



● ISSN 0254-4164

● CODEN JIXUDT

计算机学报

CHINESE JOURNAL OF COMPUTERS

第45卷 Vol.45

第3期 No.3



2022.3

● 中国计算机学会 中国科学院计算技术研究所 主办

● 科学出版社 出版

计 算 机 学 报

(JISUANJI XUEBAO)

第 45 卷 第 3 期 2022 年 3 月

目 次

深度神经网络 FPGA 设计进展、实现与展望·····	焦李成 孙其功 杨育婷 冯雨歆 李秀芳 (441)
区块链赋能物联网中联合资源分配与控制的智能计算迁移研究 ·····	
·····	陈思光 王 倩 张海君 王 堃 (472)
一种基于综合匹配度的边缘计算系统任务调度方法 ·····	
·····	郑守建 彭晓晖 王一帆 任祖杰 高 丰 (485)
丝路文化虚拟体验中的多视角立体重建技术研究 ·····	李兆歆 蒋 浩 刘衍青 王兆其 (500)
一种基于自演化预训练的多变量时间序列预测算法 ·····	
·····	万 晨 李文中 丁望祥 张治杰 叶保留 陆桑璐 (513)
CPM-MCHM: 一种基于极大团和哈希表的空间并置模式挖掘算法 ···	张绍雪 王丽珍 陈文和 (526)
食品图像识别方法综述 ·····	闵巍庆 刘林虎 刘宇昕 罗梦江 蒋树强 (542)
基于精确时间测量的无线网络室内定位系统研究 ·····	
·····	唐翔宇 张千里 王继龙 沈钰晨 张超凡 (567)
三维模板跟踪的基准合成数据集构建及算法评估 ·····	
·····	何 弦 李佳宸 金 立 刘 力 钟 凡 秦学英 (585)
流行病数据可视分析综述·····	孙国道 杨雨璠 潘 翔 梁荣华 (601)
知识蒸馏研究综述 ·····	黄震华 杨顺志 林 威 倪 娟 孙圣力 陈运文 汤 庸 (624)
人在回路的数据融合系统·····	孙 佶 李国良 (654)

CHINESE JOURNAL OF COMPUTERS

Vol.45 No.3 March 2022

CONTENTS

Development, Implementation and Prospect of FPGA-Based Deep Neural Networks

..... *JIAO Li-Cheng et al.* (441)

Resource Allocation and Control Co-aware Smart Computation Offloading for Blockchain-Enabled IoT

..... *CHEN Si-Guang et al.* (472)

An Integrative Matching Degree Based Task Scheduling Method for Edge Computing System

..... *ZHENG Shou-Jian et al.* (485)

Research on Multi-View Stereo 3D Reconstruction in Virtual Reality System of Silk Road Cultural Inheritance

..... *LI Zhao-Xin et al.* (500)

A Multivariate Time Series Forecasting Algorithm Based on Self-Evolution and Pre-training

..... *WAN Chen et al.* (513)

CPM-MCHM: A Spatial Co-location Pattern Mining Algorithm Based on Maximal Clique and Hash Map

..... *ZHANG Shao-Xue et al.* (526)

A Survey on Food Image Recognition *MIN Wei-Qing et al.* (542)

Research on Indoor Positioning System Based on Wireless Network Fine Time Measurement Technology

..... *TANG Xiang-yu et al.* (567)

A Synthetic Dataset and Performance Evaluation for 3D Template Tracking *HE Xian et al.* (585)

A Survey on Visual Analysis of Epidemic Data..... *SUN Guo-Dao et al.* (601)

Knowledge Distillation: A Survey *HUANG Zhen-Hua et al.* (624)

Human-in-the-Loop Data Integration System *SUN Ji et al.* (654)

基于精确时间测量的无线网络室内定位系统研究

唐翔宇 张千里 王继龙 沈钰晨 张超凡

(清华大学网络科学与网络空间研究院 北京 100084)

