



研究与开发

面向不确定量测的鲁棒RSS定位方法

王奇^{1,2,3}, 胡光^{1,2,3}, 李飞^{1,2,3}, 陈辉^{1,2,3}

- (1. 西安石油大学电子工程学院, 陕西 西安 710065;
2. 西安市油气及新能源开发装备智能化重点实验室, 陕西 西安 710065;
3. 中海油集团测井与定向钻井重点实验室定向钻井分室, 陕西 西安 710065)

摘要: 在基于接收信号强度 (received signal strength, RSS) 的定位中, 传感器量测的系统偏差及锚节点位置的不确定性会对定位结果造成严重影响。对此, 提出一种面向不确定量测的鲁棒定位方法。首先, 针对传感器量测有偏差及锚节点位置不确定的定位问题, 建立相应的量测模型; 其次, 基于经典的极大似然估计准则建立关于目标位置的估计问题; 最后, 对所建立的非凸位置估计问题, 采用合理的近似、松弛数学手段, 将其转化为凸的半正定规划问题, 从而保证得到全局最优解。仿真实验表明, 在不同定位场景和条件下, 所提方法的定位精度相比文献中的几种定位方法均有明显的优势, 最高可提升约 50%, 证明其能有效降低量测不确定性对定位结果的不利影响, 具有良好的鲁棒性。

关键词: 接收信号强度; 目标定位; 不确定量测; 半正定规划

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025029

A robust RSS-based localization method with uncertain measurement

WANG Qi^{1,2,3}, HU Guang^{1,2,3}, LI Fei^{1,2,3}, CHEN Hui^{1,2,3}

1. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China
2. Xi'an Key Laboratory of Intelligent Equipment Development for Oil, Gas and Renewable Energy, Xi'an 710065, China
3. Directional Drilling Laboratory of CNOOC Key Laboratory of Well Logging and Directional Drilling, Xi'an 710065, China

Abstract: In received signal strength (RSS)-based localization, systematic bias in sensor measurements and anchor

收稿日期: 2024-10-29; 修回日期: 2025-01-16

通信作者: 李飞, lif@xsyu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点项目 (No.U20B2029); 国家重点研发计划项目 (No.2023YFC2810902); 陕西省教育厅科研计划项目 (No.23JP128); 陕西省自然科学基金青年项目 (No.2023-JC-QN-0405); 陕西秦创原“科学家+工程师”团队项目 (No.2022KXJ-125); 陕西高校青年创新团队 (No.2022-ZNDXZJ); 西安石油大学科研创新团队项目 (No.2022KYCXTD01)

Foundation Items: Key Program of Joint Fund for Enterprise Innovation and Development of National Natural Science Foundation of China (No.U20B2029), The National Key Research and Development Program of China (No.2023YFC2810902), Shaanxi Provincial Department of Education Research Project (No.23JP128), Shaanxi Provincial Natural Science Foundation Youth Project (No.2023-JC-QN-0405), Shaanxi Qin Chuangyuan “Scientist + Engineer” Team Project (No.2022KXJ-125), Shaanxi University Youth Innovation Team (No.2022-ZNDXZJ), The Research and Innovation Team of Xi'an Shiyou University (No.2022KYCXTD01)



position uncertainty will heavily affect the localization result. To deal with this problem, a robust localization method with uncertain measurements was proposed. Firstly, the measurement model for the localization problem was formulated, where the sensor measurements contained biases and the anchor positions were uncertain. Secondly, the estimation problem of target location was provided using the criterion of maximum likelihood. Finally, proper approximation and relaxation were applied to convert the nonconvex estimation problem of target location to convex semidefinite programming (SDP) problem such that the global optimum could be guaranteed. Simulation results show that the proposed method outperforms some existing methods in the literature for different scenarios and conditions in terms of localization accuracy, of which the improvement achieves up to 50%. It verifies the robustness of the proposed method, and shows that it can efficiently reduce the negative effect of uncertain measurements on localization accuracy.

