

一种改进的基于信号强度的 WLAN 定位方法

孙善武^{1,2} 王楠^{1,2,3} 陈坚²

(吉林财经大学管理科学与信息工程学院 长春 130117)¹

(吉林财经大学物流产业经济与智能物流省重点实验室 长春 130117)²

(吉林大学通信与工程学院 长春 130012)³

摘要 与室外定位技术相比(如 GPS),基于无线局域网(Wireless Area Network)的定位更适用于室内环境。两种基于接收信号强度(RSSI, Received Signal Strength Indication)的定位方法即位置指纹法和信号传播模型法广泛用于室内定位的研究。使用边界盒算法和改进的二分范围搜索算法将两种室内定位方法相结合,提出了一种改进的基于 RSSI 的定位方法。提出的方法根据指纹数据库中样本的横纵坐标对其进行预处理,同时使用改进的线性二分范围搜索算法降低指纹数据库中的样本数,进而提高实时定位过程的效率。最大化位置指纹维度,并添加时间维,同时通过实验数据阐明所提出的方法可提高用户位置估算的精确度。

关键词 无线局域网,基于 RSSI 的定位,边界盒算法,二分范围搜索,位置指纹

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Improved RSSI-based Localization Method Using Bounding-box Algorithm in WLAN

SUN Shan-wu^{1,2} WANG Nan^{1,2,3} CHEN Jian²

(College of Management Science and Information Engineering, Jilin University of Finance and Economics, Changchun 130117, China)¹

(Laboratory of Logistics Industry Economy and Intelligent Logistics, Jilin University of Finance and Economics, Changchun 130117, China)²

(College of Communication and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)³

Abstract Comparing to the outdoor localization technology, such as GPS, WLAN-based localization is more applicable to indoor environments. There are two RSSI-based localization methods widely used and researched in indoor localization: location fingerprints method and signal propagation modeling method. We combined the two methods to present an improved RSSI-based localization method in WLAN by using the bounding-box algorithm and an improved binary range search algorithm. The proposed method pre-rearranges the samples of fingerprint database on the basis of their X-coordinates (or Y-coordinates) and significantly reduces the number of samples in fingerprint database by using the linear binary range search algorithm, so that the real-time localization efficiency is greatly increased. We maximized the dimension of and added time period dimension to location fingerprint and presented experimental results that demonstrate the ability of the proposed methods to estimate user location with a high degree of accuracy.

Keywords Wireless LAN, RSSI-based localization, Bounding-box algorithm, Binary range search, Location fingerprint

1 引言

越来越多的机构(如学校、公司)建设了自己的无线局域网(WLAN, Wireless Local Area Network),使得基于 WLAN 的定位已经成为了一个热门的研究课题。与室内定位技术相比,如 GPS^[1]、移动无线定位^[2],基于 WLAN 的定位更适用于室内环境。基于 WLAN 的定位的实现主要依赖于软件,无需更多其它硬件设备,因此,有着明显的成本优势。WLAN 中基于信号强度的定位(RSSI-based localization)是室内定位

技术中的一个热门研究课题,其中有两种广泛应用的定位方法:位置指纹法和信号传播模型法^[3]。

本文利用边界盒算法^[4]提出了一种改进的基于信号强度的 WLAN 定位方法。在实时定位阶段,可以将信号传播模型法与边界盒算法相结合,来确定用户位置的坐标范围(矩形区域)。通过应用改进的二分范围搜索算法,在指纹数据库中进行两次一维搜索后,将查找空间缩小为矩形区域包含的样本集。用户位置坐标最终通过最近邻点法(NNSS, nearest neighbor(s) in signal space)估算出来^[3]。

到稿日期:2013-08-19 返修日期:2013-12-26 本文受国家自然科学基金(61133011,61272208,60973089,61003101,61170092),吉林省科技发展计划项目(20100173,20130522177JH),吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(2012190,2011463,2012189),国家留学基金(201208220141),吉林省教育厅“十一五”社会科学研究项目(2010407)资助。

孙善武(1969—),男,硕士,副教授,主要研究方向为传感器网络、网络安全;王楠(1980—),女,博士,副教授,主要研究方向为物理系统建模、基于模型的诊断、自动推理,E-mail:ctuwangnan@126.com(通信作者);陈坚(1979—),男,硕士,讲师,主要研究方向为计算机网络应用、无线网络。

