



专题: 5G+6G

6G 室内定位技术原理与展望

万潇阳, 孙耀华, 王则予
(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 为更好地支撑基于位置的差异化服务, 6G 移动通信对室内定位精度提出了更高要求。首先从单一定位技术入手, 介绍了现有室内定位技术的原理、特点及优劣势。随后, 针对单一定位技术的不足, 进一步讨论了基于多技术融合的室内定位系统。此外, 介绍了基于多网络/多设备的协作定位系统进展, 归纳并分析了集中式协作定位系统与分布式协作定位系统的常见架构。最后, 指出了 6G 室内定位技术的发展机遇与挑战。

关键词: 室内定位; 协作定位; 6G 定位

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi:10.11959/j.issn.1000-0801.2021118

Principle and future trends of indoor positioning in 6G

WAN Xiaoyang, SUN Yaohua, WANG Zeyu
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: For supporting location based differentiated services better, 6G has a more stringent requirement on high-precision positioning. Firstly, the principles, characteristics, advantages and disadvantages of the existing indoor positioning techniques were introduced. Then, indoor positioning systems integrating multiple techniques were discussed to overcome the drawbacks of using only a single technique. Moreover, the advances in cooperative positioning systems involving multi-devices and multi-networks were presented with the summary and analysis of centralized and distributed implementation architectures. Finally, the opportunities and challenges faced by 6G indoor positioning were pointed out.

Key words: indoor positioning, cooperative positioning, 6G positioning

1 引言

面向高山海洋、自动驾驶、虚拟现实、全息

通信和触觉互联网等新兴业务和场景, 与 6G 移动通信相关的研究持续推进, 其关键技术涉及网络切片^[1]、区块链^[2]、人工智能^[3]、云边协同^[4]、密

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-06-10

通信作者: 万潇阳, wxy9@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1806703); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.24820202020RC11); 国家自然科学基金资助项目 (No.62001053)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China(No.2020YFB1806703), Fundamental Research Funds for the Central Universities(No.24820202020RC11), The National Natural Science Foundation of China (No.62001053)



集组网^[5]、智慧感知等，最终 6G 网络将呈现智能内生^[6]、万物智联、内生安全^[7]等全新特征。在智慧感知方面，全球发布的首个 6G 白皮书^[8]对 6G 性能指标提出了更高要求，其中包括室内定位精度达 10 cm，室外定位精度达 1 m。

数据指出，如今人们 80%至 90%的时间都在室内度过，且 2022 年，室内定位的市场规模将增长至 409.9 亿美元^[9-10]，基于位置的服务（location based service, LBS）将无处不在。在办公楼、机场、商场、医院、酒店、停车场等人流密集之处，LBS 可以通过定位导航有效疏通人流并提供动向分析，提高运营效率和用户服务质量（quality of service, QoS）；在垂直行业领域，如工厂、物流、仓库、矿井等，精准的定位服务可以实现智能化货物管理、分类、运输与追踪，降低产业成本，提高管理效率；在特殊场景下，如紧急救援、军事战场等，实时准确的定位服务能让救援、战术指挥更加及时高效。当前室内定位技术的发展已无法支撑相关基于位置的服务需求，在 6G 相关技术的发展和演进下，室内定位技术的发展受到了更多的期待，有望突破 5G 室内定位的米级精度，实现更智慧、更安全的定位。

不同于已经形成广阔且完整的基于全球定位系统（the global positioning system, GPS）的室外卫星定位网络，室内环境十分复杂，且随时会因

为人的行为而发生改变。无线信号受室内环境的影响导致非视距传播（non-line of sight, NLOS），致使信号不可预测地出现衰减、散射、阴影和盲点等情况，因而将传统的室外定位网络应用于室内时无法获得理想的定位效果。目前，常见的室内定位技术有基于到达时间（time of arrival, TOA）、到达角（angle of arrival, AOA）、接收信号强度（received signal strength, RSS）和信道状态信息（channel state information, CSI）等典型测距技术，也有基于信号指纹的非测距技术。此外，借助智能手机内置惯性测量单元（inertial measurement unit, IMU）也可实现行人自主定位导航功能。

目前，国内外涉及室内定位技术研究的公司已近千家，如中海达、CloudNav、Inpixon、PoleStar 等公司均研发了不同的室内定位方案，国内外室内定位相关研究企业见表 1。国内相关室内定位研究团队主要有清华大学刘云浩团队、北京邮电大学邓中亮团队、大连理工大学卢炳先团队等，其中清华大学刘云浩团队于 2002 年提出并实现了全球首个基于射频识别（radio-frequency identification, RFID）标签技术的非测距室内定位系统 LANDMARC^[11]，并于 2014 年提出了“差分增强全息图”^[12]定位方法，将室内定位精度突破性地提升至毫米级。

表 1 国内外室内定位相关研究企业

企业	应用领域	定位方案	精度	成本	时延
95power	煤矿、隧道、管廊设备/车辆/人员一维室内定位	UWB+TWR	厘米~分米级	高	/
中海达	物流追踪、智能工厂/医院/监狱室内定位	IR-UWB	分米级	高	/
CloudNav	室内外定位与运动跟踪、手势识别	GNSS/BLU/Wi-Fi+IMUs	米级	中	/
Inpixon	IoT 位置感知、人员/设备和资产跟踪	Chirp+UWB+TDOA	厘米~米级	高	/
Phunware	室内定位与室内外无缝导航	BLE/vBLE/Wi-Fi+指纹	米级	中	<5 s
IndoorAtlas	室内定位、人员/设备及资产追踪	PDR+地磁+BLE+Wi-Fi+气压	米级	低	/
PoleStar	室内寻路导航、资产/人员追踪、地理围栏	BLE	米级	低	/
AiRISTA Flow	医疗服务如病人管理、资产追踪、员工工作流程	Wi-Fi+BLE+RFID+IR	分米级	低	/

借助大数据、云计算、机器学习和人工智能等技术,6G时代将前所未有地充分利用用户位置信息数据深度挖掘用户需求,提高用户服务质量、节约网络资源,与此同时,6G网络也将催生更多样化和智能化的LBS产业,对实时高精度定位技术的需求将愈发迫切。

