

分布式声源定位系统节点 最优布局方法及性能研究

闫青丽, 陈建峰

(西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072)

摘要: 为提高基于到达时间 TOA (Time of Arrival) 的分布式声源定位系统在实际应用中的定位精度, 推导出各节点测量性能存在差异条件下定位误差的 CRLB (Cramer Rao Lower Bound), 遵循探测区域定位误差的平均 CRLB 最小的最优准则, 对目标以均匀分布和高斯分布概率出现的情形, 采用自适应遗传算法进行最优布局仿真研究. 仿真结果表明, 基于节点观测性能的最优布局与声源出现的概率分布直接相关; 且与不考虑节点性能时的最优布局相比, 提高了定位区域的整体定位精度.

关键词: 到达时间; 最优布局; 节点性能; 自适应遗传算法

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)05-1186-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.05.025

Node Placement Optimization for Distributed Acoustic Source Localization System and Performance Study

YAN Qing-li, CHEN Jian-feng

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: In order to improve the localization accuracy of TOA (Time of Arrival) in distributed acoustic source localization system, the CRLB (Cramer Rao Lower Bound) of localization error is deduced by taking the node performance difference into account. The adaptive genetic algorithm is used to study the optimal sensor placement by minimizing the average CRLB when the target is uniform probability distribution and Gauss distribution probability scenario in the field interested. The simulation results show that the optimal sensor placement based on the sensor observation performance is directly related to the probability distribution of sound source in the detection area.

Key words: TOA (Time of Arrival); optimal placement; sensor performance; adaptive genetic algorithm

1 引言

分布式传感器网络的声源定位技术被广泛应用于国防, 机器人及环境监控等领域, 常用的定位技术有: 基于到达时间的 TOA (Time of Arrival) 或 TDOA (Time Difference of Arrival) 方法、基于角度测量的 AOA (Angle of Arrival) 方法和基于信号能量测量的 RSS (Received Signal Strength) 方法^[1~4]. 其中, TOA 和 TDOA 因其较高的定位精度得到广泛研究和应用^[4,5]. 其定位精度不仅依赖于传感器节点个数, 采样频率, 信噪比等因素, 传感器节点布局和各个节点的测量性能也是影响定位性能的一个重要因素^[6,7], 本文以最大似然估计法为例,

研究利用 TOA 定位时的最优布局问题.

BYang 和 N. Bishop^[7,8]对 TDOA 和 TOA 的最优布局研究结果表明, 目标位于探测区域的中心, 并且相邻两个传感器节点与目标连线间的夹角相等时 CRLB (Cramer-Rao Lower Bound) 达到最小. 但该布局需要知道目标的位置才能布置, 实际情况下目标的位置是未知的, 此外在推导过程中, 均假设信号到达各节点的 TOA 测量误差为相互独立的方差相等的高斯分布. C. Ho 和 M. Vicente^[9]研究了 TDOA 和 TOA 在极坐标系中距离和角度解耦时的最优布局, 结果表明 TDOA 和 TOA 有相同的最优布局形式, 即为环形阵, 每一环上有相同的节点数目. J. Ranieri 和 G. Leus 等^[10~13], 通过

离散化测试区域将传感器节点最优布局问题转化为节点选择问题,但是优化结果依赖于离散测试区域的分辨率,当分辨率小时,计算复杂度大,当分辨率大时,所得结果不精确.此外,孙保国等^[14~16]研究了星形、菱形、倒三角和平行四边形四种规则布站形式下的定位精度分布情况,结果表明倒三角是相对理想的布站形式.王瀚等^[17]通过延长基线长度及改变节点夹角的方法,对基于“Y”形、倒“Y”形和倒“T”形的不规则布站的时差定位系统的定位精度进行了仿真分析.但是这些方法仅局限于特定布站方案的定位精度分析,不具有普遍适用性.汪波等^[18]通过限制传感器节点在一个平面圆形区域内,使目标空间的定位误差的平均 CRLB 最小的条件下,采用遗传算法研究了基于 TDOA 定位系统的最优布局,结果表明,当目标出现在节点所在圆形区域的中轴线上时,对于 5 个节点的定位系统,其中两个节点部署在圆形区域中心附近,其他三个节点均匀布置在圆形区域的边界上时,能够达到最优布局效果,但其在仿真过程中同样没有考虑节点性能.

综上所述,有关传感器节点的布局优化问题目前主要集中在针对某一特定位置的性能最优布局.但是在被动定位系统中,目标的位置是未知的,因此研究针对某一特定目标的最优布局不能满足实际的需求.在实际应用中,有时声源在某一区域各个位置出现的概率相等,而有时则呈高斯分布.这个先验知识一般在进行布局优化的研究中也很少考虑.

