

室内非视距环境下基于改进多维标度的优化定位算法

贾 丹, 李卫华, 王 鹏[✉]

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 研究了室内非视距环境下无线传感器网络的节点定位问题。在优化估计框架下, 首先提出待优化误差函数, 并基于改进多维标度(MDS-MAP)方法, 分析误差函数中未知变量的耦合关系, 最后提出基于改进 MDS-MAP 的优化定位算法。该算法仅依靠节点间的测距信息进行定位, 无需环境先验信息, 因此适用于未知、复杂环境下的无线传感器网络。同时该算法无需角度、信号强度等冗余量测信息来辅助定位, 对硬件要求较低, 从而降低了定位成本。通过仿真比较, 所提出的基于改进 MDS-MAP 的优化定位算法的有效性得以验证。在仿真过程中, 采用聚类分析方法对不同基站数目下的节点定位精度进行分析。根据仿真结果, 在节约定位成本的前提下, 当基站数目达到 6 个时, 能够实现三维空间近似最优定位。

关键词 优化估计; 多维标度; 非视距; 抑制因子

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.03.012

中图分类号 TP915.9 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)03-0066-07

An Optimization Localization Algorithm for Indoor NLOS Environment Based on Improved MDS-MAP

JIA Dan, LI Weihua, WANG Peng

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: This paper studies the localization problem of Wireless Sensor Network (WSN) in Indoor Non Line of Sight (NLOS) environment. Under condition of the optimization estimation framework, an error function to be optimized is firstly proposed, and then based on advanced Multidimensional Scaling-MAP (MDS-MAP) method, the coupling relationship among the unknown variables is analyzed, and finally an optimization localization algorithm based on improved MDS-MAP is designed. Without any prior environmental knowledge, the proposed algorithm can be conducted merely with distance information suitable for WSN in unknown and complex environment. Simultaneously, the algorithm does not need any redundant information (e. g. angle and signal strength), thus possessing the properties of low hardware requirement and low cost. The effectiveness of the proposed algorithm are illustrated through several simulations examples. And the clustering analysis method is adopted to analyze the localization precision with different numbers of basis stations. According to the simulation results, the approximate optimal localization results with low cost are reached in 3-dimensional space when the number of the basis stations is six.

收稿日期: 2017-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(61403414); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2016JQ6070); 博士后科学基金(2016M603042)

作者简介: 贾 丹(1993—), 女, 河北唐山人, 硕士生, 主要从事信息融合研究. E-mail: jiadan930510@163.com

通讯作者: 王 鹏(1985—), 男, 山西运城人, 讲师, 博士, 主要从事分布式估计与分布式控制研究. E-mail: blueKing1985@hotmail.com

引用格式: 贾丹, 李卫华, 王鹏. 室内非视距环境下基于改进多维标度的优化定位算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(3): 66-72. JIA Dan, LI Weihua, WANG Peng. An Optimization Localization Algorithm for Indoor NLOS Environment Based on Improved MDS-MAP[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3): 66-72.

Key words: optimization localization; multidimensional scaling (MDS); non line of sight (NLOS); inhibiting factor

随着无线通信网络、蜂窝移动技术和无线传感器技术的快速发展,无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)已被广泛应用在智能家居、智能工厂、灾难预测与搜救、战场环境监测、无人协同作战等各个领域^[1-2]。而节点定位技术作为传感器网络应用的首要环节和关键技术,已受到越来越多的关注。

在一些复杂环境(如室内、地下环境)中,由于障碍物密集,导致信号传播会在视距(Line of Sight, LOS)传播与非视距(Non Line of Sight, NLOS)传播两种方式之间随机切换。而在 NLOS 传播方式中,由于信号直射路径的缺失,导致基于到达时间(Time of Arrival, TOA)或到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)的测距方法会存在严重的 NLOS 测距误差,极大地影响了节点定位精度。针对 NLOS 测距误差,目前主要有 2 类处理方法:一种是基于 NLOS 传播鉴别的处理方法,即在鉴别出 NLOS 信号后,采用不同手段(如对 LOS/NLOS 信息进行加权拟合^[3]、通过虚拟基站将 NLOS 测距近似转化为 LOS 测距^[4-5]、在信息冗余时直接舍弃 NLOS 信息^[6-7]等),来提高节点定位精度;另一种是基于 NLOS 测距误差抑制的处理方法^[8-18],即采用不同手段(如滤波估计、数据重构等)对 NLOS 测量误差进行抑制,来提高定位精度。由于基于 NLOS 传播鉴别的处理方法大多需要基于信号和/或环境的统计信息,因此不适用于未知的复杂环境。

