

# 基于 CSS 技术的室内导航系统设计与实现<sup>\*</sup>

王智文 杨 楨 陈旻哲 刘守印

(华中师范大学 物理科学与技术学院 武汉 430079)

**摘要:** 设计并实现了一种基于 Chirp 信号往返飞行时间(round time of flight, RTOF)的室内导航系统,用于在复杂建筑物内部多个目标点的定位及跟踪。系统采用时分算法允许多标签同时定位,移动标签与锚节点之间实现双向测距(symmetrical double-sided two-way ranging, SDS-TWR)算法,移动标签并把测距结果传送给定位基站,定位基站再将结果透传到计算中心处理。计算中心利用改进的卡尔曼滤波算法减弱 NLOS 误差影响,采用加权修正三点定位算法计算出移动标签位置信息,并存储定位结果于定位服务器。客户端可访问定位服务器查看所需要标签的定位结果。实验结果表明,在特定复杂楼层内,系统定位精度能达到 2 m,满足室内导航精度需求。本系统实现了定位刷新时间与标签个数的最优化,也具有较好的规模伸缩度以及易部署性。

**关键词:** 室内定位;SDS-TWR;NLOS 误差;卡尔曼滤波算法;TDMA

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Indoor navigation system design and implementation based on CSS technology

Wang Zhiwen Yang Zhen Chen Minzhe Liu Shouyin

(Institute of Physics Science and Technology, Center China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** An indoor navigation system based on the RTOF (round time of flight) of Chirp signal is designed and implemented, which is used to locate and track multiple targets in a complex building interior. Time division multiplexing method to allow more tag positioning simultaneously, SDS-TWR (symmetrical double-sided two-way ranging) algorithm is realized between mobile tag and anchor node, then tag sends the result to the positioning base station, and through to the computing center. Computing center uses the improved kalman filtering algorithm to reduce the NLOS error and the weighted correction three points localization algorithm to calculate the mobile tag location information, which is stored in the location server finally. The client is able to access to the server to check the result of appointed tag. The experiments show that, within certain complex floor structures, the precision can reach 2 m, meet the demand if indoor navigation accuracy. The system has also realized refresh time optimization with tag number, with flexible and deployable.

**Keywords:** indoor location; SDS-TWR; NLOS error; Kalman filtering algorithm; TDMA

## 1 引言

全球卫星定位系统(global positioning system, GPS)比较成功地解决了室外定位问题,使得互联网时代个性化服务成为现实,为人们的生活带来了巨大便利。而在室内环境及高精度定位需求下,如煤矿井下人员定位<sup>[1]</sup>、室内导航、物流跟踪等服务需求,由于 GPS 定位在室内无法实现,使得室内定位系统的研究在近几年成为高校、研究机构和企业的研究热点。

基于无线传感器网络的定位主要有基于测距(range-based)的方法和无需测距(range-free)的方法两种。无需测距的定位系统实现较简单,但一般定位精度差;而基于测距的定位系统目前主要采用基于接收信号强度(received signal strength indication, RSSI)<sup>[2]</sup>、到达时间(time of arrival, TOA)<sup>[3]</sup>、到达时间差(time difference of arrival, TDOA)<sup>[4-6]</sup>、到达角度(angle of arrival, AOA)<sup>[7]</sup>的测距技术。RSSI 测距是根据理论和经验模型将电磁波传播损耗转化为距离测量;TOA 是利用无线信号在两个节点间的传

收稿日期:2015-11

<sup>\*</sup> 基金项目:华中师范大学自主科研基金项目“室内无线测距与定位方法研究”(230/20205140085)资助项目

播延时来计算物理距离;TDOA 和 AOA 分别利用多个信号到达目标节点的时间差和角度来计算距离。

基于 TOA 的测距方法,从理论上说,无线信号频域越宽,则时域越窄,测距精度越高,所以增大信号的带宽就能获得足够的分辨率,故而超宽带(ultra-wideband, UWB)技术被用来实现高精度定位系统。但 UWB 系统实现困难、价格昂贵,并且更大的带宽意味着会造成更大的通信干扰,所以本文选取 CSS(chirp spread spectrum)技术来实现定位系统。CSS 系统可以看成是 UWB 系统性能的折中版本,虽然 CSS 系统比 UWB 有略低的定位精度,而性价比却大大提高。

CSS 技术为线性扫频扩频技术,分析 Chirp 信号时域、频域及其脉冲压缩特性可知,它具有很强的多径分辨、抗噪声等能力。目前,CSS 已被 IEEE 802.15.4a 列为物理层的可选标准之一,并且 Chirp 超宽带信号广泛应用于精确测距、车载雷达和扩频通信。由于 Chirp 信号具有高达几十纳秒级别的时间分辨率,故而结合 TOA 的测距算法在理论上可获得米级别的定位精度。文献[8]指出,基于 TOA 的距离测量误差的来源主要分两种:测量噪声(一般假设为具有较小标准差的零均值高斯变量,在视距传输定位中,这是主要误差来源)和非视距误差(信号传播过程中的发射和衍射等导致)。

