

## 锚节点优化选择的最小二乘定位方法\*

焉晓贞<sup>1,2</sup>, 罗清华<sup>1,2</sup>, 马衍秀<sup>2</sup>, 周鹏太<sup>2</sup>, 杨一鹏<sup>2</sup>, 张辉<sup>2</sup>, 宋佳<sup>2</sup>, 王翥<sup>2</sup>



<sup>1</sup>(卫星导航系统和装备技术国家重点实验室(中国电子科技集团公司 第 54 研究所),河北 石家庄 050081)

<sup>2</sup>(哈尔滨工业大学(威海)信息与电气工程学院,山东 威海 264209)

通讯作者: 罗清华, E-mail: luqinghua081519@163.com

**摘要:** 在最小二乘定位过程中,由于环境噪声、无线信号的多径、反射和非视距传输等复杂传输环境,以及距离估计过程中存在的缺陷等负面因素,引起在未知节点与各个锚节点间的距离估计结果中存在不同程度的误差,导致最小二乘定位精度较低.基于此,提出了基于最小标准差的锚节点优化选择的最小二乘定位方法(least square localization method based on anchor nodes optimization selection through minimum standard deviation,简称 LS-ANOS).首先,采用基于 nanoLOC 的双边对等测距方法多次重复测量未知节点到各个锚节点间的距离,并对这些距离估计值进行统计计算.然后,从输入测量误差对定位结果的影响机理出发,采用动态滑动窗口单遍扫描的策略,优化选择出高质量的距离估计值,从而确定优选的锚节点.最后,基于最小二乘定位计算实现了高精度的定位,为后续导航等应用处理方法提供先验和决策信息.实验及评估结果表明,基于最小标准差的锚节点优化选择的最小二乘定位方法能够有效地提高定位精度.

**关键词:** 无线定位;最小二乘;质量评估;优化选择;标准差

中文引用格式: 焉晓贞,罗清华,马衍秀,周鹏太,杨一鹏,张辉,宋佳,王翥.锚节点优化选择的最小二乘定位方法.软件学报,2017,28(Suppl.(1)):39-49. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17005.htm>

英文引用格式: Yan XZ, Luo QH, Ma YX, Zhou PT, Yang YP, Zhang H, Song J, Wang Z. Least square localization method based on anchor nodes optimization selection. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017,28(Suppl.(1)):39-49 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17005.htm>

### Least Square Localization Method Based on Anchor Nodes Optimization Selection

YAN Xiao-Zhen<sup>1,2</sup>, LUO Qing-Hua<sup>1,2</sup>, MA Yan-Xiu<sup>2</sup>, ZHOU Peng-Tai<sup>2</sup>, YANG Yi-Peng<sup>2</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, SONG Jia<sup>2</sup>, WANG Zhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology (The 54th Research Institute of China Electronic Science and Technology Group Inc.), Shijiazhuang 050081, China)

<sup>2</sup>(School of Information and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

**Abstract:** During the process of Least Square localization, some negative factors may give rise to different levels of noise, such as the

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61671174, 61601142); 卫星导航系统和装备技术国家重点实验室开放课题(EX166840037, EX166840044); 山东省自然科学基金(ZR2015FM027, ZR2014FM023); 航天科学技术基金(2017-HT-HG-16); 广西省重点实验室开放基金(YQ14205, YQ15203); 哈尔滨工业大学创新基金(HIT.NSRIF.2015122, HIT.NSRIF.201721); 威海市科技计划(16); 哈尔滨工业大学(威海)学科引导基金(WH20150211)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61671174, 61601142); Open fund of State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology (EX166840037, EX166840044); Natural Science Foundation of Shandong Province of China (ZR2015FM027, ZR2014FM023); Space Science and Technology Foundation (2017-HT-HG-16); Open fund of Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments (YQ14205, YQ15203); Natural Scientific Research Innovation Foundation of Harbin Institute of Technology (HIT.NSRIF.2015122, HIT.NSRIF.201721); Weihai Research Program of Science and Technology (16); Discipline Construction Guiding Foundation in Harbin Institute of Technology (Weihai) (WH20150211)

收稿时间: 2017-05-15; 采用时间: 2017-09-23

environmental noise, the reflection, refraction, multipath and non-line-of sight (NLOS) complex propagation of wireless signal, and the limitation of distance estimation method. And they also lead to low localization accuracy of Least Square localization. For this problem, this paper proposes an improved Least Square localization method, which is called Least Square localization based on anchor nodes optimization selection through minimum standard deviation (LS-ANOS). In LS-ANOS method, nanoLOC-based Symmetric Double Sided Two Way Ranging (SDS-TWR) is utilized to conduct distance estimation repeatedly between unknown nodes and anchor nodes. And statistical computation is performed on these distance estimation results. Then, from the influential mechanism of input measurement noise on localization result, the paper adopts slide window-based single scanning strategy to optimize the selection of the distance estimation result with higher quality and the corresponding anchor nodes. Lastly, based on the least square localization computation, it gets the accurate localization result. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed method could improve the accuracy of Least Square localization method effectively.

**Key words:** wireless localization; least square; quality evaluation; optimization selection; standard deviation

随着物联网、工业互联网的蓬勃发展,感知数据显得尤为重要.然而没有位置信息的感知数据是没有意义的.此外,位置信息也为军事、火灾地震等突发事件搜索救援、定位导航等基于位置服务提供重要的先验和决策支持信息,起着关键的支撑作用<sup>[1]</sup>.

