

## 蓝牙手机室内定位系统

张浩,赵千川

(清华大学自动化系,北京 100084)

(zhanghao2003@tsinghua.org.cn)

**摘要:**设计并实现了一种基于蓝牙和 Wi-Fi 的低成本手机定位和信息发布平台。改进了已有蓝牙设备 RSSI 检测方案,能对多个手机同时定位;利用 Wi-Fi 和 J2ME 技术实现了手机对定位信息的接收和实时显示。实验结果表明系统具有定位准确、使用方便等特点,在目前硬件条件下为物联网应用提供了平台支持。

**关键词:**无线传感器网络;蓝牙;Wi-Fi;手机定位;J2ME;物联网

**中图分类号:** TP393.03 **文献标志码:** A

## Indoor positioning system for bluetooth cell phone

ZHANG Hao, ZHAO Qian-chuan

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This paper introduced a low-cost platform for locating bluetooth cell phones and releasing position information. The authors improved the scheme of measuring Received Signal Strength Indication (RSSI) of bluetooth devices to locate multiple cell phones simultaneously, developed cell phone program to receive position information via Wi-Fi and display it on map. The experimental results show that the system is accurate in positioning and easy to use, and it provides a platform support for applications of Internet of Things (IOT) under current hardware condition.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); bluetooth; Wi-Fi; cell phone locating; J2ME; Internet of Things (IOT)

### 0 引言

无线定位是物联网中的一项重要技术,基于位置的服务(Location Based Service, LBS)在物联网时代将拥有广阔的应用前景。手机在目前得到广泛使用的前提下,是实现 LBS 的一个便捷的平台,不仅成本较低,而且容易形成较大的产业规模。

目前室内定位主要有射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)、Zigbee<sup>[1]</sup>、超声波<sup>[2]</sup>、视频超宽带<sup>[3]</sup>(Ultra Wide Band, UWB)等技术,目前都无法应用在手机上。手机定位主要使用两类技术:GPS 和基于移动运营网基站的定位。其中 GPS 无法在室内环境下使用,而基于移动运营网基站的定位的精度太低。

蓝牙(Bluetooth)定位是一种基于接收的信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)的定位方式,和以上技术相比,蓝牙手机定位具有成本较低、使用方便等优点,虽然定位精度不高,但是在很多应用中都可以接受。

当前蓝牙硬件成本已下降到了比较合理的水平,在手机和计算机上使用非常广泛,蓝牙定位技术也开始发展。在已有蓝牙定位技术中,文献[4-5]中用嵌入式系统控制蓝牙模块的方式设计蓝牙节点,成本较高;文献[5]中还采用发送图片到手机的方式实现了简单的信息发布。文献[6]中采用蓝牙模块固件编程的技术,实现了针对单个目标的定位,在硬件设计上是比较成功的,但是使用时需要与被定位手机进行密码配对,影响了使用的方便性。

受文献[6]的启发,本文采用蓝牙模块固件编程的技术,通过重新设计蓝牙锚节点固件程序,改进了 RSSI 的检测方

法,仅用查询操作即可获得被定位手机的 RSSI,且支持多目标的定位。同时,通过加入 Wi-Fi 和局域网通信,弥补了蓝牙通信距离有限而且组网复杂等缺点,且使得整个系统可在线访问。最后,通过 J2ME 编写地图程序,使定位结果能实时地在被定位手机上显示。

系统的体系结构如图 1 所示。系统的功能是通过蓝牙的 RSSI 对手机进行定位,然后通过局域网和 Wi-Fi 把定位结果发布到手机上。具体流程是:通过布置在室内的蓝牙锚节点,测出手机的蓝牙信号在锚节点处的 RSSI。锚节点把这些 RSSI 数据发送到路由节点,路由节点再将这些数据通过 Wi-Fi 转发到局域网上。局域网的服务器对 RSSI 数据进行处理、运算,得到手机的位置数据,并发布到局域网上。手机通过 Wi-Fi 从局域网上获得位置数据,将定位结果以图形化的方式显示出来。