利用 Chirp 宽带定位技术实现的定位系统在复杂工程环境中仍然可以获得 1~3 m 定位精度,比较典型的是 Nanotron 公司 Find 平台核心组成部分 nanoPAL 系统<sup>[9]</sup>。在 nanoPAL 系统中,通过测量宽带窄脉冲信号的 TDOA 来计算标签的 1D/2D 位置,整个系统基于以太网实现高吞吐 TDOA 数据传输,每台基站都需要连接到以太网。

在综合考虑节点定位精度、硬件及算法实现复杂度、性价比及可扩展性等指标的基础上,本设计在远距离处以 CSS 技术主,通过 SDS-TWR 测距算法实现测距;在近距离处利用 CSS 辅助 RSSI 值修正路径的权值实现测距。最后利用加权矫正三点定位算法实现多目标点跟踪室内定位系统。并且引入改进的卡尔曼滤波算法减少测距数据抖动,增强系统定位精度。最后搭建实际的导航系统,测试多目标点定位和跟踪的性能。

## 2 多目标点跟踪室内定位系统结构

nanoPAL 系统中,核心解算部分基于 TDOA 双曲线算法,算法复杂度高;系统基于以太网实现高吞吐 TDOA 数据传输,因而每台基站都需要连接到以太网,系统部署麻烦;并且由于是单边测距(a way ranging, AWR),无法应用能有效消除采样频率偏移的 SDS-TWR 测距算法<sup>[10]</sup>。因此,本设计综合考虑该系统优缺点,设计并实现了适合自身实际需求的一种定位方法。

### 2.1 系统架构

本设计实现的多目标点跟踪室内定位系统是基于 CSS

技术实现定位的,其系统框架如图 1 所示。系统由定位服务器、位置计算中心、定位基站、定位锚节点与移动标签等部分组成,实物图如图 2 所示。在二维平面搭建好定位锚节点及定位基站之后,则可实现多个移动标签同时在平面内的实时定位。定位基站根据存在的标签数目将时隙分割,并把每一固定时隙(时隙长短与定位锚节点数目有关)分配给移动标签,周期性发送定位请求数据包给移动标签。标签在指定的时隙中去扫描当前环境中存在的定位锚节点,主动发起测距请求,完成 SDS-TWR 测距算法并返回测距结果给定位基站,继而定位基站将测距结果通过串口发送到位置计算中心。位置计算中心收集全部的距离数据,实现数据处理算法及定位算法,计算出标签位置信息后发送 TCP 数据包(含位置信息)给定位服务器;应用客户端可访问位置计算中心查看所需要标签的定位结果。

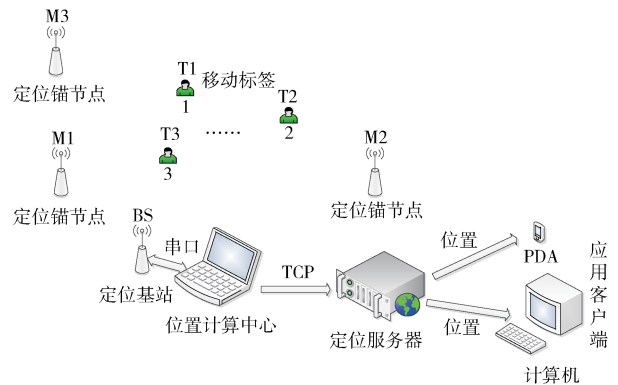


图 1 基于标签同步的 TDMA 定位系统架构

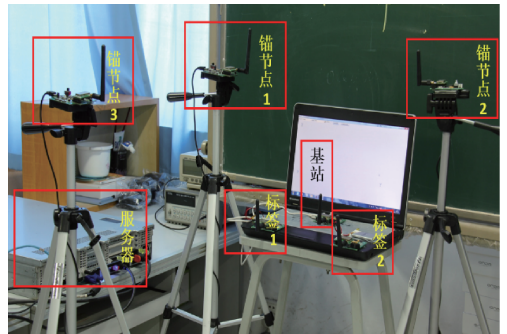


图 2 多目标点跟踪室内定位系统实物

多标签跟踪室内定位系统,即需要考虑定位系统可允许尽量多的移动标签同时实时定位,则是要避免多标签与多基站之间通信干扰问题,本文充分比较目前传感器网络中存在的 4 种冲突避免方式 CSMA/CA、CDM、FDM、TDM 的可行性,最终设计了基于标签同步的 TDM 系统架构。该架构可允许尽量多的移动标签实时定位,使定位刷新时间与标签个数最优化。TDM 系统架构在时间上的划分如图 3 所示,定位基站控制移动标签之间的同步,继而移动标签在分配到时隙依次扫描存在的锚节点,完成测距的过程。

