

# 基于 TOA 的指纹定位系统<sup>①</sup>

谈 飞 卢 翔 涂时亮 (复旦大学 计算机科学与技术学院 上海 200433)

**摘 要:** 利用无线传感器网络建立低成本、高精度的实时定位系统,是当今的研究热点之一。通过多组实验数据对比,提出了“当前的无线芯片不适用于基于 RSS 技术的指纹定位技术”的观点,并在此基础上引入 TOA(Time of Arrive)技术,设计并实现了基于 TOA 的指纹定位系统。该系统利用了当前的基于 RSS 的指纹定位系统,将 TOA 获得的测量距离值作为参考信号,利用无线信号的连续性改进了定位精度。实验数据表明,该系统在复杂的环境下达到了一定的精度,有一定的实用意义。

**关键词:** 无线传感器网络; RSS; TOA; 指纹定位

## Location Fingerprint System Based on TOA

TAN Fei, LU Xiang, TU Shi-Liang

(Department of Computer Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 210433, China)

**Abstract:** How to set up a low-cost, high-accuracy real-time location system based on wireless sensor network is one of the popular research topics. This paper, according to our analysis on various sets of experimental data, suggests that current wireless chips are not suitable for location fingerprinting based on RSS. In addition, a new location fingerprint system based on TOA is proposed. It regards distances from TOA as reference signals and makes use of wireless signal's continuity to improve the location accuracy. The experimental data show that this system achieves considerable accuracy in complicated environments.

**Keywords:** WSN; RSS; TOA; location fingerprint

近年来,随着无线通信技术、计算技术的进步,无线定位技术有着广泛的应用前景,全球定位系统(GPS)已经可以在室外环境中提供较为精确的定位,但是在室内应用中,现有的定位技术都有着很多局限性。对于室内复杂环境的定位,正是当前无线定位技术乃至无线传感器网络技术的研究热点之一。

目前,比较典型的测距定位技术主要有:1)基于 RSS 的定位技术:通过测量无线信号的场强特征值估算实际的距离实现定位;2)基于 TOA, TDOA 的定位技术:利用无线信号在节点间的传播时间测量实际的距离实现定位;3)基于 AOA 的定位技术:通过无线信号的方向性特征测量信号交点确定相应点的位置。后两者,尤其是 2)中的 TDOA 和 3)中的 AOA 技术由于其对硬件系统要求较高,研究相对较少。除此之外,

还有部分无需测距技术的定位方法,主要分为两类:

1)原地技术:利用节点接收到的所有固定节点的位置质心来估算自己的位置。2)跳计数技术:利用路由算法计算每个固定节点的跳计数来进行定位。无需测距技术的定位技术普遍存在着计算代价大,不适用于移动节点等缺点,现在研究相对较少。本文通过研究已有的 RSS 指纹定位系统和 TOA 定位技术,对两者进行实验和比较,改进了已有的指纹定位算法,实现了基于 TOA 的指纹定位系统。

## 1 定位算法

### 1.1 RSS (Received Signal Strength)

根据经典的无线信号传播损耗模型, RSS 信号强度与距离之间的关系遵循如下公式<sup>[1]</sup>:

① 收稿时间:2009-07-14

$$L_1 = L_0 + 10\alpha \log_{10} d + \nu$$

其中  $L_0$  指在距离信号源 1 米处的 RSS 信号强度值,  $L_1$  指在距离信号源  $d$  ( $d \geq 1$  米) 处的 RSS 信号强度值,  $\alpha$  是一个常量参数(根据不同模型产生),  $\nu$  是表示在多径传播环境中阴影损耗的高斯随机分布变量。

根据上述公式, RSS 的数据分布曲线应该随着源节点和目标节点间距离的增长呈单调递减趋势。为了分析实际环境中无线芯片的工作情况, 我们采用 CC1100 和 MC13192 两种具备 RSS 检测功能的无线芯片进行试验。图 1 至图 2 是我们根据实验数据绘制的曲线图, 所有实验均在晴好天气下完成, 实验环境中无人及突发障碍物干扰。

