

基于 ZigBee 技术的室内定位系统 算法研究及实现

杜月林¹, 石欣然², 王克寒²

(1. 南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210046;

2. 南京邮电大学 海外教育学院, 江苏 南京 210046)

摘要:随着当今社会城市化进程的快速发展,人们对于在复杂环境内的定位需求越来越迫切。由于建筑物的遮挡使得 GPS 定位在室内不容易实现。文中设计了一种基于 ZigBee 技术的室内定位系统(IPS)的解决方案。结合信号强度测距法(RSSI)与场景指纹定位法,提出 RSS 场景指纹定位法。该算法采用 RSS“场景特征信息”作为定位场景的“指纹信息”,来建立“指纹信息”数据库,并通过 TI 公司的 Z-stack 的硬件平台实现了该算法。测试结果表明,该定位系统在覆盖超过 20 m * 20 m 的面积里使用 4 个参考节点就能以 2 m 以内的平均定位误差实现室内定位,满足普通的定位需求。

关键词: ZigBee 技术;室内定位;RSS;场景指纹

中图分类号: TN722.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2014)07-0245-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2014.07.061

Research and Realization of Indoor Positioning System Algorithm Based on ZigBee

DU Yue-lin¹, SHI Xin-ran², WANG Ke-han²

(1. College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and

Telecommunications, Nanjing 210046, China;

2. Overseas Education College, Nanjing University of Posts and

Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: The fast process of urbanization makes the need of position in a complex environment more and more urgent. However, when GPS comes into in-door places, the concrete of the building shields most of the GPS satellite signals and makes the GPS position impossible. It gives a possible solution of in-door positioning system based on ZigBee technology. RSS scene fingerprint positioning method is proposed combining the ranging algorithm based on the received signal strength and scene fingerprinting algorithm. Using RSS “scene characters information” as the “fingerprint information” in the positioning area, then establish the “fingerprint information” database, and using TI company – Z-stack hardware platform to realize this algorithm. The test results show that the positioning system in covering more than 20 m * 20 m in the area of the four reference node can be in 2 m less than the average position error has realized the indoor positioning, meeting the demand of ordinary position.

Key words: ZigBee technology; indoor positioning; RSS; scene fingerprinting

0 引言

目前室内定位系统^[1-4]可以根据其使用的无线技术分为几类,分别是 RFID, 蓝牙, ZigBee, 红外, WiFi 等,在这些技术中,RFID 和 ZigBee 在低成本方面具有极大的优势。在实际应用中,一个大型场景内的室内

定位系统可能会使用到成百上千的感应节点,ZigBee 和 RFID 在成本上的优势会更加凸现。而相对于 RFID 技术,ZigBee 是一组针对短距离、低速率的无线网络通信协议标准^[1]。基于 ZigBee 的无线设备在 868 MHz, 915 MHz 和 2.4 GHz 频段下工作,它的最大

收稿日期: 2013-08-29

修回日期: 2013-12-07

网络出版时间: 2014-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271240);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ11-0393);南京邮电大学通达学院教学改革课题(TD00211JG31)

作者简介: 杜月林(1975-),男,山西原平人,讲师,博士生,研究方向为嵌入式系统控制、通信信号处理。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140224.0922.050.html>

传输速率为每秒 250 千字节。ZigBee 主要针对于使用电池供电的并且对数据传输速率要求不高,对电池寿命要求较高的设备。ZigBee 由于具有相对广泛的覆盖面积和节点直接具有相互数据通信的能力,使得 ZigBee 更适用于商业化的室内定位系统。

1 传统定位方法简介

1.1 定位算法的数学基础

1) 三边测量法。

三边测量法的原理如图 1 所示。已知 A、B、C 三个锚节点的坐标分别为 (x_a, y_a) 、 (x_b, y_b) 、 (x_c, y_c) , 盲节点 M 的坐标为 (x, y) , 三个锚节点 A、B、C 离盲 M 的距离分别为 m_a 、 m_b 、 m_c 。