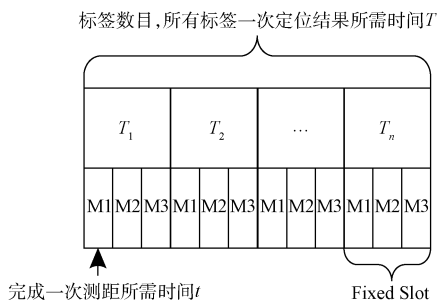


图 3 标签同步的 TDMA 系统架构时间划分

由上分析可知,基于移动标签同步的 TDM 系统架构由定位基站控制,可以实现精确的时间同步,从而很好地避

免标签间射频冲突。并且由于定位锚节点的个数在一个确定的系统中是固定的,故一个标签定位一次所需的时间是固定的,这样的架构设计可以保证系统最大容量的允许移动标签个数,即定位刷新时间与标签数目的最优化。另外,由于系统的运行完全由定位基站控制,即定位基站可标识对应的定位子系统,所以多个平面的定位系统扩展也可以很容易实现,即设计的基于标签同步的 TDM 的系统架构可扩展性好。

2.2 硬件设计

本设计的硬件部分主要为 ATmega1284p 单片机控制 Nanotron 公司生产的 nanoPAN5375 射频模块,其结构框图如图 4 所示。

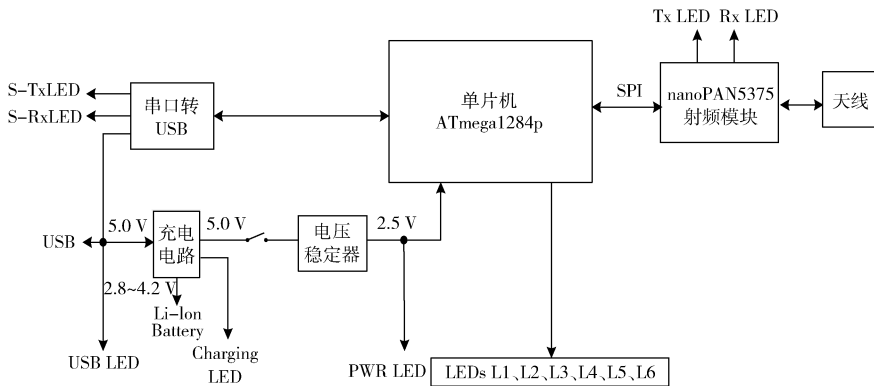


图 4 硬件结构框图

电源部分含有充电模块与稳压模块,可选 micro USB 供电或者锂电池供电,并且当用 micro USB 供电时可以实现对锂电池的充电,稳压模块的设计是为了使得 MCU 及射频模块供电电压恒定为 2.5 V; ATmega1284p 作为主控芯片,通过 SPI 控制 nanoPAN5375 射频模块收发无线数据,通过串口与 PC 机通信。此外,硬件设计上还包含按键和 LED 灯,便于代码的调试及指示节点的运行状态,考虑到移动标签低功耗硬件实现,对于按键和 LED 灯的控制可用跳冒选择是否接入电路。其移动标签硬件实物图如图 5 所示。

2.3 软件设计

本设计系统由定位服务器、位置计算中心、定位基站、定位锚节点与移动标签组成,相对应的软件分为 3 个部分:服务器软件,上位机软件及嵌入式软件。服务器软件实现协议解析、导航算法;上位机软件实现原始数据获取、位置解算与坐标输出;嵌入式软件主要为基于 nanoLOC 协议栈实现 TDMA 算法、SDS-TWR 测距算法等。

2.3.1 嵌入式软件

定位基站采用分时的方式控制存在的移动标签完成测距过程,实现标签之间严格的时间同步;待定位的移动标签在指定的时隙依次去扫描位置固定的定位锚节点,完成双边双向测距 (symmetrical double-sided two-way ranging, SDS-TWR) 测距算法并返回测距结果给定位基站,继而定位基站将结果透传到位置计算中心。定位基站在整个系统中起着主导作用,主要完成串口信号与射频信号的转换,接收串口协议帧,解析协议,发送定位请求数据帧到特定标签,指示该时隙哪个标签处于定位状态。接收测距结果数据帧,直接透传到位置计算中心。整个过程的流程图简要描述如图 6 所示。