此外,为简单起见,上述文献均假设各个节点的时延测量误差的方差相等,没有考虑由于节点与目标距离的不同而产生的探测性能的变化.对于被动声源目标探测的应用场合,由于节点分布在较大的区域内时,每个观测节点处目标信号的信噪比不同,各个节点测量的信号到达时间的测量误差也不同^[1,20].因此,研究分布式的定位系统的节点布局问题,节点的估计性能有必要考虑在内,目前关于这方面的研究还比较少.

针对以上两个问题,本文以 TOA 为研究对象,探讨在考虑节点估计性能差异的情况下,使得目标所在区域的定位误差 CRLB 的平均值最小时的最优布局问题.

2 TOA 定位方法

设在二维空间中,目标信号的位置坐标为 $\mathbf{x} = [x \ y]^T$,传感器节点的位置坐标为 $\mathbf{s}_i = [x_i \ y_i]^T, i = 1, 2, \dots, n$. 目标到传感器节点的距离为 $r_i = \|\mathbf{x} - \mathbf{s}_i\|$,符号 $\|\cdot\|$ 表示欧式距离. 一个典型的分布式定位系统示意图如图 1 所示. 设信号到达传感器节点 \mathbf{s}_i 的时间为 t_i ,信号发生时刻为 t_0 ,信号传播速度为 c ,则:

$$t_i = t_0 + \frac{r_i}{c} \quad (1)$$

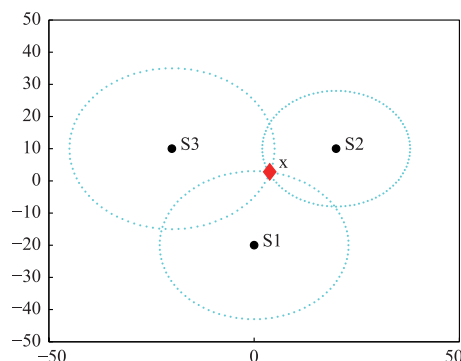


图1 分布式定位系统示意图

在噪声环境下,TOA 测量值为真实的 TOA 和测量误差的叠加,即:

$$\hat{t}_i = t_0 + \frac{r_i}{c} + e_i \quad (2)$$

其中 e_i 为 TOA 测量误差, $e_i \sim N(0, \sigma_i^2)$, 当噪声为高斯白噪声时, e_i 为相互独立,服从均值为零,方差为 σ_i^2 高斯分布.

记 $\hat{\mathbf{t}} = [\hat{t}_1 \ \hat{t}_2 \ \dots \ \hat{t}_n]^T, \mathbf{e} = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n]^T, \mathbf{t} = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_n]^T$, 将式(2)表示为向量形式.

$$\hat{\mathbf{t}} = \mathbf{t} + \mathbf{e} \quad (3)$$

令未知向量 $\mathbf{x} = [x \ y]^T, \mathbf{x}^+ = [\mathbf{x}^T \ t_0]^T$, 则 TOA 测量向量的最大似然函数为:

$$f(\hat{\mathbf{t}}|\mathbf{x}^+) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} \sqrt{\det(\mathbf{R})}} e^{-\frac{1}{2}(\hat{\mathbf{t}} - \mathbf{t})^T \mathbf{R}^{-1} (\hat{\mathbf{t}} - \mathbf{t})} \quad (4)$$

其中 \mathbf{R} 为 TOA 测量误差的协方差矩阵.

$$\mathbf{R} = \text{cov}(\mathbf{e}\mathbf{e}^T) = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则似然函数最大时的向量即为估计得声源位置.

3 节点对目标的观测性能与定位误差 CRLB 的关系

利用上述的 TOA 定位算法,导出节点对目标的观测性能与定位误差 CRLB 的关系,从而给出节点与目标相对位置的不同造成的定位误差的变化理论解析关系.对于参数估计问题,CRLB 为任何无偏估计量的方差确定了一个下限. CRLB 为 Fisher 信息矩阵 (Fisher Information Matrix) 的逆矩阵. 设 \mathbf{x} 的无偏估计量为 $\hat{\mathbf{x}}$, 则估计误差的方差矩阵的下界为:

$$E[(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x})(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x})^T] \geq \text{CRLB}(\mathbf{x}) = \mathbf{J}^{-1} \quad (6)$$

\mathbf{J} 为 Fisher 信息矩阵.

$$\mathbf{J} = E\{[\nabla_{\mathbf{x}} \ln f(\hat{\mathbf{t}}|\mathbf{x})][\nabla_{\mathbf{x}} \ln f(\hat{\mathbf{t}}|\mathbf{x})]^T\} \quad (7)$$

