



# 基于CSI的通信感知一体化设计：问题、挑战和展望\*

张大庆<sup>1</sup>, 张扶桑<sup>2</sup>, 吴丹<sup>1</sup>, 牛凯<sup>1</sup>, 王炫之<sup>1</sup>, 姚健<sup>3</sup>, 姜大洁<sup>3</sup>, 秦飞<sup>3</sup>

(1. 北京大学计算机学院, 北京 100084;

2. 中国科学院软件研究所, 北京 100190;

3. 维沃移动通信有限公司, 北京 100015)

【摘要】 下一代移动通信网络(6G)被设想为超越传统的通信功能, 提供通信感知一体化的全新能力, 从而可支撑万物互联、智慧城市、车联网和健康养老产业等众多新兴应用领域。在所有通信感知一体化方案中, 最能够快速商用且前景广阔的方案是在现有Wi-Fi、4G/5G网络基础上延伸其通讯能力并赋予感知能力, 从而可感知人和周围环境, 融合感知网络和通信网络于一体构建6G智能化新网络。根据多年来利用Wi-Fi、4G/5G CSI(信道状态信息)信号进行无线通信感知的经验, 总结提出了基于CSI实现通信感知一体化系统所面临的十个关键实践问题和理论问题, 剖析了相应的挑战并提供了可能的解决思路。希望这些问题的提出能激发更多研究者一起参与通信感知一体化的研究, 将现有的Wi-Fi、4G/5G通讯网络演进为下一代的智能6G通感一体化网络。

【关键词】 通信感知一体化; 基于CSI的感知; Wi-Fi/5G感知

doi:10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.002 中图分类号: TN929.5

文献标志码: A 文章编号: 1006-1010(2022)05-0009-08

引用格式: 张大庆, 张扶桑, 吴丹, 等. 基于CSI的通信感知一体化设计: 问题、挑战和展望[J]. 移动通信, 2022, 46(5): 09-16.

OSID:



扫描二维码  
与作者交流

## Design of CSI-based Integrated Sensing and Communication: Issues, Challenges and Prospects

ZHANG Daqing<sup>1</sup>, ZHANG Fusang<sup>2</sup>, WU Dan<sup>1</sup>, NIU Kai<sup>1</sup>, WANG Xuanzhi<sup>1</sup>, YAO Jian<sup>3</sup>, JIANG Dajie<sup>3</sup>, QIN Fei<sup>3</sup>

(1. School of Computer Science, Peking University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. vivo Mobile Communication Co., Ltd., Beijing 100015, China)

[Abstract] The next-generation mobile communication network (6G) is envisaged to go beyond traditional communication functions and provide a new capability to integrate communication and sensing, thereby supporting many emerging application fields such as the internet of everything, smart city, internet of vehicles, and health care/elder care. Among all the integrated communication and sensing schemes, the one that can be quickly commercialized and has a broad prospect is to extend its communication capability and give sensing capability on the basis of existing Wi-Fi and 4G/5G networks, so as to sense the surrounding people and environment and build a 6G intelligent new network integrating sensing network and communication network. Based on the experience of wireless communication sensing utilizing Wi-Fi and 4G/5G channel state information (CSI) signals for many years, this paper summarizes and puts forward ten key practical and theoretical issues in realizing the CSI-based integrated communication and sensing system, analyzes the corresponding challenges and provides possible solutions. It is hoped to inspire more researchers to participate in the research of integrated communication and sensing, and evolve the existing Wi-Fi and 4G/5G communication networks into the next-generation intelligent 6G integrated communication and sensing network.

[Keywords] integrated sensing and communication; CSI-based sensing; Wi-Fi/5G sensing

## 0 引言

下一代的6G移动通信网络将不仅提供高速的通信功能, 一项重要的新特性是具备无处不在的感知能力,

实现通信感知一体化(ISAC, Integrated Sensing and Communication), 以支撑全方位的智能化应用, 包括万物互联、智慧城市和健康养老等<sup>[1]</sup>。在众多关于6G通信感知一体化的方案中, 最能接近大规模商用且前景广阔的是基于现有无线技术(如Wi-Fi、4G/5G)来实现感知功能并进行演进, 因为其已经全方位覆盖人、物和环境等方方面面, 尚需要探索的是网络中通信感知一体化的工作机理和应用的可行性。

收稿日期: 2022-04-05

\*基金项目: 国家自然科学基金“面向东亚国家智慧健康养老的物联网感知关键技术研究”(62061146001); 国家自然科学基金“基于泛在信号的非接触智能感知关键技术研究”(62172394)

值得一提的是,在过去的十年中,利用无处不在的 Wi-Fi、4G/5G 无线信号对人和周围环境进行感知的研究已经取得了诸多进展<sup>[2]</sup>,这其中重点聚焦在利用 Wi-Fi、4G/5G 信号的信道状态信息(CSI, Channel State Information)来进行无线感知的理论和技术研究,催生工业界和学术界建立了许多原型应用系统,包括:生命体征监测、人机交互、活动识别、室内定位和跟踪等<sup>[3-8]</sup>。尽管使用无线通讯信号(Wi-Fi/4G/5G)进行感知具有独特优势,如低成本、普适性和非侵扰等,但当面临真正大规模商用时,由于设计初衷主要针对无线信号的通信功能,并没有为感知考虑,所以依然存在许多问题和挑战有待解决<sup>[9-10]</sup>。事实上,当前 Wi-Fi、4G/5G 在通信和感知的功能上对系统设计有着不同的要求。如何利用现有 Wi-Fi、4G/5G 无线网络实现通信感知一体化的网络;在大规模 ISAC 系统广泛部署时又会面临哪些实际的问题和挑战等,这都成为研究通感一体化亟待解决的重要问题。

