

室内外定位技术综述

苏素燕¹, 陈金旺¹, 王林芳¹, 陈芳², 陈俊², 林明睿²

(1 国网福建省电力有限公司 厦门供电公司, 福建 厦门 362400; 2 福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350108)

摘要: 随着科学技术的不断发展, 定位服务深入生活, 越来越多的行业及个人因定位技术的发展而受益, 也正是社会的不断进步以及环境的复杂多变, 越来越高的定位需求在人们心中产生, 越来越多的定位技术也随之诞生。文章从室内外定位角度出发, 分别介绍了几种当下应用比较多的室内外定位技术, 对其原理进行简单的阐述, 分析其各自的发展与存在的不足, 最后介绍了这些技术所涉及的一些主流算法。

关键词: 室内外定位; 定位服务; 定位算法

A review of indoor and outdoor positioning technology

SU Suyan¹, CHEN Jinwang¹, WANG Linfang¹, CHEN Fang², CHEN Jun², LIN Mingrui²

(1 State Grid Xiamen Electric Power Supply Company, Xiamen Fujian 362400, China;

2 School of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

[Abstract] With the continuous development of science and technology, positioning services are applied in life, and more and more industries and individuals benefit from the development of positioning technology. Faced with the continuous progress of society and the complex and changeable environment, higher requirements on positioning are proposed and more positioning technologies are developed. From the perspective of indoor and outdoor positioning, the paper introduces several indoor and outdoor positioning technologies that are more widely used at present, briefly expounds their principles, analyzes their respective development and shortcomings, and finally introduces more mainstream algorithms involved in these technologies.

[Key words] indoor and outdoor positioning; location services; positioning algorithms

0 引言

随着技术水平的不断提升, 社会各行各业的兴起和发展, 位置服务受到了越来越多人的关注和重视, 定位服务也因此变得越来越商业化、普遍化。定位系统开始投入到各行各业, 如: 地图导航、森林消防、房屋建筑、交通安防等^[1]都离不开定位系统, 可以说定位服务极大程度的改变了人们的生活水平, 推进了社会的发展与进步。

由于行业的兴起和技术的发展, 以及生活环境的不断复杂化, 对定位精度的要求也越来越高。美国的GPS定位系统和中国北斗导航定位系统, 撑起了整个的室外定位。然而, 其在复杂多变的室内环境下并不适用, 因此越来越多满足室内定位需求的定位技术被研发实施。如: 蓝牙、WIFI、超声波等定位技术^[2], 通过结合不同的算法, 甚至与不同技术

的融合, 使室内定位精度达到一个新的高度。

1 室外定位技术

1.1 GPS定位技术

GPS定位是目前最为精确, 应用最为广泛的定位技术, GPS系统由空间端、控制端、用户终端组成。其定位原理是通过用户端发出的定位请求, 空间端就会发送定位的卫星信号, 接收器随之接收相关定位信息, 再由用户端接收由地面控制中心计算出来的位置结果。

GPS定位方法包括绝对定位(单点定位)和相对定位(差分定位)等。该系统广泛应用于房屋建筑、车辆定位、农业养殖等领域^[3], 但由于定位过程的轨道误差、时钟误差以及各种延迟和噪声的干扰, 定位精度只能达到米级。

基金项目: 国网福建省电力有限公司研究开发项目(521340220005)。

作者简介: 苏素燕(1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 电力通信网建设与运维; 陈金旺(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统自动化技术及电力通信网管理; 王林芳(1989-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力通信网建设和运行管理。

收稿日期: 2022-10-06

哈尔滨工业大学主办 ◆ 科技创见与应用

1.2 北斗定位技术

北斗定位系统由空间端、地面控制端、用户端组成,是主动式双向测距二维导航。地面控制中心解算供用户定位的三维数据。北斗定位原理与GPS大致相同,多采用“三球交汇”的原理来实现。即地面接收设备需同时测量至少三颗卫星与用户的距离。用户端分别以每颗卫星为球心,其与该卫星间的距离为半径,画出相交于两点的3个球面,根据地理常识选取相对位置较低的交点,即为用户的实际坐标位置点^[4]。

