



南方科技大学  
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

# 《电子科学创新实验 II》 课程报告

题    目： 基于 WIFI 被动雷达的人体运动感知  
姓    名： 张皓东  
学    号： 12113010  
系    别： 电子与电气工程系  
专    业： 通信工程  
指导教师： 王锐

2024 年    1    月    13    日

# 基于 WIFI 被动雷达的人体运动感知

张皓东

(电子与电气工程系 指导教师: 王锐)

**[摘要]** 本项目基于 WIFI 信号, 使用被动雷达的方式, 对人体的运动进行感知与检测。人体感知是一项重要的技术, 有广阔的应用前景, 进行人体感知的方法也多种多样。近年来, 使用 WIFI 进行人体感知作为一项新兴且有前景的技术受到了广泛的关注和探索, 与其他感知方式相比, WIFI 感知呈现出了隐私安全性、便携性等特有的优势。进行 WIFI 感知主要有两种方式, 一是通过 CSI (信道状态信息) 进行获取被感知的信息。二是使用被动雷达的方式获取感知信息。本项目将采用被动雷达的方式进行人体运动感知。使用被动雷达进行人体运动感知的主要原理就是将 WIFI AP (接入点) 到接收机直射的参考信号和 WIFI 信号经过运动人体反射回来的信号进行互相关模糊函数计算, 得到反射信号的多普勒信息, 从而反映出人体的运动信息。本实验使用了 SDR (软件无线电) 接收机进行接受信号。在整个过程之前, 我们需要估计出 AP 的位置, 此项目中我们使用了 RSS 算法 (接受信号强度模型拟合算法) 进行估计 AP 位置, 表现出了良好的性能。采集信号后需要很多的信号处理算法对原始信号进行处理, 包含消除直射信号算法, 信标信号消除算法, 多 CIT 干扰消除算法等等。最后, 我们也使用了 IAA (迭代自适应性算法) 来提高多普勒检测分辨率。

**[关键词]:** WIFI 感知; 人体运动感知; 被动雷达; 软件无线电 (SDR); 多普勒频移; 数字信号处理

# 目录

1. 实验背景.....	4
1.1 人体感知的应用和方法.....	4
1.2 WIFI 感知的两大方案.....	6
1.3 被动雷达与运动检测的基本原理.....	7
2. 实验目标与实验环境.....	9
2.1 实验目标.....	9
2.2 实验设备.....	9
2.3 实验环境搭建.....	10
3. WIFI AP 的定位.....	11
3.1 定位算法.....	11
3.2 RSS 算法基本原理与算法实现.....	12
4. 人体运动感知实验.....	15
4.1 实验环境.....	15
4.2 直射信号消除算法与实现.....	16
4.3 信标信号消除算法与实现.....	18
4.4 多普勒-时间图谱绘制.....	19
5. 总结.....	22
参考文献.....	23

# 1. 实验背景

## 1.1 人体感知的应用和方法

人体感知技术是一门具有广泛应用价值和前景的重要技术领域，涵盖了安全和监测、健康与安全监测、智能家居、军事和法律执行、搜救等多个领域。在安全和监测方面，人体感知技术可用于智能监控系统，例如监测区域内的异常活动，确保公共场所的安全。在健康与安全监测方面，该技术可应用于医疗领域，监测病人的生理状态，实时反馈医护人员，以提高医疗护理水平。智能家居是人体感知技术的又一个重要应用领域，通过感知居民的活动和习惯，智能家居系统可以自动调节环境，提高居住舒适度。在军事和法律执行方面，人体感知技术有助于监测军事基地和关键设施的安全性，同时可用于支持法律执法活动，提高社区安全水平。搜救领域是人体感知技术的另一重要应用方向，搜救人员可以更有效地定位受困者，提高搜救效率。例如，在自然灾害后，通过部署人体感知技术，搜救团队可以更快速地发现被埋压的人员，展开紧急救援行动。在实现人体感知的过程中，可以采用多种方法，例如可穿戴设备、监控摄像头、红外传感器，以及主动雷达和被动雷达等技术手段。

在本项目中，我们专注于被动雷达技术，并采用 WIFI 信号作为实现人体感知的手段。使用 WIFI 信号进行感知成为现在具有广泛应用前景和研究价值的方案。由于通信感知一体化 (ISAC) 概念的兴起，雷达与通信的频谱共享引起了工业界和学术界的极大关注。其内涵不仅包括促成雷达与通信设备的同频共存、互不干扰，从而高效利用频

谱，还包括设计一种兼容二者的新型一体化系统，使得该系统能同时实现通信和非接触式感知两种功能。而 WIFI 感知正是 ISAC 技术目前尝试突破的关键技术之一，其正是使用 WIFI 通信的信号来进行感知任务，是 ISAC 发展的初步尝试。

利用 WIFI 信号进行感知相较于其他传感器等方式具有独特的优势，这种技术具备高度的私密性、良好的舒适度和低成本、便携性等特点。首先，WIFI 信号感知的高私密性使得这种技术在隐私敏感的场景中得以广泛应用。由于 WIFI 信号可以在不干扰用户隐私的前提下进行感知，这为家庭、医疗等领域提供了更为安全和可行的解决方案。用户无需担心个人信息泄露的问题，使得 WIFI 信号感知成为一种受欢迎的选择。其次，WIFI 信号感知的舒适度好，意味着用户在感知过程中不会受到任何干扰或不适感。相对于其他传感器可能产生的噪音或接触式设备引起的不适，WIFI 信号感知的非侵入性使得用户能够在自然状态下进行活动，保持高度的舒适性。此外，WIFI 信号感知的成本相对较低，无需大量昂贵的设备，因为 WIFI 基础设施已经在城市范围内广泛部署。这降低了感知系统的建设和维护成本，为更广泛的应用提供了可行性。在便携性方面，WIFI 信号感知可以轻松实现，因为大多数现代设备都具备 WIFI 模块。这使得感知系统具备便携性，可以随时随地应用于不同的场景，无需额外的专用设备。然后由于城市范围内广泛部署有 WIFI AP，WIFI 信号感知更加便捷。这意味着感知系统无需额外的基础设施部署，而是可以充分利用已有