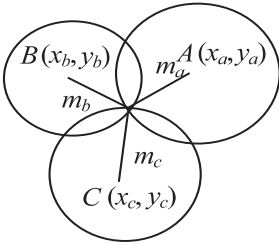


图 1 三边测量法

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2} = m_a \\ \sqrt{(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2} = m_b \\ \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} = m_c \end{cases} \quad (1)$$

所以,由以上公式可以得到盲节点 M 的坐标:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_a - x_c) & 2(y_a - y_c) \\ 2(x_b - x_c) & 2(y_b - y_c) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_a^2 - x_c^2 + y_a^2 - y_c^2 + m_c^2 - m_a^2 \\ x_b^2 - x_c^2 + y_b^2 - y_c^2 + m_c^2 - m_b^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

如果锚节点的位置信息精准,并且测得的距离准确,那么就可以根据以上公式计算出盲节点的位置。不过,这个结果是最好的理论结果,但是在实际的测量中,它存在误差,会导致结果的不准确。

2) 最大似然估计法。

最大似然估计法需要知道更多的锚节点的信息,锚节点的个数需要超过三个,通过这些信息建立方程组,这个方程组可以唯一确定盲节点的位置。原理如图 2 所示,已知 n 个锚节点的坐标分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , \dots , (x_n, y_n) , 盲节点 M 的坐标为 (x, y) , n 个锚节点到盲节点的距离分别为 m_1, m_2, \dots, m_n , 假设

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = m_1^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = m_n^2 \end{cases} \quad (3)$$

从第一个方程,每个分别减去最后一个方程,从而得到:

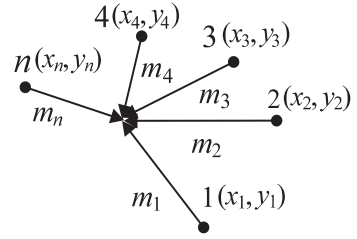


图 2 最大似然估计方法

$$\begin{cases} x_1^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x + y_1^2 - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y = m_1^2 - m_n^2 \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 - 2(x_{n-1} - x_n)x + y_{n-1}^2 - y_n^2 - 2(y_{n-1} - y_n)y = m_{n-1}^2 - m_n^2 \end{cases} \quad (4)$$

以上方程线性表示为: $AX=b$, 其中

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + m_n^2 - m_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + m_n^2 - m_{n-1}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (7)$$

使用标准的最小均方差估计方法可以得到盲节点 M 的坐标为: $\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T b$ 。可以看出,最大似然估计法利用盲节点周围锚节点的信息来进行定位。

1.2 信号强度测距算法

信号强度随着传播而衰减,所以测量信号强度可以与物理距离相对应。理论上,根据能量法则,信号强度随着距离的增大而减小。此方法中的信号一般选取 RFID 射频信号^[5-8]。

无线信号传播的一般模型为:

$$p(d) = p(d_0) - 10 \times n \times \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + x_0 \quad (8)$$

其中, n 为路径长度与路径损耗之间的比例因子,它与周围建筑物的材料和结构有关,单位为 dB; x_0 为路径损耗附加值,表示通过墙壁或建筑物的衰减因子,单位为 dB; d_0 是参考距离, $P(d_0)$ 是距离为参考距离 d_0 时的功率; d 是发送端和接收端之间的距离,通常情况下,当 $d_0 = 1$ m, $P(1) = 30$ dB,接收端的信号强度公式为:

$$p_r(d) = p_t - p(d) \quad (9)$$

其中, $p_r(d)$ 为接收功率; p_t 是传输功率; $p(d)$ 为发送端与接收端距离为 d 时的传输损耗功率。

在实际应用中,一般是通过计算 RSSI 的平均值来得到某个距离点上的 RSSI 值,这样就可以通过无线信号传输模型将传输损耗转化为距离。

1.3 场景指纹定位算法

无线电波在经过障碍物后会产生与周围环境紧密相关的多径信号,每一位置都有自己唯一的多径结构,该信号可以认为是该位置的“场景指纹”。

这个“场景指纹”信息可认为是该位置的场景特征。因为多径信号的强度分布与传输地形和障碍物有关联,所以它呈现出较强的环境特性。场景指纹算法^[9]就是依据这种特性来获取用户的位置。文中介绍的场景指纹定位算法分为两个阶段:

