

基于卡尔曼滤波的接收信号强度指示差值定位算法

耿友林^① 解成博^{*①} 尹 川^① 郭兰图^② 王先义^②

^①(杭州电子科技大学电子信息学院 杭州 310018)

^②(中国电波传播研究所 青岛 266107)

摘 要: 针对频谱监测系统中被监测信号无法控制并且没有任何先验知识, 只能通过对信号被动监测, 即接收与处理信号来估计信号源位置的要求, 该文提出一种基于接收信号强度指示差值(RSSID)的定位算法, 并利用卡尔曼滤波提高其定位精度。该文将两监测站之间的RSSID转换成信号源到两监测站的距离之比, 根据距离之比构造定位方程矩阵, 进而利用最小二乘法求取信号源位置。仿真结果表明: 所提算法比经典RSSI定位算法性能更优, 降低了环境因素对定位精度的影响, 并且能更好地满足参数较少的定位服务需求, 可以有效地应用于频谱监测系统中。同时, 卡尔曼滤波可以有效改善系统的定位精度, 达到预期的定位效果。

关键词: 定位算法; 接收信号强度指示; 卡尔曼滤波

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)02-0455-07

DOI: 10.11999/JEIT180268

Received Signal Strength Indication Difference Location Algorithm Based on Kalman Filter

GENG Youlin^① XIE Chengbo^① YIN Chuan^① GUO Lantu^② WANG Xianyi^②

^①(College of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

^②(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract: The signal source position can only be estimated by passive monitoring of the signal in terms of that the signal monitored by the spectrum monitoring system can not be controlled and there is no prior knowledge. To address this issue, based on Received Signal Strength Indication Difference (RSSID) and using Kalman filtering, a location algorithm is proposed to improve its localization accuracy. The proposed algorithm transforms the RSSID between two base stations into the ratio of the distance from the location of the signal source to the two base stations, and the distances to construct the matrix of location equations is obtained according to the ratio, and then the least square method to find the signal source position is obtained. The simulation results show that the proposed algorithm has better performance than the classical RSSI localization algorithm, reducing the impact of environmental factors on the positioning accuracy, and better meet the positioning service needing fewer parameters. This algorithm can be effectively applied to the spectrum monitoring system. In addition, Kalman algorithm can effectively improve the system's positioning accuracy, and achieve the expected positioning effect.

Key words: Location algorithm; Received Signal Strength Indication (RSSI); Kalman filter

1 引言

电磁频谱监测^[1]是实现无线电管理的技术手段之一。随着通信技术发展和应用普及, 无线电频谱管理工作越来越复杂, 为更加高效管理无线电资源, 避免未知信号源对现有电磁环境干扰, 根据频谱监测数据及时对信号进行定位和跟踪一直是电磁频谱研究热点之一。

对信号源定位技术主要有以下几种实现方法, 例如信号到达时间差(TDOA)^[2-6]、信号到达角度(AOA)^[5,6]、信号到达频率差(FDOA)^[7,8]以及接收信号强度指示(RSSI)^[9-11]等。其中TDOA, AOA, FDOA及其联合定位的定位精度较高, 但需要监测设备拥有额外的硬件^[10]。综合考虑, 在频谱监测系统中频谱数据所包含的信号相关参数较少, 且地面监测站接收机并没有都配备昂贵的测向设备等特点, 因而RSSI定位技术是目前频谱监测中一种比较有效的方法。

收稿日期: 2018-03-21; 改回日期: 2018-08-13; 网络出版: 2018-08-31

*通信作者: 解成博 chengbo_x@163.com

由于被监测信号无法控制且没有任何先验知识, 只能通过对信号的被动监测, 即接收与处理信号来估计信号源位置的情况, 无法直接利用RSSI测距定位。本文提出了一种新的定位算法, 即将监测站间的接收信号强度指示差值(RSSID)转换成信号源到两监测站的距离之比进行定位。此外, 在已知信号源到监测站距离的情况下, 距离之比定位(Localization with Ratio-Distance, LRD)比三边测量法(Trilateration)具有更加优越的定位性能^[12]。结合LRD思想, 本文提出了一种适用于频谱监测系统对信号源进行有效定位的方法, 即RSSID定位算法。