迄今为止,北斗导航系统已经发展到“北斗三号”,北斗三号实现了全球范围的无源定位,在抗干扰能力方面要强于GPS定位系统。北斗定位精度为米级,被广泛应用于通信、水利、交通、森林防火等,且北斗是唯一可以进行通信聊天的定位系统,北斗地面增强站系统已实现广域覆盖,可为全球用户提供高精度定位数据支持,具有无限的发展潜力。目前,国家正在推进北斗与5G技术的融合定位^[5]。

2 室内定位技术

2.1 WIFI定位技术

目前WIFI是相对成熟且应用较多的技术,近年来有不少公司投入到了这个领域。WIFI室内定位技术需要通过定位标签,在布满无线局域网的区域按照一定的周期发出相关信号,最后由定位服务器接收该信号。根据接收信号的强弱以及信号到达时差,来推算出人员所在的位置,并让具体位置在电子地图显示^[6]。

因成本低、覆盖范围广、传输速度高等原因WIFI成为室内定位的主流。WIFI室内定位算法大致分为两大类:一是不基于RSSI的算法,其中包括到达时间(Time Of Arrival, TOA)、到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)以及到达角度(Angle of Arrival, AOA)算法;另一种是基于RSSI的三角定位算法和指纹算法。就目前来说,WIFI技术定位应用最可行的算法是基于RSSI的指纹定位算法^[7]。利用该算法进行室内定位,在正常情况下能满足室内需求,但环境复杂多变,很容易影响WIFI信号,使其定位精度降低,定位漂移现象尤其严重,且标签功耗大、略昂贵,再加上指纹定位的数据采集阶段工程量繁琐,且很容易受基站变换的影响。

2.2 RFID定位技术

RFID定位技术适用于区域位置定位,即通过2.4 G和低频125 K的RFID技术,实现对人和物的识别以及定位管理。RFID定位主要是读取所测

RFID标签的相关特征信息,该过程通过一组固定的阅读器实现,再通过相关方法(如接收信号强度等),把标签所在的具体位置计算出来。

基于RFID的定位方法有室内静态目标定位算法和室内动态目标定位算法。室内静态目标定位算法包括测距定位算法以及非测距定位算法。如:距离矢量跳数节点定位算法、质心定位算法和k邻近定位算法等。动态目标定位算法包括:时间域相位差测距算法、频率域相位差测距算法和空间域相位差测距算法^[8]等等。

RFID定位技术信号传输范围较广、应用成本低,具有非接触以及非视距等优点,适用于室内定位。但由于该技术作用的距离有限,缺乏通信能力,与其他系统融合在一起的效果并不好,因此定位不够精准。

2.3 超声波定位技术

超声波定位原理是基于超声波测距技术,大多采用反射式测距法^[9]。定位过程如下:首先通过固定在被测物体上的声波发生器,周期性的发送同频率的信号给各个位置已知的电子标签,通过不同时间所接收到的同一信号,具体推算出其各自之间的相关距离,从而推算出被测目标的定位坐标。

常见超声波测距采用传播时间检测法进行,超声波的传播路程等于超声波传播时间与超声波在空气中的传播速度的乘积。利用定位算法并结合多组超声波测量的距离数据,即可计算出被定位物体的具体位置坐标。超声波定位主要应用TOA定位算法和TDOA定位算法实现。该方法成本低、功耗小、定位精度可观,但对于复杂的环境定位效果仍不佳。

2.4 蓝牙定位技术

蓝牙定位技术的实现,需要在室内环境下建立3个及以上的beacon基站^[10],然后通过带有蓝牙功能的移动设备来接受从基站发出的广播报文,以此来推算出功率,计算出移动设备与基站间的距离,从而确定移动设备的位置。

蓝牙定位系统主要采用测距交汇法(又称传播模型法)和指纹匹配法两种定位方式。测距交汇法基本原理为:先构建室内环境下的蓝牙信号衰减模型,使用衰减模型将信号强度信息转换为两者之间的距离信息,再采用定位算法计算出目标位置。该方案的优势是无需构建指纹数据库,理论定位精度高;指纹匹配定位方法是将位置信息和蓝牙信号强度特征形成特殊的映射关联,即对室内场景下的位置坐标信息形成与之唯一对应的信号强度特征指纹^[11]。

蓝牙定位技术是一种短距离(一般在 2-5 米左右)适用于室内的无线传输技术,具有较高的商业价值,且功率消耗低,定位精度相对较高。其缺点是受环境影响较大,稳定性较差,而且系统作用的范围比较小。

