

基于 5G+ 的室内外融合定位技术应用及发展

吴博林¹ 李娜¹ 王金婵¹ 张立文¹

WU Bolin LI Na WANG Jinchan ZHANG Liwen

摘要

为推进我国数字经济发展,国家“十四五”规划和2035年远景目标纲要明确指出要加快5G建设,构建基于5G的应用场景和产业生态。随着5G演进和规模化部署,对5G高精度定位及5G+融合定位技术的需求更为迫切。基于此,文章总结了主要的室内外及多源融合定位技术原理。从5G定位技术演进和5G定位优势出发,着重介绍了基于5G+的多源融合定位技术研究现状,并对基于5G+的多源融合定位技术应用前景进行了预测,探讨了其在智慧城市、智慧医疗、应急救援与公共安全等领域的应用潜力,总结了当前基于5G+融合定位技术面临的挑战,同时展望了基于5G+融合定位技术未来的发展方向,旨在促进5G+融合定位技术研究和应用的发展。

关键词

5G定位技术;高精度定位;5G+;融合定位

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.022

0 引言

现代社会是信息化、智慧化的时代,随着数字技术飞速发展,定位技术已逐渐渗透至生活的每个角落,成为支撑数字化生活的重要基础设施技术之一。从基于卫星的全球导航系统到蜂窝基站定位,再到室内蓝牙、射频识别(radio frequency identification, RFID)等,多元化定位技术不断发展。随着5G、物联网与人工智能的深度融合,定位技术为智慧城市与数字经济的可持续发展提供支撑。据统计,全球超80%的智能手机应用依赖定位功能实现核心服务,手机定位服务如今已渗透到我们生活中方方面面^[1]。在定位技术的实际部署中,由于室内外场景及应用需求不同对技术方案形成显著差异。室外定位主要依托卫星导航定位技术,例如GPS和北斗,另一类技术是基于移动网络基站定位。但卫星信号很容易受到遮挡,导致卫星在室内、城市峡谷等卫星遮蔽区域的高精度定位仍是难以解决的问题。针对室内复杂环境,先后出现Wi-Fi、蓝牙、RFID、惯性导航(inertial measurement unit, IMU)、超宽带(ultra wide band, UWB)等室内定位技术。由于室内定位技术部署成本较高,所以不适合在室外进行大规模部署。针对单一定位技术无法实现任意环境下高精度定位的问题,融合不同定位系统、不同定位信号,实现更弹性的高精度室内外无缝定位系统仍然是目前定位领域面临的一个重要课题,多源融合定位在未来将是必然发展趋势。

为促进数字经济发展,国家“十四五”规划和2035年远景目标纲要明确提出要加快5G建设,实施“北斗产业化”。2020年,北斗卫星导航系统开始面向全球用户提供服务。然而,北斗系统主要用于室外定位,在常见的室内场景中,由于建筑物遮挡导致的多路径效应及卫星信号捕获不足,其工作效能受到显著限制,所以单一的全球导航卫星系统定位无法满足高精度位置服务需求。由于5G的低时延、大带宽等特性,其定位精度大大提高,可以弥补卫星定位的不足。2019年6月,工业和信息化部向移动、联通、电信和广电四家运营主体发放5G商用牌照,标志着中国正式进入5G商用时代。随着5G的演进和部署,基于5G+多模一体化融合技术已经成为导航与位置服务领域的研究热点。

1 定位技术基础

1.1 室外定位技术

1.1.1 全球卫星导航系统

全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)是室外定位主流技术。目前主要是美国GPS、中国北斗、俄罗斯格洛纳斯和欧盟伽利略。GNSS定位系统需要用户的位置能够随时观测到4颗以上的卫星。GNSS系统定位技术结合多卫星系统协同,可在全球范围内快速完成大范围测量,具有全天候适应性,不受昼夜、天气影响,适用于复杂地形和恶劣环境,在工程测绘、灾害监测、交通导航等领域展现出独特优势,但也存在一定的局限性。比如,受天气条件及终端能力制约,难以满足更高精度定位需求;在室内、隧道等卫星信号遮蔽场景需依赖辅助定位技术;易受电