2 定位原理

2.1 RSSI值求取距离之比

在研究信号源位置估算方法之前, 有必要选择一种适合当前环境的无线电波传播的数学模型。本文采用适合解决市区无线电信号源位置估计的Egli电波传播模型^[13], 其经验公式如式(1)所示。

$$L = 78 + 20 \lg f + 40 \lg d - 20h_t - 20h_r \quad (1)$$

式中, L 为路径衰减, 单位dB; f 为信号频率, 单位MHz; d 为信号源到监测站的距离, 单位km; h_t 为信号源发射天线高度, 单位m; h_r 监测站接收天线的高度, 单位m。

发射功率与接收功率之间的关系为

$$\text{RSSI} = P_t - L \quad (2)$$

式中, RSSI为监测站接收功率, 单位dB; P_t 为信号源发射功率, 单位dB。

为了消除信号源的相关参数, 通过式(3)消去信号源发射天线高度 h_t 以及信号源发射功率 P_t 。

$$\text{RSSI}_0 - \text{RSSI}_i = L_i - L_0 = 40 \lg \frac{d_i}{d_0} + 20 \lg \frac{h_{r0}}{h_{ri}} \quad (3)$$

式中, RSSI_0 为主监测站接收功率, RSSI_i 为第 i 个次监测站接收功率, 因此信号源到各次监测站距离与到主监测站的距离之比 k_{i0} 为

$$k_{i0} = \frac{d_i}{d_0} = 10^{\frac{\text{RSSI}_0 - \text{RSSI}_i - 20 \lg \frac{h_{r0}}{h_{ri}}}{40}} \quad (4)$$

2.2 根据距离之比定位

由解析几何可知, 信号源到两个监测站的距离之比(比值不等于1)为常数时, 其轨迹是一个圆, 此圆的圆心位于两监测站位置的连线上并且靠近接收信号大的监测站一侧。假设有3个监测站同时接收到同一信号电平, 就可以得到2个距离比圆, 得到2个可能的信号源位置解, 再根据信号源辐射范围即可确定信号源位置。

设主监测站位置为 $B_0(x_0, y_0)$, 接收天线的高度为 h_0 , 次监测站位置为 $B_1(x_1, y_1)$, $B_2(x_2, y_2)$, 接

收天线高度分别为 h_1, h_2 , 信号源的实际位置为 $S(x_s, y_s)$, 两个距离比圆的圆心为 $C_1(x_{c1}, y_{c1})$, $C_2(x_{c2}, y_{c2})$, 所以根据距离之比和已知监测站位置, 可得到

$$k_{i0} = 10^{\frac{\text{RSSI}_0 - \text{RSSI}_i - 20 \lg \frac{h_{r0}}{h_{ri}}}{40}} = \frac{d_i}{d_0} = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} = \sqrt{\lambda_i}, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

整理式(5)得

$$\begin{aligned} & \left(x - \frac{x_i - \lambda_i x_0}{1 - \lambda_i} \right)^2 + \left(y - \frac{y_i - \lambda_i y_0}{1 - \lambda_i} \right)^2 \\ &= \frac{\lambda_i}{(1 - \lambda_i)^2} \left[(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 \right] \\ &= \frac{\lambda_i}{(1 - \lambda_i)^2} d_{i0}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中, d_{i0} 为次监测站到主监测站的距离, 可以得到距离比圆的信息。圆心坐标为

$$x_{ci} = \frac{x_i - \lambda_i x_0}{1 - \lambda_i}, \quad y_{ci} = \frac{y_i - \lambda_i y_0}{1 - \lambda_i} \quad (7)$$