第一阶段:离线阶段。通常采取盲节点漫游在定位区域内的不同位置,记录每个位置接收到的信号强度和其他指纹信息,随后将这些场景信息和当前漫游状态成对地记录到指纹数据库中。

第二阶段:在线阶段。通过指纹数据库获得盲节点的“指纹信息”后,将信息与离线阶段建立的指纹数据库中的“指纹信息”进行比对,采用相关的匹配算法确定接收到的“指纹信息”中与指纹数据库中信息匹配度最高的位置,从而确定出用户的实际位置。

基于场景指纹的定位技术的位置准确度依赖于测量网格的密度及网格大小。在最小的网格密度下,场景指纹定位方法可以获得最高的定位准确度和精确度。

2 基于 RSS 场景指纹的定位算法研究

该算法结合了 RSSI 和场景指纹定位法^[10-11]。这种方法首先需要在定位区域内部署锚节点的位置,从而形成 ZigBee 网络,同时,将盲节点放置于定位区域中,用 RSSI 方法去获得该位置的场景指纹,即盲节点的信号强度,结合该点的信号强度以及位置信息,从而形成该位置的“场景特征信息”。在实际测量中,使用 RSS 场景指纹定位算法建立数据库,同时运用相应的匹配算法来找到与盲节点相似的匹配点,最后确定该盲节点的位置。

2.1 RSS 场景指纹定位算法的工作过程

在场景指纹定位方法的基础上,RSS 场景指纹定位方法拥有同样的过程,也分为离线阶段和在线阶段,它的工作过程如下:

- 第一阶段:离线阶段,如图 3 所示,工作过程如下:
- 由于参考节点的位置是已知的,在无线网络中的定位区域内,采集节点和参考节点之间相互发射 RFID 射频信号,通过信号测距法可获取该采集节点的位置信息,同时,通过测量参考节点接收到的采集节点发射信号功率也可以获得采集节点在该参考节点处的“场景信息特征”。
 - 综合 RSSI 获取到的位置信息以及“场景信息特征”,就可以得到盲节点在所在位置对应各参考节