的网络，提高了感知的灵活性和普适性。另外，WIFI 信号能够穿透墙面，为穿墙进行感知提供了可能性，拓展了感知的应用场景和范围。

## 1.2 WIFI 感知的两大方案

使用 WIFI 信号进行感知目前主要有两种方案，第一种是利用 CSI(信道状态信息)进行感知，其利用了 WIFI 信号的信道状态信息，即 CSI，以获取有关信号传播环境的详细信息。CSI 是 WIFI 设备提供的信号传播特性的一种表示，可以通过现代 WIFI 芯片提供的 API 或者驱动程序来获取。通常，WIFI 设备提供的 CSI 信息包括幅度、相位和频率等方面的数据，这些数据反映了信号在传播路径上的变化。获取到的 CSI 数据可能受到噪声和干扰，需要进行预处理和数据处理来提取有用的信息。这可能包括滤波、去噪、对齐等操作，以确保得到的数据准确反映实际信号的特性。从处理后的 CSI 数据中提取有关环境和目标的特征。这可以包括多径信号的到达时间、相对幅度、相位变化等。这些特征可以用于识别运动、检测障碍物、测量距离等应用。利用提取的特征建立模型或使用特定的算法来实现具体的感知任务。例如，可以使用机器学习算法对特征进行分类，以实现人体检测、姿态识别或其他环境感知任务。在实时应用中，系统可能需要持续监测并感知环境变化。通过不断地获取 CSI 数据、提取特征并应用感知算法，系统可以实时地适应变化的环境，并及时提供反馈或执行相应的控制策略。另一种方法就是使用被动雷达的方式，这也是本项目使用的方案，其使用接收机以被动雷达的方式接受 WIFI 信号，包括 WIFI 的直射信号和 WIFI 经过运动物体的反射信号，通过一定的信号处理

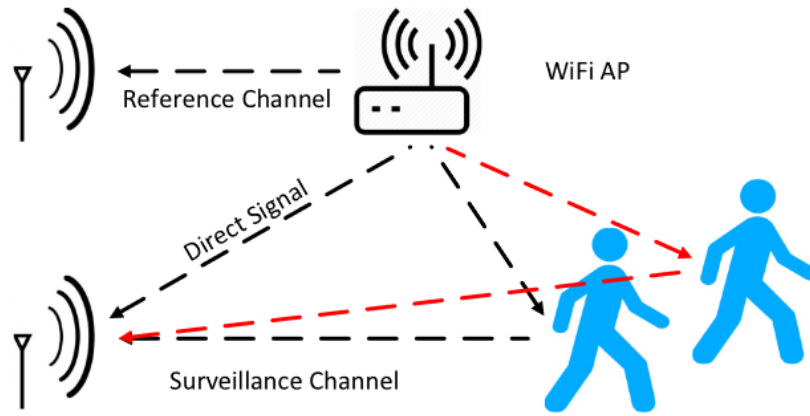
算法得到被感知对象的信息。其具体原理将在下节详细阐述。

### 1.3 被动雷达与运动检测的基本原理

被动雷达是一种雷达感知监控系统，其独特之处在于它无需发射额外的信号，即无需主动向外界发射信号，就能够实现对监控目标的跟踪。这种方法在目标识别领域具有广泛的研究潜力，因为它不会在信道中引入额外的检测信号。被动雷达的工作原理是通过接收其他信号源（这里使用 WIFI 信号）反射或衍射在目标上的信号，从而实现目标的监测和跟踪。到达接收机的信号有两条，一是参考信道，该信道信号通过直达径（LOS）从发射源直接传输到接收机。在这个传播路径上，不携带任何多普勒频移信息，从而保持了信号的原始特性。二是监视信道，它是指通过反射或衍射与监视对象发生交互的信号。这些信号在目标表面反射或经过衍射后，被另一个接收机捕获。通过这两个信号进行一定处理即可获得感知信息。监视信道信号与参考信道信号的关系如下所示：

$$y_s(t) = \sum_p A_p e^{j2\pi f_d t} y_r(t - \tau) + n(t)$$

其中  $\tau$  为时延， $f_d$  为多普勒频移，它反应了反射物体的速度信息， $p$  为多径的数量。因此如果可以通过某些信号处理的算法得到多普勒频移，就可以估计出物体的运动速度，也就完成了我们的基本的人体运动检测。其模型图如下图所示：



对于这个问题，我们可以利用互相关模糊函数，提取出由于目标检测物体移动所带来的多普勒频移，模糊函数公式如下：

$$R(\tau, f) = \int_0^{T_w} y_s(t) y_r^*(t - \tau) e^{j2\pi f t} dt$$

其中  $T_w$  表示相关积分时间（CIT），\*代表着这个信号点的共轭复数，此时就从信号中提取了一个关于监听对象与发射机的延迟  $\tau$  和对应多普勒频移  $f$  的一个关系式。此时，只需要找到  $R$  的极大值，再将其中的  $\tau$ ， $f$  提取出来，我们就找到了参考信道信息和监听信道信息之间的对应关系即为此时极大值的所对应的  $\tau$ ， $f$ 。表示为：

$$R(f, t) = \max_{\tau} \int_t^{t+T_w} y_s(x) y_r^*(x - \tau) e^{j2\pi f x} dx$$

但是，这个多普勒信道是一个时变信道，所以项目必须要缩短这个积分的区间，另外 CIT 过大也会捕捉过多的多普勒信息而不能准确区分出不同的多普勒频移，但是缩小区间会导致多普勒频移的分辨率降低，因此要选择一个合理的 CIT，在本实验找那个我们选择 0.5s。在这部分的时间间隔内，可以假设信道的时变量是一个常数，那么就可以通过调整 CIT 来获得一个最佳的信道质量。所以我们就可以使用该方法来得到多普勒频移来反应人体运动信息。但这个过程并不容易，



我们需要额外做更多的信号处理，这些将在第四节展开。对于 WIFI 信号来说，因为其带宽较小，其距离的检测分辨率较大，对于室内场景下的感知并不能有效的获得距离信息，但是多普勒信息是完全可以使用并可以很好反应物体运动信息的参数，通过控制 CIT 即可很好的控制我们的多普勒分辨率。

