

WIFI-CSI 室内定位学习周报

2025 年 8 月 17 日星期日

1. 学习目标

- 1、学习利用 WIFI CSI 数据进行室内定位的基本原理；
- 2、利用实测双天线 CSI 数据进行测试。

2. 学习进展

2.1 WIFI CSI 室内定位基本原理

室外定位目前已经较为成熟，如中国的北斗导航系统、美国 GPS 定位系统等，已经实现大规模商用。然而室外定位技术在室内往往无法使用，解决室内环境下的准确定位在导航等领域有重要意义。在室内定位技术中，基于 WIFI 的定位技术由于 WIFI 信号较为容易获取受到了广泛关注。

目前基于 WIFI 进行室内定位主要包括以下方法：基于指纹库的定位与基于多径反射的定位。基于指纹库的定位主要是利用 WIFI RSSI 或 CSI 信息，利用提前收集的位置指纹库，对当前信息进行匹配得到目标位置，这种方法需要建立起大量数据的指纹库。基于多径反射的定位需要对 WIFI 信号的到达角(AOA)与飞行时间(TOF)进行估计，在确定 WIFI 发射与接收点的位置的情况下，根据反射模型可以得到目标的位置。

➤ 菲涅尔区的基本概念

在 WIFI 信号传播过程中，受到物体反射会导致相位增加 π ，而信号传播过程中，直射传播信号最强，其余反射信号由于路径差的存在，使得相位相对于直射信号也会发生变化。在路径差为单个半波长时，信号相位增加 π ，由此得到的总体相位差为 2π ，与直射信号同相，反映到信号强度上为幅度增强。当路径差为两个半波长时，总体相位差为 3π ，与直射信号为反相，反映到信号强度上为幅度减弱。因此当路径变化依次增加半波长时，信号幅度将依次表现为波峰与波谷。第 n 个峰值或谷值所对应的反射路径满足如下公式：

$$|P_1M| + |P_2M| - |P_1P_2| = n \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

P_1 为发射天线位置, P_2 为接收天线位置, M 为物体位置。将满足上述公式所有的 M 点组成的轨迹称为菲涅尔边界, 由不同菲涅尔边界分割的区域称为菲涅尔区, 从内到外分别称为第一菲涅尔区、第二菲涅尔区等, 菲涅尔区示意图如下所示:

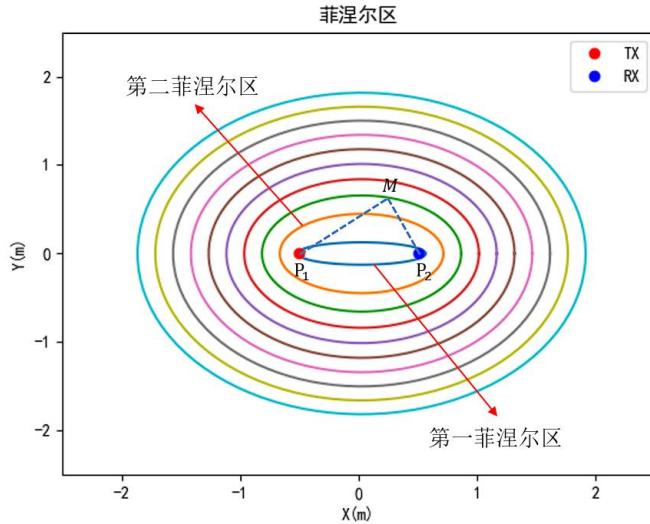


图 1 菲涅尔区示意图

当人体连续在菲涅尔区之间移动时, CSI 幅值将不断出现波峰-波谷, 体现在 CSI 谱图上即为出现“一条条线”, 而在单个菲涅尔区内的微小移动会导致 CSI 相位发生可观测但小于 π 的变化, 这也是有关研究利用 WIFI 进行呼吸监测的依据。一段真实的人体移动过程中 CSI 幅值图如下所示:

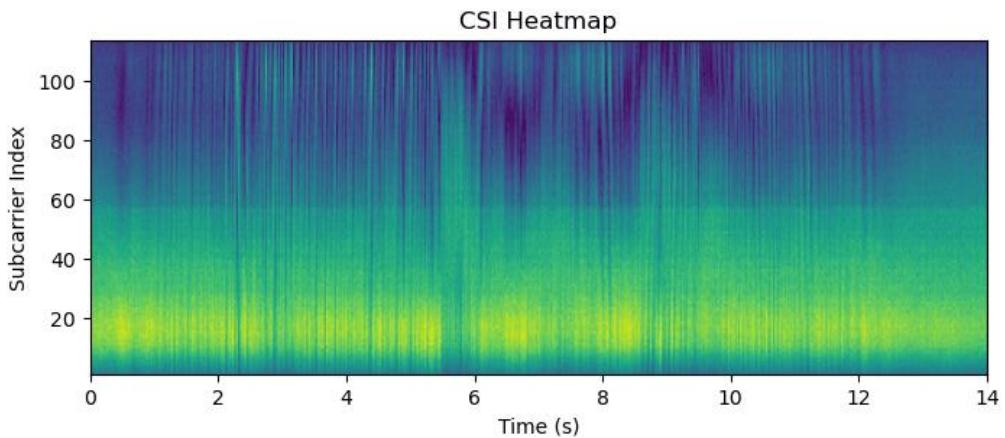


图 2 连续移动 CSI 幅度变化

通过统计 CSI 峰值谷值出现的次数, 可以得到目标移动时跨过的菲涅尔区个数, 结合菲涅尔区的分布, 有关研究利用多个 WIFI 接收点联合实现目标的定

位。虽然在只有单个接收点的情况下无法直接得到目标移动距离, 但可以作为后续目标定位的参考。

➤ WIFI 信号下虚拟阵列的 AOA-TOF 联合估计

WIFI 接收模型往往采用多天线阵列, 即一个接收点处有多个天线, 由于不同天线在接收同一入射信号时不同入射角度会导致路程差不同, 从而导致相位的变化, 通过对这种相位进行测量, 可以实现目标反射角度的估计, 不同天线下的相位差满足下式:

$$\Psi_{m,\theta} = e^{-j2\pi(m-1)fd\sin\theta/c} \quad (2)$$

上式中, $\Psi_{m,\theta}$ 代表当入射角为 θ 的某条路径在第 m 根天线上引起的相对于第一根天线的相位差, f 为中央频率, d 为天线间隔。

然而 WIFI 天线一般只有 2~3 个, 而常见的超分辨角度估计算法如 MUSIC 算法要求反射路径个数小于天线个数, 对于受多径效应影响明显的 WIFI 信号无法适用。WIFI 信号采用 OFDM 技术进行调制, 获取的 CSI 数据包含多个不同频率的子载波, 由于子载波的频率不同, 在信号传播时延下会在不同子载波之间产生一个可观测的相位变化, 不同子载波下的相位差满足下式:

$$\Omega_{n,\tau} = e^{-j2\pi(n-1)\Delta f\tau} \quad (3)$$

上式中, $\Omega_{n,\tau}$ 代表当传播时延为 τ 的某条路径在第 n 个子载波上引起的相对于第一个子载波的相位差, Δf 为子载波频率间隔, 在 5G 频段下一般为 312.5KHz。

由此可以将入射角 θ 与传播时延 τ 联合起来进行估计, 从而将传感器的个数拓展为天线个数 $M \times$ 子载波个数 N , 对于一个两天线三十子载波的 WIFI 接收器, 接收的 CSI 数据为:

$$C = \begin{bmatrix} I_{1,1} & \cdots & I_{1,30} \\ I_{2,1} & \cdots & I_{2,30} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $I_{m,n}$ 代表第 m 个天线第 n 个子载波接收的 CSI 数据, 将其展开可以得到一个虚拟的 60 天线的接收阵列, 虚拟阵列接收数据 X 为:

$$X = [I_{1,1} \quad \cdots \quad I_{1,30} \quad I_{2,1} \quad \cdots \quad I_{2,30}] \quad (5)$$

则 MUSIC 算法中接收信号可表示为:

$$X = AS + N \quad (6)$$

上式中, 假设有 k 个入射路径, 则入射信号 S 为一个 $k \times 1$ 的矩阵, 到达向量 A

为一个 $60 \times k$ 的矩阵, N 为噪声。其中到达向量 A 为下式:

$$A = [a(\theta_1, \tau_1) \quad \cdots \quad a(\theta_k, \tau_k)] \quad (7)$$

其中, $a(\theta_k, \tau_k)$ 为第 k 个路径的导向矢量, 可由下式计算:

$$a(\theta, \tau) = \begin{bmatrix} \Psi_{1,\theta} \Omega_{1,\tau} \\ \vdots \\ \Psi_{1,\theta} \Omega_{30,\tau} \\ \Psi_{2,\theta} \Omega_{1,\tau} \\ \vdots \\ \Psi_{2,\theta} \Omega_{30,\tau} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由此可根据 MUSIC 算法的流程计算接收信号的协方差矩阵 $R_{xx} = E\{XX^H\}$, 并计算特征向量进行空间谱的估计:

$$P_{MUSIC}(\theta, \tau) = \frac{1}{a(\theta, \tau)^H E_n E_n^H a(\theta, \tau)} \quad (9)$$