摘 要 随着 IEEE 802.11-2016 协议 (也称为 802.11mc) 的精确时间测量 (FTM) 定位解决方案的引入, 通过 RTT 往返时间来进行测距并进行定位的技术路线正在得到重视. 目前提出的基于 FTM 的测距方案测距精度在视线环境下通常具有 1~2 m 的偏移误差, 由于在 802.11mc 中, 噪音不具备高斯性, 精度的进一步提升存在着较大困难, 进而导致定位精度达不到米级. 本文选用了成本仅在数百元量级的市场设备搭建室内定位系统, 提出了一种新的单目标网络定位方案——基于极大似然估计与核密度估计的可扩展贝叶斯定位算法 (MLKB). 该算法首先利用核密度估计法对测距数据集进行预处理, 再对室内 AP 测距结果小于 10 m 的数据进行线性拟合, 将拟合后的测距结果代入基于紧邻 AP 策略的线性最小二乘法作为粗定位结果, 定义基于极大似然估计的目标函数, 最后利用贝叶斯算法迭代得到最终的预测位置. 本文基于 Wi-Fi FTM Linux Tool 开源工具实现了 FTM 测距、定位模块并验证了其精度. 通过在室内视线环境和非视线环境下进行实验, 结果表明在室内 LOS 环境下, MLKB 算法可达到最高 62% 的米级定位精度, 在强 NLOS 环境下可达到 41% 的米级定位精度, 相比朴素贝叶斯算法在 LOS 和强 NLOS 环境下的米级精度分别提高 43% 和 17%. 在仅使用 4 个 AP 协同室内单目标定位的条件下, 同近年先进研究成果运用的定位算法相比, MLKB 算法在不同环境下具有良好的泛化能力, 总平均定位精度能达到 1.5 m 以内, 平均米级定位精度数据占比达到了 45%, 定位效果均优于各种常见的定位算法.

关键词 802.11mc; 无线网络; 室内定位; 精确时间测量技术; 定位算法

中图法分类号 TP393 DOI 号 10.11897/SP.J.1016.2022.00567

Research on Indoor Positioning System Based on Wireless Network Fine Time Measurement Technology

TANG Xiang-Yu ZHANG Qian-Li WANG Ji-Long SHEN Zheng-Chen ZHANG Chao-Fan

(Institute for Network sciences and cyberspace, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract With the rapid development of the Internet, location information plays a more and more important role in our daily life. Many emerging applications, such as augmented reality, navigation, and body tracking, rely heavily on location information. Accurate positioning is the key to their success. Compared with outdoor positioning, indoor positioning is much more difficult to achieve meter level accuracy. First of all, there are many interference factors in indoor space, such as walls, people or furniture. Moreover, wireless signal attenuation, reflection, scattering and multipath effect make the positioning in wireless network harder. Finally, client support is also an important consideration. Although some indoor positioning technologies have claimed to achieve high accuracy, they are often limited to special equipment, which makes it infeasible for wide deployment. Also there are quite a few solutions that are restricted to specific environments, or require a lot of offline fingerprint collection beforehand. In this paper, a novel

收稿日期: 2020-08-28; 在线发布日期: 2021-07-13. 本课题得到国家重点研发计划项目“全球位置信息叠加协议与位置服务网技术”课题三“全球一致的室内外无缝剖分位置编码与IPv6映射”(2017YFB0503703)的资助. 唐翔宇, 硕士研究生, 主要研究领域为位置网与室内定位. E-mail: tang-xy20@mails.tsinghua.edu.cn. 张千里(通信作者), 博士, 副研究员, 主要研究领域为下一代互联网体系结构、网络安全等. Email: zhang@cernet.edu.cn. 王继龙, 博士, 教授, 主要研究领域为下一代互联网体系结构、网络测绘等. 沈钰晨, 硕士研究生, 主要研究领域为位置隐私. 张超凡, 硕士研究生, 主要研究领域为SRv6的应用.

