

引文格式:路泽忠,卢小平,马靓婷,等.融合ROF模型的高斯滤波RSSI测距算法[J].导航定位学报,2019,7(1):54-58.(LU Zezhong, LU Xiaoping. Gaussian filter RSSI ranging algorithm based on ROF model[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2019, 7(1): 54-58.) DOI: 10.16547/j.cnki.10-1096.20190110.

# 融合 ROF 模型的高斯滤波 RSSI 测距算法

路泽忠, 卢小平, 马靓婷, 张 航

(河南理工大学 矿山空间信息技术国家测绘地理信息局重点实验室, 河南 焦作 454003)

**摘要:**针对 WiFi 室内定位时由于室内环境的复杂性、不确定性导致所采集的 RSSI 信号存在奇异值、波动性的问题,提出一种基于高斯滤波的改进算法,以期提高 WiFi 定位的测距精度:在原有高斯滤波算法基础上与全变分去噪算法相结合,引入 ROF 模型;并利用采集的 RSSI 矩阵数据梯度控制扩散系数,当扩散系数较小时保留有效信息,扩散系数较大时去除噪声;接着对去噪后的 RSSI 矩阵进行自适应校正,同时抑制阶梯效应引起的 RSSI 矩阵平滑不均匀现象,实现对强度信号的滤波及平滑处理。实验结果表明,该方法对提高 WiFi 定位的测距精度有较好效果。

**关键词:**无线保真(WiFi)定位;高斯滤波;Rudin Osher Fatemi(ROF)模型;扩散系数

中图分类号:P228

文献标志码:A

文章编号:2095-4999(2019)10-0054-05

## Gaussian filter RSSI ranging algorithm based on ROF model

LU Zezhong, LU Xiaoping, MA Liangting, ZHANG Hang

(Key Laboratory of Mine Spatial Information and Technology of NASMG, Jiaozuo, Henan 454003, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the singularity and the fluctuation of the collected RSSI signal in WiFi indoor positioning due to the complexity and uncertainty of the indoor environment, the paper proposed an improved Gaussian filter algorithm for promoting the ranging accuracy of WiFi positioning: the total variational denoising algorithm was combined with original Gaussian filtering algorithm, and Rudin Osher Fatemi model was introduced; the diffusion coefficient was controlled by the gradient of the collected RSSI matrix data, that is, when the diffusion coefficient was smaller, the effective information was retained, while when the coefficient was larger, the noise was removed; then the denoised RSSI matrix was adaptively corrected with suppressing the unevenness of RSSI matrix caused by the staircase effect, so that the filtering and smoothing of the intensity signal was realized finally. Experimental result showed that the proposed method could well improve the ranging accuracy of WiFi positioning.

**Keywords:** wireless fidelity(WiFi)positioning; Gaussian filtering; Rudin Osher Fatemi(ROF)model; diffusion coefficient

## 0 引言

在智能手机飞速发展的时代,基于位置服务<sup>[1]</sup>(location based service, LBS)成为了人们基本服务需求,尤其在大型的体育馆、商场、停车场等室内环境中,无线保真技术(wireless fidelity, WiFi)由于部署简单、成本低廉、布设普遍等优势已被广泛地应用于基于室内的位置服务中<sup>[2]</sup>。

基于 WiFi 的室内定位方法主要涉及到到达角度(angle of arrival, AOA)、到达时间(time of arrival, TOA)、到达时间差(time difference of arrival, TDOA)及接收信号强度(received signal strength indicator, RSSI)等参数。RSSI 方法定位是当前基于 WiFi 室内定位精度最高的定位方式<sup>[3-6]</sup>。基于 WiFi 的 RSSI 室内定位有 2 种形式:一种是根据信号传播的路径损耗模型将节点接收