在基于 NLOS 测距误差抑制的处理方法中,目前解决思路主要有:一是利用 NLOS 环境中冗余先验信息来减少 NLOS 误差,如文献[19]基于机场环境的冗余先验信息,借鉴移动通信及航空信道研究成果,减少了 NLOS 误差并设计了多点定位算法;二是通过分析信号传播的物理统计特性来修正 NLOS 测距误差,如文献[11]与[12]基于 NLOS 的时延特性分析,分别对 NLOS 测量数据进行了重构与优化修正,并设计了定位算法;三是采用优化估计方法来抑制 NLOS 误差的定位算法,如文献[18]采用贝叶斯估计、文献[20]采用粒子滤波、文献[9]采用交互多模与扩展卡尔曼滤波,文献[20]基于两步最小二乘估计,分别设计了定位算法;文献[21]提出了一种基于残差加权算法与多维标度(Multidimensional Scaling-MAP, MDS-MAP)方法的集中定位与分簇拼合的定位算法;文献[22]通过提出了一种

基于泰勒级数展开法迭代估计求解的定位算法。此外,文献[17]提出了一种基于 WiFi 信号接收强度的迭代定位算法,文献[11]提出了一种基于网络的轻量级聚类定位算法。

针对 NLOS 环境中的节点定位问题,本文从优化估计的角度出发,通过引入抑制因子 α 将节点定位问题转化为令定位误差函数最小的优化问题,有效抑制 NLOS 误差,并基于改进 MDS-MAP 分析误差函数中未知变量间的耦合关系,提出了一种基于改进 MDS-MAP 的优化定位算法。该算法仅依靠节点间的测距信息,硬件要求低,无需环境中的先验信息,能够广泛应用于未知、复杂的环境中。

1 问题描述

考虑复杂三维空间中的传感器网络定位问题,见图 1。传感器网络节点集合表示为 $\mathbf{X} = \{1, 2, \dots, N, \dots, N+M\}$,可划分为基站节点集合 $\mathbf{X}_B = \{1, 2, \dots, N\}$ 与终端节点集合 $\mathbf{X}_T = \{N+1, N+2, \dots, N+M\}$,其中基站节点 $i \in \mathbf{X}_B$ 的位置 $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 已知,而终端节点 $j \in \mathbf{X}_T$ 的位置 $\mathbf{x}_j = [x_j, y_j, z_j]^T$ 待定。

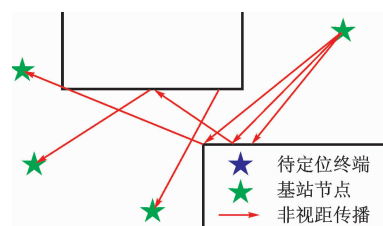


图 1 非视距传播环境示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of NLOS propagation environment

在传感器网络中,基站 $i \in \mathbf{X}_B$ 可接收到终端 $j \in \mathbf{X}_T$ 的传播信号,并根据 TOA 测距方式解算出两者之间的距离:

$$\tilde{d}_{ij} = c\tau_{\text{TOA}} = d_{ij} + n_{ij} \quad (1)$$

式中: $c = 3 \times 10^8$ m/s 为信号传播速度; τ_{TOA} 为 TOA 测距信号传播时间; d_{ij} 为基站 i 与终端 j 间的实际距离; $n_{ij} = w_{ij}^{\text{NLOS}} + w_{ij}$ 为测距误差,由 NLOS 测距误差 $w_{ij}^{\text{NLOS}} > 0$ (在 LOS 传播方式下 $w_{ij}^{\text{NLOS}} = 0$) 与测距解算噪声 $w_{ij} \sim N(0, R)$ 构成^[10,23]。根据 Nokia 公司测量数据,在全球移动通信网络中平均 NLOS 测距误差达到 500~700 m,因此假设测距与实际距离满足 $\tilde{d}_{ij} > d_{ij}$ 。

