

# 高精度室内定位研究评述及未来演进展望

王慧强, 高凯旋, 吕宏武

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 如今, 高精度室内定位服务因成为众多 5G 重大应用场景的关键支撑而受到广泛关注, 其实现技术、实施方案不断更新, 且各具优缺点及特异性。因此, 对高精度室内定位服务进行时效的、系统化的总结, 并对其演进方向进行分析。首先, 在总结已有的综述类文献的基础上, 按定位技术、定位方案 2 种不同维度对室内定位领域进行分类总结; 其次, 提出了基于定位场景的分类, 指出了其中蕴含的“隐性要求”; 再次, 提出了定位系统评价指标体系并对现有高精度定位系统进行评估; 最后, 总结了高精度室内定位领域未来的演进方向, 指出了网络一体化发展的趋势, 提出了“在线即到位”等重要概念。

**关键词:** 定位导航; 室内定位; 5G; 一体化网络; 定位技术

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2021136

## Survey of high-precision localization and the prospect of future evolution

WANG Huiqiang, GAO Kaixuan, LYU Hongwu

College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

**Abstract:** Nowadays, high-precision indoor positioning service has witnessed an increasing interest because it has become the key support of many 5G major application scenarios, and the implementation technologies and mechanisms are continuously updated with advantages, disadvantages and specificities. Therefore, a timely and systematic summary of indoor-positioning was made, and that of prospects for where this domain was heading. Firstly, based on the analysis of the existing papers, summarization of this domain was proposed from two aspects, such as positioning-techniques and positioning-methods. Secondly, a classification model was put forward based on the positioning scenarios and the “hidden requirements” included were pointed out. Then, the evaluation indices system of positioning-systems was proposed and some of the existing high-accuracy positioning system was evaluated by it. Finally, the direction of evolution about high-precision indoor positioning domain was summarized, the development trend of integrated network was pointed out, and some important concepts, such as “online is inplace”, were proposed.

**Keywords:** positioning and navigation, indoor positioning, 5G, integrated network, positioning technology

### 1 引言

从古至今, 人类始终关心一个颇具哲学意味的问题——“我在哪里”。从千年前的人类在夜空下遥望星河, 到依靠经验和模糊的观测绘制的初具现代化意味的地图, 再到近现代人类在计算机技术、

无线通信技术甚至空间技术的帮助下, 不断探索更准确、高效地获取位置信息的途径, 人类在高精度定位技术、方法和系统的尝试与研究上从未停止。

现如今, 人类拥有了四大全球卫星定位系统, 在地面逐步建立建成了 5G 移动通信系统, 室内、

收稿日期: 2021-01-27; 修回日期: 2021-06-02

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2016ZX03001023)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of China (No.2016ZX03001023)

室外高精度定位早已成为一项不可或缺的基础技术，并在各行各业（包括生产、医疗、商业以及生活服务）中发挥重要作用。近年来，随着我国北斗卫星导航系统的不断完善，以及5G及其相应基础设施的推广和部署，室内、室外高精度定位与导航领域发展迅速，各项技术取得新突破，一大批依托新技术、新成果开发而成的定位服务系统不断涌现，其中不乏部分技术、方法或系统已在国际、国内达到先进水平并取得领先地位。

### 1.1 已有文献评述

目前，高精度定位领域内已发表了大量综述类文献<sup>[1-17]</sup>和一般性研究文献<sup>[18-25]</sup>，但由于综述类文献具有一定的时效性，本文将关注重点放在近10年相关领域发表的文献上，也包含少量发表时间稍长但行业认可度极高的文献<sup>[26]</sup>。文献[6]针对当时较新的室内定位技术方法进行了归纳总结，从准确性、成本、复杂性、安全性等方面对其进行评价；此外，该文还基于当时的技术环境着重介绍了基于室内定位服务的各类应用。在其之后，Zafari等<sup>[27]</sup>进一步完善了其工作，提出从更多维度考察当时最新的定位系统的综合性能。此外，该文将重点放在了新兴物联网（IoT, Internet of things）技术背景下的室内定位领域的新机遇和新挑战，得出了当时的物联网技术不支持亚米级精度定位的结论。还有部分文献<sup>[28-30]</sup>专门对于某一特定限制条件下的室内定位进行了综合评述，其中，文献[28]通过SWOT（strength weakness opportunity threat）模型分析了超宽带（UWB, ultra wide band）技术在定位中的应用和发展状况。文献[5]则主要介绍关于指纹定位的方法，列举了先进的Wi-Fi指纹定位技术和高效的系统部署，通过对比分析提出了未来的发展方向。文献[30-31]除了列举部分室内定位系统及其原理、分析它们的优缺点以外，还提出了融合定位及导航通信一体化定位是提高定位精度及稳健性的有效方法。其将通信与定位和导航联系在一起进行考虑和评估，对未来定位技术做出了不同的展望。此外，胡青松等<sup>[32]</sup>对无线定位技术的经典理论和前沿技术进行了介绍，并按照无线定位的通信技术、基本原理、进阶算法等角度对本领域进行分类剖析和总结，将定位过程中涉及的物理层技术与逻辑层技术剥离，具有脉络清晰、体系完整的特点。

综上所述，学术界已有部分关于高精度定位技

术、方法及其应用的综述类文献，但经笔者查阅总结，其普遍存在以下不足：1) 未能将定位技术、定位方案和定位系统这3个分类维度进行区分，往往一概而论；2) 未能面向未来网络演进的特性，分析不同技术、方法在网络一体化方面的表现；3) 评价定位技术的性能往往从单一的“定位精度”出发，未能顾全到适应性、实时性、成本、可用性、网络一体化程度等综合因素；4) 未能发现不同场景中对定位技术暗含的隐性要求；5) 未能从网络发展演进的维度对未来定位网络发展方向做出演进预测。

### 1.2 本文主要贡献

本文较全面、系统地整理了到目前为止高精度室内定位领域的主流技术和分类体系，为了更好地对现有定位系统进行综合评述，还提出了全新的分类方法和多维度评价指标体系，更加符合未来网络的本质特征及演进趋势。

1) 本文对近年来认可度较高且具有代表性的文献以及定位系统进行分析评述。

2) 本文从定位技术、定位方案2个不同维度对近年来本领域研究热点进行分析评述。

3) 本文提出了基于定位场景的分类方法，并指出了隐含于实际使用环境，极其重要却容易被忽视“隐性要求”。

4) 本文提出了一种用于评估定位系统、定位技术的综合评价指标体系，并使用本指标体系，从适用性、定位精度、实时性、成本、覆盖范围、可用性以及网络融合一体化特性等方面对各类定位方法、技术以及系统进行评定分析。

5) 本文指出了未来高精度定位领域高度一体化的发展方向，提出了“在线即到位”“全知网下隐私保护”等重要概念，指明了本领域的发展趋势、关键问题和未来愿景。

## 2 关键定位技术评述

本节将重点关注室内定位领域的各类主流技术方法，详细讨论不同方法背后的原理或数学模型，并分析其优缺点。

### 2.1 ToF/ToA

ToF（time of flight）或ToA（time of arrival）定位方法被称为“飞行时间”或“到达时间”定位方法。ToA定位方法原理如图1所示，依靠测量电磁波的传播时间并换算成传播距离，解算待定位点的准确位置。

