Wi-Fi定位系统的设计实现与商业应用

Implementation and Commercial Application of Wi-Fi Positioning System

陈　诚[1]，于水生[2]，童　博[1]（1. 中讯邮电咨询设计院有限公司，北京 100048；2. 中国联通山东分公司，山东 济南 250002）
Chen Cheng[1]，Yu Shuisheng[2]，Tong Bo[1]（1. China Information Technology Designing& Consulting Institute Co.，Ltd.，Beijing 100048，China；2. China Unicom Shandong Branch，Jinan 250002，China）

摘　要：
针对室内定位系统普遍存在建设冗余、需额外佩戴设备、定位精度不高等问题，以商用可落地的解决方案为研究目标，对Wi-Fi的定位技术的商用可行性进行了分析，设计了一种高定位精度的Wi-Fi定位系统，并最终对Wi-Fi定位系统的商业价值进行了详细的阐述分析。

关键词：
室内定位；Wi-Fi定位；Wi-Fi定位系统商业应用
doi：10.12045/j.issn.1007-3043.2025.05.009
文章编号：1007-3043（2025）05-0048-07
中图分类号：TN929.5
文献标识码：A
开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

Abstract：
In response to the common problems of indoor positioning systems such as redundant construction，additional wearing equipment，and low positioning accuracy，the commercial feasibility of Wi-Fi positioning technology is analyzed with the goal of developing a commercially implementable solution. A Wi-Fi positioning system with high positioning accuracy is desigend，finally it elaborates on the commercial value of Wi-Fi positioning systems.

Keywords：
Indoor positioning；Wi-Fi positioning；Commercial application of Wi-Fi positioning system

引用格式：陈诚，于水生，童博. Wi-Fi定位系统的设计实现与商业应用[J]. 邮电设计技术，2025（5）：48-54.

1 概述

目前，基于目标位置的服务在各类应用场景中发挥着至关重要的作用，尤其在当下物联网时代，终端位置信息成为许多数字化解决方案的关键因素[1-2]。

卫星定位作为应用最广泛的定位技术，其卫星信号极易受到建筑与障碍物的阻碍和干扰，所以越来越多的室内无线定位技术成为研究热点，其在商用场景化解决方案中的重要作用也逐渐浮现。当下基于ZigBee、蓝牙[3-4]、红外定位技术实现的终端定位解决方案在保证定位精度的前提下，往往存在需要专项基础建设、特定模块穿戴、实际应用单一等问题。因此，在商业应用领域，一种能够确保定位精度、满足低投产低运营成本、相关应用灵活丰富的可商用室内定位解决方案将会衍生出客观的商业价值与潜力，并为企业的数字化运营提供全新的思路。

收稿日期：2025-03-25

2 Wi-Fi定位技术的商用优势分析

IEEE在1999年的802.11标准中制定了Wi-Fi标准后，其已经变得越来越普及。将Wi-Fi作为定位技术的基础不仅具有信号传输距离远、协议标准统一、交付复杂度低等优点，相较于其他技术方案，Wi-Fi定位技术[5]还具有以下天然独特优势。

a）无需专项系统基础设施搭建。Wi-Fi接入点（Access Point，AP）作为无线网络基础设施为终端用户提供无线网络覆盖，几乎遍布了当下所有室内无线网

络场景。相较于其他室内定位技术（如蓝牙接收器、红外接收器）需要进行专项的基础设施敷设，Wi-Fi定位系统可直接复用Wi-Fi网络中的AP设备作为定位系统的基础设施，并且Wi-Fi网络的普适性可有效打消投产方对于专项投出产出比的顾虑。

b）无需特定穿戴设备。Wi-Fi定位系统将开启了Wi-Fi功能的终端设备作为客户端，为其提供实时定位能力。当下各类智能终端设备几乎都内置了Wi-Fi模组，智能手机更是做到了几乎人手随身携带的普及程度，因此Wi-Fi定位系统无需特定穿戴设备，智能终端便可作为极佳的客户端设备选择。也正因为无需用户穿戴额外的硬件或模组，解决了在固定人员场景中，对用户穿戴习惯的培养，这一商业解决方案中的巨大难题，也同时对室内定位技术在流动人群场景（无法对人群提供穿戴设备）的商业落地提供了可能性。