上式中 E_n 为信号的噪声子空间, 通过对角度、时延的搜索, 从而实现对到达角(AOA)与传播时延(TOF)的估计。得到 AOA 与 TOF 后, 根据反射模型, 求解椭圆方程即可实现目标的定位, 定位示意图如下所示:

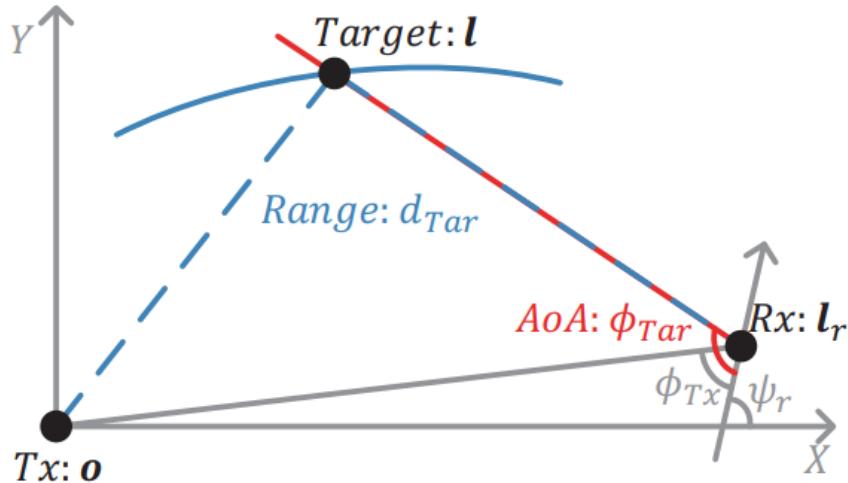


图 3 利用到达角(AOA)与传播时延(TOF)进行目标定位

2.2 仿真实验

根据 WIFI 信号的传播特点进行仿真实验, 设置发射端位置 $[0,0]$, 接收端位置 $[3,0]$, 接收天线 3 个, 中心频率 5.32GHz , 子载波个数 52 个, 带宽 20MHz , 天线间距半波长。目标位置 $[1.5, 1.5]$, 仿真两个路径: 直射路径与目标反射路径, 利用 AOA-TOF 联合估计进行 MUSIC 算法估计, 结果如下图所示:

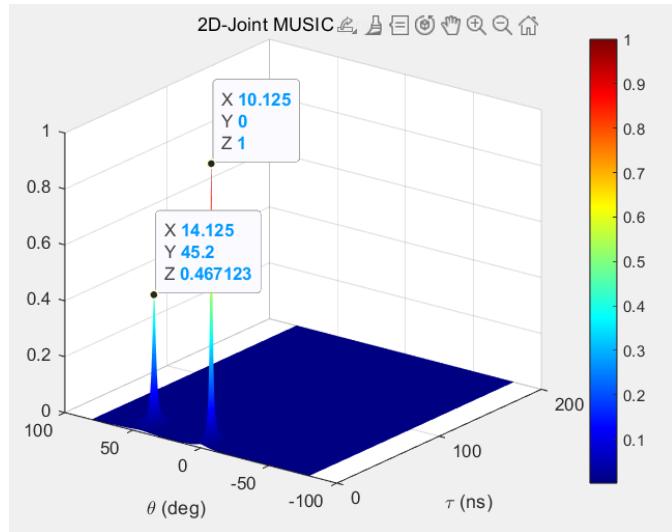


图 4 联合仿真结果(接收间距 3m, 目标位置[1.5,1.5])

从上图中可以发现, 结果主要包括两个路径, 角度为 0 的为直射路径, 另一个为目标反射路径。从中可以得到目标反射路径的到达角 AOA 为 45.2° , 传播时延 TOF 为 14.125ns , 根据这两个参数可以计算目标所在椭圆轨迹以及入射射线, 两者的交点即为目标位置:

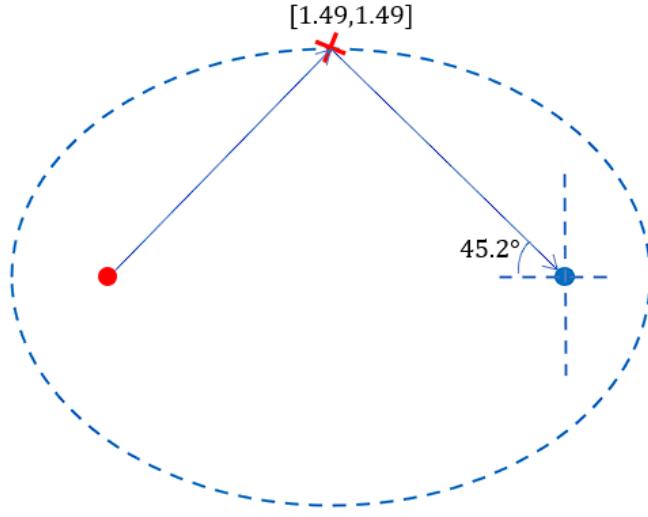


图 5 目标位置求解过程示意图

2.3 实际数据测试与出现的问题

利用实际采集的双天线数据进行 AOA-TOF 联合估计, 中心频率为 5.2GHz, 子载波个数 114, 带宽 40MHz, 天线个数 2, 天线间隔 12cm, 计算得到的 MUSIC 谱图如下图所示:

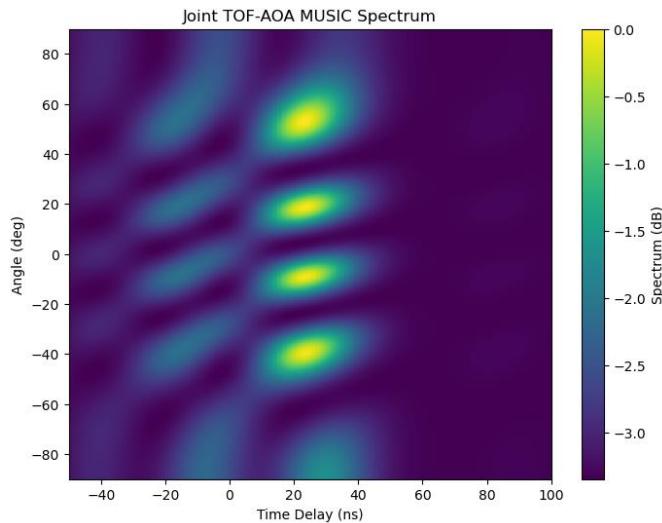


图 6 真实数据的 TOF-AOA 估计

从上图发现，结果并不符合预期，出现了相同时延下不同角度的四个峰值，且没有 0 角度的直射路径，无法确定目标的具体参数。

问题与原因分析：

一个很大原因是接收天线的间距为 12cm，而在 5.2GHz 的中心频率下半波长为 5.8cm，可以看到天下间隔约为 4 倍的半波长，而间隔大于半波长所导致的直接结果即相位差不在 $[-\pi/2, +\pi/2]$ 之间，导致有多个入射角度对应的相位差相同，这也就是上图中出现四个相似峰值的原因。将上述仿真中天线间隔改为 12cm，仿真结果也出现了多个虚假的峰值：

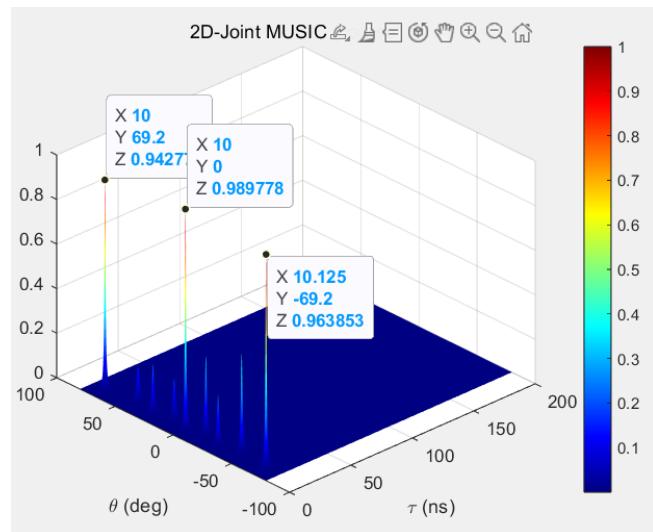


图 7 天线间距为 12cm 时仿真结果

除此之外，由于多径效应的存在，同一目标反射的信号可能通过多个路径最终被接收器接收，这些路径下的信号是相干的，与 MUSIC 算法中各信号源独立

的假设相矛盾，有关研究通过前相/后向平滑将相干信号源分配进不同的子序列，解决了这个问题。

因此，目前需要主要的问题是天线间隔大于半波长导致的角度模糊。由于天线间隔固定，若改变信号频率，需要将 WIFI 中心频率修改为 1.25GHz 才能满足，此时已不符合 WIFI 频段。另一种方法是限制目标范围，使得天线间的相位差满足单调区间，在间距为 4 倍半波长时，这意味着目标的角度范围要在 $(-15^\circ, +15^\circ)$ ，探测范围大大减小，并且由于多径效应的存在，室内场景下很难将入射角限制在这一范围。

3. 参考文献

- [1] 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.
- [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] 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.