推动双基地无线感知迈向亚波长尺度的高精度

Wenwei Li† *Jiarun Zhou*† *Qinxiao Quan*† *Fusang Zhang*‡ *Daqing Zhang*†*

†北京大学计算机科学学院，中国北京
‡北京航空航天大学网络空间科学与技术学院，中国北京
*巴黎综合理工学院 Telecom SudParis，法国巴黎

arXiv:2603.07492v1 [cs.IT] 8 Mar 2026

摘要

利用无线通信信号进行非接触式感知，因其具有非侵入性且依托无处不在的基础设施而备受关注。尽管前景广阔，无线通信固有的双基地部署会引入时钟不同步，导致信道响应中出现未知相位偏移，从而妨碍细粒度感知。当前最先进的系统普遍采用跨天线信道比来消除这些不利的相位偏移。然而，信道比仅在目标位移为整数波长时才能保留感知特征精度，会损失亚波长保真度。为克服这一局限，我们首次推导出失真比值特征与理想信道特征之间的定量映射。在此基础上，我们构建了一个稳健框架，利用信道响应幅度从失真比值中恢复理想信道特征。在 Wi-Fi 和 LoRa 上开展的真实环境实验表明，该方法能够有效重建亚波长位移细节，精度提升近一个数量级。

关键词— 非接触式感知、双基地无线系统、信道比、集成感知与通信

1. 引言

随着大众化无线通信的迅速普及，利用无处不在的无线信号进行非接触式感知，在过去十年间引起了广泛关注。与依赖专用传感器、可穿戴设备或摄像头的传统感知模态相比，这种新兴范式具有成本低、非侵入性强且能保护隐私等显著优势。研究人员已探索多种信号用于非接触式感知，包括 Wi-Fi、4G/5G 蜂窝网络和 LoRa，从而实现生命体征监测 [1, 2],活动识别 [3, 4], 和无设备跟踪 [5, 6]等关键应用。

尽管无线通信系统在感知应用方面前景广阔，但其固有的双基地部署引入了时钟异步这一根本问题。具体而言，空间上分离的发射机和接收机通常运行在两个独立的振荡器上，从而导致两端之间出现载波频率偏移（CFO）和采样频率偏移（SFO）等失配 [7, 8]。这些失配会在信道响应测量中引入未知的时变相位偏移，从而掩盖目标运动引起的真实信道相位变化。在这些有害的相位偏移下，仅幅度信息仍可用于感知，从而显著限制了潜在应用的精度和范围 [1, 9]。

以往研究探索了多种方法，以恢复适用于细粒度感知的干净信道相位测量。早期工作 [10, 11, 12, 13] 利用信道相关性来估计并消除有害的相位偏移，但估计偏差造成的残余偏移仍会影响相位精度。后续研究则利用了这些偏移在不同天线间的一致性。一些系统 [14,15, 16, 17] 采用信道测量的跨天线共轭相乘来消除偏移，但这种方法会产生虚假运动分量 [18] ，且信噪比较低 [9]。相比之下，涵盖 Wi-Fi、4G/5G 和 LoRa 的最先进系统 [1, 2, 9, 18, 4, 19, 20], 广泛采用跨天线信道比；这种方法可以消除相位偏移，同时基本保留理想信道响应的感知特性。然而，当目标位移恰好为波长的整数倍时，信道比提供的感知特征与理想信道响应完全一致；而在亚波长尺度下，两者则会出现偏差。例如，对于波长为 12 厘米的 2.4 GHz Wi-Fi信号，在目标连续位移过程中，信道比可能固有地产生高达 6 厘米的感知误差。对于 LoRa 等波长更长的信号，这种比值引入误差会更加显著。因此，现有系统在实现亚波长尺度的高精度感知方面仍面临挑战。