- 点的一组“场景信息指纹”。
- 将各个采集节点的“场景指纹信息”存入指纹数据库中,待第二阶段—在线阶段使用。

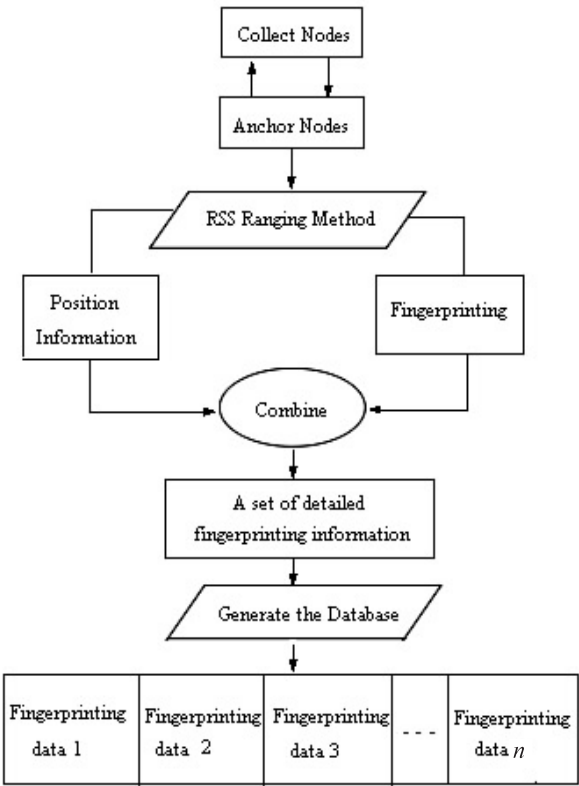


图 3 离线阶段工作流程

第二阶段:在线阶段。

- 与第一阶段的前两步相同,首先获取盲节点的“场景指纹信息”,由于第二阶段盲节点的位置是未知的,通过盲节点不断移动,“场景指纹信息”就变成了实时信息,该“指纹信息”将用于与指纹数据库中的各组“指纹数据”进行匹配比对。
- 通过匹配算法对盲节点的实时“场景指纹信息”进行比对和匹配,找出最匹配的一组,就可得出该盲节点的实际数据,从而估计出盲节点的位置。

2.2 RSS 场景指纹定位法需要研究的相关问题

1) 指纹信息数据的表示问题。

由于在一些特定的位置,RFID 射频信号会相互影响,从而导致射频信号不稳定。基于这种情况,每一位置都有自己唯一的 RFID 射频信号特征向量值。因此,通常将一个位置 and 该位置唯一的射频信号特征向量值作为一个整体,来描述建筑物内该位置的“场景指纹”^[12-13]。

因此,可以使用二元组来表示数据库中的“指纹信息”: (L,F) 。

L 代表某一位置的坐标或者类似位置的信息,表达式可以表示如下:

$$L = \{ (x,y) \mid x,y \in R^2 \}$$

(10)

F 表示该位置的 RSS “场景特征信息”, 是该位置上所有参考节点发送过来的 RSSI 平均值。

2) 定位区域内网格划分问题。

定位区域网格^[14]是将定位区域的平面图划分成大小相等的一块块范围, 将该范围内中心点作为定位区域内的 RSS “指纹场景信息” 采集点。显然网格的大小将直接影响到该区域的指纹数据库中 “指纹数据” 采集的好坏, 从而影响定位的精度。间距太小会使数据增多, 且对提高精度贡献不大, 而如果间距太大, 将导致精确度下降。

因此, 文中在较为空旷的区域, 选用 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的网格, 在房间或较小的空间, 选用 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的网格。

3) 指纹数据库生成问题。

指纹数据库的生成是由各个参考节点依次接收并测量每个采集节点的 RSSI 数据构成的, 同时与每个采集节点的位置一一对应后, 记录到指纹数据库中。

当采集节点按区域大小与形状整齐地排列成网格状时, 其定位效果是最好的。当采集节点均匀分布时, 其节点间距为:

$$g = \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (11)$$

式中, S 是定位区域的面积; N 为采集节点的个数。

如果建立的指纹数据库的定位区域太大时, 这时可以运用如下简单的插值方法, 以周围位置 $Z(x_i)$ 估计未来采样位置 x_0 变量 $Z(x_0)$ 的值来提高测量精度, 公式如下:

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{d_i} \times Z(x_i))}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (12)$$

式中, d_i 是位置 x_0 和位置 x_i 间的距离。

4) 指纹匹配算法问题。

经过比较一些匹配算法之后, 最近邻居算法性能比较好。这个算法通过选择 K 组最邻近信号强度值所对应的参考点, 然后选择一个最佳位置作为盲节点的估计位置。

假设 S_{ij} 是离线阶段第 i 个参考节点接收来自第 j 个参考节点的信号强度平均值, S_i 是在线阶段盲节点测得的来自第 i 个参考节点的信号强度值, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$, 其中 m 是参考节点个数, n 是移动节点个数。

S_i 和 S_{ij} 之间的距离, 表示如下:

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=0}^n (S_i - S_{ij})^2}, j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

