

基于信号分布混合假设检验的Wi-Fi室内定位方法

周 牧 耿小龙* 谢良波 田增山 卫亚聪

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘 要: Wi-Fi室内定位技术是目前移动计算领域的研究热点之一,而传统位置指纹定位方法没有考虑复杂室内环境下Wi-Fi信号分布的多样性问题,从而导致Wi-Fi室内定位系统的鲁棒性较差。为了解决这一问题,该文提出一种基于信号分布混合假设检验的Wi-Fi室内定位方法。首先根据Jarque-Bera(JB)检验结果对各个参考点处的Wi-Fi信号分布进行正态性评价;然后针对不同Wi-Fi信号分布特性,利用混合Mann-Whitney U检验/T检验方法构造匹配参考点集合,以实现目标的区域定位;最后通过计算定位区域中匹配参考点的K近邻(K-Nearest Neighbor, KNN),完成对目标的位置坐标估计。实验结果表明,所提方法相比于传统Wi-Fi室内定位方法具有更高的定位精度和更强的系统鲁棒性。

关键词: 室内定位; Jarque-Bera检验; Mann-Whitney U检验; T检验; 信号统计分布

中图分类号: TN961

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)12-2868-06

DOI: 10.11999/JEIT180147

Wi-Fi Indoor Localization Based on Hybrid Hypothesis Test of Signal Distribution

ZHOU Mu GENG Xiaolong XIE Liangbo TIAN Zengshan WEI Yacong

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Wi-Fi indoor localization technique is one of the current research hotspots in the field of mobile computing, however, the conventional location fingerprinting based localization scheme does not consider the diversity of Wi-Fi signal distribution in the complicated indoor environment, resulting in the low robustness of indoor localization system. To address this problem, a new hybrid hypothesis test of signal distribution for Wi-Fi indoor localization is proposed. Specifically, the Jarque-Bera (JB) test is conducted to examine the normality of Wi-Fi signal distribution at each Reference Point (RP). Then, according to the different Wi-Fi signal distributions, the hybrid Mann-Whitney U test and T test approaches are used to construct the set of matching reference points with the purpose of realizing the area localization. Finally, by calculating the K-Nearest Neighbor (KNN) of matching reference points in the located area, the location coordinate of the target is obtained. The experimental results indicate that the proposed approach is featured with higher localization accuracy as well as stronger system robustness compared with the conventional Wi-Fi indoor localization approaches.

Key words: Indoor localization; Jarque-Bera test; Mann-Whitney U test; T-test; Signal statistical distribution

收稿日期: 2018-02-05; 改回日期: 2018-06-29; 网络出版: 2018-08-14

*通信作者: 耿小龙 343097884@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771083, 61704015), 长江学者和创新团队发展计划基金(IRT1299), 重庆市科委重点实验室专项经费基金, 重庆市基础与前沿研究计划基金(cstc2017jcyjAX0380, cstc2015jcyjBX0065), 重庆市高校优秀成果转化基金(KJZH17117), 重庆市研究生科研创新项目(CYS17221), 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1704083)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771083, 61704015), The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1299), The Special Fund of Chongqing Key Laboratory (CSTC), The Fundamental and Frontier Research Project of Chongqing (cstc2017jcyjAX0380, cstc2015jcyjBX0065), The University Outstanding Achievement Transformation Project of Chongqing (KJZH17117), The Postgraduate Scientific Research and Innovation Project of Chongqing (CYS17221), The Scientific and Technological Research Foundation of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1704083)

1 引言

随着人们对室内位置服务(Location-Based Service, LBS)需求的不断增加,室内定位技术在多个应用领域起着不可或缺的作用^[1],如在大型机场、购物超市、地下车库等场景下的行人导航或物品搜寻。由于在室内环境下不易持续稳定地捕获全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的卫星信号,所以GPS难以满足大多室内LBS对定位精度的要求。与此同时,蓝牙^[2]、红外(Infrared Ray, IR)^[3]、ZigBee^[4]、超宽带(Ultra Wide Band, UWB)^[5]等定位系统通常需要增加额外的基础设施,使得其应用范围受到极大限制。相比而言,Wi-Fi^[6]网络具有覆盖范围广、部署成本低且无需特殊硬件设备等优势,于是基于接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)的Wi-Fi定位已逐渐成为室内定位技术的主流。