可以通过无线定位方法获得目标的位置信息.然而在无线定位过程中,由于环境噪声以及无线信号传输过程中面临的反射、多径、非视距传输等负面因素的影响<sup>[1-3]</sup>,导致未知节点(位置信息未知,要定位的节点)与各个锚节点(位置信息已知的节点)间的距离估计值存在不同程度的误差,从而导致定位精度较低.针对该问题,一些改进的方法也不断被提出来,例如,文献[2,3]采用统计均值作为距离估计结果.文献[4]则假定距离值较小的误差也较小,选择距离值较小的参与定位计算,然而距离值小不意味着其对应的误差也较小,并且定位计算方法对定位结果也有较大的影响,因此这种假设不一定与实际情况一致,使得改善程度有限.文献[5,6]提出了距离估计结果的随机选择方式,以获取较高的定位结果.文献[7-11]分别针对 TDOA、MIMO 雷达、RSSI 等多种不同场景中定位问题,提出了加权的最小二乘改进方法,并改善了定位效果,然而这些方法忽略了各距离估计结果中不确定性程度大小的差异.

针对上述问题,为了提高定位精度,本文从测量误差传播到距离估计和定位结果的影响机理出发,提出了基于最小标准差的锚节点优化选择的最小二乘定位方法 LS-ANOS.该方法的基本思路是:首先采用基于 nanoLoc 双边对等双向测距方法多次测量未知节点到各个锚节点间的距离;然后对各个锚节点对应的距离估计值进行统计计算,获得统计均值和统计标准差,采用滑动窗口单遍扫描的策略,选择出高质量的距离估计值,从而优化选择出参与定位计算的锚节点;最后采用最小二乘定位计算方法获得高精度的定位结果.

本文具有以下的创新点:

- (1) 考虑距离估计过程中不同程度的误差对定位计算产生不同的影响,从误差影响定位结果的机理出发,优化选择出高质量的距离估计值以及对应的锚节点参与最小二乘定位计算,获得高精度的定位结果;
- (2) 采用滑动窗口的策略,利用单遍扫描的方法从标准差序列中高效率选择出高质量的距离估计值及其对应的锚节点;
- (3) 在双边对称双向距离估计和锚节点优化选择的基础上,创新性地提出了基于最小标准差的锚节点优化选择的最小二乘定位改进方法.

本文第 1 节综述相关研究工作.第 2 节提出基于最小标准差的锚节点优化选择的最小二乘定位方法 LS-ANOS 及其实现.第 3 节对提出的最小二乘定位改进方法 LS-ANOS 进行验证和评估.第 4 节给出结论.

## 1 相关工作

定位方法可分为基于测距的定位和非基于测距的定位.其中,基于测距的定位由于定位精度较高,应用最为广泛.在基于测距的定位中,首先采用特定的测距手段,包括:基于到达信号强度(received signal strength indicator,简称 RSSI)、到达时间(time of arrival,简称 TOA)、到达时间差(time difference of arrival,简称 TDOA)、到达角度(angle of arrival,简称 AOA)和双边对等双向测距(symmetric double sided two way ranging,简称 SDS-TWR)等

信息来估计距离;然后基于定位计算方法,包括三边测量定位、最小二乘和最大似然等定位方法,从而获得定位结果<sup>[1-3]</sup>.

由于环境干扰、无线信号传输过程中的反射、折射、多径、非视距传输等复杂传输环境导致距离估计结果存在不同程度的误差<sup>[4]</sup>.为了减小距离估计结果中误差的不良影响,一些学者开展多次进行距离估计<sup>[2,3]</sup>,并将其统计均值作为距离估计的最终结果.为了提高定位精度,文献[4]假设距离值小的误差也相对较小,因此提出了基于最小距离的锚节点优化选择策略,但这种假设只适合特定环境,因为距离估计过程中的误差对定位结果的影响,除了与距离值大小相关以外,还与距离估计时的误差大小以及定位计算方法有密切的关系,因此通用性不强.为了消除距离估计过程中噪声的不良影响,文献[5,6]提出了距离估计结果的随机选择方式,以获取较高的定位结果.文献[7]针对 TDOA 测距方法中距离估计公式的非线性导致定位误差大的问题,提出了加权最小二乘的定位算法<sup>[7-9]</sup>,但仅仅进行了仿真评估,缺乏在实际环境中验证.文献[10]针对多径传输环境下 TDOA 测距引起误差导致定位精度低的问题,提出了加权的改进方法,并进行了仿真验证.文献[11]采用 TDOA 和 AOA 两种混合测距方法,提出了改进的最小二乘定位方法,从理论仿真的角度进行了验证.上述改进方法在改进定位性能上各取得不同结果,但在定位计算过程中,忽略了不同距离估计结果质量的高低.

本文综合考虑最小二乘定位过程中各个锚节点对应的距离估计值具有不同程度的噪声,从噪声影响机理出发,提出了基于最小标准差的锚节点优化选择的最小二乘定位方法 LS-ANOS.在验证手段上,除了仿真验证以外,还在实际定位环境进行验证和评估.

## 2 基于最小标准差的锚节点优化选择的最小二乘定位方法:LS-ANOS

下面,首先介绍 LS-ANOS 定位算法的系统结构,然后叙述各个子模块的功能和具体实现.

### 2.1 LS-ANOS 的系统结构

本文提出 LS-ANOS 最小二乘定位方法的系统结构主要包括距离估计及质量评估、锚节点优化选择、最小二乘定位计算这 3 个部分,如图 1 所示.