将式(4)带入式(7)可得:

$$J = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \frac{1}{c^2 \sigma_i^2} \frac{(x-x_i)^2}{r_i^2} & \frac{1}{c^2 \sigma_i^2} \frac{(x-x_i)(y-y_i)}{r_i^2} & \frac{1}{c \sigma_i^2} \frac{x-x_i}{r_i} \\ \frac{1}{c^2 \sigma_i^2} \frac{(x-x_i)(y-y_i)}{r_i^2} & \frac{1}{c^2 \sigma_i^2} \frac{(y-y_i)^2}{r_i^2} & \frac{1}{c \sigma_i^2} \frac{y-y_i}{r_i} \\ \frac{1}{c \sigma_i^2} \frac{x-x_i}{r_i} & \frac{1}{c \sigma_i^2} \frac{y-y_i}{r_i} & \frac{1}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{令 } \cos \theta_i = \frac{x-x_i}{r_i}, \sin \theta_i = \frac{y-y_i}{r_i}$$

则式(8)可表示为:

$$J = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \frac{1}{c^2 \sigma_i^2} \cos^2 \theta_i & \frac{1}{c^2 \sigma_i^2} \cos \theta_i \sin \theta_i & \frac{1}{c \sigma_i^2} \cos \theta_i \\ \frac{1}{c^2 \sigma_i^2} \cos \theta_i \sin \theta_i & \frac{1}{c^2 \sigma_i^2} \sin^2 \theta_i & \frac{1}{c \sigma_i^2} \sin \theta_i \\ \frac{1}{c \sigma_i^2} \cos \theta_i & \frac{1}{c \sigma_i^2} \sin \theta_i & \frac{1}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

因此有:

$$\begin{aligned} \det(J) &= \frac{1}{c^4} \left\{ \frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^3 \right. \\ &+ \sum_{i=1}^n \frac{\sin 2\theta_i}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^n \frac{\cos \theta_i}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^n \frac{\sin \theta_i}{\sigma_i^2} \\ &- \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{\sin 2\theta_i}{\sigma_i^2} \right)^2 \right. \\ &+ 2 \left(\sum_{i=1}^n \frac{\cos \theta_i}{\sigma_i^2} \right)^2 + 2 \left(\sum_{i=1}^n \frac{\sin \theta_i}{\sigma_i^2} \right)^2 \left. \right] \\ &+ \sum_{i=1}^n \frac{\cos 2\theta_i}{2\sigma_i^2} \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{\cos \theta_i}{\sigma_i^2} \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{\sin \theta_i}{\sigma_i^2} \right)^2 \right. \\ &\left. \left. - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^n \frac{\cos 2\theta_i}{2\sigma_i^2} \right] \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

则估计误差的 CRLB 的迹为:

$$T_{ar} = \frac{1}{c^2 \det(J)} \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{\sin \theta_i}{\sigma_i^2} \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{\cos \theta_i}{\sigma_i^2} \right)^2 \right] \quad (11)$$

由式(11)可知,对于已知节点数目及声速的定位系统,测试区域某一点的定位误差主要受声源到传感器矢量的方向以及节点探测性能的影响.对于一个带宽为 B (Hz),中心频率为 f_c (Hz),持续时间为 T_s (s)的信号, σ_i^2 的 CRLB^[1,20]为:

$$\sigma_i^2 \geq \text{CRLB (TOA)} + \frac{1}{8\pi^2 B T_s f_c^2 \text{SNR}_i} \quad (12)$$

其中, SNR_i 为节点 s_i 处的信噪比,与声源到传感器节点

的距离平方成反比,即:

$$\text{SNR}_i = \text{SNR} / r_i^2 \quad (13)$$

SNR 为信号 $1m$ 处的信噪比.则第 i 个节点的 TOA 估计方差 σ_i^2 可表示为:

$$\sigma_i^2 = C_\tau r_i^2 \quad (14)$$

其中

$$C_\tau = \frac{1}{8\pi^2 B T_s f_c^2 \text{SNR}} \quad (15)$$

在以前研究传感器节点最优布局时,为了简化起见,认为所有传感器节点测量误差服从同一高斯分布,即 $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_n$.由式(10)和式(11)可以看出,节点的观测性能对定位性能的影响体现在声源到传感器节点的距离,这对布局产生了很大的影响,直接导致最优布局与以往的结论产生较大的差异.

4 基于自适应遗传算法的最优布局方法

在实际应用中,声源位置是未知的,为了确保一定范围测试区域内的整体定位性能,本文使用的优化准则是:使测试区域内的所有可能的目标点的平均 CRLB 达到最小,即:

$$\varpi = \frac{1}{\Omega} \iint_{\Omega} \sqrt{T_{ar}} dx dy \quad (16)$$

Ω 为测试区域的面积.由式(10),(11)可知,对上式积分比较困难,因此我们对目标位置离散化处理.

$$\mathbf{p} = \arg \left\{ \min \left[\frac{1}{N} \sum_x \sqrt{T_{ar}} \right] \right\} \quad (17)$$

式中, N 为所取离散声源的数量, $\mathbf{p} = [x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n]^T$ 为传感器节点的坐标组成的向量.对式(17)采用自适应遗传算法^[21~24]进行迭代寻优,主要遗传算子如下:

(1)种群初始化:设种群规模为 M ,传感器节点坐标向量 $\mathbf{p} = [x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n]^T$ 作为染色体向量.采用浮点数编码方式,产生位于测试区域内的 M 组随机向量做为初始种群.