## 2. 实验目标与实验环境

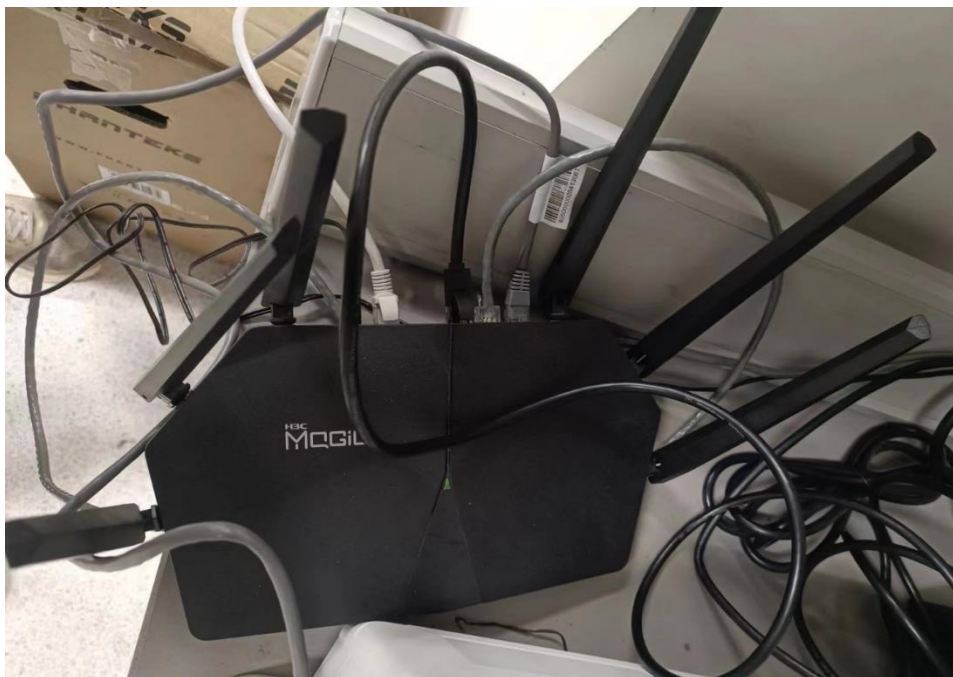
### 2.1 实验目标

本实验的目标就是使用 WIFI 信号对室内人体运动进行感知。使用 SDR 接收机接受信号，通过被动雷达的方式接受和处理信号，然后通过多种信号处理算法对原始信号进行处理，最终可以得到人体不同运动对应的运动对应的多普勒谱。

### 2.2 实验设备

本实验的信号发射源使用正常的商用 WIFI 路由器，接收机使用小 USRP (USRP NI2900)。

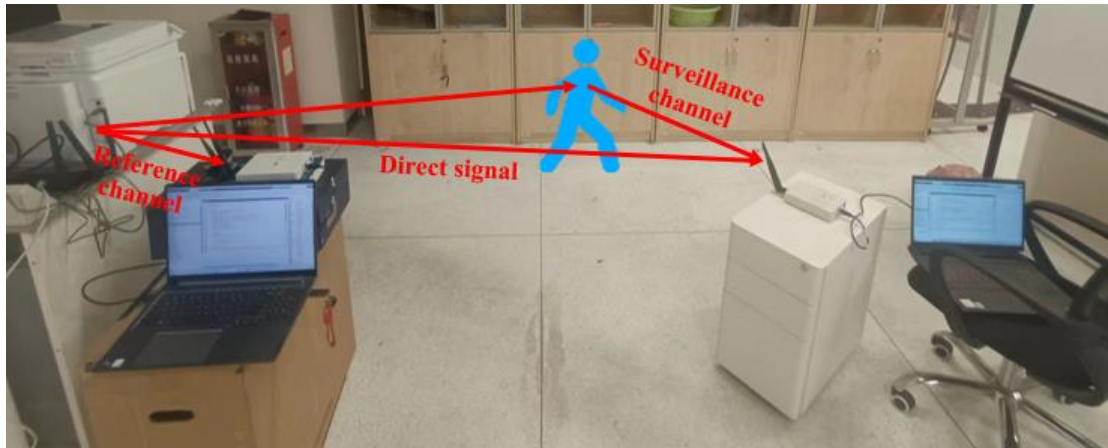




由于此小型 USRP 不能同时接收两个通道信号，故本实验采用两台 USRP 分别接收参考信号和监视信号。但由于不同 USRP 时钟不同步等问题，对于信号的接收存在着一定的影响。我们的接收天线由于设备限制使用了全向天线，这也不利于实验中信号的正确收集，因此这些硬件限制导致了最后的结果并不太理想，尽管如此，最后的结果仍然可以反映出多普勒频移信息，可见尽管硬件设备受限，仍然可以通过适当的信号处理方法得到多普勒信息。

## 2.3 实验环境搭建

本实验的实验场地环境搭建如下：



如上文所述，我们采用了两台 USRP 接收不同的信道的信号，但由于两台 USRP 分立接收信号，存在不同步问题，以及使用全向天线，接受到环境中其他信号的干扰较大，另外第二个 USRP 接受到的 WIFI AP 的直射信号的干扰很大，这都会影响我们实验的测量结果。因此在未来，我们需考虑更换硬件设备，得到更好的实验条件，搭建更好的实验环境来进行实验。

### 3. WIFI AP 定位

#### 3.1 定位算法

在 WIFI 感知进行之前，我们有必要进行 WIFI AP 的定位，这主要面向的是穿墙感知，也就是在墙外面对室内进行感知，这时我们需要提前知道 WIFI AP 的大体位置，这样我们可以将参考信道的接收天线尽可能的接近我们 AP 实际处于的位置，以得到更好的实验结果。尽管由于实验设备的限制以及室外走廊其他 WIFI 信号干扰过大的问题，在本实验中我们并没有进行穿墙感知，但是我们仍然完成了 AP 定位的实验，并取得了不错的效果。

对于信号源定位这个问题，已经存在了很多相关的算法，比如估

计到达角（AOA）的方法，但这些大多算法都需要定向天线来完成以得到准确的 AOA，但这并不用于了 WIFI 感知低成本、便携等场景。因此需要一个简单且对硬件要求不高的算法来进行定位。本实验采用了 RSS（接受信号强度）模型拟合算法来进行 AP 定位，并取得了不错的结果。

### 3.2 RSS 算法基本原理与算法实现

该算法只使用到了接收信号的强度，然后进行一定的模型拟合，即可得到 AP 位置的粗略估计。其核心思想如下：首先，我们将实验场地分成若干网格，然后分别假设 AP 在每一个网格处，算出理论接收信号的强度，然后根据实际测得的接收信号的强度，通过拟合的方式得到 AP 最可能处于的网格位置。其实现步骤如下：