2 室内定位技术分类

由于室内环境的复杂性,迄今没有单一的室内定位解决方案适用于所有室内环境,因此基于不同定位方法可以将室内定位技术分为基于测距的定位方法和基于非测距的定位方法。

解决室内定位问题的早期方法通常为基于室外定位技术开发的基于测距的定位方法,如RSS、TOA和TDOA(time difference of arrival)等,TOA和TDOA技术的唯一区别是TDOA需要源节点之间的时间同步,而TOA需要锚节点(已知位置)和目标节点(未知位置)的时间同步。因此,仅当基于时间的定位技术使用由有效的时间同步协议提供的精确定时信息时,它们才可能支持更好的定位性能。无线网络受到能耗、实施成本和复杂度的限制,不能像有线网络那样支持标准时间。基于非测距的定位技术主要为基于数据库的定位技术,根据其不同地理位置具有的不同特征来依据数据匹配算法进行定位,如图像、信号、传感器等。该方法虽然可以适应复杂性较高的室内环境,但易受环境变化的影响,需定期更新数据库并占用较大存储空间。

根据定位发起者的不同,可将定位技术区分为主动定位和被动定位。主动定位由被定位终端发起定位服务并接收服务器返回的定位结果,常用于室内导航领域,常见应用为电子导医导诊系统、反向寻车系统以及购物导航系统等。相反,被动定位由服务器轮询发起定位请求,通过人员携带或物体上安装的定位标签对其进行实时定位,常用于垂直行业领域的人员、设备及物资管

理。此外,非标签的被动定位则多用于入侵检测,利用图像、信号解决室内安全防控问题。

根据定位结果的不同可将定位技术区分为绝对定位和相对定位,因相对定位的定位结果无法映射在具体的地理环境中,一般需与绝对定位结合获取初始位置。在融合定位方法中常利用卡尔曼滤波、粒子滤波等方法将相对定位方法与绝对定位融合,以获得更高精度、更低时延的定位结果。

面向更多样化的业务应用需求和更大覆盖的信号网络,6G室内定位性能应具有更细粒度的量化标准。如何对不同的定位技术进行选取和结合,可以参照以下性能指标。

- 定位精度:根据定位估计值与被测实际地理位置之间的欧氏距离,可以评定所使用的定位方法的精确度和准确度,6G场景下室内定位精度需达厘米级。
- 定位时延:指定位终端到达定位地点与服务服务器输出该定位结果之间的时间差,需考虑服务器输出定位结果的频率(即定位刷新率)以及被测终端的移动速度。越小的定位时延即表示越好的追踪效果,6G场景下有望实现时延小于1ms。
- 定位成本:包括设备成本、功耗成本以及人力成本。面对6G大连接物联网场景,定位成本往往成为定位技术首要考虑的性能指标。
- 定位容量:基于超密集组网和空天海地一体化网络,6G场景下定位系统的连接密度有望达到之前的2倍。

2.1 基于测距的室内定位技术

2.1.1 基于时间的定位方法

已知无线信号传播的时间以及信号传播速度为光速 $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 后,可以通过简单的计算式 $d = v \times \Delta t$ 获得信号传播的距离,在获取3个已知位置锚点向未知位置点发送信号经过的距离后,



即可通过三边测量法求得定位终端的地理位置。然而, 由于光速过大, 信号传播时间测量的结果将大大影响定位精度, 仅是毫秒级的传播时间测量误差也将导致几百米的定位误差。其中, 导致时间测量误差的主要原因有参考点和未知点的时间同步问题, 以及晶体振荡器产生的时钟漂移。此外, 室内多径影响也大大降低 TOA 的定位精度。

无线网络中每个节点的时间设置不会因为外部条件(如节点温度、压力、频率)的影响而改变, 时间同步是指在无线节点之间定义一个标准的公共时间帧。尽管许多已提出的无线时间同步协议可以提供一些帮助, 但仍然需要精确的时间同步^[13]。针对 TOA 对时间同步精度的高要求, 参考文献[14]提出了基于双向测距(two way ranging, TWR)的回环 TOA, 以减小误差。此外, 通过降低信号传播的速度, 也可将时间测量误差降低到可接受范围, 由此参考文献[15]提出了超声波 TDOA。此外, TDOA 可将接收端与发送端之间的时间同步转换为多个(3 个及以上)接收端之间的时间同步, 如发送端发送信号, 3 个接收端记录接收信号时刻, 并以某接收端的接收信号时刻作为基准, 计算接收端之间信号到达时间差, 并据此求解一组双曲线方程得到发送端位置估计。Hlaing 等人^[16]提出了一种基于有效混合 RBS-PBS 同步协议的 TDOA 方法, 并仿真验证了与现有方案相比, 该方案可以提供更高的定位精度以及更好的同步性能。

超宽带(ultra wide band, UWB)技术基于发射小于 1 ns 的超短脉冲, 占空比从 1 到 1 000, 发射信号在多个频带上发送。其低功耗、容量高、对信道衰落(如多径、非直射径等信道)不敏感、抗干扰性强等优势令 UWB 成为提高室内定位分辨率和精度、多径抗扰性的重要支撑。在实际应用中, 多径信号分量将被 UWB 接收机分解, 在满足 LOS(line of sight)条件的情况下, 参考 LOS 分量的第一条路径可以获得稳健的定位效果。然

而, 若不满足 LOS 条件, 则需要更复杂的技术以执行对初始时延的精确估计。Vecchia 等人^[17]提出大规模场景中基于 UWB 的 TDOA 定位方法 TALLA, 该方法依靠 TDMA 时隙表实现节点间拓扑结构的连续多跳机制, 可实现区域内节点时间同步, 避免了对专用外部同步节点的依赖性, 简化部署, 实现大规模区域内的连续精确定位。

2016 年, 我国政府在国家重点研发计划项目中支持研发用于室内外无缝定位的北斗/GPS 伪卫星。针对室内外卫星信号不良的环境, 伪卫星技术分为室外辅助增强伪卫星技术以及室内独立伪卫星技术, 可以增大卫星覆盖面积并弥补定位系统的几何结构缺陷。为使全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)接收机可以接收伪卫星信号, 其中心频率、码长、码率、信息率等与北斗和 GPS 极化方式相同。然而在实际应用中, 多径效应和远近效应干扰问题是必须解决的关键问题之一。常用解决方法除了对伪卫星的几何布局进行设计外^[17-18], 还可以通过改变伪卫星扩频码结构或调制方法减小干扰。Gan 等人^[19]采用 GNSS 系统接口文件规定的 PRN 码设计伪卫星扩频码, 调制方式采用“Pulse+BPSK”方法, 减轻了远近效应。

