

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.03.010

基于线性调频扩频的单基站室内定位系统研究

朱 棣, 邓中亮, 尹 露, 宋汶轩

(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘要:基于 WLAN、蓝牙等无线信号的室内定位系统在布设与组网阶段需要布设大量的节点,在推广过程中严重受制于布设成本,因而提出了一种基于线性调频扩频(Chirp Spread Spectrum, CSS)信号的单基站室内定位系统及相关定位算法,结合使用线性调频测距方法与自主角度估计方法,测距精度优于 1m,测角精度达 1.5°,可为地下停车场等人员相对稀疏、定位精度需求相对较低的应用场景提供低成本的覆盖。经过室内停车场场景试验,该室内定位系统可在仅使用单一基站情况下,在约 60m 半径内提供 1~3m 的定位精度。

关键词:单基站定位;室内定位;线性调频扩频;组合导航

中图分类号:TN967.2

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2018)03-0059-05

Research on Chirp Spread Spectrum Based Indoor Positioning System with Single AP

ZHU Di, DENG Zhong-liang, YIN Lu, SONG Wen-xuan

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: As the large quantity of APs needed for wireless network based indoor positioning systems during deploying has become the greatest drawback of its popularization, a single AP indoor positioning system based on Chirp Spread Spectrum (CSS) is proposed. Combined with Chirp Spread Spectrum ranging method and independent angle estimation method, this positioning system can provide a ranging accuracy better than 1 m and angle estimation accuracy of 1.5 degree, which is suitable and cost efficient for areas with less crowd and low accuracy demand, such as underground parking lot. The system can provide an accuracy of 1~3 m in about 60 m radius with single AP in an underground parking lot test.

Key words: Single AP positioning; Indoor positioning; Chirp spread spectrum; Integrated navigation

0 引言

全球四大卫星导航系统能对高山、海洋、城市室外等环境进行精确的定位,然而当它面对有建筑物遮挡的室内环境时,基本丧失定位能力^[1-3]。人们约 80%的时间都活动在室内,因此室内定位导航服务有着广泛需求^[4]。工信部最新数据显示,截至

2017年7月,我国手机用户数达 13.6 亿户,手机用户普及率达 97.1 部/百人,智能手机用户超过 6.24 亿,LBS 相关用户数量超 5.1 亿^[5],已超过微博用户。根据百度公司内部统计,用户应用百度位置服务的定位请求信息已经超过 100 亿次/日。

目前,无线局域定位主要包括 Wi-Fi、ZigBee、Bluetooth、UWB 等,其特点是利用短距离无线小范

收稿日期:2018-03-30;修订日期:2018-04-15

基金项目:广东省科技计划项目(2017B090908005)

作者简介:朱棣(1990-),男,博士生,主要从事室内导航、卫星导航方面的研究。E-mail: zhudi_bupt@163.com

围覆盖感知来确定目标所在位置。其中基于 Wi-Fi 和蓝牙的定位系统已广泛地应用于商场、航站楼等人员密集区域,为室内人员提供服务,其定位精度根据节点密度约为 $1\sim 5\text{m}$ ^[6]。UWB 是近几年新兴的室内定位技术^[7],该类系统利用超宽带脉冲信号进行信息传递,同时利用该脉冲信号良好的时间分辨率进行 TOA 测量,进而实现多基站 TDOA 定位。UWB 室内定位系统由于其信号特点,在抗多径、低复杂度、时间同步等方面具有先天性优势,其室内定位精度通常优于 1m ^[8]。

但是,由于该类系统的定位通常需要 3 个以上基站实现 2 维或 3 维定位,而其节点设备受收发频率、信号体制等影响,通常其单基站作用半径仅为十余米至数十米^[9]。因此为了实现定位,其节点设备布设密度将进一步提升。高节点布设密度带来的成本提升极大限制了此类室内定位系统的推广,通常仅应用于高人员密度区域。

