端的采样频率和接收端的采样频率有一定的差异，这个影响称为采样频率偏移(SFO)，从而导致了接收端的相位含有一定的偏移，真实接收的 CSI 数据如下：

$$H_n = e^{-j\phi_{SFO}(n)} \sum_{k=1}^K \alpha_k e^{-2j\pi f_n \tau_k} \quad (3)$$

其中， $\phi_{SFO}(n)$ 是由 SFO 引起的相位偏移，与子载波成线性关系，因此在子载波维度上，会出现明显的线性偏移。SFO 造成的线性偏移会淹没对真实的时延估计，从而无法反映时延的真实情况，需要对其进行矫正。

通过对解卷绕后的相位信息进行线性拟合并减去这个线性相位，可以实现对线性漂移的去除，去除漂移后的 CSI 数据为：

$$\widehat{H}_n = \sum_{k=1}^K \alpha_k e^{-2j\pi f_n(\tau_k - \tau_{ref})} \quad (4)$$

其中, τ_{ref} 是通过线性拟合去除的参考时延, 去除线性漂移后的 CSI 相位已经不包含真实的时延所造成的影响, 因此无法直接估计真实的时延, 但其依然保留了不同路径时延的相对信息。

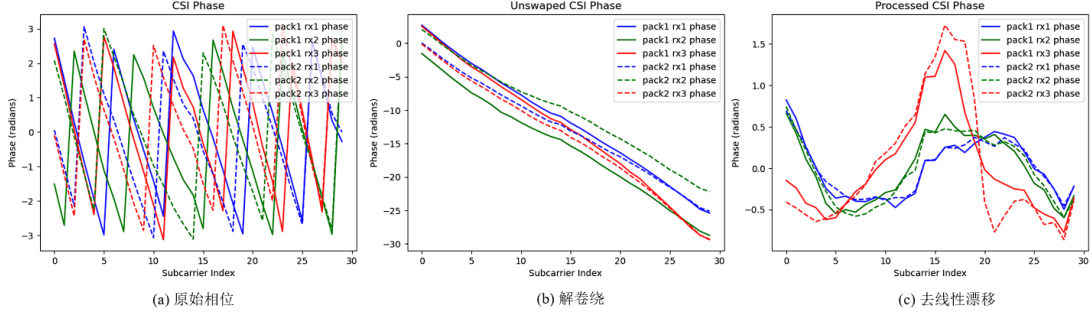


图 1 相位处理结果

由上图可以发现, 经过处理后的结果, 很好地将影响相位的线性漂移去除, 能够表现 CSI 的真实相位信息。

2.2 提取多普勒信息

在室内环境下, CSI 信号一般由两部分组成: 静态路径(包括直射路径以及静态反射路径)和动态路径(人体反射路径), 因此接收的 CSI 信号可表示为:

$$CSI(f, t) = A_{noise}(f, t) e^{-j\theta_{offset}(f, t)} [H_s(f) + H_d(f, t)] \quad (5)$$

其中, $A_{noise}(f, t)$ 为噪声的响应, $\theta_{offset}(f, t)$ 为随机采样造成的相位偏差, $H_s(f)$ 为静态路径的响应, $H_d(f, t)$ 为动态路径的响应。

原始的 CSI 信号包含噪声以及随机相位偏差, 从中难以提取由动态路径造成的多普勒频率, 为实现多普勒频率的提取, 利用多个天线下的 CSI 商作为提取 DFS 的基础:

$$H_q = \frac{CSI_1(f, t)}{CSI_2(f, t)} = \frac{H_{s1}(f) + H_{d1}(f, t)}{H_{s2}(f) + H_{d2}(f, t)} \quad (6)$$

其中, $CSI_1(f, t)$ 与 $CSI_2(f, t)$ 分别为两个天线接收的 CSI 数据, 同一接收点不同天线下的 CSI 数据所包含的噪声响应和随机相位偏差几乎一致, 通过相除可以实现二者的去除。

