

智能手机Wi-Fi往返时间测距室内定位方法

白羽¹, 柳景斌¹, 杨晨云², 姚尧²

(1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079 ;

2. 武汉市梦芯科技有限公司, 武汉 430075)

摘要:

针对室内活动场景下, 额外布设定位基站成本较高, 应用范围有限, 基于手机的室内高精度位置服务需求难以满足的问题。考虑到Wi-Fi在全球网络中的广泛部署及智能手机内置多种运动传感器, 本文实现了基于Wi-Fi RTT测距信息和手机内置多传感器的实时室内定位方法, 并在室内进行静态和动态定位实验, 实验结果表明: 该算法无论是定位精度还是定位准度都优于仅依赖于Wi-Fi RTT测距信息的Wi-Fi RTT LS算法和Wi-Fi RTT UKF算法, 平均定位误差为1.16 m, 最大定位误差为2.14 m。

0 引言

近年来, 随着移动定位技术的日臻完善, 定位精度的日益提高, 基于位置的服务 (location based services, LBS) 也在人们的日常生活中得到了广泛的应用^[1]。在室外, 全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 能够方便快捷的提供准确的位置信息^[2], 而室内由于GNSS信号受到墙体等建筑物的遮挡, 衰减较大, 定位精度较差, 仅依靠GNSS定位无法满足室内导航定位的需要^[3]。然而, 据美国环境保护局 (Environmental Protection Agency, EPA) 统计, 人们平均有高达87%的时间待在室内空间^[4]。这意味着大部分时候, 人们都需要依靠室内定位技术获得位置服务。此外, 随着经济的快速发展, 产业多元化的推进, 人们的室内活动场景也变得越来越复杂, 室内位置服务的需求也随之不断增长, 可以说, 室内位置服务蕴含着巨大的应用和商

业潜能。

现有的室内定位技术，主要包括超宽带^[5] (ultra wide band, UWB)、近场通信^[6] (near field communication , NFC)、射频识别^[7] (radio frequency identification , RFID)、蓝牙^[8]、ZigBee^[9]、Wi-Fi^[10-11]、超声波^[12]和多传感器^[13-14]

等。其中ZigBee、UWB、RFID、蓝牙、NFC和超声波定位技术都需要额外布设相应的基础设施，成本较高，应用范围有限。与之相对的是，Wi-Fi网络承载着一半以上的互联网流量^[15]，Wi-Fi设备无需额外成本，已经广泛部署于室内环境中。此外，随着微机电系统 (micro-electro-mechanical system , MEMS) 的进一步发展，磁力计、陀螺仪、加速度计等传感器成本降低，大部分智能手机都集成了多种低成本传感器，基于多传感器的室内定位技术也逐渐运用在智能手机上，但其定位结果存在误差累积的问题，不适用于长时间单独定位。

相对而言，Wi-Fi定位技术因其无需额外布设成本，可实现长时间定位等优点，逐渐成为室内定位领域的研究

热点。目前，Wi-Fi主要通过传播模型定位法^[16]和位置指纹法^[17-18]

来实现定位。传播模型定位法通常是依赖于Wi-Fi信号的信号强度 (received signal strength index , RSSI) 特征，众所周知，RSSI容易受到复杂环境的干扰，其精度是有限的。至于位置指纹法，不仅难以维护，而且早期的位置指纹法也是将RSSI作为位置特征，同样存在精度有限的问题。将Wi-Fi RSSI信息与智能手机内置多传感器相结合^[19-20]，能够有效提升定位精度，改善定位性能。

为了改善Wi-Fi定位的准确性，IEEE 802.11-2016标准对IEEE 802.11v定时测量协议进行了扩展，提出精细定时测量 (fine time measurement , FTM) 协议，该协议是一种传播时间 (time of flight) 测量协议，通过测量信号从Wi-Fi接入点到设备处再从设备处返回到Wi-Fi接入点的往返时间 (round trip time , RTT) 确定设备到Wi-Fi接入点的距离。如果有三个及以上已知坐标的Wi-Fi接入点，则可以通过距离交会的方法确定设备的位置。与IEEE 802.11v定时测量协议相比，FTM协议对时间戳的分辨率提出了更精确的要求，这也将带来定位精度的提高。虽然基于FTM协议的RTT已经有较精确的时间分辨率，但仍然无法避免非视距 (non-line-of-sight , NLOS) 的影响，在复杂的室内环境下，RTT的准确性难以保证。相比起来，基于客户端内置运动传感器的多传感器定位技术具有完全自主定位导航能力，不受复杂室内环境的影响，短时间内定位精度高。因此，本文将

