



云-端协同的智能手机行人室内外无缝定位 技术及其原型系统验证

刘万科¹ 陶贤露¹ 张传明² 姚宜斌¹ 王甫红¹ 贾海禄² 楼益栋³

¹ 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

² 北京百度网讯科技有限公司,北京,100089

³ 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

摘要:随着位置服务应用的兴起和移动智能终端的普及,高精度导航定位需求正在从孤立的区域延伸到无缝的全域,从专业群体走向大众用户。然而,实时、连续、完备的行人导航仍然面临着诸多挑战,如室外区域全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)信号易受遮挡影响、室内环境Wi-Fi/低功耗蓝牙(blueetooth low energy,BLE)/地磁指纹库更新频繁、室外内过渡区域平滑切换困难等。此外,大众移动智能终端的定位传感器受成本与功耗限制,观测数据一般噪声较大且稳定性差。因此,提出设计了云-端协同的大众行人用户室内外无缝精密定位方案,突破了信标指纹库的众包采集与快速更新、智能手机多传感器信息融合的精密定位、室内外无缝切换等关键难题,研制了大众行人协同精密定位软件,通过综合利用位置服务平台提供的协同精密定位增强信息,以及智能手机终端获取的多源观测数据(GNSS、微型惯性测量单元(miniature inertial measurement unit,MIMU)、Wi-Fi、BLE、磁力计及气压计等),实现了大众用户室外精度优于1.5 m,室内精度1~3 m,并具备室内外平滑切换能力的导航定位服务,支撑了大众用户室内外无缝精密定位的需求。

关键词:行人导航;室内外无缝;云-端协同;智能手机;多源融合;机器学习

中图分类号:P228

文献标志码:A

近年来,移动互联网的高速发展和智能手机的普及,带动了基于位置服务(location based service,LBS)产业的发展^[1-2]。随着定位技术的进步和移动互联网的普及,LBS逐渐渗透到人们的生活中,全时全域内的高精度位置信息已经成为社会生活中一项不可或缺的关键基础信息^[3-5]。大众应用市场是导航与位置服务产业发展的重心和依托,并且在监控跟踪类可穿戴式设备、移动健康医疗、城市快递和共享单车等细分领域得到广泛拓展^[6-8]。

导航定位技术各有特点,其适用范围和定位精度也各不相同。卫星定位技术实现了室外的广域覆盖,理想观测条件下可达到米级、分米级甚至更高精度,但在城市峡谷、大型立交桥等遮挡区域,全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)观测信号减弱且数据质

量下降,进而影响定位精度与可靠性^[9-11]。在室内区域,目前普遍采用Wi-Fi/低功耗蓝牙(blueetooth low energy,BLE)/地磁场等指纹匹配的定位技术,能提供3~10 m的定位精度,而局部区域重点部署的超宽带(ultra wide band,UWB)/射频识别(radio frequency identification,RFID)等信标定位技术,可以实现米级至分米级的室内定位服务^[12-14]。然而,基于指纹匹配的定位依赖相关数据库的采集密度和更新频率,信标定位的性能也与其部署方案密切相关,导致室内定位系统的运行维护成本较高,难以推广至大众用户。此外,现有的2G/3G/4G移动通信形成了地面最大覆盖的通信网络,利用时分码分正交频分复用(time and code division-orthogonal frequency division multiplexing,TC-OFDM)技术使得移动通信网络成为具有室内外定位能力的地面广域覆盖

收稿日期:2021-06-12

项目资助:国家重点研发计划(2016YFB0501803);湖北省技术创新专项(重大项目)(2019AAA043);武汉市科技计划项目(2020010601012185)。

第一作者:刘万科,博士,教授,主要从事GNSS高精度定位以及低成本多传感器组合导航技术研究。wklou@sgg.whu.edu.cn

通讯作者:姚宜斌,博士,教授。ybyao@whu.edu.cn

网络^[15-16]。但受限于移动通信网络覆盖率,且其定位精度仅为几十米至数百米,无法提供高精度室内外无缝导航位置信息。

随着移动智能终端尤其是智能手机的广泛普及,国内外围绕智能手机室内外定位系统研制开展了大量工作^[17-19]。谷歌公司采用外业采集和众包回传结合的方式聚合海量的局部基站、Wi-Fi数据库等定位资源,形成全球大众化手机终端网络定位服务平台,通过协同计算最大限度满足用户的实时定位需求^[20]。高通公司采用辅助全球卫星定位系统(assisted global positioning system, AGPS)+高级前向链接三边测量(advanced forward link three edge measurement, AFLT)+小区识别(Cell-ID)混合定位技术的解决方案,形成了无线网络辅助GPS定位,可在城区实现5~50 m的定位精度^[21]。国内的千寻位置网络有限公司依托遍布全国的卫星定位地基增强站,面向全国范围内的室外应用终端提供无缝漫游的米级精度位置纠偏数据服务^[22]。百度网讯科技有限公司基于百度地图应用软件,借助GNSS/移动基站/Wi-Fi和传感器信息,实现了精度约为10 m的综合导航定位服务,整体定位成功率高于99.5%。

然而,当前室内外定位技术手段仍然存在信息缺乏、离散以及体制落后的缺陷^[23-25],其面临的关键问题主要包括:①室外GNSS信号易受阻且定位误差修正不充分;②室内信标源指纹库更新频繁;③室内外过渡区域无缝平滑切换能力不足。随着多源传感器工艺水平的迭代更新与性能提升,将不同的定位新技术进行紧密有效的协作,有望解决定位信息缺乏、定位源离散、定位时空障碍等问题。因此,本文提出了一种适用于大众用户终端的多类传感器集成、多种先进技术方法融合的多体制协同精密定位方案,以实现大众行人室内外无缝的精密导航定位。

1 多体制协同的室内外精密定位系统总体架构

多体制协同的室内外精密定位技术是以大众智能终端为载体,有效整合当前适用于大众用户终端的各类传感源,融合适配不同场景的各种定位技术方法,突破多体制技术互通共联的难点,通过室内外不同环境下的多体制协同定位系统的架构设计(图1),实现全时全域内的大众行人无缝平滑定位。