本文提出一种新颖的框架，用于从信道比中重建亚波长精度。为此，我们超越以往对信道比的定性理解，推导出首个定量映射，用以刻画信道比所引起的亚波长特征失真。值得注意的是，我们发现该映射仅由信道响应幅度决定，而不受有害相位偏移的影响。基于该模型，我们设计了一条稳健的处理流程，利用信道测量的幅度，从失真信道比特征中恢复理想感知特征。为验证我们的框架，我们使用Wi-Fi和LoRa信号开展了真实世界实验。结果表明，我们的框架将最先进的方法的位移估计误差降低了近一个数量级，从而在亚波长尺度上实现了高精度。

本文其余部分组织如下。第2节介绍双基地无线感知的基础知识以及信道比。第3节给出所提出的模型与框架。第4节报告实验结果，第5节总结全文。

通讯作者：DaqingZhang。本研究受国家科技重大专项（项目编号：2025ZD1302100）资助。

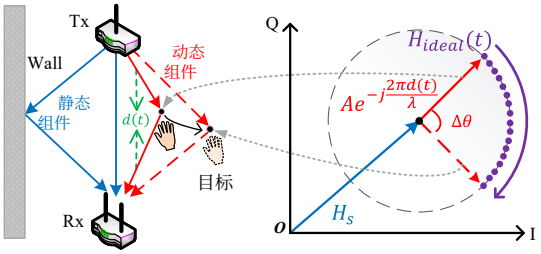
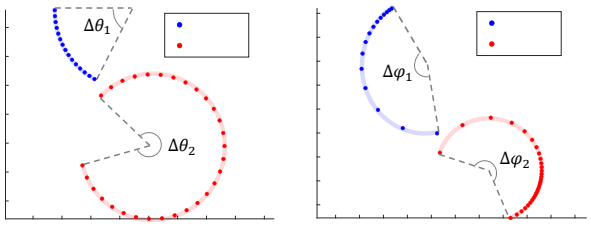


图 1。理想信道响应示意图。



(a) 理想信道响应　　(b) 信道比

图 2。在亚波长尺度变化下，信道比的旋转特征会发生畸变。

2. 预备知识

2.1. 双基地无线感知

在典型的无线通信环境中，信号沿多条路径从发射机传播到接收机。通过将接收信号与已知发射信号进行比较（例如，Wi-Fi/4G/5G中的前导码以及LoRa中的去啁啾符号），接收机可以估计感兴趣频带内的信道响应。作为来自所有路径的分量的叠加，理想信道响应 $H_{\text{ideal}}(t)$可以表示为

$$H_{\text{ideal}}(t) = \sum_i a_i e^{-j\frac{2\pi d_i(t)}{\lambda}} = H_s + Ae^{-j\frac{2\pi d(t)}{\lambda}}, \quad (1)$$

其中， a_i、 $e^{-j\frac{2\pi d_i(t)}{\lambda}}$ 和 d_i 分别表示第 i条路径信号的衰减、相移和路径长度， λ 为波长。当目标在传播环境中移动时，信道响应可分解为静态组件 H_s和动态组件 $Ae^{-j\frac{2\pi d(t)}{\lambda}}$ ：前者由直达路径及静止物体的反射产生，后者则由移动目标的反射产生。随着目标运动导致反射路径长度 $d(t)$发生变化，信道响应向量沿圆周旋转，如图 1 所示。细粒度感知的关键原理是提取这一旋转的角度，即动态相位变化 $\Delta\theta = -\frac{2\pi\Delta d}{\lambda}$，从而量化路径长度变化$\Delta d$ 和目标位移。

在实际的双基地系统中，发射机与接收机之间的时钟异步会引入载波频偏（CFO）和采样频偏（SFO）等失配。因此，实际测得的信道响应 $H(t)$会受到未知时变相位偏移 $\phi_{\text{offset}}(t)$的影响，可表示为

$$H(t) = e^{-j\phi_{\text{offset}}(t)}\left(H_s + Ae^{-j\frac{2\pi d(t)}{\lambda}}\right). \quad (2)$$

