

基于到达相位技术的室内定位系统研究与实现*

姚 飞 陶 懿 刘守印

(华中师范大学物理科学与技术学院 武汉 430079)

摘要: 研究了基于到达相位测距的性能,设计实现了基于到达相位技术的小型地下停车场定位系统。AT86RF233芯片可测量载波相位,根据不同频率射频信号的相位差可计算距离。设计了可变限幅均值滤波算法自适应限制测距结果的较大波动保证实时性的前提下优化了结果平滑性。在三锚节点的室内定位系统中,设计了基于加权最小均方误差的质心定位算法,改进了质心定位算法中定位点的选择方式。实地实验结果验证了算法的有效性,系统的实时跟踪精度达到亚米级,可用于小型室内停车场车辆和人员定位。

关键词: 到达相位; 室内定位; AT86RF233; 可变限幅均值滤波算法; 加权最小均方误差法

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Indoor positioning system research and implementation based on phase of arrival

Yao Fei Tao Cai Liu Shouyin

(Institute of physics science and technology, Center China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: This paper investigates the distance measurements performance of ranging by POA(phase of arrive) and implements a small underground parking lot positioning system based on POA. AT86RF233 uses phase shift measurements of different carrier waves to calculate the distance. This paper designs the variable amplitude-limiting and average filtering algorithm to improve real-time and smoothness performance of ranging results. Then implements the centroid localization algorithm based on weighted minimum mean square error which improves the centroid selection method of centroid localization algorithm in 3-anchors indoor position system. The field experiments' results verifies the effectiveness of the algorithms. the tracking accuracy of the indoor positioning system reaches sub-meter level and it can be used for vehicle and personnel tracking in small indoor parking lots.

Keywords: phase of arrive; indoor positioning; at86rf233; the variable amplitude-limiting and average filtering algorithm; weighted minimum mean square error

1 引言

随着定位技术的发展,基于射频信号传播特性的定位技术得到了更多的关注,且主要集中在全球卫星定位系统无法工作的室内环境^[1]。从定位几何空间看,室内射频信号精确定位技术通常是基于三边测距的方法,因而定位精度主要受测距精度影响。获取射频节点之间距离的方法主要有以下几种^[2]:基于信号强度(RSSI^[3-4])的测距,基于双向飞行时间(TW-TOF^[5])的测距,基于到达时间(TOA^[6])的测距,基于到达角度(AOA)的测距,基于WiFi的定位技术^[7-9]等。实际应用中,通常根据特定的定位需求和实现的难度来选择合适

的定位方法^[10]。但如果想改善定位的精度只能研发新的定位算法或新的测距技术。

基于射频信号到达相位的测距方法是一种新技术,通过在接收端对发射端依次产生的相同初相位不同频率的射频信号进行相位测量,计算出节点间的距离^[11]。这种技术的优势在于完全支持 ZigBee 协议,方便组网实现节点间的通信,通过测量相位而不是测量时间,提高了测距精度,避免了信号飞行时间和设备其他计算时间糅杂在一起使计时准确度难以保证的弊端。同时,目前基于射频信号相位的测距方法主要采用 Atmel 公司的核心模块,官方测距工具箱(RTB)能帮助实现了一对一的测距。同时,硬件通过天线分集产生 2×2 个测距结果,取最小结果(即所走路径最

收稿日期:2016-04

* 基金项目:华中师范大学中央高校基本科研业务费项目(CCNU14F01005)资助

短的结果)减弱多径效应的影响。

但是,目前基于射频信号相位的测距方法存在测量结果波动较大,测量耗时较长的问题。为优化测距结果本文提出了可变限幅均值滤波算法进行优化,提高测距精度的同时保证了实时性。

小型地下停车场是典型的室内定位场景,为了实现人员车辆定位,文章设计了地址轮询机制实现了多点测距。同时设计了基于加权最小均方误差的质心定位算法,通过加权最小均方误差法选择定位点,提升了单纯质心定位方