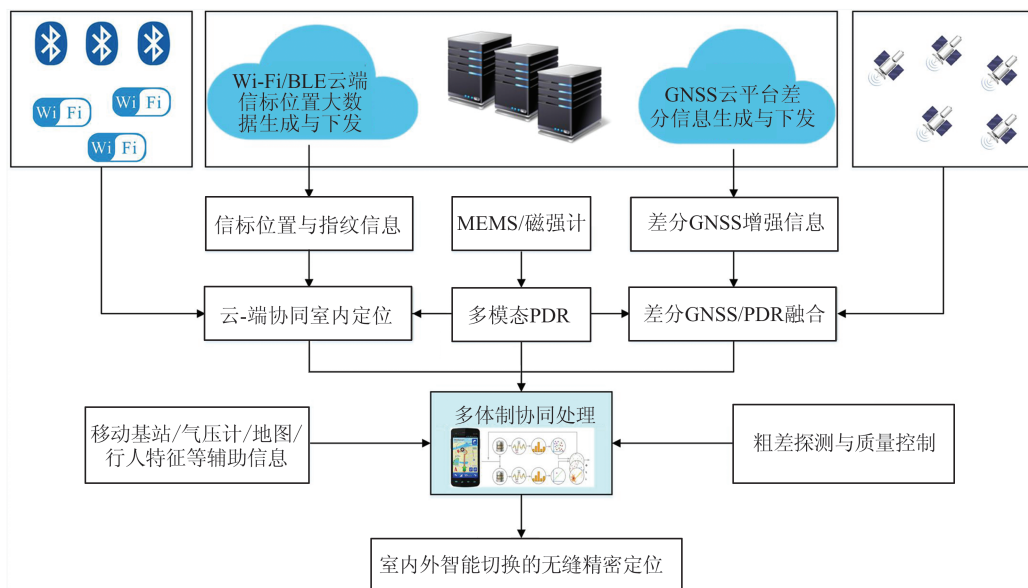


图1 多体制协同的室内外精密定位技术总体架构图

Fig. 1 Overall Architecture of Multi-system Collaborative Indoor and Outdoor Precision Positioning Technology

该体制具有云-端协同和多源协同两个显著特点:一方面协同精密定位云平台,借助信息收集、过滤、聚类、整合,形成全国覆盖的大规模信标指纹数据库;另一方面综合遍布全国的基准站网络数据,生成实时高精度差分改正信息,然后

通过移动通信网络播发云平台的信标位置和GNSS增强信息,并结合定位终端的观测信息,实现支持海量用户的云-端协同精密定位服务;同时,针对单一传感器在室内外复杂环境定位信息缺乏与定位能力不足的缺陷,基于智能终端获取

的多源观测数据(GNSS、微型惯性测量单元(miniature inertial measurement unit, MIMU)、Wi-Fi、BLE、磁力计及气压计等),实现云平台增强的多源协同无缝定位。

1.1 基于GNSS云定位增强信息的GNSS/MEMS室外定位系统构架设计

大众行人用户的多体制协同室外精密定位系统构架由基础平台层、服务层、信息处理层和应用层4部分构成,系统架构如图2所示。其中,基础平台层是实现GNSS/微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)室外高精度定位的平台支撑,其在GNSS高精度云处理平台的支持下,生成GNSS差分增强信息。服务层用来实现差分增强信息及定位辅助信息的播发。信息处理层包括数据的接收和采集、预处理和多源信息融合定位等,是实现GNSS/MEMS室外高精度定位系统的核心。应用层主要负责系统导航定位结果的输出和用于挖掘相关道路传感器指纹特征信息的生成。

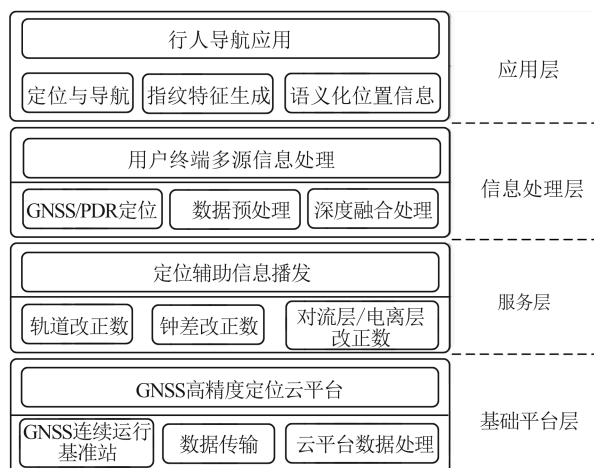


图2 GNSS/MEMS室外定位系统构架图

Fig. 2 Architecture of GNSS/MEMS Outdoor Positioning System

该系统采用以GNSS云处理平台支持下的高精度GNSS精密差分定位为主,以基于MEMS/磁强计等传感器数据的行人航位推算导航(pedestrian dead reckoning, PDR)为辅的方式,进行大众用户室外高精度导航定位。用户端采用验前、验后信息以及观测值一致性检验探测并剔除GNSS观测粗差,结合GNSS云平台播发的实时高精度差分增强信息,进行实时差分定位解算。同时,利用大众终端内置MEMS/磁强计等传感器的数据,进行步频探测、步长和航向角估计,并且通过模态识别区分用户运动状态,从而

准确推算行人位移。最终采用集中滤波器对GNSS差分定位/PDR推算导航的多源观测信息进行深度融合数据处理,结合室外地图数据、智能终端传感器数据以及行人运动特征等辅助信息,实现大众用户室外精准定位。

1.2 基于MEMS/Wi-Fi/BLE/气压计/磁强计/移动通信/室内地图等多种定位信息源的室内定位系统架构设计

大众用户的多体制协同室内精密定位方案设计同样由基础平台层、服务层、信息处理层和应用层4部分构成,系统架构如图3所示。其中,基础平台层作为室内定位服务技术的基础支撑,为服务层提供大规模的信标数据库和信息处理平台。服务层用来实现云定位和定位辅助信息的播发。信息处理层位于用户智能终端,深度融合终端的多源观测信息,输出精度高、可用性和连续性好的定位结果。应用层通过生成用户感兴趣的多维语义化位置信息,实现室内人和物的精准实时定位和导航的功能。