Wi-Fi RTT测距数据与多种传感器数据通过无迹卡尔曼滤波 (unscented Kalman filter , UKF) 进行融合用于室内定位研究 , 一方面能够避免误差累积的影响 , 另一方面能够减少NLOS对定位结果的影响 , 增强定位结果的可靠性、提高定位精度 , 改善定位性能 , 从而实现更优的室内定位体验。

当然 , 实现Wi-Fi RTT测距需要Wi-Fi接入点和移动客户端的共同支持。目前 , 已经有万禾 (Compulab) 提供的室内定位设备 (Wi-Fi indoor location device , WILD) Wi-Fi路由器支持Wi-Fi RTT功能 , 可用于实验测试 , 本文实验均基于该设备。此外 , 谷歌于2018年8月向公众发布的Android Pie系统引入了对Wi-Fi RTT功能的平台级支持 , 并承诺在谷歌Wi-Fi mesh路由器中添加对Wi-Fi RTT的支持。至此 , 有基础设施和移动客户端支持 , 利用Wi-Fi RTT测距数据进行安卓端室内定位方法研究成为可能。本文实现了基于Wi-Fi RTT测距和手机内置多传感器的室内定位方法 , 并与仅依赖于Wi-Fi RTT测距信息的Wi-Fi RTT 最小二乘 (least squares , LS) 算法和Wi-Fi RTT UKF算法进行了实验对比。

1Wi-Fi RTT测距原理及误差分析

1. 1 Wi-Fi RTT测距原理

在计算机网络中 , RTT是指数据从发送端发送 , 到接收端确认数据 , 最后接收端的确认信息返回到发送端所经历的时间延迟。Wi-Fi RTT则是针对Wi-Fi信号的往返时间延迟 , 基于FTM协议获得Wi-Fi RTT信息的具体流程如图1所示。