待定位的移动标签依次与定位锚节点完成测距,本设计采用 SDS-TWR 测距算法实现测距。SDS-TWR 算法进



图 5 移动标签实物

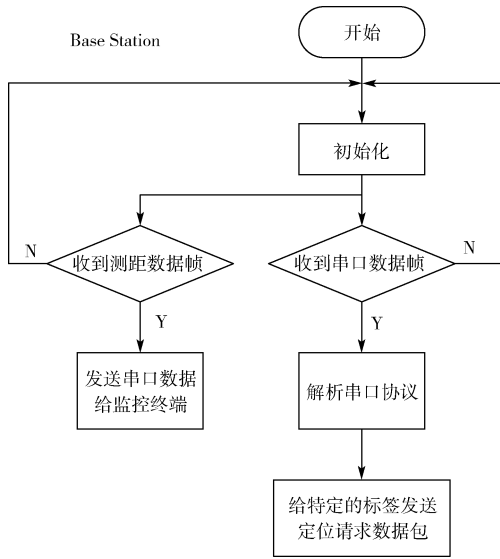


图6 定位基站工作流程

行测距可以去掉采样频率偏移(sampling frequency offset, SFO)。单向测距(a way ranging, AWR)中,飞行时间与测距误差分别为:

$$t_p = \frac{1}{2} (t_{\text{roundA}} - t_{\text{replyB}}) \quad (1)$$

$$e_{\text{AWR}} = t_p \epsilon_A + \frac{1}{2} \epsilon_A T_{\text{replyB}} (1 + \epsilon_B) \quad (2)$$

式中:  $\epsilon_A = \frac{-\beta_A}{1 + \beta_A}$ ,  $\epsilon_B = \frac{-\beta_B}{1 + \beta_B}$ ,  $\beta_A$  与  $\beta_B$  为两节点频率偏移,在该项中第1项为载波频率偏移带来的误差,第2项为SFO带来的误差;对于SDS-TWR算法,飞行时间与测距误差分别为:

$$t_p = \frac{1}{4} (t_{\text{roundA}} - t_{\text{replyB}} + t_{\text{roundB}} - t_{\text{replyA}}) \quad (3)$$

$$e_{\text{SDS-TWR}} \approx \frac{1}{2} t_p (\epsilon_A + \epsilon_B) \quad (4)$$

由式(2)与式(4)对比分析可知,SDS-TWR算法可以很好的解决由SFO导致的测距误差,从而提高测距精度。

图7标识了标签与锚节点之间的测距过程。测距过程由标签主动发起,该测距过程包括了两次对称测量和一次测距数据包传送。标签节点初始化进入低功耗休眠模式,当收到定位基站的定位请求数据包后,唤醒,以轮询的方式向位置固定的锚节点发送测距请求数据包,锚节点收到标签的测距请求数据包时会向其自动回复ACK信号,并且根据收到的测距请求数据包中包含的信息执行相应的程序和修改自身测距状态。在第1次测距过程中,标签节点根据发送测距请求数据包的时刻和接收ACK信号的时刻计算出第1次测距过程的传播延时  $T_1$ ,锚节点根据接收数据包的时刻和自动回复ACK信号的时刻计算出第1次测距过程的处理延时  $T_2$ 。紧接着锚节点会发送第

次测距请求数据包(包含  $T_2$  的信息)给标签节点,同样的,标签节点自动回复ACK信号给锚节点。第2次测距过程中,锚节点根据发送测距数据包的时刻和接收ACK信号的时刻计算出第2次测距的传播延时  $T_3$ ,标签节点根据接收锚节点数据包的时刻和自动回复ACK信号的时刻计算出第2次测距的处理延时  $T_4$ 。最后,锚节点会发送包含  $T_3$  的数据包给标签节点,标签节点收到4个时间之后,根据式(5)计算出节点距离,原始测距的值经过距离修正公式之后,将测距结果返回定位基站。

