

Wi-Fi雷达：从RSSI到CSI

杨 铮 刘云浩
清华大学

关键词：RSSI CSI 无线感知

编者按：在本文中，清华大学杨铮和刘云浩介绍了一种利用普通无线设备实现环境感知的技术。通过分析无线信道状态信息，实现了被动式人员检测，包括识别人的位置、姿势、动作以及其他环境特征，可以应用于室内定位、安全监控、针对老人和小孩的家庭医疗监护、新型人机交互方式等。本年度ACM MobiCom 将大会唯一最佳论文奖授予刘云浩团队的基于信道状态信息的无线定位工作，该工作使用的正是本文所介绍的技术。

背景

无线电信号不仅可以用于传输数据，还可以用来感知环境。在室内环境下，信号发射机产生的无线电波经由直射、反射、散射等多条路径传播，在信号接收机处形成多径叠加信号。多径叠加信号受其传播物理空间的影响，携带反映环境特征的信息。这里所说的环境是信号传播的物理空间，既包括人的因素（是否有人以及人的位置、特征、姿势、动作等），也包括其他外物的因素。

将无线电用于环境感知并不新奇。典型的应用包括探测空间中飞行器的雷达系统，通过分析无线电信号（即雷达发射的无线电波经飞行器反射后回到雷达天线或飞行器自身发出的无线电波），判断飞行器的出现、种类

以及一系列运动信息。近些年，也出现了采用超宽带 (Ultra-Wide Band, UWB) 信号的室内雷达系统。然而，这些技术依赖特殊设计的信号或硬件设备以获得更高的时间分辨率以及更准确的测距，适用于军用警用等特殊场景，难以应用于普通人的日常生活。

另一方面，人们日常生活中越来越需要环境感知技术。以被动式人员检测为例，可以广泛应用于安全监控、入侵者检测、针对老人和小孩的家庭医疗监护、新型人机交互方式等等。“被动式”在这里指的是被检测人员不需要携带任何电子设备，用以区别传统无线定位系统通过定位人所携带的电子设备来定位人员，这种方式也被称作设备无关的 (device-free) 或者非侵入式的 (non-invasive)。如果为此目的部

署专用的传感器，一般能达到较好的效果；若能利用广泛部署的Wi-Fi基础设施实现这些功能，将在成本、易用性、普适性等方面取得重要突破，但无疑更具有挑战性。这种方式不需要人员携带传感器，甚至不需要传感器，有别于我们所熟悉的无线传感网中，传感器负责感知而无线信号负责通信。

尽管Wi-Fi基础设施在全球范围内已经广泛普及，但相对于专用雷达信号甚至超宽带信号，Wi-Fi信号带宽较窄，时间分辨率低，在信号处理设备上也存在较大差距。因此亟须突破传统雷达技术，研发基于Wi-Fi环境感知理论与技术，在普通商用Wi-Fi设备上实现高精度的环境感知。Wi-Fi和雷达都不是新鲜事物，但二者结合在一起还是首

次,天雷勾动地火,在移动计算领域碰撞出创新的火花。“无线感知(wireless sensing)”、“非传感器感知(sensorless sensing)”、甚至“射频断层扫描成像(radio tomography imaging)”都是研究者赋予这个研究方向的名称,目前尚无统一的压倒性意见。本文暂且采纳无线感知以及“Wi-Fi 雷达”这个形象的说法,所表达的意思都是**利用无线信号感知环境**。

自2010年开始,麻省理工学院、华盛顿大学、斯坦福大学、杜克大学、香港科技大学、西安交通大学、清华大学等在ACM SIGCOMM, ACM MobiCom, IEEE INFOCOM, *IEEE Trans. on Mobile Computing*, *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*等计算机网络和移动计算领域著名学术会议和期刊上发表了多篇相关的论文,做了许多有益的尝试,但在理论基础和应用深度上还处于不断探索中。

从RSSI到CSI

既然无线信号在传播过程

中“调制”了环境信息,那么如何从接收信号中“解调”这些环境信息呢?举个简单的例子,如果手机接收到的Wi-Fi信号较弱,可能是由于手机距离无线路由器较远;而如果手机接收到的Wi-Fi信号强度骤降,很可能是由于手机进入了某些特定的封闭空间如电梯等。用接收信号强度推断接收机与发射机的距离或表征接收机的位置特点是传统无线感知采用的重要方法之一。近二十年里也涌现出了大量利用信