这种有害的相位偏移变化显著，并掩盖了目标运动引起的相位变化 [9, 21], ，因此在实际应用中很难提取用于细粒度感知的旋转角 $\Delta\theta$。

2.2. 跨天线信道比

为恢复干净的信道响应相位，当前最先进的系统广泛采用跨天线信道比技术。该方法的基本原理是，单个接收机上的多个天线通常共用同一个振荡器。因此，时钟异步引起的相位偏移在各接收机天线上完全相同。通过计算两个天线的信道测量之比，即可完全抵消这种有害的相位偏移。具体而言，信道比 $H_{\text{ratio}}(t)$可表示为

$$\begin{aligned} H_{\text{ratio}}(t) = \frac{H_1(t)}{H_2(t)} &= \frac{\cancel{e^{-j\phi_{\text{offset}}(t)}}\left(H_{s,1} + A_1 e^{-j\frac{2\pi d_1(t)}{\lambda}}\right)}{\cancel{e^{-j\phi_{\text{offset}}(t)}}\left(H_{s,2} + A_2 e^{-j\frac{2\pi d_2(t)}{\lambda}}\right)} \\ &= \frac{H_{s,1} + \widetilde{A_1} e^{-j\frac{2\pi d_2(t)}{\lambda}}}{H_{s,2} + A_2 e^{-j\frac{2\pi d_2(t)}{\lambda}}} = \frac{\mathcal{A}z(t) + \mathcal{B}}{\mathcal{C}z(t) + \mathcal{D}}, \end{aligned}$$

其中， $A_{(1,2)}$ 和 $e^{-j\frac{2\pi d_{(1,2)}(t)}{\lambda}}$ 分别表示两个不同天线处动态信道分量的幅度和相位，而 $\widetilde{A_1} = A_1 e^{-j\frac{2\pi(d_1-d_2)}{\lambda}}$ 在短时间内 [1, 9]可视为常数。以这种形式，信道比可视为 $z(t) = e^{-j\frac{2\pi d_2(t)}{\lambda}}$ 的莫比乌斯变换 [22] ，即 M¨。

莫¨比乌斯变换的一个关键性质是其保持圆性 [22]。由于 $z(t)$描绘单位圆，信道比也描绘一个圆。更重要的是，当 $z(t)$旋转 2π 的一个完整周期（即，目标路径长度变化一个波长）时，信道比也恰好旋转一个完整周期，与理想信道响应一致。这一性质使我们能够通过提取信道比的旋转角，在整数波长尺度上准确估计路径长度变化 Δd。

尽管信道比能够在整数波长尺度上实现精确感知，但它在亚波长尺度上会失去精度。如图2所示，当路径长度变化 Δd 不是波长的整数倍时，信道比的旋转角可能与理想信道响应的旋转角显著偏离。这一偏差从根本上限制了基于信道比的方法实现亚波长精度的能力。

3. 方法

在本节中，我们首先建立信道比的旋转角与理想信道响应的旋转角之间的定量映射。基于该模型，我们提出一个框架，利用原始信道测量的幅度，从失真的信道比中恢复理想信道响应的旋转角。

3.1. 信道比旋转角的建模

当信道比在复平面上描绘出一个圆时，可将其表示为

$$H_{\text{ratio}} = \frac{H_{s,1} + \widetilde{A_1} e^{j\theta}}{H_{s,2} + A_2 e^{j\theta}} = H_{s,\text{ratio}} + A_{\text{ratio}} e^{j\varphi}, \quad (3)$$

