CSE5010期末报告——基于毫米波雷达的手写轨迹追踪

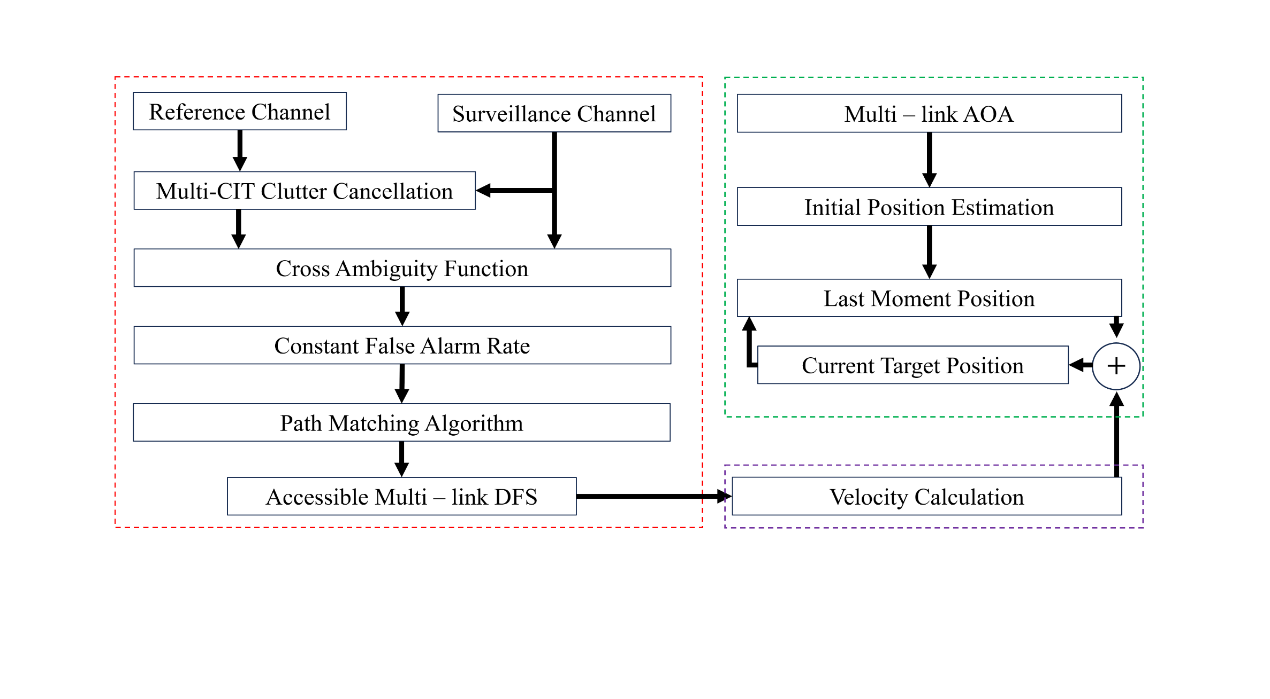
12332152吉辰卿 12010508华羽霄

1. 项目背景

在人体运动跟踪中，已经有许多利用无线通信信道状态信息（CSI）进行估计的工作。然而，传感性能受到信号波长的限制。此外，基于CSI的传感方法对接收信号强度具有很高的灵敏度。这是因为精确估计CSI对于捕获手指运动引起的相移至关重要。因此，许多现有作品中的手写跟踪实验都是在靠近Wi-Fi发射机和接收机的地方进行的，它们之间有视线（LoS）路径。因此，在非视距链路下，由于散射和反射的损失导致接收信号功率显著下降，很难使用CSI信息来高精度地跟踪轨迹。

1. 项目简介

在室内环境中，搭建毫米波雷达感知系统，重构书写运动轨迹。系统框图如下：



通过多链路毫米波被动雷达获取物体不同方位的多普勒信息，通过多普勒与物体真实速度之前的转换，从而实现手写轨迹的重构。通过交叉模糊函数、CFAR和路径匹配算法处理接受信号，来实现低发射信号要求下对物体运动多普勒的提取。

