

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.06.013

## 基于北斗的室内外无缝定位系统

诸燕平,何可人,戎海龙,陈 阳

(常州大学 信息科学与工程学院,江苏 常州 213164)

**摘要:**为了解决室内外无缝定位问题,基于北斗空间导航信号特征,并结合 Wi-Fi 指纹库定位算法,设计出一种基于北斗的室内外无缝定位系统。本系统无需改造现有 Wi-Fi 热点软硬件,首先利用空间均值滤波方法对采集的接收信号强度值进行平滑处理,提高信号采集的精度,然后将实际测量法精度高的优势和路径损耗模型法灵活易更新的特点相结合,设计了一种室内定位精度优于 5.5 m,室内外定位模式切换时间小于 10 s 的无缝定位系统,满足了室内外导航定位应用的需求。

**关键词:**北斗;室内外无缝定位;指纹库;接收信号强度

**中图分类号:**TP 391.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**2095-0411(2018)06-0087-06

## Indoor-Outdoor Seamless Localization System Based on Beidou Navigation Satellite System

ZHU Yanping, HE Keren, RONG Hailong, CHEN Yang

(School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Aiming at indoor and outdoor seamless localization problems, a new positioning system based on the characteristics of Beidou spatial navigation signal and the location algorithm of the Wi-Fi fingerprint were presented. This system did not need to transform the existing Wi-Fi hotspots' hardware and software. First the spatial mean filtering method was used to the collected received signal strength indicator (RSSI) signals for smoothing processing in order to enhance the signals' precision, then the actual measurement method with high precision and the path loss model method with flexible updating capacity were combined when the system was designed. The switching time of seamless positioning system localization mode was less than 10 seconds and indoor positioning accuracy is better than 5.5 meters, which satisfies the requirement of indoor and outdoor navigation in positioning application.

**收稿日期:**2018-05-20。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(61471157,61501061,61772090)。

**作者简介:**诸燕平(1979—),女,江苏常州人,博士,讲师。E-mail: zhuyanping@cczu.edu.cn

**引用本文:**诸燕平,何可人,戎海龙,等. 基于北斗的室内外无缝定位系统[J]. 常州大学学报(自然科学版),2018,30(6):87-92.

**Key words:** Beidou; indoor and outdoor seamless localization; fingerprint database; received signal strength indicator (RSSI)

2014 年底中国北斗卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite System,BDS)已正式被国际海事组织海上安全委员会纳入全球无线电导航系统,这意味着继美国的全球定位系统(Global Position System,GPS)和俄罗斯的全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GLONASS)后,BDS 已成为第 3 个被联合国认可的海上卫星导航系统,并且和美国 GPS、俄罗斯 GLONASS 及欧盟伽利略卫星导航系统(Galileo Navigation Satellite System, GALILEO)一起成为联合国卫星导航委员会认定的供应商<sup>[1]</sup>。

作为中国自主研发的卫星导航系统,BDS 具有十分广阔的应用前景和先天的自主可控优势,一改之前 GPS 一家独大的状态<sup>[2-3]</sup>。但是由于“城市峡谷”和一些大型建筑内部信号屏蔽、反射严重导致卫星通信不通畅的情况,室内外无缝切换的导航需求变得更加迫切。中国的羲和系统<sup>[4]</sup>在地面无缝导航方面实现了国际领先,通过在室内布设 TC-OFDM 基站,可实现室内外协同实时精密定位,具备室外亚米级、城市室内优于 3m 的无缝定位导航能力,但是该系统需要较为昂贵的定位基础设施建设,适用于机场、消防等对定位精度要求高的场合。

Wi-Fi 是一种常见的短距离无线通信技术,并已于全球大量应用<sup>[5]</sup>。本系统结合 BD 和 Wi-Fi 技术,以达到同一台北斗接收机实现室内外无缝导航的目的。本系统以北斗卫星授时作为系统内部时间基准,对接收到的 BD 和 Wi-Fi 多源导航信号进行优化处理,在本地缓存的 Wi-Fi 热点数据的基础上,完成导航定位结算,并将定位结果进行导航应用。与文献<sup>[6]</sup>不同的是,本文所提出的室内外无缝导航系统并不需要 Wi-Fi 指纹节点中使用与北斗系统中相同的伪随机码,即无需修改 Wi-Fi 设备固件,因此具有更好的通用性。