在结果中从小到大选择 K 个最小 d_j 值所对应的参

考点, 运用公式 (14) 计算它们位置坐标的平均值作为结果输出。

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_i, y_i) \quad (14)$$

式中, (x_i, y_i) 表示数据库中第 i 个被选取的参考节点所对应的坐标。

使用公式 (14), 通过 K 个最邻近的参考节点的位置来估计盲节点的位置, 是基于它们到盲节点的位置是等距离的。

但实际中并非如此, 因此会存在一定的误差。所以, 对上述方法进行了改进, 对 K 个参考节点分别赋予不同的权值 a_i , 由于盲节点离这 K 个位置参考节点之间的距离与信号强度 d_i 成反比, 所以权值可设置如下:

$$a_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (15)$$

因此, 盲节点的坐标为:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \sum_{i=1}^K a_i (x_i, y_i) \quad (16)$$

3 定位系统设硬件设计

此定位系统主要由三部分组成: 盲节点、参考节点和控制节点。

盲节点 (blind node) 是位置未知的待定位节点。该定位系统的主要功能是利用定位算法来实现盲节点的定位。

在此定位系统中, 盲节点主要有两项任务。第一是每隔一定的时间向周围的所有邻近参考节点广播信号脉冲。第二是在接收到周围参考节点发送回的 RSSI 信息后将信息发送回控制节点。

参考节点 (reference node) 是在部署时设置好位置信息的节点。参考节点用在特定的算法中, 给盲节点提供位置信息参考。在此室内定位系统中, 参考节点的主要任务是在接收到盲节点的信号脉冲后, 测量其 RSSI 值, 并存储这些值, 在取得足够的采样值之后, 将这些采样的平均 RSSI 发送回盲节点, 同时, 参考节点在部署后仍可改变自己的位置, 并通过控制节点的指令来更新自己的位置信息。

控制节点 (dongle node) 为一类比较特殊的节点, 它收集盲节点发回的 RSSI 信息然后通过串口通信提交给计算机, 计算机通过定位算法给出最终估算的盲节点位置。

同时参考节点也可以通过串口接收计算机给出的指令, 发送位置配置信息给各个参考节点, 实现系统的动态部署。

4 实验结果

4.1 实验步骤

第一步,将系统放置于 10 m * 10 m 的开阔空间中,记录实际位置与估计位置的 10 个样本误差。接着,根据误差,如果任何连续的误差出现的话,则调整系统的定位算法。

第二步,分别记录定位区域为 10 m * 10 m,20 m * 20 m 和 30 m * 30 m 的平均误差。选取 10 个位置误差样本,并计算每个位置的平均误差。

第三步,将定位系统放置于复杂的室内环境中,例如有行人走动的教学楼内。重复上述步骤,来记录上述定位区域内的三组平均误差。一些定位区域如图 4 所示。

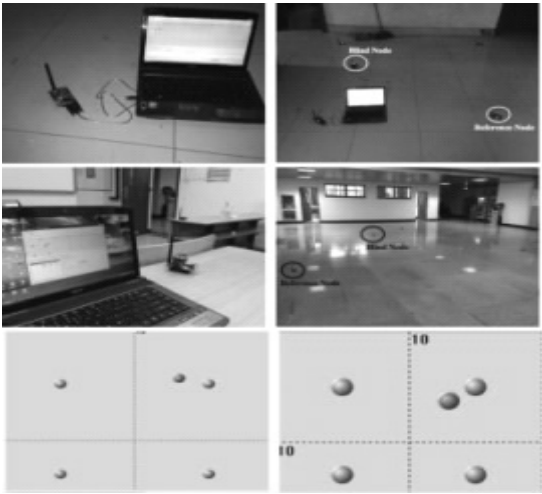


图 4 实验定位新系统测试场景

4.2 结论与误差分析

完成实验后,收集每个定位区域内的误差样本,并计算,如表 1 和表 2 所示。

表 1 开阔定位环境中的平均误差

Scene Space	10 m * 10 m	20 m * 20 m	30 m * 30 m	50 m * 50 m
Avg. Err	1.7 m	1.3 m	2.1 m	5.0 m