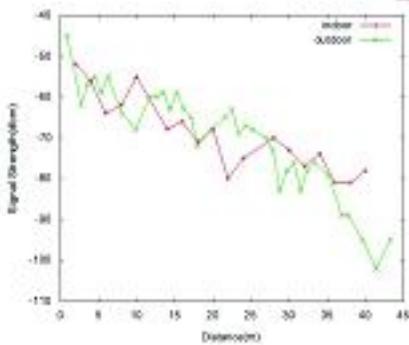


图 1 无线芯片: CC1100;  
发射功率: 10dbm; 工作频率: 433MHz

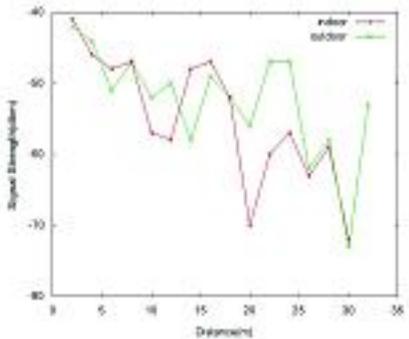


图 2 无线芯片: MC13192;  
发射功率: 10dbm 工作频率: 2.4GHZ

由图 1 至图 2 可以看出, 两种不同的无线芯片的数据曲线都没有呈现严格的单调递减的趋势, 如 CC1100 数据曲线中室内的 18m 与 27m 附近, 室外的 3m 与 15m 附近, MC13192 数据曲线中室内的 8m 与 17m 附近, 室外的 9m 与 23m 附近, 均出现

了相似的信号数据分布, 再考虑实际定位过程中复杂的环境, 系统的实际误差将会达到 10m 以上。

根据上述的实验数据, 我们有理由相信, 当前的无线芯片由于无线信号自身的多径传播、反射、信号衰减等问题, 对获得的无线信号进行了增益补偿<sup>[2]</sup>。这样的设计导致了实际测得的无线信号强度与理论值偏差过大, 当前的无线芯片并不具备通过 RSS 技术进行无线测距定位的条件。因此, 我们引入了 TOA 技术。

### 1.2 TOA (Time of Arrival)

TOA 技术通过测量信号的到达时间测量信号源与节点之间的距离。我们采集了三个基于相同芯片制作的衍射板的数据, 如图 3 到图 4 所示, 数据曲线都是沿着距离单调递增的。尽管我们的实验距离只有 15m 左右, 但是根据 TOA 的作用原理, 在芯片中加上放大器之后, 测量距离的实际精度并不随着信号加强而降低<sup>[3]</sup>。这样的实验结果使得我们有理由相信, 基于 TOA 的无线芯片对于精度要求不高的单向测距和简单环境下的定位系统, 是可以满足需求的。