本文通过介绍 Wi-Fi、4G/5G 信号中 CSI 的测量机制,发现在大规模通感一体化系统部署中存在的实践问题和理论问题,提供潜在解决这些关键问题和挑战的思路和方案,进而全面展示这一新兴研究领域。希望这项工作能激发进一步的研究,以推动现有的 Wi-Fi、4G/5G 迈向智能通信和感知一体化的 6G 时代。

## 1 基于CSI的感知基础

CSI 刻画了 Wi-Fi、4G/5G 网络中,无线信号从发送端传播到接收端所产生的变化。在通讯中,接收端的均衡器利用信道状态信息消除衰落效应和同频干扰,从而恢复原始传输信号。

### 1.1 Wi-Fi CSI

Wi-Fi 网卡通过 CSI 记录了无线信道随时间的变化,CSI 刻画了无线信号在环境中沿着多条路径经过反射、衍射、散射和距离衰减后在接收端叠加的效果。对于中心频率为  $f$  的 Wi-Fi 频道,在  $t$  时刻,无线信道的 CSI ( $H(f, t)$ ) 表示为:

$$H(f, t) = Y(f, t) / X(f, t) \quad (1)$$

其中,  $X(f, t)$  和  $Y(f, t)$  分别是发送信号和接收信号的频域表达。

为了测量 CSI, Wi-Fi 发送端在发送包的前导码(Preamble)中添加长训练符号(LTF, Long Training Symbol)字段。LTF 中包含了对于收发端均已知的符号  $X(f, t)$ 。当包含 LTF 的信号到达 Wi-Fi 接收端后,接收端提取其中的经过无线信道后的符号  $Y(f, t)$ ,并根据式(1)计算 CSI。对于一个 802.11 协议帧,所有 OFDM 子载波的 CSI 都分别被测量。

但是,由于 Wi-Fi 设备的发送端和接收端是相互独立的两个设备,它们使用各自的时钟而没有同步,实际测量得到的每个 CSI 采样中都会包含一项随时间变化的随机相位偏移  $e^{j\theta_{\text{offset}}}$ ,可表示为:

$$\hat{H}(f, t) = e^{j\theta_{\text{offset}}} H(f, t) = e^{j(2\pi\Delta f t + \theta_l + \theta_s + \theta_d)} H(f, t) \quad (2)$$

其中,  $\Delta f$  是载频相位偏移(CFO, Carrier Frequency Offset),  $\theta_l$ 、 $\theta_s$  和  $\theta_d$  分别是由锁相环(PLL, Phase Locked Loop)初始相位、采样频率偏移(SFO, Sampling Frequency Offset)和包边界检测(PBD, Packet Boundary Detection)不确定性带来的相位误差。同时,为通信信号放大而设计的自动增益控制(AGC, Automatic Gain Control)也会导致 CSI 的振幅发生波动。

Wi-Fi 无线帧可以被设置为多种模式。其中, CSI 可以利用以下三种模式估计:

(1) 信标帧(Beacon Frame)。信标帧包含了网络的所有信息,用于通知一个无线局域网(LAN)的存在。由于信标帧是周期性发送的,因此 Wi-Fi 接收端从信标帧中采集的 CSI 具有均匀的采样间隔。然而对于大多数感知应用来说,从信标帧中获取的 CSI 采样率过低。

(2) 注入帧(Injection Frame)。Wi-Fi 设备可以在监听模式(Monitor Mode)下工作,从而接收所选频道中的所有通信报文。在监听模式下, Wi-Fi 发送端使用硬编码的 MAC 地址重复注入手工帧; Wi-Fi 接收端估计包含特定 MAC 地址的帧的 CSI。相比于从信标帧中获得 CSI,注入帧会影响 Wi-Fi 协议的 CSMA/CA,导致现有设备的通信被干扰,因此常常需要独占一个专门用于感知的信道,以使 CSI 的测量更加可控。例如,研究人员可以调整注入帧的发射间隔、发送帧数和发射天线等参数。

(3) 数据帧(Data Frame)。当 Wi-Fi 设备工作在 AP 模式、客户端模式(Client Mode)和 IBSS 模式时,通信数据帧可以用于估计 CSI。这种估计方式的优势在于数据通信和 CSI 估计可以同时进行。然而,由于数据通信只有在有数据需要被传输的时候发生,CSI 只有在进行数据通信时才能被估计。因此,CSI 的采样间隔是不均匀的。此外,当数据通信空闲时,CSI 的采样率会严重不足。

### 1.2 5G新空口CSI

在 5G 新空口(5G NR, 5G New Radio)中,用户设备(UE, User Equipment)进行下行信道测量并将测量结果上报给 5G 基站(gNB, 5G Base Station)。与 Wi-Fi 不同的是,目前的商用设备仍不支持向用户提供 CSI 矩阵(指存储了信道估计结果的矩阵)的提取工具。因此,研究人员只能使用专用硬件设备或软件无线电平台提取

CSI。CSI 既可以在 UE 端 (下行链路) 被提取, 也可以在 gNB 端被提取 (上行链路)。

在 5G 新空口中, 可以通过测量参考信号、同步信号 / PBCH 块 (SSB) 或数据信号获取 CSI 矩阵。具体细节如下:

(1) 参考信号 (RS, Reference Signal)。参考信号包括上行链路参考信号和下行链路参考信号。其中, 下行链路参考信号包括信道状态信息参考信号 (CSI-RS)、解调参考信号 (DMRS, De-Modulation RS)、相位跟踪参考信号 (PTRS, Phase-Tracking RS) 和跟踪参考信号 (TRS, Tracking RS) 等。其中, CSI-RS 只能在下行链路出现, 由 gNB 端发送。UE 端接收 CSI-RS 并将其用于测量无线信道质量并上报 gNB。由于 gNB 端可以灵活分配 CSI-RS 的时间和频率资源, CSI 矩阵的采样间隔是可以被控制的。DMRS 总是和下行链路数据信号一起发送, 用于进行信道估计以解调相关数据。由于数据信号到达时间的随机性以及时间和频率资源分配的不确定性, DMRS 可能是不均匀的。对于上行链路, gNB 可以通过检测由 UE 端发送的探测参考信号 (SRS, Sounding RS)、DMRS 或 PTRS 从而获得 CSI。

(2) 同步信号 / PBCH 块 (SSB, Synchronization Signal/PBCH Block)。在 NR 系统中, SSB 是持续性、周期性发送的信号, 主要用于小区搜索和下行同步。从 SSB 中获得的 CSI 的采样间隔是固定的 (5 ms、10 ms、20 ms、40 ms、80 ms 或 160 ms)。在频域中, 同步信号包含 127 个连续的子载波。假设子载波间的频率间隔为 15 kHz, 同步信号的带宽小于 2 MHz, 如此小的带宽会导致感知的分辨率无法满足一些感知应用的需求。

(3) 数据信号。CSI 也可以基于数据信号获取, 这种方法相当于将传输数据当作已知参考信号。接收端首先需要从接收信号中解调出数据内容, 进而利用接收信号以及解调得到的数据估计 CSI。因此, 由这种方法估计的 CSI 精度会受到数据解调效果的影响。具体来说, 数据需要正确地解调, 否则, 解调误差会影响 CSI 矩阵的估计精度。此外, 相比于专门优化用于估计 CSI 的参考信号, 用户发送数据的不确定性会导致其自相关和互相关特性不够理想, 进而降低 CSI 的估计精度。

## 2 基于CSI的通信感知一体化面临的问题和挑战

### 2.1 实践问题

CSI 是为提高通信性能而设计的, 并没有针对感知问题优化。根据我们研究基于 CSI 的感知系统的经验, 在

实践中有以下问题需要解决。

#### (1) CSI 的获取

为了信道均衡和数据解调, 基于 OFDM 的无线通信系统需要估计 CSI。然而直至今日, 只有极少数商用的 Wi-Fi/4G/5G 设备可以向上层用户程序汇报 CSI, 其中包括早期发布的研究性质的 Intel 5300 Wi-Fi 芯片和 Atheros Ath9k Wi-Fi 芯片 CSItool<sup>[11-12]</sup>。然而, 目前包括 Intel、Broadcom 和 Qualcomm 等主要 Wi-Fi 芯片厂商仍未向第三方开放 CSI 的通用提取功能。和 Wi-Fi 情况相似, 目前在商用的 4G/5G 设备上仍没有任何可用的 CSI 提取工具。SrSLTE<sup>[13]</sup> 是一个工作在 USRP 软件无线电平台上的开源 4G LTE 实现工具, 用于支持以研究为目的的信道状态提取。这是一种目前可以被研究人员用于提取 4G/5G 信号的原型工具<sup>[14]</sup>。

大多数通信系统将信道估计和均衡算法实现在芯片上。因此, 在没有芯片设计厂商支持的情况下, 很难提取 CSI 并设计基于商用 Wi-Fi/4G/5G 设备上 CSI 信息的通信感知一体化系统。

#### (2) CSI 采样率和采样间隔

对于无线感知系统而言, 持续稳定的感知需要连续、均匀、快速的 CSI 采样。然而, 由于通信数据的随机性, 通信系统中的 CSI 采样频率常常无法满足感知系统的需要。基于第 1.1 节所介绍的 Wi-Fi CSI 提取机制, 在 Wi-Fi 空口设计中, 由于大量设备共享传输信道而采用了 CSMA/CA 方案, Wi-Fi CSI 提取会面临低采样率 (从 AP 信标帧中提取 CSI) 和不均匀采样间隔 (从数据帧中提取 CSI) 的问题, 如图 1 所示:

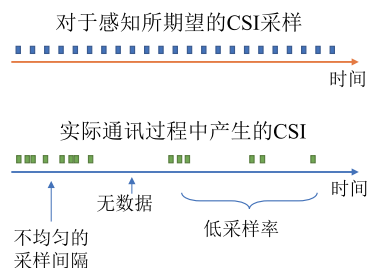


图1 CSI采样问题

在 4G LTE/5G NR 网络中, 并不采用 CSMA/CA 机制, 且一个小区内的所有用户设备是时间同步的。对于 FDD 网络, 下行链路或上行链路的时隙 / 子帧 (slots/subframes) 是连续的。假设包含感知信号的符号每 1 ms 被发送一次, 则 CSI 的采样频率为 1 000 Hz。对于 TDD 网络, 由于下行 - 上行传输的周期性 (最大值为 10 ms), 下行链路或上行链路的时隙 / 子帧 (slots/subframes) 是不连续的。假设包含感知信号的符号在下行链路中被周期性