2.1.2 基于角度的定位方法

基于到达角的方法使用接收器侧天线阵列或多个超声波接收器来感知信号到达的角度, 此角度是基于接收节点主轴方向而定的。AOA 通过利用天线阵列各个单元接收信号的时间差来估计发射信号撞击接收器的角度, 在空间位置估计中仅需 3 个接收机就可以估计设备或用户位置。然而与 TOA 类似, AOA 测量角度精度将影响最后的定位精度, 到达角计算中的细微误差, 在被测终端距离接收机较远的情况下, 会转化为实际位置估计中的巨大误差, 因此该方法更适用于短距离小范围内的位置估计。此外, 室内环境的多径效应同样使得 AOA 较难获得 LOS-AOA, 相较其他方法, 更复杂的硬件

与校准方案也使 AOA 成本较高。

最新的 AOA 技术可以分为 3 类,即基于特征结构的算法、概率估计法和稀疏表示法。其中基于特征结构的算法中较为著名的基于超分辨率和空间平滑的多信号分类 (multiple signal classification, MUSIC) 算法已在 COTS Wi-Fi 平台上被验证具有良好的性能^[20]。在此算法的理论限制基础上, Zheng 等人^[21]提出一种基于加权 AOA 的定位方法,利用到达角估计误差的渐近方差的闭合表达式来量化到达角估计精度,并对不同估计精度 AOA 赋予不同权重,与未加权定位方法相比降低了 20% 的定位误差。

2.1.3 基于信号功率的定位方法

信号传播过程中损耗功率与发射机到接收机之间的距离呈正比, RSSI 为接收机接收的实际信号功率强度指标,在不考虑 NLOS 的情况下,接收机 RSS 越大,对应的信号传播距离也越大。使用简单的路径损耗传播模型,信号传播距离可估计为:

$$RSSI = -10n \lg d + RSSI_0 \quad (1)$$

其中, n 为路径损耗指数 (其值域为 2~5), $RSSI_0$ 为与接收机相距参考距离处的 RSSI 值。通过将路径损耗功率转化为距离,定位终端可以获取与至少 3 个参考点之间的绝对距离,利用几何或三角测量即可进行位置估计。虽然此法实现简单,计算复杂度较低,但室内环境下墙壁和其他障碍物将使信号传播过程中产生额外的衰减和波动,导致位置估计误差较大。

与 RSS 特征维数低、空间分辨率低、时间稳定性差的特点相比, CSI 可以提供多路副载波的相位和幅度信息,不仅反映了信号传播过程的衰减,还反映了此过程中的散射和折射。副载波 i 的信道频率响应 CSI_i 可以用极坐标的形式写为:

$$CSI_i = |CSI_i| e^{j\angle CSI_i} \quad (2)$$

其中, $|CSI_i|$ 和 $\angle CSI_i$ 分别表示第 i 个副载波的幅度和相位。当前,许多 IEEE 802.11 网卡都可以为 OFDM 系统提供子载波级信道数据,这些数据可

以转化为更加丰富的多径信息,实现更高的定位精度。

CSI 还可以用于 AOA 测距中。MUSIC 算法适用于多传感器或多天线情况下,然而商用 Wi-Fi 设备天线数量有限,室内多径现象严重,为此 Gjengset 等人^[22]提出了一种基于 CSI 的幅度和相位数据进行阵列信号角度测量的相位器系统,该系统通过共用一根天线消除了不同网卡之间的相位差,定位误差小于 1 m。Ahmed 等人^[23]提出了一种利用多个包的 CSI 值提高精度和速度的改进矩阵束 (modified matrix pencil, MMP) 算法,同时基于角度和时间进行测距,从 Wi-Fi CSI 中估计得到所有主要多径分量的 AOA 和 TOF,在相同的估计精度下,该方法执行速度比 2D-MUSIC 算法快近 200 倍。

2.1.4 基于视觉的定位方法

现代建筑中无处不在的 LED 光源为基于可见光通信 (visible light communication, VLC) 的室内定位技术提供了实施基础,且不需要依赖其他专有定位设施。根据所使用的光接收机不同,定位方法可分为基于摄像机的定位和基于传感器的定位。前者因成像几何可以实现高精度定位并且兼容性较强, Lumicast^[24] 基于智能手机的前置摄像头即可实现厘米级精度定位。后者使用光传感器来测量已知位置的 LED 发射器的入射光 AOA 或 RSS,并通过 VLC 识别码将其唯一 ID 与每个光测量与特定地标相关联,利用这些关联量的几何约束来确定目标位置。然而,LED 部署密度、几何布局、摄像机的视场和最远视野、周围环境对 LOS 的临时遮挡都将影响 LED 定位的精度。

2.2 基于非测距的室内定位技术

2.2.1 惯性导航定位

惯性导航定位技术依赖于现代智能手机内置的各类传感器,如加速度计、陀螺仪、磁力计等,其中包含了大量瞬时运动测量信息,通过这些智能手机 IMU,可抽象地描述用户的运动状态,如



行走的节奏、轨迹、运动状态等。通过惯性导航系统可进行行人航迹推算 (pedestrian dead reckoning, PDR), 其中包含 3 个方面: 步频检测、步长估计以及航向推算。

利用行人行走时加速度计检测到的计数周期性可进行行人步频检测, 其方法分为时域分析法、频域分析法和特征聚类法。航向推算依赖于手机内置陀螺仪或磁力计, 陀螺仪通过将 3D 角速度随时间积分成转向角度来推测行人航向变化, 磁力计直接测量手机相对于磁北的绝对航位。然而两者均有劣势, 陀螺仪受初始方向偏差影响, 最后的积分结果随时间漂移产生较大误差。磁力计受室内磁场干扰也会产生较大误差。因此, 将二者结合使用可提升 PDR 的鲁棒性和准确性^[25]。Wang 等人^[26]研究特殊地标 (如楼梯、电梯、玄关等) 独特的步态, 借助已知位置的地标进行机会磁轨迹匹配和室内路标识别, 以提高定位精度。当前, 大多数 PDR 算法都默认行人行走时手机是水平且指向行走方向的, 为了解决手机方位与默认指向不一致带来的推算误差问题, Wang 等人^[27]提出了一种与设备方向无关的航向估计方法。

由于惯性导航定位技术属于相对定位技术, 需要确定其初始位置及行进方向, 因此常配合其他绝对定位技术辅助定位。

2.2.2 指纹定位方法

基于位置指纹的室内定位技术也被称为基于数据库的定位技术, 其中, 指纹表示每一个地理位置点上包括信号、场强等各类特征在时空中对应的数据分布, 理论上, 此数据分布具有唯一性。借助地理位置与位置指纹的唯一性匹配, 可以通过各种匹配算法, 在已知当前位置的各特征数据分布下求解其位置估计。指纹定位技术由于其不受室内多径效应影响 (甚至依赖于室内环境与多径效应的潜在关系), 不需要已知基站位置和计算信号传播时间和到达角, 在室内部署中可行性高, 具有易实现、易测量、成本低等特点。