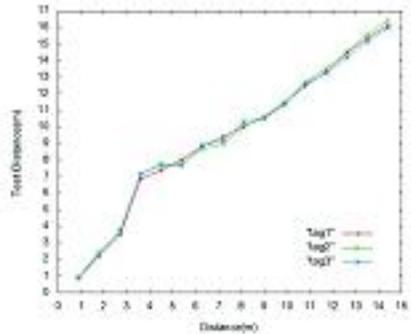


图 3 发射功率: 0dbm;  
工作频率: 2.45GHZ; 环境: 室内走廊

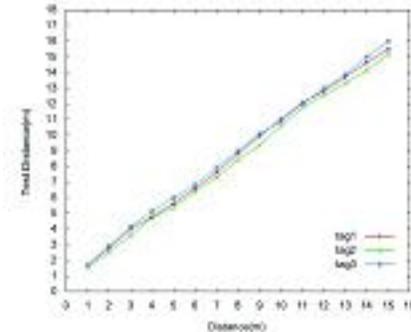


图 4 发射功率: 0dbm;  
工作频率: 2.45GHZ; 环境: 室外空旷地

然而, 对比室内外的数据曲线, 在相同距离上,

室内和室外的数据存在着较大的差异，有些点甚至达到 3-4m 的差距，如图 3 与图 4 中实际距离 4m 处室内与室外的数据。

由此可见，TOA 尽管与信号不完全相关，但是在室内复杂的环境中由于无线信号多径和反射的影响，仍然会导致个别点的测量距离相比实际距离有显著增加，这样的差距会导致在复杂的环境，比如室内外都需要定位的复杂环境中，常见的概率算法出现较大的误差<sup>[4]</sup>。因此，我们引入指纹定位算法来改进基于 TOA 技术的定位系统。

### 1.3 指纹定位

指纹定位算法将现有的定位问题看成是一个模式分类的问题。该算法首先建立无线信号的分布网络，再通过学习算法实现实时定位。这一技术预先采集了实际环境中的无线信号，可以有效地避免无线信号中固定性质引起的种种误差，对实际定位中突然出现的障碍物有一定的适应能力。

在当前的理论研究中，由于 RSS 采集方便，实现成本较低，指纹定位技术主要基于 RSS 实现。但是，现有的大部分基于 RSS 的指纹定位算法，大多是通过模拟实验来证明指纹定位的可行性，并没有经过实际环境中具体芯片的实验验证<sup>[5]</sup>。我们从实际数据出发，如图 1 和图 2 所示，RSS 在实际环境中不仅存在非单调性的问题，而且在不同的距离中，会出现 2 个乃至 3 个以上的存在相似的信号覆盖区间。在实际应用中，采用这样的芯片来实现指纹定位，会大幅度地增加系统的计算量和误差。相对 RSS，如图 3 和图 4 所示，TOA 的数据曲线沿距离呈单调增加趋势，虽然在不同的环境下数据分布呈现较大差异，但是良好的数据分布特点决定了我们可以利用 TOA 来实现我们的指纹定位系统。

这样的系统，既能够通过 TOA 解决了原本 RSS 无线信号非单调性的问题，又能利用指纹定位技术有效地解决 TOA 在不同环境下无线信号值不一致的问题。

## 2 基于TOA的指纹定位系统

### 2.1 系统概述

我们的指纹定位系统基于常见的 RSS 指纹定位系统，整个系统架构如图 5 所示，节点分为移动节点、固定节点以及控制节点，为了减少通信压力以及防止

干扰，固定节点与控制节点间通信工作在 433MHz，固定节点与移动节点间通信工作在 2.45GHz。整个系统的逻辑结构如图 6 所示，从处理流程上来说，分为以下四个步骤：

- (1) 学习过程：选取参考点，通过移动节点采集信号值，经过一系列数据处理过程，建立数据库；
- (2) 信号处理过程：接收移动节点发送的实时信号，进行处理之后，发送到 PC 终端；
- (3) 定位过程：对获取的无线信号应用匹配算法，在数据库中寻找一系列最接近的定位参考点；
- (4) 位置修正过程：对上述参考点集合，通过误差分析，从中寻找到最合适的定位点，完成定位。