2 基于改进 MDS-MAP 的优化定位算法

考虑到 NLOS 测距误差对定位结果的影响以及 $\tilde{d}_{ij} > d_{ij}$, 本文假设对实际距离的估计为 $\hat{d}_{ij} = \frac{1}{\alpha} \tilde{d}_{ij}$, 对终端 j 的位置估计为 \mathbf{x}_j , 其中 $\alpha > 1$ 为引入的测距误差抑制因子, 然后通过令估计位置解算距离与估计距离之间的偏差最小来进行优化定位, 即:

$$\arg \min_{\alpha, \mathbf{x}_j} C(\alpha, \mathbf{x}_j) = \sum_{i=1}^N \left| \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - \frac{1}{\alpha} \tilde{d}_{ij} \right| \quad (2)$$

该优化问题为非线性凸优化问题, 通过求解该非线性凸优化问题的最优解, 即可求出终端坐标 \mathbf{x}_j 与抑制因子 α . 而由于误差函数 $C(\alpha, \mathbf{x}_j)$ 中 \mathbf{x}_j 与 α 均未知, 但 \mathbf{x}_j 与 $(1/\alpha)\tilde{d}_{ij}$ 间存在内部耦合关系, 其耦合关系与 MDS-MAP 方法具有相似性. 因此, 本文首先基于改进 MDS-MAP 方法^[27] 进一步分析其耦合关系, 给出 \mathbf{x}_j 与 α 间耦合关系表达式, 并采用双线性方法迭代求解该误差函数最小的优化问题, 进而求解出 \mathbf{x}_j 与 α .

2.1 改进的 MDS-MAP 方法分析

对于终端 $j \in \mathbf{X}_T$, N 个基站的坐标构成基站坐标矩阵 $\mathbf{P} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N]^T$, 则数量积矩阵为

$$\mathbf{B}_j = [\mathbf{P} - \underbrace{[1, \dots, 1]}_{1 \times N} \mathbf{x}_j^T][\mathbf{P} - \underbrace{[1, \dots, 1]}_{1 \times N} \mathbf{x}_j^T]^T \quad (3)$$

式中: \mathbf{B}_j 第 m 行、第 n 列元素为:

$$\mathbf{B}_{m,n} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{1}{\alpha} \tilde{d}_{mj} \right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha} \tilde{d}_{nj} \right)^2 - d_{mn}^2 \right), \quad m, n \in \mathbf{X}_B \quad (4)$$

式中: $\mathbf{1}_{N \times 1}$ 为 $N \times 1$ 的全 1 向量, \tilde{d}_{mj} , \tilde{d}_{nj} 分别表示终端 j 与基站 m, n 的距离, $d_{mn} = \|\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_n\|$ 表示基站 m 与 n 间的距离. 通过对代价函数:

$$J(\mathbf{x}_j) = \arg \min_{\mathbf{x}_j} \|\mathbf{B}_j - [\mathbf{P}; \mathbf{x}_j][\mathbf{P}; \mathbf{x}_j]^T\| \quad (5)$$

进行最小化处理, 可得到终端 \mathbf{x}_j 估计定位结果. 根据文献^[24], 式(5)在最小二乘准则下满足如下关系:

$$\mathbf{L}^T \begin{bmatrix} \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{P}^T \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{P}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{P}^T \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{x}_j \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{2 \times 1} \quad (6)$$

式中: \mathbf{L} 为对 \mathbf{B}_j 进行特征值分解的特征向量, 即:

$$[\mathbf{B}_j] = \mathbf{L} \mathbf{E} \mathbf{L}^T \quad (7)$$

式中: \mathbf{E}, \mathbf{L} 分别为 \mathbf{B}_j 的特征值及对应的特征向量, 在三维空间中, 取其最大的 3 个特征值及对应的特征向量, 即: $\mathbf{E} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\}$, $\mathbf{L} = [l_1, l_2, l_3]$.

在式(6)左边同乘 $\mathbf{L} \mathbf{E}$, 得到:

$$\mathbf{B}_j \begin{bmatrix} \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{P}^T \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{P}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{P}^T \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{x}_j \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{N \times 1} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{0}_{N \times 1}$ 为 $N \times 1$ 的零向量, 对式(8)展开求解得到终端 j 的坐标表达式:

$$\hat{\mathbf{x}}_j = -(\mathbf{A}_2^T \mathbf{B}_j^T \mathbf{B}_j \mathbf{A}_2)^{-1} \mathbf{A}_2^T \mathbf{B}_j^T \mathbf{B}_j \mathbf{A}_1 \quad (9)$$

式中: \mathbf{A}_1 与 \mathbf{A}_2 分别是矩阵 \mathbf{A} 的第一列与其余列, 即

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \vdots \mathbf{A}_2] = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{P}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{P}^T \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{P}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1}_N^T \\ \mathbf{P}^T \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (10)$$

