

室内环境中基于天牛须寻优的普适定位方法

刘影^{*①} 钱志鸿^② 贾迪^①

^①(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125105)

^②(吉林大学通信工程学院 长春 130022)

摘要: 在复杂的室内环境中,测得的接收信号强度(RSS)值会出现不同程度的波动,导致无法准确地刻画出无线信号传播模型。为了解决这个问题,在基于Wi-Fi测距定位模型下,该文提出一种普适的粗粒度定位方法。该方法通过对测量到的RSS值进行拟合,以此获取信号的传播模型;在此基础上计算出未知节点与接入点(AP)的距离,再利用天牛须算法实现未知节点定位,通过仿真验证此传播模型的性能以及该优化算法的有效性。

关键词: 无线通信;信道模型;天牛须搜索;普适定位

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)07-1565-07

DOI: 10.11999/JEIT181021

Universal Localization Algorithm Based on Beetle Antennae Search in Indoor Environment

LIU Ying^① QIAN Zhihong^② JIA Di^①

^①(School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

^②(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In complex indoor environment, the measured Received Signal Strength (RSS) values will fluctuate in different degrees, which lead to inaccurate characterization of wireless signal propagation model. To solve this problem, a universal coarse grained localization method is proposed based on the Wi-Fi ranging location model. This method gets the signal propagation model by fitting the measured RSS value. On this basis, the distance between the unknown node and the Access Point (AP) is calculated, then the location of the unknown node is realized by the beetle antennae search algorithm. The performance of the propagation model and the effectiveness of the optimization algorithm are verified by simulation.

Key words: Wireless communication; Channel modeling; Beetle Antennae Search (BAS); Universal localization

1 引言

随着移动智能设备和无线通信技术在人类生产生活中被广泛地应用,有越来越多的方法可用于室内定位。如利用红外线,RFID,超声波,UWB,蓝牙,Wi-Fi,FM,声学信号,ZigBee技术等实现

室内定位。然而,随着Wi-Fi网络的普及和高速发展,利用商用Wi-Fi实现无接触的室内定位受到越来越多地关注,并且取得了很多卓有成效的进展,主要可以归纳为以下几种^[1]。

基于测距的Wi-Fi定位技术:基于Wi-Fi的室内定位中,Wi-Fi信号测量时间的分辨率有限,接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)属于MAC层指标,该指标是无线室内定位中使用最广的物理量^[2]。理论上,无线信号在传播过程中随着距离的增加信号强度值呈现一定的衰减,两者之间符合一定的理论模型,因此,当获得信号的强度值依据距离模型可以计算出传播距离。在通信理论中,在不同的室内环境中,信号强度与传播距离之间的关系模型可服从自由空间模型、Chan模型、对数正态阴影模型、Keenan-Motely模型等。基于以上经验模型可推算出接收端到接入点(Access Point, AP)的距离,之后根据三边测量等方法计

收稿日期: 2018-11-06; 改回日期: 2019-02-24; 网络出版: 2019-04-02

*通信作者: 刘影 lycommunication@126.com

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61601213), 辽宁省教育厅一般项目资金(LJ2017QL013), 辽宁省博士启动基金(20170520098), 中国博士后面上基金(2017M611252), 辽宁省创新人才支持计划项目(LR2016045)

Foundation Items: The National Natural Foundation of China(61601213), The Project of Educational Commission of Liaoning Province of China (LJ2017QL013), Liaoning Province Doctor Startup Fund(20170520098), China Postdoctoral Science Foundation (2017M611252), The Project of Innovative Talents Support of Liaoning Province of China (LR2016045)

算出接收端的位置,其中关于AP的位置可以预先设定或者自动计算^[3]。

钱志鸿等人^[4]分析定位中测量与距离估算的方法,并对不同技术进行了分析总结,指出由于室内环境复杂,无线信号RSS在传输过程中,容易受到障碍物等因素的影响,导致终端所收集到的信号强度具有较大的随机性和不稳定性,因此,某一种经验传播模型很难准确分析室内环境,这给通信距离估计提出严峻的挑战。RSS如果没有额外的基础设施或者复杂的环境模型,RSS测距将无法使用。为此出现一些对传播模型进行修正的定位方法,例如,BAHL等人^[5]给出了室内WLAN环境下多墙的信号传播模型,设置了信号穿墙的衰减因子、AP与信号接收端之间的墙面数、衰减因子可分辨的最大墙面数等参数来提高路径损耗模型的精准性。陈岭等人^[6]为了简化信号衰减模型复杂性以及参数难确定的问题,提出使用较少参数实现精准的无线信号传播模型,该模型由距离或信号强度的3次样条插值函数来调整经典衰减模型中的衰减因子,无需增加额外参数,计算简单。Lim等人^[7]采用截断奇异值分解技术(Truncated Singular Value Decomposition, TSVD)来构建信号-距离关系图,而文献^[8]则采用了更为复杂的射线跟踪法(Ray-Tracing Model, RTM)来构建无线地图并用模拟退火算法来估计模型参数。基于传播模型的定位法主要适用于一些对定位精度要求不高或者与其它高精度定位方法相结合的位置服务中。