1. 河南科技大学信息工程学院 河南洛阳 471000

[基金项目] 河南省科技攻关项目(242102211103)

磁干扰影响，多径效应和非视距传播现象会导致信号质量恶化甚至定位失效。未来，随着系统频点升级与抗干扰算法优化，GNSS 定位系统将在精度稳定性和场景适用性上进一步突破，但需结合 5G、AI 等技术构建多源融合定位体系以弥补固有不足。

1.1.2 5G 移动网络基站定位技术

移动网络基站定位是一种常用的手机用户定位方法。在 2020 年 7 月 3 日第三代合作伙伴计划（3GPP）宣布完成的 5G 标准第二版规范 R16 中增加了两个定位增强信号：上行定位参考信号（sounding reference signal, SRS）和下行定位参考信号（positioning reference signal, PRS）^[2]。利用大带宽和多波束的特性，定义了上行到达角（uplink angle of arrival, UL-AoA）、下行离开角（downlink angle of departure, DL-AoD）、多站信号往返时间（multi-round trip time, Multi-RTT）、信号到达时间差法（time difference of arrival, TDoA）及 DL-TDoA 和 UL-TDoA 等多种定位技术，图 1 为 5G 移动网络基站定位技术示意图。

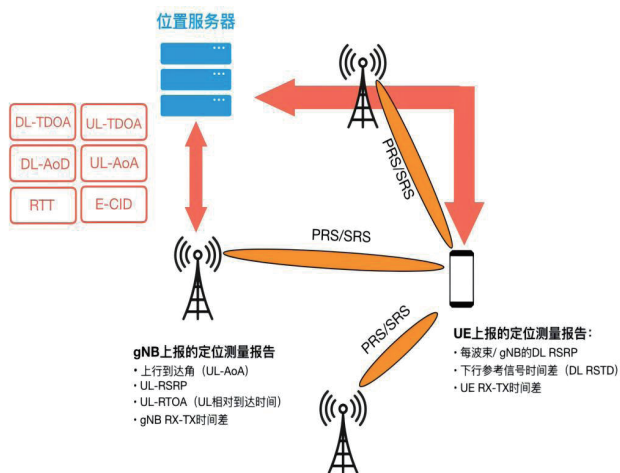


图 1 5G 移动网络基站定位技术

由于 5G 移动网络具有带宽大、高载波频率、天线数量多、网络密度大等优势，5G 定位技术具备实现更高定位精度的潜力。2021 年，上海交通大学何迪团队^[3]首次报告利用 4 个商用 5G 宏基站联合定位，实现亚米级室内定位。2021 年，高通^[4]采用宏基站在室外分别开展了单基站 UL-AoA 定位与多基站 RTT 测距联合定位，分别实现了 2.1 m、1 m 的定位精度。

1.2 室内定位技术

随着物联网的快速发展，在基于位置服务的相关场景中，对高精度室内定位的需求日益强烈。目前室内定位技术主要包括移动网络基站、蓝牙、Wi-Fi、UWB、RFID、ZigBee、惯性导航、红外、超声波等定位技术。

1.2.1 5G 移动网络基站定位技术

与室外定位相同，5G 移动通信网络的基站定位机制同

样适用于室内环境。随着 5G 基础设施建设的持续推进，其显著优势在于更大的系统带宽与更窄的子载波间隔，这直接提升了室内位置计算的精度。相较于其他定位方案，在已部署 5G 网络的区域，具备高精度定位能力，无需额外建设专用定位网络，也免除了特定终端或标签的需求。位置服务网络可充分复用现有通信设施，实现室内定位服务的高效部署。

1.2.2 蓝牙定位技术

蓝牙是一种低功耗的短距离无线通信技术，通过对信号强度的测量实现定位功能。当前主流版本蓝牙 5.1 引入了 AoA 和 AoD 等测向技术，显著提升了定位精度。该技术在室内定位应用中的突出优势在于终端设备体积小巧，便于集成到智能手机、计算机及其他便携设备中，有利于推广普及与部署。然而由于蓝牙信号抗干扰能力较弱、稳定性不足且有效通信距离有限，导致其定位精度仍有待提高。