approach based on IEEE 802.11-2016 protocol (also known as 802.11 MC) Fine Time Measurement (FTM) positioning solution is suggested. Though there have been previous researches based on FTM ranging and poisoning schemes, they are usually of low ranging accuracy. In line of sight, it usually has an error of 1-2m. Since noise is not Gaussian in 802.11 MC, it is difficult to further improve the accuracy, which leads to a positioning accuracy larger than meter level. In this paper, a new extensible single target network positioning scheme, MLKB based on maximum likelihood estimation and kernel density estimation, is proposed by using commodity equipment less than one hundred US dollars. The algorithm firstly uses kernel density estimation method to preprocess the range data sets, and then uses linear fitting to correct the data if the result of the indoor AP ranging is less than 10 m. A coarse positioning result will be achieved by linear least squares fitting based on the adjacent AP strategy. We design and mathematically prove the objective function based on maximum likelihood estimation. The ranging variance is used as a weight of the “contribution” of AP according to the fluctuation of the ranging results. Finally we use an optimization algorithm such as Bayesian Algorithm, to iteratively optimize the objective function to achieve the final result. FTM ranging and positioning module is implemented based on FTM Linux Tool and its accuracy is verified. Through experiments in indoor line-of-sight environment and non-line-of-sight environment, the results show that the MLKB algorithm can achieve the meter-level accuracy of 62% in the indoor LOS environment and 41% in the strong NLOS environment, which are 43% and 17% higher than the naive Bayesian algorithm in the LOS and strong NLOS environments, respectively. Under the condition of using only 4 AP coordinated indoor single target positioning, compared with the state-of-the-art localization research, the MLKB algorithm has good generalization ability in different environments, the total average positioning accuracy can reach within 1.5m, the average meter-level positioning accuracy data accounts for 45%, and the positioning accuracy is better than other known FTM based positioning algorithms.

Keywords 802.11 MC; Wireless networks; Indoor localization; FTM; Localization algorithm

1 引 言

随着互联网的高速发展, 位置信息在我们的日常生活中发挥着越来越重要的作用. 许多新兴的应用如增强现实、导航和人体跟踪等, 都严重依赖于位置信息, 准确的定位是这些应用成功的关键. 与室外定位相比, 室内定位实现难度要高很多. 首先, 室内空间中存在许多的干扰物和干扰因素, 如各种墙体、隔断、人或是各种家具陈设等干扰物, 以及无线信号衰减、反射、散射和多径效应等干扰因素. 其次, 客户端的支持也是一个重要的考虑点, 一些室内定位技术虽然具有较高的精度, 但是常常需要特殊设备支持, 也影响了这些技术的广泛部署. 目前一些定位算法虽然能够达到较高精度, 但其只针对特定环境, 可扩展性差, 或者需要准备大量的离线数据采集, 因此实际应用价值不大.

无线局域网 (Wireless Local Area Network, WLAN) 已经应用于各行各业, 而且具有广泛的设备支持. 如果能够实现精确的室内定位, 将大大有

利于发展室内定位相关的服务、监测和追踪任务. 目前 IEEE 802.11-2016 协议^[1] (也称为 802.11mc) 中提供了一种基于往返时间 (Round Trip Time, RTT) 的精确时间测量方案 (Fine Time Measurement, FTM). 根据该方案实现的测距模块原理上能提供米级精度的测量结果, 由于是无线网络标准中的一部分, 基于 802.11mc 的定位技术具有较好的应用前景.

然而该定位技术出现不久^[2], 实验表明由于测距的误差非简单高斯^[3]等原因, 使用普通商业化产品, 进行实际场所的米级精度定位, 仍然是一个有待解决的研究课题. 室内复杂的多径环境, 导致 FTM 方案测距误差通常在 1~2 米甚至更高, 而测距精度效果好坏将会直接影响定位精度效果. Google 公司于 2019 年 4 月发布的一款可以利用 Wi-Fi 来进行室内定位的应用程序 Wi-Fi RTT Scan App^[4], 精度仅能达到 1~2 米.

本文主要围绕室内场景下的基于 FTM 精确时间测量的无线网络定位技术展开研究, 提出一套单目标网络定位解决方案——基于极大似然估计与核

密度估计的可扩展贝叶斯定位算法(Maximum Likelihood and Kernel Density Estimation - Extensible Bayesian Algorithm, MLKB). 该方案利用市场通用的家用无线路由器作为 Access Point(AP)搭建 FTM 测距模块,对 AP 的测距数据进行了采集,并对 FTM 测量米级精度效果进行了验证. 将最终的测距结果数据集通过核密度估计优化以及线性拟合纠正后,利用基于极大似然估计的贝叶斯算法进行定位,实验结果表明在室内视线环境下,相比未经数据处理优化的贝叶斯算法米级定位精度提升约 43%,相比线性最小二乘法、牛顿迭代法、模拟退火算法的米级定位精度均提高了 43%左右. 此外 MLKB 算法可在室内视线 (Line of sight, LOS) 环境和强非视线 (Not Line of sight, NLOS) 环境下分别达到最高 62%和 41%的米级定位精度.