Key words: received signal strength, target localization, uncertain measurement, semidefinite programming

0 引言

无线定位广泛应用于各行各业, 包括目标跟踪、智能交通、环境监测等^[1-3]。在布局有一定数量锚节点的特定区域, 测量目标点与锚节点之间的无线信号特征数据, 借助相关数学算法可实现对目标的定位。根据所采用的不同信号特征数据, 定位方法可分为信号到达角度、信号到达时间、接收信号强度 (received signal strength, RSS) 等^[4-7]。其中, RSS 定位具有成本低、实现容易的优点^[8]。RSS 定位技术使用目标点与锚节点之间的无线信号强度量测, 结合锚节点自身的位置信息进行目标的位置估计。文献中已有的方法大致可分为非测距方法和测距方法^[9-12]。指纹识别法是常见的一种非测距方法, 这种方法前期需要大量的位置数据组成数据库, 并对模型进行训练, 计算量较大。测距方法通过估算目标与锚节点之间的距离, 进而对目标位置进行解算。此类方法一般基于特定的信号强度传输模型, 即对数正态阴影衰落模型, 可分为极大似然估计方法、线性最小二乘方法、基于优化的方法等^[13-16]。在精确的 RSS 模型条件下, 这些方法可以获得良好的定位精度, 相比指纹识别法, 它们在实现复杂度和精度上更具优势。特别是基于优化的方法, 如半正定规划和二阶锥规划, 往往具有很高的定位精

度。文献[13]通过构造一种关于目标位置的线性模型, 利用 RSS 量测得到距离估计, 进一步得到线性模型噪声的协方差矩阵, 然后采用加权最小二乘估计方法得到目标位置的估计, 最终证明该方法是一种最优无偏估计方法。文献[14]对无偏的 RSS 量测模型进行近似, 然后采用非线性最小二乘估计准则建立了目标位置估计的优化问题。在此基础上, 使用半正定规划方法对定位问题进行了凸化, 从而容易求解得到目标定位的结果。

然而, 用于 RSS 定位的数据模型在实际获取时难免存在一定的误差, 包括信号强度量测模型和锚节点位置量测模型。传感器在使用过程中由于损坏或其他原因可能出现输出数据存在系统偏差的情况^[17-18]。锚节点位置在使用 GPS 或其他自定位方式获取自身位置量测时, 也可能存在一定不确定性偏差^[19-20]。这两类数据误差会使大多已有的定位方法失效。为解决这类问题, 已有少量学者研究了 RSS 模型误差和相应的定位方法。文献[17]研究了传感器有偏差情况下的辐射源定位和接收器导航问题。通过模型近似、松弛, 将含有目标位置和偏差的参数向量估计问题转为凸的半正定规划和带约束的最小二乘问题。文献[18]研究了有偏差 RSS 量测下的多目标合作式定位, 基于 2 种范数提出 2 种不同的半正定规划定位方法。文献[19]针对 RSS 定位中锚节点位置不准确的问

题,提出一种联合估计目标位置和锚节点位置的方法。该方法采用非贝叶斯估计和联合极大似然估计准则,并利用一种迭代的置信区域策略求解了联合极大似然估计的非凸优化问题。文献[20]同样针对无线定位中的锚节点不确定的问题,提出一种基于二阶锥规划的定位方法。它先将锚节点位置的误差描述为无界的随机变量模型,再结合 RSS 数据模型,建立关于目标定位的优化问题,最后采用二阶锥规划对该问题进行了求解。

值得一提的是,文献[19]和文献[20]仅针对具有随机噪声的量测模型,无法解决传感器系统偏差问题,且文献[20]是基于距离量测模型,而并非直接的 RSS 量测模型。同时,文献[17]所提方法基于锚节点位置精确已知的情况,无法解决锚节点位置不确定性问题。可以看出,虽然有一些研究工作在一定程度上给出了特定不确定量测下的 RSS 定位方法,但是不能同时解决传感器存在偏差和锚节点位置存在误差的问题。

对此,本文建立同时存在传感器量测偏差和锚节点位置误差的 RSS 定位数据模型,并给出相应的定位方法。将 RSS 量测和锚节点位置量测联合,建立目标位置的极大似然估计问题。为了便于得到所建立问题的全局最优解,采用合理的近似、凸松弛等方法,将原有的非凸优化问题转为凸的半正定规划问题。最终通过仿真实验验证了所提出方法对 RSS 量测和锚节点位置不确定情况下良好的定位精度,且相比文献现有方法具有明显的优势。