1.2.3 Wi-Fi 定位技术

Wi-Fi 定位技术是室内定位技术中的一种，是利用无线设备，如智能手机，与附近的 Wi-Fi 接入点之间的信号强度或到达时间来估算设备的位置，实现定位、监测和追踪任务。目前所有智能手机标配 Wi-Fi 系统，在公共场所和室内环境中，Wi-Fi 信号随处可见，是一项低成本容易实现的定位技术。但是 Wi-Fi 定位精度通常在 5~15 m 之间，定位精度受周边 Wi-Fi 接入点数量和墙体遮挡等情况的影响，需要较多的 Wi-Fi 接入点才能提高定位精度，且功耗较高，适用范围受限，通过结合或辅助其他定位技术，可以进一步提升定位精度。

1.2.4 RFID 定位技术

RFID 是一种通过标签与读写器之间的无线通信实现非接触式识别的技术。RFID 标签通常包含唯一的识别码和天线，能够主动或被动地发送射频信号。读写器则通过天线接收来自标签的信号，并对其进行解码和处理。RFID 技术具有非视距传输、识别速度快等特点，电子标签体积小、成本低廉等优点。另外，RFID 系统能够同时识别多个标签，大大提高了定位效率。在密集标签的环境中，这一优势尤为明显，广泛应用于物流追踪、货物管理、商品定位等领域。

1.2.5 UWB 定位技术

UWB 是一种基于超宽带信号的定位技术，其通信频率范围从 3.1GHz 到 10.6GHz，通过发射极短脉冲传递信号，穿透力强，抗干扰能力远超 Wi-Fi 或蓝牙。UWB 定位是通过基站与定位标签之间发送和接收极窄脉冲信号来传输数据，采用与卫星定位相似的方式实现高精度定位，可适用于诸多应用场景下的定位业务。

除了上述室内定位方法，还有 ZigBee、惯性导航、红外、超声波等室内定位技术，这些室内定位技术在精度、成本、

部署复杂度、适用环境等方面各不相同。

1.3 室内外融合定位技术

定位技术虽然众多，但在复杂的现实环境中，单一的定位技术往往难以满足定位需求。定位技术正在从单一的室外卫星导航向室内外全域高精度定位演进。因此，多源融合定位技术将成为必然发展趋势。其核心技术架构主要包括：通过异构定位源的协同互补，整合卫星导航、移动网络基站、UWB 等多模态定位技术，旨在提供高精度连续定位服务；以及基于卡尔曼滤波、粒子滤波等算法框架，对多源传感数据进行时空配准与置信度加权融合。室内外融合技术还涉及室内外无缝切换技术，通过动态场景识别与定位权重自适应调整机制实现环境边界平滑过渡。

1973 年，Bar-Shalom^[5]提出了一种数据融合处理滤波器，首次引入多源融合技术概念。Xu 等^[6]对紧组合 GNSS/IMU 模式定位技术进行了研究。2023 年，Li 等^[7]提出了一种紧耦合的 GNSS/INS/视觉/激光雷达组合导航方法，通过扩展卡尔曼滤波方法在原始数据级直接融合，在 GNSS 半开放天空和困难环境下保持亚米级定位。随着 2020 年北斗导航系统全面建成，基于北斗的融合定位研究方案不断提出，刘家龙等^[8]基于北斗/GPS 设计了一种具有实时解析定位数据和定位装置通信信息能力的高可靠定位系统。罗华峰等^[9]提出了北斗和蓝牙的室内外协同定位技术，通过改进 BP 神经网络实现全场景下的无缝切换，在室内外缓冲区域引入定位融合策略提高定位精度。李耕宇等^[10]设计了室外“北斗+5G”的定位方法和地下时 UWB 的定位方法的电力巡检员定位系统。龚利和薛嘉琛等^[11-12]构建了北斗和 5G 融合定位模型和系统，实现了在模拟复杂环境下融合定位。目前，多源融合技术已广泛应用在定位、导航领域。