法的精度。实验验证在地下停车场的实时跟踪精度达到亚米级。

2 器件概述

本系统使用 Atmel 公司 REB233SMAD 模块。模块包含有一片 AT86RF233 射频芯片和一片 ATxmega256a3 微控制器,结构如图 1 所示,其中 AT86RF233 射频收发器工作电压为 1.8~3.6 V,睡眠状态电流为 1 μ A,工作状态电流小于 14 mA,功耗低。

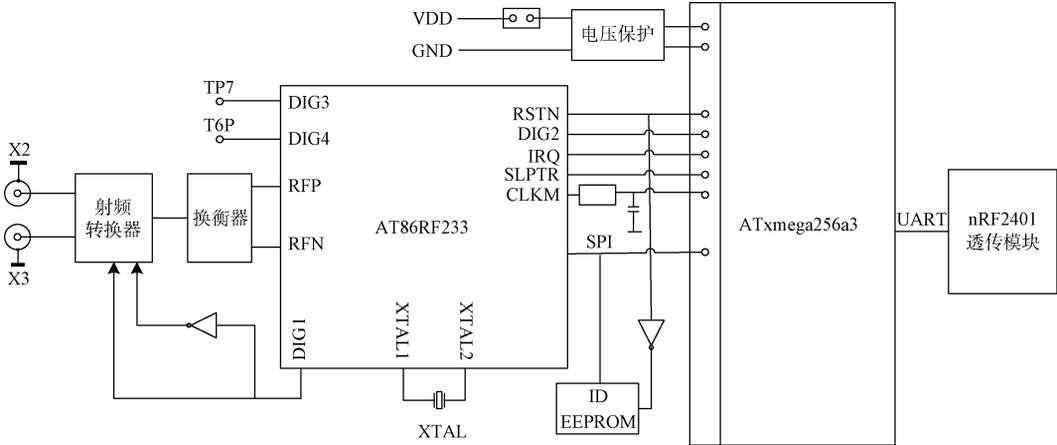


图 1 节点结构

芯片支持天线分集,通过 DIG1 脚连接射频转换器选通所用天线。在移动节点上,系统添加了 nRF2401 无线低功耗透传模块,用于向 PC 端无线透传测量数据,帮助实现系统全无线通信。

3 到达相位测距原理

到达相位测距原理是指由测量的相位值计算两节点间距离的原理。

如图 2 所示,节点 A 与节点 B 通过 802.15.4 协议进行时钟同步,然后节点 A 向节点 B 发射频率为 f_1 初相位为 φ_{1r} 的射频信号,节点 B 根据本地同频信号的相位 φ_B 测得频率为 f_1 的信号相位为 φ_{1r} 。

节点 B 发射频率为 f_2 的射频信号,在节点 B 测得的相位为 φ_{2r} 。两次测量的相位差 $\Delta\varphi$ 可表示如下:

$$\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1) = (\varphi_{2r} - \varphi_{2t}) - (\varphi_{1r} - \varphi_{1t}) = (\varphi_{2r} - \varphi_{1r}) - (\varphi_{2t} - \varphi_{1t}) \quad (1)$$

式中: φ_{1t} 、 φ_{2t} 分别表示第一次与第二次相位测量时, B 测得的信号的到达相位与信号的初相位的差值。 φ_{2r} 与 φ_{1r} 为同一发射节点,在不同次频率发射的时候可以锁定发射信号初相位,即 $\varphi_{2t} = \varphi_{1t}$,所以在接收端测得的相位变化值,即 $\varphi_{2r} - \varphi_{1r} = \Delta\varphi$,在发射端两次初相位相同时, $\Delta\varphi$ 仅与接收端测得的到达相位有关,避免了 A、B 两端相位不同步的影响。因而环境理想状况(无其他射频信号干扰,无多径效应等)下引起测量相位变化的因素只有射频信号频率的变化,进一步计算得式(2)。