本文提出的一种基于线性调频扩频信号的单基站室内定位系统,采用线性调频扩频信号作为测

距信号,信号抗多径性能优良,同时由于其扩频特性使其具有较好的传播能力,在 20dBm 发射功率下,极限测距范围可达 800m ,原始测距精度优于 1.5m 。为满足 2 维定位条件,本文提出的室内定位系统结合了惯性导航器件测量定位终端的角度信息,实现单一基站下的室内 2 维定位。经过试验,该系统单基站覆盖范围半径约 60m ,且可在该范围下提供 $1\sim 3\text{m}$ 定位精度。

1 基于线性调频扩频信号的单基站室内定位系统架构

1.1 系统组成架构

基于线性调频扩频信号的单基站室内定位系统主要由基站(Anchor)和定位终端(Tag)两部分组成,具体功能划分为测距系统、测向系统和解算系统三部分。其中测距系统在测距的同时完成基站和定位终端之间的数据传输。

其系统组成框架如图 1 所示。

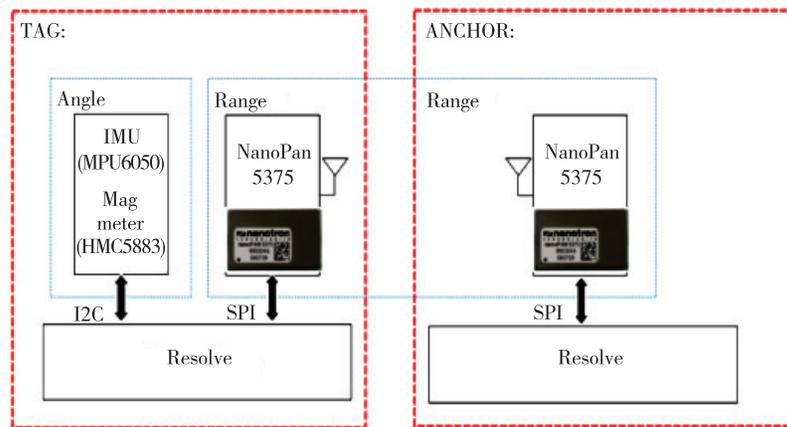


图 1 单基站室内定位系统示意图

Fig. 1 The scheme of single AP indoor positioning system

1.2 单基站定位算法

本系统主要针对的应用场景是室内,尤其是低人员密度的停车场等室内场景。因此,定位解算仅需要实现 2 维解算即可。

为此需要获得不少于 2 个独立观测量。在传统单基站定位系统中,主要以 TOA/AOA 联合测量定位方式为主,即测量定位终端与基站之间距离以及定位终端与基站之间的相对夹角,采用极坐标形式,实现定位终端的相对位置测定。

在本文提出的系统中,其覆盖区域的半径约

60m ,因此传统的基于 UWB 的多天线角度测量方法难以适用,其他基于相位信息的测量系统也难以与线性调频扩频信号兼容^[10]。因此,本文系统采用定位终端偏航角测量方式,通过测量定位终端与基站之间的相对距离以及定位终端自身偏航角,实现一种附加了几何约束的航迹推算系统。其定位模型如图 2 所示。

图 2 中,在定位终端的 2 次观测间隔内,由于观测时间相对于终端移动速度足够短,终端移动轨迹可以近似为由 (x_0, y_0) 点至 (x, y) 点的直线运动

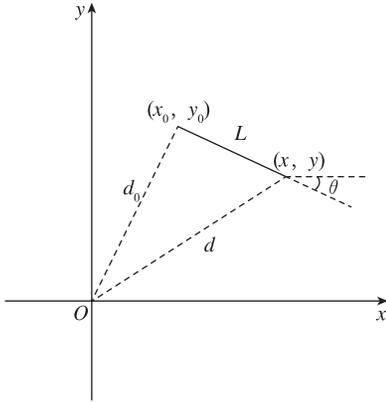


图 2 定位模型示意图

Fig. 2 Illustration of the positioning model

过程,其中测距结果由 d_0 变化至 d , 偏航角为 θ 。

因此可以分别构建距离方程与角度方程:

$$\begin{cases} x = x_0 + L \cdot \cos\theta \\ y = y_0 + L \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} d_0^2 = x_0^2 + y_0^2 \\ d^2 = x^2 + y^2 \end{cases} \quad (2)$$