Wi-Fi定位方法大致分为传播模型法和位置指纹法。前者通过Wi-Fi信号传播模型建立传播距离与RSS的数学依赖关系,然后根据已知的Wi-Fi接入点(Access Point, AP)位置,利用三边测量^[7]等几何定位算法来估计目标位置,但该方法存在的主要问题是在复杂室内环境下难以建立精确的Wi-Fi信号传播模型。而后者则主要包括离线和在线两个阶段,在离线阶段通过采集预先标定的若干参考点(Reference Point, RP)处来自不同AP的RSS,构建位置指纹数据库;然后在在线阶段将新采集的RSS与位置指纹数据库进行匹配,以得到目标的估计位置^[8]。为了提高位置指纹数据库的构建效率,现有方法通常对Wi-Fi信号分布特性进行简化假设^[9,10],如文献^[9]提出一种基于粒子滤波的联合状态估计方法,以减小视距(Line-Of-Sight, LOS)/非视距(Non-Line-Of-Sight, NLOS)环境下信号高斯分布假设条件下的正误差范围,文献^[10]利用先验非视距测量校正(Prior NLOS Measurements Correction, PNMC)方法动态估计NLOS环境下的信号瑞利分布参数以提升定位精度。显然,上述简化假设与真实Wi-Fi室内环境下的信号分布特征难以吻合。此外,关于RSS集合的粗差问题(即在给定观测条件下的观测偏差超过系统容许误差的问题),现有文献一般采用后件滤波的方法来对定位结果进行平滑处理,如文献^[11]采用CRIL(Coupled RSS and Inertial navigation system Localization)算法将定位结果反馈于信道模型以得到最优的参数估计,使系统能够快速响应动态变化的外部环境,但这类方法一般难以准确跟踪多AP条件下的信道模型参数,系统鲁棒性较差。

针对上述问题,本文提出一种基于信号分布混合假设检验的Wi-Fi室内定位方法。该方法考虑室内环境下Wi-Fi信号分布的多样性问题,其首先根据Jarque-Bera(JB)检验结果对Wi-Fi信号分布的正态性进行评价;然后利用混合Mann-Whitney U检验/T检验方法对目标进行区域定位;最后通过计算定位区域中匹配参考点的K近邻(K-Nearest Neighbor, KNN)^[12],完成对目标的位置坐标估计。

本文结构安排如下:第2节给出了关于Wi-Fi信号分布正态性评价的JB检验方法;第3节描述了基于混合Mann-Whitney U检验/T检验的Wi-Fi室内定位过程;第4节通过实验数据验证了本文方法的有效性和可靠性;第5节总结全文并给出下一步工作。

2 信号分布正态性JB检验

由于真实Wi-Fi室内环境下的信号分布存在多样性,若对不同参考点处信号总体分布进行一致性假设,则当真实信号分布偏离假设总体分布时,传统参数检验(如T检验)方法^[13]的性能将会急剧恶化。为此,本文采用JB检验方法对每个参考点处RSS分布进行正态性检验,若检验结果为真,则利用RSS正态分布条件下的T检验方法对目标进行定位;反之,则利用RSS非正态分布条件下的Mann-Whitney U非参数检验方法进行定位。具体而言,每个参考点处RSS分布正态性JB检验过程如下:

对于每个参考点处采集的RSS样本 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$,其中, n 为样本容量,建立原假设“ H_0 : RSS样本服从正态分布”和备择假设“ H_1 : RSS样本不服从正态分布”。此时,计算偏度系数 S 和峰度系数 K :