## 1 室内外无缝导航系统架构

本系统硬件部分采用 GNSS 接收机开发平台 LT20099,该平台以 STM32F205ZE 处理器为核心,配有 FPGA 芯片 CycloneIII EP3C55F484,能够完成导航信号优化处理和导航信息解算功能。本系统中进行处理的导航信号包括 BDS 信号和 Wi-Fi 信号,为了综合利用上述信号消灭定位盲区、提升导航定位精度,本文将系统设计为 2 个主要部分:前端的导航应用终端部分和后端的数据服务平台部分。系统功能结构图如图 1 所示。

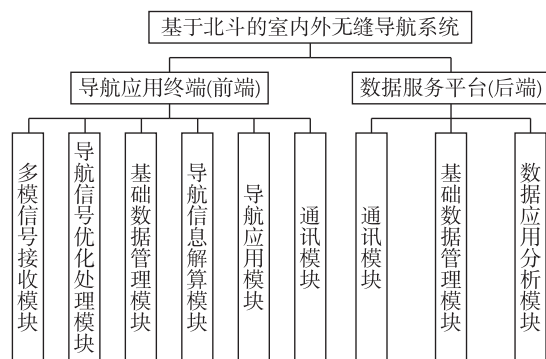


图 1 无缝导航系统功能结构图

导航应用终端(前端)进行 BDS 信号、Wi-Fi 信号的接收,并对接收到的 Wi-Fi 信号进行空间均值滤波处理,基于本地缓存的 Wi-Fi 热点数据,完成导航定位解算,并将定位结果进行导航应用。数据服务平台实现无缝导航所需的 Wi-Fi 热点基础数据的管理,完成针对前端需求进行热点基础数据的分发,并根据前端发送来的相关数据进行相应的应用分析,并将结果发送到前端。系统功能流程图如图 2 和图 3 所示。

整个系统项目采用 J2EE 体系结构,分为服务端与客户端两部分,Web 服务器采用 Appche 和 Tomcat 构建,Web 应用服务器采用 Jboss 构建,系统内部和外部通讯接口采用 XML 信息交换标准,各个终端通过 XML 适配器和导航定位终端系统实现信息交换和传输。

## 2 Wi-Fi 指纹库定位算法

当用户处于室外时,本系统使用 BDS 信号进行导航定位,进入室内时,切换成基于 Wi-Fi 信号的接收信号强度指示(Received signal strength indicator, RSSI)指纹库定位方法来消灭定位盲区,将 Wi-Fi 热点作为地面无线电导航台。指纹库定位技术首先根据室内实际情况规划出室内的终端分布图,存入信息处理数据库;然后根据室内分布情况设置 Wi-Fi 热点接入点测量出室内能量分布指纹库;然后实际终端在应用时接收机接收信号强度,同时匹配指纹库中的信息,实现定位<sup>[7-8]</sup>。由于利用北斗卫星的室外定位技术已经很成熟,所以如何利用 Wi-Fi 热点完成室内定位是本系统的关键问题。

### 2.1 指纹库的建立

指纹库定位需要经历两个阶段:离线阶段和在线定位阶段。在离线指纹库建立阶段,需要采集预定坐标点对应各 Wi-Fi 热点的 RSSI 值建立指纹数据库。本项目采用两种方法相结合建立指纹数据库:利用电磁波室内传播路径损耗模型来建立指纹库,以及根据实际测量完善指纹库。