本文的主要贡献如下:(1)采用市场常见的通用型设备与开源平台工具实现了 FTM 测距模块,设备成本仅在数百元量级,同时验证了在室内 LOS 场景下接近 50%的数据能达到米级精度测距效果;(2)设计一套新的可扩展单目标网络室内定位方案 MLKB,该方案结合了多种算法优化 FTM 测距数据集并提高定位精度,利用真实室内场景下搜集的数据集对 MLKB 进行验证评估,证明了 MLKB 在不同室内场景下具有良好的泛化能力;(3)将 MLKB 算法和室内常见定位算法的定位精度进行了对比,在仅有 4AP 的限制条件下,MLKB 算法在室内 LOS 环境可达到 62%的米级定位精度,效果优于本文提及的所有定位算法,定位精度相比朴素贝叶斯算法定位精度提升 43%,且在相同数据集下的定位效果优于 2018 年 Mobicom^[5]中提到的标准非线性迭代最小二乘定位算法 43%.

本文接下来的结构与内容安排如下:第 2 节将主要围绕无线网络定位的国内外研究现状展开介绍;第 3 节介绍 FTM 测距与定位算法原理;第 4 节介绍 MLKB 算法方案的核心设计思想;第 5 节介绍 MLKB 系统的设计与实现;第 6 节介绍 MLKB 系统的定位精度评估方案.第 7 节结束语进一步总结全文并对未来工作提出展望.

2 国内外相关工作

目前室内定位技术研究方向主要包括了 Wi-Fi^[6]、蓝牙^[7]、地磁^[8]、RFIDs^[9]、超宽带^[10]、超声波^[11]、红外光^[12]、ZigBee^[13]、可见光^[14]等,不同技术的定位性能以及规模化部署难易程度如图 1 所示. 尽管诸如激光、超宽带等技术达到了较高的定

位精度,但由于这些方案的特殊配置或者高成本部署使它们难以扩展和推广.

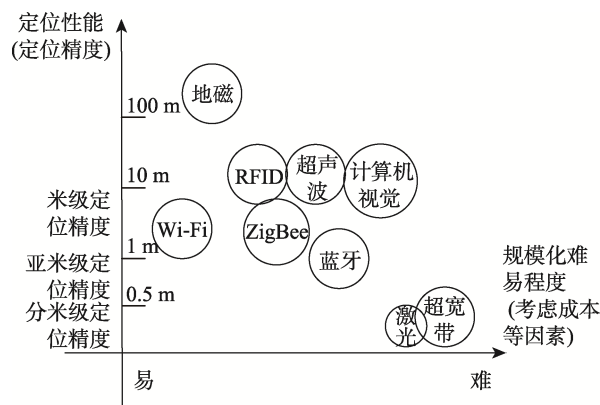


图 1 考察基于定位精度和普及性的室内定位技术类型分类

目前基于 Wi-Fi 的室内定位技术主要分为了基于 RSSI 测量^[15-16]、位置指纹定位^[17]、基于信号到达角度 AOA 测量^[18-19]、基于时间 TOA 测量^[20-21]等研究方案. 文献[22]对无线网络定位的技术理论研究做了比较全面的总结. 文献[23]对 RSS 接收信号强度的 WLAN 室内定位做了详细讨论,重点分析室内位置指纹定位算法并对算法进行一系列改进,该算法需要经过繁琐的数据采集建立指纹数据库. 在应用上已经出现了相关的专利成果^[24],其通过分析无线网络设备信号强度或者信噪比来推断目标物体的位置. 文献[25]提出了一种基于 RTT 的 TOA 方法,在不使用额外硬件的情况下估计 WLAN 节点之间的距离,测距精度达到 8m. 文献[26]基于 RTT 测量方法,利用可用的 44MHz 的 WLAN 网卡时钟达到 1m 的精度. 文献[27]针对 AOA 方案识别出 LOS 路径作为测距结果来进行定位并实现了 40cm 精度. 在基于时间测量的方案中,文献[28]通过对硬件/固件修改来克服粗略的 ToF 估计方法,实现了 2m 以内的定位精度. 在这些研究中,通常需要专用的硬件测量设备支持^[18,27-28],或者需要对测试环境进行指纹采集^[17,23],这些要求限制了它们的应用范围.