传统指纹定位技术包含主要的两个阶段: 离线训练阶段和在线匹配阶段。以信号 RSSI 为例, 离线阶段首先将定位区域划分为足够大密度的网格, 并在各个网格坐标点采集来自不同 Wi-Fi 接入点 (access point, AP) 的 RSSI 指纹数据, 保存每个位置的多维指纹至指纹数据库。在线阶段, 定位终端将采集到的 RSSI 多维数据输入定位系统, 定位系统通过定位算法找到与该数据最匹配的离线指纹数据, 并输出对应位置坐标。理论上, 即使采集到的数据具有时变性, 且受环境因素影响, 只要训练样本充足, 算法合理, 在离线阶段利用人工神经网络等方法调整网络权重, 就可以提高定位精度, 具有较好的容错性。定位算法可以基于最小化欧几里得距离来计算:

$$\hat{x} = \arg \max_{x_j} \left(\sum_{i=1}^n (r_i - \rho_i(x_j))^2 \right) \quad (3)$$

其中, r_i 为在线阶段测得的指纹数据, $\rho_i(x_j)$ 为离线指纹数据库。

基于距离的确定性算法 (如 KNN、WKNN、SVM 等) 通常较为简单, 拥有较好的鲁棒性, 这种方法对一段时间内每个位置上每个 AP 的指纹数据通常只保存一个确定的值, 如均值。然而, 实际上无线环境是时变的, 确定性算法无法反映一段时间内数据的分布趋势。通过在给定用户位置处 RSS 测量值的概率分布估计 $p(x|r_1, \dots, r_n)$, 可以运用贝叶斯定理, 最大化后验概率得到最有可能的位置估计。

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \arg \max_x p(x|r_1, \dots, r_n) \\ p(x|r_1, \dots, r_n) &= \frac{p(r_1, \dots, r_n|x)p(x)}{p(r_1, \dots, r_n)} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 先验分布 $p(x)$ 包含关于用户个人的附加信息, 比如对某个特定位置的倾向。大多数公共场所中, 假设没有关于用户位置的先验信息, 并且所有位置可以以相等的概率被访问, 在这样的条件下, 求解位置等价于最大似然估计。概率参数

定位算法中两个最常用的例子为覆盖区域 (coverage area, CA) 模型和路径损耗 (path-loss, PL) 模型。前一种方法使用椭圆概率分布对可以接收 AP 信号的区域进行建模, 给定所有 AP 的覆盖区域, 可以将用户位置计算为椭圆中心的加权平均值, 其权重由椭圆形状参数确定; 后一种方法基于根据指纹数据校准的 RSS 功率损耗模型。

对于指纹数据而言, 数据差异性是在线阶段定位算法进行回归匹配的基本, 粒度越细的指纹表示越能区分两个相似指纹, 所提供的定位性能也就越好, 同理, 数据维度越高, 也能获取更好的定位性能。此外, 特征的选取也将大大影响定位精度。常见指纹包括 Wi-Fi、4G/5G、蓝牙等信号信息、地磁、重力场、光强、温湿度等。基于 Wi-Fi 或蓝牙的定位常使用 RSSI 作为指纹, 由于 Wi-Fi 和蓝牙的分布广泛、易于部署、低功耗等特点常被用于指纹定位, 但其易受环境影响, RSSI 波动无法忽略, 因此, 鲁棒性更高的 CSI 可以提供更高的定位精度。

此外, 现有定位终端 (如智能手机、可穿戴设备、传感器等) 多种多样, 不同设备具有不同的 Wi-Fi 芯片组敏感性、不同的天线安装位置以及不同的操作系统, 以致不同设备获取的环境数据存在差异。设备异构性将会影响室内定位的性能。解决设备异构性的方式包括设备的离线校准和在线校准与适配^[28]。

2.2.3 无须构建指纹库的定位方法

指纹定位离线阶段的劳动密集型数据采集工作耗时耗力, 当信号 AP 变化、甚至室内环境变化时都必须重建指纹库。为此, 研究者提出了无须构建离线指纹库的方法, 包含即时定位与建图 (simultaneous localization and mapping, SLAM) 技术、内/外插 (extrapolation and interpolation, TIX) 技术和众包技术。

在 SLAM 中, 人的路径和地标位置都是在线估计的, 而无须任何先验环境信息。移动机器人

使用 SLAM 技术在未知环境中建图, 同时确定其在已建图中的位置。根据机器人所使用传感器的不同, 可将 SLAM 技术分为激光 SLAM、视觉 SLAM 及多传感器融合 SLAM^[29]。

TIX 需要至少 3 个 AP 测量接收的信号捕捉用户的位置, 被测终端向定位服务器发送定位请求, 服务器接收请求后向所有客户端和 AP 请求 RSS 测量值。即每个 AP 报告其他 $(n-1)$ 个 AP 的 RSS 值, 定位终端报告所有 AP 的 n 个 RSS 值。定位服务器使用信号空间邻近度 (proximity in signal space, PSS) 方法, 根据 AP 之间的 RSS 测量值来为每个观察的 AP 生成多个距离映射曲线, 此曲线将 RSS 值映射到 AP 间的距离。常用映射方法包括三角内插法及三角外插法, 通过定位终端与已知位置 AP 之间的相对距离来进行位置估计。然而, 随 AP 数量增加, TIX 计算过程将变得复杂耗时^[30]。

众包即通过将传统劳动密集型任务外包给一群人, 通过集体协作完成大规模任务。Walkie-Markie 是一个基于众包的室内定位系统, 它将大量用户通过智能手机 IMU 获得的轨迹与称为 Wi-Fi 标记的特殊地标相结合, 自动生成建筑物的室内地图^[31]。该系统利用 RSS 在靠近 Wi-Fi AP 时的趋势临界点标记 AP 位置以及 AP 的 MAC 地址, 相对而言不受设备异构性及环境因素的干扰。大量用户的参与将使地图构建更加方便和准确。然而此类众包解决方案大多依赖于基础设施提供的数据参考, 限制了方案普适性。He 等人^[32]提出了一种基于惯性感知的众包方案 SenseWit, 利用 IMU 记录行人行为偏好数据并据此标记特殊位置 (如转角、门口、饮水机)。此外, 设计了一种高效的路径捆绑算法来将所标记的路径捆绑生成平面布局图。

2.3 融合室内定位方法

融合室内定位 (fusion-based indoor positioning, FBIP) 方法通过结合不同定位技术之间的互



补性可以增加现有单一定位技术的定位性能。现有 FBIP 可以分为 3 个部分：信源、算法和融合权重。信源指待融合的数据，通过算法来获取定位结果，合理分配权重以有效地合并定位结果以产生最优的位置估计。信源数据可以通过前述任意室内定位技术提供，各室内定位技术的比较见表 2。