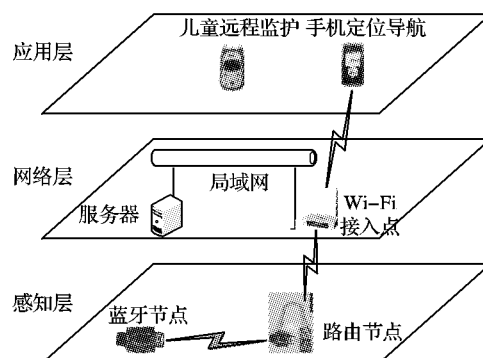


图1 系统体系结构

通过实验检验,结果表明本系统定位准确,布置简单,成

本较低,使用方便,用户无需额外购买设备即可使用定位服务,可远程访问,并且易于扩展,可用作 LBS 的平台,通过功能扩展,从而提供儿童远程监护、物流监控、大型建筑内人员导航和诱导,以及景区自助导游等服务。

## 1 系统组成

### 1.1 无线技术

蓝牙和 Wi-Fi 作为两种成熟的短距离通信技术,在计算机和手机上使用非常广泛,使无线传感器网络与现有的网络和设备可以更好地融合。蓝牙工作在 2.4 GHz 的 ISM 频段上, Wi-Fi 工作在 2.4 GHz 和 5 GHz 的 ISM 频段上。蓝牙和 Wi-Fi 虽然都工作在 2.4 GHz 的 ISM 频段,但是两者互相干扰并不明显,因为蓝牙与 Wi-Fi 被设计为支持彼此的共存。

之所以不用单纯的蓝牙组网,主要有以下几个原因:

1) 蓝牙通信速率有限,在大规模的网络中部分骨干节点的流量较大,会遇到通信速率瓶颈。局域网和 Wi-Fi 的通信速率都远大于蓝牙通信速率,完全能满足要求。

2) 大规模的 Ad-Hoc 网络的延时较大。Ad-Hoc 网络普遍采用多跳的方式来传送数据包。网络规模越大,跳数越多,延时越大,而且在数据流量大的时候,延时会更加严重。而局域网通信采用有线方式,延时较小。

3) 蓝牙通信距离太短,信号穿透能力较弱。在一般的室内环境下,无遮挡时,蓝牙通信距离只有 10 m 左右,而且信号无法穿透混凝土墙,导致蓝牙在建筑内的组网非常困难。而 Wi-Fi 传输距离长,无遮挡情况下室外传输距离为 300 m,室内传输距离为 100 m 左右;信号穿透能力强,至少可以穿透一面混凝土墙。

4) 蓝牙组网受到微微网(piconet)的限制。微微网中 1 个主设备只能连接 7 个从设备<sup>[7]</sup>, 1 个从设备只能连接 2 个主设备。

5) 蓝牙协议栈中没有定义散射网组网协议<sup>[8]</sup>。如果要用蓝牙组成的 Ad-Hoc 网络,只能自己编写组网协议。而局域网和 Wi-Fi 网络协议已经非常成熟,可以利用室内已有的这些基础网络设施组成骨干网络。而且 Wi-Fi 支持网间漫游,当手机在各个 Wi-Fi 接入点的覆盖范围之间漫游时,可以自动切换接入点。

但是目前用 Wi-Fi 开发的定位系统仅针对开源的 Android 手机,绝大多数的手机无法使用,而蓝牙定位可适用于所有蓝牙手机。另外 Wi-Fi 存在功耗大、成本较高等缺点,所以需要蓝牙和 Wi-Fi 两种技术优势互补,共同组成本定位系统。

### 1.2 网络结构

整个系统的网络结构如图 2 所示。系统的骨干网络使用局域网和 Wi-Fi,实现大流量数据通信;末端网络用蓝牙通信,功能是实现定位和手机接入。

### 1.3 设备组成

系统主要由 6 类设备组成,各类设备的功能如下。

1) 被定位手机。被定位的手机需打开蓝牙设备,并将蓝牙设置为可见。用户可以设置蓝牙的设备名称,最后能在定位界面上显示出来。

2) 蓝牙锚节点。主要功能是测出周围的蓝牙设备的

RSSI,并将结果发往蓝牙路由节点。

3) 蓝牙路由节点。功能是管理蓝牙自组织网络,实现蓝牙锚节点与局域网之间的数据交换。

4) 基础网络设施。包括局域网和无线路由器等设备,可以让任何连接了网络的设备都可以访问本定位系统,包括以有线或无线方式接入的计算机,以及用 Wi-Fi 接入网络的手机等。