地每 10 ms 发送一次, 则 CSI 的采样频率为 100 Hz。在实际网络中, CSI 采样频率也受参考信号时域密度的影响。对于 DMRS 和数据信号, 由于数据信号到达的随机性和为数据信号分配的时间与频率资源的不确定性, CSI 的采样间隔可能是不均匀的。对于 SSB, 由于这是一个周期性发送的信号, CSI 的采样频率取决于配置的 SSB 周期。对于 CSI-RS, 采样频率取决于 gNB 配置的 CSI-RS 周期。

### (3) 收发端时钟不同步

收发端时钟不同步是通信感知一体化系统中的另一个严重问题。由于通信系统中的发送设备和接收设备分别使用各自的时钟进行计时 (timing) 和载波生成, 收发端时钟不同步会在 CSI 中产生随机的相位误差<sup>[12, 15-16]</sup>。收发端载波频率的差异导致载波频率偏移 (CFO), CFO 在不同子载波上影响相同, 但是在不同时域符号中会引起随时间变化的相位偏差。收发端计时的差异导致符号定时偏移 (STO), 对于不同子载波, STO 带来的相位偏差与子载波编号线性相关。此外, 收发端时钟的非理想性还会引入相位噪声, 导致信号相位随机变化。由于 CSI 中存在随机相位偏移, CSI 的振幅和相位不再正交。因此, 希望提取多普勒频移从而精确感知波长级小尺度活动十分困难。

### (4) CSI 失真

基于 CSI 的感知技术通过监测无线信道的变化感知人体信息。然而, 实际通信系统中获取的 CSI 不仅包括感知所关注的空中无线信道信息, 也包括了收发设备的多个信号处理模块对应的信道状态信息。因此, 通信设备的一些动态调整参数, 包括预编码、波束赋形和自动增益控制, 都会影响 CSI 的测量数值。例如, 5G NR 中的 DMRS 会和数据符号一起经过发送预编码处理, 因此通过检测 DMRS 而获得的结果可能不能反映原始的信道信息。

CSI 的失真表现在不同层次上, 取决于硬件设计。例如在有些硬件上, 不同天线和不同子载波的 AGC 调整可能是不同的, 这导致 CSI 振幅在不同载波上会出现并不同步的类似脉冲的噪声。

### (5) 分布式感知数据采集

在非接触式人体感知中, 感知系统通常由分布在不同位置的一个发送端和多个接收端组成, 包括运动追踪和手势识别在内的许多感知应用需要从多个接收端同步收集 CSI。由于 CSI 只能在—对发送和接收设备通信时产生, 此时在其它非通讯参与设备上估计 CSI 是很困难的。因此, 设计一个能够在多个设备上同时估计 CSI 的通信感知一体化系统具有挑战性。

另外, 即使我们假设可以同时从多个设备上提取

CSI, 如何有效地将所有提取的 CSI 发送到网络中的一个中心处理节点也存在问题。例如在智慧家居中, Wi-Fi 路由器是一个理想的处理节点。无论 CSI 是在 AP 端还是 Wi-Fi 客户端中产生的, 我们都希望将所有 CSI 汇聚到 AP 路由器以进行进一步处理。

## 2.2 理论问题

除了实践过程中的问题, 基于 CSI 的 Wi-Fi、4G/5G 通信感知一体化还面临诸多理论问题亟待解决, 总结了如下 5 个理论问题。

### (1) 感知极限问题

在过去几年中, 涌现了大量基于 Wi-Fi 和 4G/5G CSI 的无线感知工作, 展现了 Wi-Fi 信号的强大感知能力, 尤其是 Wi-Fi CSI 信号已经被用于监测人体毫米级的胸部呼吸运动<sup>[4, 17-20]</sup>以及厘米级的手指移动<sup>[7, 21-23]</sup>。尽管前景广阔, 但仍然存在一个基本的科学问题, 即利用无处不在的无线信号可感知的最小活动位移是多少。也就是说, 无线感知的极限是什么、是否有理论模型能够清楚地阐明极限问题等问题。回答这个问题将有助于研究人员认识到利用无线信号可以实现哪些应用和无法支撑哪些应用。

### (2) 感知边界问题

当部署通信设备到真实场景时, 很重要的是需要明确发送端和接收端最大通信距离。例如: Wi-Fi 设计收发之间的通信距离是 300 m。不同于主要利用直射路径传播的通讯功能, 感知功能利用的是感知目标对无线信号的反射和衍射作用。由于反射信号的传播路径更长, 以及目标具有一定的反射系数差异, 导致感知覆盖范围会明显小于通信的覆盖范围。然而, 在基于 CSI 的感知研究中, 一直缺乏定量指标来刻画信号的感知能力和感知边界。

### (3) 位置依赖性问题

在基于 CSI 感知的研究中, 一个很重要的假设是被感知目标的行为和 CSI 信号特征间存在—映射关系, 也就是一个 CSI 信号模式对应一种目标的行为动作, 而不同目标动作会产生不同的信号模式。这里的信号模式可以是 CSI 信号的振幅或者相位, 或者是提取到的频谱、多普勒频移等信号特征。但是菲涅尔区模型<sup>[4, 17, 24-25]</sup>揭示了当相同行为活动在不同环境时 (包括位置和朝向), 振幅和相位特征可能出现很大差别 (如图 2 所示), 进而导致行为识别系统性能的下降。并且, 我们研究发现 CSI 信号的频谱和多普勒频移特征也是严重依赖于目标相对于收发设备的位置的<sup>[26]</sup>。考虑到在真实多样化的场景中不同的应用, 开发不