$$S = V \times t = V \times \frac{T_1 - T_2 + T_3 - T_4}{4} \quad (5)$$

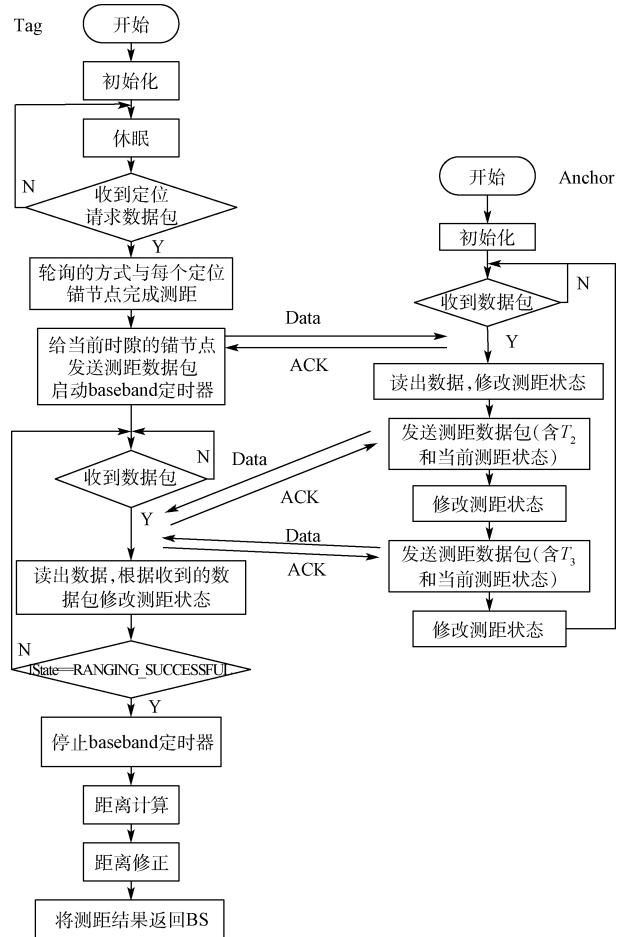


图7 标签与锚节点工作流程

### 2.3.2 上位机软件

上位机软件流程图如图8所示,定位基站获得测距结果后,通过串口将测距结果透传到上位机,上位机主要实现4个线程:定时器线程,定时轮询发送特定定位数据请求包;接收串口数据线程,解析协议,通知数据处理线程;数据处理线程则包含改进卡尔曼滤波算法实现、加权矫正三点定位算法,得到定位结果,继而将定位结果通过TCP数据包发送给服务器,最后通知图形刷新线程;图形刷新线程将定位结果以图形的方式实时显示在上位机。

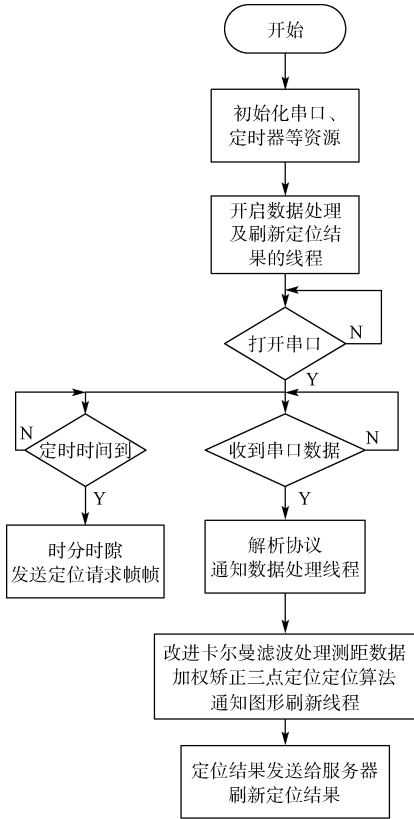


图 8 上位机工作流程

2.3.3 服务器软件

选取 Apache-2.2.3 和 PHP5.0 搭建 Web 服务器,如图 9 所示,服务器通过 TCP 接收并解析定位数据,并采用 JQuery 实时刷新定位信息和导航路线。

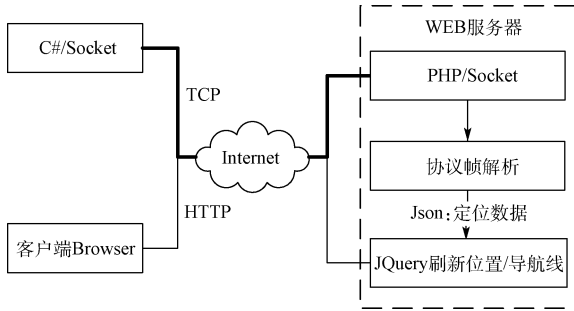


图 9 服务器端交互示意

Web 服务器通过 PHP 与上位机建立 Socket 连接,接收基站上传的定位结果,完成协议解析并将定位数据采用 Json 标准格式化。继而,前端 HTML 页面中使用 JQuery 中的 Ajax 接收 Json 数据,根据预设的锚节点坐标与标签相对定位结果,完成标签位置和导航路线的刷新。最后,用户可以通过浏览器提出 HTTP 请求得到相关位置信息,即实现室内导航服务。

3 减弱 NLOS 误差对定位影响

NLOS 误差是室内无线定位误差的主要来源,它使时间测量值发生正向偏差,从而导致定位结果产生较大误差。通过大量测距实验分析特定室内环境下 NLOS 误差特点,引入一种改进的卡尔曼滤波器 NLOS 误差消除算法,消除时间测量值偏差。通过定位实验分析特定环境下信道特性,引入加权修正定位算法,减少 NLOS 误差对定位结果的影响,从而增强系统定位精度。

3.1 NLOS 误差

用  $r_m(t_i)$  表示在  $t_i$  时刻从移动标签到定位锚节点  $m$  的距离测量值,它等于真实距离  $L_m(t_i)$  与标准测量误差  $n_m(t_i)$  和 NLOS 误差  $NLOS(t_i)$  之和,如式(6)所示。

$$r_m(t_i) = L_m(t_i) + n_m(t_i) + NLOS_m(t_i) \quad (6)$$

式中:  $n_m(t_i)$  为零均值高斯变量,  $NLOS(t_i)$  为正随机变量。从该式中可以看出, NLOS 误差的特性与电波传播路径上障碍物的分布有关,带有随机性;由于 NLOS 误差是信号在传播途中遇障碍物发射发生延迟所致,所以 TOF 中的 NLOS 误差总是偏正。TOF 测量值可以看作是真实距离与标准误差及 NLOS 误差之和,由于这两种误差的产生原因不同,因此是相互独立。