c）可实现未接入Wi-Fi网络的用户定位。开启了Wi-Fi功能的终端设备会定时发送探测请求以发现周围可用的无线网络，终端设备在尝试接入Wi-Fi网络时，会经历扫描、鉴权、关联3个阶段，并在完成鉴权和关联阶段后，最终完成Wi-Fi网络的接入，进行数据流量的传输。在扫描阶段终端设备就会周期性地发射广播探测请求（Probe Request），AP在接收到探测请求后会回复探测响应（Probe Response），以此来探测环境中可用的Wi-Fi网络信息。Wi-Fi定位技术可将探测请求作为原始信息来源，从中提取信息，并在处理计算后形成终端设备的位置信息。因此，无论终端设备是否通过了鉴权阶段，亦或最终是否接入了Wi-Fi网络，Wi-Fi定位系统均可完成对其的定位。

d）WiFi 6将持续作为行业热点。WiFi 6这一为物联网格局而构建的技术的发展，将带来更多具有变革性功能的Wi-Fi设备，基于Wi-Fi的定位技术也将必然被WiFi 6技术持续地场景化、行业化赋能。

3 Wi-Fi定位系统架构设计

3.1 Wi-Fi定位技术选型

Wi-Fi定位技术主要根据Wi-Fi无线电磁波信号的物理特性进行位置信息的挖掘。Wi-Fi信号的信号强度（RSSI）[6]、到达时间（TOA）、到达时间差定位（TDOA）以及到达角度（AOA）等物理特性均可被用来分析获取终端设备的位置信息。

将Wi-Fi信号的RSSI作为基础特性，对AP间的时间同步没有要求，因此对AP设备的硬件要求较低，商用落地的可复制性以及成本较低。本系统将基于Wi-Fi信号RSSI进行设计实现，基于Wi-Fi信号RSSI的定位方法在发展中形成明确的2个分类：信号传播模型定位法和基于位置指纹的定位法。

信号传播模型定位法通过构建信号传输损耗模型，得出Wi-Fi信号RSSI随距离的变化关系，将RSSI转化为终端设备至AP的距离，在得出终端设备至几个临近AP的距离后，通过几何算法最终确定终端设备的位置。考虑到信号传输损耗模型受环境影响较大，无线信号在传输过程中的路径损耗、阴影衰落等因素均需根据实际情况推算，很难在商用项目中实现信号衰减模型的复用，本文将采用Wi-Fi信号RSSI位置指纹定位法来进行Wi-Fi定位系统的设计与实现。也正由于不需要建立信号传播损耗模型，并且不需要预先知晓各个AP的位置信息等特点，使得基于Wi-Fi信号RSSI的位置指纹定位法具有部署成本低、可扩展性好等商用优势。

3.2 Wi-Fi定位系统功能说明

本系统将待定位终端设备在定位区域内收集到Wi-Fi信号RSSI作为系统输入，将待定位终端设备在定位区域中的“位置坐标”作为系统输出，以实现终端设备的定位能力。其功能业务流程分为离线训练和在线定位2个阶段（见图1）。

离线训练阶段使用终端设备在一个参考点所能接收到的Wi-Fi信号RSSI作为参考量来描述该参考点的位置特征，将区域内所有参考点的位置信息抽象成RSSI数值集合即位置特征指纹，构建出“位置特征指纹库”。

在线定位阶段将一台待定位终端设备在某个待测点测量得到的RSSI数值作为其位置特征，使用匹配

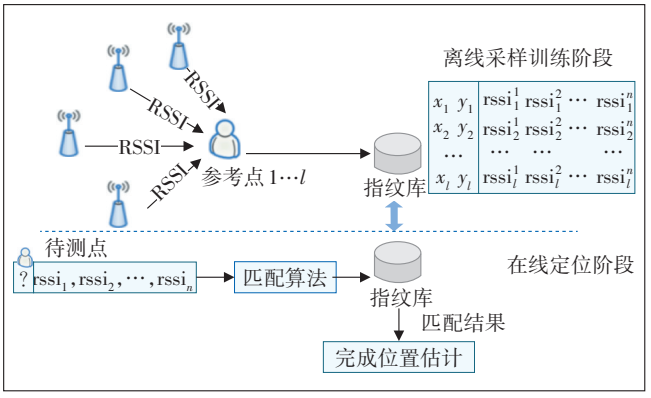

图1　Wi-Fi定位系统的业务流程

算法与“位置特征指纹库”进行匹配计算，最终得出待测点的位置坐标数据。

3.3 Wi-Fi定位系统架构设计

本系统的总体设计遵循松耦合的设计理念，在满足系统功能需求的基础上，以实现功能模块解耦为考量，将该系统设计为2个相互独立的功能模块：位置特征指纹库的建立模块和终端设备定位模块，分别对应前述系统功能业务流程的离线训练阶段以及在线定位阶段。系统功能模块架构如图2所示。