基于位置指纹的Wi-Fi定位:RSS除了被用来测距之外,更多可用于“指纹”定位。基于指纹的定位(fingerprinting-based localization)方法,利用RSS在不同位置上的空间差异性,建立位置-指纹关系数据库,包括离线阶段的数据库和在线阶段数据库^[9]。离线阶段的指纹数据收集需要专业人士使用专业设备对定位区进行逐一采样勘测,代价高昂、耗时巨大。然而环境是动态变化的,会使同一位置上的无线指纹在离线阶段所采集的指纹与在线阶段采集的指纹存在较大偏差,这种指纹获取方法不能适应环境动态变化,导致指纹定位方法很难推向实际应用。近年来国际上许多研究人员提出不需要人工现场勘测测量指纹的方法,应用群智感知思想,利用普通用户的移动终端设备采集的数据来构建室内指纹地图^[10-12]。这类方法主要面临的问题是设备的差异性、各区域移动设备的不平衡性、移动设备位置的获得等等。在指纹定位中,很多学者尝试通过机器学习方法来弥补环境变化导致定位精度下降的问题^[13,14]。当然,这些工作的代价也是明显

的,需要收集大量用户长时间的数据记录,难以保证用户的隐私安全、电量消耗等问题,或增加人工实地勘测的工作量。也有通过结合其他定位方式如声音等来克服指纹在位置上的歧异性和时变性,以保证指纹定位精度^[15]。

本文提出一种基于天牛须搜索的粗粒度普适室内定位方法,本方法优势表现在以下3个方面:(1)对AP数量没有限制,单个AP也可以实现定位;(2)建立确定性信号传播模型较好适应室内环境,并给出了仿真验证;(3)定位求解过程收敛速度快。

2 室内环境下基于天牛须寻优的测距定位算法

2.1 系统模型

基于测距的Wi-Fi定位过程分为4个部分:第1部分,移动终端搜寻可用AP;第2部分,移动终端利用软件获取AP的RSS值;第3部分,根据RSS值利用信号传播模型计算出距离值;第4部分,当移动终端获取3个以上AP的RSS值可进行定位。其中,RSS用来测距的最大问题是定位精度受限,一方面室内环境对无线信号传播造成多径、衰减等干扰,导致自由空间的信号传播模型不再适用;另一方面在定位解算中,当AP数量小于3个时无法定位。因此本文立足于研究一种适用于室内的确定性信号传播模型,在此基础上建立适应度函数,实现高效寻优,以此来弥补现有Wi-Fi定位的缺陷。

2.2 路径传输损耗模型

基于RSS的测距模型,其核心思想在于:信号传播过程中,接收信号强度会随着距离的增加而衰减,这种信号在传播过程中的衰减特性隐含了距离信息。目前大多研究者通常假设信号的传播满足对数-距离路径损耗模型,采用式(1)所示的路径损耗模型进行距离计算

$$P_r(d) = P_0(d_0) + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (1)$$

其中, $P_r(d)$ 表示发射信号经过距离 d 到达接收端后出现的损耗,单位为dB; $P_0(d_0)$ 表示距离发送端为 d_0 时的路径损耗; n 为路径损耗指数; X_σ 表示均值为0,标准差 $\sigma \in [4, 10]$ 高斯分布随机变量。

为了验证式(1)的精准性,本文安装1个AP,设置43个采样点从AP处接收RSS测量值,如图1所示。其中图1(a)表示采样点距离AP的实际距离与测量值RSS之间的关系,图1(b)表示采样点距离AP的实际距离与估计距离之间的关系,从图中可以看出该模型并不能很好地反映出信号衰减与距离