号强度信息感知环境特征的应用,其中较具代表性的是基于**接收信号强度指示**(Received Signal Strength Indicator, RSSI)的无线室内定位。

由于RSSI的强弱在一定程度上反映了信道质量的好坏,众多无线通信技术如RFID, FM, GSM, Wi-Fi, ZigBee等均可在终端设备上获取RSSI信息,以根据当前信道质量调整通信策略。在无线感知领域, RSSI的普适性使其广泛应用于室内无线定位、

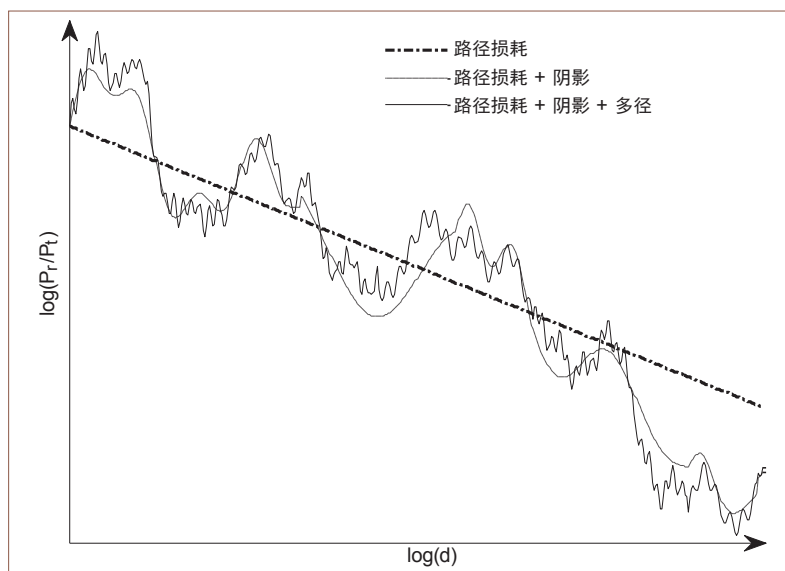


图1 多径传播环境下接收功率随传播距离变化示意图

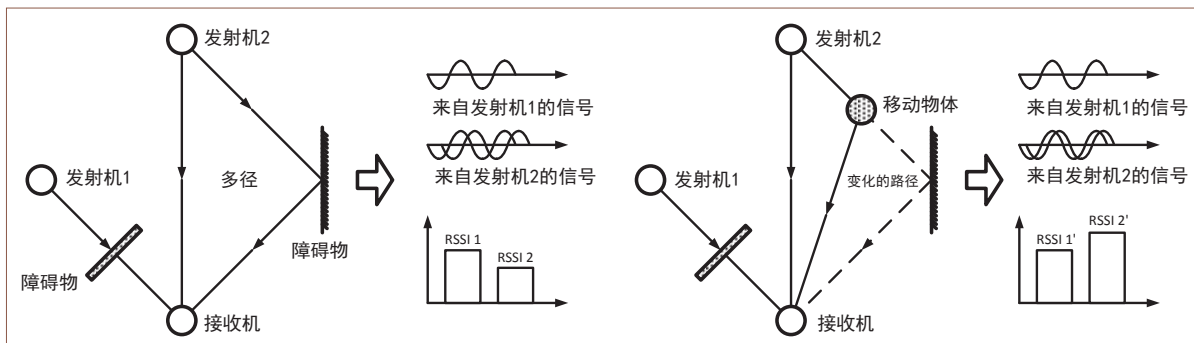


图2 不同多径叠加环境导致基于RSSI的**无线指纹**变化

被动式人员检测等移动计算应用。理论上,可将RSSI代入无线信号传播模型以估算信号传播距离,也可把RSSI作为特定地点的无线信号特征“指纹”,还能通过RSSI的波动推断是否有人或其他障碍物阻挡无线链路。但在室内环境中,RSSI会因信号多径传播引起的小尺度阴影衰落而不再随传播距离增加单调递减,从而限制测距精度(图1)。多径传播也会导致RSSI幅度波动,在典型实验室环境下,一台静止的接收机在1分钟内接收到的RSSI可能出现5dB的波动^[1]。这种多径传播造成的RSSI波动也会导致定位时无线信号指纹错误匹配(图2)。

制约RSSI稳定性和可靠性的根本因素是:RSSI测量的是信号多径传播的叠加效果,并不能逐一区分多条信号传播路径。为刻画多径传播,无线信道通常用信道冲击响应(Channel Impulse Response, CIR)建模。在线性时不变的假设下,CIR可表示为:

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^N a_i e^{-j\theta_i} \delta(\tau - \tau_i)$$

其中, a_i, θ_i, τ_i 分别为第 i 条路径的幅度衰减、相位偏移和时间延迟, N 为传播路径总数, $\delta(\tau)$ 为狄拉克脉冲函数。式中的每一项从时域上表示了一条传播路径的幅度、相位和时延。由于多径传播在频域上表现为频率选择性衰落,因而也可通过信道频率响应(Channel Frequency Response, CFR)

刻画多径传播。CFR包括幅频响应和相频响应。在无限带宽的条件下,CFR和CIR互为傅里叶变换。

精确测量CIR/CFR通常需要专业信道测量仪器,例如网络矢量分析仪。而自2010年以来,研究人员通过修改固件^[2],使得在普通Wi-Fi设备上也能以信道状态信息(Channel State Information, CSI)的形式获取一个采样版本的CFR。具体而言,利用兼容IEEE 802.11a/g/n的无线网卡即可从每个接收数据包中获取一组CSI,每组CSI代表一个正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplex, OFDM)子载波的幅度和相位:

$$H(k) = \|H(k)\| e^{j\angle H(k)}$$

其中, $H(k)$ 表示第 k 个子载波的CSI, $\|H(k)\|$ 和 $\angle H(k)$ 分别为第 k 个子载波的幅度和相位。因此,一组CSI信息 $\{H(k)\}_{k=1}^K$ 是以子载波频差为频率采样间隔,对Wi-Fi带宽内的CFR的 K 个离散采样值。通过修改固件的方式^[2],普通Wi-Fi设备可以获得30个正交频分复用子载波上的CFR采样。如果能够使用商用软件无线电设备(software-defined radio),可以获得更精确的CSI信息,提取全部56个正交频分复用子载波上的均匀CFR采样。不同于上述思路,麻省理工学院研发了基于分析Wi-Fi反射信号的感知技术,但目前还不能在普通商用Wi-Fi设备上实现。

RSSI与CSI对比

与RSSI相比,CSI在一定程度上刻画了多径传播。因此,CSI可以暂时看作是RSSI的升级版本。由于RSSI只反映了多径叠加的总幅度,我们可以形象地把RSSI比作一束白光,那么CSI即可看作以正交频分复用为棱镜色散出的光谱,每一束单色光(对应正交频分复用中不同的子载波)都呈现了不同频率下多径传播的幅度和相位。由于CSI作为物理层信息,包含了诸多介质访问控制(Medium Access Control, MAC)层不可见的信道信息。一方面,CSI可从一个数据包中同时测量多个子载波的频率响应,而非全部子载波叠加的总体幅度响应,从而更加精细地刻画频率选择性信道。另一方面,CSI既可测量每个子载波的幅度,还可测量每个子载波的相位信息。CSI将单值的RSSI扩展至频域,并且附加了相位信息,从频域上为无线感知提供了更为丰富、细粒度的信道状态信息。由于CIR与CFR互为傅里叶变换,CSI使得普通Wi-Fi设备在一定程度上能够从时域上粗略地区分传播路径,从而为基于视距路径的应用提供了更准确的视距能量估计值。

从RSSI到CSI,带来的不仅是信道信息容量的扩充。通过利用恰当的信号处理技术,CSI对于不同的传播环境可呈现不同的子载波幅度和相位特征;而对

频域??

表1 RSSI与CSI的特性比较

类别	RSSI	CSI
网络层次	MAC层	物理层
时间分辨率	数据包尺度	多径信号簇尺度
频率分辨率	无	子载波尺度
稳定性	低	高(CSI整体结构)
普适性	几乎所有Wi-Fi设备	部分Wi-Fi设备

于相同的传播环境, CSI 的整体结构特征则可能保持相对稳定。与传统 RSSI 中简单子载波幅度相加的处理方式不同, 通过综合应用信号处理和机器学习技术, 我们可以从 CSI 中合理提取更为精细且鲁棒的信号特征, 从而在时域和频域上感知更细微或更大范围内的环境信息, 提升 Wi-Fi 信号对环境的感知能力。由于 CSI 与 IEEE 802.11a/g/n 协议兼容, 利用普通无线网卡和开源的固件即可获取 CSI 信息。虽然与 RSSI 相比, 目前 CSI 的获取受限于使用 OFDM 技术的 Wi-Fi 协议以及支持开源固件网卡, 然而 Wi-Fi 网络和设备在室内环境的普遍部署使得 CSI 也成为一种相对普适的无线信号信息。表 1 总结了 RSSI 与 CSI 的基本特点。