收稿日期:2018-06-05

基金项目:2016 年国家重点研发计划项目(2016YFC0803103);河南省高校创新团队支持计划项目(14IRTSTHN026)。

第一作者简介:路泽忠(1995—),男,甘肃白银人,硕士研究生,主要研究方向为室内外一体化定位。

通信作者简介:卢小平(1962—),男,河南焦作人,博士,教授,主要研究方向为摄影测量与遥感、室内外一体化定位。

的强度值转化为距离值, 利用距离交会的方式实现定位; 另外一种方式包括 2 个阶段即离线阶段和在线阶段, 首先离线阶段采集各个节点之间的强度值建立离线阶段的指纹数据库, 其次在线阶段获取某未知节点的强度值利用相关的匹配算法如邻近算法(nearest neighbor, NN)、加权邻近算法(k-nearest neighbor, KNN)等实现在线阶段的空间匹配。然而这 2 种方式在进行定位时, 能否得到稳定可靠的信号强度值是实现定位的关键。室内环境的复杂性导致信号衰减严重、RSSI 值不稳定, 滤波是解决该问题的重要方式之一。

基于 WiFi 的 RSSI 室内定位, 根据处理对象的不同, 滤波可以分为以下 2 类: 1) 对定位坐标进行滤波, 如文献 [7] 等利用 WiFi 进行定位, 通过 K 邻近算法对位置进行估计, 接着利用滤波算法实现对位置的滤波, 达到平滑去噪目的, 提高定位精度; 2) 直接对 RSSI 值进行滤波: 如文献 [8] 等在建立 RSSI 指纹库时, 对采集的信号强度值进行高斯滤波, 构建较为精确的指纹数据库, 显著提高定位精度。文献 [9] 等将同一位置采集 RSSI 值通过高斯滤波后再进行均值滤波将其作为最终定位测距值, 提高了定位的精度。然而该滤波方法只能滤除小概率数据, 无法滤除大概率数据对定位结果造成影响。因此, 本文针对室内 WiFi 信号采集中, 由于室内复杂环境因素的影响, 采集的信号强度 RSSI 值存在较高的时变特性和较大的波动性, 导致无法采集到精确的 WiFi 强度信息等问题进行研究, 采用融合 ROF 的高斯滤波方法对采集 RSSI 进行滤波并对其距离值进行估计, 实现在数据采集阶段为 WiFi 定位提供精度保障。

## 1 基于 RSSI 的测距模型

### 1.1 基于无线电路径损耗模型

WiFi 信号工作在 2.4 GHz 频段, 在室内环境中多径效应、障碍物遮挡等环境因素会导致利用所采集的强度值求解的距离结果偏差较大, 因此在不同的环境下选择不同的路径损耗模型对实现 RSSI 的精确定位至关重要<sup>[10-11]</sup>。基于 WiFi 信号的 RSSI 值路径损耗模型主要有自由空间传播模型、对数距离路径损耗模型、对数-常态分布模型。本文针对实际实验应用环境, 选取对数距离路径损耗模型进行距离的量算实验。

传统的对数距离路径损耗模型为

$$P_r(d) = P_r(d_0) + 10n \lg \frac{d}{d_0} \quad (1)$$

为更好地适应室内的复杂环境, 文献[12]中进一步对对数距离路径损耗模型改进后为

$$P_r(d) = P_r(d_0) + 10n \lg \frac{d}{d_0} + m \quad (2)$$

式中:  $d_0$  是参考距离;  $d$  是收、发天线之间的真实距离;  $P_r(d)$  表示 WiFi 信号传播距离  $d$  时的 RSSI 值, 其计量单位为 dBm;  $P_r(d_0)$  表示  $d_0 = 1$  m 时的 RSSI 值;  $n$  表示同层测试的路径损耗指数值;  $m$  表示附加衰减因子。

### 1.2 RSSI 预处理

由于 WiFi 信号强度 RSSI 值自身波动性较大, 且容易受到复杂环境因素的影响, 如多径效应、同频率电子设备、人体的干扰等, 若想利用 WiFi 的 RSSI 值进行室内定位, 就需先对数据进行预处理<sup>[13]</sup>。