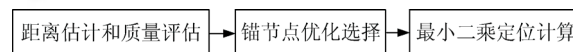


Fig.1 Framework of least square localization based on anchor nodes optimization selection through minimum standard deviation

图 1 基于最小标准差的锚节点优化选择的最小二乘定位方法框架

(1) 距离估计和质量评估.采用基于 nanoLOC 收发器的双边对等双向测量的测距方法,多次重复对未知节点到各个锚节点间的距离进行测量,并统计计算,获得距离估计结果,以及表征距离估计质量的统计标准差.

(2) 锚节点优化选择.基于滑动窗口策略,采用单遍扫描的方法,从统计标准差序列窗口中优化选择出高质量的距离估计结果,从而优化选择出参与最小二乘定位的锚节点,为获得高质量的定位结果提供支撑.

(3) 最小二乘定位计算.在优化选择的锚节点及其对应距离估计结果的基础上,构建最小二乘定位方程组,对其求解,从而获得定位结果.

### 2.2 距离估计和质量评估

在距离估计过程中,可采用 RSSI,TOA,TDOA,AOA 和 SDS-WTR 等多种手段实现距离估计.为了获取高精度的距离估计,本文采用基于 nano PAN 5375RF 无线射频收发器的 SDS-WTR 测量方法,实现锚节点与未知节点间的通信距离估计,其原理如图 2 所示.采用 nano PAN 5375RF 射频收发器的无线定位节点如图 3 所示.

如图 2 所示, $T_{round A}$  表示未知节点的传输延迟, $T_{round B}$  代表锚节点的传输延迟, $T_{reply A}$  表示未知节点的处理延迟, $T_{reply B}$  表示锚节点的处理时延, $v$  表示无线射频信号的传输速度,因此,未知节点与锚节点间的距离可以通过公式(1)获得.

$$d = \frac{T_{\text{Round},A} - T_{\text{Reply},B} + T_{\text{Round},B} - T_{\text{Reply},A}}{4} \times v \quad (1)$$

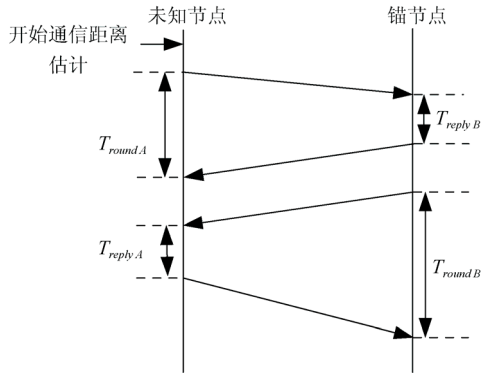


Fig.2 Illustration of SDS-WTR

图2 双向对等双边测量原理示意图

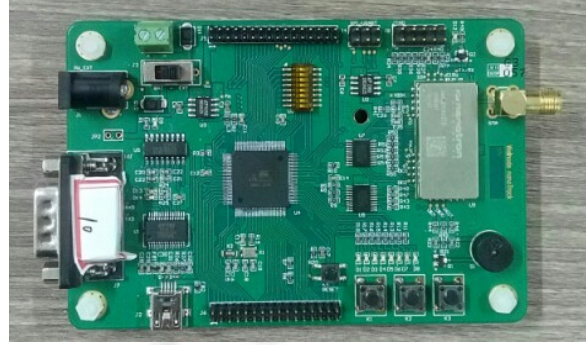


Fig.3 Nano LOC wireless localization node

图3 Nano LOC 无线定位节点

在定位环境中,对于第  $i$  个锚节点,重复  $J$  次测量其与未知节点间的距离,获得距离估计序列  $d_i = \{d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{ij}, \dots, d_{iJ}\}$ ,其中,  $i$  表示锚节点的序号,  $i$  为正整数,  $1 \leq i \leq I$ ,  $I$  为系统中锚节点的数量,本文中  $I$  取值为 10,  $j$  为正整数,表示重复测量的序号,  $1 \leq j \leq J$ ,  $J$  为正整数,表示重复测量的次数,为了保证统计特性,本文  $J$  取值 100 次,  $d_{ij}$  表示第  $i$  个锚节点的第  $j$  次的距离测量值。

按照同样的思路,系统重复测量未知节点到各个锚节点  $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_I\}$  间的通信距离  $J$  次,分别获得距离估计值序列:  $d_1 = \{d_{11}, d_{12}, \dots, d_{1j}, \dots, d_{1J}\}$ ,  $d_2 = \{d_{21}, d_{22}, \dots, d_{2j}, \dots, d_{2J}\}$ ,  $d_3 = \{d_{31}, d_{32}, \dots, d_{3j}, \dots, d_{3J}\}$ ,  $\dots$ ,  $d_i = \{d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{ij}, \dots, d_{iJ}\}$ ,  $\dots$ ,  $d_I = \{d_{I1}, d_{I2}, \dots, d_{Ij}, \dots, d_{IJ}\}$ ,其中  $i$  为正整数,  $1 \leq i \leq I$ ,  $J$  为正整数,表示重复测量的序号,  $1 \leq j \leq J$ 。

对上述的距离估计值序列进行统计计算,如公式(2)和公式(3),分别获得其对应的统计均值序列  $d_{i-\mu} = \{d_{1-\mu}, d_{2-\mu}, \dots, d_{i-\mu}, \dots, d_{I-\mu}\}$ ,以及统计标准差序列  $d_{i-\sigma} = \{d_{1-\sigma}, d_{2-\sigma}, \dots, d_{i-\sigma}, \dots, d_{I-\sigma}\}$ ,其中,  $d_{i-\mu}$  表示第  $i$  个锚节点与未知节点间的距离统计均值,  $d_{i-\sigma}$  表示第  $i$  个锚节点与未知节点间的距离标准差。

$$d_{i-\mu} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J d_{ij} \quad (2)$$

$$d_{i-\sigma} = \left[ \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (d_{ij} - d_{i-\mu})^2 \right]^{1/2} = \left[ \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J \left( d_{ij} - \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J d_{ij} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