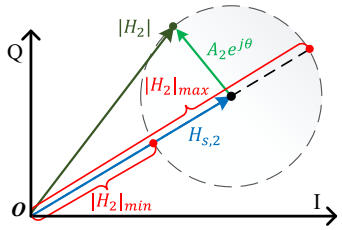


图 3。 $|H_2|_{\max}$ 和 $|H_2|_{\min}$的示意图。

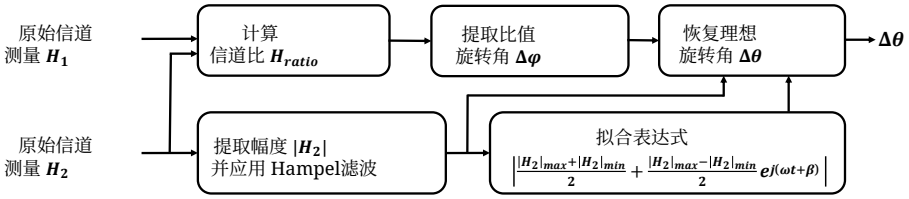


图 4。框架概览。

其中 $H_{s,\ \text{ratio}}$ 和 A_{ratio} 分别表示圆的圆心和半径， φ 表示信道比在圆上的角度，而 θ 表示 $-\frac{2\pi d_2}{\lambda}(t)$。根据这些定义， $\Delta\varphi$ 是信道比的旋转角，而 $\Delta\theta$ 是理想信道响应的旋转角。

为了对信道比的旋转角进行建模，我们分析旋转过程中信道比的变化。我们假设所分析的变化足够小（例如，两个相邻样本之间的变化），因此可以采用微分近似来简化分析。较大的变化可以通过累积这些小变化得出。根据公式 3 中的圆轨迹表达式，信道比变化的幅度可表示为

$$|\Delta H_{\text{ratio}}| = \left|\Delta(H_{s,\text{ratio}} + A_{\text{ratio}}e^{j\varphi})\right| \approx A_{\text{ratio}}\Delta\varphi. \tag{4}$$

另一方面，作为两个信道响应之比的变化，其幅度也可以表示为

$$\begin{aligned}|\Delta H_{\text{ratio}}| = \left|\Delta\left(\frac{H_{s,1}+\widetilde{A_1}e^{j\theta}}{H_{s,2}+A_2e^{j\theta}}\right)\right| &\approx \frac{\left|\widetilde{A_1}H_{s,2}-A_2H_{s,1}\right|}{|H_{s,2}+A_2e^{j\theta}|^2}\Delta\theta \\ &= \frac{\left|\widetilde{A_1}H_{s,2}-A_2H_{s,1}\right|}{|H_2|^2}\Delta\theta,\end{aligned} \tag{5}$$

其中， $|H_2|$ 表示信道比中分母信道测量的幅度。请注意， $|H_2|$ 不受有害相位偏移的影响，因此等于理想信道响应的幅度。通过结合公式4与公式5，我们可以将 $\Delta\varphi$ 与 $\Delta\theta$ 关联为

$$\Delta\varphi = \frac{\frac{1}{A_{\text{ratio}}}\left|\widetilde{A_1}H_{s,2}-A_2H_{s,1}\right|}{|H_2|^2}\Delta\theta = \frac{k}{|H_2|^2}\Delta\theta, \tag{6}$$

其中，我们将常数项 $\frac{1}{A_{\text{比}}}\left|\widetilde{A_1}H_{s,2}-A_2H_{s,1}\right|$ 记为 k，以便于后续分析。

公式 6 给出了 $\Delta\varphi$ 与 $\Delta\theta$之间的基本映射。然而，要从 $\Delta\varphi$重建 $\Delta\theta$，必须用信道响应的可测幅度表示常数 k。为此，我们利用这样一个性质：当信道比完成一次完整的 2π 旋转时，理想信道响应也恰好旋转一个完整周期。具体而言，在一次 2π 旋转期间，公式 6 两侧微分形式的积分可表示为

$$\int_0^{2\pi}\mathrm{d}\varphi = \int_0^{2\pi}\frac{k}{|H_2|^2}\mathrm{d}\theta. \tag{7}$$

By substituting $|H_2|^2 = \left|H_{s,2}+A_2e^{j\theta}\right|^2$, k can be calculated as

$$\begin{aligned}k = \frac{\int_0^{2\pi}\mathrm{d}\varphi}{\int_0^{2\pi}\frac{1}{|H_{s,2}+A_2e^{j\theta}|^2}\mathrm{d}\theta} &= (|H_{s,2}|+A_2)(|H_{s,2}|-A_2) \\ &= |H_2|_{\max}|H_2|_{\min},\end{aligned} \tag{8}$$