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{3/2}} = \frac{\hat{\mu}_3}{\hat{\sigma}^3} \\ K &= \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^2} = \frac{\hat{\mu}_4}{\hat{\sigma}^4} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, $\bar{x}$, $\hat{\mu}_3$, $\hat{\mu}_4$ 和 $\hat{\sigma}$ 分别为RSS样本均值、3阶中心矩、4阶中心矩和标准差。基于此,构造JB检验统计量^[14]:

$$J_B = \frac{n}{6} \left[S^2 + \frac{(K-3)^2}{4} \right] \quad (2)$$

由文献[14]可知,若RSS样本服从正态分布,则 J_B 服从自由度为2的卡方分布,即 $J_B = \hat{J}_B \sim \chi^2(2)$ 。于是,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件[15]下,可得决策值 p' :

$$p' = P_{\chi^2} \{J_B > \hat{J}_B\} \quad (3)$$

其中, $P_{\chi^2} \{J_B > \hat{J}_B\}$ 表示在 χ^2 分布条件下RSS样本的JB检验统计量不小于 $\hat{J}_B$ 的概率。此时,当 $p' \geq \alpha$ 时,接受 H_0 (即检验结果为真),得到该参考点处RSS样本服从正态分布;反之,接受 H_1 (即检验结果为假),得到该参考点处RSS样本不服从正态分布。

3 混合假设检验定位

3.1 T检验

对于RSS样本服从正态分布的参考点,利用T检验方法检验其RSS样本与新采集RSS样本是否来自同一总体,并将来自同一总体的参考点设为目标位置的匹配参考点。具体而言,将第 $i(i=1,2,\dots,t)$ 个来自第 $l(l=1,2,\dots,r)$ 个AP的RSS样本服从正态分布的参考点处采集的RSS样本 $\mathbf{RSS}_i^l = \{\mathbf{RSS}_{i1}^l, \mathbf{RSS}_{i2}^l, \dots, \mathbf{RSS}_{im}^l\}$ ($i=1,2,\dots,t; l=1,2,\dots,r$)作为样本 $\mathbf{X}$,其中, t 和 r 分别为参考点和AP个数, m 为每个参考点处采集的RSS样本数。同时,将第 $j(j=1,2,\dots,k)$ 个目标位置处采集的来自第 l 个AP的RSS样本 $\mathbf{RSS}_j^l = \{\mathbf{RSS}_{j1}^l, \mathbf{RSS}_{j2}^l, \dots, \mathbf{RSS}_{jn}^l\}$ 作为样本 $\mathbf{Y}$,其中, k 为目标位置数, n 为每个目标位置处采集的RSS样本数。假设样本 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 分别来自总体均值为 μ_x 和 μ_y 且总体方差为 σ_x^2 和 σ_y^2 的RSS样本集合,则建立正态分布条件下的原假设“ $H_0: \mu_x = \mu_y$ ”和备择假设“ $H_1: \mu_x \neq \mu_y$ ”。此时,对应的T检验过程如下:

(1) 分别计算样本 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 的样本均值 $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 及样本方差 S_x^2 和 S_y^2 :

$$\bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^m \mathbf{RSS}_{iq}^l, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n \mathbf{RSS}_{jq}^l \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} S_x^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{q=1}^m \left(\mathbf{RSS}_{iq}^l - \bar{X} \right)^2 \\ S_y^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n \left(\mathbf{RSS}_{jq}^l - \bar{Y} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(2) 由文献[13],可得 t 检验统计量:

$$t = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_x - \mu_y)}{S_{\omega} \sqrt{1/m + 1/n}} \sim t(m+n-2) \quad (6)$$

其中, $S_{\omega} = \sqrt{\frac{(m-1)S_x^2 + (n-1)S_y^2}{m+n-2}}$ 。此时,若 $\mu_x = \mu_y$,则有 $\hat{t} = (\bar{X} - \bar{Y}) / (S_{\omega} \sqrt{1/m + 1/n})$ 。

(3) 在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下,可得决策值 p :

$$p = P_t \{t \geq |\hat{t}|\} \quad (7)$$

其中, $P_t \{t \geq |\hat{t}|\}$ 表示在 t 分布[13]条件下RSS样本的 t 检验统计量不小于 $|\hat{t}|$ 的概率。此时,当 $p \geq \alpha$ 时,接受 H_0 (即 $\mu_x = \mu_y$),得到该参考点为第 j 个目标位置的匹配参考点;反之,接受 H_1 (即 $\mu_x \neq \mu_y$),得到该参考点不为第 j 个目标位置的匹配参考点。