将获得的统计均值序列  $d_{i-\mu} = \{d_{1-\mu}, d_{2-\mu}, \dots, d_{i-\mu}, \dots, d_{I-\mu}\}$  作为距离估计结果,将获得的统计标准差序列  $d_{i-\sigma} = \{d_{1-\sigma}, d_{2-\sigma}, \dots, d_{i-\sigma}, \dots, d_{I-\sigma}\}$  作为各个距离估计结果的质量(根据误差理论和统计分析理论,统计标准差表征测量精度)。

### 2.3 锚节点优化选择

考虑距离估计过程中,各个锚节点与未知节点间的距离估计结果含有不同程度的误差,为了提高定位精度,选择含有误差较小的若干个距离估计值及其对应的锚节点参与定位计算,基于这个思想,本文基于最小标准差,采用滑动窗口单遍扫描的策略,从  $I$  个距离估计结果  $\{d_{1-\mu}, d_{2-\mu}, \dots, d_{i-\mu}, \dots, d_{I-\mu}\}$  中,优化选择出  $K$  个高质量的距离估计值  $\{d'_{1-\mu}, d'_{2-\mu}, \dots, d'_{i-\mu}, \dots, d'_{k-\mu}\}$  及其对应的锚节点  $\{A'_1, A'_2, \dots, A'_k, \dots, A'_K\}$ ,其中,  $k$  表示优化选择后锚节点的序号,  $k$  为正整数,  $1 \leq k \leq K$ ,  $K$  为用户指定的最小二乘定位计算中方程的个数,  $K$  为正整数,  $K \leq I$ 。

在基于滑动窗口的单遍扫描优化选择(optimization selection through slide window and single scan,简称 OS-SWSS)算法中,定义滑动窗口  $\{q_1, q_2, \dots, q_k, \dots, q_K\}$  暂存选择的最小标准差序列,其伪代码如下。

**Algorithm.** OS-SWSS.

**Input:**  $d = \{d_{1-\mu}, d_{2-\mu}, \dots, d_{i-\mu}, \dots, d_{I-\mu}\}$ ,

$d_{-}\sigma = \{d_{1-}\sigma, d_{2-}\sigma, \dots, d_{i-}\sigma, \dots, d_{l-}\sigma\}$ .  
**Output:**  $d' = \{d'_{1-}\mu, d'_{2-}\mu, \dots, d'_{i-}\mu, \dots, d'_{k-}\mu\}$   
 $A' = \{A'_1, A'_2, \dots, A'_k, \dots, A'_K\}$ ;  
 1. For ( $k=1; k < K; k++$ )  
 2.  $q_k = \text{Inf}$  // Inf 为系统能够表示的最大实数  
 3. End For  
 4. For ( $i=1; i < I; i++$ )  
 5. For ( $k=1; k < K; k++$ )  
 6. If ( $d_{i-}\sigma < q_k$ )  
 7. For ( $l=K; l > k; l--$ )  
 8.  $q_l = q_{l-1}$ ;  
 9. End For  
 10.  $q_k = d_{i-}\sigma$ ;  
 11. End If  
 12. End For  
 13. End For  
 14.  $d'_{-}\sigma = \{q_1, q_2, \dots, q_k, \dots, q_K\}$ ;  
 15. **Output**  $d' = \{d'_{1-}\mu, d'_{2-}\mu, \dots, d'_{k-}\mu, \dots, d'_{K-}\mu\}$ ;  
 16. **Output**  $A' = \{A'_1, A'_2, \dots, A'_k, \dots, A'_K\}$ ;

在 OS-SWSS 算法中, 首先对滑动窗口  $\{q_1, q_2, \dots, q_k, \dots, q_K\}$  进行初始化, 即将其中的  $K$  个元素的初值设定为无穷大; 然后对标准差序列  $d_{-}\sigma$  中的每一个元素  $d_{i-}\sigma$  依次进行扫描, 并逆序依次与滑动窗口的每一个元素进行比较, 如果小于某个值  $q_k$ , 则调整滑动窗口中的后续元素后, 将  $d_{i-}\sigma$  赋给  $q_k$ . 不断循环处理, 从而获得含有最小的  $K$  个标准差的滑动窗口序列, 并输出这  $K$  个最小标准差对应的距离估计值  $\{d'_{k-}\mu\}$  和锚节点  $\{A'_k\}$ . 本算法的优势在于, 只对标准差序列做单遍扫描, 即可高效率选择出高质量的距离估计结果及对应的锚节点.

在上述的伪代码中, 滑动窗口初始化部分的计算时间复杂度为  $O(K)$ , 最外层循环的计算时间复杂度为  $O(I)$ , 内层循环的计算耗时间复杂度为  $O(K^2)$ , 则内外层循环的计算时间复杂度为  $O(IK^2)$ , 因此, OS-SWSS 算法总的计算时间复杂度为  $O(K) + O(IK^2)$ , 由于  $IK^2 \gg K$ , 总的计算时间复杂度中的  $O(K)$  可以忽略, 因此得到基于滑动窗口的单遍扫描优化选择 OS-SWSS 算法的计算时间复杂度为  $O(IK^2)$ .