连立式(1)、式(2),可得关于移动距离 L 的观测方程

$$L^2 + 2L \cdot (x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta) + d_0^2 = d^2 \quad (3)$$

由于该方程为 2 次方程,因此会出现双解的情况,需要对方程的解进行唯一性确定。主要判定条件有:

$$\begin{cases} L_1 \in R \\ L_1 > 0 \\ L' - L_1 < L' - L_2 \end{cases} \quad (4)$$

其中, L_1, L_2 为方程的 2 个解, L' 为上一观测时刻的 L 值,则优先选择 L_1 作为本次观测的解。该条件在保证了解的实正数性的同时,加入了等效的速度约束,使系统收敛性得到了提高。

2 系统测量及融合算法

2.1 测距系统

本室内定位系统采用 Nanotron 公司的 NanoPan5375 模块组成测距系统。NanoPan5375 模块使用线性调频扩频通信方式实现模块间的通信,使用 2.4GHz 的 ISM 频道,通信速率为 125Kbit/s ~ 2Mbit/s^[11]。线性调频扩频信号使用雷达系统中常用的啁啾信号,利用上扫频和下扫频信号分别表示 0 和 1 比特,其信号可表示为式(5)。

$$s(t) = A \cos 2\pi \left(f_1 + D \frac{\Delta f}{\tau} t \right) t \quad (5)$$

其中, D 为数据, Δf 为扫频步长, τ 为扫频时间。由式(5)可以看出,该信号幅频特性近似为一矩形包络。实际信号中,大于 90% 的能量集中于该包络内,同时通过较大的扫频频宽,使得该信号具有抗干扰性强和抗多径效果好等优点。该信号通过匹配滤波器接收,匹配滤波器在脉冲叠加检出的过程中分散了多路径信号,获得较高的信噪比。该信号体制相较于传统 UWB 系统的脉冲调制方式,其发射功率稳定且均一,不易干扰其他通信系统。

该系统在通信的同时,使用双边双路对称测距 (Symmetrical Double-Side Two Way Ranging, SDS-TWR)^[12] 法进行测距,如图 3 所示。

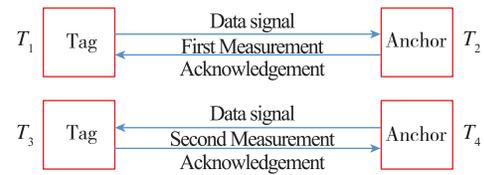


图 3 双边双路对称测距

Fig. 3 Symmetrical double-sided two way ranging

其中, T_1 代表定位终端自发送数据到首次接收基站应答数据的时间, T_2 代表基站自接收到定位终端数据至基站回复信号之间的处理时间, T_3 代表自定位终端收到基站数据到回复之间的处理时间, T_4 代表基站自发送数据到定位终端二次回复之间的时间。若假设自 $T_1 \sim T_4$ 之间终端与基站相对位置变化极小,则实际传输时间 T 可由式(6)推出:

$$\begin{cases} T_1 = 2T + T_2 \\ T_3 = 2T + T_4 \end{cases} \Rightarrow \rho = c \cdot \frac{(T_1 - T_2) + (T_3 - T_4)}{4} \quad (6)$$

该算法利用双向对称测距,消除了两节点间的始终误差,因此不需要通信双方的时钟同步,极大降低了系统复杂性。

2.2 测角系统

本文设计的室内定位系统角度测量不同于传统的 TOA/AOA 定位中所测的基站与定位终端空间角度,而是通过定位终端的惯性器件测量的终端的空间水平指向。

本系统使用 MPU6050 陀螺仪与加速度计集成芯片以及 HMC5883 地磁传感器构成 9 轴姿态传感子系统。本文基于 Kalman 滤波器构建偏航角测量系统,相关理论算法已有大量研究^[13],本文采用的是 Simone Sabatelli 等提出的双级 Kalman 滤波