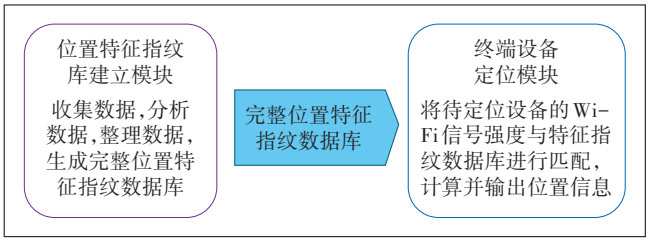

图2　系统功能模块架构

位置特征指纹库建立模块收集和处理定位区域范围内所有参考点坐标处的RSSI数据，分别作为每个参考点的位置特征指纹，形成完整的位置特征数据库提供至终端设备定位模块使用。通过本模块中的6步数据处理和计算流程可有效提升位置特征指纹库的有效性，确保最终的定位精度。

终端设备定位模块接收到定位请求时，将待定位终端设备的位置视为待测点，收集该终端设备的Wi-Fi信号RSSI数值作为该待测点的位置特征指纹，与建立完成的位置特征指纹库中的所有参考点位置特征指纹进行基于WKNN算法的匹配流程，最终计算出待测点的位置坐标信息。

这2个模块在功能逻辑上完全独立，符合系统组件解耦的设计理念，独立的功能模块设计也天然符合微服务架构要求，可实现灵活部署、扩容等需求；此外，独立的功能模块设计减少了系统内频繁的数据交互，在提高数据安全性的同时，可有效提升系统的运行效率。

3.4 位置特征指纹库建立模块

位置特征指纹数据库建立模块的主要功能为：通过对终端设备在待定位区域中所有参考点（坐标已知）处可接收到的Wi-Fi信号RSSI数据进行采集、整理、计算，形成一个包含了待定位区域内所有参考点位置特征的指纹数据库。

由于位置特征指纹库中数据的准确性会对系统最终的定位精度产生决定性的影响，本系统将位置特征指纹数据库建立模块设计为以下6个流程（见图3）：参考点选定、数据收集、数据整理、信号强度指纹计算、信号强度变化区间计算和生成位置特征指纹库。测试结果表明，该系统设计可有效保证定位精度。

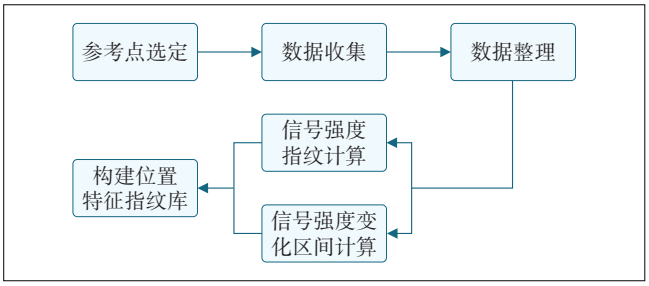

图3　位置特征指纹数据库建立流程

流程1：参考点选定。根据待定位区域环境特点的不同，规划对应密度的参考点设置。本系统采用均匀网格覆盖待定位区域进行参考点选取，网格的交点即为参考点。对于大型空旷场地，采集密度要求相对较低，参考点网格密度一般设置为3~6 m间隔；而对于商场、医院等场所，由于室内环境较复杂，人员较为密集，容易对Wi-Fi信号造成影响，应设置较高密度的参考点，可设置为1~2 m间隔。

流程2：数据收集。在所有选定的参考点处依次进行Wi-Fi信号RSSI的多次收集，本系统默认在每个参考点处进行60次数据收集，采集次数可根据实际情况而有所变化。通过完成所有参考点处的数据收集后，本流程最终可完成以下数据的收集：每一个参考点的坐标（已知）、每一个参考点处收集到的来自各个AP的Wi-Fi信号RSSI列表数据以及RSSI列表数据中每一个RSSI数值对应的AP设备“apMac”标识。