距离比圆半径:

$$R_i = \left| \frac{k_{i0}}{1 - \lambda_i} \right| d_{i0} \quad (8)$$

因此, 至少使用3个监测站才可得到2个距离比圆, 两圆在监测站共同覆盖范围的交点即为目标位置。实际情况中, 多个监测站进行监测时, 可以得到多个距离比圆, 由于误差的存在, 多个距离比圆相交将产生多个可能的目标解, 式(9)对应的目标序号 j 即为所要求的目标解:

$$\min \left[\sum_{i=0}^n \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right], \quad j \in [0, n-1] \quad (9)$$

本文算法的定位原理如图1所示。

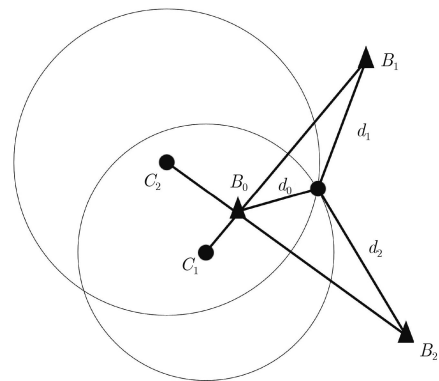


图1 RSSID定位原理图

3 算法步骤

3.1 数据预处理

从式(4)可以看出, 信号源到次监测站与主监测站的距离之比与RSSI信号密切相关。但是, 在信号的实际传播过程中RSSI信号容易受到电波传播环境影响, 例如障碍物尺寸、天气的好坏以及接收节点所在位置的高度等, 因此, 需要对RSSI信号进行预处理得到平稳变化的RSSI信号。

卡尔曼滤波是基于线性最小均方误差预测和线性递归更新的优化算法^[14], 根据前一时刻的预测值和当前时刻的测量值更新当前时刻的预测值, 可以有效解决干扰噪声服从正态分布的滤波问题, 适用于RSSI信号的滤波处理^[15-18]。在这项工作中, RSSI信号噪声被假定为高斯噪声, 虽然这个假设并不完全准确, 但实际测量中RSSI值的误差波动比较集中, 此时卡尔曼滤波器可以在一定程度上解决信号漂移和冲击问题^[18]。其次, 卡尔曼滤波在求解时不需要储存大量的观测数据, 并且当得到新的观测数据时, 可随时算得新的参数滤波值, 便于实时地处理观测数据。

对RSSI信号进行“测量-预测-更新”, 消除系统随机噪声, 平滑RSSI信号。主要包括两个阶段: 预测和更新。预测阶段为^[16]

k 时刻状态预测:

$$x(k|k-1) = x(k-1|k-1) \quad (10)$$

协方差预测:

$$P(k|k-1) = P(k-1|k-1) + Q \quad (11)$$

式中, $x(k-1|k-1)$ 为 $k-1$ 时刻RSSI信号的状态值, $x(k|k)$ 为 k 时刻RSSI信号的状态值, $x(k|k-1)$ 为 k 时刻RSSI信号的预测值, $P(k-1|k-1)$ 是对应 $x(k-1|k-1)$ 的系统误差协方差, $P(k|k-1)$ 对应 $x(k|k-1)$ 的系统误差协方差, Q 状态噪声协方差。递归估计更新阶段^[16]:

卡尔曼增益:

$$Kg(k) = \frac{P(k|k-1)}{P(k|k-1) + R} \quad (12)$$

k 时刻状态更新:

$$x(k|k) = x(k|k-1) + Kg(k)[y(k) - x(k|k-1)] \quad (13)$$

协方差更新:

$$P(k|k) = (1 - Kg(k))P(k|k-1) \quad (14)$$

式中, R 是测量噪声协方差, $Kg(k)$ 是 k 时刻的卡尔曼增益, $y(k)$ 是 k 时刻RSSI信号的测量值。当对象模型足够准确且系统状态和参数不发生突变时, 卡尔曼滤波性能较好。