3.2 Mann-Whitney U检验

对于RSS样本不服从正态分布的参考点,利用Mann-Whitney U检验方法检验其RSS样本与新采集RSS样本是否来自同一总体,并将来自同一总体的参考点设为目标位置的匹配参考点。为此,建立非正态分布条件下的原假设“ $H_0: F = G$ ”和备择假设“ $H_1: F \neq G$ ”,其中, F 和 G 分别为样本 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 的总体分布,且对应的Mann-Whitney U检验过程如下:

(1) 将样本 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 中RSS样本由小到大排列为 $Z_1^l \leq Z_2^l \leq \dots \leq Z_{m+n}^l$,同时记样本 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 中 m 和 n 个RSS样本在样本 $\mathbf{X} \cup \mathbf{Y}$ 中的排列位置序号(即RSS样本的秩)分别为 $R_1, R_2, \dots, R_m$ 和 $R'_1, R'_2, \dots, R'_n$ 。特别地,对于取值相同的多个RSS样本(即RSS样本的“结”[16]),取其秩的平均值为每个RSS样本的秩。

(2) 分别计算样本 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 的秩和:

$$W_X = \sum_{i=1}^m R_i, \quad W_Y = \sum_{j=1}^n R'_j \quad (8)$$

(3) 分别计算样本 $\mathbf{X}$ 中每个RSS样本的秩大于样本 $\mathbf{Y}$ 中秩的RSS样本数的总和 u_1 ,以及样本 $\mathbf{Y}$ 中每个RSS样本的秩大于样本 $\mathbf{X}$ 中秩的RSS样本数的总和 u_2 :

$$u_1 = W_X - \frac{m(m+1)}{2}, \quad u_2 = W_Y - \frac{n(n+1)}{2} \quad (9)$$

(4) 由文献[16],在大样本(如 $m, n \geq 30$)情况下¹⁾,构造 u 检验统计量:

$$u = \frac{u' - mn/2}{\sqrt{mn(m+n+1)/12}} \quad (10)$$

其中, $u' = \min\{u_1, u_2\}$ 。当 $F = G$ 时, u' 近似服从

¹⁾ 对于小样本基本情况, u' 将近似服从Mann-Whitney分布。此时,利用Mann-Whitney U临界值表可得相应的决策值 p 。

均值为 $E(u') = mn/2$ 且方差为 $\text{Var}(u') = mn \cdot (m+n+1)/12$ 的正态分布。此时, 令 $\hat{u} = u \sim N(0, 1)$ 。

(5) 在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下, 可得决策值 p :

$$p = P\{u \geq |\hat{u}|\} \quad (11)$$

其中, $P\{u \geq |\hat{u}|\}$ 表示在标准正态分布条件下 RSS 样本的 u 检验统计量不小于 $|\hat{u}|$ 的概率。此时, 当 $p \geq \alpha$ 时, 接受 H_0 (即 $F = G$), 得到该参考点为第 j 个目标位置的匹配参考点; 反之, 接受 H_1 (即 $F \neq G$), 得到该参考点不为第 j 个目标位置的匹配参考点。

3.3 位置坐标估计

根据混合 Mann-Whitney U 检验/T 检验方法关于每个参考点的检验结果, 计算第 w ($w = 1, 2, \dots, S$) 个区域的匹配概率 P_{area_w} :

$$P_{\text{area}_w} = \frac{\sum_{l=1}^r \text{card}(M_w^l)}{\sum_{l=1}^r \sum_{v=1}^S \text{card}(M_v^l)} \quad (12)$$

其中, S 为区域个数, $\text{card}(M_v^l)$ 为关于每 l 个 AP 的

匹配参考点位于第 v 个区域的个数。于是, 将具有最大匹配概率的区域作为目标的区域定位结果 (即匹配区域)。最后, 然后通过计算目标位置与匹配区域中各个匹配参考点处 RSS 样本中值之间的欧式距离, 利用 KNN 算法完成对目标的位置坐标估计。

4 实验结果

对于图1所示实验环境, 选择2个走廊区域 (即区域1和区域2) 和1个实验室区域 (即区域3) 进行测试。此时, 在实验环境中均匀标记88个参考点和25个测试点, 并选择三星S7568手机及自主开发的Wi-Fi信号采集软件对来自环境中6个AP的RSS样本进行采集。