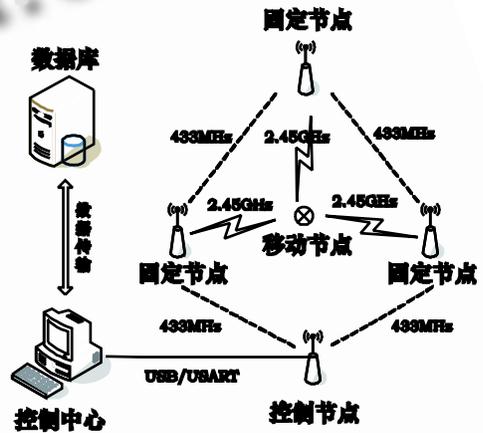


图 5 系统架构图

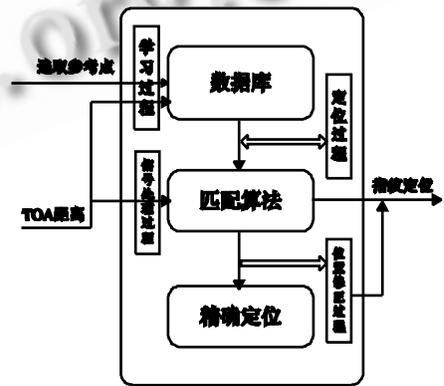


图 6 逻辑流程图

### 2.2 学习过程与信号处理过程

学习过程是一个建立无线信号数据库的过程，可以分为以下四个步骤：(1)在待定位环境中，根据待定位环境的地理分布与可能的信号分布情况确定固定节点的位置；(2)根据我们的定位精度确定我们的参考点

位置, 假设定位精度是 1 m, 则每隔 1 m 位置设置一个参考点, 在有特殊障碍物的位置, 可以增加一个参考点, 以提高定位精度; (3) 安置所有的固定节点, 在整个定位环境中放置若干移动节点, 再另外取一个移动节点作为信号采集点, 依次放置于二中设置的参考点, 收集信号; (4) 对于采集的信号, 去除其中最大以及最小的若干值之后, 对其余信号取平均, 建立数据库。

信号处理过程, 即在实时定位过程中, 采集所有移动节点到固定节点的测量值, 发送到 PC 机进行定位。在实际操作过程中, 为了避免系统负载过大, 在移动节点端对每个移动节点的测量距离取平均发送到控制节点, 提高系统效率。

### 2.3 匹配算法

本系统的匹配算法采用最近邻居算法。该算法将获得的不同固定节点的测量值组成向量, 计算移动节点与数据库中各参考点的欧几里得距离, 选取其中欧几里得距离最小的若干个参考点。我们假设有个固定节点, 数据库中第  $j$  个参考点的测量距离值向量是  $(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn})$ , 移动节点的测量距离值向量为  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。则:

$$D_i = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - x_{ij})^2}$$

$D_i$  即是我们所需要的欧几里得距离。在接收信号处理过程的测量距离值之后, 对于每一个移动节点, 计算该节点的测量距离向量与数据库中所有参考点的欧几里得距离值, 根据参考点之间的平均欧几里德距离, 决定实际应用的欧几里德阈值, 将所有阈值范围内的点组成集合, 进行位置修正。如果阈值中没有点, 则跳过位置修正, 保持原有坐标不变。

### 2.4 精确定位

上述的匹配算法可以提供一个参考点的集合, 实际的定位过程中, 由于信号的突变, 简单的取平均值不能满足我们的定位需求, 为了消除这些偶发信号的影响, 我们提出了位置修正的方案。在实际的定位过程中, 我们认为定位过程是连续的, 所得到的定位值应该是连续变化的, 和移动节点位置有较大变化的参考点不应该出现在我们参考点的集合中。

因此, 参照我们的移动节点的移动轨迹, 假定移动节点的前一位置是  $(x, y)$ , 数据库中参考点的平均间隔为  $d$ , 前述的参考点集合中的位置是  $(x', y')$ , 则

从集合中删除满足下列条件的点:

$$\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} > 2d$$

这样, 前述集合就只剩下我们所需要的待精确的参考点集合, 对这个集合里的所有参考点的坐标取平均, 即得到我们的移动节点的精确位置。如果集合中没有满足我们需要的定位点, 我们取集合中最靠近移动节点的参考点, 将该参考点与移动节点的原有位置取平均, 得到相应的精确位置。