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_{2r} - \varphi_{1r} = 2\pi\left(\frac{d}{\lambda_2} - \left[\frac{d}{\lambda_2}\right]\right) - 2\pi\left(\frac{d}{\lambda_1} - \left[\frac{d}{\lambda_1}\right]\right) \quad (2)$$

式中: λ_1 和 λ_2 分别表示频率为 f_1 和 f_2 的电磁波的波长, d 表示节点 A 与 B 间的距离。 $\left[\frac{d}{\lambda}\right]$ 表示节点间距离中整数倍波长的数目。由于在发射频率分别为 f_1 和 f_2 的电磁波时,间隔时间很短,为微秒级,节点移动的距离远小于一个波长,因而可以假设两次测相中整数倍波长的数目是一样的。式(2)可简化为:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi\left(\frac{d}{\lambda_2} - \frac{d}{\lambda_1}\right) \quad (3)$$

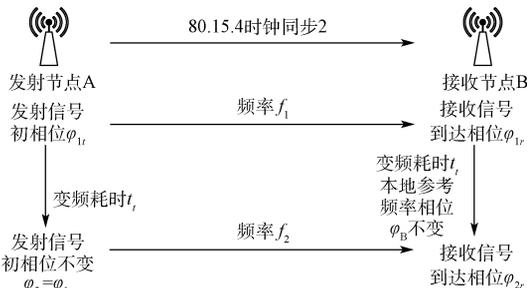


图 2 到达相位测距原理

然后两节点都将测距所用频率变频为 f_2 ,由节点 A 向

式中： λ 为所使用频率的电磁波的波长。节点间的距离 d 经过推导可以表示如下：

$$d = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{2\pi(f_2 - f_1)} \quad (4)$$

为减弱信道衰落对测量结果的影响，提高计算结果的准确性，系统以 2 403 MHz 为起始频率，每次测量增加 2 MHz，以 2 443 MHz 为终止频率，测得每个频率点的相位。测量过程中节点间距离变化很小，计算出每次测距结果后求均值，可推导出两节点间的距离 d 如下（ i 表示第 i 次测距）：

$$d = \frac{\sum_N d_i}{N} = \frac{c}{2\pi} \cdot \frac{\sum_N \Delta\varphi_i}{N \Delta\varphi} \quad (5)$$

4 测距实验及优化

通过在两节点真实距离为 10m 处的定点测距实验得到如图 3 以三角符号为标记的 200 次测距结果。由测距实验结果可以看出，测距结果波动较大。为改善测距结果波动大，最大误差值大的情况，在嵌入式底层设计实现了可变限幅均值滤波算法以保证测距实时性的前提下减小波动，提高精度。

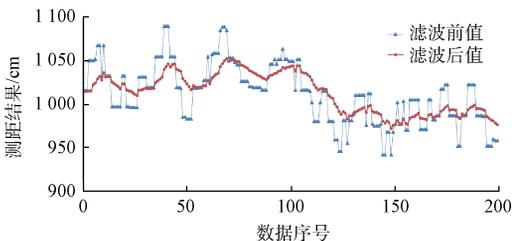


图 3 相距 10 m 处滤波前滤波后测距结果

4.1 可变限幅均值滤波算法

可变限幅均值滤波算法的核心思想是引入历史值迭代修正当前测距结果并对当前变化很大的测距结果进行可变限制。其中可变限幅滤波法包含 3 个参数^[12]：正向最小限幅 HL 、反向最小限幅 LL 和变限速率 M ，一般情况下 $HL=LL$ 。初始化周期内，当前实际限幅 $AHL=HL$ ， $ALL=LL$ 。滤波周期内，先对原始测量值 $y(k)$ 与上次滤波后的值 $\hat{Y}(k-1)$ 的增量进行判断。若超过当前限幅值 AHL ，则对增量进行限制，用限幅后的值 $\hat{y}(k)$ 进行平均滤波运算，得到最终输出结果 $\hat{Y}(k)$ 。同时，根据超限情况，对当前实际限幅进行调整。每个滤波周期的算法如图 4 所示。