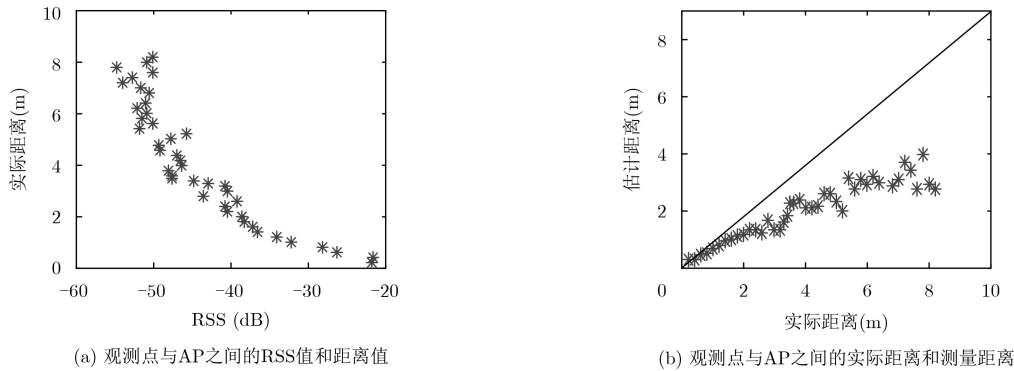


图1 RSS测量值

之间的关系, 并且采样点距离AP越远, 估计距离的误差越大, 因此在定位时要尽可能选取较近的AP参与定位。

在室内环境下直接利用经验对数-距离路径损耗模型进行距离估计存在较大误差。因此, 为了更准确地描述室内环境, 本文对实际环境中的测试数据进行拟合, 建立确定性的信号传播模型(Deterministic Signal Propagation Model, DSPM)^[16], 如式(2)所示。

$$d = p_1 \times \text{RSS}^3 + p_2 \times \text{RSS}^2 + p_3 \times \text{RSS} + p_4 \quad (2)$$

其中, d 表示接收端与AP之间的距离, 单位m; RSS表示接收端接收到AP的信号强度, 单位为dB, p_1, p_2, p_3 以及 p_4 为拟合所获参数。此确定性模型相比于自由空间的路径损耗模型可以更真实地反映当前环境下信号的传播情况。

根据路径传输损耗模型可计算出移动终端与AP之间的距离, 移动终端最少获得3个AP节点的信息, 运用三边测量法或最大似然估计法可以得到移动终端的估计位置 (x, y) , 但是在某些特殊情况下, 以上2种方法会无解, 例如当移动终端只能接收到1个或2个AP信息时或者是测距误差较大时。因此本文提出基于天牛须搜索^[17](Beetle Antennae Search, BAS)的测距定位算法, 是一种搜索逼近的方法。本方法不需要梯度信息, 不需要知道函数的具体形式即可实现高效寻优, 且云运算量大大降低。弥补了测距定位算法误差较大的缺陷以及在Wi-Fi环境下没有足够多AP的实际可应用性。

2.3 BAS-DSPM定位算法流程

在移动终端进行定位时本文使用天牛须搜索算法来优化定位结果, 天牛须是一种高效的智能优化算法。天牛须搜索原理是根据食物气味的强弱来觅食, 天牛有两只角, 如果右边触角收到的气味比左边触角收到的气味强度大, 那下一步天牛就往右边走, 否则就往左边走。这里的食物气味就相当于函数, 这个函数在任意维空间每个点值都不同, 天

牛两须可以采集自身附近两点的气味值, 天牛的目的是找到全局气味值最大的点。本文假设待定位终端为1只天牛, 待定位终端的具体位置就是天牛要寻找的食物, 根据无线信号的传播模型可计算出AP与待定位终端之间的距离, 作为目标函数, 假设在定位区域内待定位终端接收到 n 个AP的信号, 令 $f_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$, 其中 i 表示第 i 个AP节点, 则BAS的目标函数 F_i 为

$$F_i = \sum_{i=1}^n (f_i - d_i)^2 \quad (3)$$

其中, d_i 可以经过测量得到待定位终端与AP之间的RSS值, 利用式(2)计算出距离, 通过最优化目标函数的方式获取非线性方程组的最优解。目标函数 F_i 的极小值点则为要求解的定位坐标。

BAS-DSPM定位算法的具体优化步骤如下:

- 步骤1 待定位终端接收AP信号RSS;
- 步骤2 根据接收到的AP信号RSS, 利用式(2)求出待定位终端到达第 i 个AP的距离 d_i ;
- 步骤3 将距离 d_i 代入式(3);
- 步骤4 求函数 F_i , 假设待定位终端位置初始值 $\mathbf{A}$ 随机选取;
- 步骤5 在 k 维空间中, 待定位终端行走方向可表示为

$$\bar{t} = \frac{\text{rand}(k, 1)}{\text{norm}[\text{rand}(k, 1)]} \quad (4)$$

其中, $\text{rand}(k, 1)$ 为随机向量, 因为天牛头朝向是任意的, 因而从天牛左须指向右须的朝向也是任意的, 所以可以用一个随机向量表示下一步方向; k 表示维度, 本文研究的平面定位, 因此选取2维空间, 即 $k=2$ 。