(2)计算并评估适应度值:将(1)所产生的 M 组染色体向量分别带入式(17),取其倒数作为适应度值参与评估.

(3)遗传操作:

(a)选择:为了保证适应度值较高的染色体向量被选中,本文采用基于上限的确定式采样选择策略^[23].

(b)交叉:为了产生更加优秀的个体,需要对被选中的染色体中两个染色体进行交叉操作.为了防止早熟现象及提高收敛速度,采用自适应交叉算子来产生后代染色体^[24].

(c)变异:为了增加种群多样性,变异概率根据待变异个体的适应度值进行重构^[24].

(d)精英保留策略:为了将最好的个体传播到下一代,创建一个精英文件保留每一代中的精英个体,并不

断与新的个体进行比较,更新.

计算流程为:

- (1) 确定个体的组成和长度.
- (2) 初始化进化代数 $t+0$; 设定需要执行的最大进化代数 T , 随机生成 M 个个体, 行程初始种群 $M(0)$, 每个个体即为问题的潜在解.
- (3) 对个体评价, 得到种群 $M(t)$ 中个体的适应度值 $U(m)$, 并对其评价优劣.
- (4) 执行遗传操作, 产后代 $C(t)$, 并继续对后代评价优劣, 父代与子代中, 选择优秀个体组成新种群 $M(t+1)$.
- (5) 终止条件, 算法收敛, 求出解. 若 t 小于等于 T , 则 $t=t+1$, 返回继续步骤(3)和(4); 若超过设置的最大进化代数即 $t > T$, 则认为运算中适应度值最大的个体为最优解.

5 实验仿真和结果分析

本节主要对分布式声源定位系统的最优布局规律进行仿真与分析, 仿真参数如下:

- (1) 节点数目: 5, 10, 20, 40.
- (2) 测试区域: 边长 $L=2\text{km}$ 的正方形.
- (3) 信号参数: $f_c=600\text{Hz}$, $T_s=0.1\text{s}$, $B=700\text{Hz}$, 信号 1m 处的信噪比为 $\text{SNR}=70\text{dB}$.

(4) 自适应遗传算法: 种群规模为 200, 最大迭代次数为 1000 次, 初始交叉概率 $p_{c1}=0.9$, $p_{c2}=0.6$, 变异概率 $p_{m1}=0.1$, $p_{m2}=0.01$.

5.1 目标出现概率为均匀分布

当目标出现在测试区域内各个位置的概率相等时, 我们将测试区域按照 10m 的间隔划分为网格, 网格的交点为所有可能的声源位置, 带入式(17), 采用自适应遗传算法进行迭代寻优, 仿真得到的节点最优布局如图 2(a) - 图 2(d).

由图 2 可以看出, 当声源出现在测试区域各个点的概率相等时, 传感器节点的最优布局均匀的分布在整个测试区域. 当节点个数为 5 个时, 考虑节点性能的最优布局为一个节点位于测试区域中心, 其余四个节点布放在矩形测试区域的四个顶点, 整个布局近似呈现中心对称. 当节点个数为 10 个时, 最优布局为矩形测试区域每条边界线均匀布放三个节点, 其余两个传感器节点位于测试区域对角线, 关于测试区域中心呈中心对称, 其中一个节点到测试区域中心的距离占测试区域对角线长度的 1/8. 随着传感器节点则增多, 最优布局整体呈现均匀分布.