2 基于 5G+ 的多源融合定位技术研究现状

随着 5G 发展，其大带宽传输、多天线阵列以及高精度同步等技术的支撑，使 5G 定位精度有很大提高。支持 5G 各行业中基于位置的服务和应用，提供高可靠、高精度的终端位置信息始终是 3GPP 制定标准的关键目标之一。根据 3GPP 的规划，5G 技术标准演进被分为两个主要阶段，第一阶段涵盖了 Rel-15/16/17 版本，Rel-18/19/20 属于 5G 演进的第二阶段，即 5G Advanced。其中 Rel-15 是 5G 的基础标准，在 R16 版本中首次增加了 5G 定位功能，定义了 AoA、AoD、Multi-RTT、TDOA 等定位技术。Rel-17 通过降低定位时延、增强角度计算精度等，进一步提高了定位效率和精度；Rel-18 通过引入载波相位定位、定位信号载波聚合和 Sidelink 高精度定位等技术进一步提升了定位精度。5G 技术定位标准演进时间线如图 2 所示。

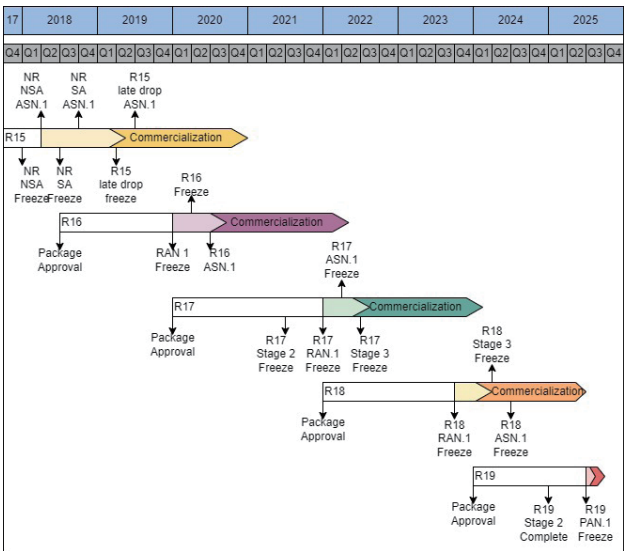


图 2 5G 技术定位标准推算

5G 定位主要具备两方面优势：一方面依托于大带宽、密集组网等特点，利用带内无线定位实现定位区域拓展；另一方面基于 5G 网络的高速率、大容量通信等特点，为定位服务赋能。随着 5G 网络不断建设，据工业和信息化部统计，截至 2025 年 3 月，我国 5G 基站总数达 439.5 万个，5G 移动电话用户达 10.81 亿户。在 5G 新基建的支撑下，便携的 5G 手机、电脑等终端设备，以及更大带宽，海量连接和超低延时的通信互连能力，为 5G 高精度定位提供强有力的支持。基于 5G+ 融合定位应用已经成为新一代信息技术创新发展应用的重要方向。

2.1 北斗+5G 定位

2019 年我国全面启动 5G 网络建设，2020 年北斗系统全面完成组网，两大系统的建设运行为北斗与 5G 融合定位提供了基础设施平台。北斗与 5G 融合定位技术已经成为国内导航与位置服务领域的研究热点，定位策略如表 1 所示，其技术体系大致可分为辅助定位、加权融合定位和信号融合定位^[13]。

表 1 不同场景下北斗+5G 定位融合方式

场景	主定位方式	辅助位方式
室外开阔区域	北斗定位	5G 定位、5G 辅助北斗定位
室外遮挡区域（≥4 颗卫星）	加权融合定位、5G 辅助北斗定位	信号融合定位
室外遮挡区域（1~3 颗卫星）	信号融合定位	5G 定位