1. 应用场景

* 手势识别与控制： 通过分析人体运动的微小变化，可以实现手势识别和手势控制，例如在智能家居中控制灯光、电器等。
* 健康监测： 跟踪人体运动可以用于健康监测，例如监测呼吸、心率等生理信号，有助于提供非侵入性的健康监护。
* 虚拟现实（VR）和增强现实（AR）： 在虚拟或增强现实环境中，可以使用这项技术来更自然地追踪用户的头部和身体运动，提高用户体验。
* 安防系统： 可用于建立智能监控系统，非侵入地监测区域内的活动，实现对异常行为的实时检测。

1. 技术优势

* 非侵入性： WiFi感知是一种非侵入性的技术，无需用户佩戴额外的传感器或设备。这使得对用户来说更加方便，减少了在使用技术的过程中的不适感。
* 基础设施广泛： WiFi技术已经普及，并且在许多地方都有广泛的基础设施。这使得WiFi感知技术可以在不需要额外硬件投资的情况下部署和应用。
* 低成本： 由于WiFi设备已经存在于很多地方，采用WiFi感知的成本相对较低。不需要购买昂贵的专用传感器，而是利用现有的WiFi基础设施。
* 多功能性： WiFi感知可以用于多种目的，包括位置跟踪、人体运动监测、手势识别等。这种多功能性使得它在不同的应用场景中都有潜在的用途。
* 无需直线视线： 与一些传统的视觉感知技术不同，WiFi感知不需要直线视线，因为WiFi信号可以穿透一些障碍物。这增加了在不同环境中应用的灵活性。
* 适用于室内定位： WiFi感知在室内定位方面具有良好的性能，可以用于室内导航、位置服务等应用。
* 数据隐私管理： 相对于某些其他感知技术，WiFi感知可能更容易进行数据隐私管理，因为它不直接涉及对个人身体的图像或生物信息的捕捉。

1. 设备布置

对于手写轨迹重构问题，使用四台Sivers60GHz相控阵列天线，对于每一台天线，都有16个天线单元，在发射端取第i种波束，接收端取第j种波束时，波束赋形的信号为：



通过开启不同数量的天线单元和取不同的波束模式，可以对相控阵列天线的波束宽窄和波束方向进行调整。通过开启指定数量的天线单元和波束模式，实现对指定方向的信号获取。相控阵天线示意图如下：

图示

描述已自动生成

在4台天线中，其中一台作为发射天线，因为实验是在通信感知一体化的背景下进行，发射的信号模拟真实的通信信号，在IEEE802.11标准中，信号通过OFDM方案进行调制，将发送的OFDM信号定义为：