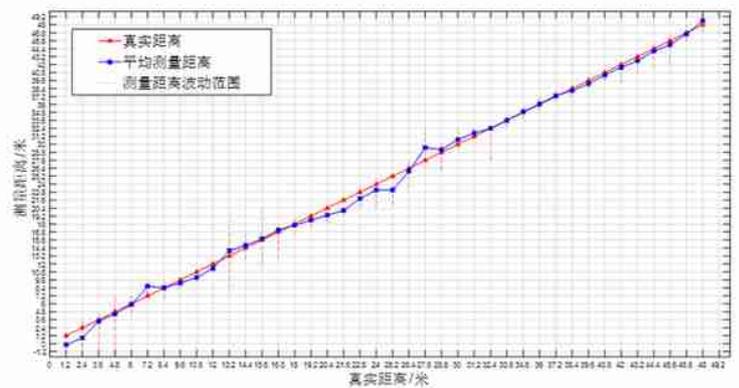


图3 Wi-Fi RTT 测距图

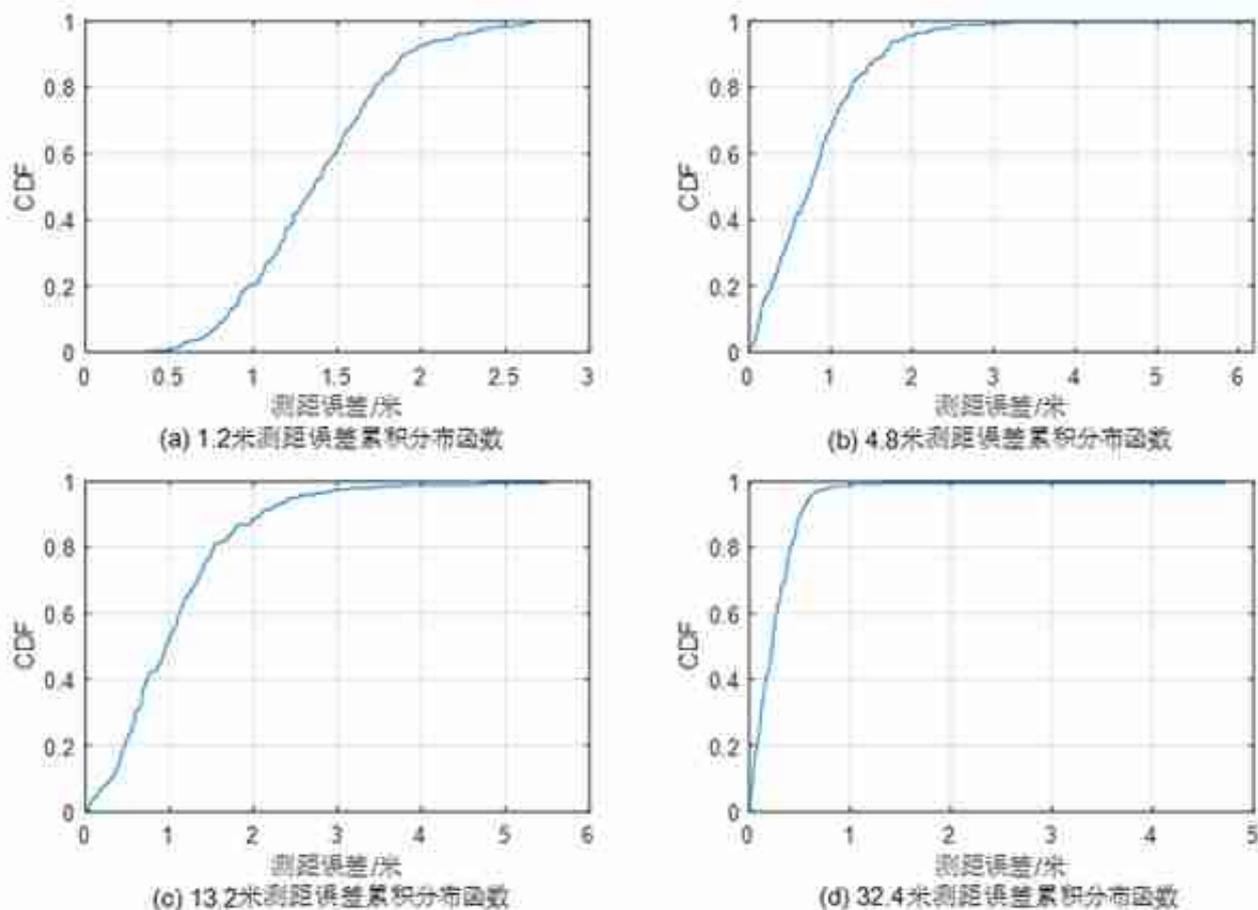


图5 特殊距离测试点测距误差累积分布函数

由图5可知，除个别测量距离粗差会引起较大的测距误差，绝大部分的测距误差均在测量均值的 ± 2 m内。

综上所述，Wi-Fi

RTT的测量距离存在与测量距离长度无关的系统性偏差，该偏差基本在1.2 m内。除该系统性偏差及测量粗差外，测量距离的噪声波动基本在2 m内。Wi-Fi RTT的距离测量范围大于等于48 m，且测距精度不随测量距离增大而减小，可以说测距精度与测量距离长度无关。

2行人航迹推算原理

众所周知，行人的步态具有周期性特征，运动康复学将每个步态周期分为脚离地、摆动、脚后跟着地和站立四部分。由于行走过程中的行人手臂及上半身的摆动与步态间存在一定的相关性，如右脚抬起时右臂后摆，左脚抬起时右臂前摆等。文献[22-23]对于行人前进时的加速度波形进行了深入的研究。研究表明，行人前进方向和垂直方向的加速度信息反映出和行人步态相同的周期性特征，而加速度信息的步

频、峰值及方差等统计特征与行人步长具有较好的相关性（一般大于0.6），可以建立加速度信息与行人步长间的数学模型来估计行人步长。据此，文献[22]提出了PDR算法。该算法通过建立数据模型，从加速度信息估计行人步长，再结合航向角信息推算行人的位置、速度等信息。与惯性导航解算受到误差的较大影响不同，PDR解耦了计算过程中的各种误差，因而不用考虑平台对准问题。