2.5 惯性导航定位技术

惯性导航技术是一种纯依靠客户端的技术,通过终端惯性传感器采集物体运动过程的相关数据信息(其中包括物体的速度、方向、加速度等),再利用各种定位运算方法推算出被测物体的大概位置。惯性导航系统是一个自主式的导航系统,由惯性测量单元和积分器组成的积分系统。惯性导航技术在没有通讯设备和网络的情况下,就可以输出用户的具体位置信息,并且这一过程是实时进行的,也就是说在各种复杂多变的环境中,仍然可以做到对人员位置的精确定位。在惯性导航定位的基础上,还有一些技术可以辅助,从而达到更好的定位效果,如与 WIFI 指纹技术的结合^[12]。

该技术不会被电磁信号所干扰,安全隐蔽性强,而且产生的导航信息噪声低,定位过程中的数据更新率高,能在短时间内有比较好的精度和稳定性;但是随着时间的变化,误差也会随之增大,再加上传感器价格昂贵等原因,该技术也无法满足人们对室内定位的需求。

2.6 超宽带(UWB)定位技术

超宽带技术是一种无线通讯技术^[13],其不使用传统通信体制中的载波(不采用正弦载波),而是通过对极窄脉冲的发送和接收来进行数据传输。该脉冲为非正弦,且脉冲宽度须在纳秒甚至微秒级以下,具有 3.1~10.6 GHz 量级的频谱带宽。该技术具有良好的室内定位发展应用前景,隐含着很高的商业价值。

随着硬件设施以及对应操作水平的不断提高,提高 UWB 定位精度以及达到普遍化应用的重点,是将该系统与其他定位技术相融合;再加上深度学习的发展,将给该技术带来更大的突破和影响。该技术主要用于室内定位,具有数据传输性能好、低功耗、安全保密性强、高处理增益、很强的抗干扰能力和定位精度高等特点^[14]。超宽带技术通过与不同技术的融合,以及采用不同算法的应用,定位精度保持在 0.1~0.5 m 的范围。

3 定位算法

3.1 AOA 定位算法

如图 1 所示,AOA 到达角度定位方法,主要是

通过建立两个基站,分别以基站坐标为起始位置,形成两条经过移动台的射线,而两射线相交的点就是移动台所在的大概位置^[15]。

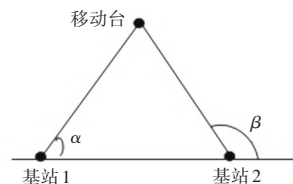


图 1 AOA 定位示意图

Fig. 1 AOA positioning schematic diagram

当基站内设有天线阵列时,移动台作为信号的发送端发出信号,并且由两个基站进行接收,进而可以得到两个基站的入射角,即图中所示的 α 、 β ,再以各基站坐标作为出发点,沿着入射角所对应方向形成的交点,就是移动台所在的位置。假设移动台位置坐标为 (x, y) , N 个基站的位置坐标为 (x_i, y_i) 。根据其几何意义,坐标之间存在以下关系:

$$\tan \alpha_i = \frac{y - y_i}{x - x_i} \quad (1)$$

将式(1)展开可得

$$y_i - x_i \tan \alpha_i = y - x \tan \alpha_i \quad (2)$$

将式(2)化简可得

$$\begin{bmatrix} y_1 - x_1 \tan \alpha_1 \\ y_2 - x_2 \tan \alpha_2 \\ y_n - x_n \tan \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tan \alpha_1 & 1 \\ -\tan \alpha_2 & 1 \\ -\tan \alpha_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$Y = AX$$

最后可以利用最小二乘法解得 X 。该算法通信成本低,定位精度较高,常应用室内定位过程中。

3.2 TOA 定位算法

TOA 到达时间定位方法,是通过记录移动台(信号发送端)发出信号到基站接收到信号所消耗的时间,再利用相关公式转换为两者间的距离,从而进行位置定位。该方法的实现至少需要 3 个基站的参与,才能计算目标的位置,其定位示意图如图 2 所示。