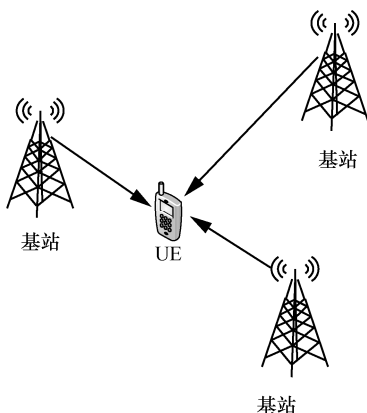


图 1 ToA 定位方法原理

此方法模型结构简单，易于理解，但在实际应用中存在明显缺点：1) 严重依赖时间同步的精度，在非实验室的场合下，待测节点与已知节点的高精度时间同步不具备实现条件；2) 数学模型基于电磁波无障碍传播的假设，当电磁波传播路径中包含折射、反射或绕射时，计算出的距离将包含误差，此类误差也被称为非视距（NLOS, non line of sight）误差。

### 2.2 TDoA

TDoA (time difference of arrival) 定位方法被称为“到达时间差”方法。如图 2 所示，在 ToF 方法的基础上改用两路信号到达时间之差作为基本观测量，代入双曲线方程，则待测节点应位于多条双曲线（面）的交点处。

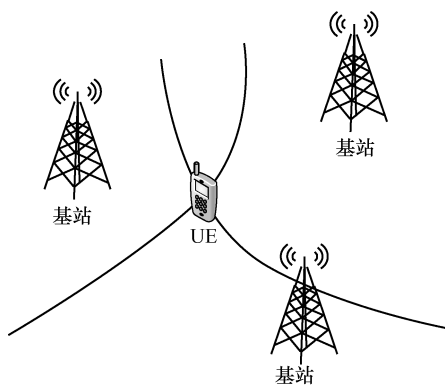


图 2 TDoA 定位方法原理

TDoA 定位方法相比于 ToA 方法具有的显著优势在于其不需要待测节点与各基站时钟同步，极大地放宽了此方法在实际工程中的应用条件，简化了系统结构。但此方法仍属于测距类方法，依赖电磁波的无障碍直射传播条件，仍会受到 NLOS 误差的影响。

### 2.3 RTof

RTof (round-trip time of flight) 定位方法，即“往返飞行时间”定位方法，原理如图 3 所示。其类似于雷达测距原理，以测得信号的往返时间作为基本观测量，转换为传播距离，解算待测节点的坐标。

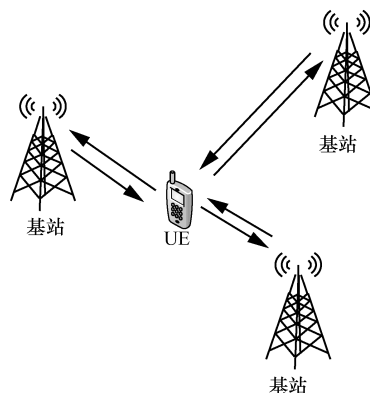


图 3 RTof 定位方法原理

RTof 方法在信号中加入时间戳，基站收到终端发出的定位信号后立刻做出应答，故终端收到应答信息时可以获得信号往返时间。此方法类似于 ToA，仍会受到 NLOS 误差的影响。此外，基站在接收并应答信号的过程中所产生的网络时延可能导致较大误差。值得注意的是，此方法本质上需要双向通信，因此不适合密集型定位应用。

### 2.4 RSSI

RSSI (received signal strength indicator) 定位方法，即“信号强度指标”定位方法，原理如图 4 所示。其利用电磁波在空间中的衰落模型，建立信号强度观测量与距离之间的对应关系，进行定位解算。电磁波在空气中的传播损耗模型与其频率相关，一般认为满足如下模型

$$L = 10 \lg \left( \frac{P_{TX}}{P_{RX}} \right) = 32.45 + 20 \lg f + 20 \lg r - G_{TX} - G_{RX} \tag{1}$$

其中， $L$  为功率衰减值， $P_{RX}$  为接收功率， $P_{TX}$  为发射功率， $G_{RX}$  为接收天线增益， $G_{TX}$  为发射天线增益， $r$  为传播距离。此方法优点在于结构简单，计算复杂度低，且不需要任何时间同步。但在现实情况中，电磁波环境极其复杂，传播过程受室内物品摆放、墙体遮挡以及人员走动等诸多因素影响，多径效应严重，定位效果不够理想。虽然可以配合滤波算法或迭代算法来提升精度，但如此又会增加计算复杂度，降低定位结果实时性。

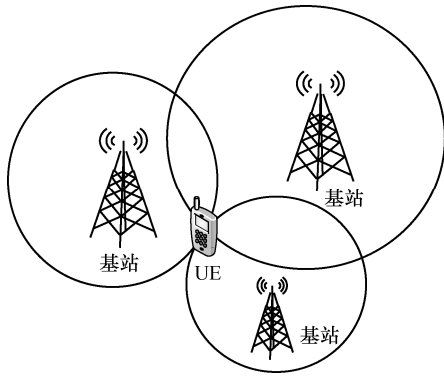


图 4 RSSI 定位方法原理

### 2.5 AoA

AoA (angle of arrival) 定位方法，即基于信号到达角度的定位方法，通过阵列天线获取到达信号的相位差，换算成到达角度。AoA 定位方法原理如图 5 所示，多个基站与待测点的径向连线交点，即为未知节点位置。此方法优势在于精度较高，所需基站数量少，不需时钟同步。但 AoA 测角需使用昂贵的阵列天线；信号解算计算复杂度高，难以支撑大容量、高并发的定位场景；此外，室内环境中多径效应严重，复杂的解相干算法进一步增加了计算复杂度。

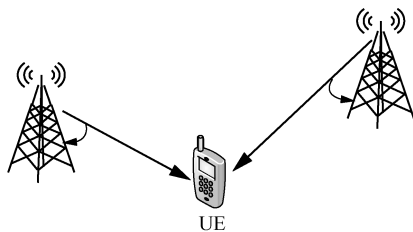


图 5 AoA 定位方法原理

### 2.6 Fingerprint

Fingerprint 定位方法，即基于信号指纹的定位方法，原理如图 6 所示。此方法不需要解算，其基

本思想在于：离线定位阶段，事先标定待测区域的标记点并采集该点处的环境指纹信息，建立离线指纹库；在线定位阶段，通过实时获取待测点的环境信息并与离线指纹库中的数据项进行匹配，得到待测点的位置。人们可以选择 RSSI、信道状态信息 (CSI, channel state information) 或其他物理量作为指纹<sup>[33]</sup>。在无线通信网络环境中，同一个待测定位点往往会收到多个基站 (已知节点) 发出的信号。并且，这些信号的 RSSI 或 CSI 受传输距离、传播路径以及遮挡物等诸多因素影响，结果也不尽相同；将不同的特征组合在一起，即具备了区分各个不同待测定位点的能力。由于 CSI 比 RSSI 可以展示出各个信道背后的相位响应和振幅响应，CSI 指纹可以获得比 RSSI 更好的时间分辨率、频率分辨率和稳定性<sup>[34]</sup>。在线定位阶段中部分主流匹配算法及其对比分析如表 1 所示。

