

利用走廊中WiFi的复值CSI进行多普勒频移测量

杨丹丹, 王涛, 孙燕姿, 吴雅婷

特种光纤和光接入网的关键实验室

特种光纤和先进通信国际联合研究实验室 上海大学先进通信和数据科学研究所。

中国上海

电子邮件: yangdd03@126.com, twang@shu.edu.cn, yanzansun@shu.edu.cn, ytwu@shu.edu.cn

摘要

本文介绍了一种基于WiFi的信道状态信息(CSI)测量室内多普勒频移(通常被忽略)的新方法。我们的方法是基于这样一个事实,即由市面上的测量工具提供的CSI是复值的,因此CSI的快速傅里叶变换(FFT)不是共轭对称的。在建立了CSI采集系统后,我们在理论推导的指导下对不同走廊情况下的CSI数据进行处理,最后得到不同相对运动的多普勒频移。我们的结果表明,这种测量多普勒频移的方法可以应用于基于WiFi的人群计数或人类活动识别的进一步研究。

关键词-WiFi; 室内; 多普勒频移; CSI

I. 简介

近年来,无线技术趋于成熟,越来越多的学者开始关注使用无线信号的各种应用。拥有广泛安装的基础设施的WiFi因其感知人体所带来的信道变化的能力而引起了人们的极大兴趣。

利用WiFi信号的传输特性,如接收信号强度指示器(RSSI)和信道状态信息(CSI),可以捕获环境的变化[1]。这为入侵检测、人群计数、活动识别等铺平了道路。与其他基于射频的系统如蓝牙、超宽带(UWB)和雷达相比,基于WiFi的系统具有覆盖面广、配置简单和成本低的优势。

一般来说,基于WiFi的系统可以被分为基于设备的方法和无设备的方法。在本文中,我们考虑无设备的方法,因为目标不需要携带某些设备访问特定的网络,所以这种方法越来越受欢迎。特别是,RSSI[2-3]或CSI[4-8]被用来测量WiFi信号的变异。一方面,RSSI很容易获得,并已被广泛用于基于WiFi的室内定位[9]。然而,由于多径衰落[10-11],它的性能急剧下降,这给基于RSSI的系统带来了困难。另一方面,CSI可以描述信道频率响应

基于正交频分的每个子载波的

多路复用(OFDM),它的稳定性要好得多。不仅是与RSSI相比,CSI提供了更稳定和可靠的振幅信息,CSI也显示了相位信息。更多的CSI-

随着为英特尔WiFi卡5300开发的驱动程序的发布,基于WiFi的应用已经被提出[12]。

本文提出了一个基于CSI的测量室内多普勒频移的无设备系统。值得注意的是,现有的基于CSI的系统只取CSI值的振幅进行后续数据处理。例如,[4]用CSI振幅的扩张矩阵(即复数值CSI的绝对值)测量WiFi变异。[6]也是通过CSI振幅的快速傅里叶变换(FFT)获得多普勒频谱,[12]通过计算基于CSI振幅的路径长度建立了一个基于CSI的速度模型。在以前的实验中,我们观察到CSI的FFT(实际上是复值)不是共轭对称的,所以它可以更直接、更有效地揭示被探测物体的速度。基于这一观察,我们成功地测量了包含运动速度和方向的室内多普勒频移,以便进一步进行人体检测。

本文的其余部分组织如下。第二节从理论上分析了基于CSI的多普勒频移测量的原理。第三节建立了CSI采集系统,随后在第四节进行了数据处理。在第五节中,在一个走廊上进行了实验,以验证理论分析的有效性。第六节是本文的结论。

II. 理论分析

本节将讨论利用CSI进行多普勒频移测量的原理。为了便于读者理解,下文中使用的重要符号定义和含义列于表I。

假设一个发射器和一个接收器在某一瞬间相距 d 。如图1所示,发射器正在持续广播WiFi信号,而接收器正以速度 v 移动。因此,WiFi信号通过一个时变和多径信道到达接收器。假设总共有 L 条独立的路径,图1显示了其中的两条路径,其中 θ_l 表示第 l 条路径的到达方向与接收器的移动方向之间的角度。