4.1 信号分布多样性讨论

根据由信号分布正态性 JB 检验过程可知, 当参考点所对应的决策值 p 越大时, 则越可能接受 H_0 ; 反之, 则接受 H_1 的可能性越高。于是, 图2给出了各个参考点处信号分布正态性 JB 检验结果。

4.2 混合检验结果讨论

图3给出了不同区域的匹配概率。以区域2为例, 该区域中6个测试点所对应的正确区域匹配概率分别为73.33%, 80.00%, 75.76%, 71.74%, 69.09%和86.49%。

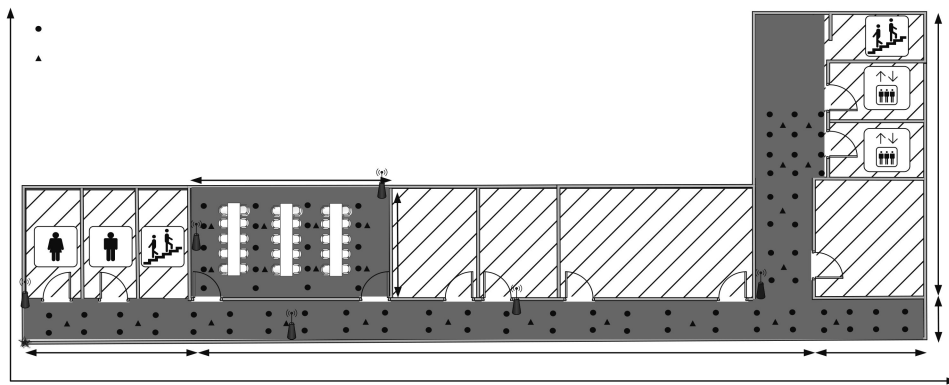


图1 实验环境结构图

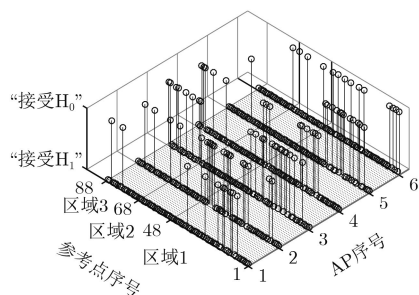


图2 各个参考点处信号分布正态性JB检验结果

4.3 定位结果讨论

图4比较了本文方法与现有T检验^[13], Mann-

Whitney U 检验^[17], 均值KNN^[12], 中值KNN^[8]和贝叶斯^[18]定位方法的定位误差。可以看出, 本文方法的平均定位误差仅为2.04 m, 相比于其它方法分别降低了13.19%, 9.33%, 16.39%, 19.37%和42.06%。同时, 图5给出了不同方法的误差累积概率分布。由图5可知, 本文方法定位误差4 m内的置信概率为85.62%, 高于其它方法的78.63%, 82.76%, 76.45%, 77.42%和68.98%。此外, 相比于其它方法, 本文方法的拖尾误差较小, 说明所提混合 Mann-Whitney U 检验/T 检验方法能够有效抑制RSS集合的粗差, 进而提高系统的定位鲁棒性。