将动态路径下随时间的变化单独表示, CSI 商满足下式:

$$\begin{aligned}
H_q &= \frac{H_{s1}(f) + H_{d1}(f, t)}{H_{s2}(f) + H_{d2}(f, t)} \\
&= \frac{H_{s1}(f) + A_1(f, t)e^{-j2\pi\frac{d_{diff}}{\lambda}}e^{-j2\pi\frac{d(t)}{\lambda}}}{H_{s2}(f) + A_2(f, t)e^{-j2\pi\frac{d(t)}{\lambda}}} \\
&= \frac{az + b}{cz + d}
\end{aligned} \tag{7}$$

上式中, $A_1(f, t)$ 与 $A_2(f, t)$ 为两个天线的幅度响应, d_{diff} 为动态路径在两个天线之间的路径差, $d(t)$ 为其中一个天线的动态路径长度, λ 为信号波长, 将 $z = e^{-j2\pi\frac{d(t)}{\lambda}}$ 带入, 可将 CSI 商转换为复平面上一个圆的表示。 z 为一个单位复变量, 动态路径的变化将影响 z 的相位, 当持续变化时, CSI 商在复平面上旋转了一个圆。此时多普勒频率定义为下式:

$$f_D = -\frac{1}{\lambda} \frac{\Delta d(t)}{\Delta t} \tag{8}$$

通过对 CSI 商的相位分析, 可以从中提取多普勒频移, 从而反映反射路径变化, 进一步反映目标位置变化。

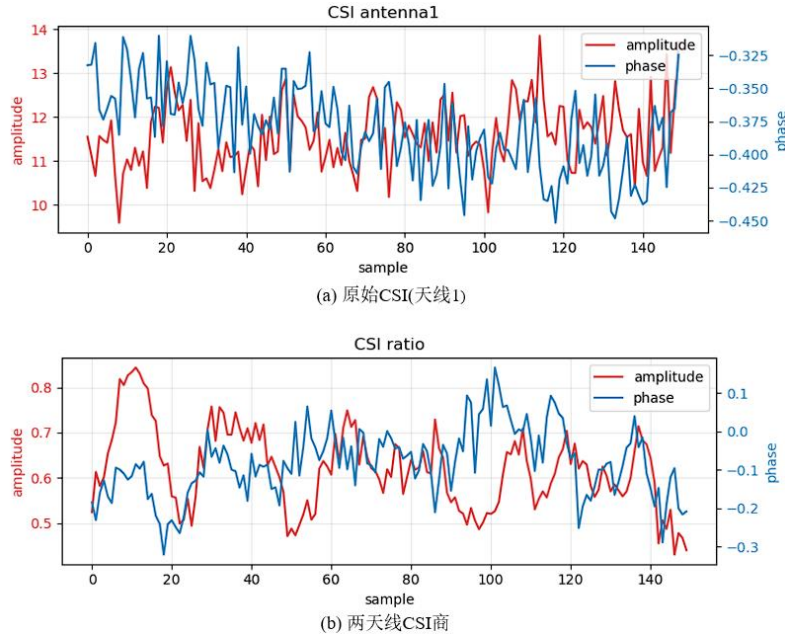


图 2 CSI 商对比图

2.3 差分估计 AOA-TOF

在 CSI 的估计结果中, 直射路径的功率往往大于其他反射路径, 从而导致其他动态反射路径的信息被淹没。在使用 MUSIC 算法进行 AOA-TOF 联合估计时,

谱图中仅能看到直射路径的结果，从而影响了直射路径与动态路径的识别。为从中区分动态路径，利用差分的方法对相邻采样点下的 CSI 数据进行处理，从而凸显动态路径。原始的 CSI 信号可表示为：

$$H(f, t) = H_s(f, t) + H_d(f, t) \quad (9)$$

在相邻时刻下，可以认为环境中静态路径的 CSI 分量变化不大，通过差分可以将其去除，差分的结果可表示为如下：

$$\begin{aligned} H_{diff}(f, t) &= H_s(f, t + \Delta t) + H_d(f, t + \Delta t) - H_s(f, t) + H_d(f, t) \\ &= H_d(f, t + \Delta t) - H_d(f, t) \end{aligned} \quad (10)$$