1 量测模型与定位方法

1.1 不确定量测模型

假设在二维平面内使用 m 个锚节点的量测对某一目标点进行定位,其中,真实的锚节点位置表示为 $\mathbf{y}_j(j=1, \dots, m)$,待定位目标点的位置记为 $\mathbf{x}$ 。考虑如下不确定量测模型^[20-21]。

$$P_{i,j} = P_0 + \delta - 10\beta \lg \frac{d_j(\mathbf{x}, \mathbf{y}_j)}{d_0} + n_{i,j} \quad (1)$$

$$\mathbf{z}_j = \mathbf{y}_j + \mathbf{v}_j \quad (2)$$

其中,式(1)表征了无线信号传播强度量测的对数正态阴影衰落模型,式(2)表征了锚节点位置不确定量测方程。 $P_{i,j}$ 表示第 j 个锚节点第 i 次采集到的有偏差 RSS 量测, $i=1, \dots, k$; P_0 为距离辐射源 d_0 处的参考信号强度(d_0 一般取 1 m 处); δ 为量测的固定偏差; β 为路径损失因子,依赖于信号传播环境, P_0 和 β 均假设为已知量; $d_j(\mathbf{x}, \mathbf{y}_j)$ 表示锚节点与目标点之间的距离; $n_{i,j}$ 为零均值高斯噪声,且方差为 σ_1^2 。 $\mathbf{z}_j$ 表示锚节点的不确定位置数据; $\mathbf{v}_j$ 假设为二维零均值高斯噪声,协方差矩阵为 Φ_j (假设 x 轴和 y 轴方向数据噪声独立且方差均为 σ_2^2 , 即 Φ_j 为对角矩阵),且对于不同的 j , 各 $\mathbf{v}_j$ 相互独立。

将信号强度量测噪声建模为高斯分布随机变量在现有的研究中比较常见,而对于系统偏差的研究甚少。对此,本文将传感器量测的系统偏差建模为非随机参数。而对于锚节点位置数据,在获取时难免因各种不确定因素产生误差。根据中心极限定理,大量因素对锚节点位置产生的随机误差之和可近似视为高斯分布,从而可将锚节点位置建模为二维高斯随机变量。由此,式(1)和式(2)建立了具有偏差且锚节点位置不确定的传感器量测模型,即本文研究的基于不确定量测定位方法的模型基础。

1.2 基于不确定量测的鲁棒定位方法

基于量测模型式(1)和式(2),使用不确定的量测包括有偏差的 RSS 量测 $P_{i,j}$ 和锚节点位置量测 $\mathbf{z}_j$, 可实现对目标点位置 $\mathbf{x}$ 的估计。由于噪声 $n_{i,j}$ 和 $\mathbf{v}_j$ 均为高斯分布,且互相独立,采用极大似然估计准则可建立定位问题。

令 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}, \mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_m]$ 为未知的位置参数矩阵,包括未知的目标点位置 $\mathbf{x}$ 和所有锚节点的真实位置 $\mathbf{y}_j(j=1, \dots, m)$, 则给定 RSS 量测 $\mathbf{P} = [P_{1,1}, \dots, P_{k,1}, \dots, P_{1,m}, \dots, P_{k,m}]^T$ 和 $\mathbf{Z} = [\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_m]^T$,



$Y = \{X, \delta\}$ 的似然函数可以写为:

$$p(P, Z|Y) = p(P|Y) \times p(Z|Y) = \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^m \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{i,j}} \exp \left(-\frac{[P_{i,j} - g(\mathbf{x}, \mathbf{y}_j)]^2}{2\sigma_{i,j}^2} \right) \times \prod_{j=1}^m \frac{1}{\sqrt{2\pi} |\Phi_j|} \exp \left(-\frac{(\mathbf{z}_j - \mathbf{y}_j)^T \Phi_j^{-1} (\mathbf{z}_j - \mathbf{y}_j)}{2} \right) \quad (3)$$

其中, $g(\mathbf{x}, \mathbf{y}_j) = P_0 + \delta - 10\beta \lg \frac{d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_j)}{d_0}$ 。

进一步, 可以得到 Y 的极大似然估计问题为:

$$\hat{Y} = \arg \min_{X, \delta} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \frac{1}{\sigma_{i,j}^2} [P_{i,j} - g(\mathbf{x}, \mathbf{y}_j)]^2 + \sum_{j=1}^m (\mathbf{z}_j - \mathbf{y}_j)^T \Phi_j^{-1} (\mathbf{z}_j - \mathbf{y}_j) \quad (4)$$

显然, 上述优化问题是一个非凸问题, 难以求得全局最优解。下面介绍一种凸优化方法。

首先, 采用一阶泰勒展开可以得到:

$$P_{i,j} - g(\mathbf{x}, \mathbf{y}_j) \approx \frac{5\beta}{\ln 10 \gamma} \left(d_j^2 10^{\frac{(P_{i,j} - P_0)}{5\beta}} - \gamma \right) \quad (5)$$