本文提出的方法根据指纹数据库中的样本横纵坐标对其进行预处理,通过使用线性二分范围搜索算法大大缩减了最终参与计算的样本数,因此,在指纹匹配时缩小了搜索空间,提高了实时定位的效率。

2 基于接收信号强度的室内定位

2.1 位置指纹法

位置指纹法是在 RADAR 系统^[3]中提出的,该系统在移动用户端测量感知到的无线接入点(AP, access point)的信号强度,并用 NNSS 方法估算移动用户的位置。关键步骤是数据收集,即离线阶段。在文献^[3]中,构造了样本集合,并将从某位置感知到的所有 AP 的信号强度作为样本的位置指纹存储到指纹数据库中。在实时阶段,利用 Euclidean 距离公式或者其他距离测量公式(如 Manhattan 距离^[5])对每个样本计算测量值与位置指纹间的距离,然后选择取得最小距离的位置作为移动用户的估算距离。Euclidean 距离表达式如式(1)所示。

$$\min(D_j), D_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (RSSI_i - \overline{RSSI_j})^2}, 0 \leq j \leq m \quad (1)$$

其中, n 是被感知到的 AP 的数量, $RSSI_i$ 表示实时阶段从第 i 个 AP 接收到的信号强度, $\overline{RSSI_j}$ 表示第 j 个样本接收到的所有信号强度的平均值, m 是位置指纹数据库中的样本数。在 RADAR 系统中该公式称为最近邻点法(NNSS)。考虑到可能存在多个与测量点距离相同的邻点,文中还提出了 k-NNSS 法和加权 k-NNSS 法。基于 RADAR 系统,很多学者还尝试从多种不同的角度进行扩展,详见文献^[6-8]。

2.2 信号传播模型法

为了减少 RADAR 系统对经验数据的依赖性,文献^[3]通过使用室内信号传播的数学模型给出了一个从理论上计算出来的信号强度集合,该模型为 WAF(the Wall Attenuation Factor)模型,如式(2)所示。

$$P(d) = P(d_0) - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - \begin{cases} nW * WAF & nW < C \\ C * WAF & nW \geq C \end{cases} \quad (2)$$

其中, n 表示随距离增大的信号损耗率, $P(d_0)$ 是某个参考距离 d_0 处的信号强度, d 是发射器与接收器之间的距离, C 是使得衰减因子发生变化的障碍物(墙壁)的最大数量, nW 是发射器与接收器之间障碍物(墙壁)的数量, WAF 是墙壁衰减因子。详细的描述见文献^[3]。

Michael Robinson 等学者^[9]基于 RADAR 系统提出了一个新的改进的 WAF 模型来估算移动用户和 AP 之间的距离。文献^[10]则应用 EKF 技术将对距离的估算转换为对用户位置的估算。文献^[11]讨论了开放空间中的 WAF 模型应用与室内环境的难度,并直接根据经验数据提出一个最优化回归模型进行距离估算。

3 改进的基于接收信号强度的定位方法

本节提出一个改进的基于接收信号强度的定位方法,并从渐进复杂性的角度分析其效率。

3.1 样本预排序

在离线阶段,首先根据一些规则选择样本并收集样本信息,从而生成位置指纹数据库。对于每一个样本,记录其位置

坐标以及在该位置感知到的所有 AP 的信号强度作为位置指纹。在实时定位阶段,会根据样本的横坐标(或纵坐标)进行预排序。为了节省定位时间,本文在构建指纹数据库时对其中的样本按照横坐标进行了升序组织。否则,可以使用某个基于比较的排序算法(如快速排序)对平均时间复杂性 $O(n \log n)$ 进行预处理。

3.2 实时阶段

• 边界盒算法

边界盒算法在文献^[4,12]中提出,作者给出了无线传感器网中的改进的边界盒定位方法。该方法的思想是根据位置和锚节点的通信半径确定未知节点的位置区域,如图 1 和图 2 所示。