器^[14]。本系统有三种不同类型的输入数据,如图4所示。将根据陀螺仪计算出的姿态角作为 Kalman 滤波器的预测值,将磁强计、加速度计计算出的姿态角作为测量值,通过 Kalman 滤波实现了多传感器信息的融合,确保了姿态估计的准确性。

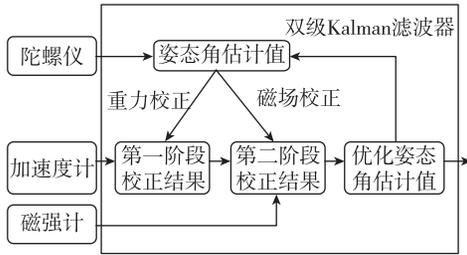


图4 双级 Kalman 滤波器

Fig. 4 Double-Stage Kalman Filter

根据陀螺仪输出角速度值计算姿态角的过程,看作是当前状态的预测,建立滤波系统的状态方程

$$\dot{Q} = \frac{1}{2} Q \cdot \omega \quad (7)$$

其中, Q 为四元数, ω 为角速率。输出的预测角度,可以看作是真实角度和误差角度的合成,如式(8)

$$Q_G^k = Q_T^k + \Delta Q_G^k \quad (8)$$

其中, Q_G^k 为经四元数微分方程求解的姿态角; Q_T^k 为假设存在真实姿态角; ΔQ_G^k 为根据陀螺仪输出角速度预测姿态角度的估计误差。根据加速度计得到的重力场加速度和磁强计得到的磁场强度计算出当前时刻的姿态角,并作为观测量。观测量方程为

$$Q_A^k = Q_T^k + \Delta Q_A^k \quad (9)$$

其中, Q_A^k 为观测量; Q_T^k 为假设存在的真实姿态角; ΔQ_A^k 为测量姿态角度与真实角度的误差。

过程噪声协方差 Q , 即陀螺仪预测姿态角过程中的过程误差协方差矩阵,可通过实验方法得到。测量噪声协方差矩阵 R 可通过融合更新计算得到

$$R = \frac{1}{2} \text{cov}(f, f) = E[(\Delta Q_A^k)^2] \quad (10)$$

将得到的过程噪声协方差和测量噪声协方差代入 Kalman 滤波算法实现估计角度和测量角度的融合,得到优化姿态角估计值,再把得到的优化结果作为下一次计算的起始值,反复地进行数据融合得到稳定的姿态角估计值。实验表明,通过 Kalman 滤波有效地补偿了传感器漂移与测量噪声等因素对加速度计、陀螺仪和磁强计的影响,减小了姿态角度测量误差,提高了运算精度,测角精度达 1.5° 。

3 实验系统及实验结果

3.1 实验系统

根据 1.1 节设计的系统架构,实验系统实物图如图 5 所示。



图5 实验装置图

Fig. 5 The picture of experiment devices

其中,蓝色板为基站板,红色板为定位终端板。定位终端可将定位结果通过串口上报上位机。

3.2 实验数据及结果

实验在北京邮电大学地下车库进行,实验范围约为 $40\text{m} \times 60\text{m}$ 的矩形区域。定点测距实验结果如表 1 和表 2 所示,可见其测距精度均优于 1m 。实地实验定位结果图如图 6 所示。

表 1 定点测距精度实验(未平滑)

Tab. 1 Result of pin point ranging (Not filtered)

实验点/m	距离/m	标准差/m
11	11.8093	0.1922
23	22.0967	0.5929
32	32.3827	0.1280
42	42.1293	0.406

表 2 定点测距精度实验(已平滑)

Tab. 2 Result of pin point ranging (Filtered)

实验点/m	距离/m	标准差/m
11	11.8197	0.1076
23	22.1142	0.0786
32	32.3809	0.1025
42	42.1339	0.0345