其中, $\gamma = 10^{\frac{\delta}{5\beta}}$, 近似步骤采用了一阶泰勒展开, 则优化问题 (4) 可以近似为:

$$\hat{Y} = \arg \min_{X, \delta} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \left(\frac{5\beta}{\ln 10 \gamma \sigma_{i,j}} \right)^2 \left(d_j^2 10^{\frac{(P_{i,j} - P_0)}{5\beta}} - \gamma \right)^2 + \sum_{j=1}^m \frac{1}{(\sigma_j^s)^2} \|\mathbf{z}_j - \mathbf{x}_j\|^2 \quad (6)$$

$$\text{令 } \lambda_{i,j} = 10^{\frac{(P_{i,j} - P_0)}{(5\beta)}}, \quad w_{i,j}^r = \left(\frac{5\beta}{\ln 10 \gamma \sigma_{i,j}} \right)^2, \quad w_j^s =$$

$\frac{1}{(\sigma_j^s)^2}$, 则问题 (6) 等价:

$$\hat{Y} = \arg \min_{X, \delta} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m w_{i,j}^r (\lambda_{i,j} h_j - \gamma)^2 + \sum_{j=1}^m w_j^s \|\mathbf{z}_j - \mathbf{x}_j\|^2 \quad \text{s.t. } h_j = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}_j\|_2^2 \quad (7)$$

可以看出, 上述优化问题的代价函数包括两

部分, 分别对应了 RSS 量测和锚节点位置量测, 且具有不同的权重。

引入辅助变量 $Z = X^T X$, 优化问题 (7) 可以转为以下半正定规划问题:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = \arg \min_{\gamma, X, Z} & \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m t_{i,j} + \sum_{j=1}^m s_j \\ \text{s.t. } & w_{i,j}^r (\lambda_{i,j} h_j - \gamma)^2 \leq t_{i,j} \\ & w_j^s (\mathbf{z}_j - \mathbf{y}_j)^T (\mathbf{z}_j - \mathbf{y}_j) \leq s_j \\ & \mathbf{y}_j = X(:, j+1) \\ & h_j = \begin{bmatrix} 0_2 \\ \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_j \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_2 & X \\ X^T & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0_2 \\ \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_j \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} I_2 & X \\ X^T & Z \end{bmatrix} \geq 0_{m+3} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{e}_j$ 为 $(m+1) \times 1$ 维的单位向量, 且第 j 个元素为 1。同时, 将引入的辅助变量 $Z = X^T X$ 松弛为 $\begin{bmatrix} I_2 & X \\ X^T & Z \end{bmatrix} \geq 0_{m+3}$, 使得其具有线性矩阵不等式的形式, 从而满足半正定规划的约束要求^[22-23]。此外, h_j 可以具体写为:

$$h_j = d_j^2 = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}_j\|_2^2 = \mathbf{a}_j^T A \mathbf{a}_j \quad (9)$$

其中, $\mathbf{a}_j = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ \cdots \ -1 \ \cdots \ 0]^T$, 且维数为 $(m+3) \times 1$ 以及第 $j+3$ 个元素为 1, 矩阵 A 可以写为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \mathbf{x} & \mathbf{x}_1 & \cdots & \mathbf{x}_m \\ 0 & 1 & \mathbf{y} & \mathbf{y}_1 & \cdots & \mathbf{y}_m \\ \mathbf{x} & \mathbf{y} & \mathbf{x}^T \mathbf{x} & \mathbf{x}^T \mathbf{y}_1 & \cdots & \mathbf{x}^T \mathbf{y}_m \\ \mathbf{x}_1 & \mathbf{y}_1 & \mathbf{y}_1^T \mathbf{x} & \mathbf{y}_1^T \mathbf{y}_1 & \cdots & \mathbf{y}_1^T \mathbf{y}_m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{x}_m & \mathbf{y}_m & \mathbf{y}_m^T \mathbf{x} & \mathbf{y}_m^T \mathbf{y}_1 & \cdots & \mathbf{y}_m^T \mathbf{y}_m \end{bmatrix}$$