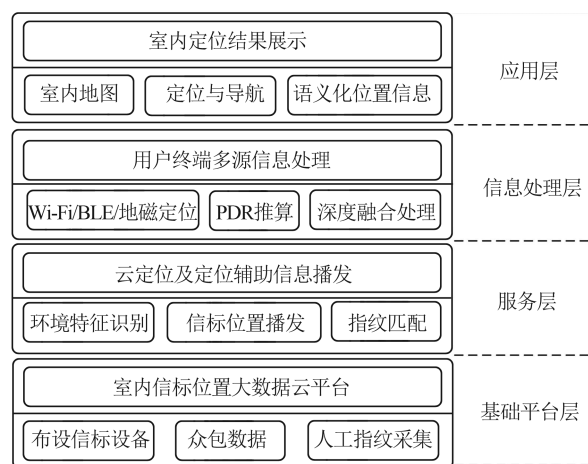


图3 多源信息室内定位系统架构图

Fig. 3 Architecture of Multi-source Information Indoor Positioning System

该系统以基于位置大数据云定位平台支持下的Wi-Fi/BLE云-端协同定位为主,以PDR、室内地图等为辅,进行大众用户室内导航定位。定位终端协同Wi-Fi/BLE/地磁3种技术进行室内绝对定位,利用云平台播发的信标位置进行三角定位,指纹信息进行匹配定位。PDR算法综合利用终端内置加速度计/陀螺仪/磁力计,进行步频、步长、航向角的估计,通过机器学习识别行人模态,准确推算出行人位移。最终融合用户终端的MEMS/Wi-Fi/BLE/气压计/磁强计/移动通信/室内地图等多种定位信息源,结合室内地图

数据、智能终端传感器数据以及行人运动特征等辅助信息,实现大众用户室内精准定位。

2 多体制协同的室内外精密定位关键技术

2.1 非重点部署区域的信标指纹库众包更新

随着物联网(internet of things, IOT)概念的发展,采用 Wi-Fi、BLE、地磁的无线信号定位技术也随之发展,而指纹数据库构建是无线定位需要解决的首要问题。在室外环境中,利用机器学习方法和大规模 GNSS 位置标签的无线信号指纹数据库构建技术已经较为成熟。在室内环境中,由于缺乏可以直接使用的位置标签,通常以人力采集作为主要数据来源。但是,这种基于人工标记指纹与室内地理坐标的建库方式存在数据采集成本大、更新周期长的问题,也无法平衡采集效率与建库精度之间的矛盾。因此,针对全国范围内的无线信号指纹库高效采集与快速更新,是面向大众应用导航定位服务的关键技术之一。

如图 4 所示,本文提出了一套基于智能移动终端众包(无标签)数据的高精度室内外定位指纹数据库自动化构建技术方案。在云端将导航轨迹基于特殊的热点(access point, AP)、传感器特征(上下楼、转弯)等关键点进行聚类,得到来自不同起点且经过同一地点的轨迹。单条无标签轨迹只能用已有的定位指纹库进行推算,其整体位置精度较差,但经过大样本整合可以校正其偶然误差,提升整体轨迹位置的精度。聚类完成后,基于已校正的关键点坐标能够推算出所有轨迹及其关联的无线信号指纹位置,也即实现了定位数据库的构建。其中,通过决策树模型等方法结合传感器观测数据,如三轴加速度计输出,可以准确识别运动、静止等运动模式;通过主成分分析等方法结合线性加速度,可以估算轨迹航向。准确的模式识别和航向估计可以有效提升无标签轨迹形态的准确性,进行聚类整合后,可以进一步提升其位置准确性,从而得到相对可用的无线定位指纹库。

2.2 重点部署区域的信标指纹库快速更新

重点部署区域,如大型商场、车站、机场等,其信标布设一般较为丰富且完善,用户对导航定位的精度需求也更高,需要通过专用设备进行高精度指纹数据库采集与构建。因此,本文自行研制了便携式高精度室内信标与地图采集系统,

如图 5 所示,该系统可以同时采集 Wi-Fi、BLE、地磁以及三维点云数据,同时支持移动终端进行采集标注,可以产生精度为 0.5 m 的 Wi-Fi/BLE 信标指纹数据库,并同时完成室内地图的构建。其中,点云成图模块是预处理系统的核心,首先将原始的点云与惯导观测通过同步定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)算法完成室内三维场景的重建与轨迹生成;然后将具备坐标信息的轨迹与信标指纹、室内地图、全景照片等数据同步,形成数据关联,实现高精度指纹库构建。

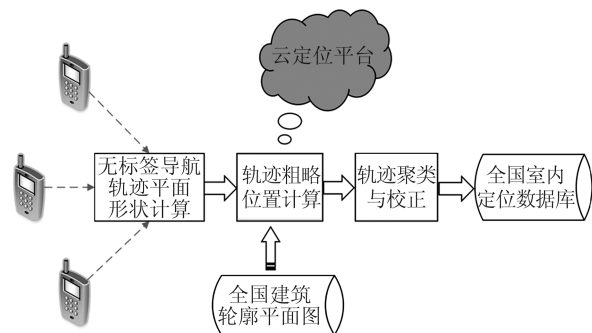


图 4 众包信息获取和指纹数据库快速更新技术架构

Fig. 4 Technology Architecture of Crowdsourcing Information Acquisition and Fingerprint Database Fast Update

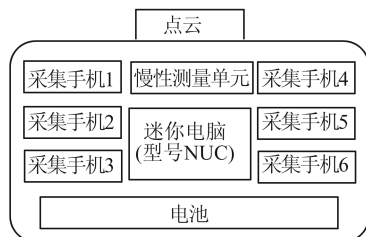


图 5 自研便携式高精度室内信标与地图采集系统设计

Fig. 5 Design of Self-developed Portable High-precision Indoor Beacon and Map Acquisition System

由于人工采集的建库数据存在分布不均的问题,将会影响实际建库效果,从而降低定位精度,采用细粒度网格进行数据聚合,可以优化数据分布,并解决 Wi-Fi、BLE 信号波动问题。本文还突破了地磁指纹库的快速更新技术,通过离线机器学习自动化迭代训练了最优的地磁指纹插值算法。

如图 6 所示,通过对最近邻法(nearest neighbor, NN)、加权 K 近邻法(weight K-nearest neighbor, WKNN)、三次样条法(cubic spline, CS)和克里金法(Kriging)4 种不同室内地磁指纹地图的插值算法进行研究,对比其参考真值指纹地图,确定 Kriging 方法能够较好地还原地磁场强分布,4

种插值方式获得的地磁场强度均方根误差分别为 $16.5\ \mu\text{T}$ 、 $11.4\ \mu\text{T}$ 、 $7.8\ \mu\text{T}$ 和 $1.6\ \mu\text{T}$, Kriging 方