室内环境下，WIFI 的收发天线一般保持不变，因此静态分量几乎不受时间变化，使用差分便可以消除强直射分量的影响，更明显地突出动态路径的变化。在仿真实验中模拟该差分过程结果如下图所示：

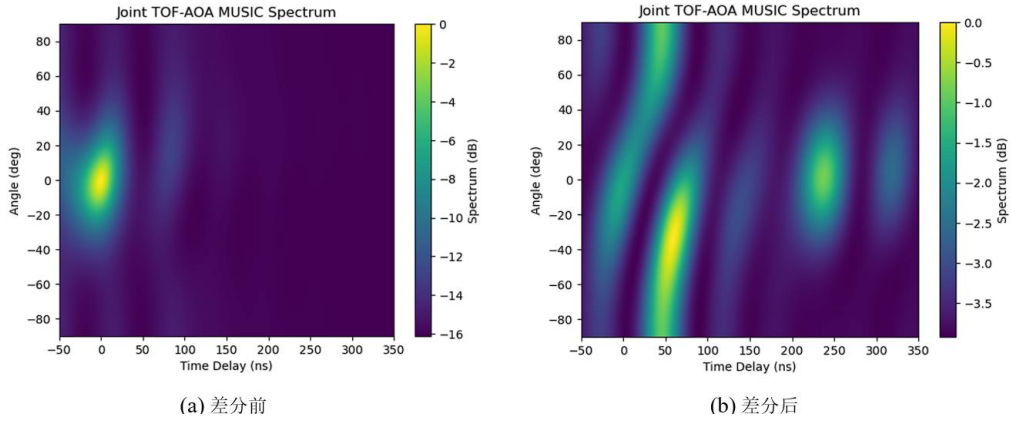


图 3 仿真差分处理结果

2.4 双天线数据采集

为实现室内环境下的定位，在走廊环境下进行人体行走场景下双天线 CSI 数据的采集。采集过程中，相关硬件参数设置如下：

表 1 CSI 数据采集参数设置

参数名	参数值
CSI 速率	80Hz
频段	5G
信道编号	40
带宽	40MHz
中心频率	5.19GHz
子载波个数	114

数据采集过程中，实验者在走廊环境下分别沿“Z”轨迹和方行轨迹以正常

步行速度进行行走，每次采集时间大约为 10s，实际数据采集环境与行走轨迹如下图所示：

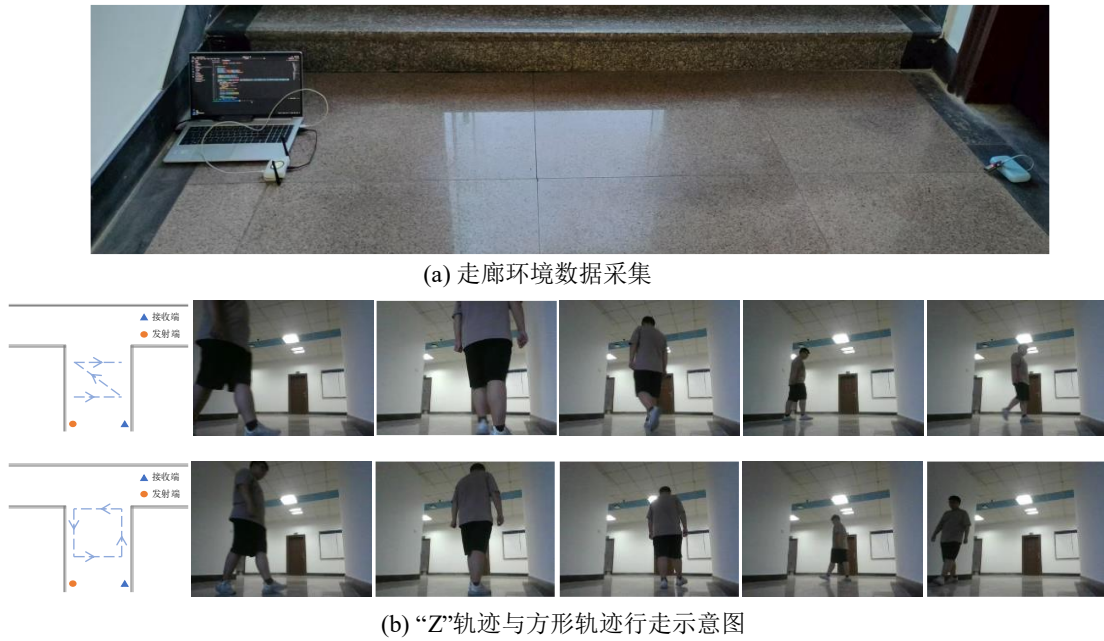


图 4 走廊环境下双天线数据采集