- 步骤6 根据 $\bar{t}$ 确定待定位终端 $\mathbf{A}$ 的搜索方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_l &= \mathbf{A} + d_0 \times \bar{t}/2 \\ \mathbf{A}_r &= \mathbf{A} - d_0 \times \bar{t}/2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{A}$ 表示待定位终端的位置坐标 $[x, y]^T$; d_0 为两

须之间的距离; A_l 表示在搜寻区域内左须的位置, A_r 表示在搜寻区域内右须的位置;

步骤7 根据函数 F_i , 求取待定位终端左右两须气味强度, 确定下一步待定位终端的位置为

$$\mathbf{A} = \mathbf{A} - \text{step} \times \bar{l} \times \text{sign}(f(A_l) - f(A_r)) \quad (6)$$

其中, $f(A_l)$ 表示向左走, $f(A_r)$ 表示向右走; step 表示为步长, $\text{step} = c \times d_0$, c 是常数; sign 为符号函数, 如果 $f(A_l) < f(A_r)$, $\mathbf{A} = \mathbf{A} + \text{step} \times \bar{l} + l \times \text{rand}(k, 1)$, 即天牛向左须方向移动, 如果 $f(A_l) > f(A_r)$, $\mathbf{A} = \mathbf{A} - \text{step} \times \bar{l} + l \times \text{rand}(k, 1)$, 即天牛向右须方向移动; l 为随机行走步长;

步骤8 通过步骤7计算得出的 $\mathbf{A}^T$ 代入函数 F_i 中, 直至找到 F_i 的最优值;

当待定位终端只接收到1个AP信号时, 公式 $f_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$ 中的 i 取值为1, 其目标函数为: $F = (f_1 - d_1)^2$, 对该函数的求解与式(3)相同, 可以找到一个最优解。当有多个AP参与定位时, 将多个AP限定待定位终端(天牛)的走向, AP数量对定位结果的影响通过仿真结果进行分析。

3 仿真分析

3.1 实验设置

为了验证信号传播模型以及优化方法的性能, 使用MATLAB2016a编程工具对本文所提方法进行仿真分析, 在此过程中所使用的所有数据均来源于辽宁工程技术大学静远楼4楼西翼测试(testbed west), 平面图如图2所示。在这些公共区域内随机选取2个测试点(0, 0), (4, 4), 最多可获取4个AP的信号, 4个AP的位置为A(5, 5), B(5, -5), C(-5, 5), D(-5, -5)来验证算法的定位性能。

3.2 无线信号传播模型性能分析

3.2.1 DSPM性能分析

本文提出一种室内环境下的信号传播模型, 为了验证此信号传播模型的准确性, 分别在测试环境内选取距离AP为2 m, 4 m, 6 m的3个测试点, 在

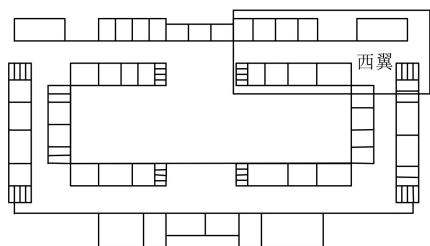


图2 测试场景

每个测试点连续采样100次, 测量时间间隔2 ms。根据得到的100个采样值利用2.2节中的式(2)估计出距离 d , 估计结果如图3所示。可以发现图3中每条曲线都呈现出一定的波动性, 这是因为同一位置上接收同一AP的无线信号会随时间发生变化, 导致100次测量结果有一定的差异。当选取的测试点距离AP为2 m时, 测量距离的平均误差为0.05 m; 当选取的测试点距离AP为4 m时, 测量距离的平均误差为0.36 m; 当选取的测试点距离AP为6 m时, 测量距离的平均误差为0.43 m。因此, 该测距模型的平均测量距离误差控制在1 m以内。