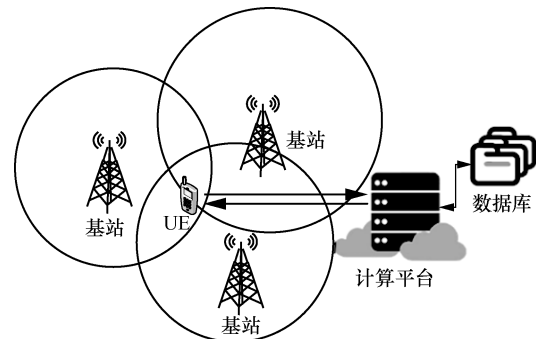


图 6 指纹定位方法原理

此方法优点在于不需要信号解算，可以通过更密集地布置指纹采集点来提升定位的分辨精度、不受 NLOS 误差影响。缺点是离线采集指纹阶段时间和人力成本较高；环境、物品、人员等因素的变化都会对信号采集、匹配造成干扰，不适用于动态环境和人员密集场所。

表 1 在线定位阶段中部分主流匹配算法及其对比分析

匹配方法	方法类型	优点	缺点
KNN	确定型算法	不需要训练、易于实现、性能良好、应用广泛	匹配过程需要大量算力，定位结果对 $K$ 取值敏感，需反复实验
极大似然估计法 <sup>[35]</sup>	概率型算法	使用统计模型参数估计提升精度	需要专业知识预判概率模型，复杂环境难以应对单一概率模型
朴素贝叶斯算法	概率型算法	使每个定位点具有最大后验概率，进一步提升定位精度	需在每一个网格内重复采集大量信号
SVM 算法	智能算法	适应于“指纹-位置”的非线性映射关系	分类效果对核函数的选择敏感，核函数难以选取
神经网络算法 <sup>[36]</sup>	智能算法	定位精度较高、误差较小、不需要考虑传播模型和概率模型	需要复杂的参数调整过程，训练耗时长、代价高

高精度定位技术分类如图 7 所示。

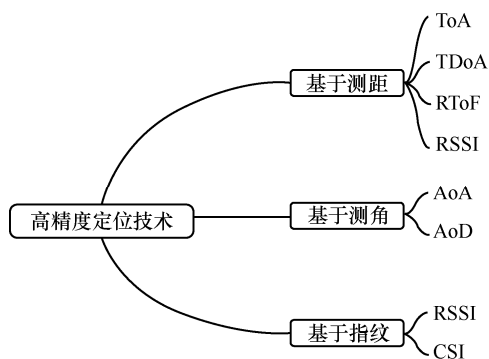


图 7 高精度定位技术分类

### 3 关键定位方案评述

#### 3.1 Wi-Fi

Wi-Fi 现常被用作无线局域网(WLAN, wireless local area network)的实现方案,其本质是 IEEE 802.11 标准,现已深入各类垂直行业中提供网络连接服务,其服务范围为 100 m。在针对物联网 IEEE 802.11ah 标准时可提升到 1 000 m<sup>[37]</sup>。目前,大量个人计算机、智能手机均配备了 Wi-Fi 网卡,这使以 Wi-Fi 技术作为定位方案拥有天然的用户友好性,易于推广。但现有的 Wi-Fi 无线系统绝大部分是针对通信需求部署的,其原则在于:1) 信号带宽尽可能用于通信使用;2) 在一个接入点覆盖范围内不再重复布置基站,以免重复和干扰。但这两点原则都与基于定位需求的 Wi-Fi 网络背道而驰,即 1) 信号带宽用于定位越多,定位精度越高;2) 同一范围内, Wi-Fi 基站越多定位结果越可靠。因此难以提升定位精度。

#### 3.2 UWB

UWB 技术,即超宽带技术。区别于基于其他无线电信号的定位技术,UWB 在大带宽上发射极短的脉冲信号而非连续载波信号进行通信或定位。

通常情况下,UWB 信号脉冲周期小于 1 ns,带宽在 GHz 量级。由于大带宽的特点,其低频成分可以更容易地具备穿透性;此外,UWB 脉冲可以有效地对抗多径效应,进而避免定位精度下降。最后,由于其宽带特性,定位精度可以轻松达到厘米级。但 UWB 技术需要专用的硬件设备和环境布置,所以会导致额外的专用开销。基于测距的 ToA、TDoA、RToF 等均可与 UWB 技术结合使用。

#### 3.3 蓝牙

蓝牙定位技术由 IEEE 802.15 技术规范定义,可以在 70~100 m 范围内提供中等速率的数据传输服务。在蓝牙 5.1 版本中,通过切换天线阵列,蓝牙技术支持信号角度的测量。也即,除了传统的 RSSI 方法,蓝牙还可支持 AoA 高精度定位。蓝牙 AoA 定位可以更好地发挥测角系统在短距离定位应用下的优势,同时相比于其他技术实现的 AoA 定位方法,蓝牙测向(测角)定位成本更低。但此技术也存在刷新率低、受多径效应干扰严重等弊端,尚有待研究和解决。

#### 3.4 共频带技术

共频带定位技术采用时分码分正交频分复用(TC-OFDM, time & code division orthogonal frequency division multiplexing)定位信号,在通信信号背景噪声中嵌入定位信号。所嵌入的信号具有较大带宽,但功率远低于通信信号,故可以实现与通信信号“同频共载”,在通信的同时实现定位信号的连续捕获和跟踪,从而实现精确的测距与定位<sup>[38]</sup>。共频带定位在卫星导航系统信号接收良好的环境中,可以使用卫星定位信号与共频带信号融合定位,提高定位精度或缩短定位时间,提升稳健性。共频带技术在不改变通信信号的基础上,通过叠加定位导航信号实现通信与定位导航的一体化构想。定位信号中编码了共频带信号播发基站对应的导航电文,如时钟信息、大地经纬度等,用于定位终端下行定位解算。

此外,卫星授时信号可为地面的共频带基站提供精准授时服务,进一步降低其同步误差。3GPP 组织在 R16 中给出基于共频带思想的室内定位系统仿真报告显示,100 MHz 带宽定位精度可达 0.125 m,具有较好的发展潜力和研究价值。

#### 3.5 5G 蜂窝网

相较于前代网络,5G 从天线技术、信道带宽到应用场景各方面均有突破性提升。依据 5G 概念白皮书<sup>[39]</sup>中定义,5G 蜂窝网有四大主要应用场景:连续广域覆盖、热点大容量、低功耗大连接和低时延高可靠。在 5G 蜂窝网络的应用中,上述四大场景即为 5G 通信网络的四大特点:连续广域覆盖可以提高小区覆盖能力,优化其范围和覆盖质量;大容量热点支持大量用户同时接入,节点算力能够得到可靠保证;大规模多输入多输出(MIMO, multiple input multiple output)技术使 5G 基站具备测距和测

角的双重功能；低功耗大连接和低时延高可靠，可以保证在处理大批量位置服务需求过程中的稳定性和实时性。此外，毫米波通信和智能波束成形作为其关键技术之一，使信号具有极佳的指向性，可以减轻 ToA、TDoA 测量受多径信号的干扰；大规模阵列天线技术使 5G 基站具备 AoA 测向能力，进一步提高了其定位精度。