针对室内具体环境本项目采用 multi-wall-and-floor 模型<sup>[7]</sup>。该模型将墙体和地面的吸收损耗因子加入到了自由空间传输模型中,分别用损耗  $L_w$  和  $L_F$  表示,此传输模型可以表示为:

$$L_{MWM} = L_1 + 10n \log d + L_w + L_F \quad (1)$$

$$L_w = \sum_{i=1}^I a_{wi} k_{wi} \quad (2)$$

$$L_F = \sum_{j=1}^J a_{Fj} k_{Fj} \quad (3)$$

式中:  $L_{MWM}$  是指路径损耗;  $L_1$  是自由空间损耗模型中距离发射点 1 m 处的路径损耗值;  $n$  是路径损耗因子,因环境变化会有所变动;  $L_w$  是信号在墙面上总损耗值;  $L_F$  是信号在地板上的总损耗值。  $I$  是指空间内墙面的材质种类数;  $a_{wi}$  是指第  $i$  种类型材料墙体的损耗因子;  $k_{wi}$  是指第  $i$  种类型材料墙体的数目。  $J$  是穿过的地板材质种类数;  $a_{Fj}$  是指第  $j$  种类型地板的损耗因子;  $k_{Fj}$  是指第  $j$  种类型材料墙体的数目。

### 2.2 实际测量完善指纹库

在实际的定位环境中,由于多径效应、绕射、障碍物等不确定性因素的影响, Wi-Fi 信号的 RSSI 值波动比较严重,为了有效减小采集数据瞬时波动造成的影响,实际测量建立指纹库时,在每个指纹信息采样点采样一定时间,采集一定量的 RSSI 数据后,进行均值平滑滤波处理,求出这个点对应每个参考

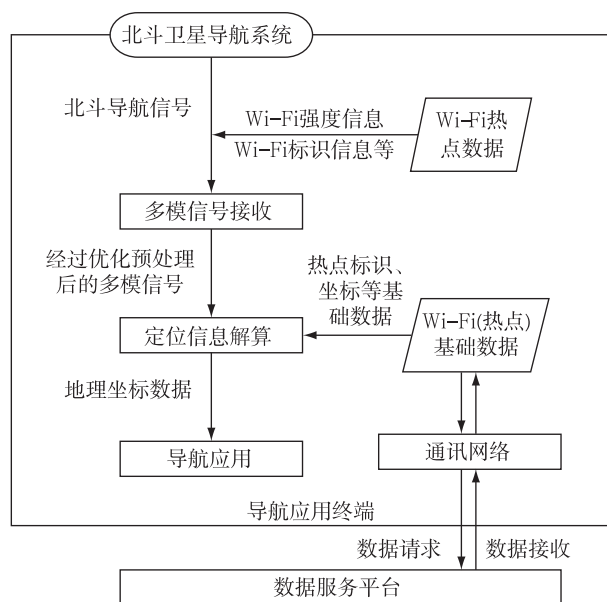


图 2 导航应用终端数据流程图

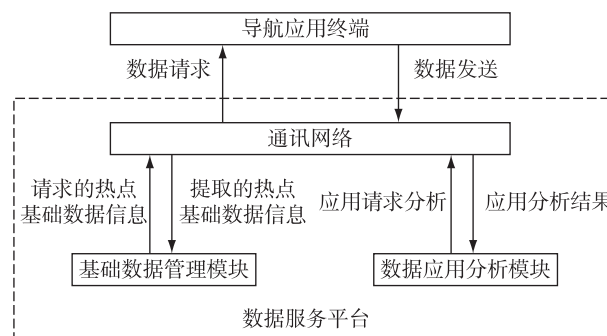


图 3 数据服务平台功能数据流程图

节点的 RSSI 值的均值与标准差一起存入数据库<sup>[9-10]</sup>。这种方式建立的指纹库有较高的精度,但工作量大。建库的过程如图 4 所示。

本项目将实际测量法精度高的优势和路径损耗模型法灵活易更新的特点结合起来。首先采用测量实际环境中的路径损耗因子,再利用实际测量法测量数个特殊采样点的 RSSI,最后将以上测得的路径损耗因子代入路径损耗模型建立一个指纹信息库,运用实际测量得到的特殊采用点的 RSSI 去修正路径损耗模型建立的指纹库。