PDR算法主要由步频探测、步长估计、航向确定和位置计算4个部分组成。具体流程如图6所示。

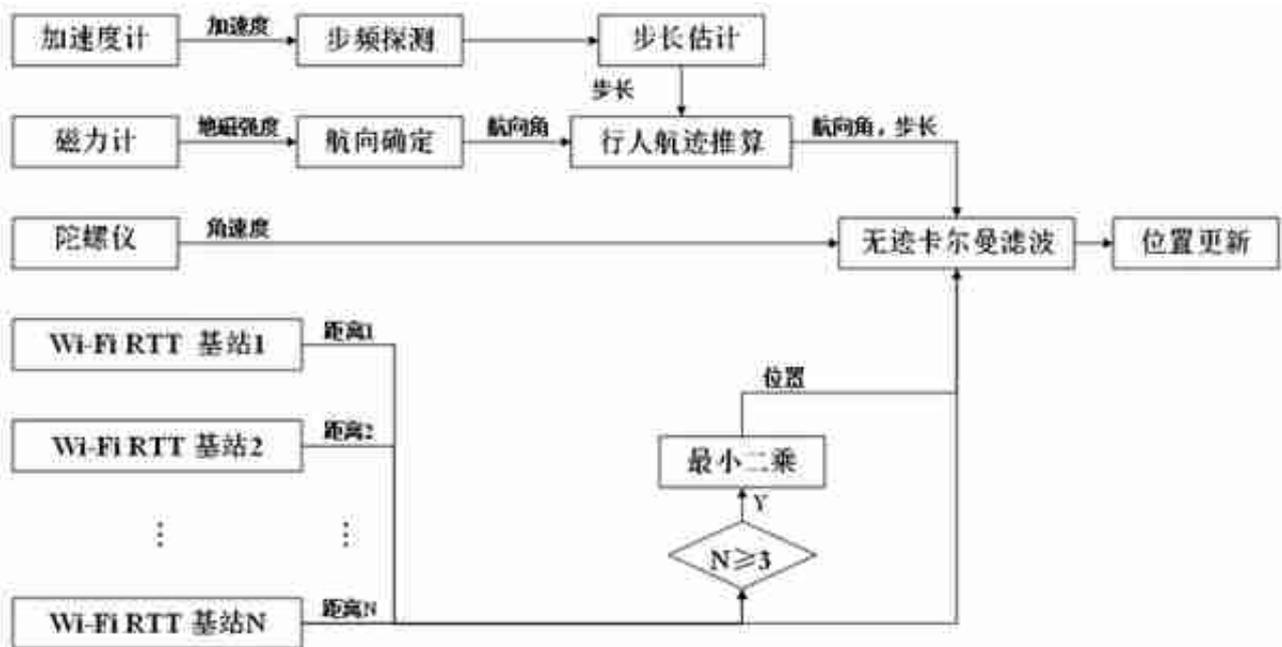


图7 Wi-Fi RTT /PDR 融合定位流程图

整体融合定位过程可以分为PDR模块、Wi-Fi RTT测距模块和UKF融合模块。

PDR模块处理多传感器数据，加速度计获得的三轴加速度信息取模值后输入步频探测模块进行步子探测，若探测到有效步子，则将加速度特征信息输入步长估计模块，最后输出估计的步长信息。磁力计获得的三轴地磁强度信息取模值后输入航向确定模块，最后计算得到的设备航向角信息。

Wi-Fi RTT测距模块处理Wi-Fi RTT测距数据，在智能手机接收到三个及以上Wi-Fi基站的RTT测距数据后，即可利用LS算法进行定位解算获得定位结果，作为UKF融合模块初始位置。

UKF融合模块处理PDR模块输出的行人步长、航向角信息、陀螺仪输出的角速度信息以及Wi-Fi RTT测距模块输出的初始位置、距离信息。UKF滤波器初始化成功后

，利用步长和步频计算得到的行人运动速度信息、航向角信息、角速度信息及距离信息作为量测值参与UKF解算，实现实时定位。

本文认为该融合定位算法中的系统噪声与观测噪声均为加性噪声，并假定他们均为理想的高斯白噪声。此外，本文认为各噪声均相互独立，即噪声方差阵为对角阵。

4定位实验及结果分析

4.1 实验描述

4.1.1 实验设备

1) Wi-Fi RTT基站。Wi-Fi RTT基站是Compulab发售的WILD Wi-Fi。硬件方面，WILD由Compulab之前发售的Fitlet 2设备搭载一个英特尔无线网卡及两个外置天线组成。软件方面，WILD运行在Debian GNU/Linux系统上。