3.2 定位算法

实际使用中发现, 监测站距离信号源较近时, 由于受到传播路径的影响较小, RSSI测量值相对较准确^[19], 因此选取RSSI值最大的监测站作为主监测站。根据式(5)可以求得信号源到其余各监测站与主监测站的距离之比。

另外由信号源 $S(x_s, y_s)$ 到达监测站 $B_i(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, N+1$ 的欧式距离公式可得

$$k_{i0}^2 = \frac{d_i^2}{d_0^2} = \frac{\|S - B_i\|^2}{\|S - B_0\|^2} = \frac{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2}{(x_s - x_0)^2 + (y_s - y_0)^2} \quad (15)$$

将式(15)整理展开可以得到

$$(1 - k_{i0}^2)(x_s^2 + y_s^2) + 2(k_{i0}^2 x_0 - x_i)x_s + 2(k_{i0}^2 y_0 - y_i)y_s = k_{i0}^2(x_0^2 + y_0^2) - x_i^2 - y_i^2 \quad (16)$$

设 $S' = [x_s, y_s, x_s^2 + y_s^2]$ 为未知矢量建立方程, N 个上述方程构成定位矩阵:

$$GS' = b \quad (17)$$

式中,

$$G = \begin{bmatrix} 2(k_{10}^2 x_0 - x_1) & 2(k_{10}^2 y_0 - y_1) & 1 - k_{10}^2 \\ 2(k_{20}^2 x_0 - x_2) & 2(k_{20}^2 y_0 - y_2) & 1 - k_{20}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2(k_{N0}^2 x_0 - x_N) & 2(k_{N0}^2 y_0 - y_N) & 1 - k_{N0}^2 \end{bmatrix},$$

$$b = \begin{bmatrix} k_{10}^2(x_0^2 + y_0^2) - x_1^2 - y_1^2 \\ k_{20}^2(x_0^2 + y_0^2) - x_2^2 - y_2^2 \\ \vdots \\ k_{N0}^2(x_0^2 + y_0^2) - x_N^2 - y_N^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

于是得到了 S' 的最小二乘估计值:

$$S' = (G^T G)^{-1} G^T b \quad (19)$$

则信号源位置 $S = S'[1:3]$ 。

4 计算机仿真

本文使用Java编程实现RSSI和RSSID定位算法的仿真实验, 并利用Python语言对实验结果进行了分析和处理。本文算法已使用Java编程成功应用于国内某频谱大数据监测平台。

为分析本文算法的定位性能, 在相同的仿真环境下进行以下仿真分析实验。仿真环境设置为4个监测站, 分别位于20 km×20 km的正方形区域的4个顶点上, 其坐标为(0, 0), (0, 20), (20, 0)和(20, 20)。另外, 为对比本文算法与RSSI测距定位算法的定位性能, 以下实验中已知信号源的相关参数, 如频率、发射天线高度及发射功率等。

4.1 影响因素分析

分别验证接收信噪比SNR以及监测站间距对定位精度的影响,采用定位结果与真实值之间的均方根误差衡量定位精度,

$$\text{RMSE}(u) = \frac{\sum_{i=0}^N \|u_{\text{obj},i} - u_{\text{mea},i}\|}{N} \quad (20)$$

其中, N 是信号源个数, $u_{\text{obj},i}$ 表示第 i 个信号源的真实位置, $u_{\text{mea},i}$ 表示 i 个信号源的定位结果。参与比较的算法包括:传统RSSI定位算法,本文所提的RSSID定位算法。

4.1.1 接收信噪比SNR对定位精度的影响

为验证接收信噪比SNR对定位精度的影响,在相同的监测站位置配置下比较不同定位算法的定位性能,设置区域内随机点数 $N=400$,接收信噪比 $\text{SNR} \in [-16, 20]$ dB。