#### 1.2.1 均值滤波

均值滤波是对实验区域某个参考点处采集到锚节点(anchor point, AP)的 WiFi 信号强度 RSSI 值  $X_n$ ,  $X_n = \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}$ , 求取其平均值  $\mu = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1} + x_n}{n}$  作为该参考点各 AP 的估计值。然而, 该方法并没有考虑复杂的环境因素变化, 在处理中将采集时产生的奇异值同时带入运算, 从而产生较大的偏差, 均值滤波具有不合理因素。

#### 1.2.2 高斯滤波

利用高斯滤波进行数据的预处理, 其前提是所有采集的 WiFi 信号强度 RSSI 值数据服从或近似服从正态分布。

假设在实验区域某参考点处采集得到  $n$  个 RSSI 值为  $X_n$ ,  $X_n = \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n\}$ , 其对应的概率为  $P_n$ ,  $P_n = \{p_1, p_2, \dots, p_{n-1}, p_n\}$ , 数据滤波均值为  $\mu$ ; 数据方差为  $\delta^2$ ; 则高斯滤波公式为

$$\left. \begin{aligned} P(X) &= \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/(2\delta^2)} \\ \mu &= \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1} + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n x_i p_i \\ \delta^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

## 2 改进的高斯滤波算法

对于所测量的 WiFi 信号强度 RSSI 值而言, 当在某个测量点处获取某个 AP 的 RSSI 值, 其分布密度越大, 表明该值越接近真实值。利用高斯

滤波方法, 可有效的剔除奇异数据, 将其与均值滤波方法相结合可得到较为精确 RSSI 值。然而该方法只是剔除了远离真实值的小概率数据, 高概率发生区的选择仍然使最终 RSSI 值较实际值偏大且无法消除数据的波动性<sup>[14]</sup>。

为实现高斯滤波算法对 WiFi 信号强度 RSSI 值有效去噪及平滑输出, 解决 RSSI 值的时变特性和波动性问题, 本文对高斯滤波算法进行改进。在对 WiFi 信号强度 RSSI 值进行预处理时, 将采集到的 RSSI 值矩阵在高斯滤波的基础上引入 ROF (Rudin Osher Fatemi) 去噪模型为

$$\min_u E(u), E(u) = \iint_{\Omega} (|\nabla u| + \frac{\lambda}{2} |u_0 - u|^2) dx dy \quad (6)$$

式中:  $u_0$  为存在噪声的强度值矩阵;  $u$  为去噪后的强度值矩阵;  $\nabla u$  为梯度算子;  $|\nabla u|$  为梯度算子的模;  $\lambda$  为约束参数, 且  $\lambda \geq 0$ ;

参照噪声方差加入的保真项为

$$\iint_{\Omega} |u_0 - u|^2 dx dy \quad (7)$$

矩阵的能量函数方程为

$$TV(u) = \iint_{\Omega} |\nabla u| dx dy \quad (8)$$

其中, 保真项的作用是实现对 WiFi 强度值矩阵中噪声的去除。能量函数方程的作用是保证在进行 WiFi 强度值矩阵 RSSI 值滤波处理中不会产生过量的偏差, 起到平滑的作用, 也称为正则项。 $\lambda$  起到平衡保真项和正则项的作用。

全变分去噪能量泛函<sup>[15]</sup>为

$$E = \int_{\Omega} \frac{1}{2} (u - u_0)^2 dx dy + \lambda \cdot TV(u) \quad (9)$$

对能量泛函进行最小化处理, 其欧拉-拉格朗日方程为

$$F = \nabla \left( \frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) - \lambda(u - u_0) = 0 \quad (10)$$