5) 数据服务器。服务器通过网络接收蓝牙路由节点发来的数据包,计算后得出被定位手机的位置,然后通过网络发送到客户端。

6) 客户显示端。通过 Wi-Fi 接收服务器的定位结果,并将结果以图形的方式显示出来。

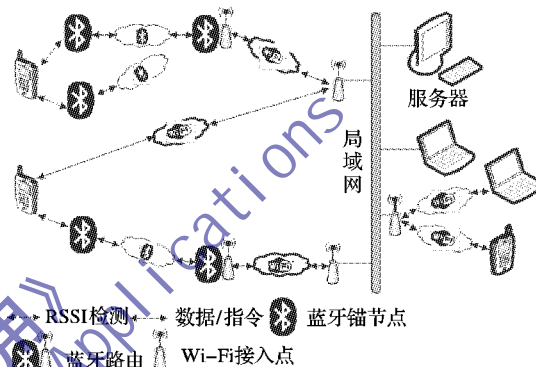


图 2 网络结构

## 2 定位原理和算法

### 2.1 定位原理

蓝牙定位系统是通过 RSSI 来估算目标与锚节点的距离,进而算出目标的位置。但是通过 RSSI 来估算目标与锚节点的距离是有较大的误差的,主要原因是:蓝牙的底层协议中会根据需要自动调节发射功率;室内环境中存在多径效应。

实测的蓝牙信号 RSSI 和距离的关系如图 3。当目标与锚节点的距离超过一定范围(3 m 左右)时,信号强度不再随距离单调下降。而实际情况中,受成本限制,锚节点的布置间距是 5 ~ 10 m,因此决定了本定位系统只能进行粗定位或者区域定位。在常见的室内定位应用中,区域定位的精度是可以接受的。

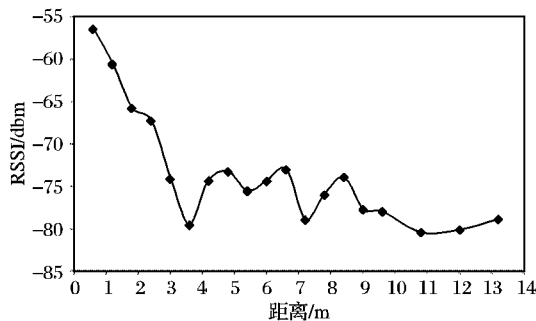


图 3 蓝牙 RSSI 与距离的关系

从图 4 中可以观察到蓝牙 RSSI 随时间变化较为剧烈。将影响 RSSI 随时间变化的因素视为噪声,为了减轻其影响,在服务器端的算法里对 RSSI 进行了滤波。

### 2.2 定位算法

本定位系统采用质心定位算法。计算时先过滤掉小于一

定阈值的 RSSI, 剩余的 RSSI 数据都是离目标最近的几个锚节点采集到的。然后对这几个锚节点的坐标进行加权平均, 算出目标的坐标, 算法如下:

$$X = \frac{\sum_{k=1}^n f(\hat{S}_k) X_k}{\sum_{k=1}^n f(\hat{S}_k)}$$

其中:  $X_k$  为第  $k$  个锚节点的坐标,  $X$  为目标的坐标,  $f(\hat{S}_k)$  是与第  $k$  个锚节点处 RSSI 有关的权重。实验中, 将整个地图划分为若干区域, 其中走廊或大房间分为每块长宽都不超过 5 m 的区域, 小房间为一块区域。由于蓝牙传输距离只有 10 m, 所以锚节点不能检测到距其超过 10 m 的目标的 RSSI。另外, 在室内定位时, 由于蓝牙信号穿透能力不强, 锚节点也不能检测到隔壁房间内目标的 RSSI, 这样, 锚节点就只能检测到与其在同一区域或者在相邻且连通的区域的目标, 从而保证了目标定位的准确性。

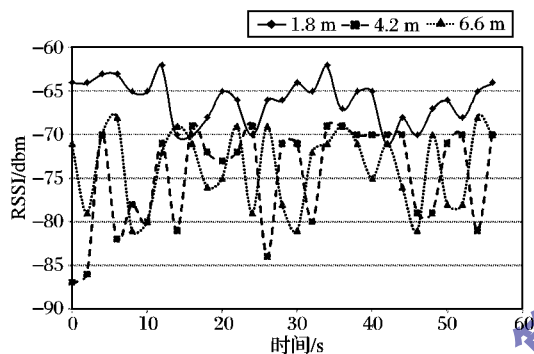


图4 蓝牙 RSSI 随时间变化情况

### 3 关键技术

#### 3.1 蓝牙节点设计

##### 3.1.1 硬件设计

在现有的蓝牙定位技术中, 蓝牙节点的硬件设计大致有两种方式:

第一种是主机控制蓝牙模块的方式。用蓝牙模块作为从设备, 通过主机控制接口 (Host Control Interface, HCI) 协议<sup>[8]</sup>在单片机<sup>[9]</sup>或嵌入式系统<sup>[4-5]</sup>等主设备的控制下运行。这种模式的优点是功能齐全, 缺点是成本较高、体积大、功耗较大。这类节点适合充当传感器网络的骨干节点或者基站。

第二种是蓝牙模块充当主机的方式。蓝牙节点采用对 CSR BC4 模块进行固件编程的方式<sup>[6]</sup>设计。CSR BC4 模块提供固件编程的接口, 固件里除了实现蓝牙协议栈以外, 还有一个虚拟机运行用户程序。该模块上有数字 IO、模拟 IO、PCM、UART、IIC 和 USB 等多种有线的 IO 接口。通过虚拟机控制模块上的各种有线 IO 接口和蓝牙通信, 完全可以满足传感器节点的要求, 甚至可以充当主设备, 在模块上外挂各种传感器组成更强大的节点。这种设计方式的优点是有效降低了蓝牙节点的成本、体积和功耗。这类节点适合充当传感器网络的普通节点。

蓝牙节点采用 CSR BC4 蓝牙模块充当主机的方式设计。根据节点功能的不同, 蓝牙节点分为锚节点和路由节点两种。

蓝牙锚节点仅由一个蓝牙模块组成, 在电池供电下即可工作。

蓝牙路由节点硬件采用 CSR BC4 蓝牙模块和 Wi-Fi 模块组成。蓝牙模块为主控制单元, Wi-Fi 模块作为扩展功能模块, 两个模块通过串口连接。其中蓝牙模块里面的程序功能是负责组织管理附近的蓝牙锚节点, 并将蓝牙网络和串口的数据进行转发。Wi-Fi 模块通过设置采用 UDP 透明传输模式, 可以将局域网通过 Wi-Fi 发来的 UDP 包解包后发送到串口, 也可将串口数据自动打包成 UDP 包通过 Wi-Fi 发送到局域网。需要注意的是, 将串口数据打包成 UDP 包时, 是 Wi-Fi 模块根据设定的自动组帧长度和周期, 从串口接收数据达到一定长度或者时间后, 强制将数据打成 UDP 包发出, 因此可能会使数据包被不完整分割, 导致数据包在接收端无法被识别而丢失。服务器程序中的数据接收模块对数据包进行重组, 解决了这个问题, 见 3.2 节。

##### 3.1.2 锚节点固件程序设计

固件程序编写通过 BlueLab 开发工具里的 xIDE 编写。已有的蓝牙定位系统在查询到手机蓝牙设备后进行密码配对和建立连接<sup>[6]</sup>, 获取被定位手机的 RSSI。但这种 RSSI 检测方法存在两个缺点: 1) 建立连接时, 需要人工输入密码进行配对。这样, 当用户在各个锚节点的测量范围之间漫游时, 由于需要随时断开连接和建立新的连接, 需要用户不断输入配对码, 这一过程费时而且影响用户体验。2) 当锚节点的测量范围内存在多个目标时, 该方法在同一时间只能检测到一个蓝牙设备的 RSSI。本系统改进了固件程序的编写, 仅通过查询操作即可获得被定位手机的 RSSI, 使锚节点无需和手机建立连接, 无需进行密码配对, 且支持多目标的定位, 因此克服了上述的缺点。在使用时, 用户只需打开手机的蓝牙设备, 并设置为可见状态, 即可被锚节点检测到。

在查询操作之前需要通过以下函数指定查询的模式为 RSSI 模式:

```
ConnectionWriteInquiryMode(&theApp -> task,
    inquiry_mode_rssi);
```

实现查询操作的函数为: ConnectionInquire (theAppTask, inquiry\_lap, max\_responses, timeout, class\_of\_device); 函数中可以设置本次查询中的最大响应次数、查询时间、需要响应的设备类型。查询完毕以后在 CL\_DM\_INQUIRE\_RESULT 消息中可以得到附近设备的蓝牙地址和对应的 RSSI 值。