流程3：数据整理。在某一参考点处进行的多次数据收集过程中，经常会出现来自某一个AP的RSSI数值波动较大的情况，也会出现来自某一个AP的信号时有时无的情况。存在波动较大数值以及空值的采集数据将直接影响位置特征指纹库的准确性。因此，数据整理流程的主要作用为：对数据收集流程采集的数据中的无效数据进行过滤丢弃，提升采集数据的可靠性。数据整理流程通过以下2条过滤规则过滤上述2类无效数据。

规则1：在一个参考点处的N次Wi-Fi信号RSSI数据的收集中，来自AP_j的信号RSSI出现未采集到的情况次数大于$N/20$次时，来自AP_j的所有数据将被过

滤丢弃。

规则2：来自一个AP的Wi-Fi信号RSSI弱到一定程度时，其信号RSSI的波动性就会较大，并且其产生空数据的概率也会变大。为了减小环境因素对Wi-Fi信号RSSI所带来的影响，在一个采集点处的N次数据收集中，来自AP_j的信号RSSI小于等于-75 dBm的次数大于N/10次时，来自该AP_j的所有数据将被过滤丢弃。

在本流程中，通过对无效数据的定义与过滤，排除无效数据对位置特征指纹库准确性的影响，数据整理流程处理完成的数据被传递给后续流程进行计算。

流程4：信号强度指纹数据计算。进入本流程后，对数据整理流程传递下来的数据进行计算，计算逻辑为：在一个参考点处计算来自每一个AP的RSSI数值的均值，最终得到在所有参考点处来自各个AP的RSSI均值数据列表，以及每一个RSSI均值对应AP设备的“apMac”标识。表1所示为参考点个数为n个、AP数量为j时的计算结果示例。

表1　信号强度指纹数据计算示例

参考点	坐标	RSSI均值列表
参考点1	(x_1,y_1)	$\overline{rssi_{11}},\overline{rssi_{12}},\cdots,\overline{rssi_{1j}}$
参考点2	(x_2,y_2)	$\overline{rssi_{21}},\overline{rssi_{22}},\cdots,\overline{rssi_{2j}}$
参考点3	(x_3,y_3)	$\overline{rssi_{31}},\overline{rssi_{32}},\cdots,\overline{rssi_{3j}}$
参考点n	(x_n,y_n)	$\overline{rssi_{n1}},\overline{rssi_{n2}},\cdots,\overline{rssi_{nj}}$

流程5：信号强度变化区间计算。在终端设备定位模块中，需要将待定位设备的RSSI指纹与位置特征指纹库中的数据进行匹配，当待定位终端设备的Wi-Fi信号RSSI指纹数值命中指纹库中某个参考点处指纹数据的范围区间时，则视为匹配。因此，本流程的主要功能即为对每个参考点处来自各个AP的RSSI变化区间进行计算。本流程的数据输入同样为流程3的输出数据，将整理后的数据按以下步骤进行计算。

步骤1：首先以一个参考点为计算单元，计算来自各个AP的RSSI数值最大值与最小值的差。然后对区域中所有参考点重复进行差值计算，计算结果如表2所示。

步骤2：以AP为计算单元，计算每个AP在所有参考点处RSSI差值的均值，作为每台AP在区域中所有参考点处的RSSI变化范围（见表3）。

j为该区域中所有出现的AP的个数。本流程的最终输出将用于终端设备定位模块中指纹匹配算法的匹配结果判断。

表2　参考点RSSI差值计算结果

AP标识	参考点1 RSSI差值	参考点2 RSSI差值	参考点3 RSSI差值	…	参考n RSSI差值
AP_1	12	6	12	…	12
AP_2	10	9	10	…	–
AP_3	12	–	9	…	12
AP_j	…	…	…	…	…

表3　参考点处的RSSI变化范围计算

AP标识	区域中差值均值
AP_1	$Range_1$
AP_2	$Range_2$
AP_3	$Range_3$
…	…
AP_j	$Range_j$

流程6：位置特征指纹库生成。在本流程中，将流程4输出的每个参考点的RSSI指纹数据，流程5输出的每个AP的信号强度变化区间进行组合，形成位置特征指纹库。如表4所示，位置特征指纹库是位置特征指纹数据库建立模块的最终输出，它由以下数据组成：待定位区域中所有参考点的坐标(x_n,y_n)、各参考点处RSSI指纹$\overline{rssi_{nj}}$、指纹所对应的AP设备标识AP_j以及AP的信号强度变化区间$Range_j$。