针对方形轨迹数据，可以将其分为四个阶段：靠近接收机、远离接收机、继续远离接收机、靠近接收机。在不同阶段过程中，由于人体反射而造成的动态路径长度也随之变化，分别表现为：路径减短、路径增长、路径继续增长、路径简短。根据多普勒频移的定义，反射路径的减短对应着 DFS 为负号，反射路径的增长对应着 DFS 为正号。因此，在方形轨迹下，从采集的 CSI 数据中提取 DFS 的结果如下图所示：

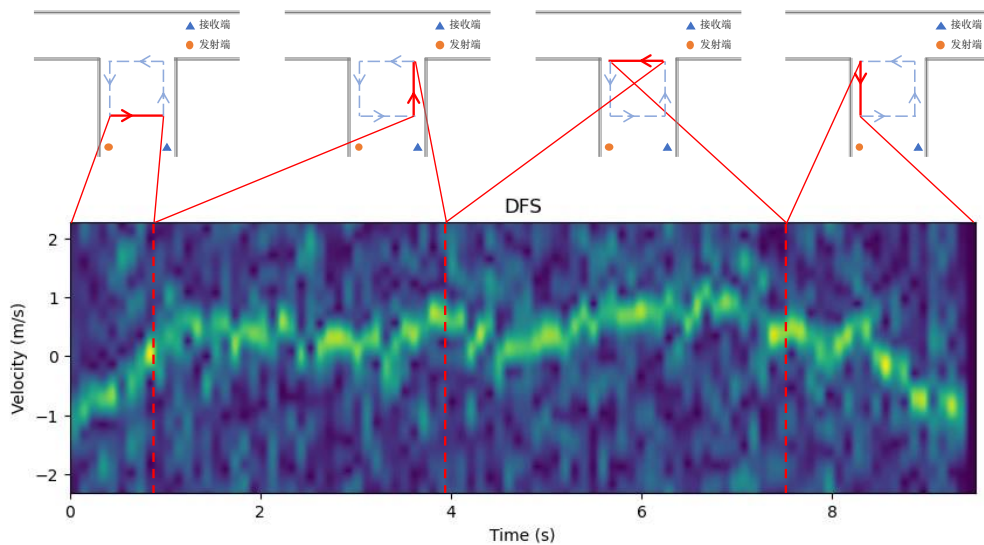


图 5 方形行走轨迹对应的 DFS 谱图

从上图中可以发现，计算得到的 DFS 谱图与实际路径有一定的对应关系，负的速度代表着反射路径长度的减少，正的速度代表反射路径长度的增加。

然而 DFS 所反映的仅是实际速度在反射路径方向上的一个分量，并不代表实际的行走速度以及行走方向，仅凭借该信息依然无法实现人体位置的定位。在单个链路下，因天线阵列间隔过大导致的到达角无法估计问题还未解决，从而使得 AOA-TOF 联合估计无法获取相关参数，暂时还未实现位置的定位。

3.参考文献

- [1] 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.
- [2] 徐健. 基于WiFi设备的无源被动室内位置追踪技术研究[D]. 中国科学技术大学, 2024.