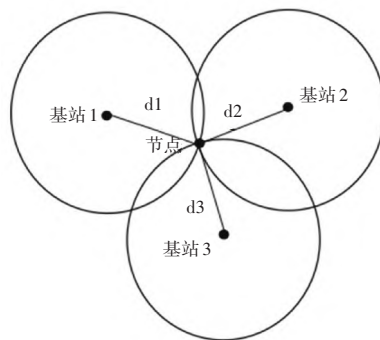


图 2 TOA 定位示意图

Fig. 2 TOA positioning schematic diagram

三个基站与信号接收节点的距离分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 ，以基站所在位置为圆心，所测得的距离为半径画3个圆，相交于一点，即目标节点所在位置。在计算过程中一般利用最小二乘法计算待测节点的大概位置^[15]。假设节点处位置坐标为 (x, y) ， N 个基站的位置坐标为 (x_i, y_i) 。根据其几何意义，则坐标之间存在以下关系：

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = r_i^2 \quad (3)$$

其中， $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ，设： $K_i = x_i^2 + y_i^2$ ， $R = x^2 + y^2$ ，将公式(3)化简得到：

$$\begin{bmatrix} r_1^2 - k_1 \\ r_2^2 - k_2 \\ \vdots \\ r_i^2 - k_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2x_N & -2y_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ R \end{bmatrix}$$

$$Y = AX$$

要得到坐标 (x, y) ，即求得 X 的值，可利用最小二乘法可得 $X = (A^T A)^{-1} A^T Y$ ，进行求解计算。

因该方法部署过程方便且性价比高，特别适用于室内、岩洞、森林、峡谷等 GPS 拒止环境下的目标定位，并且随着环境以及技术的变化，该算法在不断的被改进更新。该算法主要应用于 WIFI 室内定位技术和 UWB 室内定位技术中。

3.3 TDOA 定位算法

到达时间差算法 TDOA，是对 TOA 算法的改进与加强，只需保持各基站时钟同步即可。该算法主要利用多个基站接收到同一信号的时间差计算出对应的距离差，再确定信号源所在位置。定位示意图如图3所示：

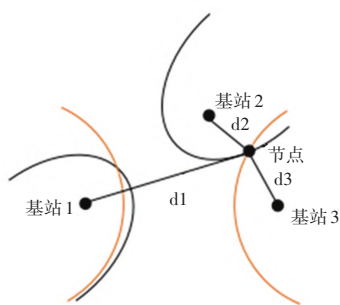


图3 TDOA 定位示意图

Fig. 3 TDOA positioning schematic diagram

各个基站从同一时间开始接受信号源的信号，根据信号接收端接收到数据的时间不一，会产生一个时间差，再通过相关的计算公式，计算出各个基站之间的距离差，距离差=时间差×电磁波的速度。如图3所示，可以选取基站1作为相对固定点，分别与

其他基站联合作为焦点，可以得到两条双曲线，两条双曲线的交点就是信号节点所在的位置。通过各基站的坐标以及各基站到节点的距离，就可以计算出节点处坐标。

TDOA 算法的优势是不存在任何相位模糊问题，且该系统构建复杂度较低，定位精度相对高，常常被应用于各种室内外定位技术中^[15]。随着定位精度需求的不断提高，该算法也被多次改进，其中包括基于 TDOA 的 Fang 算法、Chan 算法以及泰勒级数法等等。

3.4 指纹定位算法

指纹定位算法是基于无线信号的室内定位中比较经典的定位算法，其主要思想就是将某一需要进行定位的区域进行网格划分，将这些网格的交点分别设置其对应坐标，在每一个坐标上，都可以收到一组对应接入点 (Access Point, AP) 的特征量，这组特征量就相当于一个指纹上的多个特征 (这也是位置指纹这个名字的由来，指纹只是一种比喻)，依靠这组特征就可以确定定位节点所在的网格位置。该方法的实现分为离线采集和在线测试两个阶段^[16]。

离线阶段负责采集指纹信息，通过将某一需要进行定位的区域进行网格划分，对每个交点处分别设置对应坐标后，采集每个小网格区域内所表现出来的 RSSI 值，将指纹信息图片化处理，然后构建指纹数据库。

在线阶段进行定位测试，通过相关算法得到待测点处 RSSI 值以及大致坐标值，与数据库中的指纹坐标信息进行匹配对比，从中找出与待测点处 RSSI 值最为接近的点，此点的坐标就可视为待测点处坐标。该阶段可采用 Bayes 法、KNN 法进行坐标加权计算，用 K-means 等方法对指纹数据进行聚类运算^[17]，减少匹配时间。