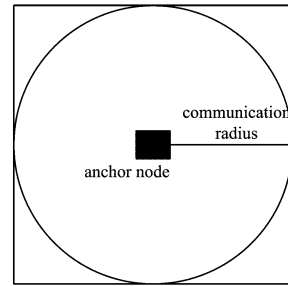


图1 锚节点的通信半径

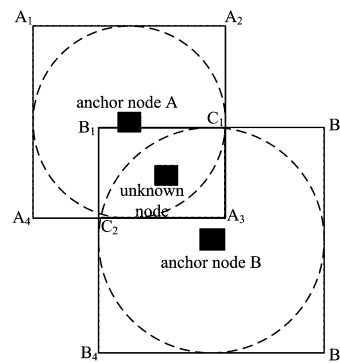


图2 边界盒算法的思想

未知节点发送定位请求,通信范围内的锚节点接收到信息后,会广播自己的位置信息。未知节点接收到锚节点发送的信息后,会确定通信范围内的锚节点数以及具体的通信范围。如图 2 所示,有两个锚节点 A 和 B,它们的通信范围分别为 $A_1A_2A_3A_4$ 和 $B_1B_2B_3B_4$,两个通信范围的交集是矩形 $B_1C_1A_3C_2$,未知节点即将该矩形的中心作为它的最终位置,详见文献^[12]。

• 通信范围

边界盒算法的关键是确定感知到的 AP 的通信范围。我们用 WAF 模型确定移动用户和 AP(即锚节点)之间的距离,为了简化,我们忽略式(2)中的墙壁衰减因子 C ,用式(3)计算 d 作为某个 AP 的通信半径。

$$P(d) = P(d_0) - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3)$$

假设 d_1 和 d_2 分别是由式(2)和式(3)计算出来的距离,显然 $d_2 > d_1$,因此以 d_2 作为通信半径的矩形区域必定大于以 d_1 作为通信半径的矩形区域,这保证了移动用户(即待定位的未知节点)一定在所计算的通信范围内。

在 RADAR 系统中已经证明接收的信号强度随着到 AP 的距离的增加而减小,假设在实时阶段,我们检测到不只一个

接入点: AP_1, AP_2, \dots, AP_n , 并且它们的信号强度值为: $RSS_1, RSS_2, \dots, RSS_n$, 我们从中选择两个最大的值, 即 $P(d_i) = RSS_i$ 和 $P(d_j) = RSS_j$, 利用式(3), 可以计算出 d_i 和 d_j 作为 AP_i 和 AP_j 的通信半径。根据图 1 所示的方法, 可以生成一个矩形区域, 由于 d_i 和 d_j 比 AP_i 和 AP_j 的实际通信半径大, 因此待定位的移动用户必定包含在该矩形区域内。

• 二分范围搜索

上面计算出的矩形横坐标和纵坐标范围分别为 $[lx, rx]$ 和 $[ly, ry]$, 假设所有样本的信息存储在集合 $S = \{S_i | 1 \leq i \leq n\}$ 中, 其中 n 是样本数, S_i 表示为元组: $S_i = (position_x, position_y, ssvavg_ap_1, \dots, ssvavg_ap_{m_i}), position_x$ 和 $position_y$ 是样本坐标, $ssvavg_ap_j (1 \leq j \leq m_i)$ 是第 j 个 AP 的平均信号强度, m_i 是感知到的 AP 数。这里假设样本节点已经按照横坐标进行了预排序, 即: $S_1.position_x \leq S_2.position_x \leq \dots \leq S_n.position_x$, 因此可以将二分搜索改进为二分范围搜索, 在矩形区域内生成样本节点集合。算法描述如下:

```
BinaryRangeSearch(S, low, high, lx, rx)
//在集合 S[low, high] 中搜索样本, 其横坐标范围为 [lx, rx], 搜索结果存储在集合 subS 中;
① int mid = (low + high) / 2;
② if (S_mid.position_x > rx)
    BinaryRangeSearch(S, low, mid - 1, lx, rx);
③ else if (S_mid.position_x < lx)
    BinaryRangeSearch(S, mid + 1, high, lx, rx);
④ else {
⑤ subS = subS ∪ {S_mid};
⑥ BinaryRangeSearch(S, low, mid - 1, lx, S_mid.position_x);
⑦ BinaryRangeSearch(S, mid + 1, high, S_mid.position_x, rx);
⑧ }
```