### 2.3 室内定位原理

定位过程就是在线对第一阶段(离线阶段)建立指纹数据库的查询过程,当移动节点出现在定位区域后,将会获得热点的 RSSI 值,执行指纹库算法后可计算出定位结果<sup>[6]</sup>。

本项目中指纹库定位算法设计采用了基于贝叶斯估计的算法。贝叶斯算法在离线阶段获取采样点的位置指纹特征,即该点接收到的所有 Wi-Fi 热点 RSSI 值的概率分布。通过统计分析,可以得到各热点的 RSSI 值分布情况。不失一般性,假设在线阶段一个 RSSI 位置指纹样例为  $S$ ,它包含来自  $m$  个热点接收信号的强度值,即

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_m)$$

贝叶斯法根据实时 RSSI 位置指纹样例  $S$  得到定位区域内的每个位置的后验概率,表示为

$$P(L_i | S)$$

根据贝叶斯定理,该后验概率为

$$P(L_i | S) = \frac{P(S | L_i) \cdot P(L_i)}{P(S)} = \frac{P(S | L_i) \cdot P(L_i)}{\sum_{k \in L} P(S | L_k) \cdot P(L_k)} \quad (4)$$

式中:  $P(S | L_i)$  为在已知某个位置的情况下实时 RSSI 位置指纹样例  $S$  的条件概率;  $P(L_i)$  称为位置  $L_i$  在位置区域上的先验概率。由于用户可能出现在定位区域上的任何一个位置,即可认为  $P(L_i)$  服从均匀分布。由于各个 Wi-Fi 热点的接收信号强度是独立不相关的,因此  $P(S | L_i)$  的计算可以表示为

$$P(S | L_i) = P(S_1 | L_1) \cdot P(S_2 | L_1) \cdots P(S_m | L_m) \quad (5)$$

式(5)中用高斯概率分布来近似表示 RSSI 在某一位置处的分布,为

$$P(S | L_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[ -\frac{(s - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (6)$$

式中  $\mu$  和  $\sigma$  分表示信号强度的平均值和标准差。本文采用最大后验概率估计用户的位置,即

$$L = \max P(L_i | S)$$

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验环境

在本项目中室外导航部分接收 Beidou B1I 导航信号;室内无线 AP 设置在 IEEE 802.11b 的频道 11

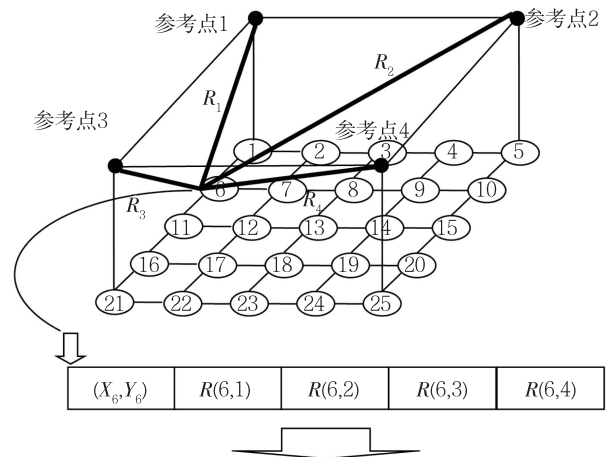


图 4 指纹数据库建立过程

采样点	参考点 1	参考点 2	参考点 3	参考点 4
$(X_1, Y_1)$	RSSI(1,1)	RSSI(1,2)	RSSI(1,3)	RSSI(1,4)
$(X_2, Y_2)$	RSSI(2,1)	RSSI(2,2)	RSSI(2,3)	RSSI(2,4)
...				
$(X_6, Y_6)$	RSSI(6,1)	RSSI(6,2)	RSSI(6,3)	RSSI(6,4)
...				
$(X_n, Y_n)$	RSSI(n,1)	RSSI(n,2)	RSSI(n,3)	RSSI(n,4)

(2 462 MHz)上,发射功率为 20 dBm(100 mW),实验环境为同一楼层内共 9 个房间,过道及房间内部署 15 个 Wi-Fi 热点情况如图 5 所示。