首先，我们通过简化的 Pathloss 模型计算出理论接收信号强度，记为  $Y_k$ ，简化的 Pathloss 模型公式如下：

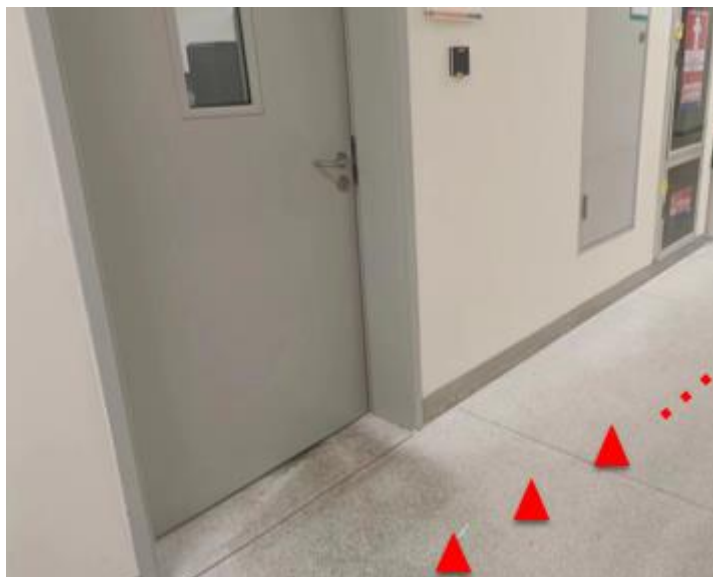
$$PathLoss = P_t - P_r = PathLoss_0 + 10\gamma \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_g$$

因此，我们首先需要测出发射功率  $P_t$ ，这里，我们采用的方式是贴近 AP 测试：



测量信号强度过程中，我们使用了多次测试取平均值，来避免偶然误差。这样，我们就可以得到发射功率，然后我需要测试  $d_0$  处的信号强度，我们选择在墙外贴近 AP 的位置测试，距离 AP 1.85m 也就是  $d_0=1.85\text{m}$ ，测得的功率与发射功率一起便可算出参考  $\text{pathloss}_0$ 。

接着，有了理论计算结果，我们就可以在室外距离墙 1m 处多次测试，如下图：



这样，我们就得到了实际测量的信号强度  $X$  和理论计算得到的  $Y_k$ ，首先我们对于每个网格的  $Y_k$ ，通过下式计算出其与  $X$  拟合的最佳系数，以减小误差：

$$a_k = \arg \min_{a_k} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |X(n) - a_k Y_k(n)|^2 .$$

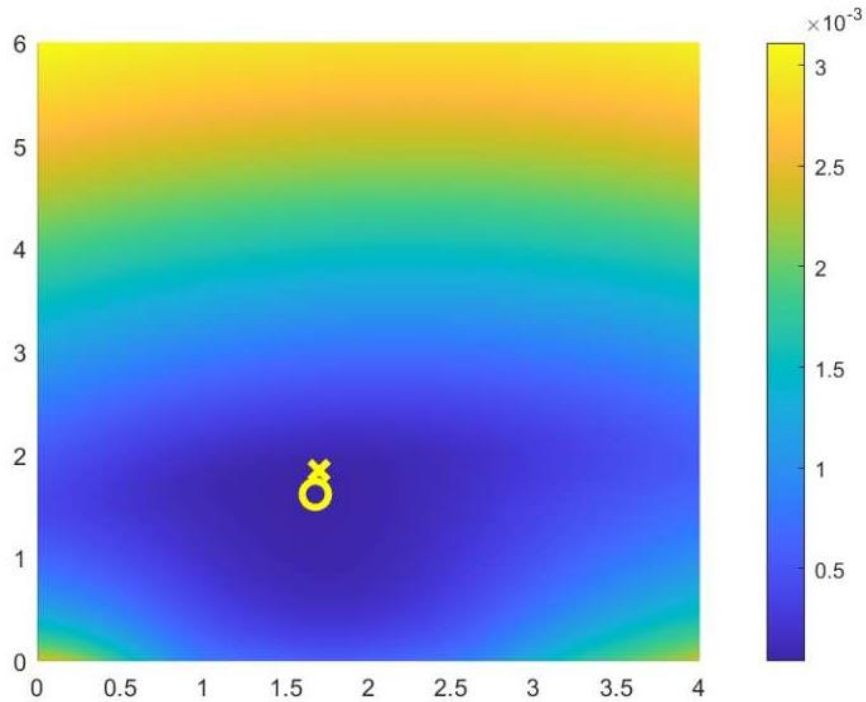
然后，使用  $a_k$  乘以  $Y_k$  作为第  $k$  个网格最接近  $X$  的值进行拟合，找出拟合误差最小的  $k$  即为 AP 最有可能的位置：

$$\hat{Y}_k(n) = a_k Y_k(n) .$$

$$E_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |X(n) - \hat{Y}_k(n)|^2 .$$

$$\hat{k} = \arg \min_k |E_k| .$$

我们将所测的数据带入到我们编写的代码中，就可以完成 RSS 定位过程，我们可以画出场地坐标图下不同位置处拟合误差  $E_k$  的值，通过 mesh 函数画出二维颜色图如下；