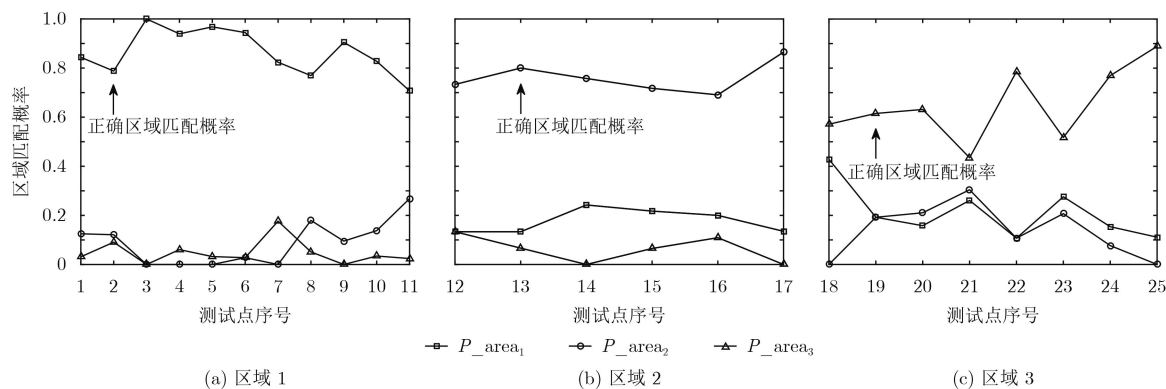


图3 不同区域中测试点所对应的区域匹配概率

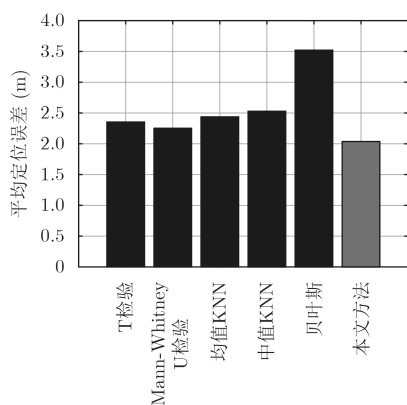


图4 不同方法的平均定位误差比较

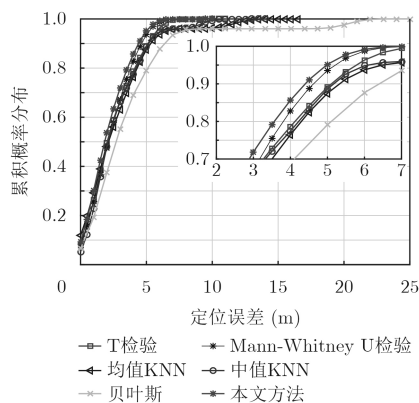


图5 不同方法的误差累积概率分布比较

5 结束语

针对复杂室内环境下Wi-Fi信号样本多样性及RSS集合粗差问题, 本文提出了一种基于信号分布混合假设检验的Wi-Fi室内定位方法。该方法首先利用JB检验方法对各个参考点处采集的Wi-Fi信号样本进行正态性检验; 然后通过混合Mann-Whitney U检验/T检验方法得到目标位置所对应的匹配参考点; 最后根据目标位置与匹配参考点处RSS样本中值之间的欧式距离, 利用KNN算法完成对目标的位置坐标估计。然而, 所提信号分布混合假设检验方法虽然能够有效提高Wi-Fi室内定位精度,

但如何解决该方法在动态信号分布条件下的适应性问题将作为下一步工作。

参考文献

- [1] EL-KAFRAWY K, YOUSSEF M, EL-KEYI A, *et al.* Propagation modeling for accurate indoor WLAN RSS-based localization[C]. IEEE Vehicular Technology Conference Fall, Ottawa, Canada, 2010: 1–5. doi: [10.1109/VETECF.2010.5594108](https://doi.org/10.1109/VETECF.2010.5594108).
- [2] YIN Feng, ZHAO Yuxin, GUNNARSSON F, *et al.* Received-signal-strength threshold optimization using Gaussian processes[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(8): 2164–2177. doi: [10.1109/TSP.2017.2655480](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2655480).
- [3] GOMEZ A, SHI K, QUINTANA C, *et al.* A 50 Gb/s transparent indoor optical wireless communications link with an integrated localization and tracking system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(10): 2510–2517. doi: [10.1109/JLT.2016.2542158](https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2542158).
- [4] HONG K, LEE S K, and LEE K. Performance improvement in ZigBee-based home networks with coexisting WLANs[J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2015, 19(5): 156–166. doi: [10.1016/j.pmcj.2014.03.002](https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.03.002).
- [5] MAALEK R and SADEGHPOUR F. Accuracy assessment of ultra-wide band technology in locating dynamic resources in indoor scenarios[J]. *Automation in Construction*, 2016, 63(3): 12–26. doi: [10.1016/j.autcon.2015.11.009](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.009).
- [6] 刘洺辛, 孙建利. 基于能效的WLAN室内定位系统模型设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1169–1178. doi: [10.19650/j.cnki.cjsi.2014.05.029](https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.2014.05.029).
- LIU Mingxin and SUN Jianli. Design and implementation of WLAN indoor positioning system model based on energy efficiency[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5): 1169–1178. doi: [10.19650/j.cnki.cjsi.2014.05.029](https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.2014.05.029).
- [7] 吴楠, 王旭东, 胡晴晴. 基于多LED的高精度室内可见光定位方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(3): 727–732. doi: [10.11999/JEIT140725](https://doi.org/10.11999/JEIT140725).