从算法流程图看，当测量值连续单向变化时，变化方向对增量的实际限幅渐渐变大，直到实际限幅等于测量值增量，相反方向的实际限幅则等于最小限幅。

当测量值在准确值周围随机跳动时，单方向上持续保持限幅增大或减小的概率不大，则两个方向上的实际限幅都不会持续放大，维持在最小限幅的范围附近。并且经过

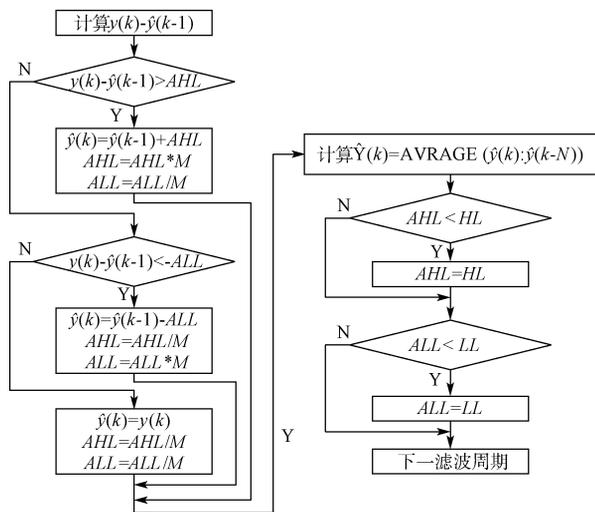


图 4 可变限幅均值滤波算法流程

几个周期的限幅后，逐渐放开变化方向的限幅，最终测量结果能够快速跟上测量结果的变化。

图 4 中的 N 指的是均值滤波所使用的历史值的个数。这里 N 一般取 5。取值过大会造成节点移动过程中，最终测距结果无法及时跟上节点的变化速度。同时初始限幅值 HL 、 LL 的值不能设置过小， M 取值取决于节点最大移动速度。

图 3 是当 N 取 5， M 取 2， $HL=LL=50$ cm，两节点相距 1 000 cm 时的采用可变限幅均值滤波和不使用滤波的测距结果对比。从图 5 可以看出，在加入了可变限幅均值滤波后，突变值被从测距数据中修正并且数据的变动更加平滑。误差最大值由之前的接近 100 减小到了 50 cm 以内。可变限幅均值滤波算法能够平滑测距结果，提高定点测距精度。

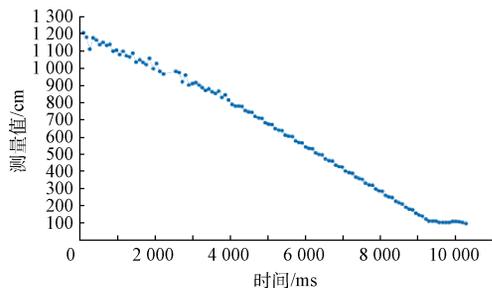


图 5 室内步行测距结果

4.2 室内移动测距实验

为了验证系统的跟踪能力，确认可变限幅均值滤波算法在移动测距中的实际效果，进行室内步行测距实验。实验设置在一条室内长直走道内，一个锚节点，一个移动节点均固定在高 169 cm 的三脚架上。一位身高 176 cm 的实验人员用手托举着移动节点三脚架以 1.00 m/s 左右的速度沿地上拉直的卷尺从 12.00 m 处往 1.00 m 处行走，连

续测量,耗时大约 11 s。整理得到如图 5 所示的室内步行测距结果。

由图 7 可以看出,室内步行测距时,测距结果能够跟随节点位置的变化而变化。前期波动较大是由于滤波算法缺少可以参考的历史数据,限幅值不稳定,导致加权效果不明显。随着测距的进行,波动逐步减小,限幅值趋于稳定。可变限幅均值滤波算法能够保证移动测距实时性和精度。从总体来看,在室内步行环境下,本系统的测距功能能够在保证亚米级精度的前提下实时跟踪移动节点的移动。