在最坏情况下, 二分范围搜索的时间复杂性可以通过式(4)计算, 其中 n 是集合 S 中的元素数。

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + O(1) \quad (4)$$

式(4)的求解结果为 $T(n) = O(n)$, 从渐进复杂性的角度来看其与顺序搜索方法时间复杂性相同。但是, 在实时定位阶段, 移动用户的位置是随机的, 因此在二分范围搜索算法中, 至少有一半概率运行语句②或③, 复杂性表达式变为式(5)。

$$\begin{aligned} T(n) &= \frac{1}{2}T\left(\frac{n}{2}\right) + \frac{1}{2} \times 2T\left(\frac{n}{2}\right) + O(1) \\ &= \frac{3}{2}T\left(\frac{n}{2}\right) + O(1) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)的求解结果为 $T(n) \approx O(n^{0.58})$ 。

在用横坐标范围限制的样本子集中, 我们可以在线性时间内根据纵坐标范围进一步减少样本数量, 最后生成矩形区域内的所有样本, 用 NNSS 方法^[3]选择与观测信号强度最匹配的样本作为移动用户的估算位置。

定位过程如下所示:

离线阶段:

将样本存储在指纹数据库 S 中;

对 S 中的样本 S_1, \dots, S_m 按照横坐标升序预排序。

实时阶段:

接收来自于接入点 AP_1, \dots, AP_n 的信号强度: RSS_1, \dots, RSS_n ;

$\text{Max}(Pd_1, Pd_2, RSS_1, RSS_2, \dots, RSS_n)$;

// Pd_1 和 Pd_2 是 $RSS_1, RSS_2, \dots, RSS_n$ 中两个最大的值, 假设其对应的接入点分别为 AP_1 和 AP_2 , 它们的坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 且 $x_1 \leq x_2$;

$$d_1 = 10^{\frac{Pd_0 - Pd_1}{10n}} \cdot d_0, d_2 = 10^{\frac{Pd_0 - Pd_2}{10n}} \cdot d_0;$$

// d_1 和 d_2 是根据式(3)计算的 AP_1 和 AP_2 的通信半径;

subS₁ = BinaryRangeSearch(S, 1, m, x₁, x₁ + d₁);

// subS₁ 中样本的横坐标介于 x₁ 和 x₁ + d₁ 之间;

subS₂ = Search(subS₁, i, j, y₁ - d₁, y₂ + d₂);

// subS₂ 中样本的纵坐标介于 y₁ - d₁ 和 y₂ + d₂ 之间;

对于每个 $N_i \in \text{subS}_2$

$$D_i = \sum_{k=1}^{n_i} (RRSI_i - \overline{RRSI_k})^2;$$

// n_i 是在 subS₂ 中的第 i 个样本 S_i 处检测到的 AP 的数量;

$D_j = \min(D_i), 1 \leq i \leq |\text{subS}_2|$;

输出 S_j 的坐标作为位置结果。

由于集合 subS₂ 中的样本数减少到占集合 S 的非常小的比例(见第 4 节实验数据部分), 因此我们保留指纹数据库中测量的所有 AP 的信号强度。如果某个 AP 在实时阶段没有检测到, 则使用一个较小的值作为它的信号强度值参与计算。对于每个样本, 除了方向, 我们也考虑了时间因素的影响, 并且将时间维度加入到指纹数据库中, 尽管占用了一定的空间, 但是却大大提高了定位的精度, 详见第 4 节。

4 实验结果分析

本节基于一个实际的实验环境, 描述前面提出的方法, 并对结果数据进行分析。

• 实验环境

本文的实验环境为一个 4 层教学楼宇的第 1 层, 该层的布局如图 2 所示。本层由 3 个部分组成, Part A 范围为 71.7 米 × 21 米, 面积为 1505.7 平方米, 包含 7 间教室; Part B 是大厅, 范围为 28.5 米 × 19.4 米, 面积为 552.9 平方米; Part C 范围是 50 米 × 19.1 米, 面积为 955 平方米, 包含 8 间教室。该层有 7 个无线接入点 AP, 其分布如图 2 所示。我们发现假设 l 是两个样本间距离, 当 $l > 1$ 米时, 平均误差接近于 l ; 但当 $l < 1$ 米时, 平均误差则会变大。距离短不一定会提高定位的精度, 因此我们设计了 344 个样本点, 每两个相邻的样本距离约 2 米。像盥洗室、楼梯、防火控制室等区域没有设计样本。所有的样本都设计在如图 3 所示的网格内, 并记录了它们的坐标。