可用于此定位方案的方法众多，包括基于测距、基于测角以及基于指纹匹配的定位方法等均可与 5G 网络结合使用。不同定位方法对比如表 2 所示。

#### 4 基于定位场景的分类

室内定位与导航技术日渐成熟、普及，已经深入诸多领域和行业中，文献[40-41]均对定位技术的各类应用场景进行了介绍。但上述文献往往仅关注了各类应用本身，如交通、医疗、购物、消防等；未能分析总结这些应用背后的共通性与特异性，未能挖掘不同类型的应用场景对于定位技术的隐性要求。这些要求往往源自实际应用条件，属于刚性要求，但却最易为人们所忽略。本节着重从应用场景分类的角度，介绍分析各类典型场景下对定位技术应用的隐性要求，并给出相应的适用定位技术，如表 3 所示。此外，在未来网络一体化发展趋势下，

高精度定位将不再局限于某种单一技术或方案，而本节中提出的基于场景的定位分类更能刻画其本质特征，这一点将在 7.3 节详细论述。

##### 4.1 WAI 类

WAI, “Where am I” 即“我在哪里”，此类应用场景的主要特征在于发起定位诉求的主体和待测目标主体一致。在民用室内定位与导航领域中，绝大部分主动定位的应用场景均属于此类，如大型商场或机场的个人定位服务、车位导航以及室内展馆路线指引等。用户主动提出定位诉求，且定位所需的源数据，包括但不限于时钟信息、频点频段信息、信道状态、到达时间等。

综上所述，此类定位场景暗含的隐性要求即为用户高度配合或主动定位，且具备较高计算能力。可用于此类定位场景的方法有 ToF/ToA、TDoA、RSSI、指纹定位、卫星定位以及行人航位推算等。

##### 4.2 WAU 类

WAU, “Where are you” 即“你在哪里”，此类应用场景的主要特征在于发起定位诉求的主体与待测目标主体不一致，但二者之间具有联系。此类应用环境大多包涵交互场景与通信场景，如好友寻路、虚拟现实/增强现实互动游戏等。发起定位诉求主体的目的是获取另一在网用户的位置信息，这需

表 2 不同定位方法对比

定位原理	定位技术	实现逻辑	优点	缺点
基于时间测距	ToF/ToA	测量信号单程传播时间，换算成距离，完成定位解算	结构简单、易于实现	依赖基站间高精度时间同步，需要待测节点与基站时间同步，受 NLOS 误差影响
	TDoA	测量 2 个基站的信号传播时差，换算成距离差，完成定位解算	结构简单、易于实现，待测节点不需时间同步	依赖基站间高精度时间同步，受 NLOS 误差影响
	RToF	测量信号在基站与终端间的往返时间，换算成距离，完成定位	结构简单、易于实现，进一步降低同步要求	受 NLOS 误差影响，需双向通信，网络通信开销导致额外误差，系统容量有限
基于传播模型测距	RSSI	通过信号衰减模型将信号强度换算为传播距离，完成定位解算	结构简单、易于实现，不需要时间同步	受 NLOS 误差影响更严重
基于相位测角	AoA/AoD	测量不同阵元上的相位差，换算成信号到达角度，完成定位	不需要时间同步，近距离定位精度高	需要阵列天线，增加硬件成本，解算复杂度高，受 NLOS 误差影响
基于指纹匹配	CSI	离线采集指纹、在线匹配指纹，直接搜索得到终端位置	不需要时间同步，具备一定抗 NLOS 能力，在线定位阶段复杂度低	离线训练阶段耗时长、成本高，环境改变后定位精度显著下降

表 3 不同定位场景及其隐性要求的比较

定位场景	配合度	定位解算	源数据	兼顾通信	算力要求	功耗	容量	隐私性
WAI	高	用户完成	用户独有	不需要	高	高	无限制	高
WAU	高	双方完成	双方共有	需要	高	高	高	中
WIH	无	服务商提供	服务商独有	需要	低	低	低	低

要被定位用户的授权与配合,定位所需源数据可参见 4.1 节。

此类定位场景暗含的隐性要求即为被定位用户高度配合、具备较高计算能力的支持以及网络兼具通信与定位功能。可用于此类场景的定位方法有 ToF/ToA、TDoA、指纹等。

### 4.3 WIH 类

WIH,“Where is he”即“他在哪里”,此类应用场景的主要特征在于发起定位诉求的主体与被测目标主体无关,甚至希望对被测目标保密。此类应用场景属于被动定位范畴,例如目标定位追踪、公安天网系统、重点人员和重要资产监控、智慧养老社区等。发起定位诉求主体一般位于服务侧,需要在任何时间、任意条件下完成对待定位目标的静默定位。

此类定位场景暗含的隐性要求即为用户零配合、无算力要求,但要求用户设备具备一定的隐蔽性并采用低功耗方案。可用于此类场景的定位方法有 TDoA、指纹等。

## 5 定位技术(系统)评价指标体系

一项定位技术或定位系统在特定应用场景的综合定位性能受多种因素制约。本节试图提出一种多维度的评价指标体系,以评估其综合效能。

### 5.1 适用性

适用性指标是指定位技术或定位系统在某一应用场景下满足人们的要求和预期效果的适合程度。如第 4 节所述,不同类别的定位应用场景对于定位方法的要求有着本质的区别。例如,“WIH”场景需要“零配合度”完成定位,因而下行定位技术不适用;“WU”定位应用场景则要求网络兼具定位和通信功能。此外,不同的定位应用对定位技术的要求也不同。例如,在大型室内(矿场、地下停车场)中,蓝牙方案不适用;在个人定位应用场景下,超宽带定位所需的硬件条件无法满足;在工业互联网、物联网等应用场景下,低功耗、高可靠性成为系统的重要基础,因此,AoA、指纹定位等方法便难堪此任。

因此,适用性指标是考察某一定位系统的第一指标和最重要的原则之一。

### 5.2 定位精度

定位精度是衡量定位方法、系统最直观也是最普遍的指标之一;此外,基于多种定位方法的融合

定位算法以及滤波迭代等优化算法,也是以定位精度的提升为目标提出的。常用的精度衡量指标包括区域检测率、均值、方差、协方差、均方根误差、绝对均值误差等。

### 5.3 成本

部署成本,即定位系统在建立初期需要考虑的部署成本,包括硬件设备的成本、安装调试耗时以及必要的操作人员的人力成本等。以 UWB 定位技术为例,其需要专用的硬件设备,包括基站端和用户端,这将导致较高的专用开销。

运维成本即定位系统部署完毕后,在投入运行阶段是否需要不断维护更新,是否随环境变化需要不断修正参数等问题,即牵涉到定位系统的运维成本。以指纹匹配定位为例,因定位场景更新、物品摆放位置变化等因素,需要不断重新测量标定,因而后期维护成本较高。

### 5.4 实时性

实时性指标实际上是对定位系统的解算速度进行考察并提出了要求。定位技术由于实现原理和系统结构不同,实时性区别也非常大。例如,AoA 定位需要谱峰搜索,计算复杂度高,因此适用于实时性要求较低的应用场景。

### 5.5 覆盖范围、功耗与体积

定位技术往往与定位系统的实现方式密切相关,因而在选定定位技术路线时必须考量定位系统预期的覆盖范围、功耗与体积等关键技术指标。往往基站的覆盖范围越大,其功耗也越大,进而要求更高效的散热和更大的设备体积;相反,某些需要小尺寸定位设备的应用场景下,必须通过降低功耗和牺牲覆盖范围的方式获得低功耗运行方案。例如在电力系统监控、无人机集群等工业互联网应用场景下,往往没有统一的标准来判断,而是需要根据情况具体分析,使这三方面因素协调统一,达到最佳的平衡状态。