### 2.5 实验结果与分析

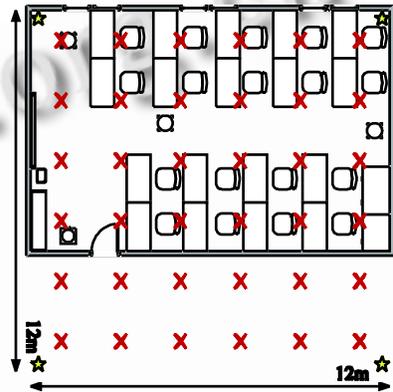


图 7 实验环境示意图

星形: 固定节点 X 形: 移动节点

为了考察上述指纹定位系统的实际工作情况, 我们进行了如下实验: 实验环境如图 7 所示, 包括了一间办公房间及外面的走廊, 中间隔了一堵墙, 无人为干扰。测试区域为 12 m × 12 m, 走廊为 4 m × 12 m 在房间外 (0,0), (0,12), 房间内 (12,0), (12,12) 四处分别设置固定节点。每隔 2 m 位置设置参考点, 建立数据库。定位区域中采用一个移动节点, 沿着指定坐标顺序移动, 对其进行定位。实验数据如表 1 所示。

由表 1 可以看到, 本系统的定位误差较小, 平均误差约为 0.7 m, 已经可以满足一般应用的需求。

表 1 实验数据(第一行为测量点的实际 X 坐标, 第一列为测量点的实际 Y 坐标。数据格式: (测得 X 坐标, 测得 Y 坐标)/定位误差。单位: m)

	1	3	5
1	(0.51,1.12)/0.52	(2.31,1.23)/0.72	(5.88,1.16)/0.89
3	(0.41,3.37)/0.70	(2.11,3.34)/0.95	(5.96,3.45)/1.06
5	(0.46,5.60)/0.81	(2.21,5.69)/1.05	(5.73,5.53)/0.90
7	(0.38,6.29)/0.94	(2.47,6.18)/0.98	(6.02,6.08)/1.37
9	(0.71,8.68)/0.43	(2.25,8.23)/1.07	(5.99,8.47)/1.12
11	(0.91,10.23)/0.78	(2.52,10.59)/0.63	(5.65,10.14)/1.08

表 1 (续 1)

	7	9	11
1	(7.66,1.33)/0.74	(9.30,1.18)/0.35	(11.01,1.15)/0.15
3	(7.52,3.32)/0.61	(9.12,3.75)/0.76	(11.18,3.15)/0.23
5	(7.97,5.78)/1.24	(9.78,5.17)/0.80	(11.94,5.02)/0.94
7	(7.13,6.38)/0.63	(9.25,6.83)/0.30	(11.89,6.70)/0.94
9	(7.74,8.44)/0.86	(9.83,8.65)/0.90	(11.30,8.18)/0.87
11	(7.58,10.74)/0.63	(9.57,10.97)/0.57	(11.04,10.32)/0.68

## 参考文献

- 1 Hadami A, Pahlavan K. A Comparative Performance Evaluation of RSS-Based Positioning Algorithm Used in WLAN Networks. Proc. of the 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2005,4:2331 - 2337.
- 2 李鹏程,廖波,罗娟.无线传感器网络中一种移动节点定位算法.小型微型计算机系统, 2008,29(11):2051 - 2054.
- 3 Cheung KW, So HC, Ma WK, Chan YT. Least squares algorithms for time-of-arrival-based mobile location. IEEE Trans. Signal Process, 2004,52(4):1121 - 1130.
- 4 段凯宇,张力军,高玲,乔加新,武凌.两种 NLOS 误差消除及 TOA 定位算法.信号处理, 2008,24(4):565 - 568.
- 5 Fang SH, Lin TN, Lee KC. A novel algorithm for multipath fingerprinting in indoor WLAN environments. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2008,7(9):35 79 - 3588.

## 3 总结

针对基于 RSS 的指纹定位系统在实际应用中难以达到理想的定位精度的问题, 本文通过研究实际环境中的测试数据, 将 TOA 技术应用于指纹定位系统, 对最近邻居算法进行了修正, 消除了实际环境中偶然的信号突变对于定位的不利影响, 具有较高的精度和很好的稳定性。实验结果表明, 在足够的参考点分布下, 我们的基于 TOA 技术的指纹定位系统已经达到一定的定位精度, 可以较好地满足一般的应用需求, 具有一定的实用价值。