表 2 复杂室内定位环境的平均误差

Scene Space	10 m * 10 m	20 m * 20 m	30 m * 30 m	50 m * 50 m
Avg. Err	1.7 m	1.8 m	5.2 m	7.3 m

实验结果表明,在开阔的定位环境中,在可接收的误差情况下,拥有四个参考节点的系统可以定位 30 m * 30 m 的区域。但是,随着距离的增加,信号强度随之减弱,并且误差随之增加。

5 结束语

文中提出了一个室内定位系统的设计和实现过程。从最初的理论计算到这个系统的设计再到最终的使用 TI 公司的开发平台 Z-Stack 来实现系统。根据

测试结果,这种低成本定位系统在覆盖超过 20 m * 20 m 的面积里使用 4 个参考节点就能以 2 m 以内的平均定位误差满足普通的日常定位需求。在实际应用过程中,此系统除了可以提供基础的定位服务以外,通过改进盲节点的硬件结构,可以使得盲节点具有自身实现定位算法的能力。且通过添加额外的系统,如室内环境信息数据库,高速率的通信系统,此室内定位系统就可以提供室内地图、导航、搜索等相关功能,在现实生活中具有较大的应用价值。

参考文献:

[1] 王权平,王 莉. ZigBee 技术简析[J]. 通讯世界,2003,9(4):41-43.

[2] 董珍珍,杨 云. 浅析 ZigBee 技术及其应用[J]. 科技视界,2012(24):209-210.

[3] Kinney P. IEEE 802. 15. 4 Statue[EB/OL]. 2004. <http://ZigBee.org>.

[4] 钱 璟,虞建立,刘 吴. 一种基于 RSSI 技术的大楼定位系统的实现[J]. 电脑知识与技术,2008(23):1061-1062.

[5] 陈维克,李文锋,首 珩,等. 基于 RSSI 的无线传感器网络加权质心定位算法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2006,30(2):265-268.

[6] 单杭冠,沈建锋,王宗欣. 一种适用于无线传感器网络定位的新方法[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(10):1484-1489.

[7] 任丽荣,肖 军. 基于 TOA 的无线传感器网络自定位技术的研究[J]. 信息与控制,2006,35(2):280-283.

[8] 李文江,陈 宇,刘晓平,等. 基于 ZigBee 技术的煤矿井下人员定位系统设计[J]. 成都大学学报(自然科学版),2008,27(4):322-325.

[9] 金 纯,何 山,徐洪刚,等. 基于 ZigBee 的井下人员定位系统设计[J]. 电视技术,2011,35(21):138-140.

[10] Stoleru R, Stankovic J A. Probability grid: a location estimation scheme for wireless sensor networks [C]//Proceedings of 2004 first annual IEEE sensor and ad hoc communications and networks conference. Santa Clara, California: IEEE, 2004.

[11] Madigan D, Elnahrawy E, Martin R, et al. Bayesian indoor positioning systems[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2005. Miami, Florida: IEEE, 2005: 1217-1227.

[12] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2000. Tel-Aviv, Israel: IEEE, 2000: 755-784.


[13] Lin Tsung-Nan, Lin Po-Chiang. Performance comparison of indoor positioning techniques based on location fingerprinting in wireless networks[C]//Proceedings of 2005 international conference on wireless networks, communications and mobile computing. [s. l.]: IEEE, 2005: 1569-1574.

[14] 张洁颖. 基于 ZigBee 网络的定位跟踪研究及实现[D]. 上海: 同济大学, 2007.

基于ZigBee技术的室内定位系统算法研究及实现

作者：[杜月林](#)，[石欣然](#)，[王克寒](#)，[DU Yue-lin](#)，[SHI Xin-ran](#)，[WANG Ke-han](#)

作者单位：[杜月林, DU Yue-lin\(南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京, 210046\)](#)，[石欣然, 王克寒, SHI Xin-ran, WANG Ke-han\(南京邮电大学 海外教育学院, 江苏 南京, 210046\)](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2014(7)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wj fz201407061.aspx