### 5.6 可用性

可用性也是确保定位系统长期稳定运行的关键属性。定位系统因其功能具备基础服务的特性,往往作为诸多其他服务或高级应用的底层服务提供者。因此,定位方法和定位系统的自我恢复能力、灾难幸存能力和容错能力也是本文提出的评价指标体系中的关键部分。例如在火灾救援、防空指挥系统等应用场景下,抗毁、保持可用的能力需要列为首要考量因素。定位系统或定位算法应当可以进

行自适应调节，以适应环境的不断变化。

### 5.7 网络一体化特性

网络一体化特性，即网络在通信、定位导航<sup>[42-43]</sup>、数据、授时、异构互联等方面体现出的高度一体化特性。近年来，多网络不断融合，异构互联的通信体系逐步实现，是否面向未来网络支持网络技术的平滑演进，也成为重要评价指标之一。

以通信与定位导航一体化为例，依其实现层次不同，可分为 3 个阶段：1) 应用级一体化，通过应用服务或应用软件整合通信网和定位网提供的信息，进而展开通导一体化服务；2) 设备级一体化，提出新的设备开发标准、网络协议以及空中接口，使面向未来网络的设备自身同时具备通信网与定位网融合工作的能力；3) 信号级一体化，通过设计更优的信号格式、编码方式、调制解调技术，使定位与通信功能灵活、智能地在信号层深度融合，实现真正意义上的通信定位导航一体化网络。

## 6 现有定位系统评述

本节将列举近年来国内外的若干定位系统，并使用第 5 节中提出的评价指标体系对其进行分析评价，最后通过表 4 总结了高精度定位系统的对比分析结果。

### 6.1 5G 蜂窝网定位系统

蜂窝网络由传统 2G、3G、4G 进入 5G 时代，其服务方向也逐渐由单纯通信逐渐扩展到通信、导航、授时一体化方向。传统 4G-LTE 网络虽然支持定位功能，但是通信网的设计原则、网络规划等与定位需求不一致，导致其实际定位精度误差超过 100 m，无法提供亚米级的室内定位能力。

陈诗军等<sup>[44-45]</sup>提出一种 5G 带内高精度定位网系统架构并完成原型系统研发，突破了定位领域和通信领域的壁垒，将广域异构室内高精度定位技术

与 5G 网络融合，通过定位网规划技术和融合定位技术实现 5G 室内亚米级定位，水平精度为 0.5 m、垂直精度为 0.5 m，并针对该架构下同步、首径信号检测等关键技术进行阐述，充分利用 5G 通信大带宽、低时延特点，实现通信网与定位网平滑融合。其研发完成的“5G 增强型高精度定位微站原型系统”，通过在下行链路中增加定位专用信道和相关参考信号的方式，使用 3.5 GHz 运营商频段以及 3GPP 规定的标准 5G PRS 参考信号，率先实现 5G 通信标准下通信定位一体化；该原型系统同时支持 TDoA 定位、A-GNSS 定位以及惯性测量等多种定位方式的融合，可进一步提升综合定位效果。

文献<sup>[46-47]</sup>提出一种 5G 高精度室内定位仿真平台，主要研究了室内复杂多径环境下电磁波传播模拟技术、定位信号合成技术，以及在此基础上进行 5G 定位仿真。其中关键技术包括：1) 虚拟场景生成与分析技术，该仿真平台生成虚拟空间，并对室内虚拟空间中电磁信号的传播进行确定性追踪分析；2) 多径信号合成与干扰仿真，分析射线由直射、反射、衍射所造成的多径信道上的路径损耗、阴影衰落、多径衰落等带来的影响；3) 移动终端定位性能综合评估问题，包括首径测量算法、多径处理算法等测距定位性能的评估；4) 提出首径覆盖分布和反射覆盖分布、误差分布，并依此计算出异构定位网络的最优规划方案；5) 通信定位一体化网络优化技术，研究影响室内定位精度的网络基础设施（基站/热点等）地理分布因素，建立关联模型，并给出指导性原则，减少传播环境中的多径效应误差。此外，还研究了小区动态开启/关闭技术和网络参数动态调整技术，提高同步精度、降低同频干扰，优化整体网络布局。该仿真平台可提升通信质量和定位精度，并避免实际调试系统的开销，具有重要科研意义和巨大经济价值。

表 4 高精度定位系统的对比分析结果

定位系统	适用类别	适用场景	定位精度	部署成本	运维成本	实时性	覆盖范围	稳健性	一体化程度
5G 蜂窝网定位系统	我在哪	广域下行	亚米级	与通信网共用	低	高	广域	高	设备级
	你在哪								
DeepFi	他在哪	局域上行	米级	中等	高	中	室内	低	无
Widar3.0	他在哪	局域静默	厘米级	高	高	高	室内	低	无
共频带定位系统	我在哪	广域下行	亚米级	中等	低	高	广域	高	应用级
	Ubisense								
UWB-IP	我在哪	局域下行	厘米级	高	低	高	室内	高	无

本节所述研究成果基于 5G 蜂窝网络,适用于“我在哪里”“你在哪里”的定位场景,属于广域下行定位,其系统容量几乎不受限制,安全性隐私性高;其克服了建立大规模定位网络需要重新布置海量基站的成本问题,适用于室内室外无缝切换的定位应用场景,已具备设备级通导一体化性质。

## 6.2 Wi-Fi 指纹信息定位系统

Wang 等<sup>[48-49]</sup>提出了基于 CSI 的室内指纹识别系统 DeepFi。离线训练阶段,利用深度学习训练深度神经网络的所有权值作为指纹,并采用贪婪学习算法对权值进行逐层训练,降低了算法复杂度;在线定位阶段,较好地利用了深度网络的优势,在学习复杂参数输入与输出的非线性对应关系上表现良好。

Qian 等<sup>[50]</sup>根据 Widar 系统利用 Wi-Fi 指纹信息,提出一种全新的理论模型,以几何方式量化了 CSI 动态与用户位置和速度之间的关系,并实现了物体厘米级被动定位与跟踪。该模型不需要使用统计学习技术,消除了传统 Wi-Fi 指纹信息需要进行事先离线训练的弊端。此外,该文还提出了一种从有噪声的 CSI 数据中识别出与人体运动相关的频率分量的技术,除速度信息以外,还可以得到用户的准确位置。

进一步地,Zheng 等<sup>[51]</sup>又提出了一种基于 Wi-Fi 的零代价跨域手势识别系统,研究了当 Wi-Fi 数据域发生变化时,必须进行系统调整才可使用新数据,从而限制了此类系统实际可用性的问题。该系统开发了一种只需一次训练,即可应用于不同数据域的模型,可自适应地从信道状态的变化感知室内场景下人体的行为和动作,代表无线指纹信息朝着普适感知的方向演进。

本节所述 Wi-Fi 定位系统适用于“他在哪”定位场景,可在用户低配合的情况下完成定位;覆盖范围较小,属于局域定位;此定位网络为专用网络,且需要配备专用阵列天线,部署成本和维护成本较高;不具备一体化网络特性。

## 6.3 共频带定位系统

Deng 等<sup>[52]</sup>结合 5G 信号的特点,提出了 TC-OFDM 理论,并设计研发了共频带定位系统。该研究主要涉及基于现有标准的定位信号设计与同频共载技术,综合考虑终端对定位信号捕获、跟踪以及测距的可实现性,降低定位系统与数据传输