5 定位系统设计

通过对测距结果滤波优化了测距性能,利于采用多边测距进行质心定位。基本思想是测得移动节点与其他锚节点的距离,通过基于加权最小均方误差的质心定位算法确定移动节点的位置。由此设计了如图 6 所示的定位系统框架。实验系统包含 3 个锚节点、1 个移动节点,移动节点通过低功耗无线透传模块与上位机无线通信,在上位机进行复杂度较高的定位算法,同时实时显示定位结果。

该系统通过移动节点以地址轮询的方式与 3 个固定锚节点进行测距,每次测距结果实时发送给 PC 端上位机,上位机在解析数据后得到相应的测距值,之后按照定位算法计算移动节点的位置坐标并实时显示。

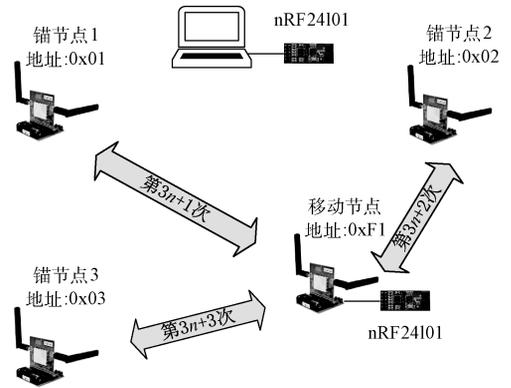


图 6 室内 POA 定位系统框架

系统由锚节点、移动节点、上位机 3 部分构成。相应的软件设计主要为两部分:嵌入式软件设计和上位机软件设计。嵌入式软件主要实现了可变限幅均值滤波算法和地址轮询测距。上位机软件主要实现了底层数据解析、基于加权最小均方误差的质心定位算法、移动节点位置实时显示。