依赖于位置和朝向的无线感知系统是很重要的研究方向<sup>[27]</sup>。

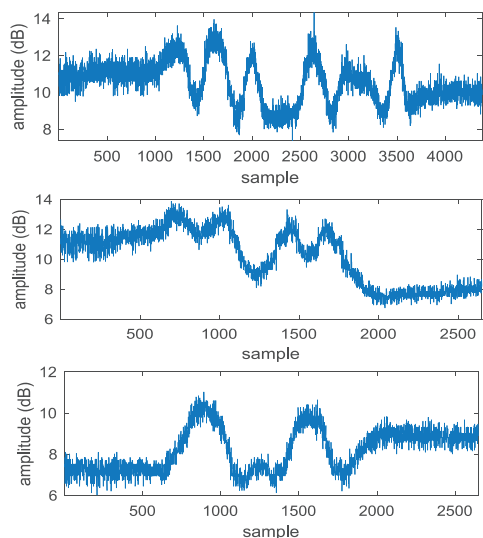


图2 相同的手势动作在不同位置会引起不同的信号波动模式

#### (4) 连续动作的自动切割问题

基于 CSI 的感知已经促进了诸多真实应用, 包括手势识别<sup>[26, 28]</sup>、行为识别<sup>[29-30]</sup>以及定位追踪<sup>[3, 31]</sup>。但是, 大多数已有的原型系统都是从一段连续采集的信号中手动切割动作对应的 CSI 信号片段; 或者在采集过程中, 要求相邻动作间进行短暂的停顿用于切分动作。然而, 实际中人的自然行为和动作都是连续没有停顿的。例如, 人在走向一把椅子随后坐下这种场景, 在行走和坐下行为中间是没有停顿的。由于不同的动作和行为间通常难以用单一的特征进行切分, 因此, 如何从一些日常活动中自动切割连续行为是一个具有挑战的研究问题。

#### (5) 安全和隐私问题

因为无线信号可以绕过障碍物或穿过墙壁, 因此, 基于 CSI 的无线感知可以穿墙监测或者识别行为。但是, 这将引起许多隐私和安全的问题。例如, 黑客可以通过在墙外部署非法 Wi-Fi 监听设备并与室内 Wi-Fi 设备连接, 在用户不知情时采集获取室内的 Wi-Fi CSI 信息, 从而推断用户是否在家、在哪个房间、日常行为等信息, 造成安全和隐私问题。而且, CSI 信息泄露是很难被及时发现。因此, 当利用 CSI 提供感知服务的同时, 也需要有更多的研究关注所引入的隐私和安全问题。

### 3 解决思路和研究方向

#### 3.1 实践问题的研究思路

##### (1) CSI 的可获取性

为了便于从不同厂商的各种通信设备上获取 CSI, 最

好的方法是将其统一为标准的 CSI 采集接口 (API), 当然, 这需要芯片厂商和通信设备厂商的共同努力。我们还建议未来的无线通讯标准中包含 CSI 采集 API, 以便在所有厂商的设备上支持 CSI 采集。CSI 采集 API 获取的信息应包括硬件时间戳、发送设备 MAC 地址、MIMO 天线配置、收发天线对等关键信息, 对于载波进行统一排列, 产生标准化的 CSI 矩阵信息。

##### (2) CSI 采样率和采样间隔

CSI 采样率低、采样间隔不均匀的问题可以通过多种方式解决。对于 Wi-Fi 信号, 可以通过结合信标帧和数据帧来提取 CSI。信标帧保证在没有通信时可以以较低的速率进行 CSI 采样; 而数据帧可以确保高的 CSI 采样率。尽管 Wi-Fi 中数据帧的间隔可能是不均匀的, 但我们可以对 CSI 采样进行插值使其尽可能均匀。我们也希望未来的 Wi-Fi 标准能够兼顾感知和通信的需求, 让所有的 Wi-Fi 接收设备都能以合适的采样率估计 CSI。4G/5G 信号的采样均匀性问题没有 Wi-Fi 的那样严重, 第一个原因是 4G/5G 没有使用 CSMA/CA; 第二个原因是 gNB 可以灵活配置一些信号的周期性, 例如 CSI-RS 或 SSB, 以满足 CSI 采样率的要求。

##### (3) 收发端不同步

收发端不同步导致的 CSI 随机相位偏移需要在感知处理前被移除。现有研究表明, 相位偏移可以建模为线性拟合问题<sup>[12]</sup>或频谱估计问题<sup>[15]</sup>。通过估计 CSI 采样的相位误差, 可以消除相当程度的相位偏移。然而, 残余的相位偏移仍然不可忽略。另一种有效的解决方案是利用 CSI 商 (CSI-Ratio) 模型。CSI 商模型通过对接收设备的两个天线的 CSI 进行除法运算来系统地消除相位偏移<sup>[10, 32]</sup>, 适用于建模单个移动目标。对于多目标情况, 文献 [20] 提出了一个基于 CSI 商的通用模型。我们希望在未来的无线通讯系统设计中, 发射端和接收端能够协调一致, 这样我们就可以使用统一的解决方案来消除相位偏移, 实现收发设备同步。

##### (4) CSI 失真

CSI 失真是由通信模块的动态调整引起的。由于通信设备供应商采用的优化策略不同, CSI 失真在不同硬件上也表现不同。因此, 对于不同的通信设备拿到的 CSI, 在软件处理上并没有通用的解决方案来去除失真。然而, 由通信模块引起的 CSI 失真可以在硬件处理中很容易地进行修复。由于发送和接收设备上包含了自动增益控制等功率放大调整、预编码等的具体数值, 因此接收设备可以在物理层“撤销”对 CSI 值引入的调整, 从而使上报的用于感知的 CSI 不包括通信硬件引入的各种变化。