系统间存在的同频干扰以及不同基站间的相关干扰,最终实现了定位信号与通信信号的同频共载。共频带定位系统支持单站高精度定位,在实验室条件下可达到厘米级精度<sup>[53]</sup>。但此技术尚未写入 3GPP R16,这使其应用推广受到了一定的影响。

本节所述共频带定位系统应用于“我在哪”定位场景中,属于广域下行定位领域;通过改造现有通信网络,可在一定程度上减少部署成本和运维成本;具备应用级通信定位一体化特性。

## 6.4 UWB 定位系统

UWB 定位系统由于使用独特的大带宽脉冲信号,在定位精度和干扰对抗能力方面取得了优异的表现,也成为近年来学术界和产业界研究开发的热点和重点。Ubisense、BeSpooon 和 DecaWave 是比较成熟的商用 UWB 系统。

Ubisense 定位系统<sup>[54]</sup>采用 TDoA 和 AoA 融合解算<sup>[55]</sup>的方式来获取待测节点的位置,且其商用版本中配备了阵列天线用来接收待测节点发出的 UWB 信号,使其具备了估计方位角和俯仰角的二维测向能力,这一点是其他 UWB 系统不具备的。该系统刷新率较高可达 160 Hz,三维空间内定位精度可以达到 15 cm,售价昂贵且设备不具有通用性是其主要缺点。

BeSpooon 实现了 UWB 系统的小型化,并使其可以集成到手机大小的设备中,使其具备更高的附加价值和更丰富的应用场景支持。该系统工作在 3.99 GHz,直射条件下可实现 10 cm 级定位精度以及 880 m 测距定位范围。

DecaWave DW1000 不同于前述二者,是一种低功耗芯片模块。使用该模块可进行 RToF 双向测距定位或 TDoA 实时测距定位,单点定位精度为 10 cm,实时精度约为 30 cm。由于体积及功耗限制,该模块可在不超过 300 m 范围内提供有效定位支持。该模块系统具有 2 种工作频率,分别为 3.99 GHz 和 6.48 GHz,且分别支持不同的数据传输速率,具备一定的通信定位一体化能力。

Yin 等<sup>[56]</sup>提出了一种基于波分多址 (WDMA, wavelength division multiple access) 的定位方案 UWB-IP,以提高 UWB 定位系统在多用户应用中的定位精度。此外,该文还提出了一种基于 Coif4 小波的超宽带脉冲波形设计方法,使用波分多址提高了抗多址干扰性能,并采用基于熵的到达时间估计方法,改善了多径条件下的 ToA 估计性能,实现了

秒级响应的厘米级定位精度。

超宽带定位系统适用于局域下行定位应用场景，定位精度高、抗干扰效果好。但由于信号体制的特殊性，需要配备昂贵的专业设备，专用程度较高，综合成本较高，且一般不具有一体化网络特性。

## 7 总结：挑战、机遇和前进方向

从“仰望星空”到“脚踏实地”，人类在室内外精确定位领域进展快速，成果颇丰。如今，5G网络基建发展迅速，北斗三号系统全球覆盖运行，6G网络环境酝酿正如火如荼，未来网络面临着新的挑战、机遇，本文提出如下4个方面的挑战、机遇和前进方向，供读者参考。

### 7.1 室内外联合定位——出入场景无缝切换

未来无线定位技术将向室内室外跨场景、跨区域联合定位与无缝切换的方向演进。如今，室外定位领域以卫星信号广域覆盖为主流解决方案，室内定位则呈现出百家争鸣、百花齐放的局面。室外地图以道路、建筑、车道和交通规则为主要元素，室内地图则需要建立三维立体模型，提供直观的楼层信息，并且包含更多的区域功能数据、商品或服务数据、人员数据，但二者之间仍未能实现完全的网络互连、数据融通。

对于未来智慧机场、智慧城市等场景，定位系统应融合室外行车路线、室内步行路线、地下车位信息、楼层信息、商户商品位置以及其他多元异构数据，为用户提供室内外一体化导航等服务。也即，在未来智慧城市的应用场景下，用户从离开住所至抵达目的地的全过程中，应当获得“门到门”的位置信息服务。另一方面，服务提供商也需要获得更全面精准的用户信息和管理数据，从而在服务调整和精准营销等商业行为中获得优势和助益。

### 7.2 5G赋能传统定位技术——泛在融合定位

现如今，多种不同的定位/通信网络共存，其制式、技术各不相同，导致其在定位性能、覆盖范围、功耗成本等方面也各具优劣。5G网络设施可为各类异构网络 and 不同制式的智能设备提供泛在连接，以融汇不同定位技术、方案，实现优势互补、融合赋能。

例如，5G网络具有大带宽、低时延以及广域连接的能力和特点，而基于AoA方法的蓝牙5.1定位技术精度高，但通信能力不足。因此提出融合定位解决方案，使5G与蓝牙融合布站、共用资源，

将高精度定位数据通过高速网络传输，解决海量应用下通信导航一体化的需求。还可结合边缘计算、雾计算等其他智能技术，使5G网络为传统定位技术助力、赋能。

特别地，本节所述的“泛在融合定位”的本质在于“多种技术协同作用，共生共存”的发展方向，即未来定位网络可由多种定位/通信技术复合而成。此概念与7.3节“高度一体化网络”具有本质区别。

### 7.3 高度一体化网络——在线即在位

网络发展迅速，先后出现了通信网、授时网、计算机网、传感器网、定位导航网等多种用途类别的网络系统。但之所以网络种类繁多，是因为网络技术及通信技术不够发达，现实世界中主体的信息无法由统一渠道表达，只能被迫拆分、切片后，由不同的专用网络传输。因此，这些系统各自采用不同的技术原理，承担着不同的功能任务，彼此相对独立割裂。

本文认为，未来网络演进将弥合技术壁垒、跨越制式障碍、融合多种能力，以“一网”代替“多网”，以“高度一体化网络”实现“全维度”的主体信息表示——“在线即在位”。

网络的本质在于信息的传递和交流，解决对象传输过程中“Who”“What”“How”“When”和“Where”5个关键问题。随着网络和通信技术的不断发展与融合，网络技术和通信机制必将由割裂走向统一，即“高度一体化网络”即为“How”这一关键问题的最终答案。

因此，本文在第4节中提出了“基于定位场景的分类”。面向未来网络发展，本文不再将分类中的关注重点局限于定位方法或信号体制等技术层面的问题，而是将应用场景（例如WAI、WAU、WIH）和服务主体（例如人员、资产、无人设备）作为核心要素对高精度定位领域进行分类分析。此分类方法更接近网络的本质属性，忽略无关紧要的技术细节，更能刻画出不同定位方法的本质属性、目标和要求。

进一步地，“在线即在位”概念不仅局限于“数据网络”和“定位网络”的融合，其意义和本质在于：提出未来高度一体化网络趋势——主体（包括但不限于个人、车辆、智能终端，甚至生命体等一切可联网对象）的多维信息可综合、完整地通过一体化网络进行表达和关联。在高度一体化网络中，

时间、空间、数据、视听觉信息、生物信息不必割裂切片,而是可以完整传输并恰当还原。同时,网络中的信息足以全方位刻画该信息所代表的现实世界中的主体,实现现实主体在虚拟网络世界中的完整表示和传递。