5.1 嵌入式软件设计

嵌入式软件编写在 Atmel Studio 6.2 平台上进行,锚节点和移动节点分开。锚节点与移动节点的协同工作软件流程如图 7 所示。

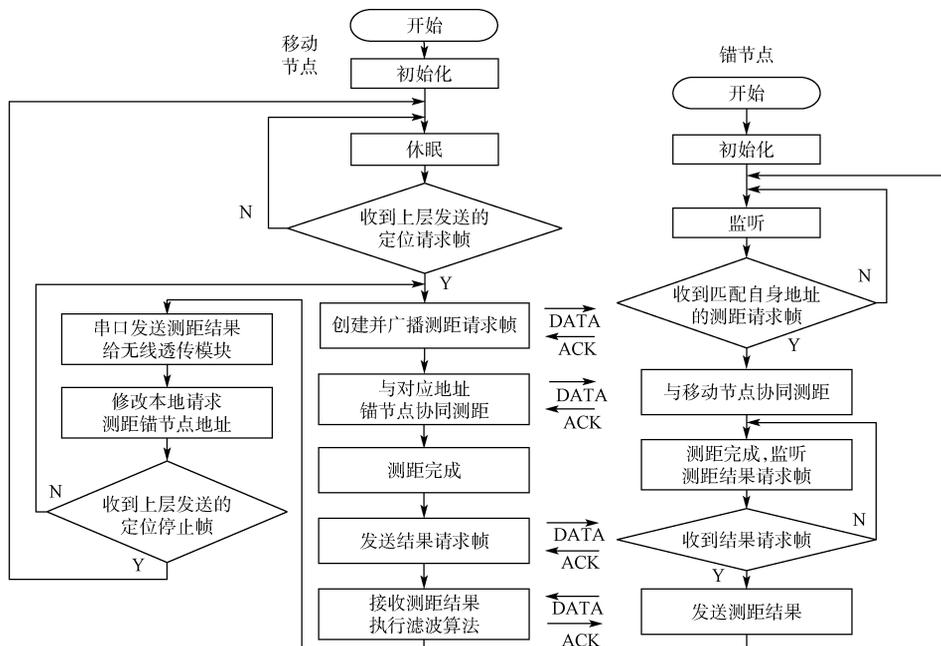


图 7 移动节点与锚节点的工作流程

移动节点采用地址轮询的方式对锚节点进行点名式测距。分别对每个锚节点测距结果可变限幅均值滤波,测距完成后通过无线透传模块把当前测距结果发送给上位

机。然后移动节点改变测距请求帧中锚节点的地址进行轮询测距。

锚节点采用监听的方式工作,当接收到与自己地址匹

配的测距请求帧时返回接收请求帧,进行测距,测距完成后进入监听状态等待下一轮被点名。

5.2 上位机软件设计

上位机软件在 Visual Studio 2013 上采用 C# 语言编写,包含 5 部分:串口数据获取、系统参数设置、基于加权最小均方误差的质心定位算法计算、移动节点坐标的实时显示(Zedgraph^[13]库)、日志记录(log4net 库)。其中由测距数据计算定位坐标是上位机软件的核心。系统参数设置可以设置定位区域大小、锚节点位置坐标、定位算法加权系数、显示轨迹点个数,系统开启关闭等。实时显示可以同时显示 10 个以内的定位点构成的轨迹,使轨迹移动更加直观。上位机软件工作流程图如图 8 所示。

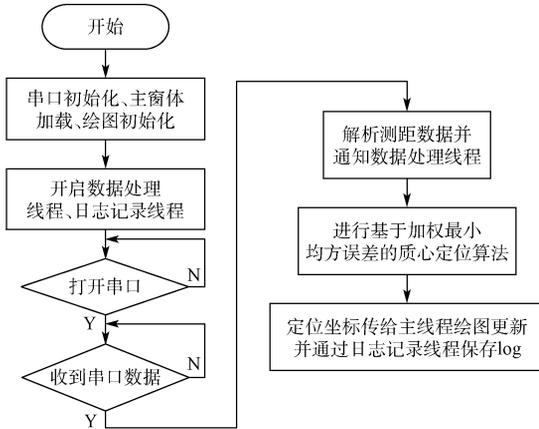


图 8 上位机软件工作流程

5.2.1 基于加权最小均方误差的质心定位算法

定位算法是上位机软件的核心,本文设计了基于加权最小均方误差的质心定位算法,将加权最小均方误差法^[14-15]与质心定位法^[16]结合,优选质心,相比于单纯的质心定位方法定位精度更高。假设无线定位系统中锚节点有 n 个,分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, 移动节点的坐标为 (x, y) 。锚节点 n 到移动节点的距离为 d_n 。由二维空间的几何知识可得:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (6)$$

即在基于距离测量的定位系统中,已知 $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n), d_1, \dots, d_n$, 求解 (x, y) 。从几何上看,把每两个圆的所有交点分为一组,形成 C_n^2 组,在每组中抽出一个交点构建 n 边形,计算构成的所有 n 边形的质心。单纯的质心定位方法是计算所有交点构成的多边形的质心。本文先对每两个圆的交点进行选择,组建 n 边形,再计算所有 n 边形的质心与基站距离,将此距离同对应基站的测距结果计算均方误差,则均方误差差最小的质心的坐标就是定位的结果,这样去除了单纯质心定位方法中错误交点的影响,提高了定位精度。最小均方误差计算如式(7)所示。

$$\hat{x}_{MMSE} = \arg \min_x \left\{ \sum_{i=1}^N (\hat{d}_i - \|x - x_i\|)^2 \right\} = \arg \min_x \left\{ \sum_{i=1}^N (e_i)^2 \right\} \quad (7)$$