在 5G 辅助北斗定位技术中，主要采用北斗广域定位+5G 局域定位，北斗系统仍作为核心定位基准，当卫星信号受遮挡时，利用 5G 网络基站定位提供辅助定位参考。加权

融合定位主要采用双系统并行计算机制,通过两个定位系统分别获取独立定位结果,运用动态权重算法对两组空间坐标进行最优加权融合,提高定位精度。曹晓春等^[14]通过北斗+5G联合解算获取定位结果。王新宇等^[15]提出基于观测值质量定权的北斗与5G室内外融合定位方法实现精准定位。信号级融合技术通过将北斗卫星与5G原始信号的特征参数进行联合建模,构建多源异构信号联合定位方程,通过优化算法解算目标位置坐标,实现终端定位。薛嘉琛等^[12]提出一种北斗与5G信号联合定位算法,利用最小二乘拟合算法迭代得到最佳的拟合数据,将两个系统定位数据进行融合解算获得定位结果。2025年2月6日,媒体报道中国科学院国家授时中心研究团队提出了一项重要技术突破—城市环境中的北斗+5G组合无缝定位模型,该模型引入双阈值门限机制,利用北斗与5G信号融合解决了城市场景中定位性能不稳定及室内外切换不平滑问题,提升复杂场景下的定位精度。

2.2 5G+GPS 定位

全球定位系统GPS凭借其全天候、高覆盖、低成本的特点在空间定位领域得到广泛应用。然而,在峡谷、地下隧道等特殊场景时,信号可能受到干扰或者阻挡导致GPS无法提供高精度定位服务,甚至定位失效。考虑到5G和GPS终端设备的普及度,已有不少专家学者对5G和GPS融合定位进行研究。Li等^[16]提出了一种适用于5G的双差分算法,并将5G双差分观测值与未差分/双差分GPS观测值进行组合定位,发现5G与GPS组合定位模型在不同定位模式下能够实现更准确的定位结果,尤其在遮挡环境中优势更明显。姜大乾^[17]针对GPS信号被遮挡引起车辆定位不准确、定位位置更新频率慢的问题,基于卡尔曼滤波算法,提出了利用5G技术提升GPS定位,实现智能汽车高精度定位。张一达^[18]提出一种5G+北斗+GPS的动态分权融合定位算法,该算法首先对北斗与GPS观测值进行筛选,然后根据北斗+GPS可见星的数量分配相应权值,与5G观测数据进行不等权的融合定位,有效提高了定位终端定位精度和覆盖范围。洪宇飞^[19]在卡尔曼滤波的基础上提出了一种GPS/5G融合定位算法,较大提升了在室内环境中的定位精度。

2.3 5G+UWB 定位

UWB技术具有低功耗、强抗干扰性、高速实时定位等特点,可以弥补5G在耗能上的不足,在室内定位领域有着广泛的应用。在室内复杂环境中5G基站与UWB基站融合定位不仅能够提升定位精度,也使UWB基站与5G基站通用,降低室内定位基础设施的布设成本。张凯丽等^[20]提出了基于融合定位算法的5G+UWB室内定位模型,通过融合算

法将两个单系统定位结果进行融合得到组合系统定位精度最高可达0.22 m,最低可达0.73 m,实现亚米级定位。刘厚荣^[21]提出一种基于5G+UWB融合基站的无线网络通信定位优化方法,并在实际井下挖掘环境中进行了测试。刘源^[22]提出一种基于LM-BP神经网络的5G+UWB融合定位方法,设计了5G+UWB融合定位试验平台并实现验证。除5G+UWB融合定位之外,李明锋等^[23]基于5G通信网络提出5G+UWB+惯导技术的井下人员定位系统,利用5G网络将采集的UWB与惯导数据传输至计算平台,完成定位解算,实现了高精度定位。张琳^[24]将通信网络和室内定位进行优势互补,在5G基础上融入UWB和即时定位与地图构建,提出了一种基于5G+UWB+激光雷达的融合室内定位方法,从而实现室内外定位的无缝衔接。