示意图

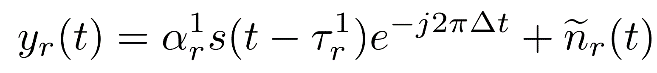
描述已自动生成

一台天线作为参考天线，参考天线接收的信号表示为：

图示

中度可信度描述已自动生成

因为直达径的功率远大于其他路径，参考天线接收的信号表示为：

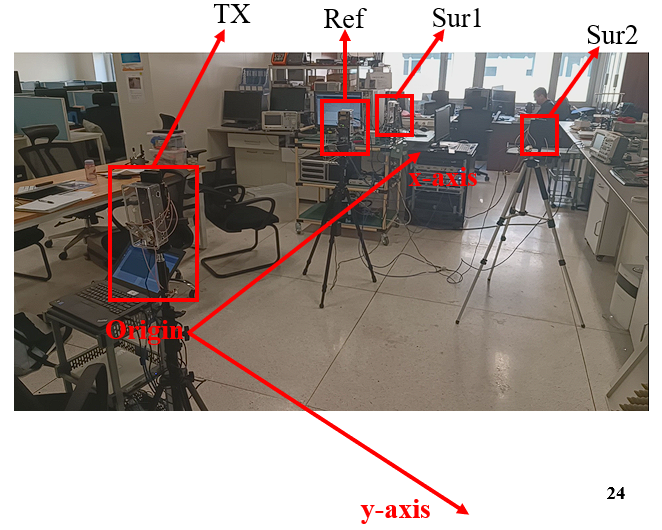


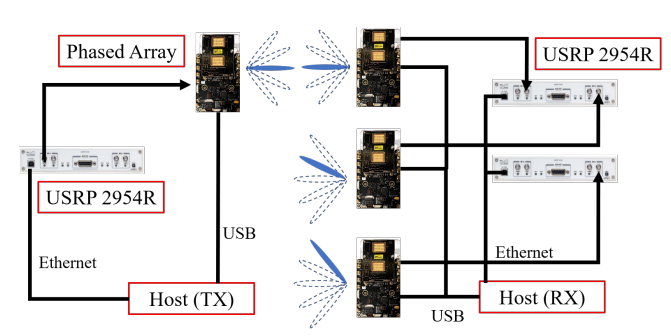
另外两台作为监视天线，监视天线接受的信号表示为：

文本

低可信度描述已自动生成

设备摆放位置如下：





1. 技术细节
   1. 交叉模糊函数

在被动雷达中，对参考信道和监视信道进行同步后，使用交叉模糊函数处理来获得多普勒偏移，表示为：

文本, 信件

描述已自动生成

可以观察到，当时延和多普勒匹配时，参考信号和监视信号的模糊函数计算值会达到峰值，通过遍历的方式可以得到峰值对应的多普勒频移，在实际运算中，采用快速傅里叶变换来加快运算速度。此外，在上述交叉模糊函数的基础上应用滑动窗口，窗口大小为一个相干积分时间，相干积分时间越长，多普勒分辨率越高，但同时计算时间成本也会随之增加。通过交叉模糊函数生成时间多普勒谱，得到连续的多普勒变化：

文本

描述已自动生成

* 1. 杂波消除

在交叉模糊函数后，存在较强的零频分量，这是来源于直达径的信号影响，因此需要做杂波消除，具体表示为：

图片包含 徽标

描述已自动生成

徽标

中度可信度描述已自动生成

其中，U表示监视信道信号，V为参考信道信号，长度为一个相干积分时间（CIT）。在实际计算时，为了避免零频的完全去除，选择采用多CIT杂波消除的方式。

* 1. 恒定虚警概率下的检测器

对于两个监视信道得到的两幅时间多普勒图，因为毫米波对微多普勒的敏感性，会存在一些与手写轨迹多普勒无关的噪声，因此采用恒定虚警概率下的检测器（CFAR）进行处理。对于CFAR，需要定义保护单元数量，训练单元数量和虚警概率。其中，训练单元用于估计噪声，保护单元用于防止检测单元的信号分量泄露到训练单元，对于一维的CFAR，具体结构如下：

表格

描述已自动生成

这里使用的是一维的CFAR，首先定义噪声估计为：

文本

中度可信度描述已自动生成

其中N为训练单元数量。

虚警概率与门限因子的式子表示为：

文本

描述已自动生成

其中a为门限因子，fa为虚警概率。

* 1. 路径匹配算法

通过CFAR，获得新的多普勒时间图，因为轨迹追踪是连续的动作，在处理后希望看到的时间多普勒图应当是连续的，但是由于CFAR并不能保证每一个相干积分时间的检测点数相同，因此需要设计路径匹配算法。

设计路径算法时，主要考虑两种情况：

当前时刻无检测结果。采用滑动平均对当前时刻进行插值：

图片包含 形状

描述已自动生成

当前时刻有检测结果。分为两类情况讨论：当检测结果唯一，即选取当前唯一检测结果作为当前时刻的多普勒；当检测结果不唯一，由于前后时间多普勒的连续性，首先考虑距离权重，同时，将多普勒的绝对值也考虑在内，因此在选择点时定义以下权重函数：