作为信道响应,在时间瞬间 nTs 收集的 第 k 个子载波的CSI可以表示为:

$$h_k(nT) = \sum_{l=1}^L \Delta e^{-j\phi_l} e^{j2\pi f_c nT} H_k$$

其中 v_l 可以表示为：

$$v_l = v \chi \cos \theta_l \quad (2)$$

可以很容易地注意到，当接收器远离发射器时， v_l 是一个负值，否则，它是正值。

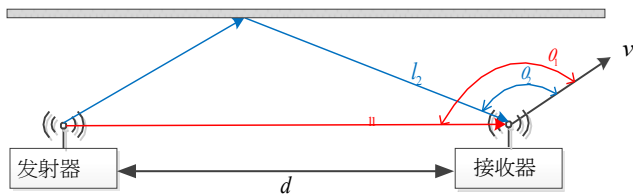


图1.所考虑的发射器-接收器链路的图示。

表1. 符号定义和物理意义。

符号定义	物理意义
k	子载波数量（共30个子载波）
T_s	CSI采样的时间间隔
l	路径数（假设总共有 L 条路径）。
α_l	第 l 条路径的振幅
ω_k	第 k 个子载波的角频率
d_l	第 l 条路径的长度
c	电磁波的速度(3×10^8 m/s) ⁸
v_l	接收者在第 l 条路径上的速度投影
ϵ_k	第 k 个子载波的测量误差

由于802.11n协议的工作频率为2.4GHz至2.4835GHz [13]，这里我们假设WiFi信号在通道1上发送，即子载波的频率从2.4GHz。根据802.11n协议，20MHz信道内有56个子载波，实验中使用的市售CSI工具可以收集56个子载波中30个的CSI测量值。此外，这30个子载波被分配在[2.4Hz z]频段。

$$f_k = 2.4 + k \Delta f, \quad k = 1, 2, \dots, 30, \quad (3)$$

其中 Δf 是子载波之间的频率差，相当于 6.7×10^{-4} GHz，与2.4GHz相比相当小。

对于第 k 个子载波，多普勒频移频率为 ω_k ，大约等于

$$\omega_k = 2\pi f_k = 2\pi v_l \xi \cdot 2.4 \times 10^9 \frac{v_l}{c}, \quad (4)$$

因为 f_k 对于不同的子载波几乎是一样的。基于上述观察，我们对所有30个子载波的CSI进行平均，得到。

这也有利于信号的去噪。

得到 $h(nT_s)$ 的FFT。

$$\bar{H}(m) = \frac{1}{30} \sum_{k=1}^{30} \Lambda \alpha_k e^{j \omega_k n T_s} + \frac{1}{30} \sum_{k=1}^{30} \Lambda Z_k, \quad (6)$$

其中 E_k 是 Z_k 的FFT，我们定义 $\alpha_{l,m}$ 为。

$$\alpha_{l,m} = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j 2\pi \left(\frac{m}{N} \right) n}, \quad (7)$$

那么（6）可以表示为：

$$\bar{H}(m) = \frac{1}{30} \sum_{k=1}^{30} \Lambda \alpha_k e^{j \omega_k n T_s} + \frac{1}{30} \sum_{k=1}^{30} E_k, \quad (8)$$

当满足以下公式时， $\alpha_{l,m}$ 的绝对值将得到最大。

$$f T_s - \frac{m}{N} = \pi, \quad p \in \mathbb{Z}, \quad (9)$$

即 $f = \frac{m}{N T_s} + \frac{\pi}{T_s}$ （ p 的值与范围有关

的 m ）。在这个条件下， $\left| \bar{H}(m) \right|$ 可以达到最大

值， f_i

是所需的多普勒频率。我们将在下面的章节中展示基于上述原理的多普勒频移频率的测量过程。

III. 数据采集

CSI可以被认为描述30个子载波的振幅和相位的信道响应，这使得它的粒度更细、更稳定。为了远程获得CSI值，我们建立了一个CSI采集系统，如图2所示。笔记本电脑1被放置在测试空间之外，作为系统的总控制台，而笔记本电脑2和WiFi路由器被放置在测试空间内。放在里面，以收集CSI值。该布局可以避免人的操作对无线信道的干扰。