2.2 基于改进 MDS-MAP 定位优化算法

基于上述 \mathbf{x}_j 与 $(1/\alpha)\tilde{d}_{ij}$ 的内在耦合关系(式(4)与式(9)), 本文采用有效集及双线性方法对该凸二次规划问题进行优化求解, 在得到较精确的定位结果的同时, 降低了算法复杂度, 保证了定位的实时性. 本文提出的基于改进 MDS-MAP 的优化定位算法步骤如下:

Step1 对终端 $j, j \in \mathbf{X}_T$, 初始化迭代次数 $k = 1$, 抑制因子 $\alpha_k = 1$;

Step2 对测距信息进行处理, 即 $d_{ij}^k = \frac{1}{\alpha_k} \tilde{d}_{ij}$, $i \in \mathbf{X}_B$;

Step3 根据式(4)计算终端 j 对应的数量积矩阵 \mathbf{B}_j ;

Step4 根据式(9)~(10)计算待定位终端 j 的坐标 \mathbf{x}_j^k ;

Step5 根据式(2), 计算误差函数, 确定搜索方向, 并通过线搜索算法计算优化步长 $\Delta\alpha_k$;

Step6 若 $\Delta\alpha_k = 0$ 时, 终止迭代, 输出待定位终端的坐标 \mathbf{x}_j^k 及第 k 迭代的抑制因子 α_k ; 否则, 更新 $\alpha_{k+1} = \alpha_k + \Delta\alpha_k$, $k = k + 1$, 并跳转 **Step2**;

3 仿真结果分析

为了验证算法的有效性, 我们以华为公司提供的三维室内节点间距离信息作为测试数据, 对算法的定位精度进行仿真分析. 仿真过程中, 我们分别针对 3 个不同场景(NLOS 误差大小程度不同)进行仿真验证, 并与现有的 3 种 NLOS 定位算法进行对比, 分别是两步最小二乘方法(Least Square, LS)^[20]、线性位置线法(Linear Line of Position, LLOP)定位算法^[25]以及 Taylor 级数展开迭代求解定位算法^[22], 并采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \left[\sum_{i=1}^M (\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_i)^2 \right]} \quad (11)$$

及应力(Stress):

$$\text{Stress} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=N+1}^{N+M} (d_{ij}^2 - \hat{d}_{ij}^2)^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=N+1}^{N+M} d_{ij}^4}} \quad (12)$$

作为描述定位精度的评价指标。其中 RMSE 和 Stress 值越小, 定位精度越高。

图 2、3 是场景 1 中基站数目为 30 时不同算法的仿真结果, 场景 1 中 NLOS 误差较大, 经拟合后终端节点平均 $\alpha=1.414$; 图 4、5 是场景 2 中基站数目为 50 时不同定位算法的仿真结果, 场景 2 中环境遮挡较场景 1 中小, 经拟合后终端节点平均 $\alpha=1.191$; 图 6、7 是场景 3 中基站数目为 40 时不同定位算法的仿真结果, 场景 3 中障碍物遮挡较小, 经拟合后终端节点平均 $\alpha=1.03$ 。

0.41%; Taylor 级数展开迭代求解定位算法定位精度较好, 平均 RMSE 均值为 16.892 m, 应力均值为 0.24%; 基于改进 MDS-MAP 优化定位算法定位精度最高, 平均 RMSE 值为 1.939 m, 应力均值为 0.071%, 较两步 LS 定位算法和 LLOP 定位算法定位精度分别提高了 92.6% 和 92.5%, 较 Taylor 级数展开迭代求解算法定位精度提高了 88.57%。在 NLOS 误差较小的场景 2 及场景 3 中, 随着 NLOS 误差的减小, 各算法的定位精度均提升, 但本文提出的算法定位依然有较明显的优势。在场景 2 中, 如图 4、5 所示, 基于改进 MDS-MAP 的优化定位算法平均 RMSE 值为 1.78 m, 应力均值为 0.067%; 在场景 3 中, 如图 6、7 所示, 该算法的平均 RMSE 值为 1.53 m, 应力均值为 0.051%。