法整体插值误差控制在最低水平, 实际对比测试定位精度有较为显著的提升。

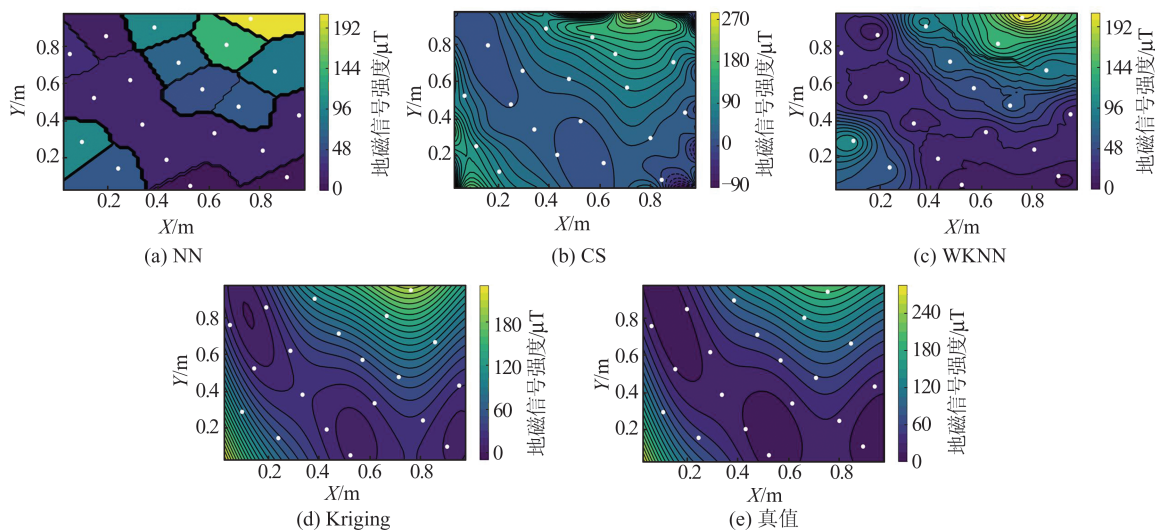


图6 不同插值模型下地磁指纹建库效果对比

Fig. 6 Comparison of the Effect of Geomagnetic Fingerprint Database Construction Under Different Interpolation Models

2.3 智能手机多源融合的室外精密平滑定位

目前,位置服务设备市场中移动智能终端占据90%以上份额^[1],以智能手机为代表的定位载体已成为大众用户导航与定位服务的主流设备。随着多频多模(L1/L5,全系统)GNSS芯片以及MEMS器件的普及,智能手机成为了多源传感器高度集成的大众定位终端。利用手机获取连续平滑的高精度位置服务仍然面临诸多挑战:①受限于体积小的线性极化天线和低功耗芯片,手机GNSS信号强度低、伪距多路径误差大、周跳频繁,模糊度难以固定并获取高精度位置结果;②在城市复杂场景下GNSS信号易受高楼、树木等遮挡影响,无法始终提供准确、连续、可用的导航定位结果;③基于低成本MEMS观测值的PDR是相对定位方法,在缺乏有效校正更新时,位置和航向误差累积迅速。因此,通过多种定位技术方法的优势互补,实现基于智能手机多源融合的室外精密定位,是面向大众应用导航定位服务的另一关键技术。

本文基于智能手机多源观测信息的精密定位算法流程如图7所示。在数据流上,用户端从智能手机应用程序接口实时获取GNSS原始观测值、星历、MEMS传感器数据,同时通过移动网络接收GNSS云平台实时播发的高精度差分改正信息。在融合定位方法上,当GNSS可用时,利用载波相位历元间差分(time differenced carrier phase, TDCP)和多普勒观测值构建速度约束的动态模型,以差分GNSS方程进行观测更新,实

时获取亚米至分米级的滤波定位结果,并为PDR系统提供精确的误差校正信息;当GNSS暂不可用时,将PDR系统的相对位置变化引入动态模型,并发掘零速更新、磁航向变化、气压计相对高程等多源更新信息,维持滤波定位系统的预报位置精度,以实现复杂场景的准确、连续、平滑定位,并在GNSS信号恢复时辅助其快速重新收敛。

2.4 室内外平滑无缝切换

通常行人用户所在区域可简单划分为室外、室内和室内外连接区,在室外使用GNSS与PDR两种定位方式融合,在室内则重点采用Wi-Fi/BLE匹配与PDR融合。在室内外连接区域,GNSS和Wi-Fi/BLE均不能正常定位,实现该区域的精确定位是室内外无缝切换的重要前提。

本文提出的室内外平滑无缝切换算法的基本思路为:①室内Wi-Fi/BLE信标采用与室外GNSS相同的空间基准;②使用地图匹配来分析是否处于室内外连接区域;③定位传感器中包括室内外环境下共用的MEMS传感器和磁强计,以PDR推算导航实现连接区域的定位;④采用集中滤波算法,不区分室内外定位方式,对室内外的观测数据(尤其是少于必要条件的GNSS观测值)进行融合处理,输出最优的定位结果。

图8为不同场景下可见卫星数和通信基站信号强度的变化趋势。如图8所示,当行人由室外逐渐过渡到室内时,GNSS信号减弱且信噪比明显下降,Wi-Fi/BLE/通信基站等信号则逐渐增

强,此时可将信号变化特征作为主要判断依据,结合地图匹配来预知信息,判断用户所处区域。反之,同样可以根据不同信号的强弱变化和地图匹配预知信息。不同的是,当用户进入室外环境