• 数据收集与处理

在离线阶段, 我们使用应用程序 Network Stumbler Version 0.4.0 测量接收的信号强度并为每个样本生成日志文件。测量时间间隔设置为 1 秒, 每个日志文件中包含 30 组数据。对于每个样本 S , 我们计算在该样本处检测到的每个 $AP_i (1 \leq i \leq m_s)$ 的接收信号强度的平均值, 将其作为它在指纹数据库中的属性 RSS_i 的值, 其中 m_s 是在样本 S 处检测到的 AP 的数量。

存在以下几个问题: (1) 接入点的安装位置对接收信号强度的变化影响很大。前面提到的距离与 RSSI 值之间的规则在实际环境中并不总是起作用, 我们的实验环境是一个实际正在使用的教学楼宇, 因此所有的接入点已经安装在天花板上。但是移动用户在地板上行走, 与接入点不在同一水平面

上,对测算精度有一定影响。我们可以尽量多地获取测试数据来减少这种影响,同时,实际测量的信号强度与距离之间的关系也值得深入研究。(2)如文献[3]分析,给定位置的信号强度与用户的朝向相关,为此我们分别记录了4个不同方向(东、西、南、北)上的接收信号强度值,计算其平均值作为样本

的信号强度。(3)在楼宇中,温度、来往人群的数量等因素随着时间变化而有所不同,也会影响信号强度(可达5dbm),因此我们在指纹数据库中加入了时间维度:

$$S_i = (\text{position}_x, \text{position}_y, \text{ssavg_ap}_1, \dots, \text{ssavg_ap}_{m_i}, \text{time_period})$$

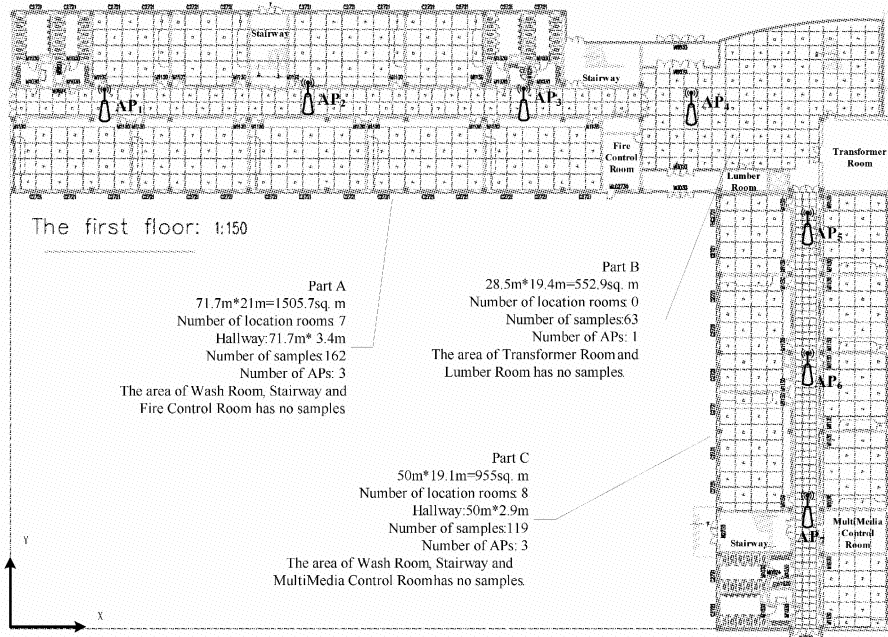


图3 实验环境的布局

在离线阶段,在每个样本处分别测试几个不同时间段的信号强度(本实验中为3个时间段),然后根据时间段将指纹数据库中的样本分成不同的部分,这样在实时阶段,定位空间首先被限制在与移动用户有相同时间段的样本中。

我们分别设计了3个方法对用户定位并进行比较:文献[3]中的RADAR系统、本文设计的不包含时间维度 time_period 的方法 method1 、本文设计的包含时间维度 time_period 的方法 method2 。比较结果见本节后半部分。