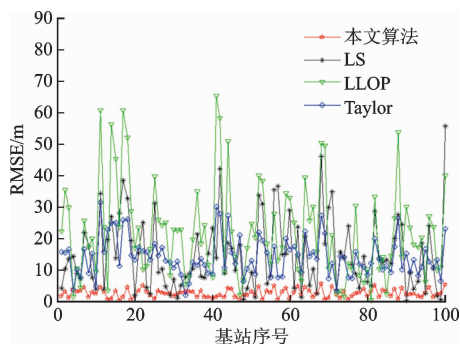


图 2 场景 1 RMSE 值算法仿真结果

Fig. 2 RMSE of localization algorithm for situation 1

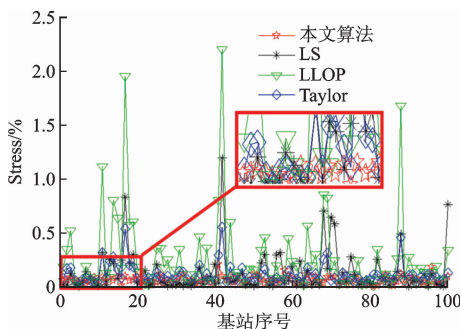


图 3 场景 1 Stress 值算法仿真结果

Fig. 3 Stress of localization algorithm for situation 1

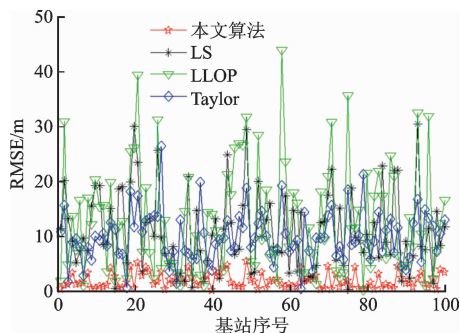


图 4 场景 2 RMSE 值算法仿真结果

Fig. 4 RMSE of localization algorithm for situation 2

在场景 1 环境下, 如图 2、3 所示, NLOS 误差较大, LLOP 定位算法定位精度最低, 平均 RMSE 达到 26.416 m, 应力均值为 0.43%; 其次是两步 LS 定位算法, 平均 RMSE 值为 25.972 m, 应力均值为

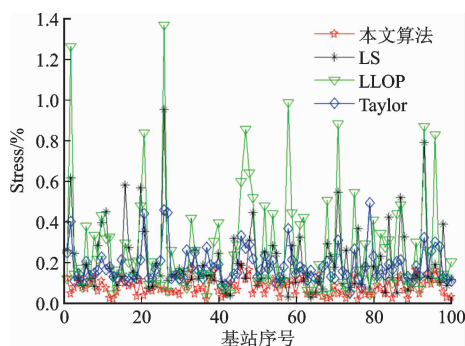


图 5 场景 2 Stress 值算法仿真结果

Fig. 5 Stress of localization algorithm for situation 2

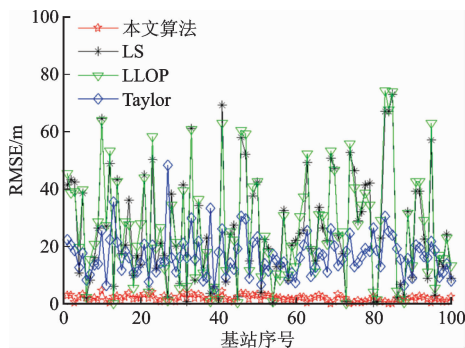


图 6 场景 3 RMSE 值算法仿真结果

Fig. 6 RMSE of localization algorithm for situation 3

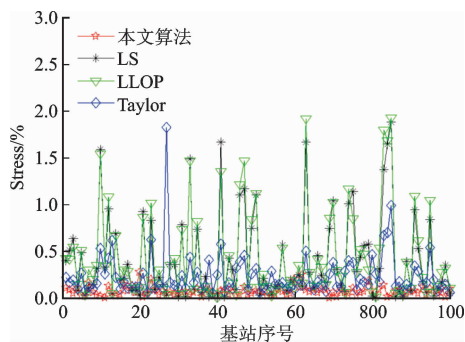


图 7 场景 3 Stress 值算法仿真结果

Fig. 7 Stress of localization algorithm for situation 3

通过分析 RMSE 及 Stress 值,在不同的定位环境中基于改进 MDS-MAP 定位算法 RMSE 稳定在 5 m之内,且 Stress 数值稳定在 0.25%之内,能实现未知复杂环境下有效的节点定位。其余 3 种算法中 LLOP 定位算法定位效果最差,尤其在 NLOS 误差较大时,平均 RMSE 值达到高于 20 m,定位结果偏离真实位置较大。两步 LS 定位算法相较 LLOP 有一定的优化,但定位精度仍较低。Taylor 级数展开迭代定位算法在 NLOS 误差较小的环境中平均 RMSE 值达到 9.817 m,但在 NLOS 误差较大的环境中,平均 RMSE 值为 16.892 m,对 NLOS 误差的适应力不强。