在基于 802.11mc 的精确时间测量方案中,FTM 的测距精度通常在 1~2m^[4],要达到 1m 以下甚至更高的定位精度仍然十分具有挑战性. 文献^[4]针对 FTM 的室内定位介绍了一种“频率多样化”的方法,比较了多种定位算法,利用贝叶斯网格更新算法将室内定位精度提高了一倍. 文献[5]在开源平台上针对 FTM 测量方法进行了验证,提出在 LOS 环境下,采用 5GHz 频段与 80MHz 带宽下,通过密集 AP 部

署才能实现米级精度测距,但在距离 20m 外的 NLOS 环境下测距结果则会变得极不可靠.文献[29]介绍了一种基于线性卡尔曼滤波的定位引擎 (Positioning Engine, PE) 和延时测量数据库,该数据库包括在室内 Wi-Fi 场所收集的精确时间测量 (FTM) 时间戳.可用于被动、延时、可扩展的 Wi-Fi 定位系统的开发和性能评价.文献[30]提出了一种基于无迹卡尔曼滤波的航迹推算算法,将 Wi-Fi FTM 的结果与多传感器相结合.文献[31]将 Wi-Fi FTM 测距应用于对运动车辆之间的距离估计问题,开发了一种使用局部多项式平滑车辆运动的距离估计算法.文献[32]将 Wi-Fi FTM 和惯性传感器与扩展的卡尔曼滤波器相互结合以达到优势互补的效果,提出 INS 融合模型.在文献[33]中,作者提出了一种基于广播的 FTM 网络传感器协同工作协议,客户可以通过被动接收传感器之间交换的时间测量值来估计和跟踪自己的位置.文献[34]利用 FTM 定位和 KKT 约束搜集客户端的历史信息,提出了一种基于联合定位的虚拟客户端 (Virtual Positioning Clients, VPC) 方法来共同优化客户的位置,将实时位置估计问题转化为考虑多个 VPC 的组合位置优化问题,最终利用 8 个 AP 达到了 80% 的米级定位精度.

综上所述,FTM 定位精度在室外空旷环境下通过误差校准才一定程度上达到米级精度的测距^[5].但在室内存在复杂的多径效应的环境下,FTM 定位性能并不能达到室外环境下令人满意的测距精度.现有的大部分基于 FTM 的定位技术研究专注于提高室内定位精度,通过结合大量 AP^{[5][34]}、惯性传感器^{[30][32-33]}、构建指纹数据库^[29]、客户端历史行为信息^[34]等方法在某一特定的室内环境下能达到令人欣慰的定位效果.但由于室内环境的复杂性和设备特殊性、前期数据采集工作量大等因素导致了适用场景有限而无法大规模普及或者投入商业使用.

与以上研究相比,本文采用成本仅在数百元量级的市场设备和具备 FTM 功能的无线网卡搭建室内定位系统,在 AP 数目有限的情况下尽可能提高定位精度并达到“性价比高”且令人满意的效果.

3 FTM 测距与定位方法原理

3.1 FTM测距工作原理

FTM 模块,即精确时间测量模块,该模块基于 IEEE 802.11-2016 协议中提供的一种基于往返时间 RTT 的精确时间测量方案进行实现.目前根据该方案实现的测距模块经过固定误差校准后在 LOS 环境下能提供米级精度的测量结果.图 2 主要描述了

802.11mc 协议的 FTM 大致工作原理.其中 Station (STA)是主要用于向无线接入点 AP 发送 FTM 请求的基站,AP 通常指接受 FTM 请求并发送 FTM 响应的无线网络接入点.当 STA 向 AP 发送 FTM 请求时,AP 基于协议响应是否同意或拒绝 FTM 测距过程.