不同信源数据的融合定位可以分为同构定位系统以及异构定位系统，同构定位系统从独立网络（如 WLAN、GSM、ZigBee 等）中获取多个相同或不同种类的测量值（如 TOA、AOA、RSS 信息）。例如，Li 等人^[33]提出一种将 AOA 和 TOF 混合度量引入 RSS 指纹识别系统的融合定位方法，并仿真证实了融合方案拥有更好的精度和覆盖范围。异构定位系统能够更好地利用用户的环境信息，组合来自多个不同网络的同类型测量值，以补偿独立网络的限制。例如，Gan 等人^[19]采用伪卫星技术与 PDR 结合以降低室内外无缝定位应用成本。

考虑上述不同来源数据，如何将它们有效地融合是提高 FBIP 系统性能的关键。常见融合定位算法包括最小二乘法、最大似然法、最小均方误差法等，它们既可用于几何定位系统也可用于指纹定位。指纹定位中常用机器学习进行指纹匹配，包括 KNN、随机森林、支持向量机、神经网络等算法。常用状态估计方法包括隐马尔可夫模型、卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波和粒子滤波。

3 协作式室内定位

室内环境具有复杂几何形状的各种动态场景，包括住宅、办公室、仓库、医院、商场等，针对终端用户的应用也多种多样，对精度、时延、成本与覆盖范围均有不同要求，因此，室内场景的特殊性和应用的多样性使得单一的室内定位系统无法成为通用解决方案，而是不同的定位技术并存。

协作定位是一种基于不同设备或不同 IPS 之间的直接或间接交互来进行位置估计的方法。与传统的室内定位系统相比，协作式室内定位系统（collaborative indoor positioning system, CIPS）带来多方面优势：CIPS 可以通过不同网络间共享用户的位置来扩大独立 IPS 的覆盖范围，通过不同设备间协作减少昂贵或复杂的定位基础设施的部署，并且通过多系统融合提高用户的定位精度。CIPS 削减了由于 AP 布局不佳而造成的定位模糊性，还可以利用周围用户作为辅助节点以减少 NLOS 环境中的定位误差。需要与融合定位方法区别开来的是，CIPS 是基于多个独立的用户或设备之间交换信息并计算彼此之间的相对距离以提供用户位置集合的系统，而融合定位方法基于单个用户或设备的多种传感器信息或多种定位技术进行协同定位决策，本质上仍是单一 IPS。

协作定位可以根据其协作端的不同分为网络间协作与设备间协作，前者主要指室内通信网络

表 2 各室内定位技术的比较

定位技术	定位精度	硬件成本	受 NLOS 影响	缺陷
UWB/超声波/伪卫星-TOA	毫米级~厘米级	高	是	需精密的时间同步，普适性差
UWB- AOA	分米级	高	是	需硬件支持 AOA 测量
功率	米级	低	是	受环境影响，可靠性差
视觉	厘米级	高	是	抗干扰性差，距离短，成本高
指纹	米级	低	否	维护人力成本高，精度低
惯导	米级	低	否	受 IMU 精度和累积误差影响

与室外卫星网络的协作定位,后者主要利用不同设备间的位置信息共享实现协同定位。此外,由于CIPS与单一IPS相比,组成架构更加复杂,参与者(用户或设备)更多,通常可以根据其架构特点分为集中式CIPS和分布式CIPS。这两种协作定位架构都是基于不同设备或网络间的数据共享和信息协作完成位置估计任务。

3.1 集中式协作定位

以设备间协作为例,传统的基于设备的集中式CIPS架构如图1所示,存在一个中心服务器,用于接收从各传感器/节点/用户处收集来的数据并进行数据处理、模型训练、决策优化等任务。中心服务器可以通过估算被定位终端与其通信范围内的已知位置设备间距离来确定其坐标。

Cullen 等人^[34]提出一种基于集中式协作架构CAPTURE的突破当前IPS定位范围限制的解决方案。CAPTURE利用传统通信网络中的“机会信号”向使用这些网络的设备发送数据,并与其他设备协作以对丢失设备进行位置估计。CAPTURE使用RSSI估计设备间的距离以确定丢失设备的坐标值。为使CAPTURE可以在网络内

协作定位未知设备,在此设备附近必须存在至少3个参考设备,其中每一个都必须在预先存在的IPS中对其位置具有先验知识,参考设备可以是固定服务点、LED以及其他移动用户。该架构中,中心服务器用于存储设备收集的所有数据并通过定位算法确定未知设备坐标。

Vaghefi 等人^[35]提出了一种基于半定性编程(semidefinite programming, SDP)的新型传感器跟踪算法,具有减轻NLOS影响的能力,并将其扩展到协作定位网络,同时考虑了节点间的连通性限制。仿真结果表明,在典型的室内环境中,源节点之间的协作可以使定位性能提高33%以上。Zhu 等人^[36]提出了一种集中式智能指纹定位架构。该架构由终端层、IoT设备层、IoT云组件层、定位决策层、云服务和定位App组成,其面向智能技术,具有自适应和自学习能力,并且结合广义学习、混沌理论等多学科交叉方法解决定位安全问题。