式中  $F$  表示泛函  $E$  对  $u$  的梯度。为避免式(10)中  $|\nabla u| = 0$ , 加入正则项  $\beta$ , 则式(10)中  $\nabla u$  变为

$$|\nabla u|_{\beta} = \sqrt{|\nabla u|^2 + \beta^2} \quad (11)$$

ROF 去噪模型中扩散系数  $1/|\nabla u|$ , 也称为 TV 流扩散模型, 属于逼近项, 具有良好的稳定性, 在进行 RSSI 值矩阵滤波时控制 RSSI 值矩阵不会产生较大的波动, 可取得全局最优解。当  $|\nabla u|$  较小时, 其扩散能力较强, 进而达到噪声去除的目的。将其与高斯滤波算法融合进行 RSSI 值滤波具有较好的处理时变特征和波动性的能力。

本文的算法流程如图 1 所示。

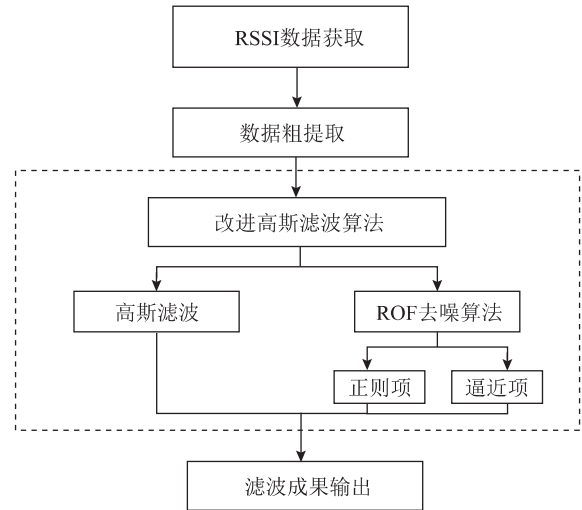


图 1 算法流程

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 基于改进算法数据处理实验

在进行 WiFi 信号强度 RSSI 测距实验时, 需采集距实验锚节点 1~10 m 距离处各节点的强度值, 用于构建强度值与距离之间关系的路径损耗模型。在各节点 WiFi 信号强度 RSSI 值采集过程中, 利用自编软件每隔 1 s 测得一个 RSSI 值, 测得不同距离处的待测节点信号强度 RSSI 值。本文以试验场中一个特定锚节点为例, 测得距该实验锚节点的 3 组不同距离处 RSSI 源数据如图 2 所示。