诚然, 与专用仪器相比, 由于 CSI 对无线信道的测量精度受限于 Wi-Fi 协议的工作带宽, 利用当前的 IEEE 802.11n 协议还无法逐一区分每条传播路径。随着 Wi-Fi 协议(如 IEEE 802.11ac 等)工作带宽的进一步拓展, 我们相

信未来 CSI 能够提供更为精细的多径传播信息。

CSI应用

如何利用从普通 Wi-Fi 设备上提取的 CSI 信息?“他山之石, 可以攻玉。”既然 CSI 是 RSSI 的升级版, 不妨借鉴 RSSI 的方法。在传统的无线室内定位应用中, 一般通过定位人所携带的智能手机或者平板电脑来定位人员。RSSI 既可以当作某个特定位置上的信号特征指纹, 用于标识这个位置以及区别其他位置, 也可以用于测距, 即根据信号传播模型计算出移动终端与 Wi-Fi 接入点之间的距离, 再通过三边定位方法确定位置。与以上方法类似, 我们可以把 CSI 当作信息更丰富的指纹(包括多个子载波上的信号幅度和相位两方面的信息), 也可以依赖频率选择性衰减的模型, 用于更精确的测距。

另外, 在被动式人员检测与定位中, 人员可以不携带任何电子设备, 无线感知系统通过分析人员对环境 Wi-Fi 信号的影响来确定人员出现的位置。这种模式是 CSI 大展身手的主战场之一。与 RSSI 相比, CSI 具有一定程度的多径分辨能力, 能够察觉视距或非视距路径上信号的微弱波动, 从而提高感知灵敏度, 扩大感知区域, 增强感知可靠性。有研究人员利用单发射机-接收机链路实现了接收机附近全向人

员检测, 即人从任意方向接近接收机都能被检测到^[3]。还有研究人员利用 CSI 提供的频率分集(frequency diversity)和多天线提供的空间分集(spatial diversity), 在不同的多径传播环境下选择高敏感度的子载波组合以及来自非视距路径方向的信号, 从而提升被动式人员检测的灵敏度并扩大检测范围。该方法可以在安防应用中形成“无死角”的入侵者检测。这不禁使我们想起在电影《碟中谍》中, 汤姆·克鲁斯绕过红外线监测, 将身体悬挂在天花板上以避免触发地面上的压力传感器, 最终成功盗取了电脑中资料的情节。而这样的盗窃行动在无线感知面前将无处遁形。无线信号在室内多径传播的特性使得无线感知在感知范围以及方向性上具有天然优势。在上述工作的基础上, 也有研究人员利用 CSI 对环境变化的高灵敏度实现人体动作、手势、呼吸等微小运动以及日常活动进行识别^[4-6]。最近, 有研究人员报告了利用 CSI 识别唇语的工作, 这给运动识别的粒度和复杂性方面带来了更大的难度^[7]。

最后, CSI 作为信道特征, 可以自然而然地应用于无线通信。例如, 发射机与接收机之间信号视距传播路径是否存在, 对通信质量有着明显的影响。若视距路径存在, 则可以采取提高码率等措施来相应地提高效率, 反之则可以降低码率以增加可靠性。例如, 研究人员基于 CSI 提

时域和频域?

?? 什么是视距, 一个是非视距

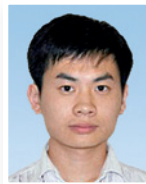
取时域和频域信号的统计特征, 结合接收机的移动性, 利用视距和非视距路径的稳定性差异判断视距路径是否存在^[8]。由于CSI比RSSI更加精细地刻画了频率选择性信道, CSI也被用于更准确地估计信道质量以实时调整传输速率^[2]。也有研究者利用CSI将传输信息按重要性映射至不同质量的子载波上, 并根据细粒度的信道状态调整前向纠错编解码策略以提供不同等级的纠错能力^[9]。除此之外, CSI也可用于通信加密。CSI反映了发射机与接收机之间信道的固有物理特征。根据信道互异性, 该特征是发射机与接收机所共有的信息, 是第三方不能直接获得或监听的。因此, CSI可以作为通信双方密钥生成和协商的共有基础信息^[10]。