#### 2.4 最小二乘定位计算

优化选择得到的锚节点  $\{A'_1, A'_2, \dots, A'_k, \dots, A'_K\}$ , 及其对应的坐标  $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k), \dots, (x_K, y_K)\}$  以及距离估计结果  $\{d'_{1-}\mu, d'_{2-}\mu, \dots, d'_{k-}\mu, \dots, d'_{K-}\mu\}$ , 列定位方程, 如公式(4)所示.

$$\begin{cases} d'_{1-}\mu = \sqrt{[(x_1 - \hat{x})^2 + (y_1 - \hat{y})^2]} \\ d'_{2-}\mu = \sqrt{[(x_2 - \hat{x})^2 + (y_2 - \hat{y})^2]} \\ \dots \\ d'_{k-}\mu = \sqrt{[(x_k - \hat{x})^2 + (y_k - \hat{y})^2]} \\ \dots \\ d'_{K-}\mu = \sqrt{[(x_K - \hat{x})^2 + (y_K - \hat{y})^2]} \end{cases} \quad (4)$$

基于最小二乘定位计算的定位结果  $(\hat{x}, \hat{y})$  按公式(5)进行计算.

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = (C^T C)^{-1} C^T D \quad (5)$$

$$\text{其中, } C = \begin{bmatrix} 1 & -2x_1 & -2y_1 \\ 1 & -2x_2 & -2y_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & -2x_k & -2y_k \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} (d'_{1-u})^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ (d'_{2-u})^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ \dots \\ (d'_{k-u})^2 - x_k^2 - y_k^2 \end{bmatrix}.$$

### 3 性能评估与分析

对所提出的基于最小标准的锚节点优化选择的最小二乘定位方法进行性能评估和分析.首先,基于仿真环境和仿真数据,对该方法的定位精度进行评估,并与相关方法进行比较,验证其可行性和有效性;然后,在实际定位环境下对该方法进行验证和评估,为了验证其有效性,采用室内、大厅和室外 3 种不同的典型定位环境进行验证和评估.

#### 3.1 仿真环境的验证评估

首先阐述仿真环境搭建,然后在不同定位噪声环境中,锚节点优化选择数目的确定;最后评估本文所提方法的性能,并和相关方法进行比较分析.

##### 3.1.1 仿真环境搭建

仿真实验环境如图 4 所示,在  $9.2\text{m} \times 7.2\text{m}$  的定位区域内,部署 10 个锚节点和 1 个未知节点,固定锚节点,将未知节点变化部署在不同的定位节点上,在各锚节点与未知节点之间的距离值上叠加不同程度的噪声,并同时考虑视距误差和非视距误差的情况,评估定位精度,并与相关方法进行比较分析.

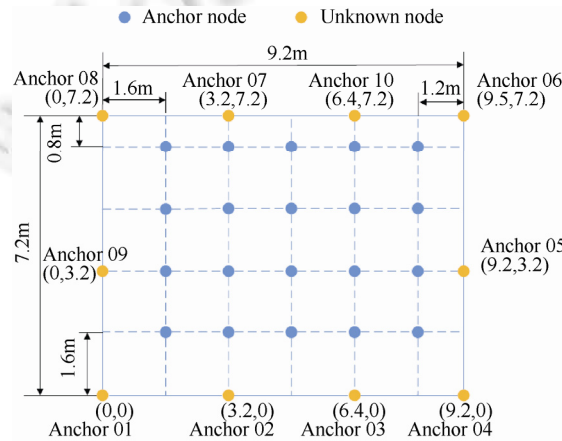


Fig.4 Deployment of localization field

图 4 定位区域示意图

##### (1) 定位精度评估参数

在定位精度评估上,采用绝对平均定位误差  $e_{\text{MAE}}$  来衡量定位精度,如公式(6)所示.

$$e_{\text{MAE}} = \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N \sqrt{(x_n - \hat{x}_n)^2 + (y_n - \hat{y}_n)^2} \right) \quad (6)$$

其中,  $(\hat{x}, \hat{y})$  表示定位计算的坐标信息,  $(x, y)$  表示实际的坐标信息.平均定位误差  $e_{\text{MAE}}$  值越小,表示定位精度越高.

##### (2) 定位效率评估参数

在定位效率评估上,采用处理时间来评估定位效率的高低,其数值越小,表明定位处理的效率越高.

##### 3.1.2 锚节点优化选择数目 $K$ 的评估分析

考虑在视距和视距/非视距两种不同定位环境中,分别评估锚节点优化选择数目  $K$  对定位精度的影响,从而确定最优的锚节点数目.



(1) 视距定位环境

在视距环境中,距离估计误差处理为随机误差,对 10 个锚节点与未知节点间的距离值分别叠加不同标准差的噪声,即锚节点 1~7 对应的距离叠加均值为 0,标准差为 0.3 的高斯白噪声,锚节点 8~10 对应的距离叠加均值为 0,标准差为 0.9 的高斯白噪声.并分别采用最小距离值优化选取、最小标准差优化选取和随机选取的 3 种最小二乘定位方法分别进行定位,其定位误差如图 5 所示.