• 参数确定

在实时阶段用式(3)来计算移动用户和接入点 AP_i 之间的距离,从而确定 AP_i 的通信范围。在实时定位前,必须确定参数 n, d_0 和 $P(d_0)$ 。虽然所有接入点具有相同的型号和功率,但是仍然需要考虑环境因素。我们把 d 和 n 作为未知变量,令 $d_0=1$ 米,通过测量接收到 $P(d_0)$ 和 $P(d)$ 的值,将其代入到式(3)中,计算出 d 和 n 的值。为了使计算更加精确,对于每个 $AP_i (1 \leq i \leq 7)$ 接收20组不同的值,计算出20个 n 值 $n_{i_1}, \dots, n_{i_{20}}$,并用其平均值 n_i 作为 $AP_i (1 \leq i \leq 7)$ 的参数。

• 定位结果分析

在实时阶段从3个方面对本文的两个方法与RADAR系统进行比较:搜索空间的样本数量、定位时间和定位误差。

随机选取51个测试点对移动用户的位置进行估算,其中Part A包含24个点,Part B包含5个点,Part C包含22个点。通过确定通信范围和进行二分范围搜索,在所有51次实时定位中,搜索空间的样本数量均限制在103以内,如图4所示。实际参与NNSS计算的平均样本数仅为49.25,即指纹数据库中样本数的14.3%。与RADAR系统相比(指纹数据库中所有样本都参与了Manhattan距离计算), method1 大大减少了计算量。 method2 与 method1 的结果非常接近,因此

为了清晰,我们在图4和图5中省略了 method2 获得的结果数据。

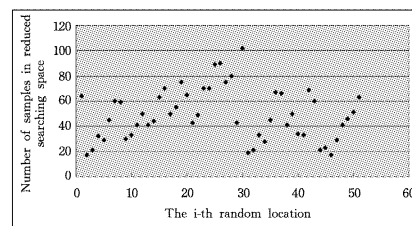


图4 方法 method1 中实际参与计算的样本数

在整个实时定位过程中,方法 method1 花费的时间远小于RADAR系统,比较结果如图5所示。

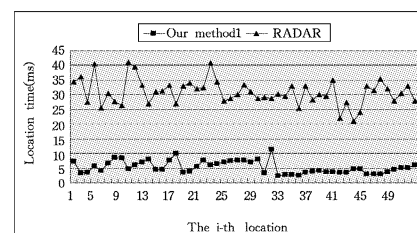


图5 方法 method1 和RADAR的定位时间比较

正如前面提到的,由于不同的时间段人们出现的密度不同,对测量的信号强度有很大的影响,因此在方法 method2 中,我们分别在3个不同的时间段记录每个样本的指纹数据。这虽然增加了数据采集的难度,但是提高了定位的精度。图6显示了RADAR、 method1 和 method2 3种方法的误差距离。

25%、50%和75%的测试点的误差距离如表1所示,我们发现在3种方法中走廊的误差距离小于教室内的误差距

离,但是在许多室内定位的实际应用中,只要定位到移动用户在哪间教室即可,因此当前的精度已经可以满足定位需求。

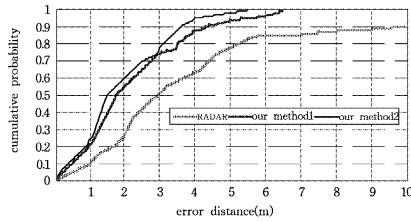


图 6 定位误差比较图

表 1 25%、50%和 75%的测试点的误差距离

方法	25th(\leq (m))	50th(\leq (m))	75th(\leq (m))
RADAR	1.93	2.94	4.69
Our Method1	1.14	1.75	3.05
Our Method2	1.05	1.5	2.95

结束语 本文利用边界盒算法和改进的二分范围搜索算法,给出了一个基于 RSSI 的 WLAN 定位方法。所提出的方法通过线性二分范围搜索减小了查找空间,提高了实时定位的效率和精度。同时从 3 个方面对 RADAR 系统和本文设计的两个方法进行比较,即搜索空间中的样本数、定位时间以及定位误差。实验结果表明,提出的方法可以以较高的精度更好地估算移动用户的位置。

但是正如前面所讨论的,仍然存在一些需要深入研究和解决的问题,这也是我们未来的工作方向,比如接入点的安装位置与接收信号强度之间的关系(可以考虑使用数据挖掘技术进一步研究),以及如何抽象指纹数据来提高搜索效率和定位精度等等。