时,由于GNSS需要重新初始化,其定位收敛到米级一般需要几秒时间,此时融合处理需要对卫星定位结果降权,并主要依赖PDR航迹推算实现从室内向室外定位的平滑过渡。

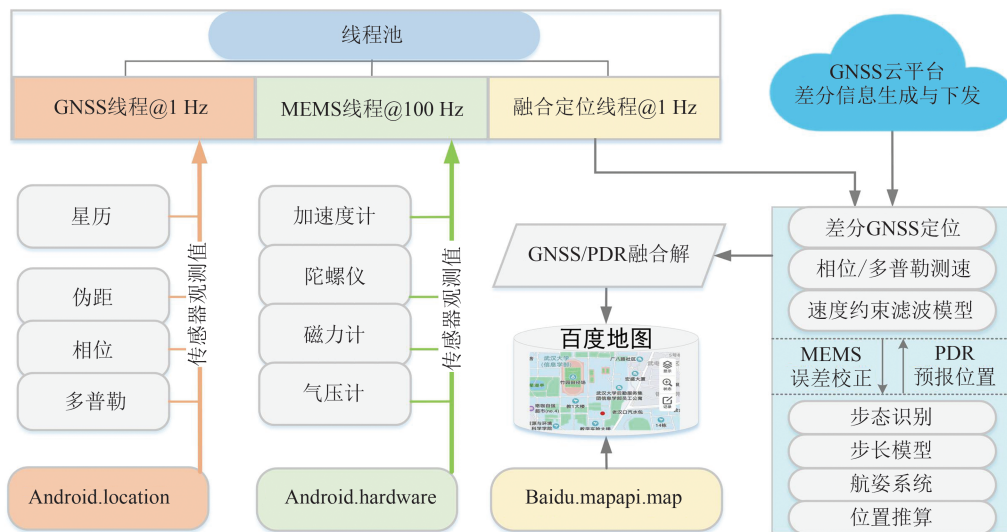


图7 智能手机多源融合精密定位算法流程

Fig. 7 Algorithm Flow of Smart Phone Multi-source Fusion Precision Positioning

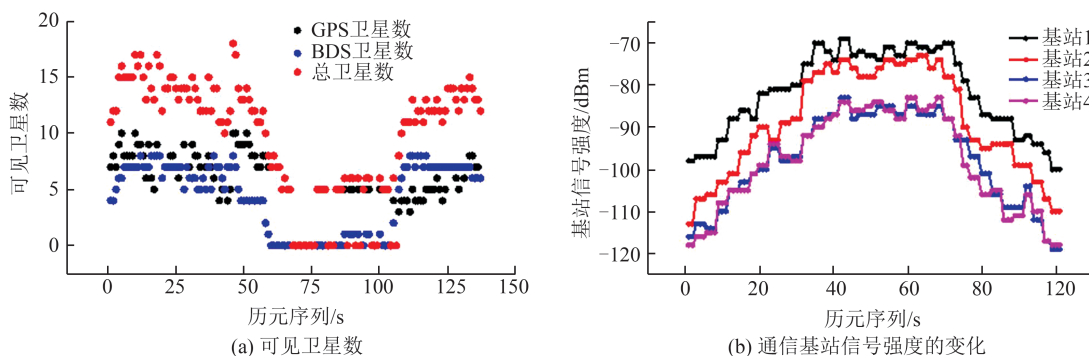


图8 不同场景下可见卫星数和通信基站信号强度的变化趋势(室外—室内—室外)

Fig. 8 Changes in the Number of Visible Satellites and Signal Strength of Communication Base Stations in Different Scenarios (Outdoor—Indoor—Outdoor)

3 测试分析与验证

本文基于Android系统开发了行人室内外无缝精密定位应用软件,可实时获取智能手机原始GNSS数据、MEMS数据、Wi-Fi/BLE/地磁强度等多源观测以及云平台增强信息,实现城市复杂场景的行人导航定位。为分析该软件及算法性能,在武汉大学信息学部综合试验场分别开展行人动态室外定位、室内定位与室内外切换测试。

采用GNSS分布式高精度数据处理系统,通过接入国际GNSS服务、北斗地基增强网、陆态网等实时流,处理生成实时高精度增强信息(表1),并以状态空间表示(state space representation,

SSR)格式播发给用户。图9给出了综合试验场内图书馆室内场景的Wi-Fi/BLE信标布设与地磁指纹采集情况。在云定位平台支持下,GNSS增强信息与信标指纹位置可为用户提供室内外导航定位服务。

3.1 室外连续平滑高精度定位测试

室外连续平滑高精度定位测试地点为武汉大学信息学部操场及四周主干道,如图10所示,测试路线包括了开阔环境、树木遮挡的半开阔环境以及建筑完全遮挡环境,属于典型室外场景。沿途采用高精度实时动态差分定位(real-time kinematic, RTK)测得室外参考点坐标,可以用于评估动态定位精度。

表1 各类GNSS实时高精度产品说明
Tab. 1 Description of Various Types of GNSS Real-time High-precision Products

产品名称	更新周期	详细说明
卫星钟差	5 s	卫星钟差基准为双频无电离层组合, 支持GPS/BD2/BD3/GLONASS/Galileo
卫星轨道	3 h	支持GPS/BD2/BD3/GLONASS/Galileo
差分码偏差	30 s	提供GNSS各频点差分形式码偏差
电离层	30 s	全球7阶的球谐电离层产品;中国区域2.5°×1.5°的格网电离层产品

图11给出了行人手持智能手机动态测试轨

迹,试验设备为分别为 Huawei P10(单频)和 Xiaomi 8(双频)智能手机。图11中 PedNav 表示行人导航(Pedestrian Navigation)。由图11可见,单频手机芯片输出的定位结果在开阔环境波动较小,在树木遮挡环境波动增大,并在建筑完全遮挡后定位结果不可用。双频手机芯片定位轨迹改善明显,在一般环境中轨迹波动较小,这说明新一代多频 GNSS 芯片提升了手机定位性能。而自研算法的单频和双频定位结果相比芯片输出解均有所提升,尤其是在复杂环境中,得益于 PDR 的推算能力,即使 GNSS 信号短时中断时,也能实现连续平滑的行人导航定位。

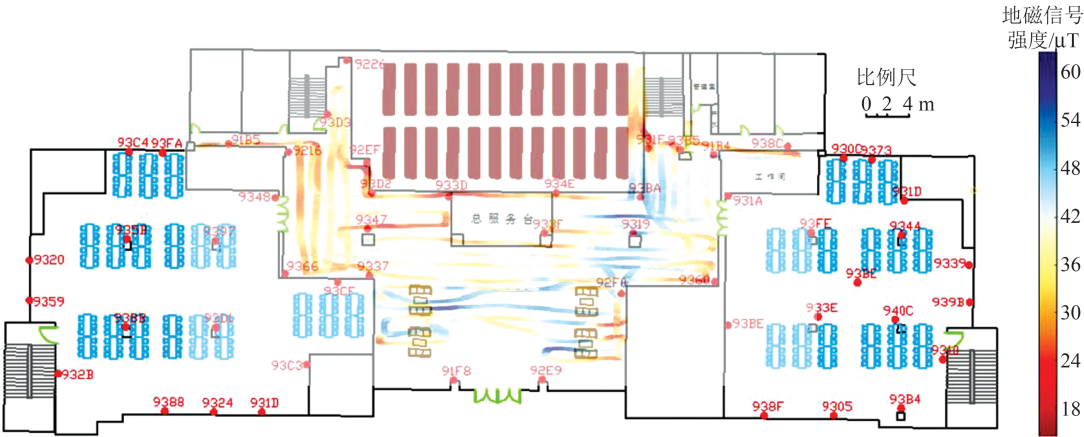


图9 室内场景Wi-Fi/BLE信标布设与地磁指纹分布
Fig. 9 Wi-Fi/BLE Beacon Layout and Geomagnetic Fingerprint Distribution in the Indoor Scene