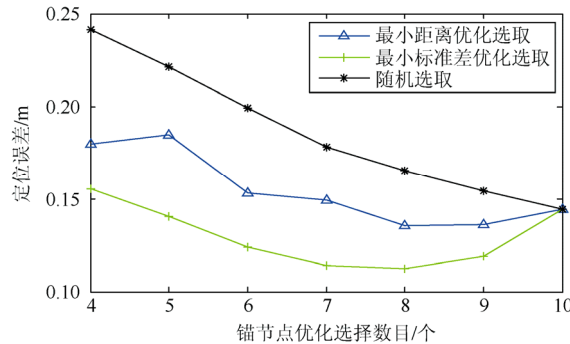


Fig.5 Localization error with different optimization selection number of anchor nodes in line-of-sight environment

图 5 视距环境中不同锚节点优化选择数目对应的定位误差

其中,固定选择是从距离估计结果序列中固定选择  $K$  个参与定位计算;随机距离值选择是指从  $I$  个距离估计值中随机选择出  $K$  个及其他对应的锚节点参与最小二乘定位计算;距离值最小策略是考虑距离值越小,误差就越小,从  $I$  个距离估计值中选择出  $K$  个最小值及其对应的锚节点参与最小二乘定位计算.

从图 5 可以看出,相对于其他两种方法,在视距定位环境中,本文提出的最小标准差优化选取对应的最小二乘定位方法的定位误差较小,主要是因为该方法优化选择出误差较小的距离进行定位.此外,从图 5 可以看出,为了保证定位精度和效率,锚节点优化选择的数目选择在 7 个~8 个比较合适.

(2) 视距/非视距混合定位环境

在视距/非视距混合环境中,距离估计误差处理为随机误差和系统误差混合的情况,对 10 个锚节点与未知节点间的距离值分别叠加不同标准差的噪声,即锚节点 1~7 对应的距离叠加均值为 0,标准差为 0.3 的高斯白噪声,锚节点 8~10 对应的距离叠加均值为 0.5,标准差为 0.9 的高斯白噪声.分别采用最小距离值优化选取、最小标准差优化选取和随机选取的 3 种最小二乘定位方法进行定位,其定位误差如图 6 所示.

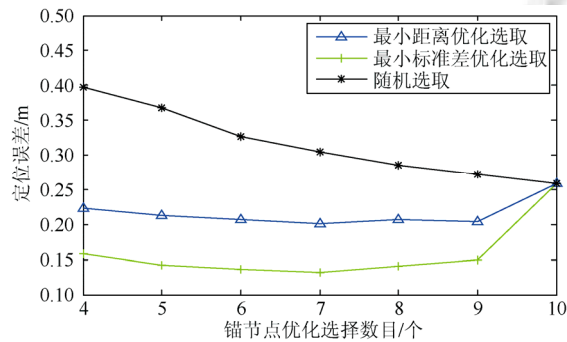


Fig.6 Localization error with different optimization selection number of anchor nodes in non-line-of-sight environment

图 6 非视距环境中不同锚节点优化选择数目对应的定位误差

从图 6 可以看出,相对于其他两种方法,在视距/非视距混合定位环境中,本文提出的最小标准差锚节点优化选取的最小二乘定位方法的定位误差较小,具有较高的可行性和有效性.

### 3.1.3 仿真性能分析

在视距和非视距混合这两种不同定位环境中,分别评估本文提出的最小二乘定位方法,并与其他方法进行对比分析.

#### (1) 视距定位环境定位精度评估

按照如图 4 所示的定位区域进行部署,对 10 个锚节点与未知节点间的距离值分别叠加噪声,即锚节点 1~7 对应的距离叠加均值为 0,标准为 1 的高斯白噪声,锚节点 8~10 对应的距离叠加均值为 0,标准差从 1 增加到 9 的高斯白噪声,叠加噪声系数为 0.3.分别采用最小距离值优化选择、随机距离值选取和本文提出最小标准差优化选择 3 种选择策略,从 10 个距离值中选择出最优的 8 个及对应的锚节点进行最小二乘定位计算,定位的绝对均方根误差随误差的标准差变化曲线如图 7 所示.

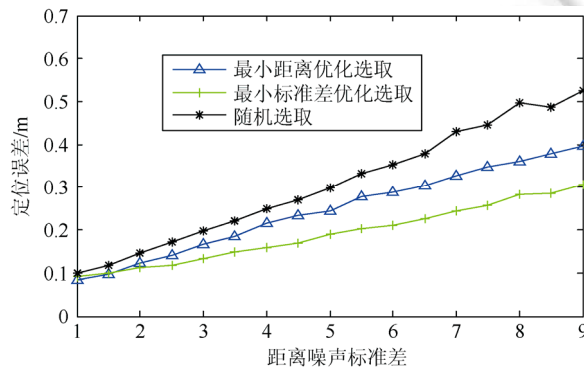


Fig.7 Localization error of different methods with different standard deviation of distance noise in line-of-sight environment

图 7 视距环境中不同距离噪声标准情况下,不同方法的定位误差

从图 7 可以看出,随着距离噪声标准差的增大,相对于其他两种方法,本文提出的最小标准差的锚节点优化选择的定位方法的定位误差较小,相对于最小距离优化选择的方法,平均减小定位误差 20.62%,相对于随机选择的定位方法,减小定位误差达 34.38%.而且受噪声的影响较小,这主要是由于本文提出的定位方法能够优选噪声较小的距离估计值,且利用最小二乘准则最大限度减小噪声的影响.

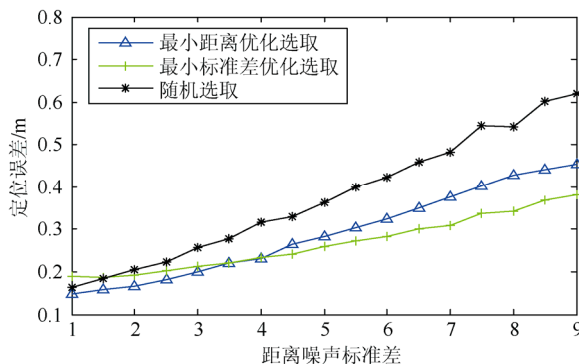


Fig.8 Localization error of different methods with different standard deviation of distance noise in non-line-of-sight environment

图 8 非视距环境中不同距离噪声标准情况下,不同方法的定位误差

从 10 个距离值中选择出最优的 8 个及对应的锚节点进行最小二乘定位计算,定位的绝对均方根误差随误差的标准差变化曲线如图 8 所示.