集中式CIPS架构依赖于中心服务器,架构缺乏可扩展性,并且在中心服务器故障或遭受攻击等特殊情况下可能导致整个系统崩溃,鲁棒性不

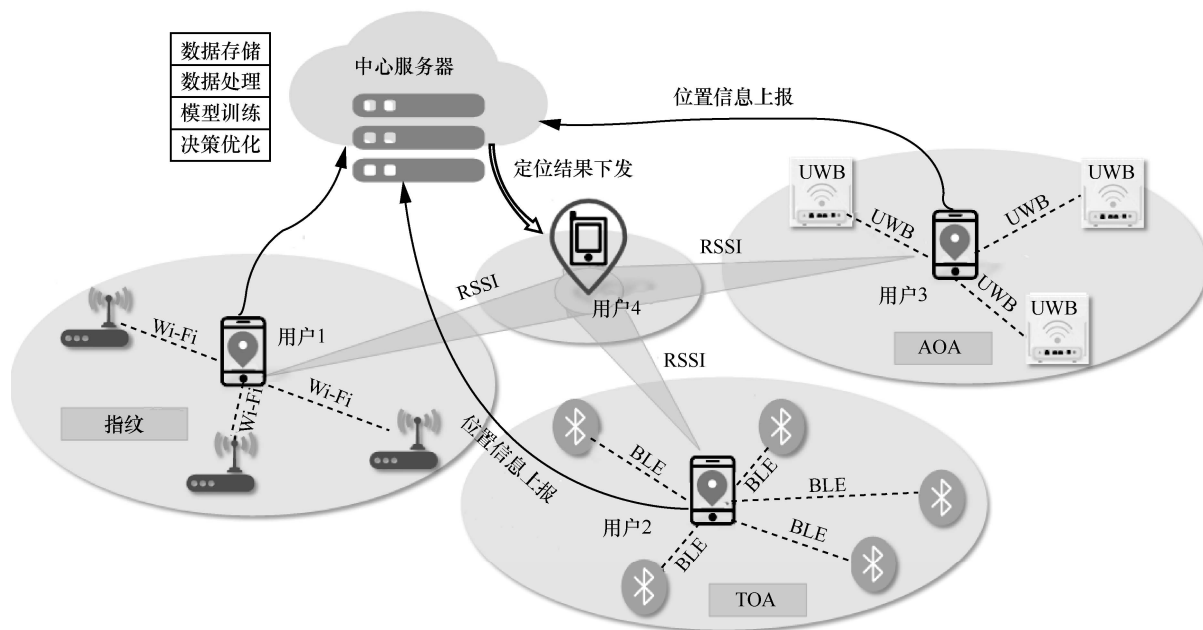


图1 基于设备的集中式CIPS架构



足。因此近年来，分布式架构逐渐在研究中占据主导地位。

3.2 分布式协作定位

以设备间协作为例，传统分布式 CIPS 架构如图 2 所示。在分布式架构中，各终端除了获取和共享数据外，也同时进行数据处理，确定自身位置。再利用 RSSI 映射得到设备间距离，用于进行未知设备位置估计。

Li 等人^[37]提出一种协作邻近方法减少定位所需的蓝牙信标数量。该方法可以通过使用参与定位的用户终端来临时增加定位区域中的蓝牙信标数量，其主要利用蓝牙技术的双向通信特性，即手机中的蓝牙模块不仅负责外部信号的接收，同时还作为信标节点向外广播蓝牙信号，并将校正后的位置坐标广播给其他终端作为参考节点。Qiu 等人^[38]提出了 CRISP 系统用以改善智能手机定位性能，其利用多个智能手机交互的机会，每个智能手机在估计自身位置的同时与附近的终端共享位置信息，并实现米级定位精度。该系统定期测量用户设备上的 IMU，通过引入平均速度预测改进 PDR 定位，用于系统的非协作定位阶段。在协作定位阶段，CRISP 会定期向周围其他终端广播

蓝牙、ZigBee 和 Wi-Fi 信号，并检测和分析接收其他设备的 RSSI 值变化，用户通过 RSSI 估计自己到其他设备间的距离用以估计自身坐标。

相较集中式 CIPS 架构，分布式 CIPS 架构避免了通信拥塞、响应时延以及对中心服务器的依赖，成为如今 CIPS 发展更合适的选择。然而，由于用户设备终端计算能力的限制，定位算法复杂度需纳入 CIPS 考量标准中，并且由于设备异构性，定位方案可能并不适用于所有用户。

4 6G 室内定位候选技术

4.1 太赫兹辅助的室内定位技术

太赫兹具有丰富的频谱资源，其大带宽、高速率、高分辨率、强抗干扰能力等特性可以为复杂多径环境下的室内定位提供更高精度、更低时延的解决方案。

太赫兹卓越的时间分辨率和大编码容量，有利于 TOA、TDOA 等基于时间的定位技术的性能提升。El-Absi 等人^[39]提出了一种基于回环 TOF 的无芯片 RFID 定位系统，其中回环 TOF 测距的精度受多径传播的影响，相应的，带宽越大，回环 TOF 测距的精度也越高，利用太赫兹的大带宽

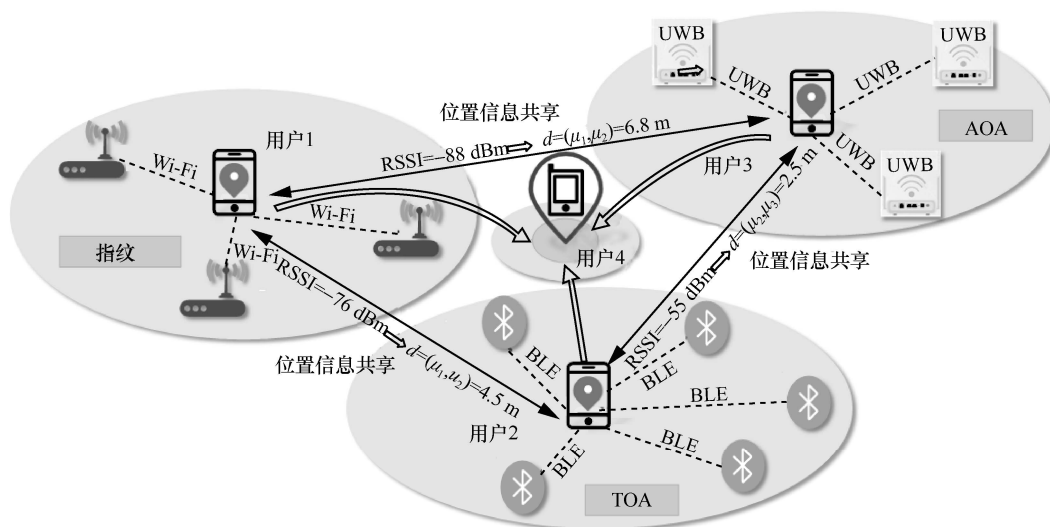


图 2 基于设备的分布式 CIPS 架构

优势,可以突破此前基于 UWB 的功率限制和多径影响,实现毫米级定位精度。在静态室内环境下,太赫兹通信的信道响应可被描述为一条视距传播路径、 N_{rfe} 条反射路径和 N_{dif} 条衍射路径,用户移动将导致太赫兹的波束空间快速变化并反映在其 CSI 信息中。Fan 等人^[40]提出了一种基于 SBi-LSTM 的 3D 太赫兹室内定位方法,提取并利用了太赫兹的 CSI 信息,在基于射线追踪生成的仿真环境下验证了该算法对室内 NLOS 定位的鲁棒性和收敛性,实验结果表明此方案可将定位平均误差降低至 0.27 m。