3.2 改进的基于卡尔曼滤波器的 NLOS 误差消除算法

卡尔曼滤波器基本思想就在于用两个方程分别表示未知状态的转移过程和测量系统输入与输出的关系,从而把某个时刻的状态值与当前以及以前时刻的测量值关联起来。因此,卡尔曼滤波问题的实质是以某种最优方式联合求解未知状态方程和测量方程的问题。状态方程和测量方程如式(7)、(8)所示。

$$s(k+1) = \mathbf{A}s(k) + w(k) \quad (7)$$

$$z(k) = \mathbf{G}s(k) + v(k) \quad (8)$$

式中:  $s(k)$  和  $z(k)$  分别是  $k$  时刻的状态变量和测量向量,  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{G}$  分别是状态转移矩阵和测量矩阵,  $w(k)$  和  $v(k)$  分别是  $k$  时刻的过程噪声和测量误差。

卡尔曼滤波器的迭代过程如式(9)~(14)所示。

$$\tilde{s}_k = \mathbf{A}\hat{s}_{k-1} \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{P}}_k = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{P}}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (10)$$

$$e_k = z_k - \mathbf{G}\tilde{s}_k \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_k = \tilde{\mathbf{P}}_k\mathbf{G}_k^T(\mathbf{G}_k\tilde{\mathbf{P}}_k\mathbf{G}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (12)$$

$$\hat{s}_k = \tilde{s}_k + \mathbf{K}_k e_k \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{G}_k)\tilde{\mathbf{P}}_k \quad (14)$$

式中:  $\tilde{s}_k$  和  $\hat{s}_k$  分别代表  $k$  时刻状态变量的预测值和估计值,  $\tilde{\mathbf{P}}_k$  和  $\hat{\mathbf{P}}_k$  分别是  $k$  时刻预测和估计的误差协方差矩阵,  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  分别是  $w(k)$  和  $v(k)$  的协方差矩阵,  $\mathbf{K}_k$  是  $k$  时刻的卡尔曼增益。由上述公式可以看出,卡尔曼滤波器的解释递归计算的,其状态的每一次更新估计都是由前一个估计和新的输入数据计算得到,因此只需存储前一次估计,并

可实现实时处理。

用卡尔曼滤波器进行估计的常规算法中,受 NLOS 污染严重而偏差较大的测量值将会使当前状态估计值发生较大偏差,而由于卡尔曼滤波器的记忆性,使后续的状态估计值都受到严重影响,所以对于这样极不准确的测量值,应当将其舍弃,并且用状态预测值代替状态最优估计值,如式(15)所示。另一方面,大量实验验证测量值相对真实值存在一个正向偏差,所以把状态估计值往下偏移在一定程度上消除 NLOS 误差对状态估计值的影响,如式(16)所示。

$$K_k = \begin{cases} 0, & e_k > threshold \\ \tilde{\mathbf{P}}_k \mathbf{G}_k^T (\mathbf{G}_k \tilde{\mathbf{P}}_k \mathbf{G}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}, & otherwise \end{cases} \quad (15)$$

$$K'_k = \begin{cases} K_k/a, & e_k \geq 0 \\ K_k \times a, & e_k < 0 \end{cases} \quad (16)$$

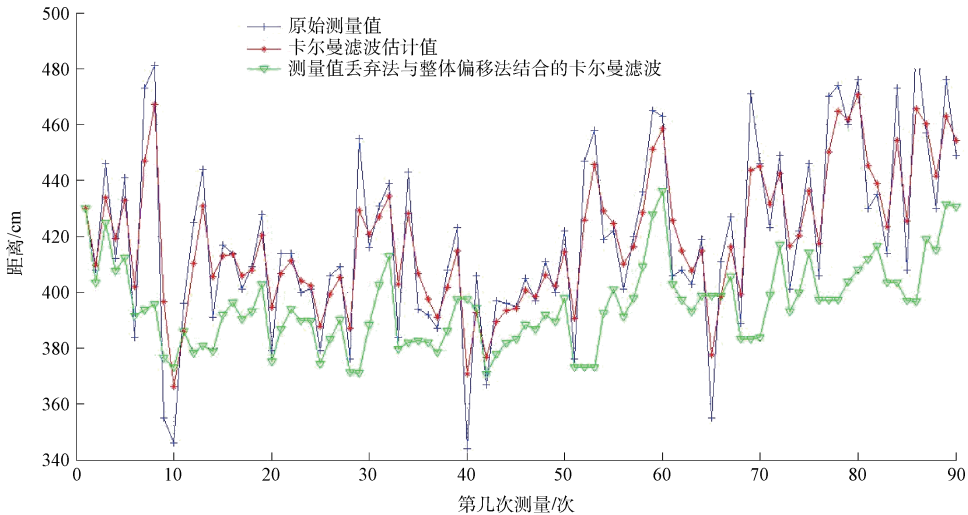


图 10 4 m 处原始测量值、卡尔曼算法及改进的卡尔曼算法仿真结果

### 3.3 加权矫正三点定位算法

考虑到 CSS 技术远端精度高、近端精度低的特点,故而在实现三点定位算法<sup>[1]</sup>时,路径相应的权值随距离测量值增大而加重;同时,结合采集当前时刻的 RSSI 强度,判断相应路径 RSSI 值是否异常而适当调整该条路径的权值。本文通过上述两种方式合理调整定位的 3 条路径的权值,从而整体提高定位精度。