其中, $\mathbf{x} = [x, y]^T, \mathbf{y}_j = [x_j, y_j]^T$ 。

由于半正定规划是凸优化问题, 上述问题容易求解得到全局最优解。记关于 X 的解为 X^o , 则最终目标点的位置估计为:

$$\hat{\mathbf{x}} = X^o(1:2, 1) \quad (10)$$

同样, 也可得到偏差 δ 和锚节点位置 $\mathbf{y}_j$ 的估计量。

2 计算复杂度分析

对于以下标准的半正定规划问题：

$$\begin{aligned} & \min \mathbf{c}^T \mathbf{y} \\ & \text{s.t. } \mathbf{A}(\mathbf{y}) \succeq 0 \\ & \mathbf{A}(\mathbf{y}) = \mathbf{A}_0 + \sum_{i=1}^n y_i \mathbf{A}_i \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{y}, \mathbf{c} \in \mathbf{R}^n$ 为 n 维列向量; $\mathbf{A}_0, \dots, \mathbf{A}_n \in \mathbf{R}^{l \times l}$ 为 $l \times l$ 维的对阵矩阵, 其计算复杂度由计算步数和每步计算量决定。每步计算量可表示为 $O(n^2 l^2)$, 其中, n 和 l 分别为半正定规划问题中优化变量个数和线性矩阵不等式的维数。若约束条件中包含 s 个线性矩阵不等式, 则有 $l = \sum_{i=1}^s l_i$, l_i 为第 i 个线性矩阵不等式的维数, 而迭代步数可表征为 $O(\sqrt{l})$ 。因此, 求解标准半正定规划问题的复杂度可表征为 $O(n^2 l^{2.5})^{[24-25]}$ 。

对于本文所提算法对应的半正定规划问题 (7), 其中的优化变量总数 $n = m^2 + (k+6)m + 4$, 线性矩阵不等式的维数 $l = (k+2)m + 3$, 因此, 本文所提定位方法的计算复杂度可表示为 $O([m^2 + (k+6)m]^2 [(k+2)m]^{2.5})$ 。

3 仿真实验与分析

将本文所提的鲁棒定位方法与文献中未考虑传感器偏差或锚节点位置误差的定位方法在不同场景下进行比较。在所有实验图中, 本文方法的结果记为 SDP-RB, 而所比较的极大似然估计方法、文献[13]的最优无偏估计方法、文献[14]中的半正定

规划方法以及文献[18]中的半正定规划方法分别记为 ML、BLUE、SDP 和 SDP-L。极大似然估计方法采用真值初始化求解。对于量测模型 (1), 参考功率 P_0 设为 -40 dB, 对应的参考距离 $d_0 = 1$ m, 路径损失因子 $\beta = 3$, RSS 量测偏差的真值设为 $\delta = 3$ dB。假设每个锚节点采集 2 次关于目标点的 RSS 量测, 即 $k = 2$ 。采用均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 表征定位精度, 其计算式为:

$$\text{RMSE}(\hat{\mathbf{x}}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\hat{\mathbf{x}}_i - \mathbf{x}\|^2} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为真实的目标位置向量; $\hat{\mathbf{x}}_i$ 为一次估计结果; N 为样本总数。如未作特殊声明, 所有 RMSE 计算结果均为 200 次蒙特卡洛实验结果的平均值。考虑 2 种场景下不同方法的定位性能。

3.1 随机场景

随机定位场景如图 1 所示, 10 个锚节点 (辐射源) 随机布局在 20 m × 20 m 的二维平面, 真实位置见表 1。待估的目标点 (接收器) 真实位置为 $[8.5, 9.5]^T$ 。

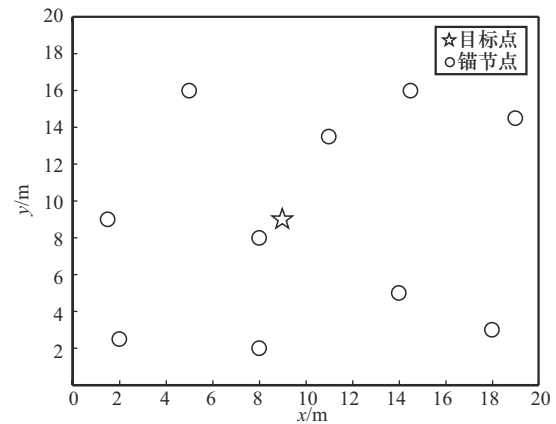


图1 随机定位场景

表1 随机场景中锚节点真实位置

标号	1	2	3	4	5
横坐标	14	8	5	8	2
纵坐标	5	8	16	2	2.5
标号	6	7	8	9	10
横坐标	18	14.5	19	11	1.5
纵坐标	3	16	14.5	13.5	9