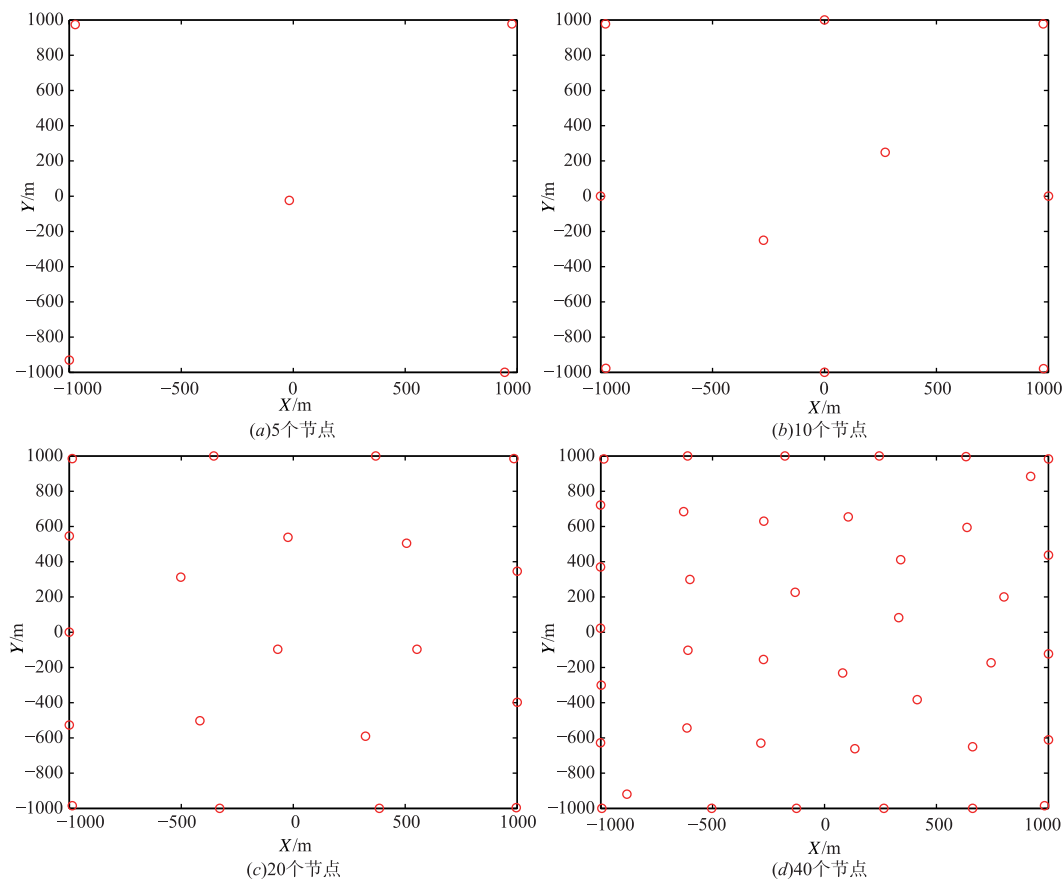
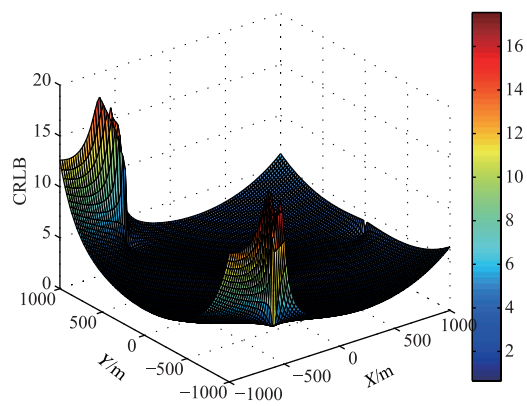
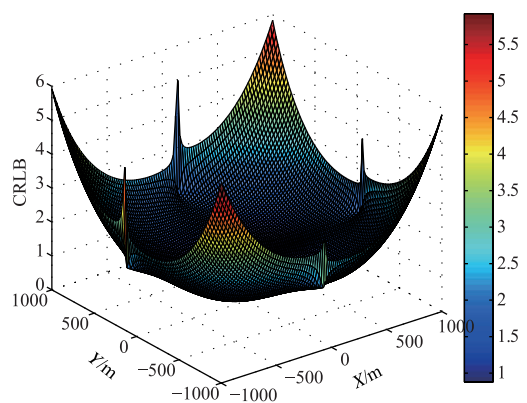


图2 声源位置服从均匀分布时的最优布局, 图中o表示传感器节点

若将 5 个传感器节点限制在半径为 1000m 的圆内,若按照文献[18]所得结论,两个传感器节点布放在测试区域中心,其他三个节点均匀布放在圆周上时,带入式(16),可得出在此布局下的 CRLB 分布如图 3(a)所示.按照本文算法所得最优布局时的误差分布如图 3(b)所示.



(a)文献[18]最优布局时的误差分布



(b)基于节点探测性能最优布局时的误差分布

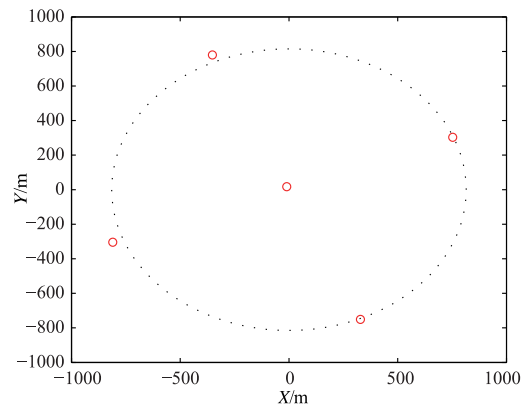
图3

由图 3 可知,采用文献[18]所得到的最优布局的误差整体高于本文所得最优布局的误差.由图 3(b)可知,采用本文所得最优布局时的误差整体相差较小,边界区域比中心区域的误差仅仅相差 4m 左右.但是采用文献[18]最优布局时的误差分布边界区域比中心区域可高达约 15m.因此,本文所得最优布局可明显提高分布式定位系统的整体定位性能.