表4　位置特征指纹库示意

参考点	坐标	参考点指纹
参考点1	(x_1,y_1)	$(AP_1,\overline{rssi_{11}},\ Range_1),(AP_2,\overline{rssi_{12}},\ Range_2),\cdots,(AP_j,\overline{rssi_{1j}},\ Range_j)$
…	…	…
参考点n	(x_n,y_n)	$(AP_1,\overline{rssi_{n1}},\ Range_1),(AP_2,\overline{rssi_{n2}},\ Range_2),\cdots,(AP_j,\overline{rssi_{nj}},\ Range_j)$

3.5 终端设备定位模块

终端设备定位模块的主要功能为：将待定位终端设备在区域中的位置称为待测点，实时采集终端设备在待测点处可接收到的所有AP信号的RSSI数值，将其作为终端设备在待测点处的位置特征指纹，在位置特征指纹库中进行匹配，最终完成待定位终端设备的定位。

由此可见，匹配算法是终端用户定位模块的核心，同时也是影响定位精度的关键因素。本系统采用加权K最近邻算法（WKNN）这一精确度较高的匹配算法进行系统的设计与实现[7]，WKNN算法首先匹配出距待测点欧式距离最小的K个参考点，然后进一步计

算出每个参考点指纹相对于待测点的贡献程度，赋予每个参考点权重值，最后计算K个参考点的加权中心坐标作为待测点的最终计算坐标，因此在实际应用中，需根据实际需求合理选取K值的大小。本节以K=3为例，给出终端设备定位模块的具体实现流程（见图4）。

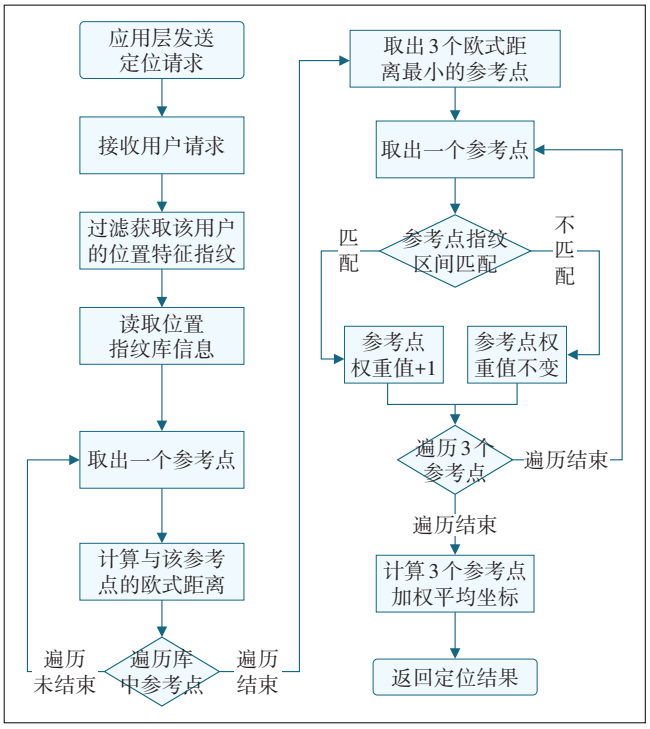

图4　终端设备定位模块的具体实现流程

a）终端用户定位模块由应用层调用，向本模块发送定位请求，请求中仅需包含该待定位终端设备的“clientMac”地址信息。

b）终端用户定位模块接到请求后，根据待定位终端设备的“clientMac”过滤出该设备的RSSI位置特征指纹，终端设备在待测点处的指纹数据可表示为：$R=(\mathrm{rssi}_1,\mathrm{rssi}_2,\cdots,\mathrm{rssi}_j)$，其中$\mathrm{rssi}_j$为待定位终端设备接收到的来自第$j$个AP的信号强度。

c）得到待测点的指纹数据后，将其遍历位置特征指纹库中所有参考点指纹数据。当位置特征指纹库中存储了n个参考点数据时，每一个参考点的指纹数据可表示为：$D_n=(\overline{\mathrm{rssi}_{n1}},\overline{\mathrm{rssi}_{n2}},\cdots,\overline{\mathrm{rssi}_{nj}})$，其中$\overline{\mathrm{rssi}_{nj}}$代表第$n$个参考点上可接收到的来自第$j$个AP设备的信号强度均值。