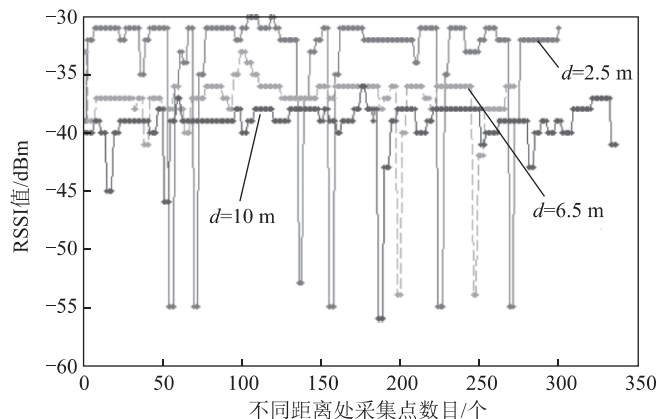


图 2 3 组不同距离处 RSSI 源数据曲线

从图 2 可知, 所测得 WiFi 信号强度 RSSI 值数据具有一定高斯噪声波动、有数值突变点、数值差异呈现一定的区间性。

利用本文所改进的滤波算法对采集的数据进行预处理, 以  $d=2.5$ 、 $6.5$ 、 $10.0$  m 处数据为例, 数据处理结果如图 3 所示。

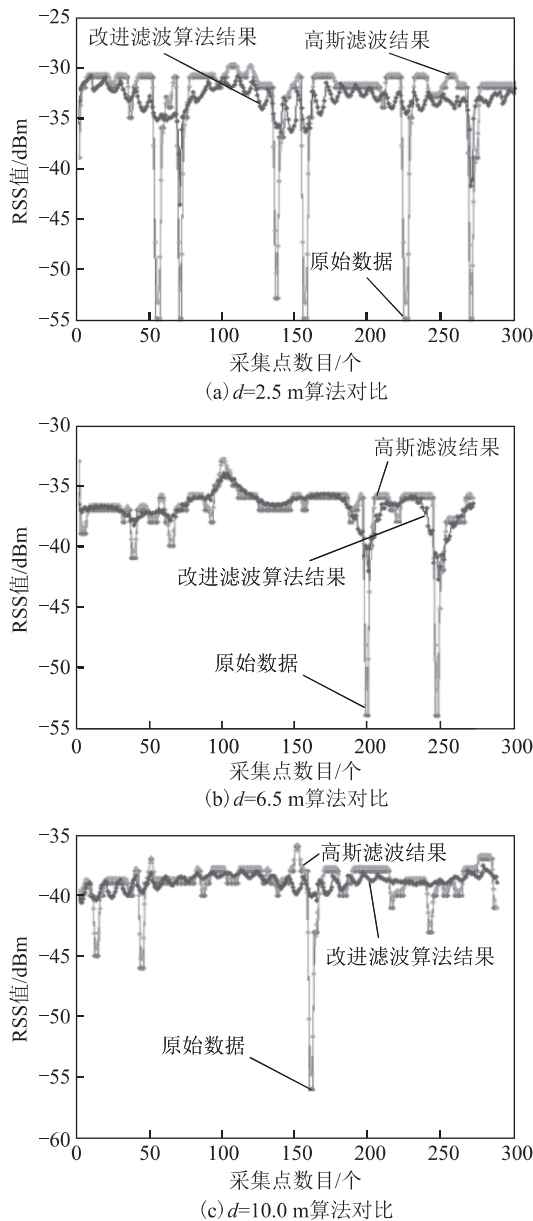


图 3 RSSI 数据处理曲线图

从图 3 可知, 采用单一高斯滤波算法, 可实现对原始数据的突变点平滑输出效果, 但该方法滤波后的数据输出整体波动性较大且无法消除允许范围之内的大范围波动。利用本文提出的改进高斯滤波算法, 在高斯滤波基础上进行 ROF 去噪模型的二次滤波平滑, 能够有效的消除数据突变点, 实现对数据噪声波动的平衡, 使数据准确、平滑地输出。

### 3.2 基于 RSSI 测距实验

本文所测得距实验锚节点 1~10 m 距离处的实测强度数据如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, WiFi 信号强度由于受到多径效应、同频率电子设备、人体遮挡等室内复杂环境因素的干扰, 距离实验 AP 越远, 数据波动

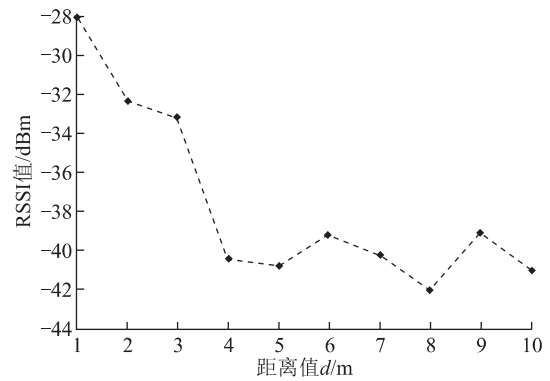


图 4 距实验锚节点 1~10 m 距离处强度值

越大, 尤其在 3~6 m 的距离处。故在进行对数距离路径损耗模型构建前, 需对 RSSI 数据进行滤波处理, 消除数据噪声对测距结果的影响。

对距实验锚节点 1~10 m 距离处 RSSI 数据分别进行高斯滤波及改进算法滤波, 消除数据中存在的噪声, 得到关于实测数据、高斯滤波及改进算法滤波后的数据对比结果如图 5 所示。