其中， $|H_2|_{\max}$ 和 $|H_2|_{\min}$ 分别表示 $|H_2|$ 在完成一个完整周期的旋转过程中的最大值和最小值，如图 3 所示。最后，我们推导出 $\Delta\theta$ 与 $\Delta\varphi$之间的映射：

$$\Delta\theta = \frac{|H_2|^2}{|H_2|_{\max}|H_2|_{\min}}\Delta\varphi. \tag{9}$$

基于公式9，我们可以通过从原始信道测量中提取$|H_2|$、$|H_2|_{\max}$ 和 $|H_2|_{\min}$，由 $\Delta\varphi$ 重构 $\Delta\theta$。

3.2. 恢复理想信道的旋转角

图4展示了我们所提出的用于恢复理想信道响应旋转角的框架，即，$\Delta\theta$。

首先，与已有系统保持一致，我们根据两根天线的原始信道测量计算信道比。随后，我们采用 [3] 中提出的最先进的方法来提取信道比的旋转角，即， $\Delta\varphi$。

同时，我们提取作为信道比值分母的原始信道测量的幅度，记为 $|H_2|$。为减轻潜在脉冲噪声对信道测量幅度 [9]，的影响，我们对原始 $|H_2|$ 应用汉佩尔滤波器。

然后，我们在 0.5 秒的时间窗口内获取多个 $|H_2|$ 样本，以提取 $|H_2|_{\max}$ 和 $|H_2|_{\min}$。直接将最大和最小的 $|H_2|$ 样本分别作为 $|H_2|_{\max}$ 和 $|H_2|_{\min}$ 的简单方法并不稳健，原因有二：(1) 这些极值很容易受到离群值和噪声的影响；(2) 在小尺度目标运动过程中， $|H_2|$ 的变化可能未覆盖其完整理论范围，这意味着实际的最大值和最小值可能无法被观测到。因此，我们提出一种利用窗口内所有样本来估计 $|H_2|_{\max}$ 和 $|H_2|_{\min}$ 的方法。具体而言，由于信道响应可视为在短时间窗口内均匀旋转，因此幅度 $|H_2|$ 可建模为

$$\left|\frac{|H_2|_{\max}+|H_2|_{\min}}{2}+\frac{|H_2|_{\max}-|H_2|_{\min}}{2}e^{j(\omega t+\beta)}\right|.$$

我们使用非线性最小二乘算法，在窗口内对多个样本拟合该表达式，从而获得稳健的 $|H_2|_{\max}$ 和 $|H_2|_{\min}$估计值。

最后，我们将提取的 $\Delta\varphi$、 $|H_2|$、 $|H_2|_{\max}$ 和 $|H_2|_{\min}$ 代入公式9，以计算 $\Delta\theta = -2\pi\Delta d/\lambda$。随后，我们便能以亚波长精度量化由目标运动引起的路径长度变化。