文本, 信件

描述已自动生成

* 1. 位置迭代模型

路径匹配后，可以得到两个方位各自的多普勒轨迹，但是多普勒描述的是反射路径变换的快慢，并不等于物体移动的真实速度。对于单链路而言，多普勒和真实速度之间存在关系：

手机屏幕的截图

描述已自动生成

图示

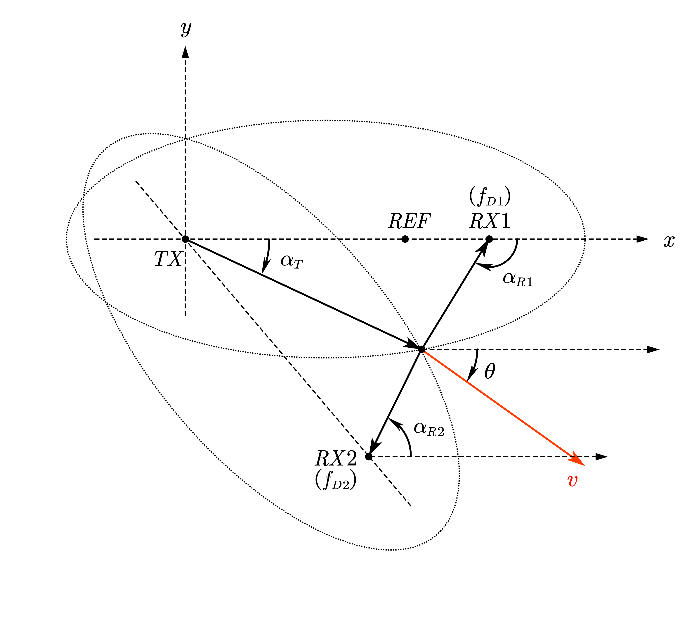
描述已自动生成

但是，如果想要解出速度的大小和方向，需要多链路的多普勒，建立如下方程：

手机屏幕的截图

描述已自动生成

其中，fD1为第一条链路的多普勒，fD2为第二条链路的多普勒。具体表示含义如图所示：



对方程组进行整理：

图示

描述已自动生成

把速度在x和y方向分解的分量vx和vy代入方程，可以表示为：

手机屏幕截图

描述已自动生成

表示为矩阵形式，并对速度分量进行求解，可以得到：

图示

描述已自动生成

因此，由两幅时间多普勒图可以得到物体真实速度在x，y轴上的速度分量，对于每一时刻的速度分量，乘以相干积分时间，可以还原物体的轨迹。

文本

描述已自动生成

1. 实验结果

杂波消除效果前后对比：

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

轨迹重构及误差分布：

|  |  |
| --- | --- |
|  | 图表, 折线图  描述已自动生成 |
| 图表, 折线图  描述已自动生成 | 图表, 折线图  描述已自动生成 |
| 图表  描述已自动生成 | 图表, 折线图  描述已自动生成 |
| 图表, 折线图  描述已自动生成 | 图表, 折线图  描述已自动生成 |
| 图表  描述已自动生成 | 图表, 折线图  描述已自动生成 |
| 图表, 折线图  描述已自动生成 | 图表, 折线图  描述已自动生成 |

1. 总结思考

在该项目中，我们使用两毫米波相控阵接收机链路，提取运动目标两个方向的多普勒频率分量。采用自主研发的算法（路径匹配算法）解决了CFAR算法后的多普勒频率缺失、异常值和错误检测等问题。实验结果证明，路径匹配算法在准确、流畅地恢复运动物体的轨迹方面起着重要作用。通过写入5个不同的数字和五角星图案，证明我们提出的系统可以准确地还原真实轨迹，中值误差基本在厘米级（cm级）。

1. 未来计划

由于路径匹配算法更适合检测每个人的连续多普勒频率，因此我们可以提取在时-多普勒频谱图中写入的多个人的连续多普勒，并对它们进行区分。然后，我们可以通过调整路径匹配算法的超参数来追踪多人的手写，从而验证该算法是否对多人手写追踪保持了良好的准确性。

目前系统可以实现同一水平面上地轨迹估计，如果想要实现空间内的轨迹估计，可以考虑添加一台监测设备，放置在区域正上方朝下。