其中颜色表示  $E_k$  的大小，颜色越暗表示拟合误差越小，AP 处于



该位置的可能性越大，我们可以找出图中最小值处的位置，用圆圈标记，然后将实际的 AP 位置在图中用 X 标记，可以发现二者非常接近，这意味着实现的算法取得了成功。因此我们通过实验表明，即使使用全向天线也可以很好的得到定位效果。该过程实现的代码如下：

```

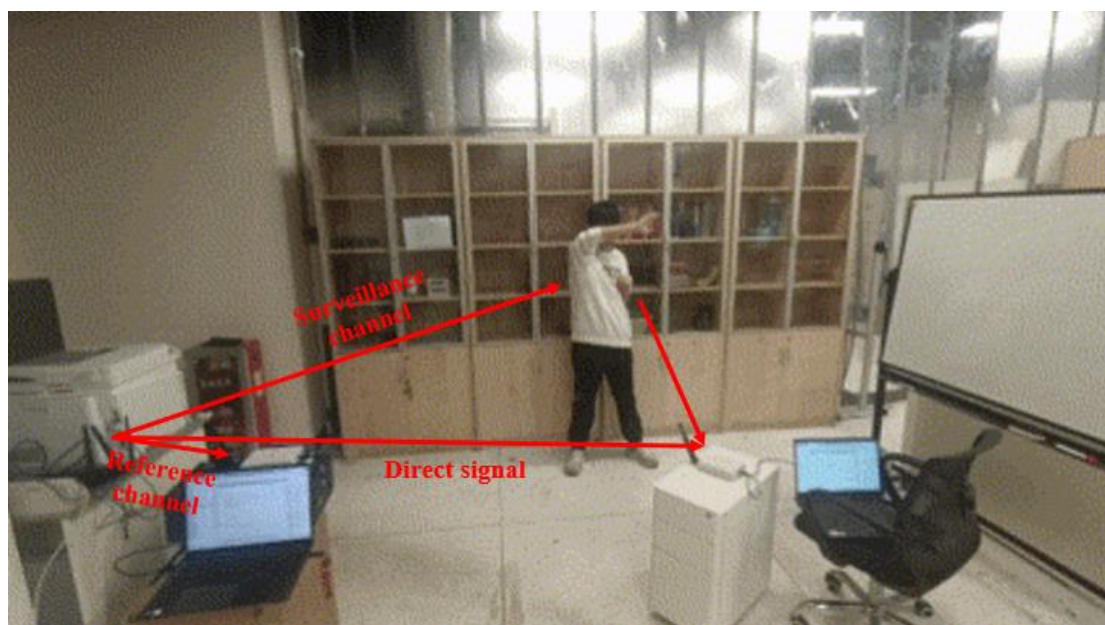
r = 800; % row
c = 800; % column
L = 6; % the length of the room
W = 4; % the width of the room
long = L/r; % the length of each grid
width = W/c; % the width of each grid
% The transmitted power in decibel
Pt = 0.687690664741878;
gama = 2;
PathLoss0 = 16.081463599820760;
d0 = 1.85;
X = [sqrt(0.0075),sqrt(0.0132),sqrt(0.0089),sqrt(0.00751),sqrt(0.00708),sqrt(0.00638)];
coord_x = 0.01*[21,21+122,21+122+78,21+122+78+88,21+122+78+88+39,21+122+78+88+39+63];
% The number of samples
sum_error = zeros(c,r);
fitting_error2 = zeros(c,r);
for li = 1:r
    for ci = 1:c
        d = sqrt((ci*width-coord_x).^2+((li*long+0.8))^2);
        Pr = 10*log10(Pt)-PathLoss0-10*gama*log10(d/d0);
        Yk = sqrt(10.^(Pr/10));
        ak = linspace(0.05,1.1,1000);
        fitting_error1 = zeros(1,length(ak));
        for j = 1:length(ak)
            fitting_error1(j) = 1/6*sum(abs(X-ak(j).*Yk).^2);
        end
        [m_a,k_a] = min(fitting_error1);
        a = ak(k_a);
        fitting_error2(li,ci) = 1/6*sum(abs(X-a*Yk).^2);
    end
end
step_x = width*(1:c);
step_y = long*(1:r);
[minValue, minIndex] = min(fitting_error2(:));
[row, col] = ind2sub(size(fitting_error2), minIndex);
figure;
mesh(step_x,step_y,fitting_error2,'CDataMapping','scaled');
colorbar
set(gca,'YDir','normal');
hold on
scatter3(1.7,d0,0.001,120,'x','y','LineWidth',3)
hold on
scatter3(row*long,col*width,0.001,120,'o','y','LineWidth',3)
hold off

```

## 4. 人体运动感知实验

### 4.1 实验环境

实验环境的搭建与上文中的实验环境一致，即使用两个 USRP 进行两个信道信号的接收。然后人在第二个 USRP 附近做动作，如挥手，敲击键盘等。如下图所示：



## 4.2 直射信号消除算法与实现

由上图可见，监视信道的接收机很容易收到 WIFI AP 的直射信号，因此我们必须采用一定的数据处理算法将监视信道接收机收到的信号中直射信号带来的影响消除，这里我们采用最小二乘的方法实现这个目标。接收到目标信号可以表示为：

$$\mathbf{U}_0 = [u_0(1), u_0(2), \dots, u_0(N)]^T$$

参考信道接收到的信号可表示为：

$$\mathbf{V}_0 = [v_0(1), v_0(2), \dots, v_0(N)]^T$$

因为到达监视信道接收机的信号是参考信号的若干个延时，因此我们可以将  $\mathbf{V}$  创建多个延时副本，构成一个矩阵，如下：

$$\mathbf{V} = [\mathbf{V}_0, \mathbf{V}_0(n-1), \dots, \mathbf{V}_0(n-P)]$$



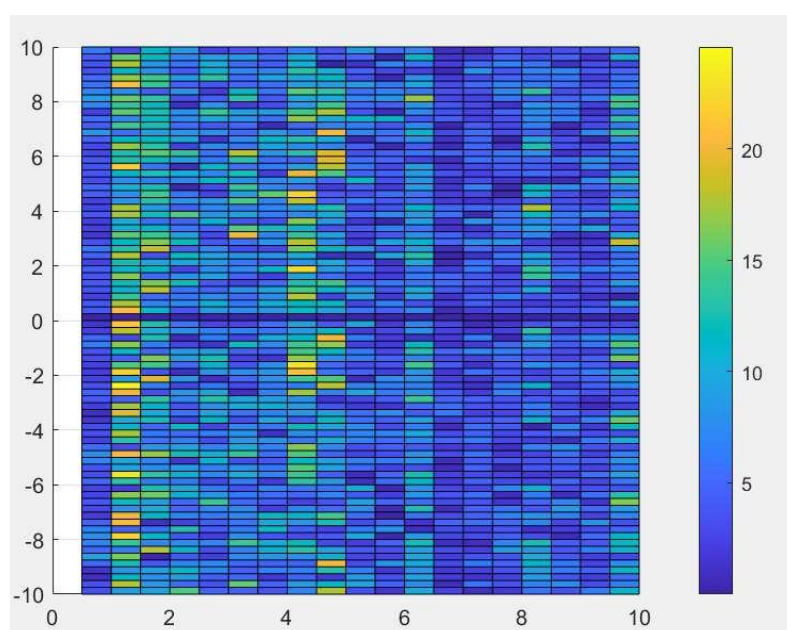
表示有  $P$  个延时副本。在程序中我们选择  $P=10$ 。因为  $U$  与  $V$  存在关系，也就是  $U$  与  $V$  并不完全正交，消除  $U$  中  $V$  的影响就可以认为是将  $U$  在  $V$  中投影消除，只保留  $U$  与  $V$  正交方向的投影量，这个过程可以通过最小二乘的方式实现，得到最小二乘权重矩阵：

$$\mathbf{W} = (\mathbf{V}^H \mathbf{V})^{-1} \mathbf{V}^H \mathbf{U}_0$$

将该矩阵与  $V$  相乘，即可得到  $U$  在  $V$  中的投影分量，用  $U$  减去该分量即可得到正交分量：

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_0 - \mathbf{V}\mathbf{W}$$

这样就可以有效消除直射信号的影响。该操作后一个显著的表现就是，多普勒零频附近的值都被消掉，表现出一道凹陷，以任一段信号为例：



但是，将零频附近的多普勒分量都消掉并不是一件很好的事情，这导致可能一些较为微弱的多普勒分量不会被捕捉到，因此将多段 CIT 的信号一起进行干扰消除比较好，这样既可以一定程度消除直射