## 4 实验过程及性能分析

### 4.1 测距性能分析

在华中师范大学 9 号教学楼 2 楼,设置移动标签与定为锚节点等高(距地面 1.5 m),实物图如图 11 所示,每隔 3 m 设置一测试点,测试范围 1~49 m,得到实际距离、距离测量值与距离修正值之间的关系曲线,如图 12 所示。可以发现,移动标签和定位锚节点距离近时测距精度不高,距离测量值抖动很大。引入改进卡尔曼滤波算法可以有

由式(15)、(16)可知,门限值及卡尔曼增益修改因子的选取很重要。如果门限值设置过高不能有效消除 NLOS 误差对状态估计值的影响。反之,门限值设置过低,一方面会导致舍去过多测量值,导致估计值将不再随测量值变化,即造成卡尔曼滤波器的不收敛;另一方面限制标签移动的速率。通过大量实验合理设置门限值及倍频因子  $a$  可以最大化消除特定环境下的 NLOS 误差。采用改进的卡尔曼滤波算法,对 4 m 处 CSS 测距值(抖动大)MATLAB 仿真结果如图 10 所示,利用卡尔曼滤波算法可以减少原始测距数据抖动,而本文提出的改进卡尔曼滤波算法根据选定的室内环境可进一步提高测距精度。



图 11 测距实物

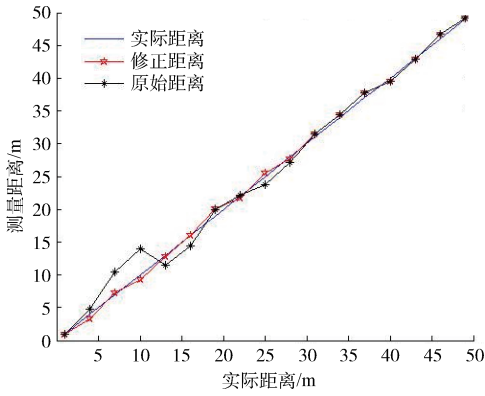


图 12 测距结果分析

效的减少抖动。距离远时测距精度高(3条曲线几乎重合)。利用 MATLAB 线性拟合处理原始数据建立的距离修正模型能有效减少测量误差,经过修正,在特定室内环境最大测距误差为 2.077 m,线性拟合的计算简单且能有效提高测距精度。

4.2 定位性能分析

图 13 为华中师范大学九号教学楼二楼平面结构示意图,如图搭建的锚节点与定位基站,锚节点坐标分别为  $M1(0,0)$ 、 $M2(105,0)$  和  $M3(0,50)$ ,定位基站放置在  $M1$  附近,可实时跟踪在 2 楼平面内的两个移动标签。实验中选取了 6 个观测位置,对每个位置进行 10 次测量,对 10 次测量数据的计算结果取平均记为最终定位结果,得到的数

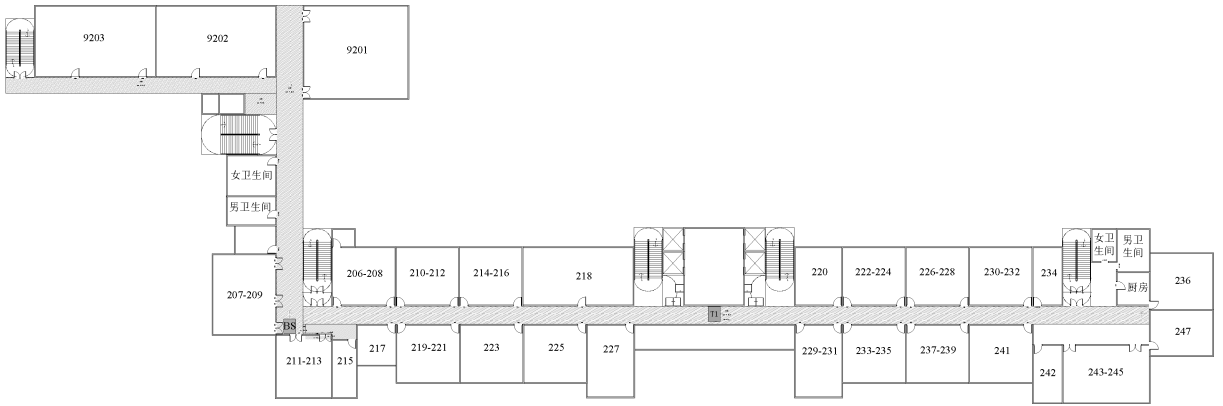


图 13 华中师范大学 9 号楼 2 楼平面结构示意图

据如表 1 所示。可以看出,本设计实现的系统易于部署,可同时定位且跟踪多个移动标签,系统定位精度在 2 m 以内,满足房间导航需求。

表 1 定位结果分析

实际位置	定位位置	定位误差/m
(102,0)	(104,0)	2
(52,0)	(52.9,0)	0.9
(3,0)	(2.2,0)	0.8
(0,3)	(0,3.3)	0.3
(0,25)	(0,25.7)	0.7
(0,47)	(0,48.5)	1.5