通常每个蓝牙设备都有一个设备名, 用户可以自行设置, 方便识别和记忆。锚节点可以读取附近手机的设备名, 并将设备名与蓝牙地址的对应关系发送到服务器备案。读取手机的蓝牙设备名的函数为: ConnectionReadRemoteName (theAppTask, bd\_addr); 读取完毕以后在 CL\_DM\_REMOTE\_NAME\_COMPLETE 消息中可以得到与该蓝牙地址对应的设备名。

##### 3.1.3 路由节点固件程序设计

路由节点除了实现数据转发的功能外, 还可以管理与锚节点组成的网络。网络管理的功能通过状态机实现。路由节点在 Idle 状态得到服务器发来的连接网络的命令时, 进入 Linking 状态, 自动查询周围的锚节点。在查询到锚节点以后进入 Connecting 状态与之连接。连接成功完成以后该锚节点会将自己设置为查询不可见, 路由节点返回 Linking 状态, 继续查询和连接剩余的节点。当路由节点达到最大连接数或者查询不到锚节点时, 进入 Linked 状态。此时网络已经建立完



毕,可以在服务器的命令下开始定位。因为查询比较费时,查询和连接的过程需要 30 ~ 60 s,所以另外设计了一种 StandBy 状态,可以在断开连接时保存与路由节点相连接的锚节点的蓝牙地址,这样在得到服务器的连接命令时可以在 10 s 以内进入 Linked 状态开始工作。节点状态转换关系如图 5 所示。

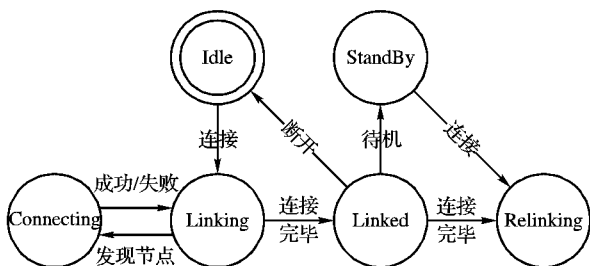


图5 路由节点状态机

### 3.2 服务器程序设计

服务器程序的开发环境是 Visual Studio 2008, 主要功能是汇集从各个锚节点发来的数据, 经过处理和计算之后, 发布到局域网上。数据处理流程如图 6。

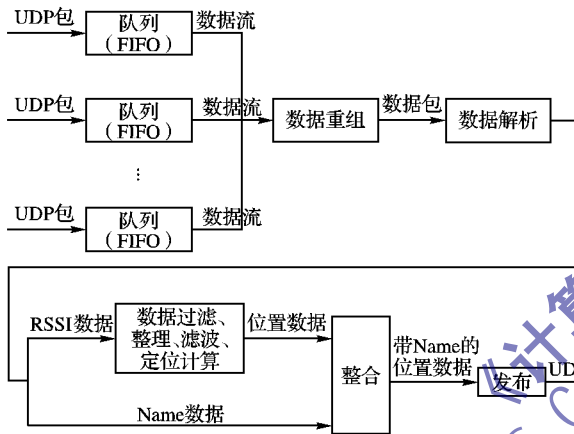


图 6 服务器数据处理流程

因为路由节点中的 Wi-Fi 模块可能会造成数据包的不完整分割,所以要对数据包进行重组。先利用多个先进先出 (First In First Out, FIFO) 的队列,使不完整的 UDP 数据包根据源 IP 地址的不同形成多个数据流。接着在数据流中识别包头和包的长度,将数据流分割成完整的数据包。生成完整的数据包以后,再对数据进行解析、分类,对其中的 RSSI 数据包进行过滤、整理、滤波。接着按照定位算法算出手机的位置,与 Name 数据进行整合以后得到带设备名的位置数据。最后将这些位置数据打包生成 UDP 包发布到局域网上。