在达成协议之后,AP 开始发送 FTM 消息并等待 STA 返回 ACK,STA 基于 FTM 消息发送的时间戳和 ACK 的接收时间戳来估计往返时间 RTT. AP 可以发送多条 FTM 消息,但必须等待收到 STA 发回的 ACK 包后才能继续发送新的 FTM 消息.图 2 中展示了一个 Burst 过程中带有多条 FTM 消息 (显示出其中的两条) 且设置 ASAP 模式为 1 的示例.

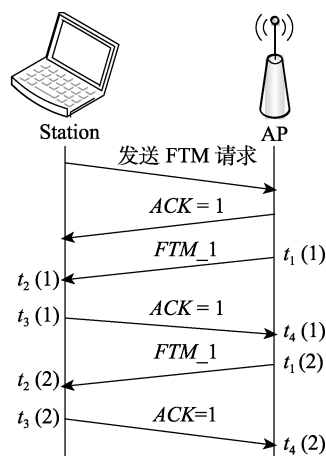


图 2 802.11mc 协议 FTM 原理

对于多条 FTM 消息,RTT 的计算方法如下:

$$RTT = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n t_4(k) - \sum_{k=1}^n t_1(k) \right) - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n t_3(k) - \sum_{k=1}^n t_2(k) \right) \quad (1)$$

一般来说,协议通过计算从 AP 端的总往返时间 ($t_4 - t_1$) 减去 STA 的处理时间 ($t_3 - t_2$),即可得到一次 FTM 消息的往返时间.每次进行 FTM 消息交换都重复此计算,最终的 RTT 即为消息往返时间平均值.

3.2 常见定位算法核心思想

本文主要针对室内定位模型中的单目标网络定位模型 (见图 3) 进行测距与定位.在已经获得 STA 到 AP 的测量距离的基础上,增加 AP 的数量 (利用尽可能少的 AP) 使之满足单目标定位条件,算法的目标是在已知各个 AP 的位置坐标和其分别到 STA 的测量距离的条件下,求出待定位 STA 的位置坐标.本节主要讨论常见定位算法原理以及核心思想,包括线性最小二乘法、牛顿迭代法、模拟退火算法和贝叶斯优化算法.

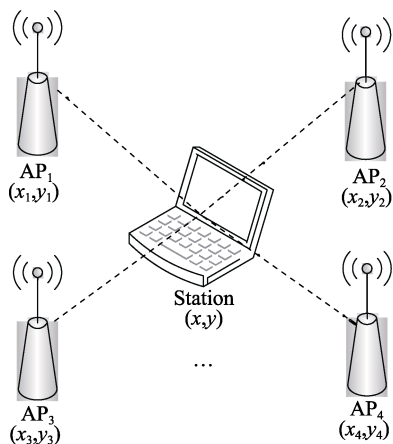


图3 单目标网络定位模型

3.2.1 线性与非线性迭代最小二乘法

线性最小二乘法（Linear Least Squares, LLS）是一种数学优化技术^[22]，使得获得的数据与实际数据之间的平方和最小。它通过最小化数据间误差的平方和来寻找数据的最佳拟合函数。在实际运用时，根据 AP 的数量列出方程组，再将 AP 位置坐标、测量距离等信息代入正规方程矩阵中，即可求出未知点的测量坐标。

非线性的迭代最小二乘法^[35]，也称为牛顿迭代法（Newton），是在线性最小二乘法的基础上的进一步优化，其基本思路是将非线性方程 $f(x)=0$ 转化为线性方程进行迭代求解。在室内定位的应用场景下，需要求出未知点的位置坐标，则待求参数至少包含两个及以上，转化为数学问题则是利用牛顿迭代法对多元非线性方程进行求解。此外，由于初始点的选取将很大程度影响牛顿迭代法的收敛效果，如果初始点与根距离较远，则算法可能会发散。