如今,网络一体化进程已取得一定进展,如 5G 蜂窝网络融合通信、数据、定位三网功能,北斗卫星网络融合定位、通信、授时等功能以及文献[57]提出的星地融合网络的 5 个不同层次等。因此,当网络一体化进展足够发达,对主体信息的刻画维度足够全面、细致时,未来网络将不再局限于某种功能网络,而是实现“物流”“信息流”“人流”三流合一;其覆盖范围将逐步朝“海、陆、空、天一体化”方向发展;未来网络将以通信、数据、定位、授时、异构互联的高度一体化网络为方向,不断演进。

#### 7.4 网络安全保护新内涵——全知网下的个人位置隐私保护

在未来网络中,“在线即在位”,每个个体都将不间断地接入网络,其生成的高精度位置数据、状态数据、财务数据,甚至生物信息都将被网络所感知、记录,个人将处在“全知网”中,即个人信息全感知、全记录。这些信息的存储、传输与管理,无疑会带来隐私信息保护以及信息财产安全等全新问题。例如,通过个人行动轨迹,可以精确获得一系列隐私敏感数据,刻画出个体的生活习惯、教育情况、收入情况等。因此,未来网络在不断被赋予更强大的能力的同时,也需要人们提供更可靠的全知网隐私保护技术、完备的全知网监控体制和精妙的全知网管理智慧,确保未来网络为人类文明进步做出稳定而卓越的贡献。

## 8 结束语

高精度定位作为未来一体化网络的重要部分,正受到广泛关注并蓬勃发展。在网络一体化的背景下,本文首先在传统意义上,对高精度定位领域进行了基于定位技术和定位方案的分类和评述。其次,基于一体化网络发展趋势,提出了更接近网络本质属性的基于定位场景的分类,探讨了 WAI、WAU 和 WIH 这 3 类场景的特点和意义。再次,本文提出一种用于综合评估定位技术的多维度评价指标体系,并以此评估了主流的定位系统。最后,本文对高精度定位技术的发展进行了总结和展望,

指出了未来网络的一体化发展趋势,提出了“在线即在位”“全知网下隐私保护”等重要概念。

本文可帮助高精度定位领域的研究者及时、准确、全面地了解研究现状和进展,并明晰未来一体化网络的总体发展方向。

#### 参考文献:

- [1] 刘公绪,史凌峰. 室内导航与定位技术发展综述[J]. 导航定位学报, 2018, 6(2): 7-14.  
LIU G X, SHI L F. An overview about development of indoor navigation and positioning technology[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2018, 6(2): 7-14.
- [2] 邓中亮,尹露,唐诗浩,等. 室内定位关键技术综述[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(3): 14-23.  
DENG Z L, YIN L, TANG S H, et al. A survey of key technology for indoor positioning[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(3): 14-23.
- [3] LIU H, DARABI H, BANERJEE P, et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2007, 37(6): 1067-1080.
- [4] PATHAK P H, FENG X T, HU P F, et al. Visible light communication, networking, and sensing: a survey, potential and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2047-2077.
- [5] 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.
- [6] YASSIN A, NASSER Y, AWAD M, et al. Recent advances in indoor localization: a survey on theoretical approaches and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 1327-1346.
- [7] DARDARI D, CLOSAS P, DJURIĆ P M. Indoor tracking: theory, methods, and technologies[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(4): 1263-1278.
- [8] WU C S, YANG Z, LIU Y H, et al. WILL: wireless indoor localization without site survey[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(4): 839-848.
- [9] BOUET M, DOS SANTOS A L. RFID tags: Positioning principles and localization techniques[C]//2008 1st IFIP Wireless Days. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-5.
- [10] RANTAKOKKO J, RYDELL J, STRÖMBÄCK P, et al. Accurate and reliable soldier and first responder indoor positioning: multisensor systems and cooperative localization[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(2): 10-18.
- [11] MAINETTI L, PATRONO L, SERGI I. A survey on indoor positioning systems[C]//2014 22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks. Piscataway: IEEE Press, 2014: 111-120.
- [12] ZAFARI F, GKELIAS A, LEUNG K K. A survey of indoor localization systems and technologies[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2568-2599.
- [13] ZHUANG Y, HUA L C, QI L N, et al. A survey of positioning systems using visible LED lights[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 1963-1988.