定位精度随信噪比不同的变化情况如图2所示,对比传统RSSI定位算法,当 $\text{SNR} \in [0, 20]$ dB时本文算法性能明显提升,这是因为即使估计的距离与真实距离相差较大,距离的比例也没有太大的影响。当 $\text{SNR} \leq -4$ dB时,噪声在接收信号中起决定性作用,本文算法与RSSI定位算法误差均较大,无法正确估计信号源位置;当 $\text{SNR} \geq -4$ dB时,本文算法定位性能优于RSSI定位算法。

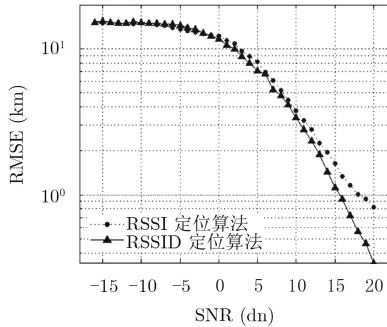
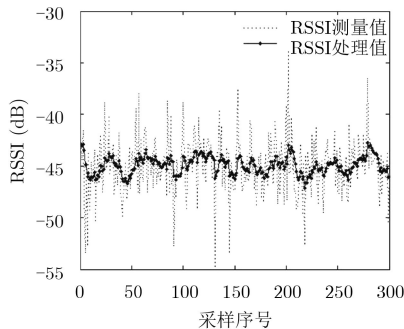
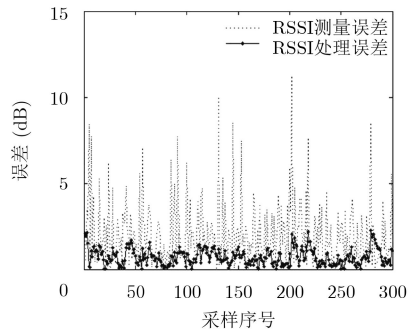


图2 随信噪比变化的定位性能



(a) RSSI 测量值及滤波估计值



(b) RSSI 测量误差及估计误差

图4 卡尔曼滤波效果图

4.1.2 监测站间距对定位精度的影响

为验证监测站间距对定位精度的影响,设置信噪比 $\text{SNR}=16$ dB,监测区域内信号源个数 $N=1000$,监测站间距 $d \in [1, 20]$ km。

定位精度随监测站间距不同的变化情况如图3所示,对比传统RSSI定位算法,随着监测站间距的增大,本文算法定位误差明显较小,性能明显提升。

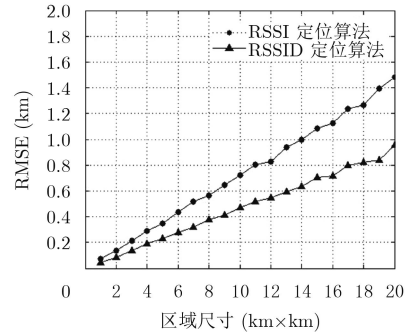


图3 随监测站间距变化的定位性能

4.2 RSSI定位与RSSID定位误差分析

在此分析监测站接收信号信噪比为 $\text{SNR}=16$ dB时, RSSID定位与RSSI定位的定位性能,以及卡尔曼滤波算法对RSSID定位的优化能力。

4.2.1 数据预处理

RSSID定位与RSSI定位的定位精度均受到信号接收强度的影响,因此有必要对RSSI信号进行预处理。本文采用卡尔曼滤波处理RSSI信号,如图4(a)与图4(b)所示,卡尔曼滤波可以实现对RSSI信号的平滑处理,减少RSSI信号的测量误差。

4.2.2 单目标定位

为对比RSSID定位算法与RSSI定位算法对单个目标的定位性能,对区域内随机一个目标进行200次定位。两种不同算法的定位误差如图5(a)与图5(b)所示,可以看出滤波前后, RSSID定位算法与RSSI定位算法都可以对信号源进行有效定位, RSSID定位算法均比RSSI定位算法定位误差较小。