理论上指纹库采样点选取越密集,定位精度越高,但是实际情况中,由于本系统使用室内环境自带的 Wi-Fi 热点信号,所以指纹节点的密度只有文献[9-10]中节点密度的  $1/4 \sim 1/2$ 。

### 3.2 性能评估

通过对 15 个热点进行 350 次测试,将采集到的数据首先通过信号均值滤波的方法预去除测量中的突变点(可能由于干扰、人员走动或环境变化导致,这些突变点会导致定位结果误差变大),如图 6 所示。从图 6 中可以看出滤波后的 RSSI 值中波动明显的误差点已经被消除了。

本实验在图 5 所示环境对预先测定的 A, B, C 坐标点位置和无缝导航系统在该点实测定位值进行对比,所测得定位误差结果显示在图 7 中,其中每个点的实际测量时间在 5 s 左右,测量点附近用来干扰测量的实际人数为 0~10 人,人员为静止或较慢移动状态,图 7 中的每个测量值都为测量 100 次求平均得到的结果。从图 7 中可以看出,室内定位精度在 1~5.5 m 的范围,离 Wi-Fi 热点最近的 A 点,由于 RSSI 多径效应中直线到达路径的信号强度远大与其他路径,多径效应造成 RSSI 信号误差程度较小,所以定位效果最好;C 点附近的 AP 热点分布情况造成 C 点多径效应情况比较复杂, RSSI 准确度较低,定位效果相对较差;B 点处于两种情况之间,所以曲线处于 A, B 点曲线之间。总体来说,测量点附近人数的增加会使得测量环境变得更加复杂,从而导致定位精度的下降。

## 4 结 论

针对卫星信号室内屏蔽严重、单独的 BDS 无法室内定位的问题,提出了一种室内外无缝定位系统,使用 Wi-Fi 指纹库技术,在不需要更改 Wi-Fi 热点硬件的前提下,本系统达到室内导航精度优于 5.5 m,满足了室内外导航定位应用的需求。