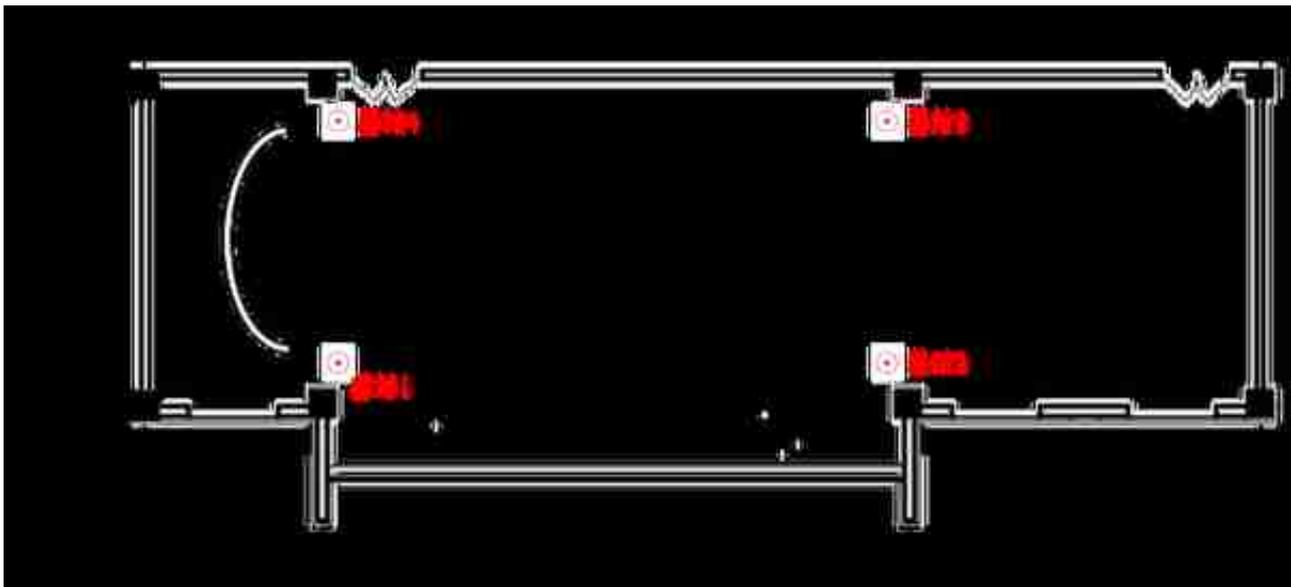


图9 实验环境（展厅）及Wi-Fi RTT基站位置平面图



(a) 自东向西视角

(b) 自西向东视角

图10 真实实验环境（展厅）

4. 1. 3 实验平台

本文在Google Pixel 3手机上设计“Wi-Fi RTT/PDR融合定位”APP进行Wi-Fi RTT测距数据的实时接收、存储，并使用基于Wi-Fi RTT的LS算法、基于Wi-Fi RTT的UKF算法和基于Wi-Fi RTT/PDR的UKF算法三种定位算法实时解算手机的位置坐标。如图11所示，该APP能够实时显示并存储Wi-Fi RTT/PDR融合定位结果、Wi-Fi RTT LS定位结果，Wi-Fi RTT测距数据获取结果（具体包括MAC地址、距离测量值、距离测量值标准差、Wi-Fi RSSI），而Wi-Fi RTT UKF算法定位结果仅存储，未实时显示。按钮“记录时间点”能够记录按下按钮的时间信息。按钮“INITM”初始化系统参数。按钮“STARTM”开始数据接收，并进行定位解算。按钮“STOPM”暂停数据接收和定位解算，点击“STARTM”后即可继续数据接收和定位解算。按钮“DESTROYM”销毁所有信息，销毁后需要重新点击“INITM”和“STARTM”才能重启数据接收和定位解算。