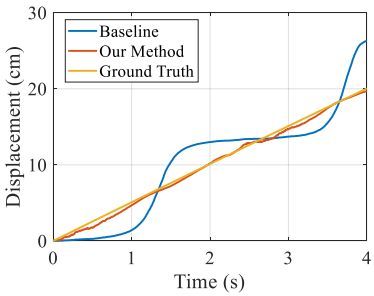


图 5。位移估计示例。

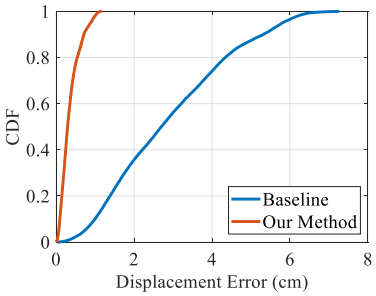


图 6。基准实验结果。

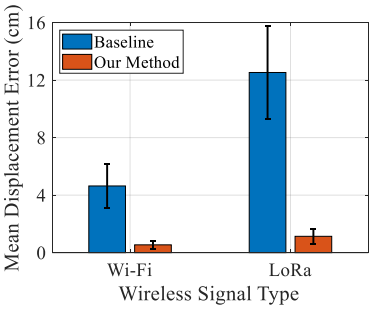


图 7。手势实验结果。

4. 实验

为评估我们所提出的框架，我们使用Wi-Fi和LoRa信号开展了真实世界实验。具体而言，我们通过基准实验和手势实验，评估该框架在估计目标位移方面的性能。

Wi-Fi 设置。 我们使用两台配备商用 Intel 5300 无线网卡的迷你电脑来发射和接收 Wi-Fi信号。发射机配置了一根天线，接收机则配备了两根天线。Wi-Fi信号的中心频率为 2.47 GHz，对应的波长为 12.1 cm。我们使用 CSI Tool [23], 以 1000 Hz 的采样率采集 Wi-Fi 信道状态信息 (CSI) 作为信道测量。

LoRa 设置。 我们使用搭载 Arduino Uno 的 Semtech SX1276 模块作为 LoRa 节点，并为其配备一根天线。LoRa 网关采用配备两根天线的 USRP B210 和 GNU Radio 实现。LoRa 节点以 915 MHz 的中心频率发射信号，对应的波长为 32.8 cm。我们对接收到的 LoRa 信号进行去啁啾处理，以 1000 Hz 的采样率获取信道测量。

基线方法。 我们采用 [3] 中提出的最先进的方法作为基线方法。我们的框架沿用基线方法来提取信道比的旋转角，但基线方法未纳入我们的亚波长精度恢复方案。

4.1. 基准实验

在基准实验中，我们使用一块 30 cm × 30cm 的金属板作为目标。Wi-Fi 发射机和接收机部署在距离金属板 1.2 m 处，二者间距为 4 m。金属板安装在配有数字控制器的高精度滑轨上，可实现精度为 1 mm 的位移控制。我们设置金属板沿收发机对的垂直平分线，以 1 cm/s、2 cm/s 和 5 cm/s 的速度移动，位移距离分别为 2 cm、5 cm、10 cm、15 cm 和 20 cm。每项实验重复 20 次。

图5展示了单次目标移动实验中位移估计结果随时间变化的一个示例。我们观察到，当目标路径长度变化并非波长的精确整数倍时，基线方法相对于滑动轨迹真实值会出现周期性的高估或低估，最大误差为6.3厘米。相比之下，我们的方法在亚波长尺度上保持与真实值一致的位移估计，最大误差低于0.9厘米。

图 6展示了所有基准实验中位移估计误差的累积分布函数（CDFs）。可以观察到，我们的方法将误差中位数从2.7厘米降低至0.3厘米，并将第90百分位误差从5.3厘米降低至0.7厘米。这些结果表明，我们的框架显著突破了亚波长尺度下的感知精度极限。

4.2. 量化手势位移

为评估我们的框架在感知应用中的潜力，我们使用Wi-Fi和LoRa设备开展手势实验。在这些实验中，发射机和接收机放置在办公环境的一张桌子上，相距2米。志愿者从距离收发机1米的初始位置执行手势。为获取真实值，我们预先在桌面上标记位移为5厘米、10厘米、15厘米和20厘米的参考点，并指示志愿者在这些点之间移动双手。我们招募了四名志愿者（两男两女）参与实验，每项实验重复10次。

图 7 展示了我们的方法与基线方法相比的平均位移估计误差。值得注意的是，在 Wi-Fi 和 LoRa 感知中，我们的方法都将精度提高了近一个数量级。具体而言，使用 Wi-Fi 信号进行感知时，基线方法和我们的框架的平均误差分别为 4.6 厘米和 0.5 厘米。使用波长较长的 LoRa 信号时，基线方法的平均误差增至 12.5 厘米，而我们的方法仍将平均误差保持在较低的 1.1 厘米。这些结果表明，我们的框架显著提升了手势位移估计的亚波长精度，为通过空中手势对物联网设备进行精细控制等应用开辟了新的机会。