5 结 论

本文设计并实现了基于 CSS 信号 RTOF 的室内导航系统,用于在复杂建筑物内部多个目标点的定位及跟踪,实现对房间的导航。本文实现 SDS-TWR 测距算法去除采样频率偏移,采用 MATLAB 线性拟合处理原始测距数据,

提高测距精度;合理设计系统结构实现 TDMA 算法允许多目标点跟踪,避免无线信号的冲突问题,提高定位系统稳定性;加入改进卡尔曼滤波算法和加权矫正定位算法消除室内环境下 NLOS 误差。在华中师范大学 9 号楼 2 楼搭建实际导航系统,系统稳定性高,定位精度可达 2 m。从实验结果看,考虑 NLOS 误差的影响,利用 CSS 技术实现的多标签跟踪室内定位系统具有实际的应用价值。

系统可通过改进定位算法及几种定位方法相结合等方式提高定位精度,本研究后续将在这些方面进行进一步的探索。

参考文献

[1] 陈奎. 井下移动目标精确定位理论与技术的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.

[2] CHEN Q, LIU H, YU M, et al. RSSI ranging model and 3D indoor positioning with ZigBee network[C]. Proceedings of IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012: 1233-1239.

[3] 毛永毅, 李明远, 张宝军. 一种 NLOS 环境下的 TOA/AOA 定位算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 37-40.

- [4] 史小红. 基于 TDOA 的无线定位方法及其性能分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(2): 252-257.
- [5] 刘影, 钱志鸿, 王雪, 等. 基于到达时间差的无线传感器网络质心定位算法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010(1): 245-249.
- [6] 韩霜, 罗海勇, 陈颖, 等. 基于 TDOA 的超声波室内定位系统的设计与实现[J]. 传感技术学报, 2010, 23(3): 347-353.
- [7] 邓平, 李莉. 一种 TDOA/AOA 混合定位算法及其性能分析[J]. 电波科学学报, 2002, 17(6): 633-636.
- [8] 焦磊, 邢建平, 张军, 等. 一种非视距环境下具有鲁棒特性 TOA 无线传感网络定位算法[J]. 传感技术学报, 2007, 20(7): 1625-1629.
- [9] 基于 Chirp 技术的高精度定位系统 OEM 方案—nanoPAL [EB/OL]. [2015-05-15]. [Http://www.Wellnode.Com/Cn/Category/200.Html](http://www.Wellnode.Com/Cn/Category/200.Html)
- [10] OH D, KWAK M, CHONG J W. Subspace-based propagation delay estimation robust to frequency offset for two-way ranging [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(2): 216-219.
- [11] 张亚杰, 段渭军, 王福豹, 等. 改进的距离重构三维定位算法[J]. 传感技术学报, 2014, 27(12): 1681-1686.

## 作者简介

**王智文**, 1991 年出生, 华中师范大学硕士研究生, 主要从事室内无线定位方面的研究。

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

**杨祯**, 1994 年出生, 华中师范大学硕士研究生, 主要从事物联网方面研究。

**陈旻哲**, 1994 年出生, 华中师范大学硕士研究生, 主要从事物联网方面研究。

**刘守印**, 1964 年出生, 华中师范大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信、传感器网络等。

(上接第 14 页)

- [7] LO C C, YANG Y L, TSAI C L, et al. Novel wireless impulsive power transmission to enhance the conversion efficiency for low input power[C]. International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission, 2011: 55-58.
- [8] 王钟. 宽带微波混沌振荡器的研究与设计[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [9] 王晓艳. 非线性混沌电路的分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [10] COLLADO A, GEORGIADIS A. Improving wireless power transmission efficiency using chaotic waveforms [C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2012.
- [11] SUSAN R J, PILLAI S S. Chaotic sequences for reduction of PAPR in OFDMA system[C]. India Conference, 2011.

## 作者简介

**魏巍**, 硕士研究生, 研究方向为数字信号处理、计算机测控。

E-mail: verawei0620@163.com

**刘文波**, 博士, 教授, 研究方向为线性系统分析与处理、数字信号处理与计算机测控。

E-mail: Wenbolu@nuaa.edu.cn

**沈蹇**, 博士, 研究方向为计算机图形学、信号处理。

E-mail: 78198260@qq.com