#### (2) 非视距混合定位环境下性能评估

按照如图 4 所示的定位区域进行部署,对 10 个锚节点与未知节点间的距离值分别叠加噪声,即锚节点 1~7 对应的距离叠加均值为 0.5,标准为 1 的高斯白噪声,锚节点 8~10 对应的距离叠加均值为 0.5,标准差从 1 增加到 9 的高斯白噪声,叠加噪声系数为 0.3.分别采用最小距离值优化选择、随机距离值选取和本文提出最小标准差优化选择 3 种选择策略,



从图 8 可以看出,在非视距定位环境中,本文提出的方法具有很高的定位精度.相对于其他两种方法,本文提出的最小标准差的锚节点优化选择的定位方法的定位误差较小,相对于最小距离优化选择的方法,平均减小定位误差 13.03%,相对于随机选择的定位方法,减小定位误差达 25.76%.

### 3.2 实际定位环境验证评估

#### 3.2.1 实际定位环境搭建

如图 9 所示,在室内、大厅和室外 3 种典型的定位环境中,按如图 4 所示的定位部署 10 个锚节点和 1 个未知节点,采用基于 nano PAN 5375RF 射频收发器的 nanoLOC 无线节点进行距离估计和定位验证,节点部署参数见表 1.



Fig.9 Localization deployment in three real environments

图 9 3 种实际定位环境部署图

Table 1 Experimental conditions and parameters

表 1 实验环境及参数

参数选择	环境		
	室内走廊	室内大厅	室外开阔
温度(°C)	22.0	23.5	24.0
节点放置高度(m)	1	1	1

评估过程中采用的计算平台参数为:CPU: Intel i7 720QM@1.6GHz,内存:4G,操作系统:Windows XP Professional SP3,实验评估环境为 Matlab 2009b.

在上述 3 种典型定位环境中,固定 10 个锚节点,不断移动并部署未知节点在如图 4 所示的每一个定位点.在任一定位点上,未知节点依次向各个锚节点发送距离估计请求数据包,每一个锚节点回复该数据包,两者通过多次数据包交互和双边对等双向测距方法,实现对未知节点与锚节点间距离的多次重复测量,并对测量结果进行统计计算,得到最终距离测量结果  $\{d_i, u\}$  及其质量指标  $\{d_i, \sigma\}$ ,  $1 \leq i \leq I$ .然后通过基于滑动窗口和单遍扫描的方法优化选择出参与最小二乘定位的距离估计值及其对应的锚节点,评估定位的精度,并和相关的最近距离选取<sup>[4]</sup>、随机选取<sup>[5,6]</sup>和加权<sup>[7-11]</sup>等定位方法进行比较分析,以评估其可行性和有效性.

实验过程中,为公平起见,均采用各自的策略.在随机选取策略中,随机选取锚节点参与最小二乘定位计算.在加权最小二乘中,采用距离长度的倒数作为权值,进行最小二乘定位计算.最近距离则选取若干个最小的距离值及其对应的锚节点参与最小二乘定位计算.

#### 3.2.2 定位精度评估

在上述 3 种典型定位环境中,部署定位系统,应用本文提出的定位方法进行定位计算,评估其定位精度,并与随机距离值选取、距离值最小优化选择和加权最小二乘定位方法进行比较,其定位误差如图 10 和表 2 所示.

##### (1) 定位精度比较分析

从图 10 和表 2 可以看出,相对于其他定位方法,本文提出的定位方法具有较高的定位精度.相对于随机选取、距离值最小优化选择和加权最小二乘的最小二乘定位方法,本文提出的最小标准差优化选择的最小定位方法分别提高定位精度 25.70%,12.91%和 1.18%,这主要由于本文综合考虑了距离估计结果中不同程度的误差成分,从误差影响机理出发,优化选择误差较小的距离值参与定位计算,从而获得较高的定位精度.

##### (2) 定位环境影响比较

从图 10 和表 2 可以看出,定位环境对定位的精度具有较大的影响:室内和大厅环境中的定位精度较低,而室外环境定位精度较高,这主要是由于室内和大厅是无线电传输反射、多径等复杂环境,而室外的传输环境较高,

因此定位精度较高.因此,在部署定位系统时,也要综合考虑环境对定位精度的影响.

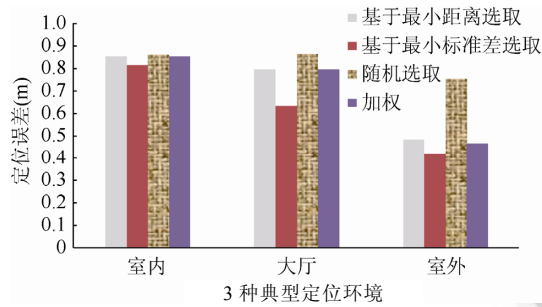


Fig.10 Localization error of different methods in three typical environments

图 10 3 种典型环境中不同方法的定位误差

Table 2 Localization error of different methods in three typical environments

表 2 3 种典型环境中,不同方法的定位误差

方法	定位环境		
	室内	大厅	室外
基于最小距离选取	0.851 7	0.794 4	0.478 7
基于最小标准差选取	0.812 3	0.629 1	0.415 0
随机选取	0.859 1	0.859 9	0.752 1
加权	0.849 3	0.795 3	0.462 5

### 3.2.3 定位效率评估

在上述 3 种典型定位环境中,部署定位系统,应用本文提出的定位方法进行定位计算,评估其定位效率,并与随机距离值选取、距离值最小优化选择和加权最小二乘定位方法进行比较,其定位处理时间见表 3.