笔记本电脑1。Laptop1通过TCP/IP协议接收Laptop2获得的CSI值，并用Matlab进行数据处理。

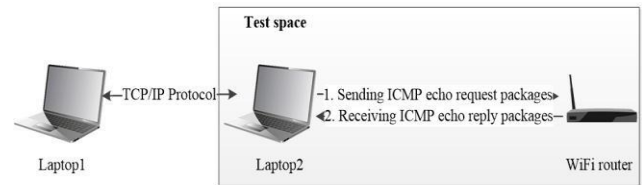


图2.我们的CSI采集系统。

我们系统中配置的硬件和软件见表2和图3。2和图3。

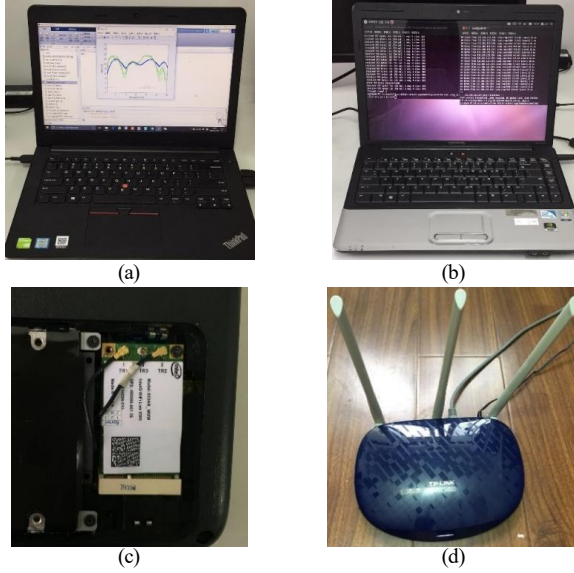


图3.设备。

表二： 硬件和软件配置。

标签	硬件设施	软件	图
Laptop1	ThinkPad E470	Matlab 2016a	图3 (a)
Laptop2	HP Presario CQ40, 英特尔Wi-Fi 5200	Ubuntu 11.04. Linux 802.11n, CSI工具	图3(b)(c)

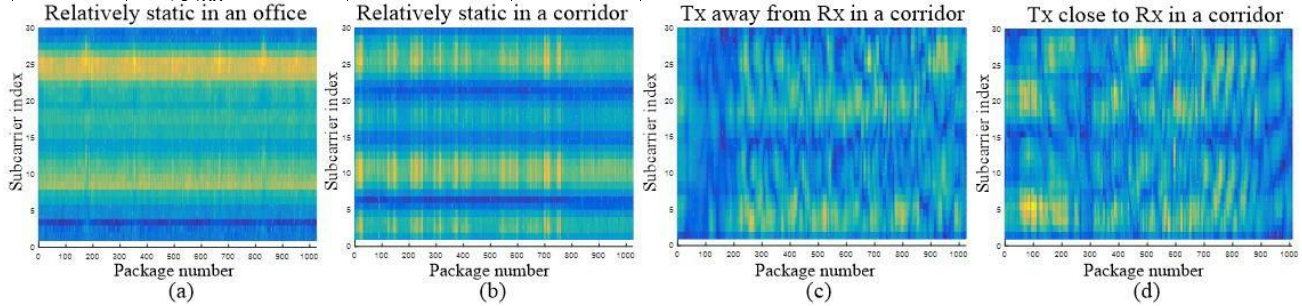


图4.不同信道环境下的CSI振幅。

根据第二节的理论分析。

多普勒频率可以通过以下两个步骤获得。

- 1) 我们的系统总共可以支持 $3 \times 3 = 9$ 个链接，我们选择第一项，并对每一列进行平均。

$$h^1 = \begin{bmatrix} h_{1,1}^1 & \dots & h_{1,30}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{30,1}^1 & \dots & h_{30,30}^1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 h^1 是所有30个子载波的CSI平均值。

第 j 个包和第1个链接。

标签	硬件设施	软件	图
无线网络	TP-Link TL-WR886N	/	图3(d)