5. 结论

本文针对基于信道比的双基地无线感知中亚波长精度的根本性局限。超越以往的定性理解，我们首次推导出信道比失真感知特征与理想感知特征之间的定量映射。我们揭示，该映射仅由信道响应的幅度决定，不受双基地无线系统中有害相位偏移的影响。基于这一基础，我们提出了一种稳健框架，用于从失真的信道比中恢复理想感知特征。在 Wi-Fi 和 LoRa 上开展的真实环境实验表明，我们的框架在亚波长尺度上将精度提升了近一个数量级。

6. 参考文献

[1] Youwei Zeng、Dan Wu、Jie Xiong、Enze Yi、Ruiyang Gao 和 Daqing Zhang，《Farsense：利用两根天线的 CSI 比率突破基于 WiFi 的呼吸感知距离极限》，*ACM* 交互式、移动、可穿戴和普适技术，第 3 卷第 3 期，第 1–26 页，2019 年。

[2] Fusang Zhang、Zhaoxin Chang、Jie Xiong、Rong Zheng、Junqi Ma、Kai Niu、Beihong Jin 和 Daqing Zhang，《释放 LoRa 波束成形在远距离多目标呼吸感知中的潜力》，《*ACM*交互、移动、可穿戴与普适技术汇刊》，第 5 卷，第 2 期，第 1–25 页，2021 年。

[3] Ruiyang Gao、Wenwei Li、Yaxiong Xie、Enze Yi、Leye Wang、Dan Wu 和 Daqing Zhang，《通过表征 WiFi 信号的感知质量实现稳健的手势识别》，《*ACM*交互、移动、可穿戴与普适技术汇刊》，第 6 卷，第 1 期，第 1–26 页，2022 年。

[4] Weiyan Chen、Kai Niu、Deng Zhao、Rong Zheng、Dan Wu、Wei Wang、Leye Wang 和 Daqing Zhang，《使用 LTE 终端实现稳健的动态手势交互》，载于*2020* 年第 *19* 届 *ACM/IEEE* 国际传感器网络信息处理会议（*IPSN*）。IEEE 计算机学会，2020 年，第 109–120 页。

[5] Wenwei Li、Ruiyang Gao、Jie Xiong、Jiarun Zhou、Leye Wang、Xingjian Mao、Enze Yi 和 Daqing Zhang，“WiFi CSI 差分范式：实现用于被动跟踪的高效多普勒速度估计”，《*ACM*交互、移动、可穿戴与普适技术汇刊》，第 8 卷，第 2 期，第 1–29 页，2024 年。

[6] Fusang Zhang、Zhaoxin Chang、Kai Niu、Jie Xiong、Beihong Jin、Qin Lv 和 Daqing Zhang，“探索 LoRa 在远距离穿墙感知中的应用”，《*ACM*交互、移动、可穿戴与普适技术汇刊》，第 4 卷，第 2 期，第 1–27 页，2020 年。

[7] Manikanta Kotaru、Kiran Joshi、Dinesh Bharadia 和 Sachin Katti，“SpotFi：使用 WiFi 实现分米级定位”，载于*2015* 年 *ACM* 数据通信特别兴趣小组会议论文集，2015 年，第 269–282 页。

[8]Deepak Vasisht、Swarun Kumar 和 Dina Katabi，“使用单个 {WiFi}接入点进行{分米级} 定位”，载于 第 *13* 届 *USENIX* 网络系统设计与实现研讨会（*NSDI 16*），2016 年，第 165–178 页。

[9] Dan Wu、RuiYang Gao、Youwei Zeng、Jinyi Liu、Leye Wang、Tao Gu 和 Daqing Zhang，“Fingerdraw：使用 WiFi 信号进行亚波长级手指运动追踪”，*ACM* 交互式、移动、可穿戴与普适技术会议论文集，第 1 卷，第 1 期，2020 年。