- WU Nan, WANG Xudong, and HU Qingqing. Multiple LED based high accuracy indoor visible light positioning scheme[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(3): 727–732. doi: [10.11999/JEIT140725](https://doi.org/10.11999/JEIT140725).
- [8] ALTINTAS B and SERIF T. Indoor location detection with a RSS-based short term memory technique (KNN-STMM)[C]. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, Lugano, Switzerland, 2012: 794–798. doi: [10.1109/PerComW.2012.6197620](https://doi.org/10.1109/PerComW.2012.6197620).
- [9] VELDE S V D, ARORA G, VALLOZZI L, *et al.* Cooperative hybrid localization using Gaussian processes and belief propagation[C]. IEEE International Conference on Communication, London, United Kingdom, 2015: 785–790. doi: [10.1109/ICCW.2015.7247276](https://doi.org/10.1109/ICCW.2015.7247276).
- [10] KOVALEV M. Indoor positioning of mobile devices by combined Wi-Fi and GPS signals[C]. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Busan, Republic of Korea, 2015: 332–339. doi: [10.1109/IPIN.2014.7275500](https://doi.org/10.1109/IPIN.2014.7275500).
- [11] CAI Sheng, LIAO Weixian, LUO Changqing, *et al.* CRIL: An efficient online adaptive indoor localization system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(5): 4148–4160. doi: [10.1109/TVT.2016.2597303](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2597303).
- [12] BAHL P and PADMANABHAN V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[C]. IEEE International Conference on Computer Communications, Tel Aviv, Israel, 2000: 775–784. doi: [10.1109/INFCOM.2000.832252](https://doi.org/10.1109/INFCOM.2000.832252).
- [13] ZHOU Mu, WEI Yacong, TIAN Zengshan, *et al.* Achieving cost-efficient indoor fingerprint localization on WLAN platform: a hypothetical test approach[J]. *IEEE Access*, 2017, 5(8): 15865–15874. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2737651](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2737651).
- [14] JARQUE C M and BERA A K. A test for normality of observations and regression residuals[J]. *International Statistical Review*, 1987, 55(2): 163–172. doi: [10.2307/1403192](https://doi.org/10.2307/1403192).
- [15] COWLES M and DAVIS C. On the origins of the .05 level of statistical significance[J]. *American Psychologist*, 1982, 37(5): 553–558. doi: [10.1037/0003-066X.37.5.553](https://doi.org/10.1037/0003-066X.37.5.553).
- [16] 王星, 褚挺进. 非参数检验[M]. 第2版, 北京: 清华大学出版社, 2014: 93–99.
- WANG Xing and ZHU Tingjin. Non-Parametric Statistics[M]. Second Edition, Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 93–99.
- [17] MANN H B and WHITNEY D R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other[J]. *Annals of Mathematical Statistics*, 1947, 18(1): 50–60. doi: [10.1214/aoms/1177730491](https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491).
- [18] LIU Zhongpeng and LIU Lijuan. Bayesian optimization RSSI and indoor location algorithm of iterative least square[J]. *International Journal of Smart Home*, 2015, 9(6): 31–34. doi: [10.14257/ijsh.2015.9.6.04](https://doi.org/10.14257/ijsh.2015.9.6.04).
- 周 牧: 男, 1984年生, 教授, 研究方向为无线定位与导航技术、信号侦察与检测技术、凸优化与深度学习理论等。
- 耿小龙: 男, 1993年生, 硕士, 研究方向为无线定位技术。
- 谢良波: 男, 1986年生, 讲师, 研究方向为低功耗模拟/数字集成电路、低功耗SAR ADC、室内定位技术等。
- 田增山: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信、个人通信、GPS及蜂窝网定位技术等。
- 卫亚聪: 女, 1993年生, 硕士, 研究方向为无线定位技术、数值计算等。