2.4 其他 5G+ 组合定位

除上述多源定位方式之外,随着5G网络的普及和技术发展,不同组合的“5G+”高精度定位成为新的研究热点。例如,金武等^[25]通过融合卷积神经网络和循环神经网络的优势,开发了一个深度学习模型,分别处理时空数据,提出了一种基于5G UTDOA与MR指纹技术的室内定位融合策略,有效提升了室内定位精度。郭科跃^[26]通过把RTK定位新技术与5G有效融合,设计的智能巡检系统在中石化系统内完成了双防巡检融合和国产化适配。程振豪等^[27]提出了一种融合5G信道状态信息和地磁数据的室内定位算法,在全连接层实现了异质传感器数据的融合定位。罗威等^[28]基于5G信号特征和多信号分类算法,提出一种5G室内三维指纹定位算法,应用于电力巡检机器人定位。邓玥团队^[29]通过融合TOA/AOD定位解算提出了5G+SINS紧组合导航算法,并在复杂场景下进行了仿真验证。

随着5G技术的商业化推进及市场对室内精准定位需求的增长,现代智能化办公场所普遍存在Wi-Fi接入点的高密度布设现象,王迪也^[30]提出了基于5G辅助的多源融合定位系统,搭建了一个完整的仿真实验平台,利用5G高密度组网的特性,以Wi-Fi为主数据源,引入D2D和PDR融合数据源,并设计了一个融合定位算法,实现了室内外无缝定位解决方案。这些研究作为5G融合室内定位提供了新的技术思路和解决方案。

3 基于 5G+ 多源融合定位技术发展前景与挑战

在众多应用场景中,传统的单一定位技术的局限性日益凸显。随着5G网络基站数激增,以及5G具有融合适应性强、大带宽、延时低、速率快等特点能够应对多样化场景下个性化需求,为了突破单一定位技术的瓶颈,满足日益增长的高

精度、高可靠性定位需求,基于5G+技术的融合定位已成为当前定位技术的重点发展方向。

在智慧城市与管理方面,通过北斗+5G融合定位,可实现广域定位和局域定位结合,通过在车辆上安装融合定位终端,能够准确获取车辆的位置、速度和行驶方向等信息,交通管理部门可以对来往的车辆进行实时的监控和调度,实现应急车辆路径优化、缓解拥堵状况的效果。例如,在城市公交系统中,通过融合定位技术,公交公司可以实时掌握每辆公交车的位置,合理安排发车时间和线路,提高公交运营效率,为乘客提供更准确的公交到站信息。在物流运输中,可以实时了解货物运输车辆的位置,及时调整运输计划,确保货物按时送达。

在智慧医疗与养老方面,5G+融合定位技术可以实现对医生、患者以及医疗设备的实时定位。通过佩戴定位标签,医院管理人员可以快速找到需要紧急支援的医护人员,对于老年患者、重症患者或者患有认知障碍的患者,定位技术可以实时监测其位置,防止患者走失。同时,对医疗设备如轮椅、担架、输液泵等进行定位管理,能够提高设备的使用效率。在养老方面,通过为老年人佩戴定位设备,工作人员可以实时了解老年人的活动轨迹和位置信息。一旦老年人出现跌倒、长时间停留异常区域等情况,系统能够及时发出警报、处理,保障老年人的生命安全。

在应急救援与公共安全方面,在煤矿、隧道等井下,5G+UWB室内定位的融合,对井下坐标进行精确定位,有利于对井下工作人员的安全进行实时监测。依赖于UWB的能耗低、穿透力强及抗干扰能力强等特点,还可以为消防、地震救援等场景提供关键位置信息。在工业物联网与智能制造方面,例如在智能仓储场景中,5G+结合Wi-Fi、蓝牙、RFID等室内定位技术可达到更加精确的轨迹控制,能够实现对货物托盘、叉车等设备的实时定位,提高仓储空间利用率和货物搬运效率,同时结合室外定位形成全流程物流追踪闭环,显著提升仓储自动化水平;在智能制造生产过程中,可以精确追踪生产设备、原材料以及人员的位置信息,实现生产资源的优化配置。