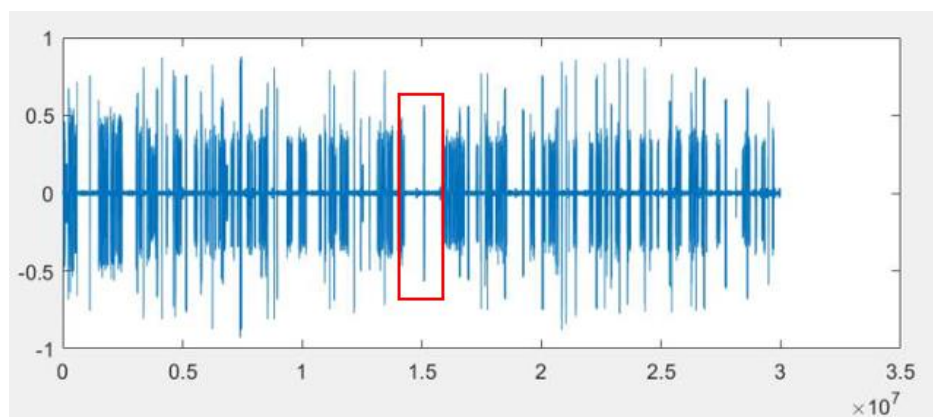
信号干扰，也可以减弱零频附近的信号消失。在后续的代码中，我们采用了两段 CIT 消除法。

该过程代码如下：

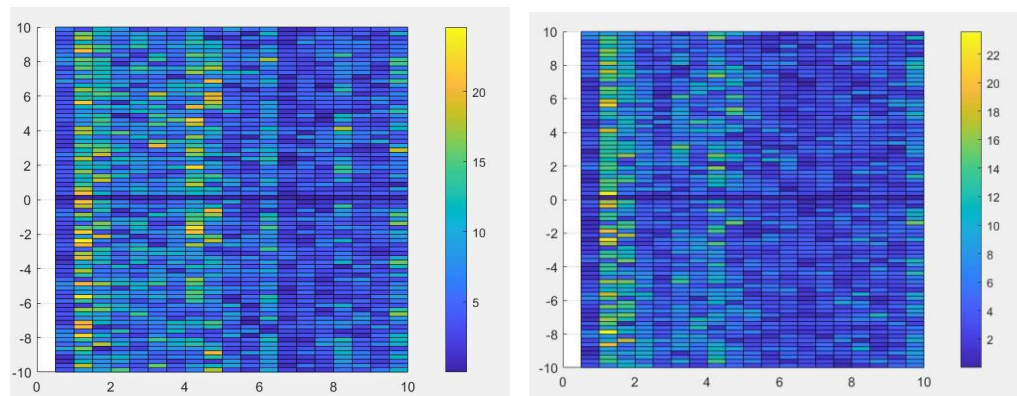
```
P = 10;
V = zeros(n_total,P);
for p = 1:P
    M = [zeros(1,p-1),ref_adjusted];
    V(:,p) = M(1:n_total);
end
W = (V'*V)\(V'*sur_adjusted);
U = sur_adjusted-V*W;
```

### 4.3 信标信号消除算法与实现

对实验结果影响较大的另一个因素就是信标信号，信标信号是指 WIFI AP 以一定频率（例如，10Hz）传输的周期性信号。这个信号通常用于网络中的设备进行同步和定位。在 2.4GHz 频段的 WIFI 信号中，信标信号可能占据整个信号的相当大的部分。在 WIFI 被动雷达测量中，信标信号的存在可能会导致在经过匹配滤波和多普勒处理后的多普勒-时间图中出现显著较高的噪声底线。因此，为了提高目标检测性能，我们希望从接收到的参考 WIFI 信号中移除信标信号。从我们接收到信号时域图中可以明显看到信标信号：



我们可以通过以下方式解决这个问题：选择一段 WIFI 数据传输间隙期间收集和存储信标信号的副本作为参考。在数据处理中，使用参考信标信号与接收到的 WIFI 信号进行交叉相关，并将相关峰值视为信标信号存在的位置。然后，通过将在检测到的信标信号持续时间内的数据设置为零来简单地移除信标。通过这种信标信号的移除，可以在多普勒-时间图中看到噪声底线显著降低，从而使一些较弱的信号更清晰地被检测到。以任一段信号为例，可以看到消除信标信号可以有效地减小底噪和可能的导致的错误干扰。



代码如下：

```
for i = 1:10
    sur_corr = xcorr(sursignal_adjusted,beacon_signal);
    symbol_corr = xcorr(symbol_adjusted,beacon_signal);
    [max_corr_sur, max_corr_index_sur] = maxk(sur_corr,1);
    [max_corr_symbol, max_corr_index_symbol] = maxk(symbol_corr,1);
    original_position_sur = max_corr_index_sur - length(sursignal) + 1;
    original_position_symbol = max_corr_index_symbol - length(symbolsignal) + 1;
    sursignal_adjusted(original_position_sur:original_position_sur+length(beacon_signal)-1) = 0;
    symbol_adjusted(original_position_symbol:original_position_symbol+length(beacon_signal)-1) = 0;
end
```

#### 4.4 多普勒-时间图谱绘制

该实验的最终目的就是画出多普勒频域与时间的关系图，仍然采用二维颜色图的来呈现，颜色表示了模糊函数  $R$  的大小，颜色越深，表示  $R$  约小，颜色越亮表示  $R$  越大。在实验中，我们采用 CIT 为 0.5s，

对于每个 0.5s 的信号我们可以计算出，不同频率和不同时延对应的模糊函数值  $R(f, \tau)$ ，选出最大值对应的一列将其筛选出来，最后将每个 CIT 形成的一列信号拼起来最终形成一个矩阵，命名为 doppler\_time，用来表征不同时间对应的多普勒信息，然后将该矩阵用颜色图 surf 或 mesh 绘制出来即可得到最终的多普勒-时间图谱。