一种理想的做法是在 CSI 采集 API 中对其进行标准化。

### (5) 分布式感知数据采集

分布式 CSI 数据的收集可以通过在无线网络中使用广播或组播帧来实现。例如，在 Wi-Fi 中，通过接收来自 AP 的信标帧或短组播消息，可以在多个接收设备处同时收集 CSI 数据。在 4G LTE/5G NR 中，可以使用 SSB 信息在多个用户设备上估计 CSI。在多个接收设备处收集分布式 CSI 数据的另一种方法是轮询法，也就是在每个接收设备处依次接收单播帧，这样的难点在于需要同时保持足够的 CSI 采样率和均匀的采样间隔。

有多种方法可以从多个设备收集和汇总分布式的 CSI 数据。在单播的情况下，一个实际的解决方案是从中央节点（例如 Wi-Fi AP）处估计 CSI。通过向每个 Wi-Fi 客户端发送查询数据包并等待 ACK 帧，然后根据 ACK 帧估计 CSI<sup>[33]</sup>。在广播或组播的情况下，一种可能的思路是将客户端估计的 CSI 传回发送端，例如将 CSI 嵌入到每个 ACK 帧中。对于可以容忍延迟的感知应用，我们可以聚合多次 CSI 采样，从而降低回传频率以减少信道占用。

## 3.2 理论问题的研究思路

### (1) 感知极限问题

如图 3 所示，北京大学的张大庆等人<sup>[2, 4, 24]</sup>提出了菲涅尔

尔区（Fresnel Zone）模型来描述当目标位于第一菲涅尔区（FFZ）之外时，CSI 与目标运动轨迹、目标相对于收发设备的位置之间的数学关系，他们进一步扩展了由衍射效应占主导地位的第一菲涅尔区 FFZ 以内的菲涅耳区模型<sup>[17]</sup>。基于菲涅尔区模型，可以知道为什么以及何时可以检测到由人呼吸引起的毫米级胸部位移。与动态向量变化模型<sup>[22]</sup>一起，菲涅耳区模型揭示了可以使用泛在的无线通讯信号感知人类活动的尺度极限——即信号可能的感知粒度。

### (2) 感知边界问题

在通信领域，信噪比（SNR）常被用于量化通讯系统的通信质量及可靠性。如果 SNR 低于一个阈值，则通信会由于高比特错误率而失败。更进一步，接收端的最小可容忍 SNR 决定了最大通信距离。在基于 CSI 的感知中，张大庆等人<sup>[34]</sup>提出了感知信噪比（SSNR, Sensing Signal to Noise Ratio）来量化接收信号的感知能力。基于感知中的最小可容忍 SSNR，可以确定感知的范围和边界。其中，感知边界会随着收发设备间距的变化而产生形状和覆盖面积的变化，如图 4 所示。

### (3) 位置依赖性问题

尽管完全解决位置依赖性问题比较困难，但已有不少研究尝试解决该问题，在呼吸监测、手势识别和人体追踪等方面产生了一定的进展<sup>[27]</sup>。例如：在呼吸监测应用中，CSI 信