4.2 基于大规模多天线的室内定位技术

大规模多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 使用大量基站天线及测量的 CSI 信息在空间上复用户终端,具有高频谱效率、高方向性和低复杂度等优势,因此具有提供精确定位的潜力。其中,大规模 MIMO 的 CSI 信息可以被提取并用于用户定位。由于大规模 MIMO 系统本身依赖于 CSI 进行通信,因此使用 CSI 定位并不会在系统中引入额外开销。Garcia 等人^[41]基于大规模 MIMO 提出了一种直接定位方法,解决了 NLOS 场景下窄带定位问题。Lin 等人^[42]针对毫米波大规模 MIMO 系统提出了一种基于混合 RSS-AOA 的三维室内定位方案,通过大量仿真验证了该方案即便对于干扰较大的区域也能获得分米级的定位精度。此外,将太赫兹与大规模 MIMO 相结合,可以更大程度地提升信号分辨率,如角度分辨率和距离分辨率,有利于 AOA 的感知精度提升,同时还具有大连接的优势,可以提高工业物联网场景下的定位容量,为海量设备的 LBS 提供支撑。

4.3 基于可重构智能表面的室内定位技术

可重构智能表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 由大量低成本的无源单元组成,可以在偏置电压的控制下重新配置其物理参数,因此可以充当可控的发射器或接收器。Ma 等人^[43]

利用 RIS 标记信道和代替传统主动定位锚点的能力,提出了一种室内 RIS 辅助定位方法,使用 RIS 标记信道并将 UWB 信号用于多径识别,仿真表明基于 RIS 的单锚点 TOA 定位可实现米级的定位效果。在遮挡场景下,利用 RIS 主动修改入射电磁波的能力,可以避免 NLOS 阻塞,提高定位的精度和连续性。例如在工业互联网场景下,通过 RIS 创建稳健的多路径信道,可以动态地跟踪定位目标的移动,有望实现高移动性场景下的精准定位。

5 6G 室内定位面临的挑战

6G 在此前通信技术的基础上向着更高通信频率、更大带宽和更大规模的天线阵列发展,基于太赫兹和可见光的高频接入技术可以使室内定位解决方案具有良好的距离分辨率和角度分辨率,更大程度地削弱 NLOS 对定位精度的影响^[44];大规模天线阵列和先进的波束空间处理技术将推动更高精度的用户目标同步跟踪及环境地图绘制,用以实现无线环境图自动化更新绘制;新型材料和可重构表面将允许网络运营商控制并重塑室内环境电磁响应,成为定位技术潜在的发展方向。此外,6G 网络的更高精度的时间同步也将从源头缓解需要严格时间同步的定位技术(如 TOA、TDOA 等)的计算误差。另一方面,在单一定位技术日趋成熟的情况下,基站间融合室内定位以及不同网络间协作室内定位是进一步提高室内定位精度和鲁棒性的有效途径。然而与室外卫星定位完整的体系结构相比,室内定位平台仍不成规模,无法统一实施部署。

总体而言,6G 室内定位发展仍存在以下机遇与挑战。

- 安全与隐私:当前对于室内定位系统涉及的安全与隐私问题尚未有成熟的解决方案,尤其是基于网络和云的定位方案(如 CIPS),容易因协作过程中不够安全的数据



交换泄露用户自身的位置, 虚拟运营商和服务供应商数量的增多也将给 6G 定位链加入不安定因素^[45]。

- 标准化缺乏: 不同的室内定位系统仍旧依赖特定环境而设计, 在部署难易程度、覆盖范围、维护成本、定位精度等方面存在各自的不足之处, 室内定位标准尚未成熟统一, 缺乏解除环境依赖性的普适解决方案。
- 硬件约束: 当前太赫兹器件, 如功率放大器、相控天线、射频模块等硬件设施都未成熟, 无法满足大范围定位需求, 此外, 大规模 MIMO 技术也受限于高集成度的射频电路的优化挑战^[46]。

参考文献:

- [1] 项弘禹, 肖扬文, 张贤, 等. 5G 边缘计算和网络切片技术[J]. 电信科学, 2017, 33(6): 54-63.
XIANG H Y, XIAO Y W, ZHANG X, et al. Edge computing and network slicing technology in 5G[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(6): 54-63.
- [2] 聂凯君, 曹侯, 彭木根. 6G 内生安全: 区块链技术[J]. 电信科学, 2020, 36(1): 21-27.
NIE K J, CAO B, PENG M G. 6G endogenous security: blockchain technology[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(1): 21-27.
- [3] 张彤, 任奕璟, 闫实, 等. 人工智能驱动的 6G 网络: 智慧内生[J]. 电信科学, 2020, 36(9): 14-22.
ZHANG T, REN Y J, YAN S, et al. Artificial intelligence driven 6G networks: endogenous intelligence[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(9): 14-22.
- [4] SUN Y H, PENG M G, MAO S W. Deep reinforcement learning-based mode selection and resource management for green fog radio access networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 1960-1971.
- [5] 尹博南, 艾元, 彭木根. 雾无线接入网: 架构、原理和挑战[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 20-27.
YIN B N, AI Y, PENG M G. Fog computing based radio access networks: architecture, principles and challenges[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 20-27.
- [6] 彭木根, 孙耀华, 王文博. 智简 6G 无线接入网: 架构、技术和展望[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(3): 1-10.
PENG M G, SUN Y H, WANG W B. Intelligent-concise radio access networks in 6G: architecture, techniques and insight[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(3): 1-10.
- [7] 刘杨, 李珺, 陈文韵, 等. 面向 6G 的雾无线接入网内生安全数据共享机制研究[J]. 通信学报, 2021, 42(1): 67-78.
LIU Y, LI J, CHEN W Y, et al. Research on endogenous security data sharing mechanism of F-RAN for 6G[J]. Journal on Communications, 2021, 42(1): 67-78.
- [8] LATVA-AHO M, LEPPÄNEN K, CLAZZER F, et al. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence[Z]. 2020.
- [9] Indoor Atlas. The rise of indoor positioning-a 2016 global research report on the indoor positioning market[R]. 2016.
- [10] Market and Markets. Indoor location market by component (technology, software tools, and services), deployment mode (cloud, and on-premises), application, vertical (transportation, hospitality, entertainment, retail, and public buildings), and region - global forecast to 2022[R]. 2020.
- [11] NI L M, LIU Y H, LAU Y C, et al. LANDMARC: indoor location sensing using active RFID[C]//Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2003. (PerCom 2003). Piscataway: IEEE Press, 2003: 407-415.
- [12] YANG L, CHEN Y K, LI X Y, et al. Tagoram: real-time tracking of mobile RFID tags to high precision using COTS devices[C]//Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2014: 237-248.
- [13] KHEDIRI S E, NASRI N, SAMET M, et al. Analysis study of time synchronization protocols in wireless sensor networks[J]. International Journal of Distributed & Parallel Systems, 2012, 3(3): 155-165.
- [14] WANG A Y, SONG Y. Improved SDS-TWR ranging technology in UWB positioning[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Sensor Networks and Signal Processing (SNSP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 222-225.
- [15] ZHANG R, HÖFLINGER F, REINDL L. TDOA-based localization using interacting multiple model estimator and ultrasonic transmitter/receiver[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(8): 2205-2214.
- [16] HLAING Y, MAUNG N A M. An enhanced time-based wireless indoor localization using synchronized TDoA technique[C]//Proceedings of 2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Piscataway: IEEE Press, 2019: 693-696.
- [17] VECCHIA D, CORBALÁN P, ISTOMIN T, et al. TALLA: large-scale TDOA localization with ultra-wideband radios[C]//Proceedings of 2019 International Conference on In-