随着5G、物联网等新技术的不断发展,导航与位置服务也将与更多的行业融合,形成更多的创新应用。基于5G+多源数据融合技术在定位与组合导航领域的应用研究呈多元化发展趋势,应用前景广阔。但是,基于5G+的室内外融合定位技术仍面临以下挑战:

(1) 多源数据融合的复杂性与实时性。异构传感器(如5G、UWB、IMU等)的时空配准与数据同步存在技术难点。

(2) 在实际应用场景中,多径效应与非视距传播现象

会显著恶化5G信号质量;此外,测距精度会受到5G系统非理想性的影响。

(3) 无缝切换的稳定性。现有切换算法主要依赖信号强度阈值判定,易因信号突变引发频繁切换或延迟响应。还有,异构系统的时空基准统一尚未完全解决,导致切换过程中坐标跳变,需引入更高效的时空配准模型。

(4) 目前,5G+融合定位大部分尚处于理论、初步测试研究阶段,如何进一步提高融合定位的连贯性及可靠性,也有待进一步研究。

4 结论

5G技术的出现,不仅大大推动了通信产业发展,还深刻影响了通感一体化体系的构建,5G定位的优势展现出了其对导航与位置服务的强大推动力。随着5G的演进和部署,5G+多模一体化融合技术已经成为导航与位置服务领域的研究热点。论文从当前社会对于高精度定位的需求和5G技术的发展出发,对室内外常用技术定位展开了介绍,并分析了多源融合定位技术的研究现状,着重探讨了基于5G+的融合定位技术发展、应用前景和挑战。通过混合定位架构、多源融合算法等机制的结合,当前基于5G+的融合定位研究已初步实现了从室外广域覆盖到室内高精度定位,并在智能汽车管理、电力巡检、智慧医疗、矿井下应急救援与公共安全等方面取得应用。然而,融合定位的机制、算法及模型还需要进一步提升,复杂环境适应性、异构系统时空基准统一等问题仍制约着技术的广泛应用。

随着人工智能的发展,定位和导航技术迈入了智能时代,服务更加聚焦于智能网联汽车、智能无人机系统、智慧城市管理等智能系统。未来基于5G+多源融合定位技术将深度集成人工智能算法,在融合定位机制、算法及模型方面向数据与模型共同驱动的人工智能方向迈进,突破传统框架的局限性。随着5G向6G通信技术的演进,定位技术将深度融入通信系统架构,通感一体化技术将成为导航和位置服务的一个重要研究方向。

参考文献:

- [1] 5G positioning: enterprise problem solver or just another RTLS technology? [Z]. ABI research, 2021.
- [2] 3GPP. Revised WID: NR positioning support: RP-192581 [EB/OL]. (2019-06-03)[2025-12-25]. https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/RAN/TSGRAN_84/Docs/RP-192581.zip.
- [3] HE D, CHEN X, PEI L, et al. Multi-BS spatial spectrum fusion for 2D DOA estimation and localization using UCA