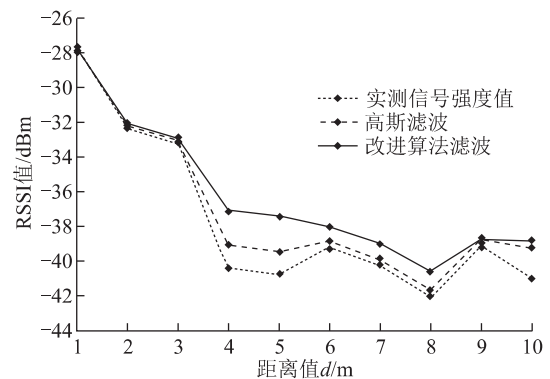


图 5 实测数据与滤波后数据结果对比

利用改进算法对数据进行滤波后, 在滤波后数据的基础上可以构建更为精确的对数距离路径损耗模型。本文根据实测数据, 对实验 AP 在  $d_0=1$  m 时,  $P_r(d_0)=-28$  dBm, 得到适用于本次实验区域的对数距离路径损耗模型  $P_r(d)=-28.576-11.75\lg(d)$ , 其中路径损耗指数  $n=1.175$ , 衰减因子  $m=-0.576$ 。所构建的路径损耗曲线拟合结果与实测数据、高斯滤波及改进算法滤波后关于距离  $d$  和 RSSI 值的对比曲线如图 6 所示; 基于 RSSI 损耗模型的测距计算结果如图 7 所示。

从图 6 和图 7 可知, 本文所提出的改进算法能更加有效的反映其在距离  $d$  处的有效强度值且改进算法相较于高斯滤波及未经处理的数据而言, 其值更接近真实距离值。所得测距误差曲线如图 8 所示。

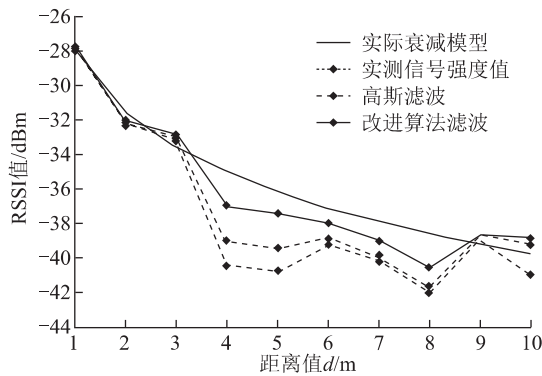
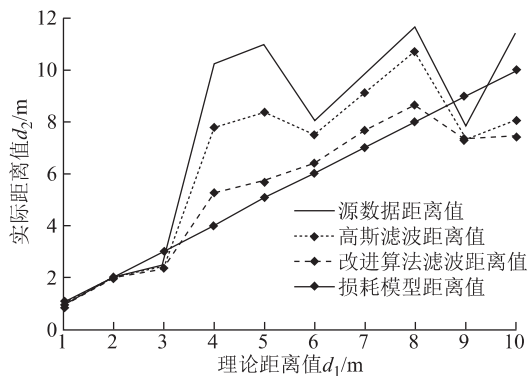
图6 距离  $d$  和 RSSI 值的对比曲线

图7 基于 RSSI 的距离计算结果

从图8可以看出,未经修正前数据最大测距误差为 6.285 6,最小测距误差为 0.069 2,平均误差为 2.400 3。经高斯滤波后数据最大测距误差为 3.783 3,最小测距误差为 0.018 7,平均测距误差