### 3.3 手机客户端程序设计

手机上实现定位结果的信息发布,有短信息、GPRS、蓝牙和 Wi-Fi 等通信方式,其中蓝牙和 Wi-Fi 为近距离通信,延时较小,无需付费,更适合信息的实时发布。发布形式上有文字信息、静态图片、动态画面等。文献[5]中就采用了通过蓝牙发送图片到手机的方式实现了简单的信息发布。通信方式上,在对比蓝牙和 Wi-Fi 的优劣后,采用 Wi-Fi 通信;在发布形式上,为了获得更灵活的效果,采用编写程序实现动态画面实时显示定位结果。用 J2ME 编写的 Java 程序在大部分的手机平台上都得到支持,通用性极强。

客户端 Java 程序的编译平台<sup>[10]</sup>是 JDK1.6.0\_24 和 Java Wireless Toolkit 2.52,编程工具采用 Eclipse 3.6.0。程序的功能如图 7。程序通过 Wi-Fi 接收数据包,进行数据分析后,根



图7 客户端程序功能结构

## 4 实验测试

实验场景如图 8 所示,范围为  $12\text{ m} \times 8\text{ m}$ 。所有锚节点放置在天花板上,离地面约  $2.5\text{ m}$ 。图 9 为现场照片。实验人员手持被定位手机,定位结果输出到该手机上显示,手机界面如图 10。实验结果表明,本系统定位能准确判定被定位手机所在的区域,而且延时较小,能适用于大部分应用。实验结果的相关统计数据如表 1,其中目标运动时的速度为正常步行速度 ( $1\text{ m/s}$ )。

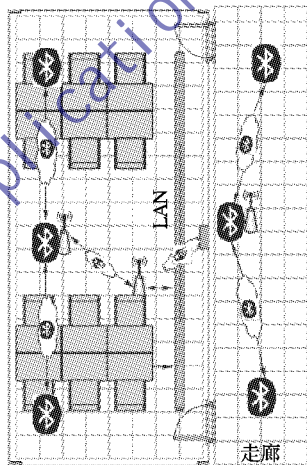


图 8 实验场景示意图

表1 实验结果统计数据

目标 状态	概率/%			目标丢失
	定位准确	定位到相邻区域	定位到较远区域	
静止	91	2	1	6
运动	76	11	6	7

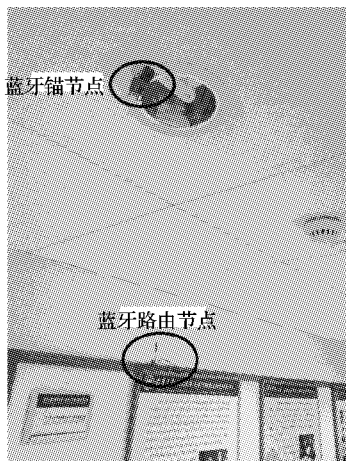


图9 定位现场照片

## 5 应用前景

本系统提供了 LBS 的一个平台,适用于很多应用场合,市

场前景广阔。通过改进应用层的软件,可能的应用范围如下。

1)室内导航/人员疏导。火车站和机场等大型、复杂的建筑让初次进入的人容易迷失方向,而且在人流密度较大的地方需要进行人员的疏导和分流。在使用了本系统以后,服务端可以实时掌握建筑内的人员分布密度,根据用户的导航请求,指示出最短而且畅通的路径。

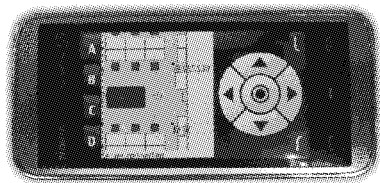


图10 定位时手机界面

2)大型超市导购。大型超市里顾客有时花较长时间才能找到要购买的商品。在购物集中的时段,大量顾客在超市内寻找商品容易造成拥堵。用本系统除了可以帮助顾客找到要购买的商品以外,还可以记录顾客的行走轨迹,帮助超市研究顾客的购物习惯,合理安排营销策略。

3)人员远程监控。目前儿童手机是一个比较热门的应用,而儿童手机的一个重要功能是远程监护,这必须有定位服务的支持。在成本限制和精度要求下,目前只有蓝牙手机能满足要求。在普通手机上安装软件,配合定位平台,就能实现实时监护、轨迹查询、安全护栏等功能。

4)景区(展馆)自助讲解器。景区自助讲解器也是一种无线定位的应用,目前已经得到了广泛应用。对本系统进行扩展,实时指示游客所在景点,并且播放相应的讲解语音,即可实现自助讲解器的功能,而且成本更低。