参 考 文 献

[1] Enge P, Misra P. Special Issue on GPS: The Global positioning system[C]//Proc. of the IEEE, January 1999; 3-127
 [2] Wang S S, Green M, Malkawa M. E-911 location Standard and

Location Commercial Services[C]//Proceedings of IEEE Emerging Technologies Symposium on Broadband, Wireless Interact Access, April, 2000
 [3] Bahl P, Padmanabhan V. RADAR: An in-building RFbased user location and tracking system[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM, March 2000, 2:775-784
 [4] Simic S N, Sastry S. Distributed Location in Wireless Ad-hoc Networks[EB/OL]. www. ee. iitb. ac. in/student/~sripada/papers/simiknshastry. pdf, 2002-04-10
 [5] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L. Introduction to Algorithms[M]. The MIT Press, 1990
 [6] Xiang Z, Song S, Chen J, et al. A wireless LAN-based indoor positioning technology[J]. IBM Journal of Research and Development, 2010, 48(5/6): 617-626
 [7] Roos T, Myllymaki P, Tirri H, et al. A Probabilistic Approach to WLAN User Location Estimation[J]. Int. Journal of Wireless Information Networks, 2002, 9(3): 155-164
 [8] Youssef M, Agrawala A K. Handling Samples Correlation in the Horus System[C]//IEEE Info Com. Hong Kong, March 2004
 [9] Robinson M, Psaromiligkos I. Received Signal Strength-based Location Estimation of a Wireless LAN Client[C]// Wireless Communications and Networking Conference, IEEE, March, 2005: 2350-2354
 [10] Kotanen A, Hannikainen M, Leppakoski H, et al. Positioning with IEEE 802. 11b wireless lan[C]//14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2003). 2003: 2218-2222
 [11] Wang Y, Jia X, Lee H K. An Indoors Wireless Positioning System Based on Wireless Local Area Network Infrastructure[C]// The 6th International Symposium on Satellite Navigation (SatNav 2003). Melbourne, Australia, July 2003
 [12] Wang Xing-fu, Liu Zhi-qiang, et al. Improved Bounding-box Localization Algorithm in WSN[J]. Computer Engineering, 2011, 37(20): 57-59

(上接第 83 页)

[2] Ge A, Callegati F, Tamil L. On optical burst switching and self-similar traffic[J]. IEEE Communication Letters, 2000, 4(3): 98-100
 [3] Vokkarane V M, Haridoss K, Jue J P. Threshold-based burst assembly policies for QoS support in optical burst-switched networks[C]//SPIE Optical Communication, Boston Mass USA, 2002: 125-136
 [4] Toksoz M A, Akar N. Dynamic threshold-based assembly algorithms for optical burst switching networks subject to burst rate constraints[J]. Springer Photonic Network Communication, 2010, 20(2): 120-130
 [5] Yuan C, Zhang Z, Li Z, et al. A unified study of burst assembly in optical burst switching networks[J]. Springer Photo Netw Commun, 2011, 21(5): 228-237
 [6] 牛大伟, 于卫波, 米志超, 等. 多目标约束下的光突发交换网络组装参数分析[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 314-319

[7] 牛大伟, 王海, 于卫波, 等. 一种适用于光突发交换网络的背景流量估计模型[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1-5
 [8] 牛大伟, 彭来献, 于卫波, 等. 一种基于控制平面测量的光突发交换网络动态偏置时间算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 776-781
 [9] 乐孜纯, 陈君, 付明磊, 等. 一种新型结构光交叉连接节点及其联网性能分析[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 1-7
 [10] 胡卫生, 孙卫强, 何浩, 等. 光交换的时间及空间结构分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 1-6
 [11] de Pedro L, Aracil J, Hernandez J A, et al. Analysis of the processing and sojourn times of burst control packets in optical burst switches[C]//Proceedings of International Conference on Optical Networks Design and Modeling. Catalonia Spain, 2008: 1-3
 [12] Yuan Chi, Zhang Zhen-rong, Li Zheng-bin, et al. A unified study of burst assembly in optical burst switching networks[J]. Photon Netw Commun, 2011, 21: 228-237