- door Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-8.
- [18] 程建强, 牡丹, 周云, 等. 基于多阵元的室内伪卫星几何布局研究[J]. 无线电工程, 2020, 50(9): 762-768.
- CHENG J Q, DU D, ZHOU Y, et al. Research on geometric layout of indoor pseudo-satellite based on multiple array elements[J]. Radio Engineering, 2020, 50(9): 762-768.
- [19] GAN X L, YU B G, HENG Z, et al. Indoor combination positioning technology of Pseudolites and PDR[C]//Proceedings of 2018 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [20] WAN C C, HAN F Y, LIU P F, et al. iLoc: non-invasive localization for mobile devices with COTS Wi-Fi access points[C]//Proceedings of 2020 6th International Conference on Big Data Computing and Communications (BIGCOM). Piscataway: IEEE Press, 2020: 24-32.
- [21] ZHENG Y, SHENG M, LIU J Y, et al. Exploiting AoA estimation accuracy for indoor localization: a weighted AoA-based approach[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(1): 65-68.
- [22] GJENGSET J, XIONG J, MCPHILLIPS G, et al. Phaser: enabling phased array signal processing on commodity Wi-Fi access points[C]//Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2014: 153-164.
- [23] AHMED A, ARABLOUEI R, HOOG F, et al. Estimating angle-of-arrival and time-of-flight for multipath components using Wi-Fi channel state information[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1753.
- [24] JOVICICA. Qualcomm lumicast: a high accuracy indoor positioning system based on visible light communication[Z]. 2016.
- [25] 亢璐. 基于 Wi-Fi 指纹与 PDR 融合的室内定位算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- KANG L. Research on indoor positioning based on fusion of Wi-Fi fingerprint and PDR [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [26] WANG Q, LUO H Y, ZHAO F, et al. An indoor self-localization algorithm using the calibration of the online magnetic fingerprints and indoor landmarks[C]//Proceedings of 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-8.
- [27] WANG Q, LUO H Y, XIONG H, et al. Pedestrian dead reckoning based on walking pattern recognition and online magnetic fingerprint trajectory calibration[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(3): 2011-2026.
- [28] HE S N, CHAN S H G. Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: recent advances and comparisons[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 466-490.
- [29] 田野, 陈宏巍, 王法胜, 等. 室内移动机器人的 SLAM 算法综述[J]. 计算机科学, 2021: 1-26.
- TIAN Y, CHEN H W, WANG F S, et al. Overview of SLAM algorithms for mobile robots[J]. Computer Science, 2021: 1-26.
- [30] JANG B, KIM H. Indoor positioning technologies without offline fingerprinting map: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 508-525.
- [31] SHEN G, CHEN Z, ZHANG P, et al. Walkie-Markie: Indoor pathway mapping made easy[C]//Proceedings of 10th {USE-NIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation. [S.l.:s.n.], 2013: 85-98.
- [32] HE Y, LIANG J Q, LIU Y H. Pervasive floorplan generation based on only inertial sensing: feasibility, design, and implementation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(5): 1132-1140.
- [33] LI C L, TROGH J, PLETS D, et al. CRLB-based positioning performance of indoor hybrid AoA/RSS/ToF localization[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [34] CULLEN G, CURRAN K, SANTOS J, et al. CAPTURE - Extending the scope of self-localization in Indoor Positioning Systems[C]//Proceedings of 2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-10.
- [35] VAGHEFI R M, BUEHRER R M. Cooperative source node tracking in non-line-of-sight environments[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(5): 1287-1299.
- [36] ZHU X Q, QU W, QIU T, et al. Indoor intelligent fingerprint-based localization: principles, approaches and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2634-2657.
- [37] LI X S, SHAO Y R, ZHAO F D. An indoor positioning approach using smartphone based on PDR and EKF[C]//Proceedings of 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Piscataway: IEEE Press, 2020: 182-187.
- [38] QIU C, MUTKA M W. Cooperation among smartphones to improve indoor position information[C]//Proceedings of 2015 IEEE 16th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-9.
- [39] EL-ABSI M, ALHAJ ABBAS A, ABUELHAJA A, et al. High-accuracy indoor localization based on chipless RFID systems at THz band[J]. IEEE Access, 2018(6): 54355-54368.
- [40] FAN S K, WU Y Z, HAN C, et al. A structured bidirectional LSTM deep learning method for 3D terahertz indoor localization



- tion[C]//Proceedings of IEEE InfoCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 2381-2390.
- [41] GARCIA N, WYMEERSCH H, LARSSON E G, et al. Direct localization for massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(10): 2475-2487.
- [42] LIN Z P, LV T, MATHIOPOULOS P T. 3-D indoor positioning for millimeter-wave massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(6): 2472-2486.
- [43] MA T, XIAO Y, LEI X, et al. Indoor localization with reconfigurable intelligent surface[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(1): 161-165.
- [44] SARIEDDEEN H, SAEED N, AL-NAFFOURI T Y, et al. Next generation terahertz communications: a rendezvous of sensing, imaging, and localization[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(5): 69-75.
- [45] YLIANTILA M, KANTOLA R, GURTOV A, et al. 6G white paper: research challenges for trust, security and privacy[J]. arXiv preprint arXiv:2004.11665, 2020.
- [46] 赵军辉, 李一博, 王海明, 等. 6G 定位的潜力与挑战[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 75-81.
- ZHAO J H, LI Y B, WANG H M, et al. 6G localization: potentials and challenges[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 75-81.

[作者简介]



万潇阳(1997-), 女, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为室内定位技术。



孙耀华(1992-), 男, 博士, 北京邮电大学助理研究员, 主要研究方向为 5G 试验平台、人工智能驱动的网络优化。



王则予(1997-), 女, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为星地融合网络。