3.2.2 模拟退火算法

模拟退火（Simulated Annealing, SA）是一种贪心算法^[36]，根据热力学原理，在温度为 T 时，出现能量差降温的概率见公式（2），即可确定出往峰值下坡方向移动的概率：

$$p(\Delta E) = e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (2)$$

上述公式是在金属冶金过程中的应用概率公式，对应于模拟退火算法，即假设现在位于位置 x_0 ，此时随机发生一个位移到达 $x_0 + \Delta x$ ，当发生位移后因变量 $y|_{x=x_0+\Delta x}$ 小于原来的 $y|_{x=x_0}$ ，则接受位移的概率如下：

$$p(\Delta x) = e^{-\frac{\Delta x}{T}} \quad \left(\text{if } y|_{x=x_0+\Delta x} < y|_{x=x_0} \right) \quad (3)$$

其中 T 是模拟退火算法中设置的参数。如果 $y|_{x=x_0+\Delta x} > y|_{x=x_0}$ ，那么位移被接受，对应的 $p(\Delta x)=1$ 。

3.2.3 贝叶斯优化算法

贝叶斯优化（Bayesian）是一种逼近思想，当计算非常复杂、迭代次数较高时能起到很好的效果，多用于超参数确定。其基本思路是利用贝叶斯定理，基于数据估计目标函数的后验分布，然后根据分布选择下一个样本的超参数组合。考虑到误差的异常性质，贝叶斯估计非常适合在单目标网络的距离测量中预测位置^[4]。这也是本文的 MLKB 算法选择贝叶斯作为迭代定位算法的主要原因。

贝叶斯优化的流程图见图4。贝叶斯优化包含先验函数（Prior Function, PF）和采集函数（Acquisition Function, AC）两个核心过程^[37]。PF 主要利用高斯过程回归；AC 主要包括 EI, PI, UCB 这几种方法，同时开发与探索的平衡，也是通过 AC 来完成的。

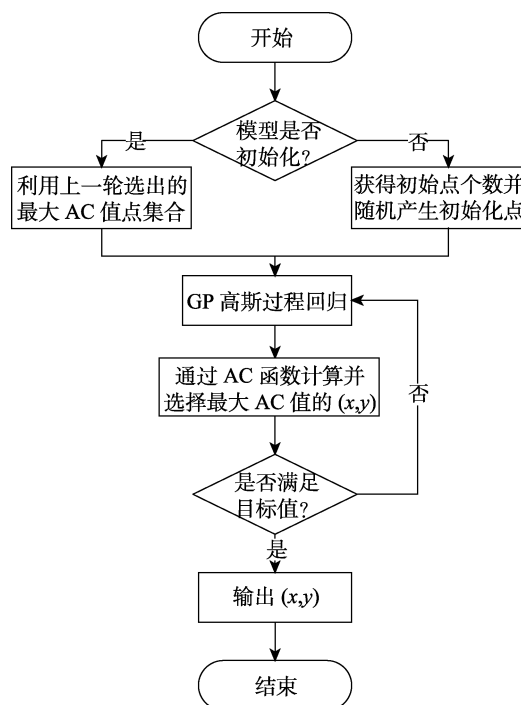


图4 贝叶斯优化算法流程图

4 MLKB 算法方案设计

本文设计了一种新的单目标无线网络室内定位方案——基于极大似然估计与核密度估计的可扩展贝叶斯定位算法 MLKB（Maximum Likelihood and Kernel Density Estimation-Extensible Bayesian Algorithm），该方案的工作流程图如图5所示。