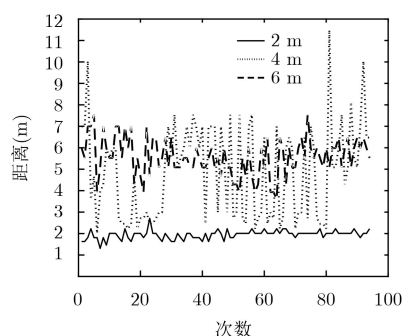


图3 DSPM测距结果值

在相同环境下, 利用经典的路径损耗模型得到的估计结果如图4所示, 每个测试点的平均误差分别为: 0.85 m, 1.14 m和3.22 m, 其中, 式(1)中参数 $d_0 = 1$, 单位为m; 路径损耗系数 $n = 3$ 。从图3和图4可以得出, 当接收端逐渐远离AP时, 两种信号传播模型的测量误差都在增大, 但本文所提DSPM准确率要优于对数-距离路径损耗模型。

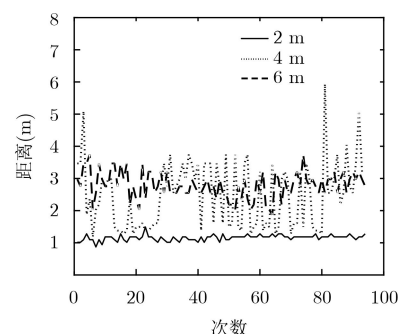


图4 式(1)测量结果值

3.2.2 改变DSPM参数对测量结果的影响

改变DSPM中的参数 p_1 , p_2 , p_3 和 p_4 值, 得到的测量结果如图5所示。其中, 图5(a)是随机改变参数 p_1 , p_2 , p_3 和 p_4 值, 当距离AP为2 m时, 测量距离的平均误差为0.17 m; 距离AP为4 m时, 测量距离的平均误差为1.62 m; 距离AP为6 m时, 测量距离

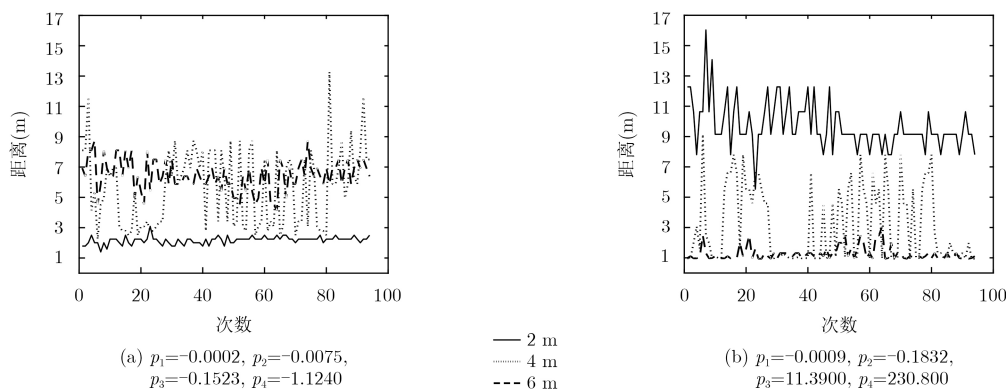


图5 改变DSPM参数后得到的测量结果

的平均误差为0.45 m, 图5(a)与图3相比误差变化不是很大。图5(b)是将教学楼教室内测得的模型参数用于教学楼走廊试验, 当距离AP为2 m时, 测量距离的平均误差为7.7 m; 距离AP为4 m时, 测量距离的平均误差为1.16 m; 距离AP为6 m时, 测量距离的平均误差为5.72 m, 误差较大, 因此要根据实际环境设置DSPM参数。

3.3 BAS-DSPM定位算法性能分析

BAS优化方法参数设置: 主要分析式(6)中参数step和 l 大小的选取, 以及AP数量对定位性能的影响。随机选取测试点连续定位100次, 最后对100次定位点取平均值作为最终测试点的位置。

(1) 步长的确定: 假设距离误差为0, 通过仿真实验确定步长step和 l 的值, 如图6所示。只有step取3时误差相对优于step取2和4, 当step=3时 $l=0.010$ 或 $l=0.120$ BAS优化误差相对较低。通过仿真可以得出, step和 l 的值与定位的覆盖区域有关, 如果定位区域在十几米以内天牛应该走小步, 覆盖区域上百米天牛应走大步, 但是Wi-Fi的通信范围一般在十几米内。因此本文仿真环境下step=3, $l=0.010$ 较为合适。