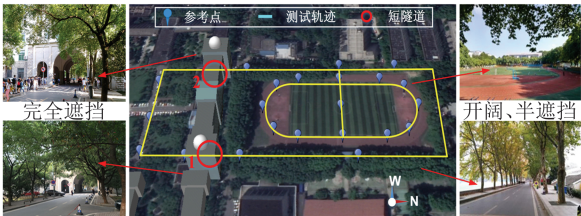


图10 测试路线及环境
Fig. 10 Test Route and Environment

图12给出了定位误差RMS (root mean square)统计序列。可见,整体上看,本文提出的多源融合定位方法在一般环境中双频手机能够达到优于1 m的定位精度,在复杂场景下的统计精度约为1.5 m,可以进一步提升大众行人导航定位的精度与可用性。

3.2 室内及室内外无缝定位测试

室内动态定位及室内外无缝定位测试地点

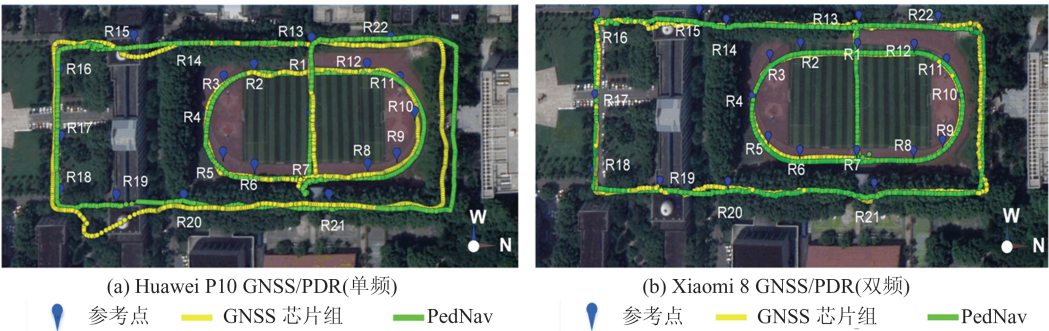


图11 室外连续平滑高精度定位轨迹
Fig. 11 Outdoor Continuous Smooth High-precision Positioning Trajectory

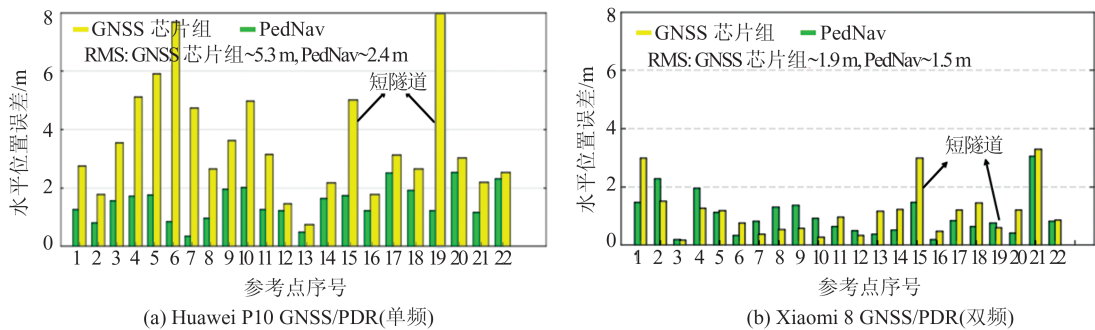


图 12 室外连续平滑高精度定位误差序列

Fig. 12 Outdoor Continuous Smooth High-precision Positioning Error Sequence

为武汉大学信息学部图书馆一楼及正门外平地，如图 13 所示，测试路线周边人员走动频繁，环境较复杂，属于典型的大众用户室内场景。测试路线使用高精度 RTK 测得室外参考点坐标，以此为基准使用全站仪测得室内各参考点坐标，连点成线即为行人动态测试的参考轨迹。

图 14 给出了三圈室内动态定位及室内外切换测试轨迹，整个测试过程中定位结果与参考轨迹符合较好，无明显突刺、跳变和中断。室外区域定位轨迹连续平滑、重复性好，且在 GNSS 绝对位置更新下，定位精度较高；室内区域，定位点依旧连续可用，但噪声稍大，在 Wi-Fi/BLE/地磁场绝对位置更新下，定位精度仍然维持较好；在室内外切换区域，能够实现连续平滑的室内外无缝切换。表 2 给出室内定位及室内外切换测试精

度统计，室内定位的三圈轨迹分别有 1 078、1 198 和 1 239 个定位点，中断点（前后历元时间间隔大于 2 s）数分别为 0、8 和 1 个，飞点（相邻历元定位点水平距离超过 3 m）数分别为 1、0 和 1 个，水平位置平均定位误差 RMS 为 2.348 m，定位算法可用性平均超过 99%。可见本文方法能够实现优于 2.5 m 的室内定位，以及平滑无缝的室内外切换。