d）将终端设备在待测点处的指纹与每一个参考点指纹进行欧氏距离计算，计算并选出距离待测点欧式距离最小的3个参考点，其坐标分别表示为M_1、M_2、M_3。

e）对这3个参考点的RSSI指纹与待测点的RSSI指纹进行匹配，当待测点位置指纹R中每有一个rssi_j在参考点n指纹D_n中$\overline{\mathrm{rssi}_{nj}}$的区间范围$\mathrm{Range}_j$内时，该参考点的权重值+1。

f）遍历参考点n指纹中所有的$\overline{\mathrm{rssi}_{nj}}$值，最终得出该参考点$n$的权重值$\omega_n$，重复对3个欧式距离最小的参考点进行计算，算出$\omega_2$、$\omega_3$。随后对3个参考点坐标进行加权平均计算：

$$P(x,y)=\frac{\omega_1\times M_1+\omega_2\times M_2+\omega_3\times M_3}{\omega_1+\omega_2+\omega_3}$$

$P(x,y)$即为待测点的估计坐标，作为终端设备定位模块的最终输出，实现终端设备在区域内的位置定位。

4 Wi-Fi定位系统测试评估

4.1 测试实验环境

本节选用某办公楼某层办公区域进行实地测试，该层办公区由10个测试AP完成Wi-Fi覆盖，在x轴y轴方向采用间隔为3.25 m的网格覆盖，完成225个参考点的选取（电梯厅以及楼梯区域未选取参考点位）。

实测中AP设备选型为华为AirEngine5761-21，采用MacBook Pro 2019笔记本电脑收集Wi-Fi信息。

在数据采集阶段，对每个参考点处进行60次数据收集，共采集了13 500组RSSI指纹样本，经过数据整理阶段对异常样本过滤后，最终得到9 640组稳定样本，并最终计算构成位置特征指纹库。

4.2 终端定位模块K值选择

为了确定在最终定位精度测试实验中终端设备定位模块的K值设定，在定位区域内随机选取100个待测点进行预实验，结果如图5所示，从图5可以看出，当K=5时，误差均方根最小。因此，在最终定位

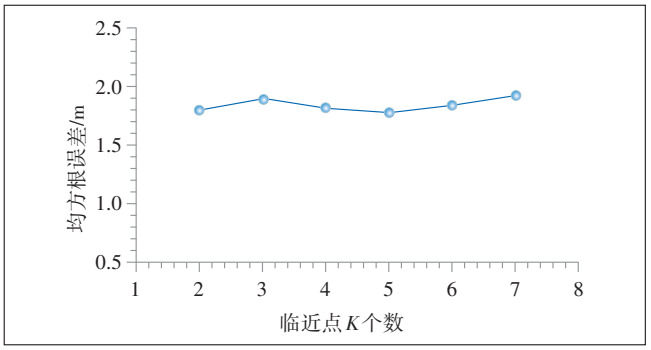

图5　均方根误差与邻近点个数K的关系

精度测试中，所有待测点将进行K值为5的匹配循环。

4.3 定位精度测试结果分析

在定位精度测试中，分别在3个不同时间段进行了3轮测试，每轮测试都随机选取70个实际待测点进行终端设备的定位测试，测试结果如表5所示。

表5　定位测试结果

轮次	x轴误差/m			y轴误差/m		
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
第1轮	0.05	2.06	1.38	0.06	2.53	1.07
第2轮	0.02	1.97	1.33	0.03	2.87	1.21
第3轮	0.10	2.29	1.41	0.03	2.55	1.13

将待测点的系统定位坐标与待测点的实际坐标的欧式距离作为定位误差衡量指标，结果如表6所示。从表6可以看出，本文设计的Wi-Fi定位系统，对终端用户的平均定位误差达到1.88 m，定位均方根误差达到2.06 m，其定位误差在2 m内的概率达到了89%。多轮测试也可体现本系统受环境及环境内人员流动的影响较小，可满足商用场景的基本要求。