指纹定位算法的精确度，很大程度取决于指纹信息分类的精细程度，分类越精细，定位精度就越高。因此，可以结合分类器对指纹信息进行分类，以此提高定位精度。但是，该方法也存在很大的不稳定性，当周边环境变化或者基站数量或位置变化时，该定位算法精确度就会很低，而且需要进行指纹信息重新采集，而采集工作相当繁琐，任务量较大。因此，该算法时常与 WIFI 定位技术相结合应用于室内定位。

3.5 RSSI 测距定位算法

RSSI 信号是将 RSS 经过转换后的值，RSSI 值由无线局域网的供应商按照自己特定的方式去定

义。将原有的 $RSSI$ 区间值通过特有的公式,对应到自己定义的区间。室内定位常用对数距离路径损耗模型,从而得到以下计算公式(4):

$$RSSI(d) = RSSI(d_0) - 10n \lg(d/d_0) + X_\sigma \quad (4)$$

其中, $RSSI(d_0)$ 即为距离发射点 d_0 处的 $RSSI$ (仅为参考点), 往往以 1 m 作为这个参考点; $RSSI(d)$ 是与发射点相差 d 处的 $RSSI$; X_σ 是一个均值为 0, 方差为 σ 变量, 并服从高斯分布; n 为信号衰减指数, 与环境有关, 通常值为 2 ~ 4 之间。根据所搭建的模型, 可得到发送端距离接收端的长度 d , 不同发送端所在的位置不一, 所以得到同一接收端的距离也不同, 最后依据多边定位等计算方法, 计算出大致的位置坐标^[18]。

4 结束语

本文从对定位技术的需求出发, 对多种室内外定位技术以及相关定位算法进行概括阐述, 得出各自适用的领域与环境。由于复杂多变的环境, 导致定位精度的大大降低, 现存的单一定位技术已无法满足目前的发展需求, 多种定位技术甚至算法的融合定位才是未来室内外定位的发展方向。目前的融合定位系统并未成熟, 迫切需要新技术的投入, 而 5G 通信技术的兴起给该领域带来新的机遇, 尤其是当下正处于探索阶段的“北斗+5G”融合定位技术, 是未来定位系统领域的重点研究对象。

参考文献

- [1] 闫大禹, 宋伟, 王旭丹, 等. 国内室内定位技术发展现状综述[J]. 导航定位学报, 2019, 7(4): 5-12.
- [2] 陈献, 王鑫. 室内定位技术发展及应用研究[J]. 科学技术创新,

2019(17): 83-85.

- [3] 陈加丰. GPS 测量定位技术在桥梁中的应用与展望[C]//中国土木工程学会总工程师工作委员会 2021 年度学术年会暨首届总工论坛会议论文集, 2021: 429-430.
- [4] 刘永战, 冯阳, 李蓐. 北斗定位导航技术的应用及展望[J]. 数字技术与应用, 2022, 40(7): 18-20.
- [5] 刘海蛟, 刘硕, 刘文学, 等. 北斗+5G 融合定位技术研究[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(9): 41-46.
- [6] 赵航. 基于 WIFI 室内定位方法的研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2020.
- [7] 祝文飞. 基于位置指纹的 WiFi 定位技术研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2021, 33(2): 14-16.
- [8] 李阳. 基于 RFID 的室内定位技术研究与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- [9] 韩丙辰, 马引群, 李平. 基于超声波的室内定位技术研究[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2017, 33(6): 21-24.
- [10] 丁子璇. 基于蓝牙 5.0 Beacon 的室内定位技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [11] 赵心域. 蓝牙室内定位的动态指纹窗口模型及其应用方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [12] 杨海效, 吴虹, 田菟玉, 等. 基于 Wi-Fi 指纹与惯性导航的室内定位技术研究[C]. 第十一届中国卫星导航年会论文集——S10 PNT 体系与多源融合导航. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 中科北斗汇(北京)科技有限公司, 2020: 146-150.
- [13] 朱自强. 超宽带定位的关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [14] 董兴波. 基于 UWB 的高精度室内定位系统研究与实现[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
- [15] 谢恩德, 洪毅. 室内定位方法综述[J]. 电脑知识与技术, 2021, 17(11): 231-234, 244.
- [16] 朱顺涛. 室内位置指纹定位算法的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- [17] 邹春明, 齐森南. 改进 K-means 聚类的自适应加权 K 近邻指纹定位算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 946-954.
- [18] 石琴琴, 徐强, 张建平, 等. 基于 RSSI 测距的室内目标定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 86-91.