(2) 收敛速度: BAS测距定位算法收敛非常快, 通常在迭代10~30次后就基本可以收敛到最优位置, 达到较好的定位效果, 如图7所示。从图7(a)、

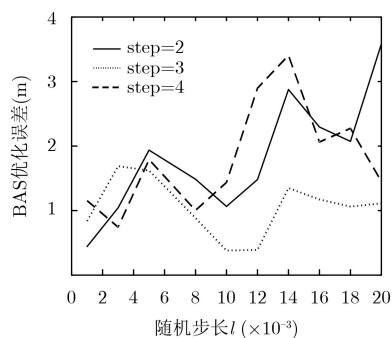
图6 不同step取值定位误差随随机步长 l 的变化

图7(b)中可以看出, 随机步长 l 值的选取对迭代次数影响不大, 收敛速度不会因步长变大而减慢, 步长只是对定位精度有一定的影响。

(3) AP数量对BAS-DSPM定位算法性能的影响: 基于测距的定位算法中, AP的数量是一个影响定位性能的重要参数, 如果AP数目少于3个将无法定位。本文通过仿真分析在不同AP数目时, DSPM误差对BAS优化结果的影响, 每个结果进行了100次定位实验取平均值, 如图8所示。其中横坐标表示DSPM误差, 在3.2节中通过对DSPM仿真得出, 该模型98%的定位结果误差都小于4 m, 因此横坐标限定为4; 纵坐标表示为优化误差。

图8中1AP选取参考点为A, 2AP选取参考点为

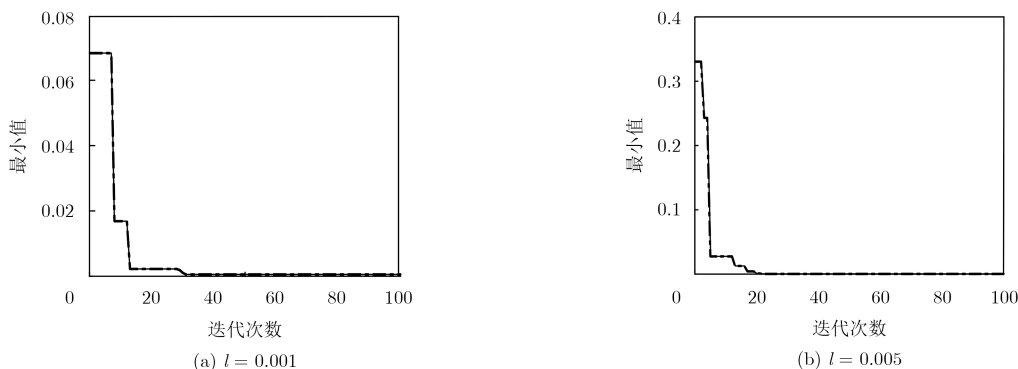


图7 收敛速度

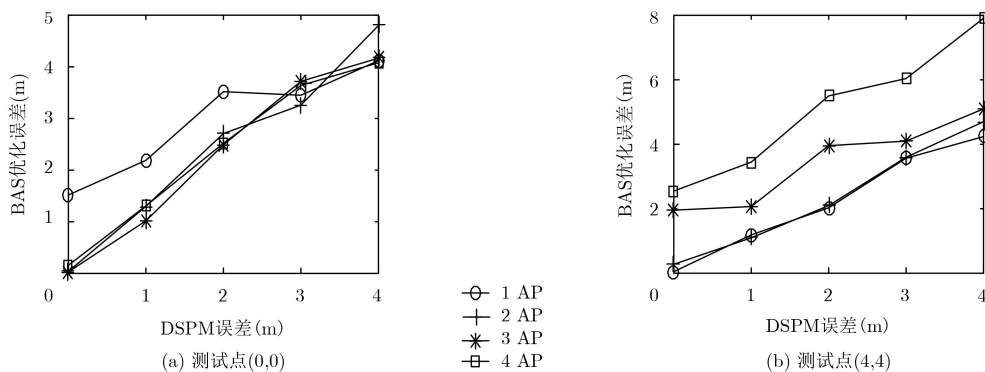


图8 不同AP数目的定位误差对比

A和B, 3AP选取参考点为A, B和C, 4AP选取的参考点为A, B, C和D。当测试点距离AP较近时, 定位误差较小, 如图8(a), 图8(b)中所示, 当只有1AP时, 测试点(4, 4)误差小于测试点(0, 0), 因此本文算法在选取参考点时首选最先收到的AP信号作为参考点。选取的AP点距测试点较远时, 虽然AP数量增加, 但是定位误差反而升高, 如图8(b)中3AP和4AP曲线所示, 并不是AP数量越多越好。由于Wi-Fi受通信距离的影响, 测试点距离AP越远接收到的信号越不稳定, 且受到的干扰也较大, 因此AP与测试点的距离以及AP自身的位置都会影响最终的定位效果, 关于AP位置的选取不在本文研究范围之内。