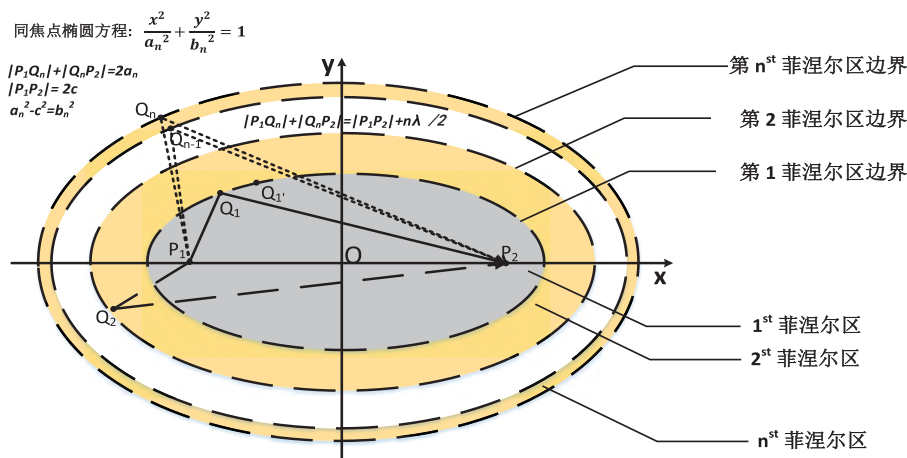


图3 菲涅尔区的几何形态

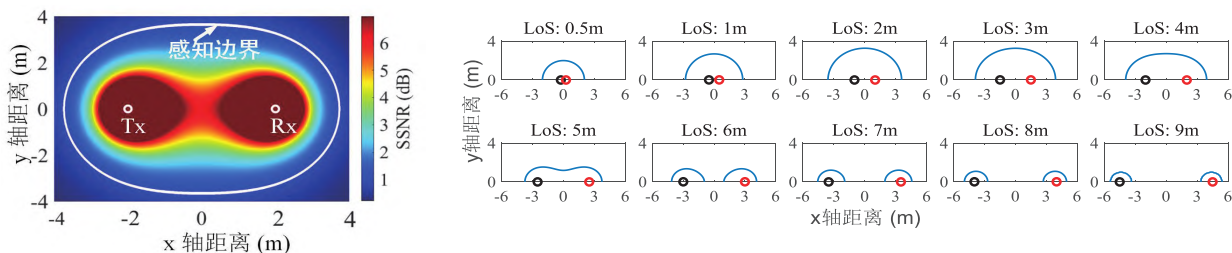


图4 感知边界会随着收发设备间距产生变化的示意图



号的振幅和相位信息可以互补, 从而解决位置差异导致的感知盲区问题<sup>[35]</sup>。在手势识别应用中, 可以通过在两个设备间提取相对移动速度比值的信号特征模式代替在固定位置采集的信号特征, 以解决手势朝向不同引起的信号差异<sup>[28]</sup>。在人体追踪应用中, 通过联合多个接收端设备的观察, 选择最优的观测角度, 从而解决速度信息在不同位置的不一致性<sup>[36]</sup>。在位置依赖性问题中, 如何能有统一的解决思路, 完成对各类应用一致性的保障, 将是未来研究的重点。

#### (4) 连续动作的自动切割问题

基于 CSI 的无线信号连续切割问题, 仍然是领域内的难点。很少有研究针对该问题提出相应的解决方法。在 RT-Fall<sup>[6]</sup> 跌倒检测系统中, 基于人倒地后速度瞬间静止的观察, 提出了一个基于状态改变的切割方法。WiBorder<sup>[37]</sup> 房间级定位系统通过空间划分来切割连续日常行为, 利用时间、空间等情境信息极大地缩减待识别动作种类, 并可能通过对静止、原地活动和走动的区分, 来划分发生在不同位置的原地行为。但依然需要有更多研究针对这一难点问题给出解决思路, 只有解决好了连续行为的识别问题, 才能有机会在大规模真实场景部署感知系统。

#### (5) 安全和隐私问题

为了解决基于 CSI 感知的隐私和安全问题, 一个可能的方法是利用发送端预编码机制对 CSI 信号加密。通过在收发端共享预编码密码本, 使得仅有授权的接收设备可以解码相应的 CSI 信号<sup>[38]</sup>。这样, 即使攻击者可以隔墙窃听到用户的 CSI 信号, 但他们无法解码 CSI 信号并推断目标的行为活动。

## 4 结束语

在本文中, 为了赋能现有的基于 CSI 的无线通信系统 (例如 Wi-Fi、4G/5G), 使其具有智能化的感知能力, 展示了 Wi-Fi 和 4G/5G 无线网络中的 CSI 的估计机制, 提出了基于 CSI 的通信感知一体化系统在实际大规模应用时需要解决的十个实践问题和理论问题, 并提供了应对这些关键挑战可能的解决思路。希望能激发更多研究者一起努力推动从 Wi-Fi/4G/5G 网络到下一代 6G 通感一体化网络的演进。

## 参考文献:

- [1] Liu F, Cui Y, Masouros C, et al. Integrated Sensing and Communications: Towards Dual-functional Wireless Networks for 6G and Beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022.
- [2] D Zhang, Hao W, Dan W. Toward Centimeter-Scale Human Activity Sensing with Wi-Fi Signals[J]. Computer, 2017,50(1): 48-57.
- [3] Li X, Zhang D, Lv Q, et al. IndoTrack: Device-Free Indoor Human Tracking with Commodity Wi-Fi[J]. Proceedings of the ACM on Interactive Mobile Wearable and Ubiquitous Technologies, 2017,1(3): 1-22.
- [4] Wang H, Zhang D, Ma J, et al. Human respiration detection with commodity wifi devices: do user location and body orientation matter[C]//Acm International Joint Conference on Pervasive & Ubiquitous Computing. ACM, 2016: 25-36.
- [5] Zhang F, Wang Z, Jin B, et al. Your Smart Speaker Can “Hear” Your Heartbeat![J]. Proceedings of the ACM on Interactive Mobile Wearable and Ubiquitous Technologies, 2020,4(4): 1-24.
- [6] Hao W, Zhang D, Wang Y, et al. RT-Fall: A Real-Time and Contactless Fall Detection System with Commodity WiFi Devices[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017,16(2): 511-526.
- [7] Wu D, Gao R, Zeng Y, et al. FingerDraw: Sub-wavelength Level Finger Motion Tracking with WiFi Signals[J]. Proceedings of the ACM on Interactive Mobile Wearable and Ubiquitous Technologies, 2020,4(1): 1-27.
- [8] Zhang F, Chang Z, Xiong J, et al. Unlocking the Beamforming Potential of LoRa for Long-range Multi-target Respiration Sensing[J]. Proceedings of the ACM on Interactive Mobile Wearable and Ubiquitous Technologies, 2021,5(2): 1-25.
- [9] Ma Y, Zhou G, Wang S. WiFi Sensing with Channel State Information: A Survey[J]. ACM Computing Surveys, 2019,52(3): 1-36.
- [10] Zeng Y, Wu D, Xiong J, et al. FarSense: Pushing the Range Limit of WiFi-based Respiration Sensing with CSI Ratio of Two Antennas[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2019(3): 1-26.
- [11] Halperin D, Hu W, Sheth A, et al. Tool release: gathering 802.11n traces with channel state information[J]. Acm Sigcomm Computer Communication Review, 2011,41(1): 53.
- [12] Xie Y, Li Z, Mo L. Precise Power Delay Profiling with Commodity Wi-Fi[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015.
- [13] Gomez-Migueluez I, Garcia-Saavedra A, Sutton P D, et al. srsLTE: An Open-Source Platform for LTE Evolution and Experimentation[J]//In Proceedings of the Tenth ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation, and Characterization. ACM, 2016: 25-32.
- [14] Chen W, Niu K, Zhao D, et al. Robust Dynamic Hand Gesture Interaction using LTE Terminals[C]//2020 19th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). ACM, 2020: 109-120.
- [15] Chen Y, X Su, Hu Y, et al. Residual Carrier Frequency Offset Estimation and Compensation for Commodity WiFi[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019(12): 2891-2902.

