

# 无线传感器网络定位误差传播研究

崔永青<sup>1</sup>, 叶晓宇<sup>2</sup>, 赵 亮<sup>1</sup>

(1. 宝鸡职业技术学院, 陕西 宝鸡 721013; 2. 空装驻宝鸡地区第一军事代表室, 陕西 宝鸡 721006)

**摘要:**无线传感器网络定位技术是无线传感器网络中的关键技术之一。该研究基于无线电干涉定位系统(RIPS)建立了等价测量误差模型,研究实际情况下已定位节点作为未知节点的锚节点在进行定位的过程中,由于锚节点自身位置误差对未知节点定位的精度影响以及误差传播问题。通过仿真分析表明,锚节点自身位置误差会降低未知节点的定位精度。在此基础上考虑锚节点自身位置误差传播的影响研究无线传感器网络定位节点分配策略,在定位过程中找到最优锚节点使得定位误差最小化。

**关键词:**无线传感器网络;定位精度;误差传播;节点分配

中图分类号:TN929.5

文章编号:1000-0682(2024)06-0114-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.022

## Research on positioning error propagation of wireless sensor networks

CUI Yongqing<sup>1</sup>, YE Xiaoyu<sup>2</sup>, ZHAO Liang<sup>1</sup>

(1. Baoji Vocational and Technology College, Shaanxi Baoji 721013, China;

2. The First Military Representative of Baoji, Shaanxi Baoji 721006, China)

**Abstract:**Sensor localization is one of the key technologies of wireless sensor networks. This paper establishes an equivalent measurement error model based on radio interferometric positioning system (RIPS), and investigates the node positioning error and error propagation caused by the position error of anchor nodes in practical situations. Simulation result shows that the position error of anchor nodes will reduce the positioning accuracy of unknown nodes. On this basis, research wireless sensor network localization node allocation strategy considering the influence of anchor node position error propagation, so as to find the optimal anchor node to minimize positioning error during the positioning process.

**Keywords:**wireless sensor networks; positioning accuracy; error propagation; node allocation

## 0 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是当前国内外备受关注的研究热点领域。在无线传感器网络中,节点的位置信息对于网络的数据采集、地域监测具有十分重要的作用。在无线传感器网络中定位误差取决于很多因素。

文献[1]针对DV-HOP定位算法锚节点分布不均匀对定位精度的影响,提出一种跳距修正的DV-HOP定位算法。文献[2]提出了一种融合改

进的麻雀搜索算法和广义回归神经网络(ISSA-GRNN)的节点定位优化算法,减少无线传感器网络的定位误差。文献[3]针对DV-Hop算法定位精度低和环境适应力差的问题,提出基于坐标修正的扩展卡尔曼定位算法EKF-DV-Hop。文献[4]为了充分利用无线传感器网络的拓扑结构来提高节点定位精度,提出一种基于节点密度加权的RDD算法。文献[5]提出一种基于RSSI跳数量化与误差修正的DV-Hop改进算法,提高DV-Hop算法在非均匀网络中的定位精度。文献[6]提出基于测距修正的差分进化的节点定位算法(RDEL)算法,提高节点定位精度。

在实际应用场景中,有的定位系统初始的锚节点数量很少,此时需要使用较少的锚节点定位尽可能多的未知节点。所以需要将已经定位的未知节点作为锚节点,再将其用于其他未知节点的定位中。

收稿日期:2024-02-27

基金项目:陕西省教育厅2024年度一般专项科研计划项目(自然科学专项)——无线传感器网络定位误差传播研究。

第一作者:崔永青(1989—),女,陕西铜川人,硕士研究生,讲师,主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail:cyqnwpu@163.com

在这种情况下,锚节点和未知节点在定位过程中误差会不断的累积。该文主要研究基于无线电干涉定位系统(RIPS),考虑实际情况下已定位节点作为未知节点的锚节点在进行定位的过程中,由于锚节点自身位置误差对未知节点定位的精度影响以及误差传播问题,并通过仿真进行分析。基于此研究无线传感器网络定位节点分配策略,从而最小化定位误差。

## 1 基于 RIPS 测量的无线传感器网络模型

基于无线电干涉系统(RIPS)测量的无线传感器网络模型如图 1 所示,该系统由节点  $A, B, C$  和  $D$  组成,其中节点  $A, B$  和  $C$  的位置已知,节点  $D$  的位置未知。