为了进一步测试BAS-DSPM定位算法的有效性, 与PSO(Particle Swarm Optimization-DSPM, PSO-DSPM)优化方法、PSO-经典测距模型方法进行对比, 结果如表1所示。从表1可知, BAS与PSO方法相比收敛速度大大提高, 是一种高效的智能优化方法, 较适用于移动终端的定位。在3.2节仿真分析中得出DSPM测距模型优于经典的测距模型, 因此BAS-DSPM和PSO-DSPM方法误差小于PSO-经典测距模型的误差, 当测试点距离AP为6 m时, 由图6可知利用经典测距模型测距误差3.22 m, 导致PSO-经典测距模型的误差较大。

3.4 算法时间复杂度分析

本文算法的时间复杂度由两部分组成, 即待定位节点与AP之间距离计算的时间复杂度和BAS优化的时间复杂度。假设定位区域内有 M 个定位节点, 则本文算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

证明 利用BAS算法进行优化时, 首先计算函数 F_i 的最优值, 假设迭代 n 次, 无论几个AP参与定位时间复杂度均为 $O(n)$; 其次, 为了提高定位结果的稳定性, 定位节点需要定位 m 次取平均值, 时间复杂度为 $O(n \times m)$ 。本文算法中令 $m = n$, 因此, BAS的时间复杂度为

$$O(n \times m + n) \approx O(n^2) \quad (7)$$

证毕

待定位节点与AP之间距离计算时间复杂度为 $O(M)$, 如果 M 个定位节点同时进行定位的, 时间复杂度为 $O(M \times n^2)$, 但对于每一个移动终端来说只需知道自身的位置。根据以上分析, 因此对于一个定位节点来说整个算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

4 结束语

本文提出了一种基于测距的普适室内定位方法, 实现简单且收敛速度极快, 对于每一个待定位的终端来说时间复杂度为 $O(n^2)$ 。本方法基于普通的移动终端设备, 利用室内空间中已部署的Wi-Fi网络, 移动终端设备通过软件可获取到各个AP的信号强度, 移动终端根据测量到的信号强度利用本文建立的信号传播模型计算出与AP之间的距离, 最后通过天牛须方法进行优化, 估计出移动终端的位置。实验结果表明, 本文算法只需要少量AP就可以实现较好的定位精度, 从待定位节点选取较近AP且测距模型误差为1 m时, 定位误差能够接近于1 m, 突破传统基于测距误差较大的问题, 因此本优化方法适合于普适的室内定位。但是本方法中的确定性测距模型还不能完全自适应, 下一步将研究

表1 本文算法与经典算法对比

	真实位置	测量位置	误差(m)	收敛速度
BAS-DSPM	(0, 0)	(0.7123, 1.4437)	1.6098	迭代27次趋于平稳
PSO-DSPM	(0, 0)	(1.3654, -1.8031)	2.2617	迭代108次趋于平稳
PSO-经典测距模型	(0, 0)	(-2.0462, 3.4623)	4.0217	迭代98次趋于平稳