计算 R 的方式有很多种，一是可以通过遍历的方式，分别遍历  $f$  和  $\tau$ ，得到 R，但这种方式对于较长的信号来说速度较慢。因此我们可以对此进行改进，观察到模糊函数的计算与 FFT 的计算公式存在一定的相似性，因此我们可以使用 FFT 计算这个过程，然后选出 FFT 中间的几列就是我们想要的结果，通过 FFT 计算得到结果的速度就快了很多，遍历求解与 FFT 求解的程序如下：

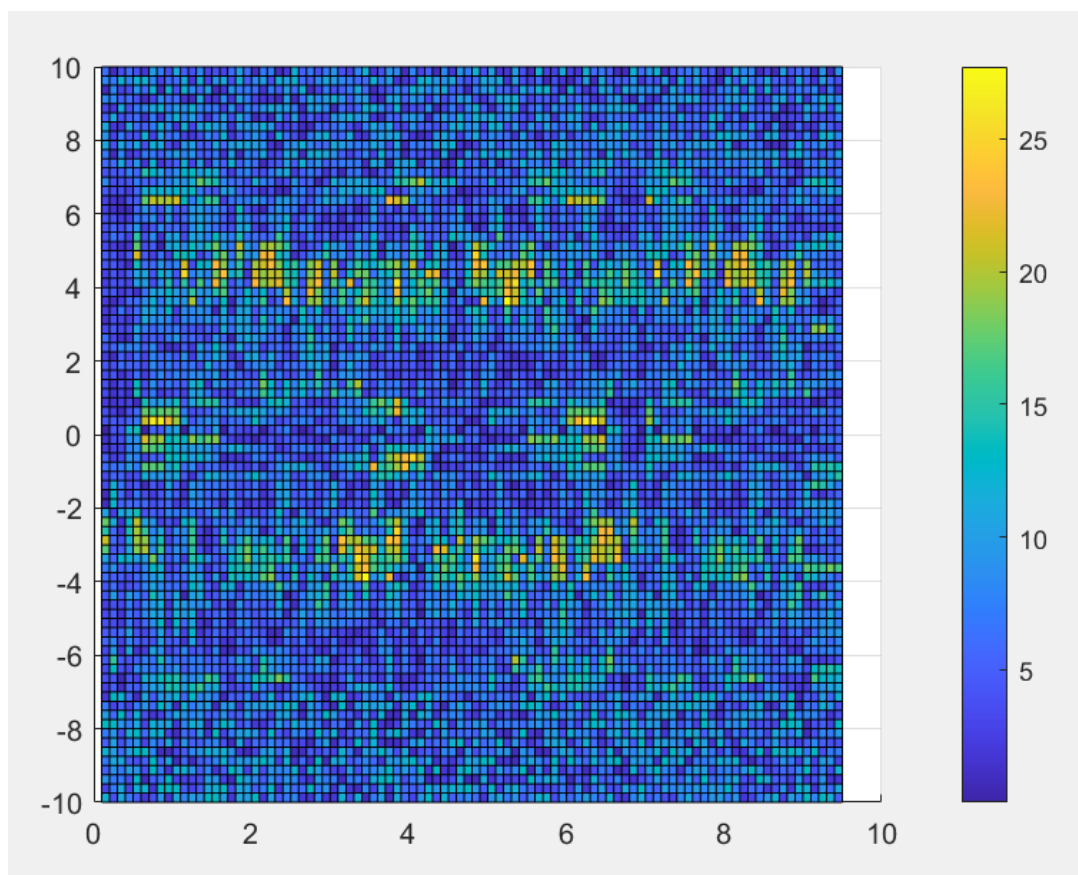
```
for n_tau = 0:6
    for n_fd = 1:length(fd)
        ref = [zeros(1,n_tau),symbolsignal_2];
        ref = ref(1:nn);
        COR(n_tau+1,n_fd) = sum(conj(ref).*sportsignal_2.*exp(-1j*2*pi*n*Ts*fd(n_fd)));
    end
end

for n_tau = 0:11
    ref = [zeros(1,n_tau),symbolsignal_2];
    ref = ref(1:nn);
    FFT(n_tau+1,:) = abs(fftshift(fft(conj(ref).*sportsignal_2)));
%     FFT(n_tau+1,:) = IAA(conj(ref).*sportsignal_2);
end
COR=FFT(:,(floor(-40+n_total/2+1):floor(40+n_total/2+1)));
```