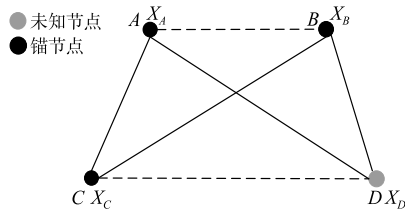


图 1 无线传感器网络模型

定位问题就是要根据节点  $A, B$  和  $C$  的位置和它们与节点  $D$  之间的位置关系对节点  $D$  进行定位。图 1 中  $X_A, X_B, X_C$  和  $X_D$  分别为节点  $A, B, C$  和  $D$  的坐标。1 组 RIPS 测量值  $K_{A,B,C,D}$  和  $K_{A,C,B,D}$  定义如下：

$$k(u) = \begin{bmatrix} k_{A,B,C,D} \\ k_{A,C,B,D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{ab} + \sqrt{(x_a - u_x)^2 + (y_a - u_y)^2} - \sqrt{(x_b - u_x)^2 + (y_b - u_y)^2} \\ \delta_{ac} + \sqrt{(x_a - u_x)^2 + (y_a - u_y)^2} - \sqrt{(x_c - u_x)^2 + (y_c - u_y)^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $[x_a, y_a]$ 、 $[x_b, y_b]$  和  $[x_c, y_c]$  分别为节点  $A, B$  和  $C$  的坐标； $u = [u_x, u_y]$  为未知节点  $D$  的坐标；

$$\begin{aligned} \delta_{ab} &= d_{BC} - d_{AC} \\ &= \sqrt{(x_b - x_c)^2 + (y_b - y_c)^2} - \sqrt{(x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2} \\ \delta_{ac} &= d_{BC} - d_{AB} \\ &= \sqrt{(x_b - x_c)^2 + (y_b - y_c)^2} - \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \end{aligned}$$

则 RIPS 测量模型可以写成：

$$x = k(u) + w \quad (2)$$

式中： $x$  为未知节点的坐标； $w \sim N(0, \Sigma)$ ， $\Sigma = \sigma^2 I_{2 \times 2}$ 。

定位问题就是根据上述 RIPS 测量值估计未知节点  $D$  的位置。

## 2 基于 RIPS 测量的等价测量误差模型

在图 1 所示模型中,锚节点的位置都是确定的。但是在实际情况中,当未知节点的位置被估计出来后,该节点可能会被用作下一时刻估计其他节点的锚节点。由于定位算法必然存在一定的误差,从而导致这些锚节点自身位置存在误差,而此类锚节点的位置误差又会影响待定节点的定位精度。因此,在整个网络定位过程中应考虑到测量模型中锚节点自身误差的传播。

根据上述模型,考虑锚节点位置误差的 RIPS 测量模型如下:假设节点  $A, B$  和  $C$  的位置误差为高斯白噪声,记为  $n_{a,x}, n_{b,x}, n_{c,x}$ ,则由式(1)得到带误差的测量值为:

$$K'_{A,B,C,D} = \delta'_{ab} + \sqrt{(x_a - u_x + n_{a,x})^2 + (y_a - u_y + n_{a,y})^2} - \sqrt{(x_b - u_x + n_{b,x})^2 + (y_b - u_y + n_{b,y})^2} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \delta'_{ab} &= \sqrt{[(x_b + n_{b,x}) - (x_c + n_{c,x})]^2 + [(y_b + n_{b,y}) - (y_c + n_{c,y})]^2} \\ &\quad - \sqrt{[(x_a + n_{a,x}) - (x_c + n_{c,x})]^2 + [(y_a + n_{a,y}) - (y_c + n_{c,y})]^2} \end{aligned}$$

同理:

$$K'_{A,C,B,D} = \delta'_{ac} + \sqrt{(x_a - u_x + n_{a,x})^2 + (y_a - u_y + n_{a,y})^2} - \sqrt{(x_c - u_x + n_{c,x})^2 + (y_c - u_y + n_{c,y})^2} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} \delta'_{ac} &= \sqrt{[(x_b + n_{b,x}) - (x_c + n_{c,x})]^2 + [(y_b + n_{b,y}) - (y_c + n_{c,y})]^2} \\ &\quad - \sqrt{[(x_a + n_{a,x}) - (x_b + n_{b,x})]^2 + [(y_a + n_{a,y}) - (y_b + n_{b,y})]^2} \end{aligned}$$

式中： $n_{i,x} \sim N(0, \sigma_i^2)$ ， $n_{i,y} \sim N(0, \sigma_i^2)$ ， $i = a, b, c$ 。

因此， $K'_{A,B,C,D}$  可以近似为均值为  $K_{A,B,C,D}$ 、方差为  $\sigma_{s1}^2$  的高斯分布,表示为  $K'_{A,B,C,D} \sim N(K_{A,B,C,D}, \sigma_{s1}^2)$ 。