[10] XiangLi、ShengjieLi、DaqingZhang、Jie Xiong、Yasha Wang 和 Hong Mei，“Dynamic-music：精准的无设备室内定位”，载于 *2016* 年 *ACM* 普适与泛在计算国际联合会议论文集。ACM，2016 年，第 196–207 页。

[11] Chen Chen、Yan Chen、Hung-Quoc Lai、Yi Han 和 KJ Ray Liu，《高精度室内定位：一种基于 WiFi 的方法》，载于 *2016 IEEE* 声学、语音与信号处理国际会议（*ICASSP*）。*IEEE*，*2016*年，第*6245–6249*页。[12] Jincao Zhu、Youngbin Im、Shivakant Mishra 和 Sangtae Ha，《为商用现成WiFi设备校准时变、设备特定的相位噪声》，载于第*15*届*ACM*嵌入式网络传感器系统会议，2017年，第1–12页。[13] Nan Yu、Wei Wang、Alex X Liu 和 Lingtao Kong，《Qgesture：利用 WiFi 信号量化手势距离与方向》，《*ACM*交互、移动、可穿戴与普适技术汇刊》，第2卷第1期，第1–23页，2018年。[14] Kun Qian、Chenshu Wu、Zimu Zhou、Yue Zheng、Zheng Yang 和 Yunhao Liu，《利用商用WiFi推断运动方向以实现交互式体感游戏》，载于*2017*年*CHI*会议：计算系统中的人因，2017年，第1961–1972页。

[15] Xiang Li、Daqing Zhang、Qin Lv、Jie Xiong、Shengjie Li、Yue Zhang和Hong Mei，“Indotrack：基于商用WiFi的无设备室内人体追踪”，《*ACM*交互、移动、可穿戴与普适技术汇刊》，第1卷，第3期，第72页，2017。

[16] Kun Qian、Chenshu Wu、张毅、张贵东、Zheng Yang和Yunhao Liu，“Widar2. 0：基于单条Wi-Fi链路的被动式人体跟踪”，载于第*16*届移动系统、应用与服务年度国际会议论文集，2018，第350–361页。

[17] Youwei Zeng、Dan Wu、Ruiyang Gao、Tao Gu和Daqing Zhang，“Fullbreathe：利用WiFi信号CSI相位与幅度互补性的全人体呼吸检测”，《*ACM*交互、移动、可穿戴与普适技术汇刊》，第2卷，第3期，第148页，2018。

[18] 李新宇, 张安德鲁, 吴凯, 崔元浩, 和 Xiao- jun Jing, “通感一体化中的基于CSI比率的多普勒频率估计,”《*IEEE*传感器期刊》, 第 22 卷, 第 21 期, 第 20886–20895 页, 2022.

[19] 胡衍墨, 吴凯, 张安德鲁, 邓伟博, 和 郭毅, “通感一体化系统中基于CSI比率的双基地多普勒感知性能界与优化,”《*IEEE*无线通信汇刊》, 2024.[20] 倪志同, 张安德鲁, 吴凯, 和 刘仁平, “感知移动网络中基于CSI比率的上行感知,”《*IEEE*信号处理汇刊》, 第 71 卷, 第 2699–2712 页, 2023.[21] Dan Wu, Youwei Zeng, Ruiyang Gao, 李申杰, 李阳, Rahul C Shah, 卢宏, 和 Daqing Zhang, “Witraj：利用 WiFi 信号进行稳健的室内运动跟踪,”《*IEEE*移动计算汇刊》, 第 22 卷, 第 5 期, 第 3062–3078 页, 2021.[22] Tristan Needham,《视觉复分析》, 牛津大学出版社, 2023.[23] Daniel Halperin, 胡文俊, An mol Sheth, 和 David Wether- all, “工具发布：使用信道状态信息采集 802.11 n 轨迹,”《*ACM SIGCOMM*计算机通信评论》, 第 41 卷 , 第 1 期 , 第 53–53 页 , 2011.