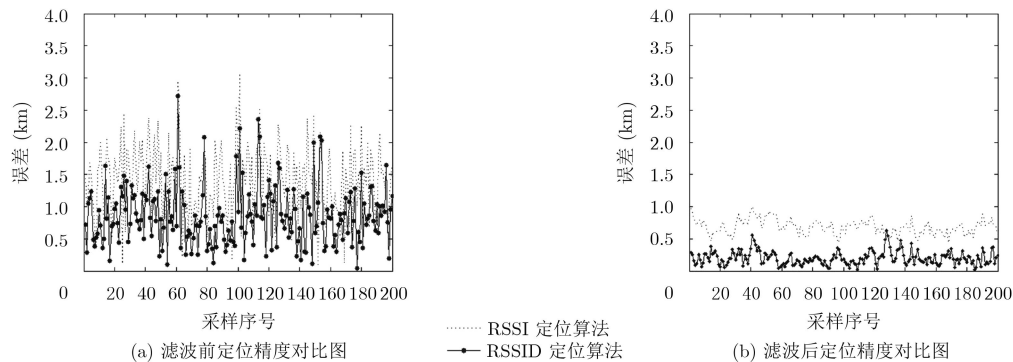


图 5 单目标定位误差对比

为了避免仿真实验的随机性，对1个随机生成的信号源进行10000次定位，分析其误差，如表1所示。

4.2.3 多目标定位

为对比RSSID定位算法与RSSI定位算法对多个目标同时定位的定位性能，对区域内随机生成的25个信号源进行200次定位。两种不同算法的定位误差如图6(a)与图6(b)所示，可以看出滤波前后，本文RSSID算法定位性能均明显优于RSSI定位算法。

为会因为数据量较少出现偶然误差，对200个信号源进行10000次定位，分析每次对200个信号源定位的平均误差，统计结果如表2所示。

5 结束语

本文提出了一种运用于频谱监测系统对监测信号有效定位的方法。在频谱监测系统中，被监测信号无法控制并且没有任何先验知识，只能通过对信号的被动监测、接收与处理来估计信号源的位置，此时不适用传统RSSI定位法，而本文RSSID算法

表 1 单目标定位10000次误差统计分析(km)

是否预处理	定位方法	最大误差	最小误差	平均误差
否	RSSI定位	5.0802	0.0239	1.3993
否	RSSID定位	4.6224	0.0076	0.8527
是	RSSI定位	1.4537	0.2273	0.6249
是	RSSID定位	0.8801	0.0068	0.2683

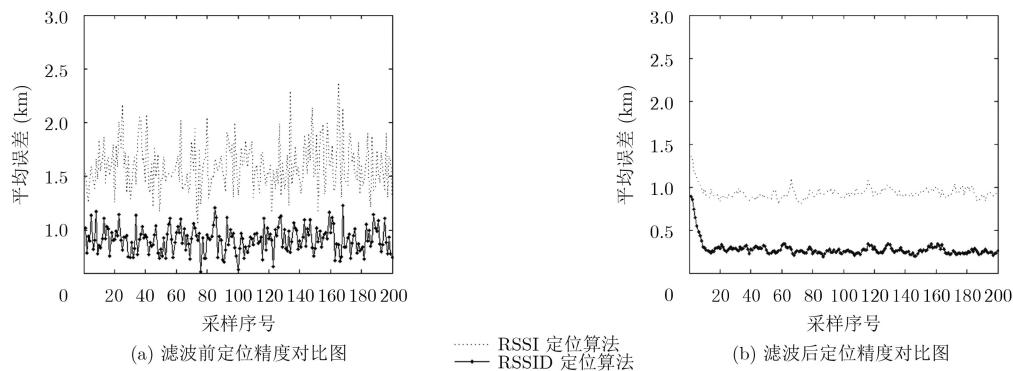


图 6 多目标定位平均误差对比

表 2 多目标定位10000次平均误差统计分析(km)