- [14] WANG B, CHEN Q Y, YANG L T, et al. Indoor smartphone localization via fingerprint crowdsourcing: challenges and approaches[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(3): 82-89.
- [15] KHALAJMEHRABADI A, GATSIS N, AKOPIAN D. Modern WLAN fingerprinting indoor positioning methods and deployment challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3): 1974-2002.
- [16] ZANELLA A. Best practice in RSS measurements and ranging[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2662-2686.
- [17] AL-AMMAR M A, ALHADHRAMI S, AL-SALMAN A, et al. Comparative survey of indoor positioning technologies, techniques, and algorithms[C]//2014 International Conference on Cyberworlds. Piscataway: IEEE Press, 2014: 245-252.
- [18] WU C S, YANG Z, LIU Y H. Smartphones based crowdsourcing for indoor localization[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015, 14(2): 444-457.
- [19] SHU Y C, BO C, SHEN G B, et al. Magicol: indoor localization using pervasive magnetic field and opportunistic WiFi sensing[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(7): 1443-1457.
- [20] KIM Y, CHON Y, CHA H. Smartphone-based collaborative and autonomous radio fingerprinting[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2012, 42(1): 112-122.
- [21] ATIA M M, NOURELDIN A, KORENBERG M J. Dynamic online-calibrated radio maps for indoor positioning in wireless local area networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(9): 1774-1787.
- [22] ZHOU B D, LI Q Q, MAO Q Z, et al. Activity sequence-based indoor pedestrian localization using smartphones[J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2015, 45(5): 562-574.
- [23] MOGHATAIEE V, DEMPSTER A G, LIM S. Indoor localization using FM radio signals: a fingerprinting approach[C]//2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-7.
- [24] LIU X Y, AERON S, AGGARWAL V, et al. Adaptive sampling of RF fingerprints for fine-grained indoor localization[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(10): 2411-2423.
- [25] NIU J W, WANG B W, CHENG L, et al. WicLoc: an indoor localization system based on WiFi fingerprints and crowdsourcing[C]//2015 IEEE International Conference on Communications Piscataway: IEEE Press, 2015: 3008-3013.
- [26] SECO F, JIMENEZ A R, PRIETO C, et al. A survey of mathematical methods for indoor localization[C]//2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2009: 9-14.
- [27] ZAFARI F, GKELIAS A, LEUNG K K. A survey of indoor localization systems and technologies[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3): 2568-2599.
- [28] DAVIDSON P, PICHÉ R. A survey of selected indoor positioning methods for smartphones[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(2): 1347-1370.
- [29] ALARIFI A, AL-SALMAN A, ALSALEH M, et al. Ultra wideband indoor positioning technologies: analysis and recent advances[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 707.
- [30] 邓中亮. 基于导航与通信融合的室内定位与位置服务[J]. *中国计算机学会通讯*, 2016, 12(3): 32-36.
- DENG Z L. Indoor positioning and location service based on integration of navigation and communication[J]. *Communications of CCF*, 2016, 12(3): 32-36.
- [31] 张欣旺, 董佳, 邹司晨, 等. 通信·导航·物联一体化 5G 室内通信网络[J]. *电信科学*, 2019, 35(8): 139-146.
- ZHANG X W, DONG J, ZOU S C, et al. Communication, navigation and IoT integration 5G indoor communication network[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(8): 139-146.
- [32] 胡青松, 李世银. 无线定位技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- HU Q S, LI S Y. *Wireless localization technologies*[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 2020.
- [33] 蒋天润, 尹露, 邓中亮, 等. 信道状态信息指纹定位算法性能评价方法研究[J]. *导航定位与授时*, 2019, 6(6): 113-118.
- JIANG T R, YIN L, DENG Z L, et al. Performance evaluation method of fingerprint localization algorithm based on channel state information[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2019, 6(6): 113-118.
- [34] YANG Z, ZHOU Z M, LIU Y H. From RSSI to CSI[J]. *ACM Computing Surveys*, 2013, 46(2): 1-32.
- [35] ZHU J B, LUO X L, CHEN D. Maximum likelihood scheme for fingerprinting positioning in LTE system[C]//2012 IEEE 14th International Conference on Communication Technology. Piscataway: IEEE Press, 2012: 428-432.
- [36] IRFAN N, BOLIC M, YAGOUB M C E, et al. Neural-based approach for localization of sensors in indoor environment[J]. *Telecommunication Systems*, 2010, 44(1/2): 149-158.
- [37] ADAME T, BEL A, BELLALTA B, et al. IEEE 802.11AH: the WiFi approach for M2M communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(6): 144-152.
- [38] DENG Z L, YU Y P, YUAN X, et al. Situation and development tendency of indoor positioning[J]. *China Communications*, 2013, 10(3): 42-55.
- [39] IMT-2020(5G) 推进组. 5G 网络技术架构白皮书[R]. (2015-05-28)[2021-01-27].
- IMT-2020(5G) Promotion Group. White paper on 5G network technology architecture[R]. (2015-05-28)[2021-01-27].
- [40] 阮陵, 张翎, 许越, 等. 室内定位: 分类、方法与应用综述[J]. *地理信息世界*, 2015, 22(2): 8-14, 30.
- RUAN L, ZHANG L, XU Y, et al. Indoor positioning: classification, methods and applications[J]. *Geomatics World*, 2015, 22(2): 8-14, 30.
- [41] 裴凌, 刘东辉, 钱久超. 室内定位技术与应用综述[J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(3): 1-10.
- PEI L, LIU D H, QIAN J C. A survey of indoor positioning technology and application[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(3): 1-10.
- [42] FERNÁNDEZ A, DE AGÜERO S G, PALOMO J M, et al. Wireless integrated communication and navigation system based on IEEE 802.16 standards[C]//2012 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-8.
- [43] 赵亚东, 尉志青, 冯志勇, 等. 卫星导航与 5G 移动通信融合架构与关键技术[J]. *电信工程技术与标准化*, 2017, 30(1): 48-53.
- ZHAO Y D, WEI Z Q, FENG Z Y, et al. Fusion architecture and key technologies of satellite navigation and 5G mobile communication[J].

- Telecom Engineering Technics and Standardization, 2017, 30(1): 48-53.
- [44] 陈诗军, 王慧强, 陈大伟. 面向 5G 的高精度融合定位及关键技术研究[J]. 中兴通信技术, 2018(5): 1-9.  
CHEN S J, WANG H Q, CHEN D W. 5G oriented high-precision fusion positioning architecture and key technologies[J]. ZTE Communications, 2018(5): 1-9.
- [45] 陈诗军, 王慧强, 陈强, 等. 带内高精度定位网系统及其关键技术[J]. 电子科学技术, 2017, 4(1): 93-101.  
CHEN S J, WANG H Q, CHEN Q, et al. High precision inband positioning network system and key technologies[J]. Electronic Science & Technology, 2017, 4(1): 93-101.
- [46] 陈诗军, 王慧强, 陈大伟, 等. 基于改进禁忌搜索的基站布局优化算法[J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(2): 341-347.  
CHEN S J, WANG H Q, CHEN D W, et al. A base station placement optimization algorithm based on improved tabu search[J]. Computer Engineering & Science, 2018, 40(2): 341-347.
- [47] 陈诗军, 王慧强, 陈强, 等. 一种高精度室内定位仿真系统的研究与实现[J]. 电子科学技术, 2016, 3(6): 710-715.  
CHEN S J, WANG H Q, CHEN Q, et al. Research and implement of high precision indoor location simulation system[J]. Electronic Science & Technology, 2016, 3(6): 710-715.
- [48] WANG X Y, GAO L J, MAO S W. CSI phase fingerprinting for indoor localization with a deep learning approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(6): 1113-1123.
- [49] WANG X Y, GAO L J, MAO S W, et al. CSI-based fingerprinting for indoor localization: a deep learning approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(1): 763-776.
- [50] QIAN K, WU C S, ZHENG Y, et al. Widar: decimeter-level passive tracking via velocity monitoring with commodity Wi-Fi[C]// Proceedings of the 18th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2017: 1-10.
- [51] ZHENG Y, ZHANG Y, QIAN K, et al. Zero-effort cross-domain gesture recognition with Wi-Fi[C]//Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. Seoul Republic of Korea. New York: ACM Press, 2019: 313-325.
- [52] DENG Z L, YU Y P, YUAN X, et al. Situation and development tendency of indoor positioning[J]. China Communications, 2013, 10(3): 42-55.
- [53] 付加伟, 韩可, 邓中亮, 等. 基于5G共频带信号的单基站定位方法[C]//2019 中国信息通信大会(CICC 2019). 北京: 中国通信学会, 2019: 43-48.  
FU J W, HAN K, DENG ZH L, et al. Single base station location method based on 5G TC-OFDM signal[C]//China Information and Communication Conference (CICC2019). Beijing: China Institute of Communications, 2019: 43-48.
- [54] BARBIERI L, BRAMBILLA M, TRABATTONI A, et al. UWB localization in a smart factory: augmentation methods and experimental assessment[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-18.
- [55] JIMÉNEZ RUIZ A R, SECO GRANJA F. Comparing ubisense, BeSpoon, and DecaWave UWB location systems: indoor performance analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(8): 2106-2117.
- [56] YIN Z D, JIANG X, YANG Z T, et al. WUB-IP: a high-precision UWB positioning scheme for indoor multiuser applications[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(1): 279-288.
- [57] 汪春霆, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面5G的融合初探(二)[J]. 卫星与网络, 2018(11): 22-26, 28.  
WANG C T, LI N, ZHAI L J, et al. A preliminary study on the fusion of satellite communication and ground 5G[J]. Satellite & Network, 2018(11): 22-26, 28.

## [作者简介]



王慧强 (1960- ) , 男, 河南周口人, 博士, 哈尔滨工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为未来网络与认知网络、网络安全与信息安全、云系统与软件可信性、智慧社区与物联网等。



高凯旋 (1995- ) , 男, 北京人, 哈尔滨工程大学博士生, 主要研究方向为室内定位、未来网络与认知网络、网络安全与信息安全等。



吕宏武 (1983- ) , 男, 山东日照人, 博士, 哈尔滨工程大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为网络安全、移动云计算与移动边缘计算、形式化建模与性能评价等。