一种自适应的测距模型, 为测距定位在普适定位中应用做准备。

参 考 文 献

- [1] MA Lin and XU Yubin. Received signal strength recovery in green WLAN indoor positioning system using singular value thresholding[J]. *Sensors*, 2015, 15(1): 1292–1311. doi: [10.3390/s150101292](https://doi.org/10.3390/s150101292).
- [2] SEN S, LEE J, KIM K H, *et al.* Avoiding multipath to revive inbuilding WiFi localization[C]. Proceedings of ACM 11th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, Taipei, China, 2013: 249–262. doi: [10.1145/2462456.2464463](https://doi.org/10.1145/2462456.2464463).
- [3] 陈冰, 杨小玲. 一种基于概率密度的WLAN接入点定位的算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 855–862. doi: [10.11999/JEIT140661](https://doi.org/10.11999/JEIT140661).
CHEN Bing and YANG Xiaoling. A WLAN access point localization algorithm based on probability density[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 855–862. doi: [10.11999/JEIT140661](https://doi.org/10.11999/JEIT140661).
- [4] 钱志鸿, 孙大洋, LEUNG V. 无线网络定位综述[J]. 计算机学报, 2016, 39(6): 1237–1256. doi: [10.11897/SP.J.1016.2016.01237](https://doi.org/10.11897/SP.J.1016.2016.01237).
QIAN Zhihong, SUN Dayang, and LEUNG V. A survey on localization model in wireless networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(6): 1237–1256. doi: [10.11897/SP.J.1016.2016.01237](https://doi.org/10.11897/SP.J.1016.2016.01237).
- [5] BAHL P and PADMANABHAN V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[C]. Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Tel Aviv, Israel, 2000: 775–784. doi: [10.1109/INFCOM.2000.832252](https://doi.org/10.1109/INFCOM.2000.832252).
- [6] 陈岭, 许晓龙, 杨清, 等. 基于三次样条插值的无线信号强度衰减模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(9): 1521–1527, 1538. doi: [10.3785/j.issn.1008-973X.2011.09.003](https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-973X.2011.09.003).
CHEN Ling, XU Xiaolong, YANG Qing, *et al.* Wireless signal strength propagation model base on cubic spline interpolation[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2011, 45(9): 1521–1527, 1538. doi: [10.3785/j.issn.1008-973X.2011.09.003](https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-973X.2011.09.003).
- [7] LIM H, KUNG L C, HOU J C, *et al.* Zero-Configuration indoor localization over IEEE 802.11 wireless infrastructure[J]. *Wireless Networks*, 2010, 16(2): 405–420. doi: [10.1007/s11276-008-0140-3](https://doi.org/10.1007/s11276-008-0140-3).
- [8] JI Yiming, BIAZ S, PANDEY S, *et al.* ARIADNE: A dynamic indoor signal map construction and localization system[C]. Proceedings of the 4th ACM International Conference on Mobile Systems, Applications and Services, Uppsala, Sweden, 2006: 151–164. doi: [10.1145/1134680.1134697](https://doi.org/10.1145/1134680.1134697).
- [9] JUN J, HE Liang, GU Yu, *et al.* Low-overhead WiFi fingerprinting[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, 17(3): 590–603. doi: [10.1109/TMC.2017.2737426](https://doi.org/10.1109/TMC.2017.2737426).
- [10] ZOU Han, JIN Ming, JIANG Hao, *et al.* WinIPS: WiFi-based non-Intrusive indoor positioning system with online radio map construction and adaptation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(12): 8118–8130. doi: [10.1109/TWC.2017.2757472](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2757472).
- [11] WU Chenshu, YANG Zheng, and XIAO Chaowei. Automatic radio map adaptation for indoor localization using smartphones[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, 17(3): 517–528. doi: [10.1109/TMC.2017.2737004](https://doi.org/10.1109/TMC.2017.2737004).
- [12] AHN J and HAN D. Crowd-assisted radio map construction for Wi-Fi positioning systems[C]. Proceedings of 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sapporo, Japan, 2017: 1–8. doi: [10.1109/IPIN.2017.8115872](https://doi.org/10.1109/IPIN.2017.8115872).
- [13] LI Qiyue, LI Wei, SUN Wei, *et al.* Fingerprint and assistant nodes based Wi-Fi localization in complex indoor environment[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 2993–3004. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2579879](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2579879).
- [14] ZHANG Wei, HUA Xianghong, YU Kegen, *et al.* Domain clustering based WiFi indoor positioning algorithm[C]. Proceedings of 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Alcalá de Henares, Spain, 2016: 1–5. doi: [10.1109/IPIN.2016.7743641](https://doi.org/10.1109/IPIN.2016.7743641).
- [15] 王硕朋, 杨鹏, 孙昊. 基于声音位置指纹的室内声源定位方法[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(2): 224–229.
WANG Shuopeng, YANG Peng, and SUN Hao. Indoor sound-position fingerprint method based on scenario analysis[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(2): 224–229.
- [16] 刘影, 贾迪, 王和章. 复杂环境下基于CFSFDP的自适应室内定位方法[J]. 信号处理, 2018, 34(4): 465–475.
LIU Ying, JIA Di, and WANG Hezhang. Adaptive indoor localization algorithm of based on CFSFDP in complex environment[J]. *Journal of Signal Processing*, 2018, 34(4): 465–475.
- [17] JIANG Xiangyuan and LI Shuai. BAS: Beetle antennae search algorithm for optimization problems[J]. arXiv: 1710.10724, 2017.

刘 影: 女, 1983年生, 讲师, 研究方向为无线定位、非接触式物体识别。

钱志鸿: 男, 1957年生, 教授、博士生导师, 研究方向为基于物联网, D2D, Wi-Fi, RFID等无线网络与通信技术。

贾 迪: 男, 1982年生, 副教授, 研究方向为图像处理、计算机视觉及模式识别。