- in massive MIMO system[J/OL]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2021[2025-12-23].<https://ieeexplore.ieee.org/document/9216099>.DOI: 10.1109/TIM.2020.3029363.
- [4] Qualcomm Technologies, Inc.MWC 2021: qualcomm demos enhanced wide area 5GOTA testbeds [EB/OL].(2021-06-27)[2025-12-25].<https://www.qualcomm.com/news/onq/2021/06/27/demonstrating-advanced-5g-innovations>.
- [5] BAR-SHALOM Y. Extension of the probabilistic data association filter to multi-target environment[EB/OL].1974[2025-12-22].<https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=c3578b88d115364c358614cfa0ddec00>.
- [6] XU Q Z, GAO Z Z, LÜ J, et al. Tightly coupled integration of BDS-3 B2b RTK, IMU, Odometer, and dual-antenna attitude[J]. IEEE internet of things journal, 2023, 10(7): 6415-6427.
- [7] LI S Y, LI X X, WANG H D, et al. Multi-GNSS PPP/INS/Vision/LiDAR tightly integrated system for precise navigation in urban environments[J]. Information fusion, 2023,90(B3): 218-232.
- [8] 刘家龙, 吴柯锐, 张会新, 等. 基于北斗/GPS 双模模块的高可靠定位系统设计[J]. 航天控制, 2024, 42(4): 35-41.
- [9] 罗华峰, 王刘旺, 左浩然, 等. 基于北斗和蓝牙的室内外协同定位系统[J]. 集成电路与嵌入式系统, 2025,25(3):73-79.
- [10] 李耕宇, 肖志刚. 基于北斗 5G 和 UWB 的电力巡检员定位系统[J]. 信息技术与信息化, 2021 (7):158-160.
- [11] 冀利, 赵延杰, 朱明辉. 一种基于北斗和 5G 技术融合的复杂环境下机车定位方法[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(2): 44-51.
- [12] 薛嘉琛, 武建锋, 焦喜康, 等. 一种基于北斗+5G 的联合定位系统[J]. 无线电工程, 2022, 52(6): 1004-1012.
- [13] 金耀, 周又眉, 张贺, 等. 北斗+5G 融合定位技术研究及应用进展[J]. 全球定位系统, 2023, 48(4): 12-18.
- [14] 曹晓春, 张静, 林开钦, 等. 北斗+5G 联合定位与误差校正技术[J]. 遥测遥控, 2022, 43(6): 70-77.
- [15] 王新宇, 杜翠凤, 李帅. 基于观测值质量定权的北斗伪距差分与 5G 室内外融合定位方法[J]. 广东通信技术, 2023, 43(12): 7-14.
- [16] LI F X, TU R, ZENG L C, et al. Integrated positioning with double-differenced 5G and undifferenced/double-differenced GPS[J]. Measurement, 2023, 218: 113114.
- [17] 姜大乾. 5G 时代下智能汽车 GPS 定位技术研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2022, 6(1): 205-206.
- [18] 张一达. 基于 5G 和 GNSS 的室内外一体化定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [19] 洪宇飞. 基于 5G+GPS 的融合定位技术的研究与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2024.
- [20] 张凯丽, 涂锐, 李芳馨, 等. 基于 5G+UWB 的室内定位算法研究[J]. 全球定位系统, 2024, 49(3): 38-44.
- [21] 刘厚荣. 基于 5G 和 UWB 融合基站的井下系统应用分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(5): 318-322.
- [22] 刘源. 基于 LM-BP 神经网络的 5G+UWB 融合定位方法[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2022.
- [23] 李明锋, 李冀, 刘用, 等. 基于 5G+UWB 和惯导技术的井下人员定位系统[J]. 工矿自动化, 2024, 50(1): 25-34.
- [24] 张琳. 基于 5G+UWB+激光雷达信息融合的室内定位研究[J]. 长江信息通信, 2023, 36(10): 126-128.
- [25] 金武, 陈亦繁, 徐宗, 等. 基于 5G UTDOA 与 MR 指纹技术的室内定位融合算法研究[J]. 邮电设计技术, 2025 (1): 47-50.
- [26] 郭科跃. 基于 5G+RTK 定位技术的智能巡检管理系统[J]. 智能物联技术, 2024,56(6): 77-80.
- [27] 程振豪, 赵冬青, 郭文卓, 等. 一种融合 5G CSI 和地磁的集成学习定位方法[J]. 测绘通报, 2024(7): 12-16.
- [28] 罗威, 蒋政, 于佳, 等. 面向电力巡检的 5G 室内三维指纹定位算法[J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(6): 81-86.
- [29] 邓玥, 余江, 郭文飞, 等. 信号遮挡环境下融合 TOA/AOD 的 5G/SINS 组合导航算法模型与精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(7): 1133-1139.
- [30] 王迪也. 5G 辅助的室内外融合定位技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.

【作者简介】

吴博林(2002—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 研究方向: 定位智能算法、图像处理。

(收稿日期: 2025-07-15 修回日期: 2026-01-15)