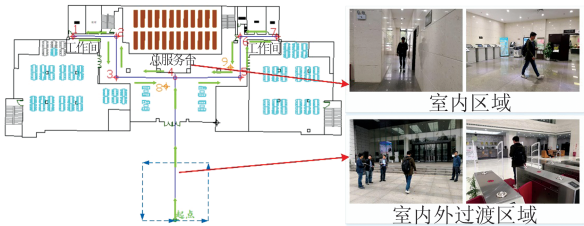


图 13 测试路线及周边环境

Fig. 13 Test Route and Surrounding Environment

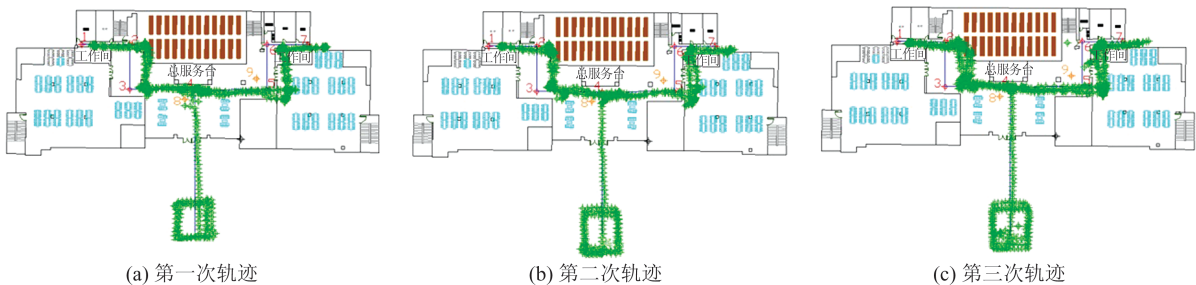


图 14 3次室内定位及室内外平滑无缝切换测试轨迹

Fig. 14 Three Indoor Positioning and Smooth and Seamless Switching Test Trajectory Between Indoor and Outdoor

表 2 室内定位及室内外切换测试精度统计

Tab. 2 Test Accuracy Statistics of Indoor Positioning and Indoor and Outdoor Switching

测试 编号	水平定位精度 RMS/m	动态轨迹		定位算法 可用性/%
		断点数(比例)	飞点数(比例)	
第一圈	2.336	0(0.000%)	1(0.001%)	99.990
第二圈	2.404	8(0.007%)	0(0.000%)	99.300
第三圈	2.305	1(0.001%)	1(0.001%)	99.830
平均	2.348	3(0.027%)	0.7(0.001%)	99.707

4 结 语

随着多源传感器工艺水平的迭代更新与性能提升,将不同的定位新技术进行紧密有效的协作,有望解决定位信息缺乏、定位源离散、定位时空障碍等问题。本文针对室外区域GNSS信号易受遮挡影响、室内环境Wi-Fi/BLE/地磁指纹库更新频繁、室内外过渡区域平滑切换困难以及大众移动智能终端的定位传感器受成本与功耗限制,观测数据一般噪声较大且稳定性差等实际情况,提出了一种适用于大众用智能终端的多类传感器集成、多种先进技术方法融合的多体制协同精密定位方案,创新性地采用云-端协同和多源协同支持海量用户的室内外无缝定位服务,并通过信标指纹库的众包采集与快速更新、智能手机多传感器信息融合的精密定位、室内外无缝切换等关键技术,实现了基于移动智能终端的大众行人无缝平滑定位。

采用自研大众行人定位应用软件,在武汉大学综合试验场分别开展行人动态室外定位、室内定位与室内外切换测试。结果表明,基于双频智能手机实现了行人室外精度优于1.5 m,室内精度1~3 m,定位轨迹连续、平滑、可用,并具备室内外平滑切换能力的导航定位服务,支撑了大众用户室内外无缝精密定位的应用需求。

大众用户高精度无缝导航是解决智慧出行“最后一公里”的关键,用户空间位置信息的准确性和可靠性越高,智慧出行相关业务的成功率和安全性越高。本文针对大众用户移动智能终端在复杂空间环境的泛在定位问题,从系统架构设计、关键技术探索和原型系统搭建等角度开展了研究,以满足海量用户全国范围内的室内外无缝定位需求,进一步促进导航与位置服务新兴产业的落地。

参 考 文 献

- [1] Verhagen S, Odijk D, Teunissen P J G, et al. Performance Improvement with Low-cost Multi-GNSS Receivers[C]//The 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk, Netherlands, 2010
- [2] Humphreys T E, Murrian M, van Diggelen F, et al. On the Feasibility of cm-Accurate Positioning via a Smartphone's Antenna and GNSS Chip[C]//IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Savannah, GA, USA, 2016
- [3] Chen Ruizhi, Chen Liang. Indoor Positioning with Smartphones: The State-of-the-Art and the Challenges[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 316-1 326 (陈锐志, 陈亮. 基于智能手机的室内定位技术的发展现状和挑战[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1 316-1 326)
- [4] Jiang Weiping, Guo Chi, Zuo Wenwei. Progress and Thought of Navigation and Location Services in China[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020 (1): 1-4 (姜卫平, 郭迟, 左文伟. 我国导航与位置服务的进展及思考[J]. 测绘通报, 2020(1): 1-4)
- [5] Tu Wei, Cao Jinzhou, Gao Qili, et al. Sensing Urban Dynamics by Fusing Multi-sourced Spatio-temporal Big Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1 875-1 883 (涂伟, 曹劲舟, 高琦丽, 等. 融合多源时空大数据感知城市动态[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(12): 1 875-1 883)
- [6] Qu Xiangfang. The BeiDou Satellite Navigation and Positioning System Global Networking Industry Chain Ushers in New Development Opportunities—"2018 China Satellite Navigation and Location Service Industry Development White Paper" is Released[J]. *Satellite Application*, 2018(8): 65-71 (曲向芳. 北斗卫星导航定位系统全球组网产业链迎来新发展机遇:《2018中国卫星导航与位置服务产业发展白皮书》发布[J]. 卫星应用, 2018(8): 65-71)
- [7] Guo Danhuai, Zhang Mingke, Jia Nan, et al. Survey of Point-of-Interest Recommendation Research Fused with Deep Learning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1 890-1 902 (郭旦怀, 张鸣珂, 贾楠, 等. 融合深度学习技术的用户兴趣点推荐研究综述[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(12): 1 890-1 902)
- [8] European GNSS Agency (GSA). GNSS Market Report[EB/OL]. https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2020/08/market_report_issue_6_v2-2019.pdf, 2019
- [9] Pesyna K M J, Heath R W J, Humphreys T E. Centimeter Positioning with a Smartphone-Quality GNSS Antenna[C]//The ION GNSS 2014, Tampa, USA, 2014
- [10] Hsu L T, Gu Y, Kamijo S. NLOS Correction/Exclusion for GNSS Measurement Using RAIM and City Building Models[J]. *Sensors*, 2015, 15(7): 17 329-17 349
- [11] Lai Qifeng, Yuan Hong, Wei Dongyan, et al. Re-