同时,基站数目的个数、选取策略都极大的影响着终端定位精度。一般来说,随着基站数目的增多,终端定位精度越高,但与此同时定位成本也随之提高。对于三维空间终端定位问题,至少需要 4 个已知基站才能实现对终端的唯一性定位。而对基站的选取策略,一般来说,选择的位置越分散,相似度过低,多径传播的概率越小,终端定位精度越高。因此,在分析不同基站数目对定位精度的影响过程中,首先采用 K-Means 聚类算法,根据基站间的位置相似性进行聚类分析,图 8 是 4、5、6、7 聚类结果。

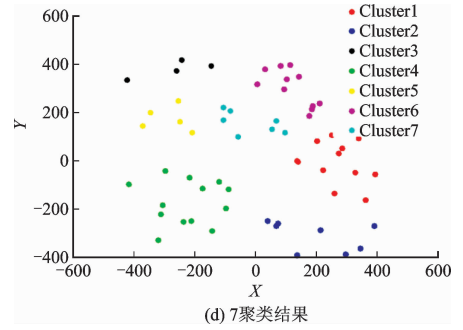
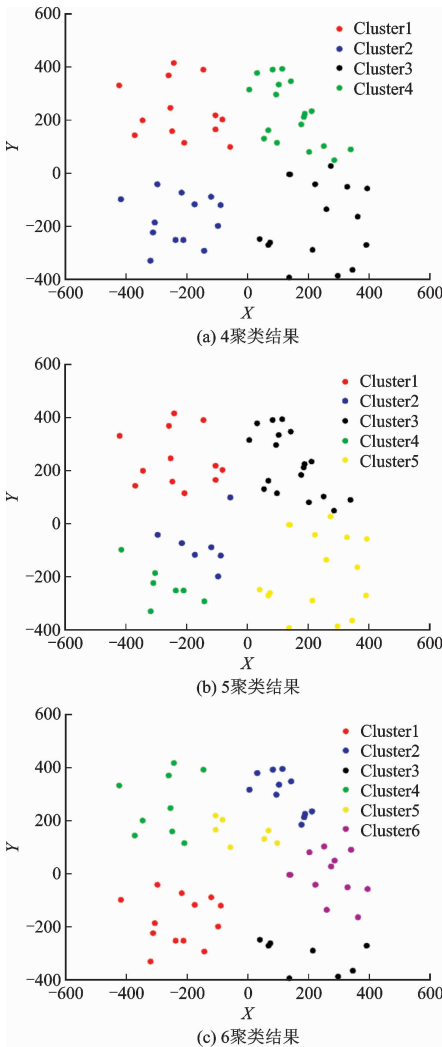


图 8 不同基站数目下聚类分析结果
Fig. 8 Clustering analysis results for different numbers of basis stations

根据聚类分析的结果,我们从不同类中随机抽取基站,组成不同基站数目下的基站组合,对不同基站数目下的定位精度进行分析,见图 9、10。当基站数目为 4 时, RMSE 值及 Stress 值很大,定位精度较低;当基站数目为 5 时,相较于基站数目为 4 的情况,定位精度有大幅度的提高, RMSE 值与 Stress 值急剧下降;当基站数目为 6 时, RMSE 值与 Stress 值相较基站数目为 5 时有小幅度的缩减,定位精度更高,定位算法更稳定;当基站数目大于 6 时,随着基站数目的增多,定位精度变化不大。因此,根据数据分析结果,当基站数目为 6 时,能达到三维近似最优的定位效果,且硬件要求较低,满足低成本、高精度的定位要求。