- [16] Ni Z, Zhang J A, Huang X, et al. Uplink Sensing in Perceptive Mobile Networks With Asynchronous Transceivers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2021,69: 1287-1300.
- [17] Zhang F, Zhang D, Xiong J, et al. From Fresnel Diffraction Model to Fine-grained Human Respiration Sensing with Commodity Wi-Fi Devices[J]. Proceedings of the Acm on Interactive Mobile Wearable & Ubiquitous Technologies, 2018,2(1): 1-23.
- [18] Liu J, Wang Y, Chen Y, et al. Tracking Vital Signs During Sleep Leveraging Off-the-shelf WiFi[C]//the 16th ACM International Symposium. ACM, 2015: 267-276.
- [19] Liu X, Cao J, Tang S, et al. Wi-Sleep: Contactless Sleep Monitoring via WiFi Signals[C]//2014 IEEE Real-Time Systems Symposium. IEEE, 2014: 346-355.
- [20] Zeng Y, Wu D, Xiong J, et al. MultiSense: Enabling Multi-person Respiration Sensing with Commodity WiFi[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2020,4(3): 1-29.
- [21] Ali K, Liu A X, Wei W, et al. Keystroke Recognition Using WiFi Signals[C]//Proceedings of the 21st annual international conference on mobile computing and networking. ACM, 2015: 90-102.
- [22] Niu K, Zhang F, Jiang Y, et al. WiMorse: A Contactless Morse Code Text Input System Using Ambient WiFi Signals[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019,6(6): 9993-10008.
- [23] Niu K, Zhang F, Xiong J, et al. Boosting fine-grained activity sensing by embracing wireless multipath effects[C]//The 14th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies, 2018: 139-151.
- [24] Wu D, Zhang D Q, Xu C R, et al. Widir: walking direction estimation using wireless signals[C]//The 2016 ACM international joint conference on pervasive and ubiquitous computing. ACM, 2016: 351-362.
- [25] Zhang F S, Niu K, Xiong J, et al. Towards a diffraction based sensing approach on human activity recognition[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2019,3(1): 1-25.
- [26] Niu K, Zhang F, Wang X, et al. Understanding WiFi Signal Frequency Features for Position-Independent Gesture Sensing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021.
- [27] 张大庆, 牛凯, 张扶桑. Wi-Fi 无接触感知系统中的位置依赖性问题: 理论与探索 [J]. 中国计算机学会通讯, 2021(2).
- [28] Gao R Y, Zhang M, Zhang J, et al. Towards position independent sensing for gesture recognition with Wi-Fi[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2021,5(2): 1-28.
- [29] Li S, Xiang L, Kai N, et al. AR-Alarm: An Adaptive and Robust Intrusion Detection System Leveraging CSI from Commodity Wi-Fi[C]//International Conference on Smart Homes & Health Telematics. Springer, Cham, 2017: 211-223.
- [30] Wang Y, Wu K, Ni L M. WiFall: Device-Free Fall Detection by Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016(2): 581-594.
- [31] Wu D, Zeng Y W, Gao R Y, et al. Witraj: Robust indoor motion tracking with Wi-Fi signals[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021.
- [32] Zhang F S, Chang Z X, Niu K, et al. Exploring lora for long range through-wall sensing[C]//Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. ACM, 2020,4(2): 1-27.
- [33] Abedi A, Abari O. WiFi Says “Hi!” Back to Strangers! [C]//HotNets ‘20: The 19th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. ACM, 2020: 132-138.
- [34] Wang X Z, Niu K, Xiong J, et al. Placement matters: Understanding the effects of device placement for Wi-Fi sensing[C]//Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol. ACM, 2022,6(1).
- [35] Zeng Y, Wu D, Gao R, et al. FullBreathe: Full Human Respiration Detection Exploiting Complementarity of CSI Phase and Amplitude of WiFi Signals[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2018,2(3): 1-19.
- [36] Niu K, Wang X Z, Zhang F S, et al. Rethinking Doppler Effect for Accurate Velocity Estimation with Commodity Wi-Fi Devices[C]//IEEE Journal on Selected Areas in Communications. IEEE, 2022.
- [37] Li S, Liu Z, Zhang Y, et al. WiBorder: Precise Wi-Fi based Boundary Sensing via Through-wall Discrimination[J]. Proceedings of the ACM on Interactive Mobile Wearable and Ubiquitous Technologies, 2020,4(3): 1-30.
- [38] Jiao X J, Michael T M, Liu W, et al. openWi-Fi CSI fuzzer for authorized sensing and covert channels[C]//ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks. ACM, 2021: 377-379. ★

## 作者简介



张大庆 (orcid.org/0000-0002-6608-1267): 现任北京大学讲席教授, 欧洲科学院院士, IEEE Fellow, 中国计算机学会 (CCF) 普适计算专委会主任, 研究方向为情境感知、无线感知、大数据分析和智能物联网等。



张扶桑: 博士, 现任职于中国科学院软件研究所副研究员, 中国计算机学会高级会员, 普适计算专委会委员, 研究方向为普适计算、无线感知等。



吴丹: 博士, 北京大学计算机学院特聘副研究员, 研究方向为普适计算、无线感知等。