IV. 数据处理

由于CSI采集系统是一个多输入多输出（MIMO）系统，假设有 M 个发射天线和 N 个接收天线，那么有 N 个 $h_{ch} = M \times N$ WiFi链路。在每个链路中，56个子载波中的30个被采样，随着时间的推移，包的数量会增加。第 n 个链路的CSI值可以表示为一个 $30 \times p$ 的复数矩阵。

$$H^n = \begin{bmatrix} h_{1,1}^n & \dots & h_{1,30}^n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{30,1}^n & \dots & h_{30,30}^n \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 $h_{i,j}^n$ 是第 j 个子载波中的CSI值，第 n 个包和第 n 个链接。如图4所示，我们可以观察到，不仅不同的多径传播情况会导致CSI值的变化（从图4（a），（b）），而且发射器和接收器之间的不同相对运动也会导致CSI振幅的巨大变化（从图4（c），（d））。

- 2) 在大小为 W 的滑动窗口上计算平均CSI值的FFT

$$H^1(j) = \left| \frac{1}{W} \sum_{k=j_0}^{j_0+W-1} h_{k,j}^1 \right|, k = 1, 2, \dots, W \quad (12)$$

随后，我们可以得到一个包含多普勒频率的矩阵。

$$\overline{H^1(j_0)} = \begin{bmatrix} H_1^1(j_0) & \dots & H_k^1(j_0) & \dots & H_W^1(j_0) \end{bmatrix} \quad (13)$$

具有最大振幅的频率是所需的多普勒频率。

V. 实验结果

在这一节中，我们进行实验来验证第二节中理论推导的正确性。

实验是在一个走廊（3米×10米）进行的，如图5所示。WiFi路由器是Tx，笔记本电脑2是Rx，如图中标示。在整个实验过程中，Rx可以在图中的位置（距离Tx 10米）和Tx之间移动。笔记本电脑1，数据处理中心，被固定在测试区域外1米处，以便与笔记本电脑2进行稳定的TCP/IP传输。

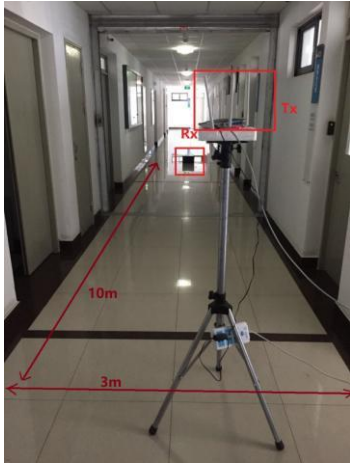


图5. 实验场景。

实验中对3种情况下的多普勒频率进行了测量。

- 情况1：Tx和Rx保持静态，如图5所示。
- 案例2：Rx（由一个人持有）以大约1米/秒的速度向Tx移动。
- 案例3：从Tx的位置开始，Rx（由一个人持有）以大约1米/秒的速度移动。

考虑到CSI的采样率和每个案例的持续时间，我们截取了每个案例的512个包，然后得到3个CSI矩阵（ 30×512 ）。每个矩阵按照第四节的步骤进行处理，滑动窗口 W 的大小为512。最终结果如图6所示。

理论上，当相对运动速度为1m/s时，可以计算出WiFi信号的多普勒频移约为8Hz。当接收器离发射器比较近时，多普勒频率为正，否则为负。

图6(a)显示，当通道相对稳定时，振幅的分布几乎是均匀的。

1.图6(b)显示，当Rx靠近Tx时，正向部分的振幅一般高于负向部分，在7.324Hz达到最高，这是多普勒频率要求，与理论结果8Hz基本一致。而在情况3中，当Rx远离Tx时，如图6(c)所示，与情况2相反，负部分要高得多，它在-8.887Hz达到最高，也接近推断的-8Hz。