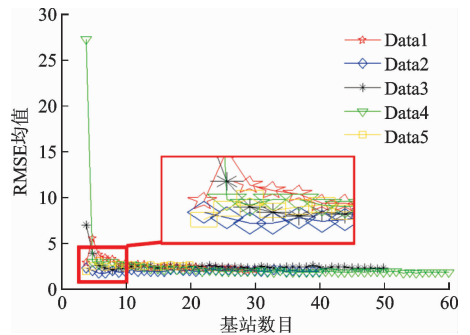


图 9 不同基站数目下的 RMSE 均值
Fig. 9 RMSE on different number of basis stations

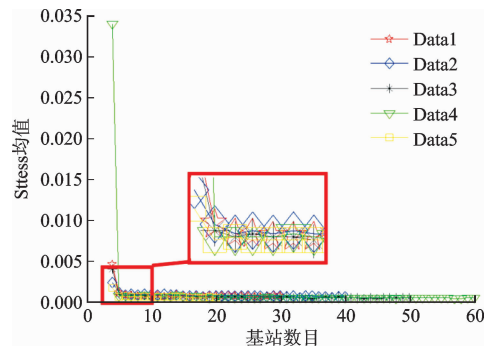


图 10 不同基站数目下的 Stress 值
Fig. 10 Stress on different number of basis stations

4 结语

针对仅基于测距信息的 NLOS 环境下传感器网络节点的定位问题,本文从优化估计角度出发,提出了一种基于改进 MDS-MAP 的优化定位算法,有效抑制 NLOS 误差,实现了较高的节点定位精度。通过仿真,验证了该算法的有效性,并对不同数目下该算法的定位精度进行分析。经仿真数据分析,当基站数目为 6 时,该算法能够实现三维近似最优定位,且满足低成本、高精度的定位要求。

参考文献(References):

- [1] 李响. 一种基于多维标度的无线传感器定位算法研究 [D]. 长春:吉林大学, 2015.
LI X. Research on A Localization Algorithm in WSN Based on MDS [D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [2] 温龙飞. 基于距离优化的移动传感器网络定位技术研究 [D]. 北京:北京理工大学, 2015.
WEN L F. Study of Localization in Mobile Sensor Networks Based on Distance Refinement [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [3] 田子建, 王宝宝, 张向阳. 一种基于非视距鉴别加权拟合的矿井超宽带定位方法 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 512-516.
TIAN Z J, WANG B B, ZHANG X Y. Mine Ultra-wideband Positioning Method Based on Non Line-of-Sight Identification Weighted Fitting [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 512-516. (in Chinese)
- [4] CHEN S W, SEOW C K, TAN S Y. Elliptical Lagrange-Based NLOS Tracking Localization Scheme [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on Wireless Communication, 2016, 15(5): 3212-3225.
- [5] LIU D L, LIU K H, MA Y T, et al. Joint TOA and DOA Localization in Indoor Environment Using Virtual Stations [J]. Communications Letters, 2014, 18(8): 1423-1426.
- [6] 杨北亚, 熊辉, 丁宏, 等. 应用 NLOS 鉴别补偿的无线传感器网络 TDOA 定位算法 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(10): 120-126.
YANG B Y, XIONG H, DING H, et al. TDOA Localization Algorithm Based on NLOS Error Identification and Compensation in Wireless Sensor Network [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(10): 120-126. (in Chinese)
- [7] 缪志敏, 赵陆文, 田世伟, 等. 类别不平衡学习识别 UWB 定位非视距信号 [J]. 信号处理, 2016, 32(1): 8-13.
MIAO Z M, ZHAO L W, TIAN S W, et al. Class Imbalance Learning for Identifying NLOS in UWB Positioning [J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(1): 8-13. (in Chinese)
- [8] 毛科技, 邬锦彬, 金洪波, 等. 面向非视距环境的室内定位算法 [J]. 电子学报, 2016, 44(5): 1174-1179.
MAO K J, WU J B, JIN H B, et al. Indoor Localization Algorithm for NLOS Environment [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(5): 1174-1179. (in Chinese)
- [9] 张云洲, 付文艳, 项姝, 等. 室内环境下基于 IMM-EKF 算法的移动目标定位 [J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(11): 2408-2415.
ZHANG Y Z, FU W Y, XIANG S, et al. IMM-EKF Algorithm-Based Indoor Moving Target Localization [J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(11): 2408-2415. (in Chinese)
- [10] 柯炜, 吴乐南. 基于非视距误差直接估计的定位跟踪算法 [J]. 信号处理, 2010, 26(12): 1858-1863.
KE W, WU L N. Location Tracking Algorithm based on Direct NLOS Error Estimation [J]. Signal Processing, 2010, 26(12): 1858-1863. (in Chinese)
- [11] 刘兴, 张浩, 徐凌伟. 基于波束成形的 60 GHz 无线局域网定位算法 [J]. 计算机应用, 2016, 36(8): 2170-2174.
LIU X, ZHANG H, XU L W. Beamforming Based Localization Algorithm in 60 GHz Wireless Local Area Networks [J]. Journal of Computer Application, 2016, 36(8): 2170-2174. (in Chinese)
- [12] 陆音, 王宝全, 丘靓玮. CHAN 算法在 LOS 和 NLOS 环境下的定位研究 [J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(9): 61-65.
LU Y, WANG B Q, QIU J W. Study on Localization of CHAN Algorithm in LOS and NLOS Environment [J]. Computer Technology and Development, 2015, 25(9): 61-65. (in Chinese)
- [13] 李奇越, 吴忠, 黎洁, 等. 基于改进卡尔曼滤波的 NLOS 误差消除算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1513-1519.
LI Q Y, WU Z, LI J, et al. NLOS Error Elimination Algorithm Based on Modified Kalman Filtering [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(10): 1513-1519. (in Chinese)
- [14] 杨波波, 张磊. 基于 WiFi 的室内迭代定位算法的研究 [J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(4): 262-264.
YANG B B, ZHANG L. On Indoor Iterative Positioning