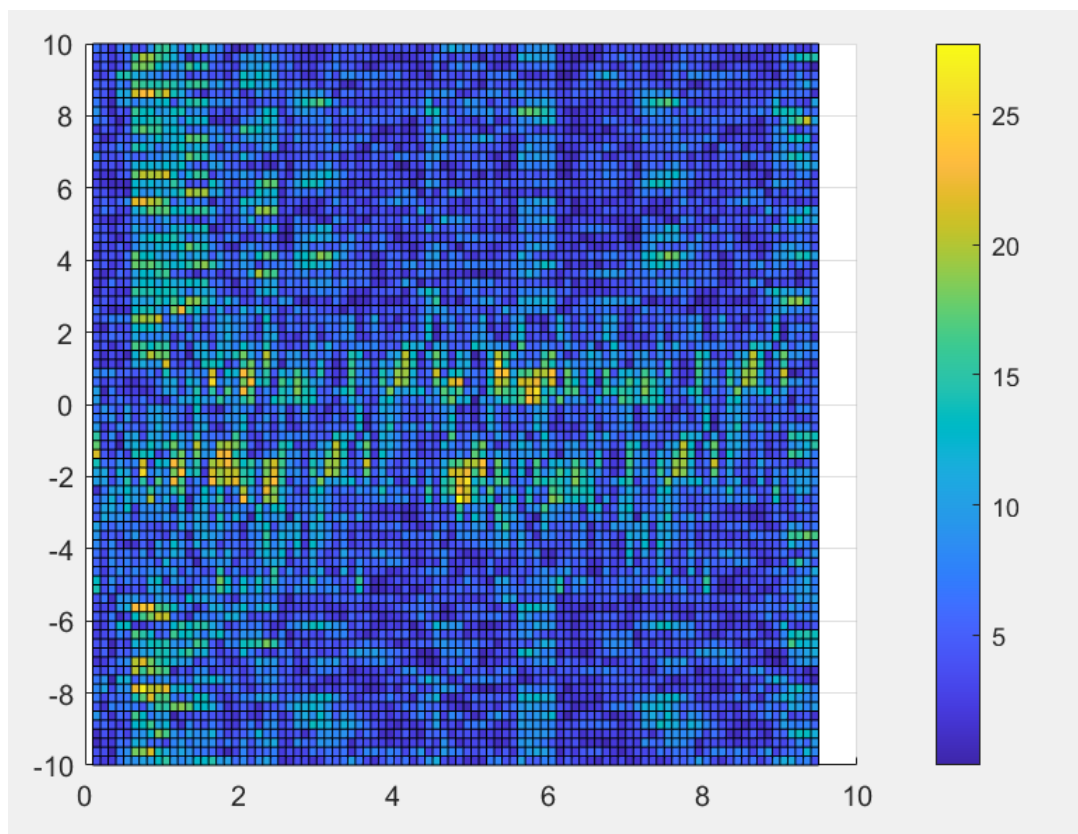
利用上述所有的信号处理算法，我们可以最终绘制出如下的多普勒-时间图：

挥手：

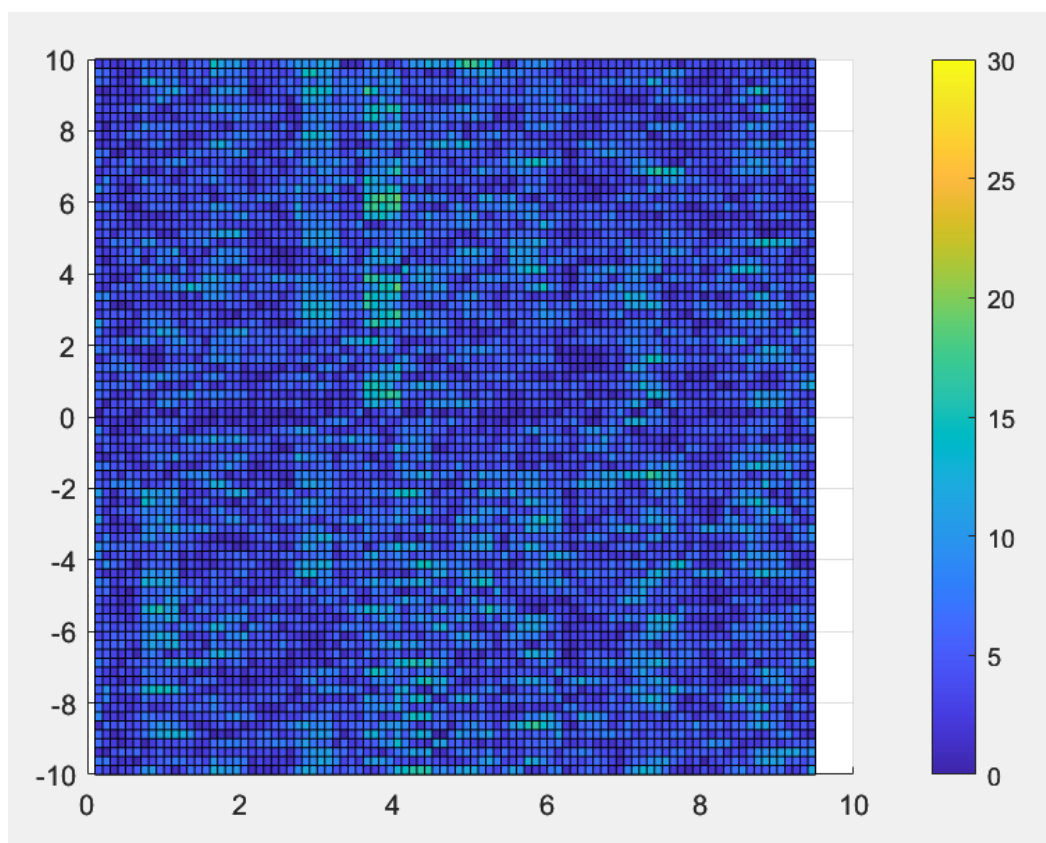




敲键盘



没有运动:



可见，由于硬件设备和测试条件的不优越，我们得到的结果并不完美，但依然可以看出不同的多普勒频移，可以较容易地区分不同动作以及没有动作的多普勒谱的差别。

## 5. 总结

本实验使用了 WIFI 信号进行人体运动感知，主要采用了被动雷达检测的方式。首先，我们使用 RSS 算法进行了 WIFI AP 的定位，实验结果表明，我们可以很好地估计出 AP 的位置，证明了算法的可靠性，并表明即使使用全向天线也可以很好地估计出 AP 位置，得到 AP 位置，有利于 WIFI 感知的进行。然后我们通过搭建实验环境，进行了实物实验，采用两个 USRP 设备接收两个信道信号，并对获得的信

号就行处理，包括消除直射信号影响和消除信标信号影响。由于硬件设备的限制，最终得到的多普勒时间图并不完美，但依然可以看出不同动作对应不同的多普勒谱，可以简单地根据多普勒谱来区分不同动作和是否有动作。未来，可以继续改进实验设备，并进行更细致的多普勒检测。另外，通过实验可以发现，WIFI 感知十分受限于环境，对于普通的硬件设备依然很难做到完美的结果，不可避免地受到其他信号的干扰，呈现出对环境的不鲁棒性，所以 WIFI 感知或许还有很长的路要走。

## 参考文献

- [1] H. Sun, L. G. Chia and S. G. Razul, "Through-Wall Human Sensing With WiFi Passive Radar," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 57, no. 4, pp. 2135-2148, Aug. 2021, doi: 10.1109/TAES.2021.3069767.
- [2] W. Li, R. J. Piechocki, K. Woodbridge, C. Tang and K. Chetty, "Passive WiFi Radar for Human Sensing Using a Stand-Alone Access Point," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, no. 3, pp. 1986-1998, March 2021, doi: 10.1109/TGRS.2020.3006387.
- [3] W. Li et al., "A Taxonomy of WiFi Sensing: CSI vs Passive WiFi Radar," 2020 *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps, Taipei, Taiwan, 2020*, pp. 1-6, doi: 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367546.
- [4] W. Li, B. Tan and R. Piechocki, "Passive Radar for Opportunistic Monitoring in E-Health Applications," in *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, vol. 6, pp. 1-10, 2018, Art no. 2800210, doi: 10.1109/JTEHM.2018.2791609.