- search on GNSS/INS Integrated Positioning Method for Urban Environment Based on Context Aware [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2021, 8(1): 151-162 (来奇峰, 袁洪, 魏东岩, 等. 基于场景检测的城市环境 GNSS/INS 组合定位方法研究 [J]. 导航定位与授时, 2021, 8(1): 151-162)
- [12] Correa A, Barcelo M, Morell A, et al. A Review of Pedestrian Indoor Positioning Systems for Mass Market Applications [J]. *Sensors*, 2017, 17(8): 1927
- [13] El-Sheimy N, Li Y. Indoor Navigation: State of the Art and Future Trends [J]. *Satellite Navigation*, 2021, 2(1): 1-23
- [14] Zhuang Y, Lan H Y, Li Y, et al. PDR/INS/WiFi Integration Based on Handheld Devices for Indoor Pedestrian Navigation [J]. *Micromachines*, 2015, 6(6): 793-812
- [15] Deng Zhongliang, Luo Muxing, Mo Jun, et al. Research on Open-loop Tracking Method Based on TDD [C]// The 10th China Satellite Navigation Conference (CSNC), Beijing, China, 2019 (邓中亮, 罗牧星, 莫君, 等. 基于 TDD 模式下的开环跟踪方法研究 [C]. 第十届中国卫星导航学术年会, 北京, 2019)
- [16] Wei Dongyan, Yuan Hong, Xu Ying. Cooperative Position Using Fingerprint in GNSS and Cellular Mobile Communication Systems [C]// The 3rd China Satellite Navigation Conference (CSNC), Guangzhou, China, 2012 (魏东岩, 袁洪, 徐颖. 基于 GNSS 与蜂窝移动通信系统的协同指纹定位 [C]. 第三届中国卫星导航学术年会, 广州, 2012)
- [17] Harle R. A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(3): 1281-1293
- [18] Realini E, Caldera S, Pertusini L, et al. Precise GNSS Positioning Using Smart Devices [J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2434
- [19] Zhu F, Tao X L, Liu W K, et al. Walker: Continuous and Precise Navigation by Fusing GNSS and MEMS in Smartphone Chipsets for Pedestrians [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(2): 139
- [20] Ahmad Fuad M R, Driberg M. Remote Vehicle Tracking System Using GSM Modem and Google Map [C]// 2013 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (CSUDET), Selangor, Malaysia, 2013
- [21] Soliman S, Agashe P, Fernandez I, et al. GP-SONe/Sup TM/: A Hybrid Position Location System [C]// IEEE Sixth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Parsippany, NJ, USA, 2000
- [22] Huang Yongshuai, Shi Junbo, Ouyang Chenhao, et al. Real-Time Observation Decoding and Positioning Analysis Based on Qianxun BeiDou Ground Based Augmentation System [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(9): 11-14 (黄永帅, 史俊波, 欧阳晨皓, 等. 千寻北斗地基增强网络下的实时观测数据解码及定位性能分析 [J]. 测绘通报, 2017(9): 11-14)
- [23] Yang Yuanxi, Li Xiaoyan. Micro-PNT and Comprehensive PNT [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1249-1254 (杨元喜, 李晓燕. 微 PNT 与综合 PNT [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1249-1254)
- [24] Yang Yuanxi. Resilient PNT Concept Frame [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(7): 893-898 (杨元喜. 弹性 PNT 基本框架 [J]. 测绘学报, 2018, 47(7): 893-898)
- [25] Fang Zhixiang, Jiang Yuxin, Guan Fangli. Pedestrian Relative Positioning Method Based on Visible and Invisible Landmarks [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(5): 601-609 (方志祥, 姜宇昕, 管昉立. 融合可视与不可视地标的行人相对定位方法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(5): 601-609)

Pedestrian Indoor and Outdoor Seamless Positioning Technology and Prototype System Based on Cloud-End Collaboration of Smartphone

LIU Wanke¹ TAO Xianlu¹ ZHANG Chuanming² YAO Yibin¹ WANG Fuhong¹
JIA Hailu² LOU Yidong³

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Baidu Netcom Science and Technology Co. Ltd., Beijing 100089, China

3 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: With the rise of location service applications and the popularization of mobile smart terminals, the demand for high-precision navigation and positioning is extending from isolated areas to seamless whole areas, from professional groups to mass users. However, real-time, continuous, and complete pedestrian navigation still faces many challenges, such as occlusion of global navigation satellite system (GNSS) signals, frequent updates of Wi-Fi/ bluetooth low energy (BLE)/geomagnetic fingerprint databases, and smoothly switching in the transitional area of indoor and outdoor. In addition, the positioning sensors of popular mobile smart terminals are limited by cost and power consumption, and the observation data is generally noisy and poor in stability. **Methods:** Therefore, this paper proposes a pedestrian indoor and outdoor seamless positioning technology based on cloud-end collaboration of smartphone, which breaks through the crowd sourced collection and rapid update of the beacon fingerprint database, the precise positioning of the smart phone multi-sensor information fusion, and the indoor and outdoor seamless switching. We have developed a smartphone positioning application for pedestrians. The collaborative precision positioning enhancement information is provided by the location service platform and the multi-source observations data (GNSS, miniature inertial measurement unit (MIMU), Wi-Fi, BLE, magnetometer, barometer) are obtained by the smartphone. **Results:** The field test results show that the outdoor positioning accuracy of ordinary users is better than 1.5 m, and indoor accuracy is about 1–3 m. **Conclusions:** It supports the demand of mass-market users for seamless and precise positioning indoors and outdoors.

Key words: pedestrian navigation; seamless indoor and outdoor; cloud-end collaboration; smartphone; multi-source fusion; machine learning

First author: LIU Wanke, PhD, professor, majors in precise positioning technology of GNSS and low-cost multi-sensor integration technology. E-mail: wkliu@sgg.whu.edu.cn

Corresponding author: YAO Yibin, PhD, professor. E-mail: ybyao@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (2016YFB0501803); the Major Special Projects of Technological Innovation in Hubei Province (2019AAA043); the Wuhan Science and Technology Project (2020010601012185).

引文格式: LIU Wanke, TAO Xianlu, ZHANG Chuanming, et al. Pedestrian Indoor and Outdoor Seamless Positioning Technology and Prototype System Based on Cloud-End Collaboration of Smartphone[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(12): 1808–1818. DOI:10.13203/j.whugis20210310(刘万科, 陶贤露, 张传明, 等. 云-端协同的智能手机行人室内外无缝定位技术及其原型系统验证[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(12): 1808–1818. DOI:10.13203/j.whugis20210310)