- ning Algorithm Based on WiFi [J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(4): 262-264. (in Chinese)
- [15] 范丹丹, 张立志, 黄开枝, 等. 非视距环境下单站定位的伪目标动态可行域约束法 [J]. 电子学报, 2008, 36(10): 2040-2043.
FAN D D, ZHANG L Z, HUANG K Z, et al. Pseudo-Target Dynamic Feasible Region Constraint Location Method Using Single Observer in NLOS Environment [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10): 2040-2043. (in Chinese)
- [16] 刘韵婷, 张嗣瀛, 井元伟. 基于粒子群优化的无线传感器网络非视距节点定位算法 [J]. 控制与决策, 2015, 30(6): 1106-1110.
LIU Y T, ZHANG S Y, JING Y W. Non-line of Sight Node Localization Algorithm Based on Particle Swarm Optimization for Wireless Sensor Networks [J]. Control and Decision, 2015, 30(6): 1106-1110. (in Chinese)
- [17] 周艳聪, 董永峰, 王安娜, 等. 新的室内移动机器人自定位方法 [J]. 计算机应用, 2015, 35(2): 585-589, 594.
ZHOU Y C, DONG Y F, WANG A N, et al. New self-localization method for indoor mobile robot [J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(2): 585-589, 594. (in Chinese)
- [18] VOLKOV A S. Accuracy Bounds of Non-Gaussian Bayesian Tracking in a NLOS Environment [J]. Signal Processing, 2015, 108: 498-508.
- [19] 宫峰勋, 马艳秋, 车业蒙. 场面信道特征重构的非视距多点定位性能研究 [J]. 电波科学学报, 2015, 30(6): 1189-1196.
GONG F X, MA Y Q, CHE Y M. Performance Analysis of Multilateration in NLOS Environments Based on Reconstructions Channel Characteristics [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(6): 1189-1196. (in Chinese)
- [20] WU S X, LI J P, LIU S Y. Improved Positioning Algorithm Based on two Step Least Square in NLOS Environments [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2011, 18(5): 58-63.
- [21] WUA X W, TANGA D Y, QIANA X H. A Centralized Location Algorithm based on RSSI in Large-Scale Wireless Sensor Network [J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 2004-2009.
- [22] 徐彤阳. NLOS 环境下无线传感器网络 TOA 定位算法 [J]. 计算机工程, 2013, 39(12): 93-96.
XU T Y. TOA Location Algorithm in Wireless Sensor Network Under NLOS Environment [J]. Computer Engineering, 2013, 39(12): 93-96. (in Chinese)
- [23] CHEN H Y, LUI K W K, WANG Z Z, et al. Non-Line-of-Sight node Localization Based on Semi-Definite Programming in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 11(1): 108-116.
- [24] WEI H W, WAN Q, CHEN Z X, et al. A Novel Weighted Multidimensional Scaling Analysis for Time-of-Arrival-Based Mobile Location [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(7): 3018-3022.
- [25] 滕飞, 钟子发, 张圣钧. 一种基于 MIMO 的 LLOP 定位算法 [J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(10): 18-21.
TENG F, ZHONG Z F, ZHANG S J. Research of LLOP Location Algorithm Based on MIMO [J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(10): 18-21. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)