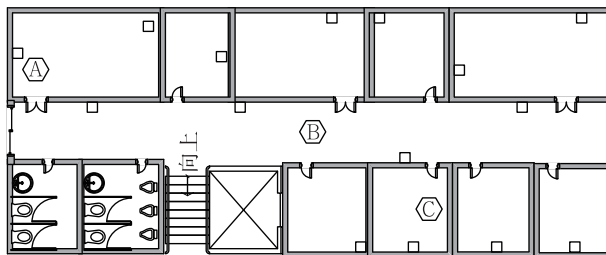


图 5 各房间无线 AP 部署情况

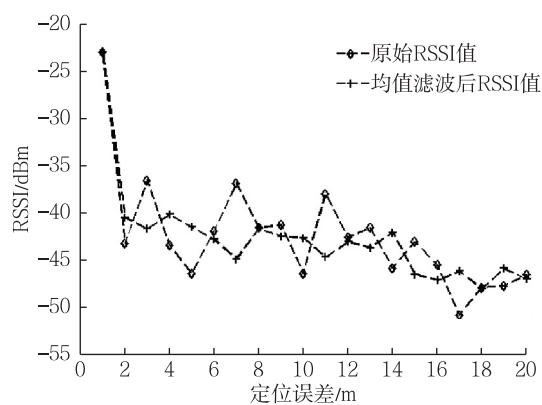


图 6 RSSI 信号均值滤波效果

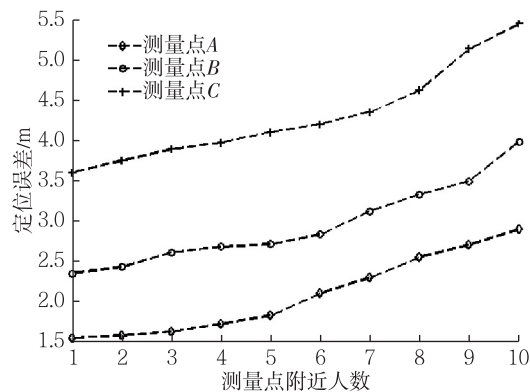


图 7 A, B, C 测量点实际定位误差情况



## 参考文献:

- [1]SHI C, ZHAO Q, HU Z, et al. Precise relative positioning using real tracking data from compass GEO and IGSO satellites[J]. GPS Solutions, 2013, 17(1):103-119.
- [2]LI J, YANG Y, XU J, et al. GNSS multi-carrier fast partial ambiguity resolution strategy tested with real BDS/GPS dual- and triple-frequency observations[J]. GPS Solutions, 2013, 19(1):5-13.
- [3]XU J, YANG Y, LI J, et al. Performance analysis of compass/GPS code differential positioning[C]// CSNC'12, Beijing: China Satellite Navigation Annual Academic Committee, 2013:201-209.
- [4]孙自法, 张磊, 詹正旗. 北斗与“羲和”联手中国卫星导航“登堂入室”[J]. 中国测绘, 2013(4):50.
- [5]LU N, CHENG N, ZHANG N, et al. Wi-Fi hotspot at signalized intersection: cost-effectiveness for vehicular internet access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5):3506-3518.
- [6]陈雷, 韩帅, 邹德岳, 等. 基于北斗指纹节点的室内外无缝导航定位系统的设计[C]//中国卫星导航学术年会. 武汉: [s.n.], 2013.
- [7]LOTT M, FORKEL I. A multi-wall-and-floor model for indoor radio propagation[C/OL]// IEEE VTS 2001. Piscataway: IEEE Press, 2001:464-468.
- [8]KAEMARUNGSI K, KRISHNAMURTHY P. Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting[C]// International Symposium on Optical Science & Technology. Piscataway: IEEE Press, 2004: 1012-1022.
- [9]江城. 基于北斗终端的室内外无缝定位系统设计[J]. 无线电工程, 2016, 46(8):38-42.
- [10]BAHL P, PADMANABHAN V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[C]// INFOCOM 2000. Piscataway: IEEE Press, 2000:775-784.

(责任编辑:李艳)

## 【上接第 65 页】

- [3]BAI F Y. The research of the river sludge as road subgrade filling materials in big city[C]//Trans Tech Publications, Engineering and Industry Technology Institute(EITD). [S.l.]: [s.n.], 2014:9.
- [4]LI C, LIN D F. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement [J]. Journal of Hazardous Journal of Hazardous, 2009, 162:321-327.
- [5]程福周, 雷学文, 孟庆山. 水泥及其外加剂固化淤泥的试验研究[J]. 建筑学, 2014, 30(9):51-55.
- [6]中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准:GB/T50123—1999 [S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
- [7]中华人民共和国环境保护部. 固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法:HJ557—2010[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2010.
- [8]王清涛, 李森, 于华芹. 利用赤泥制备轻质高强保温装饰一体化建筑材料[J]. 硅酸盐通报, 2018(4):1393-1398.
- [9]张庆. 固化疏浚淤泥-磷石膏混合土工程性质及膨胀特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2013.
- [10]王清涛, 李森, 于华芹. 利用赤泥制备轻质高强保温装饰一体化建筑材料[J]. 硅酸盐通报, 2018(4):1393-1398.
- [11]卢雪松. 离子土壤固化剂加固武汉红色粘土的试验效果及其机理研究[D]. 北京:中国地质大学, 2010.
- [12]中国环境科学研究所固体废物污染控制技术研究所, 环境标准研究所. 危险废物鉴别标准:浸出毒性鉴别 GB5085.3—2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2007:25.
- [13]滕维民, 李明宇. 浅谈 ISS 固化剂的原理及特点[J]. 黑龙江交通科技, 2010, 33(1):50.
- [14]张云升, 孙伟, 郑克仁. 水泥-粉煤灰浆体的水化反应进程[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006(1):118-123.
- [15]彭丽思, 付广义, 陈繁忠. 城市河道底泥的固化处理及机理探讨[J]. 环境工程, 2016, 34(S1):747-752.

(责任编辑:李艳)