CSI具有广阔的应用前景, 目前正处在萌芽和快速增长阶段。作为RSSI的升级版, 一些应用将RSSI替换为CSI, 取得了更好的效果。但这种简单替换缺乏对CSI频率多样性的挖掘和利用, 因此还有提升的空间。除了作为RSSI的替身, CSI的优势还催生出以前RSSI不能实现的环境感知应用, 例如人体姿势、手势、呼吸等细粒度的运动检测以及复杂环境变化模式的检测。当然, CSI不是万能的, 其敏感性也仅仅是相对于RSSI存在优势, 毕竟CSI是从Wi-Fi信号中获取的粗略信道估计。有些应用可能已超越CSI的能力, 让CSI孤木难支, 盛名难副。

结语

无线感知在Wi-Fi信号的局限性以及人们日益增长的环境感知需求两者之间的矛盾中寻求突破口, 在低成本和高精度之间寻找平衡点, 在频率多样性和空间多样性的综合利用上寻找解决方法, 在移动计算和无线通信的交叉领域寻找应用机会。随着技术的不断进步, 感知粒度变得更精细, 感知灵敏度也在提高, 这将催生出更多的应用。希望本文能达到向大家介绍“Wi-Fi雷达”的目的, 有兴趣的读者可以进一步阅读相关论文。

如果将Wi-Fi看做一种“编外”的传感器, 那么基于Wi-Fi的环境感知系统算得上世界上部署最广泛的无线传感器网络: 在办公楼、写字楼、商场、机场等公共场所以及很多家庭中铺开一张大网, 默默地注视着人们的活动。在这样一个网络中, 每个人无须通过在社交网络中发微博、晒照片来刷存在感, 每个人在物理世界中的存在即赋予了其在数字世界中的存在。以前在电视剧中总能看到这样的场景, 当几个人做坏事或者密谋做坏事的时候, 一般会选择在一个密室, 关好门拉上窗帘, 有经验的还会检查桌子下面是否有窃听器, 完事后还要仪式性地念叨一句“天知地知, 你知我知”。今后, 别忘了还要把Wi-Fi关掉。■



杨 铮

CCF会员。清华大学特聘副研究员。主要研究方向为无线网络、移动计算等。yangzheng@tsinghua.edu.cn



刘云浩

CCF高级会员、杰出演讲者。清华大学长江学者特聘教授。主要研究方向为物联网与传感网、对等网与云计算。yunhao@greenorbs.com

参考文献

- [1] Zheng Yang, Zimu Zhou, and Yunhao Liu, From RSSI to CSI: Indoor Localization via Channel Response, ACM Computing Surveys, Volume 46, No. 2, 2014.
- [2] D. Halperin, W. Hu, A. Sheth, and D. Wetherall, Predictable 802.11 Packet Delivery from Wireless Channel Measurements, Proc. of ACM SIGCOMM, 2010.
- [3] Z. Zhou, Z. Yang, C. Wu, L. Shangguan, and Y. Liu, Towards Omnidirectional Passive Human Detection, Proc. of IEEE INFOCOM, 2013.
- [4] Q. Pu, S. Gupta, S. Gollakota, and S. Patel, Whole-Home Gesture Recognition Using Wireless Signals, Proc. of ACM MobiCom, 2013.
- [5] X. Liu, J. Cao, S. Tang, and J. Wen, Wi-sleep: Contactless Sleep Monitoring via WiFi Signals, Proc. of IEEE RTSS, 2014.
- [6] Y. Wang, J. Liu, Y. Chen, M. Gruteser, J. Yang, and H. Liu, E-eyes: In-home Device-free Activity Identification Using Fine-grained WiFi Signatures, Proc. of ACM MobiCom, 2014.
- [7] G. Wang, Y. Zou, Z. Zhou, K.

Wu, L. M. Ni, We Can Hear You with Wi-Fi, Proc. of ACM MobiCom 2014.

[8] Z. Zhou, Z. Yang, C. Wu, W. Sun, and Y. Liu, LiFi: Line-Of-Sight Identification with WiFi, in Proc. of IEEE INFOCOM, 2014.

[9] A. Bhartia, Y. Chen, S. Rallapalli, and L. Qiu, Harnessing Frequency Diversity in Wi-Fi Networks, Proc. of ACM MobiCom 2011.

[10] S. Mathur, W. Trappe, N. Mandanyam, C. Ye, and A. Andreznik, Radio-telepathy: Extracting a Secret Key from an Unauthenticated Wireless Channel, Proc. of ACM MobiCom, 2008.