MLKB 首先利用核密度估计法对 FTM 测距模块搜集的数据集进行预处理，输出各个 AP 到 STA 的测量距离，其次对室内 AP 测距结果小于 10m 的

《计算机学报》编辑委员会

The Editorial Board of Chinese Journal of Computers

主 编 Editor-in-Chief 孙凝晖 SUN Ning-Hui

副主编 Associate Editors-in-Chief

陈熙霖 CHEN Xi-Lin 冯登国 FENG Deng-Guo 金 芝 JIN Zhi

林 闯 LIN Chuang 周傲英 ZHOU Ao-Ying

委 员 Members

陈贵海 CHEN Gui-Hai

陈克非 CHEN Ke-Fei

程学旗 CHENG Xue-Qi

范玉顺 FAN Yu-Shun

方滨兴 FANG Bin-Xing

傅育熙 FU Yu-Xi

高 文 GAO Wen

韩燕波 HAN Yan-Bo

何新贵 HE Xin-Gui

胡事民 HU Shi-Min

华庆一 HUA Qing-Yi

怀进鹏 HUAI Jin-Peng

黄继武 HUANG Ji-Wu

蒋昌俊 JIANG Chang-Jun

蒋巍川 JIANG Yi-Chuan

焦李成 JIAO Li-Cheng

金 海 JIN Hai

李德毅 LI De-Yi

李 刚 LI Gang

李国杰 LI Guo-Jie

李建中 LI Jian-Zhong

李克秋 LI Ke-Qiu

李 未 LI Wei

李晓明 LI Xiao-Ming

李忠诚 LI Zhong-Cheng

林惠民 LIN Hui-Min

刘大有 LIU Da-You

刘云浩 LIU Yun-Hao

刘志勇 LIU Zhi-Yong

卢汉清 LU Han-Qing

卢锡城 LU Xi-Cheng

陆汝铃 LU Ru-Qian

吕 建 LV Jian

罗军舟 LUO Jun-Zhou

马建峰 MA Jian-Feng

梅 宏 MEI Hong

孟 丹 MENG Dan

孟祥旭 MENG Xiang-Xu

闵革勇 MIN Ge-Yong

钮心忻 NIU Xin-Xin

欧阳彤 OUYANG Dan-Tong

潘启敬 PAN Qi-Jing

潘云鹤 PAN Yun-He

潘志庚 PAN Zhi-Geng

彭群生 PENG Qun-Sheng

钱德沛 QIAN De-Pei

瞿裕忠 QU Yu-Zhong

沈向洋 SHEN Xiang-Yang

沈绪榜 SHEN Xu-Bang

史忠植 SHI Zhong-Zhi

舒继武 SHU Ji-Wu

苏金树 SU Jin-Shu

谭铁牛 TAN Tie-Niu

唐志敏 TANG Zhi-Min

田 捷 TIAN Jie

王国胤 WANG Guo-Yin

王怀民 WANG Huai-Min

王 戟 WANG Ji

王 珊 WANG Shan

王兴伟 WANG Xing-Wei

吴建平 WU Jian-Ping

肖建国 XIAO Jian-Guo

许 进 XU Jin

杨学军 YANG Xue-Jun

杨义先 YANG Yi-Xian

于 戈 YU Ge

于 剑 YU Jian

查红彬 ZHA Hong-Bin

张 钹 ZHANG Bo

张长水 ZHANG Chang-Shui

张大鹏 ZHANG Da-Peng

张 健 ZHANG Jian

张尧学 ZHANG Yao-Xue

赵沁平 ZHAO Qin-Ping

周立柱 ZHOU Li-Zhu

周兴社 ZHOU Xing-She

朱传琪 ZHU Chuan-Qi

祝跃飞 ZHU Yue-Fei

计算机学报

(月刊,1978年创刊)

第45卷 第3期 总第471期 2022年3月

Chinese Journal of Computers

(Monthly, Started in 1978)

Vol. 45 No. 3 Series No. 471 March 2022

主 管 中国科学院
主 办 中国计算机学会
中国科学院计算技术研究所
主 编 孙凝晖
编 辑 《计算机学报》编辑委员会

中国科学院计算技术研究所
邮政编码 100190, 北京 2704 信箱
E-mail: cjc@ict.ac.cn
http://cjc.ict.ac.cn

编辑部主任 李 刚
出 版 科 学 出 版 社
印 刷 装 订 北京科信印刷有限公司
总 发 行 处 科 学 出 版 社

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码 100717

国外总发行 中国国际图书贸易总公司
(中国 国际书店)
北 京 399 信 箱

Supervised by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by China Computer Federation,
Institute of Computing Technology, CAS

Editor-in-Chief: SUN Ning-Hui

Edited by Editorial Board of Chinese

Journal of Computers

P. O. Box 2704, Beijing 100190, China

Director: LI Gang

Published by Science Press

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

Distributed by Science Press

16 Donghuangchenggen North Street, Beijing
100717, China

Foreign: Guoji Shudian

P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一连续出版物号: CN 11-1826/TP

订购处: 全国各邮电局

定 价: 73.00 元

国内邮发代号: 2-833

国外发行代号: M 206

国内外公开发行业

ISSN 0254-4164



9 770254 416223