实验对比了 Kumar 等提出的基于 Wi-Fi 的单基站定位方法^[15],可见本文方法定位精度保持在 $1 \sim 3\text{m}$,优于基于 Wi-Fi 的单基站定位结果。

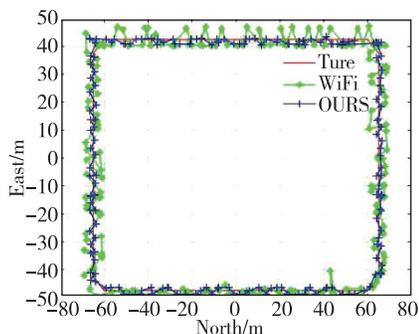


图6 实地实验定位结果图

Fig. 6 The results of field experiment

4 结论

本文提出了一种基于线性调频扩频信号的单基站室内定位系统。该系统采用线性调频扩频信号进行单基站测距,同时以定位终端偏航角信息进行辅助,构成了一种有附加几何约束的航迹推算系统,加入了等效的速度约束,使系统收敛性得到了提高。实地实验表明:该定位系统仅需单个基站即可覆盖60m以上半径范围,实现1~3m的室内定位精度。

由于本文的定位系统仅需要单个基站覆盖,其节点布设密度远远低于现有基于Wi-Fi、蓝牙、Zigbee和UWB的定位系统,降低了定位系统安装和部署的难度,减少了定位成本及复杂度,对室内定位系统的推广和发展具有积极意义。

参考文献

- [1] He Z, Petovello M, Pei L, et al. Evaluation of GPS/BDS indoor positioning performance and enhancement [J]. *Advances in Space Research*, 59(3), 2017: 870-876.
- [2] He Z, Petovello M, Lachapelle G. Improved velocity estimation with high-sensitivity receivers in indoor environments[C]//*Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, 2012: 1004-1016.
- [3] Dedes G, Dempster A G. Indoor GPS positioning-challenges and opportunities[C]// *2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference*, 2005: 412-415.
- [4] 邢珍珠. 基于地磁传感器的室内导航解决方案[J]. *软件工程*, 2016, 19(4):13-15.
- [5] TechWeb. 我国手机用户突破14亿 户均流量2.25G [DB/OL]. [2017-11-24]. <http://www.techweb.com.cn/tele/2017-11-24/2610515.shtml>.
- [6] 华海亮. 基于WiFi和蓝牙的室内定位技术研究[D]. 锦州:辽宁工业大学, 2016.
- [7] 杨狄, 唐小妹, 李柏渝, 等. 基于超宽带的室内定位技术研究综述[J]. *全球定位系统*, 2015, 40(5): 34-40.
- [8] Yang D, Li H, Peterson G D, et al. Compressive sensing TDOA for UWB positioning systems[C]// *Radio & Wireless Symposium. IEEE*, 2011:194-197.
- [9] 温培博, 李行健, 杨文. 多基站下基于信号到达时间的室内三维定位[J]. *数学的实践与认识*, 2017, 47(14):151-161.
- [10] 张浩, 刘兴, Gulliver T A, 等. 基于单基站天线阵列的超宽带定位AOA估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(8):2024-2028.
- [11] Nanotron Technologies GmbH. Nanopan 5375 RF module datasheet[M]. Version 2.0. Berlin, 2009.
- [12] Lin C. Application of SDS-TWR technology in coal mine personnel positioning system[J]. *Industry & Mine Automation*, 2015.
- [13] 陈航科, 张东升, 盛晓超, 等. 基于Kalman滤波算法的姿态传感器信号融合技术研究[J]. *传感器与微系统*, 2013, 32(12):82-85.
- [14] Sabatelli S, Galgani M, Fanucci L, et al. A double-stage Kalman filter for orientation tracking with an integrated processor in 9-D IMU[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2013, 62(3):590-598.
- [15] Kumar S, Kumar S, Katabi D. Decimeter-level localization with a single WiFi access point[C]// *Usenix Conference on Networked Systems Design and Implementation. USENIX Association*, 2016:165-178.