表6　定位误差

轮次	定位平均误差/m	定位均方根误差/m
第1轮	1.83	2.01
第2轮	2.03	2.24
第3轮	1.77	1.94
3轮均值	1.88	2.06

5 Wi-Fi定位系统的商业价值分析

基于Wi-Fi定位系统的综合商业体应用方案如图6所示，基于Wi-Fi定位系统提供的基础数据，根据实际需求持续扩展各种应用功能模块。

本章以面向综合商业体完成开发的应用为例，通过分析介绍Wi-Fi定位系统可实现的相关数据呈现维度，阐述其在经营决策方面可提供的商业价值。

5.1 客流量趋势分析

客流数据是经营者关注的关键数据之一。根据Wi-Fi定位系统提供的位置信息可以对指定区域内的终端设备的数量信息做出汇总分析，给出不同时间段内在该区域中出现的终端设备的总计数量、峰值、平均值，也可以进一步通过筛选条件，查询出不同时间段、不同商场区域或楼层、不同类别的店铺中的客流相关数据。

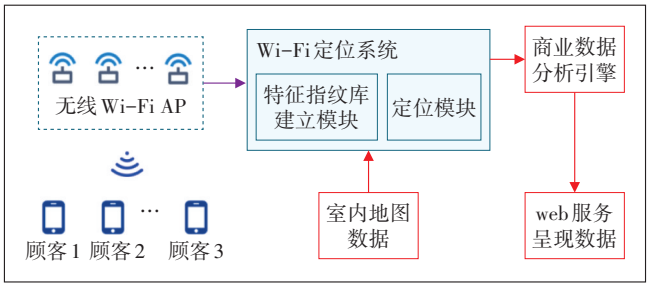

图6　基于Wi-Fi定位系统的综合商业体应用方案

5.2 客流类型识别

根据终端用户在某区域内出现的时长，可按照既定规则将客流分为不同类型。如以1 h为周期，如果连续5 min都被探测到的终端，则被识别为访客，不满足访客条件的终端，都被识别为路人，可对客流进行分类时序展示。结合访客在总客流中的占比，形成访客捕获率数据（见图7），可作为店铺陈列、店铺商品吸引度的分析依据。

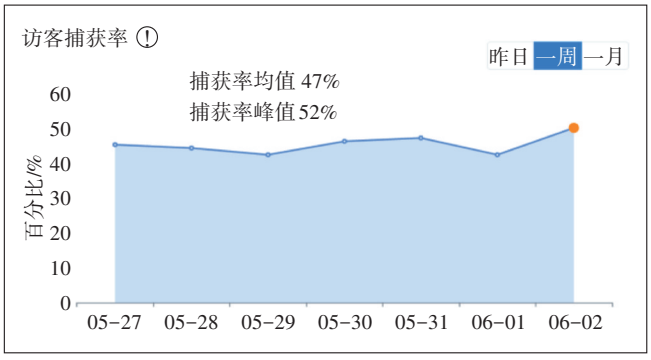

图7　访客捕获率数据

5.3 客流访问识别

将终端设备出现在某一区域坐标范围内的次数视为一位顾客的来访次数，可将一位顾客在指定时间段内的到访频次进行分布归类，形成到访客户忠诚度分布视图，也可将非首次访客的占比包装为访客回头率这一直观的商业数据（见图8）。

5.4 客流驻留时长识别

将终端设备出现在某区域坐标范围内的时长视为一位顾客在区域内的驻留时长，可计算展示出该区域内不同驻留时长的客流分布，将其作为该区域客流黏性的客观指标。同时，某区域客流平均驻留时长趋势可体现出该区域客流黏度的时段属性。