式中: x 表示 n 边型质心的坐标, x_i 表示第 i 个基站的坐标, \hat{d}_i 表示移动节点与第 i 个基站之间的测距结果, e_i 是 n 边型质心的和第 i 个基站之间距离差与对应测距结果的误差。MMSE 指最小均方误差。

在最小均方误差法的基础上进行进一步扩展,进行加权最小均方误差。主要思想是通过对方误差添加 β_i 作为移动节点与第 i 个锚节点之间误差平方值的加权系数从而提高最小均方误差法的可靠性,表达式如式(8)所示。

$$\hat{x}_{WMMSE} = \arg \min_x \left\{ \sum_{i=1}^N \beta_i (\hat{d}_i - \|x - x_i\|)^2 \right\} = \arg \min_x \left\{ \sum_{i=1}^N \beta_i (e_i)^2 \right\} \quad (8)$$

β_i 是 POA 测距的误差值平方期望的倒数,可以在搭建定位系统时在当时的定位环境下测得,通过上位机软件设置加权系数,表示如式(9)所示。

$$\beta_i = \frac{1}{E\{(\hat{d}_i - d_i)^2\}} \quad (9)$$

5.2.2 定位特殊情况处理

在执行定位算法的过程中会出现没有合适交点或定位结果越出定位区域等情况。

无交点处理分两种情况,第一种是存在两个圆之间没有交点,则选取两圆心连线被两圆所截圆外部分线段的中点作为一个可用交点;第二种是两两圆之间均没有交点,说明本次测量结果出现了较大偏差,则采用上次计算出的位置作为本次数据对应的结果,以避免过多错误数据同时出现导致最终定位点过大波动,不符合实际物理规律。

定位结果越出定位区域的情况,系统采用定位区域边缘离越出点最近的位置替代定位结果,从而保证了定位结果在定位区域以内,符合定位实际。

6 定位实验及分析

为了验证系统的实际定位性能,选择在实地小型停车场进行实地移动定位实验。

如图 9 所示的定位上位机界面,分别在坐标 $(0, 0)$ 、 $(3300, 0)$ 、 $(3300, 2000)$ 处放置锚节点 2、锚节点 3、锚节点 1。移动节点以身高为 175 cm 的实验人员用手托举着节点以大约 1.70 m/s 的速度(相当于小型地下停车场车辆移动的速度)沿着如图 10 的真实轨迹逆时针移动,共记录了 101 次定位结果。移动轨迹外侧为长 5.00 m 宽 2.50 m 的停车位,有车辆停放不方便移动,因此沿着停车场中部车道两侧移动。整个跟踪过程耗时大约 51 s,由秒表计时,用 Excel 绘制出如图 10 的定位轨迹。