比较图6(b)和图6(c)，可以看出，情况3的振幅一般要比情况2高。

而在情况3中，正数部分和负数部分之间的差距更加明显。原因可能是较高的信噪比，因为一开始Tx和Rx之间的距离较短，这意味着噪声较小。

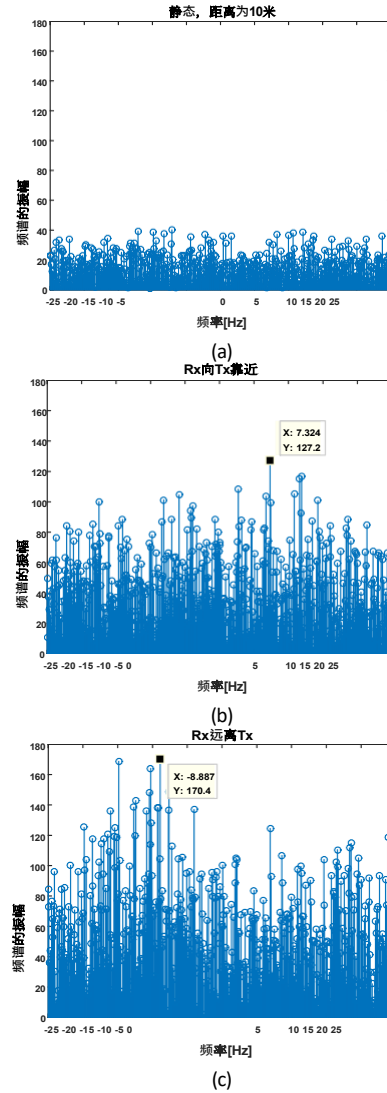


图6.三个案例的频谱图。

VI. 总结

本文提出了一种利用WiFi测量室内走廊的多普勒频移的方法，并从理论上分析了基于CSI的多普勒频移测量原理。利用我们建立的CSI采集系统，在一个走廊里进行了三个案例的实验，结果证明了理论分析的有效性。本文提出的方法可以帮助测量包含速度和方向的真实多普勒频率，它可以应用于相关的人类检测。

判决

这项工作得到了NSFC 61671011, 61401266, 61501289的支持。

参考文献

- [1] E.Cianca, M.D. Sanctis and S.D. Domenico, "Radios as Sensors", *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, vol. 4, no. 2, pp.363-373.
- [2] T.Yoshida和Y. Taniguchi, "估计室内环境中使用现有wifi接入点的人数", 在第六届欧洲计算机科学会议 (ECCS '15) 论文集中, 第46-53页。
- [3] S.Depatla, A. Muralidharan and Y. Mostofi, "Occupancy Estimation Using Only WiFi Power Measurements", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, vol. 33, no. 7, pp.1381-1393.
- [4] W.Xi, J. Zhao, X.Y. Li, K. Zhao, S. Tang, X. Liu and Z.Jiang, "电子蛙眼。使用WiFi计算人群", 在IEEE INFOCOM 2014, 第361-369页。
- [5] S.D. Domenico, G. Pecoraro, E. Cianca, and M. D. Sanctis, "Train-once device-free crowd counting and occupancy estimation using WiFi:A Doppler spectrum based approach." in 2016 IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), pp.1-8.
- [6] <Wang, K. Wu, and L. M. Ni, "WiFall Device-Free Fall Detection by Wireless Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16, no. 2, pp.581-594, 2017.
- [7] W.Wang, A. X. Liu, M. Shahzad, K. Ling, and S. Lu, "Device-Free Human Activity Recognition Using Commercial WiFi Devices, " *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no.5, 2017, pp.1118-1131.
- [8] D.Zhang, H. Wang, and D. Wu, "Toward Centimeter-Scale Human Activity Sensing with Wi-Fi Signals," *Computer*, vol. 50, no.1, 2017, pp.48-57.
- [9] C.Feng, W. S. A. Au, S. Valaee, and Z. Tan, "Received-Signal-Strength-Based Indoor Positioning Using Compressive Sensing," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, no. 12, 2012, pp.1983-1993.
- [10] C.Wu, Z. <ang, <.Liu, and W. Xi, "WILL Wireless Indoor Localization without Site Survey," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 24, no.4, 2013, pp.839-848.
- [11] H.Lim, L. C. Kung, J. C. Hou, and H. Luo, "Zero-Configuration, Robust Indoor Localization:理论和实验". *IEEE INFOCOM 2006*, pp.1-12.
- [12] D.Halperin, W. Hu, A. Sheth, and D. Wetherall, "Predictable 802.11 packet delivery from wireless channel measurements." in *ACM SIGCOMM 2010 Conference*, Vol.40, no.4, pp.
- [13] IEEE标准802.11n-2009。增强了更高的吞吐量。