Table 3 Localization processing time of different methods in three typical environments (s)

表 3 3 种典型环境中,不同方法的定位处理时间

方法	定位环境		
	室内	大厅	室外
基于最小距离选取	0.004 17	0.004 15	0.004 14
基于最小标准差选取	0.004 17	0.004 16	0.004 15
随机选取	0.004 13	0.004 13	0.004 14
加权	0.003 62	0.003 61	0.003 59

从表 3 可以看出,这 4 种最小二乘定位方法的处理时间基本相同,本文提出的方法和最小距离优化选择的方法所用时间相对较长,这主要是由于其统计计算和优化选择的时间.综合考虑定位精度和定位效率,本文提出的方法具有较高的定位性能.

## 4 结 论

针对最小二乘定位过程中由于诸多负面因素引起距离估计误差较大,导致定位精度较低的问题.本文提出了基于最小标准差的锚节点优化选择的最小二乘定位方法.该方法采用双边对等双向测距方法实现未知节点和各锚节点间距离的多次重复估计;然后,考虑测量噪声对距离估计的影响,采用滑动窗口单遍扫描的方法优化选择出高质量的距离估计结果以及对应的锚节点,为实现高精度定位提供支持;最后,基于最小二乘定位,得到定位结果.仿真验证评估结果和 3 种实际典型定位环境中的实验结果表明,相对于基于随机选取、最小距离优化选择和加权最小二乘定位方法,本文提出的定位方法可以有效地改善定位误差,具有较高的定位精度.这主要得益于考虑距离估计中不同程度误差的影响,优化选择出高质量的距离估计值及对应的锚节点进行最小二乘定位,实现高精度的最小二乘定位.该方法也为其他定位方法的精度改善提供了重要借鉴和参考.下一步将重点

研究质量评估和优化选择策略在动态定位中的有效性和可靠性.

**References:**

[1] Vempaty A, Ozdemir O, Agrawak K, Chen H, Varshney PK. Localization in wireless sensor networks: byzantines and mitigation techniques. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2013,61(6):1495–1508.

[2] Luo QH, Peng Y, Li JB, Peng XY. RSSI-Based localization through uncertain data mapping for wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2016,16(9):3155–3162.

[3] Luo QH, Yan XZ, Li JB, Peng Y, Tang YM, Wang JQ, Wang D. DEDF: Light-Weighted WSN distance estimation using RSSI data distribution based fingerprinting. *Neural Computing and Applications*, 2016,27(6):1567–1575.

[4] Yan LB, Lu Y, Zhang YR. Improved least-squares algorithm for TDOA/AOA-based localization. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016,31(2):394–400 (in Chinese with English abstract).

[5] Yujun L, Meng C. A trilateral centroid localization and modification algorithm for wireless sensor network. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2015,355:96–97.

[6] Zhang AQ, Ye XR, Hu HF. Point in triangle testing based trilateration localization algorithm in wireless sensor networks. *KSII Trans. on Internet and Information Systems*, 2012,6(10):2567–2586.

[7] Qiu R, Feng RJ, Yu N, Wu YF. A weighted least squares source localization algorithm using TDOA measurements in wireless sensor networks. In: *Proc. of 2016 IEEE the 6th Int'l Conf. on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC 2016)*. Hong Kong: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. 10–13.

[8] Einemo M, So HC. Weighted least squares algorithm for target localization in distributed MIMO radar. *Signal Processing*, 2015, 115:144–150.

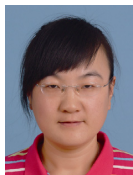
[9] Zeyuan L, Peijung C. Weighted least squares solution for RSS based localization in correlated shadowing. In: *Proc. of the IEEE Workshop on Signal Processing Systems*. Belfast: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. 1–8.

[10] Gemayel N, Jakel H, Jondral F. A weighted least squares algorithm for passive localization in multipath scenarios. In: *Proc. of IEEE the 82nd Vehicular Technology Conf.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. 1–2.

[11] Qu XM, Xie LH, Tan WR. Iterative constrained weighted least squares source localization using TDOA and FDOA measurements. *IEEE Trans. on signal Processing*, 2017,65(15):3990–4003.

**附中文参考文献:**

[4] 闫雷兵,陆音,张业荣.基于改进最小二乘算法的 TDOA/AOA 定位方法. *电波科学学报*,2016,31(2):394–400



焉晓贞(1981—),女,山东威海人,博士,讲师,主要研究领域为无线定位导航方法及其应用.



杨一鹏(1995—),男,硕士生,主要研究领域为无线定位.



罗清华(1979—),男,博士,讲师,CCF 专业会员,主要研究领域为无线定位及其不确定性处理方法.



张辉(1995—),男,硕士生,主要研究领域为无线定位.



马衍秀(1994—),女,硕士生,主要研究领域为无线定位.



宋佳(1978—),男,博士,高级工程师,主要研究领域为无线网络故障诊断.



周鹏太(1989—),男,硕士生,主要研究领域为无线定位.



王嘉(1962—),男,博士,高级工程师,CCF 专业会员,主要研究领域为无线网络.