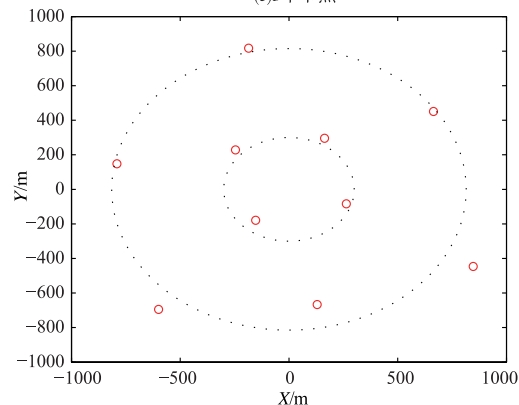
5.2 目标出现概率为高斯分布

对于一些预设位置的声源定位问题,例如制导导弹、炮弹等,其落入测试区域的落点位置相对预期目标点的偏差一般呈高斯分布.

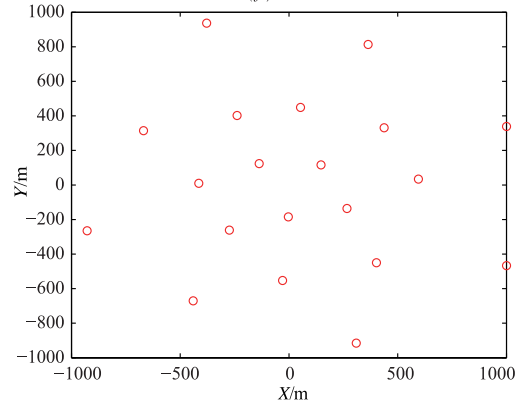
设目标落入测试区域的概率服从均值为测试区域中心点,标准差为 $L/6$ 的高斯分布 $N(0, L^2/36)$.在此概率参数下,目标落入测试区域内的概率为 98%.生成服从该高斯分布的 2000 个随机点作为目标的可能位置,将所有可能的声源位置带入式(17),采用自适应遗传算法进行迭代寻优,仿真得到的节点最优布局如图 4(e)~图 4(h)所示.



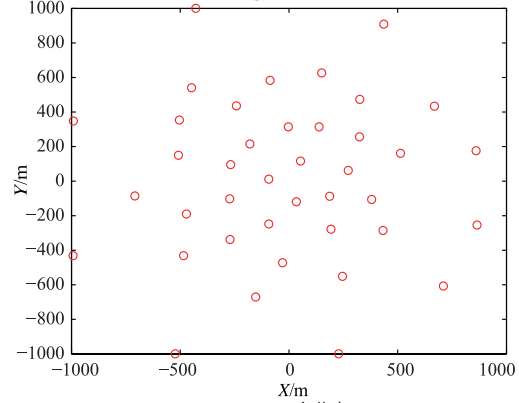
(e)5个节点



(f)10个节点



(g)20个节点



(h)40个节点

图4 声源位置服从高斯分布时的最优布局

由图 4 可以看出,当声源服从高斯分布时,节点最优布局在区域中心区较密,而靠近边沿处稀疏.当传感器节点个数为 5 个时,最优布局的一个节点在中心,其余 4 个节点接近均匀分布于半径为 834m 的圆周上.当有 10 个节点参与定位时,节点最优布局为:四个节点靠近半径为 300m 的圆上,而六个节点则近似分布在半径为 835m 的圆上.

由图 2 和图 4 可知,传感器节点的最优布局与声源出现在测试区域的概率分布十分相关,当声源出现在测试区域各个点的可能性相等时,传感器节点应在整个测试区域均匀布放.当声源出现在测试区域的概率服从高斯分布时,最优布局按照不等间距的圆环布设.

5.3 节点个数的选择

在实际应用中,需要用最少的节点个数设计符合要求的定位系统.采用本文方法,对不同测试区域大小时,不同节点个数在最优布局时的定位误差变化趋势,为实际应用中选择节点个数提供指导.

从图 5 可以看出,在相同的测试区域大小情况下,平均 CRLB 随着传感器节点的增加而减小,但误差减小的速度却随着节点个数的不断增加而逐渐减小.例如测试区域为 500 时,从三个节点增加到四个节点时,平均 CRLB 减小 1.5m,而从 13 个增加到 14 个节点时,平均 CRLB 只减小 0.03m.但是增加传感器节点会使得计算复杂度以及能耗等各方面同时增加,因此,应该在综合个方法性能指标要求的情况下合理选择传感器节点的个数.