随机场景下 RMSE 随 RSS 量测偏差的变化如图 2 所示。其中, RSS 量测随机噪声的方差设为 $\sigma_1=1$ dB, 锚节点位置的不确定性水平固定为 $\sigma_2=1$ m。可以看出, 在不同偏差情况下, 各方法的定位精度由低至高分别为 BLUE、ML、SDP、SDP-L、SDP-RB。SDP-L 考虑了传感器偏差问题, 定位精度优于其他 3 种文献中的方法。而本文所提方法既考虑了传感器偏差又考虑了锚节点位置不确定性, 最终定位精度表现最佳。特别是在 $\delta=3.5$ dB 时, 相比 BLUE 方法, 其精度提升约 50%。

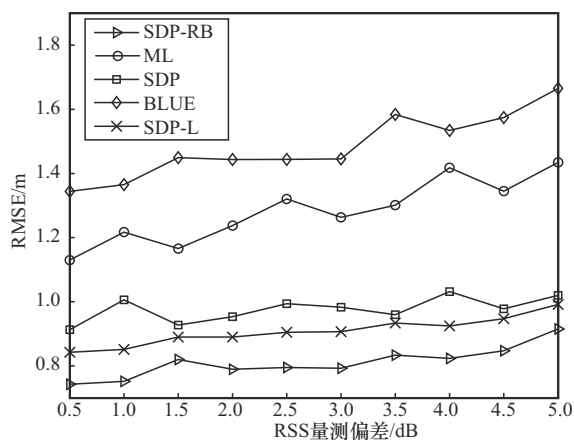


图2 随机场景下 RMSE 随 RSS 量测偏差的变化

随机场景下 RMSE 随锚节点位置不确定性水平的变化如图 3 所示, 其中 RSS 量测的偏差固定为 $\delta=3$ dB。可以看出, 随着锚节点位置的不确定水平变高, 所有方法的定位精度都在降低。ML 和 SDP 的结果相近, 但是本文方法的 RMSE 明显低于其他 4 种方法。综合图 2 和图 3 的实验结果, 说明本文方法能有效减小传感器偏差和锚节点位置误

差对定位结果的影响, 达到提升定位精度的目的。

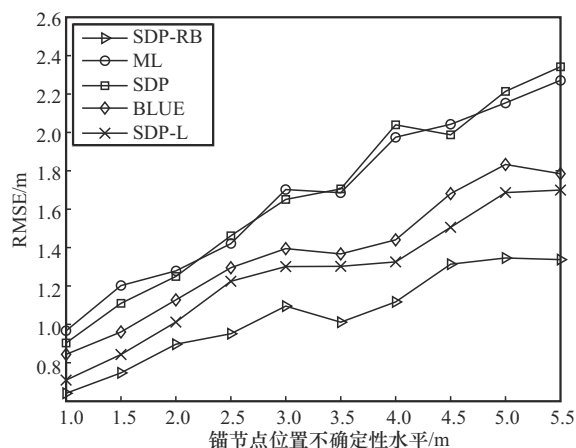


图3 随机场景下 RMSE 随锚节点位置不确定性的变化

3.2 均匀定位场景

均匀定位场景如图 4 所示, 16 个锚节点 (辐射源) 均匀分布于 $23\text{ m} \times 23\text{ m}$ 的二维场景中。目标点的真实位置为 $[-2.5, 2.5]^T$, 各锚节点的真实位置见表 2。

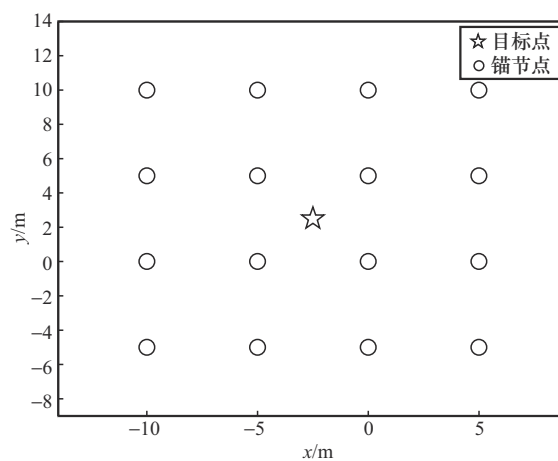


图4 均匀定位场景

表2 均匀定位场景中锚节点真实位置

标号	1	2	3	4	5	6	7	8
横坐标	-10	-10	-10	-10	-5	0	5	5
纵坐标	-10	5	0	-5	-5	-5	-5	0
标号	9	10	11	12	13	14	15	16
横坐标	5	5	0	-5	-5	0	-5	0
纵坐标	5	10	10	10	5	5	0	0