如图 10 所示,移动定位结果均在真实轨迹 100 cm 以内,整体变动方向与真实轨迹相符,系统具备跟踪能力。

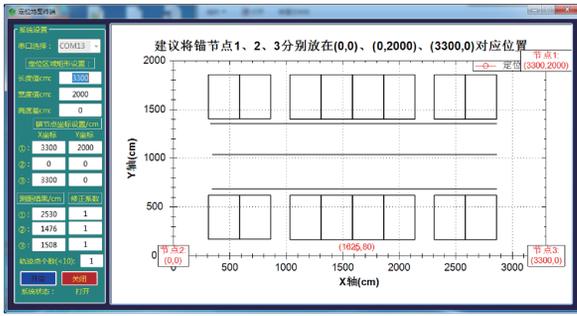


图 9 上位机软件界面

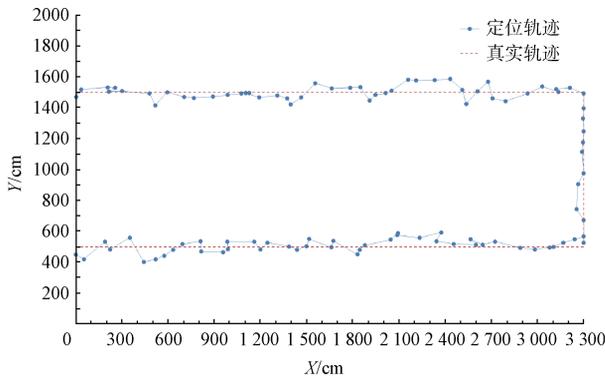


图 10 步行定位实验结果

通过统计计算,定位点误差绝对值的平均值为 34 cm,误差标准差为 42 cm,系统步行定位精度达到亚米级。

7 结 论

本文设计并实现了基于 POA 的室内定位系统,可用于诸如停车场等室内空间目标二维定位。文章在嵌入式底层上通过可变限幅均值滤波算法有效减弱了测距结果波动,保证 POA 测距亚米级精度。为实现多点测距在嵌入式底层设计实现了地址轮询测距机制能够使移动节点具备与各个锚节点的依次测距的能力,在上位机软件设计了能适应 POA 测距环境的基于加权最小均方误差的质心定位算法实现了高精度定位,在小型室内停车场的定位实验验证了系统具备亚米级的实时移动定位精度。

参考文献

- [1] 龚凌翔,叶芝慧,冯奇,等. 基于 STM32 的北斗/RFID 组合定位系统设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(4): 76-82.
- [2] 彭宇,王丹. 无线传感器网络定位技术综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(5): 389-399.
- [3] CHEN Q, LIU H, YU M, et al. RSSI ranging model and 3D indoor positioning with ZigBee network[C]. Myrtle Beach of South Carolina: Position Location and Navigation Symposium (PLANS) IEEE/ION,

2012: 1233-1239.

- [4] 陶金龙,康志伟,骆坚. 基于 RSSI 测距的加权概率定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1123-1129.
- [5] 常华伟,王福豹,严国强,等. 无线传感器网络的 TOF 测距方法研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(1): 35-38.
- [6] SIESKUL B T, ZHENG F, KAISER T. Time-of-arrival estimation in path attenuation[C]. SPAWC '09, IEEE 10th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2009: 573-577.
- [7] 杨帆,赵冬冬. 基于 ANDROID 平台的 WIFI 定位[J]. 电子测量技术, 2012, 35(9): 116-124.
- [8] 郑学伟. 基于权值参数的 WIFI 定位算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3): 35-37, 50.
- [9] 刘洛辛,孙建利. 基于能效的 WLAN 室内定位系统模型设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1169-1178.
- [10] 曾光. 室内精确定位算法研究[D]. 上海:华东理工大学, 2014: 2-16.
- [11] 柯彬. 巷道内人员高精度定位技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2014: 11-15.
- [12] 吕文祥,张金柱,杨跃,等. 可变限幅滤波方法的参数分析与改进[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2012, 52(8): 1106-1111, 1095.
- [13] 杨伟杰. 基于 ZedGraph 的在线动态数据图表绘制[J]. 软件导刊, 2014, 13(1): 128-130.
- [14] 龙易,黄际彦,杜江. 基于最小均方误差估计的 RFID 室内定位算法[J]. 南京邮电大学学报:自然科学版, 2013, 33(6): 69-75.
- [15] 蔺莉,汤震. 基于最小均方误差选择参考节点的 RSS 测距定位算法[J]. 激光杂志, 2015, 36(4): 174-178.
- [16] 陆霞. WIFI 定位技术——基于质心定位的三边定位算法的研究[J]. 电脑知识与技术, 2013, 9(25): 5765-5767.

作者简介

姚飞,1991 年出生,华中师范大学硕士研究生。主要研究方向为无线室内定位及应用软件开发。

E-mail: yaofei@mails.ccnu.edu.cn

陶偲,1991 年出生,华中师范大学硕士研究生,主要研究方向为无线室内定位。

E-mail: 1157183572@qq.com

刘守印,1964 年出生,华中师范大学教授、博士,主要研究领域为无线通信,物联网。

E-mail: sylu@phy.ccnu.edu.cn