5.5 顾客分布热力图

通过周期性地收集、存储一个区域内的所有终端设备的位置信息，并将所有顾客的位置点坐标进行叠

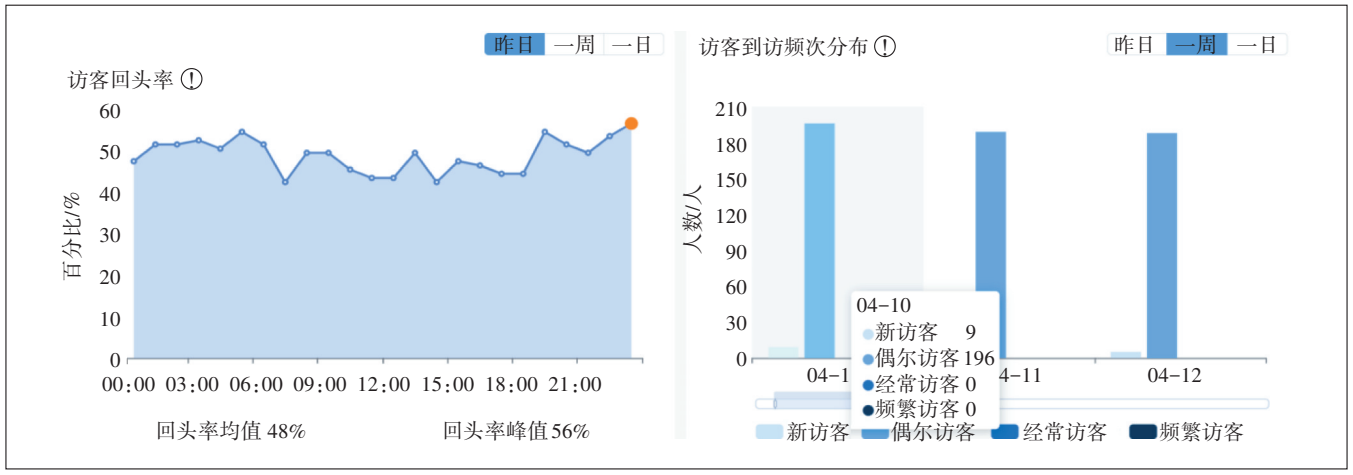

图8　访客到访频次分布及回头率

加处理，可用分布密度的方式将某个时刻的用户分布情况作出呈现，可看出在一个具体时刻，哪些区域获得了相对多的顾客关注度。通过播放一段时间内的热力图变化，可对顾客密度在一天中的变化情况进行回放。顾客分布密度这一数据纬度无疑可作为完全客观的数据为决策者提供顾客关注度这一商业指标。

5.6 精准营销投放

结合顾客的位置信息与Wi-Fi的Portal认证页面方案，可实现在用户尝试接入Wi-Fi网络时，通过定制化Portal认证推送页面，将附近商铺的广告信息推送至用户浏览器。精准且按需的信息推送和投放将会有效地刺激顾客产生目的消费之外的消费行为。

6 结束语

本文详细阐述了Wi-Fi定位技术的特点、研究意义和发展现状，并以Wi-Fi信号RSSI位置指纹定位法作为理论基础方法，设计并详述了一种具有商用可行性的Wi-Fi定位系统设计架构。通过对系统功能模块、主要流程以及关键逻辑的详细展开，介绍了本系统在系统架构上松耦合、轻交互、高性能等特点；并通过对位置特征指纹库模块和终端设备定位模块的详细介绍，阐明了本系统在数据处理流程上以及提高定位精度等方面作出的具体设计；然后通过测试验证了本文提出的定位系统在2 m误差容忍内的准确度可达89%。

最后针对Wi-Fi定位系统的商业价值进行了分析与展望，通过对Wi-Fi定位系统赋能商业智能的具体应用实现，阐述其可为运营和决策者提供全新纬度的商业分析数据来源，并可有效提升商业顾客的实际用户体验，进而提高顾客黏性。下阶段的研究将致力于改进数据处理流程以及算法，进一步提高系统定位精度，并挖掘开发出更多基于室内定位数据的商业应用。

参考文献：

[1] ZHOU Y, ZENG G X, HUANG Y Y, et al. Indoor space location model based on location service[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, XLII-4/W7: 49-53.

[2] 朱敏. 室内定位技术分析门[J]. 现代计算机(专业版), 2008(2): 79-81.

[3] FARAGHER R, HARLE R. Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(11): 2418-2528.

[4] T C E G, GALVAN-TEJADA I, SANDOVAL E I, et al. Wi-Fi bluetooth based combined positioning algorithm [J]. Procedia engineering, 2012, 35: 101-108.

[5] DUVALLET F, TEWS A D. Wi-Fi position estimation in industrial environments using Gaussian processes[C]//2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice: IEEE, 2008: 2216-2221.

[6] 林玮，陈传峰. 基于RSSI的无线传感器网络三角形质心定位算法[J]. 现代电子技术, 2009, 32(2): 180-182.

[7] OH J, KIM J. AdaptiveK-nearest neighbour algorithm for Wi-Fi fingerprint positioning[J]. ICT Express, 2018, 4(2): 91-94.

作者简介：
陈诚，助理工程师，硕士，主要从事网络创新产品研发设计工作；于水生，高级工程师，硕士，主要从事政企BG统筹协调板块营销管理、新型IP网络技术、SDN及网络创新产品的研究及营销工作；童博，高级工程师，硕士，主要从事新型IP网络技术、SDN及网络创新产品的研发工作。