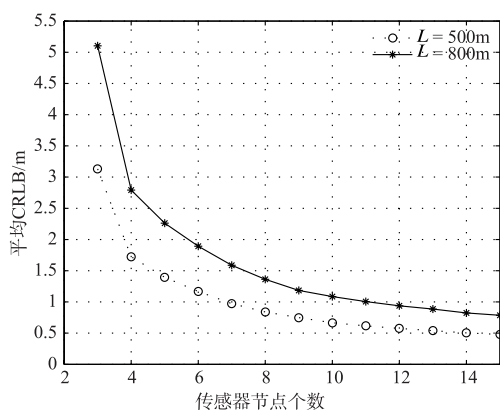


图5 相同的测试区域时,不同传感器节点个数最优布局时的定位误差

目前,常用的节点选择方法有贪婪算法、凸优化方法、稀疏优化方法以及遗传算法等^[25].若已知定位精度要求,为了降低能耗,要求用最小的节点数目达到该精度,可以用稀疏优化方法进行建模,并通过松弛变量,转化为半正定规划问题,进而利用凸优化方法例如内点法进行求解^[12,26~28];该方法计算简单,所需时间短,但是需要满足稀疏性,即可供选择的传感器节点数

目必须远远大于所选择的节点数目.如果可供选择的节点数目较少,即不满足稀疏性,则可以选择贪婪算法进行节点选择^[30~33].

6 结论

本文研究了针对被动声源目标的分布式传感器网络的节点最优布局问题,优化目标为测试区域内的平均定位误差达到最小.综合考虑了节点观测性能的差异、目标落入待测区域的分布概率差异两种情况.利用自适应遗传算法进行布局仿真,结果表明:(1)考虑节点性能时,所得最优布局可明显提高分布式定位系统的整体定位性能;对于半径为 1000m 的测试区域,采用本文所得最优布局时边界区域比中心区域的误差仅相差 4m 左右,与不考虑节点性能时的最优布局相比,误差可提高约 11m.(2)最优布局与信号的分布概率有关.当节点出现在测试区域各个位置的概率相等时,最优布局近似呈均匀分布.当声源位置服从高斯分布时,节点最优布局也呈显出内密外疏的近似高斯分布.(3)最优布局条件下,定位误差的平均 CRLB 随着传感器节点的增多而减小,减小速度随着节点个数的增多而降低.

参考文献

- [1] Saric Z M, Kukolj D D, Teslic N D. Acoustic source localization in wireless sensor network[J]. Circuits, Systems and Signal Processing, 2010, 29(5): 837-856.
- [2] Kaune R. Accuracy studies for TDOA and TOA localization[A]. 2012 15th International Conference on Information Fusion (FUSION) [C]. Singapore: International Society on Information Fusion, 2012. 408-415.
- [3] Yong Liu, Yu Hen Hu, Quan Pan, Distributed, robust acoustic source localization in a wireless sensor network [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(8): 4350-4360.
- [4] Ferguson, Brian G, Michael V. Scanlon, and Jay W. Chang. Time delay estimation of broadband acoustic signals and its defense applications[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 140(4): 3006-3006.
- [5] Li, Xinya, et al. Contributed review: Source-localization algorithms and applications using time of arrival and time difference of arrival measurements[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(4): 041502.
- [6] Shen, Guowei, Rudolf Zetik, Reiner S. Thoma. Performance comparison of TOA and TDOA based location estimation algorithms in LOS environment[A]. 2008 5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication [C]. Germany: Leibniz University of Hannover, 2008. 71-78.
- [7] Yang B, Scheuing J. Cramer-Rao bound and optimum sen-