是否预处理	定位方法	最大误差	最小误差	平均误差
否	RSSI定位	1.8602	1.3599	1.5911
否	RSSID定位	1.1015	0.7620	0.9170
是	RSSI定位	1.5312	0.9470	1.1530
是	RSSID定位	0.8284	0.1948	0.2930

是根据监测站地理位置以及各监测站接收信号强度对信号源定位的,不需要任何先验知识。因此,本文算法适用性更广,可用于频谱监测系统对监测到的未知信号进行实时定位。

仿真分析表明,在信号相关参数已知的情况下,本文RSSID算法比传统RSSI定位法受到信噪比的影响较小,定位性能更加优越。另外引入卡尔曼滤波对RSSI值进行预处理可以极大的提高本文算法的定位性能。

参 考 文 献

- [1] 王先义, 陈丹俊, 刘斌, 等. 复杂电磁环境战场频谱管理[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(4): 338–344. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2008.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2008.04.002).
WANG Xianyi, CHEN Danjun, LIU Bin, *et al.* Battlefield spectrum management in complex electromagnetic environment[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2008, 3(4): 338–344. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2008.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2008.04.002).
- [2] 史小红. 基于TDOA的无线定位方法及其性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(2): 252–257. doi: [10.3969/j.issn.1001-0505.2013.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2013.02.005).
SHI Xiaohong. TDOA-based wireless positioning method and its performance[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(2): 252–257. doi: [10.3969/j.issn.1001-0505.2013.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2013.02.005).
- [3] WARNER G A and DOSSO S E. Bowhead whale localization using time-difference-of-arrival data from asynchronous recorders[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 141(3): 1921. doi: [10.1121/1.4978438](https://doi.org/10.1121/1.4978438).
- [4] WEI Junming and XU Changbin. Improvement of software defined radio based TDOA source localization[C]. Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Dallas, USA, 2015: 5307–5313. doi: [10.1109/IECON.2014.7049310](https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7049310).
- [5] LIU Congfeng, YANG Jie, and WANG Fengshuai. Joint TDOA and AOA location algorithm[J]. *Journal of Systems Engineering & Electronics*, 2013, 24(2): 183–188. doi: [10.1109/JSEE.2013.00023](https://doi.org/10.1109/JSEE.2013.00023).
- [6] NOROOZI A. Algebraic solution of source location estimation using TDOA and AOA measurements[C]. Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, 2017: 1609–1614. doi: [10.1109/IranianCEE.2017.7985303](https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2017.7985303).
- [7] 曲付勇, 孟祥伟. 基于约束总体最小二乘方法的到达时差到达频差无源定位算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5): 1075–1081. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01019](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01019).
QU Fuyong and MENG Xiangwei. Source localization using TDOA and FDOA measurements based on constrained total least squares algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(5): 1075–1081. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01019](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01019).
- [8] LU Zhiyu, BA Bin, WANG Jianhui, *et al.* A direct position determination method with combined TDOA and FDOA based on particle filter[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(1): 161–168. doi: [10.1016/j.cja.2017.11.007](https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.11.007).
- [9] 陈淑敏, 乔晓田, 毛佳, 等. 基于接收信号强度(RSSI)的室内二次定位方法[J]. 传感技术学报, 2015, 28(4): 572–577. doi: [10.3969/j.issn.1004-1699.2015.04.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1699.2015.04.020).
CHEN Shumin, QIAO Xiaotian, MAO Jia, *et al.* RSSI-based twice location method for indoor positioning[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(4): 572–577. doi: [10.3969/j.issn.1004-1699.2015.04.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1699.2015.04.020).
- [10] ZHENG Jungang, WU Chengdong, HAO Chu, *et al.* Localization algorithm based on RSSI and distance geometry constrain for wireless sensor network[C]. IEEE International Conference on Electrical and Control Engineering, Wuhan, China, 2010: 2836–2839. doi: [10.1109/iCECE.2010.693](https://doi.org/10.1109/iCECE.2010.693).
- [11] TAZAWA R, HONMA N, MIURA A, *et al.* RSSI-based localization using wireless beacon with three-element array[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2018, 101(2). doi: [10.1587/transcom.2017ISP0027](https://doi.org/10.1587/transcom.2017ISP0027).
- [12] MARC A K J and KAZUNORI O. LRD: A distributed and accurate localization technique for wireless sensors networks[C]. TENCON 2010-2010 IEEE Region 10 Conference, Fukuoka, Japan, 2010: 234–239. doi: [10.1109/TENCON.2010.5685992](https://doi.org/10.1109/TENCON.2010.5685992).
- [13] 谢树果, 叶知秋, 王磊, 等. 一种基于场强测量的辐射源定位方法[J]. 电波科学学报, 2013, 28(6): 1133–1138. doi: [10.13443/j.cjors.2013.06.024](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2013.06.024).
XIE Shuguo, YE Zhiqiu, WANG Lei, *et al.* Radio source locating method based on signal strength measurement[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(6): 1133–1138. doi: [10.13443/j.cjors.2013.06.024](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2013.06.024).
- [14] 卞国龙, 黄海松, 王安忆, 等. 无线传感器网络定位技术的研究[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(6): 122–127. doi: [10.3969/j.issn.1006-7167.2017.06.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7167.2017.06.029).
BIAN Guolong, HUANG Haisong, WANG Anyi, *et al.* Research on localization technology of wireless sensor networks[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2017,