均匀定位场景下 RMSE 随 RSS 量测偏差的变化如图 5 所示, 锚节点位置的不确定水平设为 $\sigma_2=2$ m。在同样场景下, 各方法定位结果随锚节点位置不确定性的变化如图 6 所示, 其中 RSS 量测偏差同样固定为 $\delta=3$ dB。可以看出, 在不同传感器偏差和锚节点位置不确定性情况下, 文献中 4 种方法的 RMSE 较为接近, 特别是 SDP 和 ML。然而, SDP-RB 的精度依然最高, 且在不同条件下相比其他方法, 精度提升约 30%。

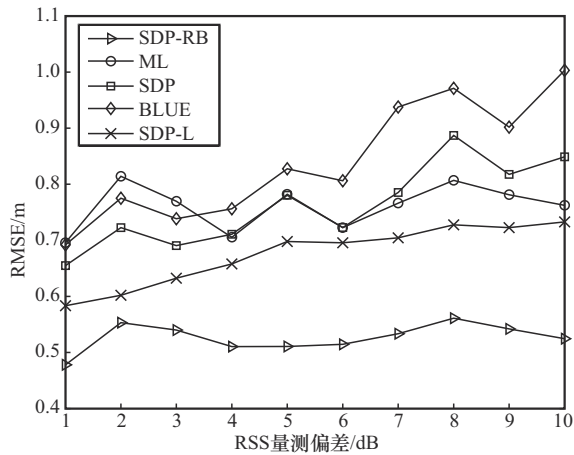


图5 均匀定位场景下RMSE随RSS量测偏差的变化

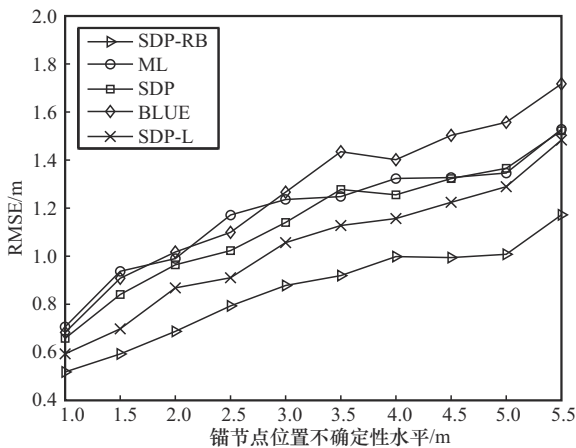


图6 均匀定位场景下RMSE随锚节点位置不确定性的变化

随机场景和均匀定位场景的实验结果均说明本文所提的鲁棒RSS定位方法能有效解决量测不确定性的问题, 具有良好的定位性能。

4 结束语

本文针对RSS定位中的量测不确定性问题, 即传感器量测有偏差且锚节点位置不确定, 提出一种鲁棒的定位方法。将传感器量测偏差建模为未知的非随机量, 弥补仅考虑随机噪声的不足。同时, 将锚节点位置的不确定性建模为高斯随机变量。基于不确定的RSS量测模型, 采用极大似然估计方法建立了目标定位问题。为解决该非凸问题, 提出半正定规划方法将原始问题转化为凸问题, 从而保证有效求得全局最优解, 即得到目标位置的最优估计。通过与文献中的极大似然估计方法、半正定规划方法以及最优无偏估计方法比较, 证实了本文所提方法在随机场景和均匀定位场景下、不同传感器偏差与锚节点位置不确定性等条件下均表现出明显的优势, 精度最高可提升约50%。这表明本文方法能有效解决RSS定位中的量测不确定性问题, 促使定位精度明显提高。

参考文献:

- [1] 戴丽, 袁琴, 朱顶贵, 等. 基于CSS及边缘计算的移动医疗设备定位管理系统研究[J]. 电子器件, 2021, 44(1): 192-196.
DAI L, YUAN Q, ZHU D G, et al. Research on location management system of mobile medical devices based on CSS and edge computing[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021, 44(1): 192-196.
- [2] 常琳. 煤矿井下无线定位技术及系统的应用现状和发展方向[J]. 煤矿安全, 2021, 52(7): 94-98.
CHANG L. Application status and development direction of wireless positioning technology and system in underground coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(7): 94-98.
- [3] 李天松, 李奕霖, 卢相志. 基于改进灰狼优化算法的射频识别室内定位算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(18): 85-91.
LI T S, LI Y L, LU X Z. RFID indoor positioning algorithm based on improved grey wolf optimization algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(18): 85-91.
- [4] 马方立, 徐扬, 徐鹏. 基于多种方位角计算方法的超短波