## 6 结语

本文描述了一个室内对蓝牙手机进行定位的物联网应用平台,该平台具有方便易用、成本较低、易于扩展等优点。通过布置在室内的蓝牙传感器网络检测手机的蓝牙信号强度,服务器端计算得出手机位置,手机通过 Wi-Fi 接收定位信息并实时显示。在蓝牙和 Wi-Fi 越来越普及的今天,蓝牙定位从实验室走向市场的时机愈加成熟,本定位系统也具有更广阔的市场前景和进一步开发研究的价值。

### 参考文献:

- [1] 蒋挺,赵成林. 紫蜂技术及其应用[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2006.
- [2] 王鸿鹏,王耀宽. 基于 Cricket 传感器网络室内定位系统的设计与实现[J]. 计算机工程与应用,2008,44(2):211-214.
- [3] 樊晓翔,王福豹,严国强. 基于 TDOA 技术的自适应定位系统研究[J]. 计算机测量与控制,2009,17(4):727-731.
- [4] 江德祥,胡明清,陈益强,等. 基于核岭回归的自适应蓝牙定位方法[J]. 计算机应用研究,2010,27(9):3487-3489.
- [5] 康会娜,张崎. 大型场馆游客定位诱导系统的研究[J]. 信息技术,2010,34(8):65-69.
- [6] 王小好. 基于蓝牙无线技术的室内定位方法的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2007.
- [7] 金纯,许光辰,孙睿. 蓝牙技术[M]. 北京:电子工业出版社,2001:12.
- [8] 马建仓,罗亚军,赵玉亭. 蓝牙核心技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [9] 毛飞,蒋挺,周正,等. 基于蓝牙的无线传感器网络[J]. 系统工程与电子技术,2005,27(6):1142-1144.
- [10] 刘斌. Java ME 实用详解:用 Eclipse 进行移动开发[M]. 北京:电子工业出版社,2007.

(上接第3151页)

本文通过对3种算法的研究发现:松弛因子起到调节修正的作用,由于它影响着迭代速度和迭代结果的质量,因此松弛因子的正确选取尤为重要。本文给出了3种算法的松弛因子合理选取范围,具有一定的参考意义;算法比较依赖初值,合理地选取初值不仅可以提高计算速度加快算法收敛,还可以在观测值对网格覆盖不佳的情况下,获得更为准确的结果;合理的迭代收敛条件可以帮助算法更好的达到收敛效果。

致谢 感谢中国科学院上海天文台宋淑丽副研究员提供的气象资料。

### 参考文献:

- [1] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, *et al.* GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D14): 15787-15801.
- [2] BEVIS M, BUSINGER S, CHISWELL S, *et al.* GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33(3): 379-386.
- [3] 宋淑丽,朱文耀,丁金才,等. 上海 GPS 网层析水汽三维分布改善数值预报湿度场[J]. 科学通报, 2005, 50(20): 2271-2277.
- [4] FLORES A, RUFFINI G, RIUS A. 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays[J]. Annales Geophysicae, 2000, 18(2): 223-234.
- [5] STOLLE C, SCHLÜTER S, HEISE S, *et al.* A GPS based three-dimensional ionospheric imaging tool: Process and assesment[J]. Advances in Space Research, 2006, 38(11): 2313-2317.
- [6] JIN SHUANGGEN, LUO O F, PARK P. GPS observations of the ionospheric F2-layer behavior during the 20th November 2003 geomagnetic storm over South Korea[J]. Journal of Geodesy, 2008, 82(12): 883-892.
- [7] WEN DEBAO, LIU SANZHI, TANG PINGYING. Tomographic reconstruction of ionospheric electron density based on constrained algebraic reconstruction technique[J]. Journal of GPS Solution, 2010, 14(4): 251-258.
- [8] LIU SANZHI, WANG JIEXIAN, GAO JUNQIANG. Inversion of ionosphere electron density based on a constrained simultaneous iteration reconstruction technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(6): 2455-2459.
- [9] DAS S K, SHUKLA A K. Two-dimensional ionospheric tomography over the low-latitude Indian region: An intercomparison of ART and MART algorithms[J/OL]. Radio Science, 2011, 46, RS2005, doi: 10.1029/2010RS004350. [2011-04-01]. <http://www.agu.org/pubs/current/si/links/2010RS004350.pdf>.
- [10] BENDER M, DICK G, GE M, *et al.* Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(10): 1704-1720.