- 36(6): 122–127. doi: [10.3969/j.issn.1006-7167.2017.06.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7167.2017.06.029).
- [15] JUNG J Y, KANG D O, CHOI J H, *et al.* D2D distance measurement using Kalman filter algorithm for distance-based service in an office environment[C]. International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Seoul, South Korea, 2015: 221–224. doi: [10.1109/ICACT.2015.7224789](https://doi.org/10.1109/ICACT.2015.7224789).
- [16] ZHANG Kaibi, ZHANG Yangchuan, and WAN Subo. Research of RSSI indoor ranging algorithm based on Gaussian - Kalman linear filtering[C]. IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, China, 2016: 1628–1632. doi: [10.1109/IMCEC.2016.7867493](https://doi.org/10.1109/IMCEC.2016.7867493).
- [17] YU Zongzuo and GUO Gaizhi. Improvement of positioning technology based on RSSI in ZigBee networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2016, 95(3): 1–20. doi: [10.1007/s11277-016-3860-1](https://doi.org/10.1007/s11277-016-3860-1).
- [18] ZHOU Cheng, YUAN Jiazheng, LIU Hongzhe, *et al.* Bluetooth indoor positioning based on RSSI and Kalman filter[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 96(3): 1–16. doi: [10.1007/s11277-017-4371-4](https://doi.org/10.1007/s11277-017-4371-4).
- [19] 方震, 赵湛, 郭鹏, 等. 基于RSSI测距分析[J]. 传感技术学报, 2007, 20(11): 2526–2530. doi: [10.3969/j.issn.1004-1699.2007.11.037](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1699.2007.11.037).
- FANG Zhen, ZHAO Zhan, GUO Peng, *et al.* Analysis of distance measurement based on RSSI[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(11): 2526–2530. doi: [10.3969/j.issn.1004-1699.2007.11.037](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1699.2007.11.037).
- 耿友林: 男, 1966年生, 教授, 研究方向为复杂介质目标电磁散射的解析和数值方法、复杂介质中的电波传播特性以及小天线设计和辐射特性等.
- 解成博: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为信号源定位.
- 尹 川: 男, 1987年生, 讲师, 研究方向为电磁成像.