- AOA 定位比较[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(4): 713-719.
- MA F L, XU Y, XU P. Comparison of AOA localization in ultra-short wave under various azimuth calculation methods[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(4): 713-719.
- [5] 鹿浩, 侯玉涛, 杨晓倩, 等. 基于复域超多维标度的混合 TOA/AOA 定位算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(13): 39-45.
- LU H, HOU Y T, YANG X Q, et al. Research on hybrid TOA/AOA location algorithm based on super multidimensional scale in complex domain[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(13): 39-45.
- [6] WANG Q, DUAN Z S, LI F. Semidefinite programming for wireless cooperative localization using biased RSS measurements[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(6): 1278-1282.
- [7] PANWAR K, FATIMA G, BABU P. Optimal sensor placement for hybrid source localization using fused TOA-RSS-AOA measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(2): 1643-1657.
- [8] 杨军华. 基于接收信号强度的室内定位方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
- YANG J H. Research on indoor positioning method based on received signal strength[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [9] 阚瑞祥, 王玫. 基于三维封闭式测距球动态调整的 WSN 定位[J]. 现代电子技术, 2020, 43(8): 68-71.
- KAN R X, WANG M. WSN positioning based on dynamic adjustment of 3D closed ranging sphere[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(8): 68-71.
- [10] 毕京学, 汪云甲, 纪冬华, 等. RSS 最小值动态补偿的室内 WKNN 指纹定位方法[J]. 测绘科学, 2020, 45(12): 22-27.
- BI J X, WANG Y J, JI D H, et al. Indoor WKNN fingerprint localization method with RSS minimum dynamic compensation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(12): 22-27.
- [11] JIN Y, ZHOU L, ZHANG L, et al. A novel range-free node localization method for wireless sensor networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(4): 688-692.
- [12] WANG Z F, ZHANG H, LU T T, et al. Cooperative RSS-based localization in wireless sensor networks using relative error estimation and semidefinite programming[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1): 483-497.
- [13] SO H C, LIN L X. Linear least squares approach for accurate received signal strength based source localization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(8): 4035-4040.
- [14] VAGHEFI R M, GHOLAMI M R, BUEHRER R M, et al. Cooperative received signal strength-based sensor localization with unknown transmit powers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(6): 1389-1403.
- [15] LI Y Q, MUKHOPADHYAY B, ALOUINI M S. RSS-based cooperative localization and transmit power(s) estimation using mixed SDP-SOCP[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(12): 16936-16941.
- [16] 杜谨泽. 基于 RSSI 的无线传感器网络节点定位算法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- DU J Z. Research on node localization algorithm of wireless sensor network based on RSSI[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [17] WANG Q, DUAN Z S, LI X R. Three-dimensional location estimation using biased RSS measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(6): 4673-4688.
- [18] TOMIC S, BEKO M. A robust NLOS bias mitigation technique for RSS-TOA-based target localization[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2019, 26(1): 64-68.
- [19] ANGJELICHINOSKI M, DENKOVSKI D, ATANASOVSKI V, et al. SPEAR: source position estimation for anchor position uncertainty reduction[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(4): 560-563.
- [20] NADDAFAZADEH-SHIRAZI G, SHENOUDA M B, LAMPE L. Second order cone programming for sensor network localization with anchor position uncertainty[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 749-763.
- [21] KETABALIAN H, BIGUESH M, SHEIKHI A. Advanced RSS-based multisource localization: sequential hypothesis testing for robust location estimation[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(22): 37324-37331.
- [22] BOYD S P, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge, UK: Cambridge, 2004: 168-169.
- [23] GUO X, CHU L, SUN X. Accurate localization of multiple sources using semidefinite programming based on incomplete range matrix[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(13): 5319-5324.
- [24] VANDENBERGHE L, BOYD S. Semidefinite programming[J]. SIAM Review, 1996, 38(1): 49-95.
- [25] WU X P, QI H N, XIONG N X. Rank-one semidefinite programming solutions for mobile source localization in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021, 8(1): 638-650.

[作者简介]



王奇 (1988-), 男, 博士, 西安石油大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为无线信号定位、姿态测量等。



李飞 (1977-), 男, 博士, 西安石油大学教授、博士生导师, 主要研究方向为姿态测量、井场设备定位等。



胡光 (1997-), 女, 西安石油大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络定位方法。



陈辉 (2001-), 男, 西安石油大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络定位方法。