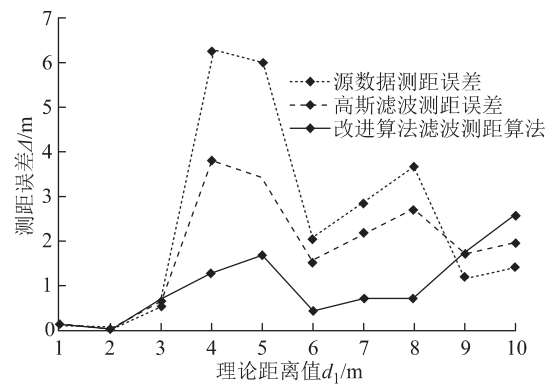


图8 测距误差曲线

为 1.792 9 m。经本文改进算法滤波后数据的最大测距误差为 2.550 8,最小测距误差为 0.02,平均误差为 0.982 8 m,这明显提高了测距精度。

#### 4 结束语

本文提出基于高斯滤波的改进算法,对采集的 WiFi 信号强度 RSSI 值源数据进行滤波平滑处理,针对实验环境建立基于 RSSI 的对数距离路径损耗模型,利用该测距模型计算 AP 与实验手机之间的距离。实验结果证明,本文所提出的改进方法能够有效实现对 RSSI 值的准确、平滑输出,可真实反映实际距离处的强度值,提高了测距精度,从而更好地为 WiFi 室内定位提供保障。

#### 参考文献

- [1] 彭宇,王丹. 无线传感器网络定位技术综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(5): 389-399.
- [2] 陈国良,张言哲,汪云甲,等. WiFi-PDR 室内组合定位的无迹卡尔曼滤波算法[J]. 测绘学报, 2015, 44(12): 1314-1321. DOI:10.11947/j. AGCS. 2015. 20140691.
- [3] 陈群,高星伟,郭杭,等. 一种基于 RSSI 的三维加权质心定位算法[J]. 测绘科学, 2013, 38(4): 91-93. DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2013.04.029.
- [4] 赵永翔,周怀北,陈森,等. 卡尔曼滤波在室内定位系统实时跟踪中的应用[J]. 武汉大学学报(理学版), 2009, 55(6): 696-700.
- [5] 吴东金,夏林元. 面向室内 WLAN 定位的动态自适应模型[J]. 测绘学报, 2015, 44(12): 1322-1330. DOI:10.11947/j. AGCS. 2015. 20130780.
- [6] HUA J S, XIAO P Z, ZHI W. Efficient closed-form algorithms for AOA based self-localization of sensor nodes using auxiliary variables[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2014, 62(10): 2580-2594.
- [7] CHAN E C L, BACIU G, MAK S C. Using WiFi signal strength to localize in wireless sensor networks[J]. IEEE Computer Society, 2009: 538-542. DOI:10.1109/CMC. 2009. 233.
- [8] 王彦斐,赵言,黎慕韩. 高斯滤波在 Zigbee 室内定位中的应用研究[J]. 测绘地理信息系统, 2016, 45(5): 56-59.
- [9] 陶为戈,朱华,贾子彦. 基于 RSSI 混合滤波和最小二乘参数估计的测距算法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(12): 1748-1753.
- [10] 贾银山,曾帅斌,王璟. 一种基于优化 RSSI 精度的加权质心算法[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(11): 162-165.
- [11] 李桢,黄劲松. 基于 RSSI 抗差滤波的 WiFi 定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(3): 361-366.
- [12] 万群,郭贤生,陈章鑫. 室内定位理论、方法和应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2012: 80-81.
- [13] 薛卫星,邱卫宁,花向红. 一种用于 RSS 提取的改进粒子滤波算法[J]. 测绘科学, 2017, 42(11): 20-24.
- [14] 陈丽,王学东,孙晶晶,等. 基于改进高斯滤波的室内无线定位算法[J]. 计算机技术及应用, 2014, 36(3): 31-34.
- [15] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Physica D, 1992, 60: 259-268.