(a) 初始界面

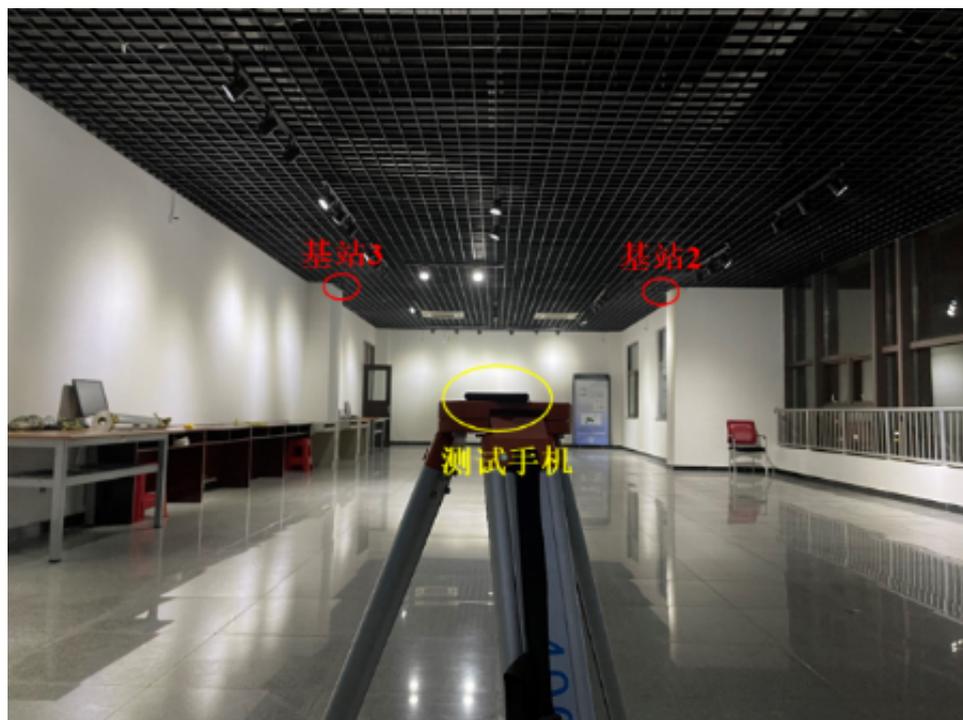
(b) 定位界面

图11 “Wi-Fi RTT/PDR融合定位” APP界面

4.2 静态定位实验及误差分析

静态定位实验环境如图12所示，实验中将Google Pixel 3测试手机平放在高度为0.97 m的三脚架上，进行约10 min的数据采集与定位解算，分别基于Wi-Fi RTT LS算法及Wi-Fi RTT