- sonor array for source localization from time differences of arrival [J]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Signal Processing Society, 2005. 961 – 964.
- [8] Bishop A N, Fidan B, Anderson B D O, et al. Optimality analysis of sensor-target geometries in passive localization: Part 2-Time-of-arrival based localization [A]. 2007 3rd International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks, and Information Processing [C]. Australia: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. Vol. 36: 13 – 18.
- [9] Ho K C, Vicente L M. Sensor allocation for source localization with decoupled range and bearing estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56 (12): 5773 – 5789.
- [10] Ranieri, J, Amina C, and Martin V. Near-optimal sensor placement for linear inverse problems [J]. IEEE Transactions on signal processing, 2014, 62(5): 1135 – 1146.
- [11] Chepuri S P, Leus G. Continuous sensor placement [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(5): 544 – 548.
- [12] Chepuri S P, Leus G. Sparsity-promoting sensor selection for non-linear measurement models [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(3): 684 – 698.
- [13] 金家保, 吴宁, 杨全. 基于半定松弛的时差定位系统优化布站算法 [J]. 电路与系统学报, 2013, 18 (2): 134 – 138.
Jin Jiabao, Wu Ning, Yang Quan. Sensor placement strategies for TDOA location system based on semidefinite relaxation [J]. Journal of Circuits and Systems, 2013, 18 (2): 134 – 138. (in Chinese)
- [14] 孙宝国, 苗强, 宋继林, 等. 布站形式对 TDOA 无源区域定位系统定位精度的影响 [J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(9): 129 – 132.
Sun Baoguo, Miao Qiang, Song Jilin, et al. Analysis of the influence of station placement on the position precision of passive area positioning system based on TDOA [J]. Fire Control and Command Control, 2011, 36(9): 129 – 132. (in Chinese)
- [15] 王成, 李少洪, 黄槐. 测时差定位系统定位精度分析与最优布站 [J]. 火控雷达技术, 2003, 32(1): 1 – 6.
Wang Cheng, Li Shaohong, Huang Huai. Location accuracy analysis and optima distribution of TOA difference location system [J]. Fire Control Radar Technology, 2003, 32(1): 1 – 6. (in Chinese)
- [16] 孙勇, 赵俊渭, 张银兵. 多基地声纳系统定位精度分析与最优布站 [J]. 计算机仿真, 2008, 25(8): 20 – 22.
Sun Yong, Zhao Junwei, Zhang Yinbing. Precision analysis of location and optimal distribution based on multistatic sonar system [J]. Computer Simulation, 2008, 25 (8): 20 – 22. (in Chinese)
- [17] 王瀚, 钟丹星, 周一宇. 不规则布站时差定位系统定位精度分析 [J]. 现代电子技术, 2007, 30(7): 19 – 21.
Wang Han, Zhong Danxing, Zhou Yiyu. Location precision analysis in the time difference of arrival location system using irregular distribution [J]. 2007, 30(7): 19 – 21. (in Chinese)
- [18] 汪波, 薛磊. 基于遗传算法的 TDOA 定位系统的最优布站算法 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (24): 219 – 221.
Wang Bo, Xue Lei. Station arrangement strategy of TDOA location system based on genetic algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 45 (24): 219 – 221. (in Chinese)
- [19] Ash J N, Moses R L. Acoustic time delay estimation and sensor network self-localization: Experimental results [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(2): 841 – 850.
- [20] Patwari N, Ash J N, Kyperountas S, et al. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks [J]. IEEE Signal processing magazine, 2005, 22 (4): 54 – 69.
- [21] Grefenstette J J. Genetic Algorithms and Their Applications: Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms [M]. America: Psychology Press, 2013.
- [22] Yan Qingli, Chen Jianfeng. Node placement optimization for distributed sensor network using adaptive genetic algorithm [A]. IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC) [C]. Hong Kong: City University of Hong Kong, 2016. 1 – 4.
- [23] 杨平, 郑金华. 遗传选择算子的比较与研究 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(15): 59 – 62.
Yang Ping, Zheng Jinhua. Comparison and research over genetic selection operator [J]. Computer Engineering and applications, 2007, 43(15): 59 – 62. (in Chinese)
- [24] 俞建峰, 吴雪凡, 聂义, 等. 基于自适应遗传算法的无线传感网络节点布局优化 [J]. 江南大学学报 (自然科学版), 2014, 13(1): 39 – 43.
Yu Jianfeng, Wu Xuefan, Nie Yi, etc. Research on wireless sensor networks deployment based on adaptive genetic algorithm [J]. Journal of Jiangnan University (Nature Science Edition), 2014, 13(1): 39 – 43. (in Chinese)
- [25] Rowaihy H, Eswaran S, Johnson M, et al. A survey of sensor selection schemes in wireless sensor networks [A]. Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics [C]. America: The International

- Society for Optical Engineering, 2007. 65621A – 65621A – 13.
- [26] Jamali-Rad H, Simonetto A, Leus G. Sparsity-aware sensor selection: Centralized and distributed algorithms [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(2): 217 – 220.
- [27] Jamali-Rad H, Simonetto A, Ma X, et al. Distributed sparsity-aware sensor selection [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(22): 5951 – 5964.
- [28] Liu S, Chepuri S P, Fardad M, et al. Sensor selection for estimation with correlated measurement noise [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(13): 3509 – 3522.
- [29] Joshi S, Boyd S. Sensor selection via convex optimization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(2): 451 – 462.
- [30] Wang H, Yao K, Estrin D. Information-theoretic approaches for sensor selection and placement in sensor networks for target localization and tracking [J]. Journal of Communications and Networks, 2005, 7(4): 438 – 449.
- [31] Wang H, Yao K, Pottie G, et al. Entropy-based sensor selection heuristic for target localization [A]. Proceedings of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks [C]. New York: ACM, 2004. 36 – 45.
- [32] Shamaiah M, Banerjee S, Vikalo H. Greedy sensor selection: Leveraging submodularity [A]. 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) [C]. Atlanta: the IEEE Control Systems Society, 2010. 2572 – 2577.
- [33] Shimosaka M, Saisho O, Sunakawa T, et al. ZigBee based wireless indoor localization with sensor placement optimization towards practical home sensing [J]. Advanced Robotics, 2016, 30(5): 315 – 325.

作者简介



闫青丽 女, 1990 年 5 月出生, 河南安阳人, 西北工业大学航海学院, 博士研究生. 主要研究方向为信号与信息处理、无线传感器网络声源定位.
E-mail: gongchyy@163.com



陈建峰 男, 1972 年 9 月出生, 陕西西安人, 西北工业大学航海学院教授, 主要研究方向为无线传感器网络、阵列信号处理、水下信号处理等方面.