UKF融合算法解算得到静态定位结果。



(a) 基站1和基站4相对测试手机位置

(b) 基站2和基站3相对测试手机位置

图12 静态定位实验环境图

静态定位实验结果如图13所示，静态定位误差累积分布函数如图14所示，静态定位误差统计结果如表1所示。



图15 动态定位实验装置

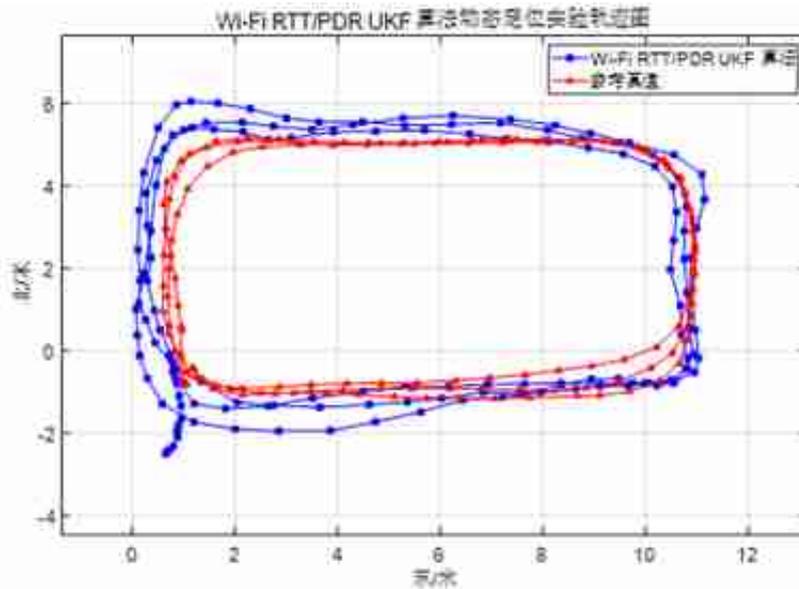


图 18 Wi-Fi RTT/PDR UKF 算法定位结果图

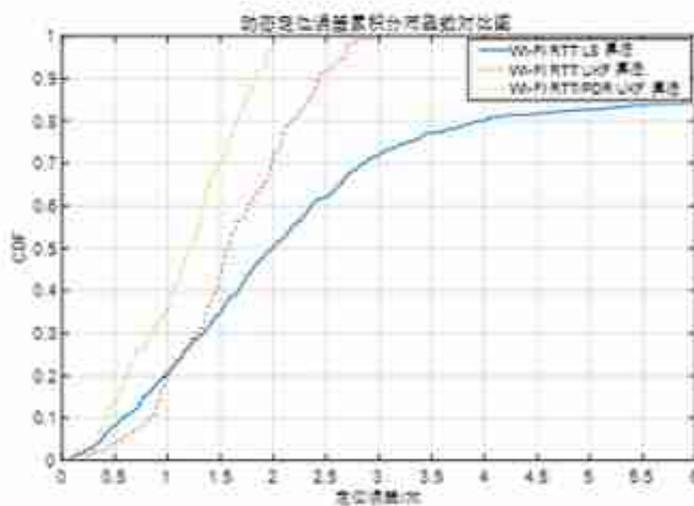


图 19 Wi-Fi RTT LS 算法、Wi-Fi RTT UKF 算法和 Wi-Fi RTT/PDR UKF 算法动态定位误差累积分布函数对比图

表2 动态定位实验误差统计 m

统计指标\算法	Wi-Fi RTT LS	Wi-Fi RTT UKF	Wi-Fi RTT/PDR UKF
E方向	CDF (P=68.3%1.03)	1.07	1.27
	误差均值	0.85	0.86
	均方根误差	1.18	1.06

N方向	最大误差	7.93	2.97	2.13
	CDF (P=68.3%)	2.50	1.49	0.54
	误差均值	2.66	1.17	0.53
	均方根误差	3.97	1.35	0.69
位置	最大误差	16.07	2.70	1.69
	CDF (P=68.3%)	2.76	1.96	1.44
	误差均值	2.99	1.61	1.16
	均方根误差	4.14	1.73	1.27
	最大误差	16.08	2.97	2.14

结合图16、图17和图18可知，Wi-Fi RTT LS算法定位结果存在较大误差，且定位结果容易受到异常Wi-Fi RTT测距数据的影响，定位轨迹杂乱无章。Wi-Fi RTT UKF算法定位效果相较于Wi-Fi RTT LS算法有一定提升，能够看出绕圈3周的定位轨迹，但定位轨迹不够平滑且N方向定位误差较大。Wi-Fi RTT/PDR UKF算法定位效果明显好于Wi-Fi RTT LS算法和Wi-Fi RTT UKF算法，能够清晰的看出3圈的定位轨迹，且定位轨迹与参考真值相似度较高。结合图19和表2对定位结果进行统计分析，可以看出Wi-Fi RTT LS算法的定位误差和波动都很大，而且LS算法的定位结果只由当前历元的Wi-Fi RTT数据求得，因此容易受到Wi-Fi RTT异常数据的影响，最大误差达16.08 m。UKF算法的定位结果融合了当前历元Wi-Fi RTT数据以及之前所有历元的Wi-Fi RTT数据，因此定位结果更加稳定可靠且波动较小，最大定位误差均在3 m内。Wi-Fi RTT/PDR UKF算法在E方向的定位精度略次于Wi-Fi RTT UKF算法，而Wi-Fi RTT/PDR UKF算法在N方向的误差均值为0.53 m，Wi-Fi RTT UKF算法为1.17 m，可以说Wi-Fi RTT/PDR UKF算法在N方向的定位精度明显优于Wi-Fi RTT UKF算法。综上所述，可以说Wi-Fi RTT/PDR UKF算法无论是定位精度还是定位准确度都优于Wi-Fi RTT UKF算法和Wi-Fi RTT LS算法。

5结束语

近年来，室内LBS服务蓬勃发展，为满足广泛的室内位置需求，本文基于Wi-Fi RTT测距数据进行室内定位技术研究，相对于UWB、蓝牙等室内定位技术具有定位精度高、应用成本低、范围广等优点。针对复杂室内环境下Wi-Fi RTT测距准确性难以保证的问题，本文通过UKF融合Wi-Fi RTT测距数据和手机内置多传感器数据实现实时室内定位，一方面能够减少NLOS情况下Wi-Fi RTT测距不准对定位结果的影响，另一方面能够避免误差累积，增强定位结果的可靠性、提高定位精度，改善定位性能。通过室内环境下的静态及动态定位对比实验，验证了本文

实现的Wi-Fi RTT/PDR UKF融合定位方法的定位性能明显优于仅依赖Wi-Fi RTT测距信息的Wi-Fi RTT LS方法和Wi-Fi RTT UKF方法，动态定位平均误差为1.16 m，最大误差为2.14 m。结果表明，本文方法具有较好的稳定性，可实现高精度高可用的室内定位。