同理， $K'_{A,C,B,D}$  可以近似为均值为  $K_{A,C,B,D}$ 、方差为  $\sigma_{s2}^2$  的高斯分布,表示为  $K'_{A,C,B,D} \sim N(K_{A,C,B,D}, \sigma_{s2}^2)$ 。因此考虑锚节点误差的 RIPS 测量模型表示为:

$$x = k(u) + n(u) + w \quad (5)$$

式中： $n(u)$  为等价锚节点噪声,它服从均值为零、方差为  $\Sigma_s = \text{diag}(\sigma_{s1}^2, \sigma_{s2}^2)$  的高斯分布。

该模型下测量的误差方差为:

$$\begin{aligned} \sigma_{s1}^2 &= 2 \left[ 1 - \frac{(x_a - u_x)(x_a - x_c) + (y_a - u_y)(y_a - y_c)}{d_{AD}d_{AC}} \right] \sigma_a^2 \\ &\quad + 2 \left[ 1 - \frac{(x_b - u_x)(x_b - x_c) + (y_b - u_y)(y_b - y_c)}{d_{BC}d_{BD}} \right] \sigma_b^2 \\ &\quad + 2 \left[ 1 - \frac{(x_a - x_c)(x_b - x_c) + (y_a - y_c)(y_b - y_c)}{d_{AC}d_{BC}} \right] \sigma_c^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{s2}^2 = & 2\left[1 - \frac{(x_a - u_x)(x_a - x_b) + (y_a - u_y)(y_a - y_b)}{d_{AD}d_{AB}}\right]\sigma_a^2 \\ & + 2\left[1 - \frac{(x_a - x_b)(x_c - x_b) + (y_a - y_b)(y_c - y_b)}{d_{AB}d_{BC}}\right]\sigma_b^2 \\ & + 2\left[1 - \frac{(x_c - x_b)(x_c - u_x) + (y_c - y_b)(y_c - u_y)}{d_{BC}d_{CD}}\right]\sigma_c^2\end{aligned}\quad (7)$$

式中:  $d_{XY}(X, Y \in R)$  为节点  $X$  和节点  $Y$  之间的距离。

### 3 锚节点位置误差在传感器网络中的传播

#### 3.1 误差传播模型

假设在传感器网络中, 节点 1、节点 2 和节点 3 为锚节点, 其余节点均为未知节点。定位过程: 第 1 步, 由节点 1、节点 2 和节点 3 定位节点 4; 第 2 步, 用节点 2、节点 3 和节点 4 定位节点 5 等。即定位过程为节点  $i-3$ 、节点  $i-2$  和节点  $i-1$  定位节点  $i$ 。假设第 2 步定位过程中, 锚节点 4 的位置是由前一次的定位确定的, 而由于定位算法的误差导致它的位置存在误差, 则可以用式(6)和式(7)表示该误差方差, 将该方差代入第 2 步定位的原方差公式中, 得到第 2 步定位的误差方差。

以此类推, 可以得到用已知定位节点作为未知节点的锚节点的定位过程中累积误差方差为:

$$\sigma_{si}^2 = (\sigma'_{si})^2 + \sum_{j=4}^i M_{i-j} (\sigma'_{sj})^2, (i \geq 5) \quad (8)$$

式中:

$$\begin{aligned}(\sigma'_{si})^2 = & 2\left[1 - \frac{(x_{i-3} - x_i)(x_{i-3} - x_{i-1}) + (y_{i-3} - y_i)(y_{i-3} - y_{i-1})}{d_{i-3,i}d_{i-3,i-1}}\right] \\ & + 2\left[1 - \frac{(x_{i-2} - x_i)(x_{i-2} - x_{i-1}) + (y_{i-2} - y_i)(y_{i-2} - y_{i-1})}{d_{i-2,i}d_{i-2,i-1}}\right] \\ & + 2\left[1 - \frac{(x_{i-3} - x_{i-1})(x_{i-2} - x_{i-1}) + (y_{i-3} - y_{i-1})(y_{i-2} - y_{i-1})}{d_{i-3,i-1}d_{i-2,i-1}}\right]\end{aligned}$$

$$M_i = M_{i-1} + W_i M_{i-1}; M_1 = W_1; M_0 = 0;$$

$$W_i = 2\left[1 - \frac{(x_i - x_{i+2})(x_{i+1} - x_{i+2}) + (y_i - y_{i+2})(y_{i+1} - y_{i+2})}{d_{i,i+2}d_{i+1,i+2}}\right] (i \geq 1)$$

得到节点  $i$  的定位误差方差为:

$$\Sigma_{si} = \text{diag}(\sigma_{si1}^2, \sigma_{si2}^2) \quad (9)$$

式(9)表示, 在用已定位节点定位未知节点的过程中, 误差一步步累积, 在原有方差的基础上增加了  $\sum_{j=4}^i M_{i-j} (\sigma'_{sj})^2$  项, 即累积误差部分; 且随着定位过程逐步增加, 定位误差一步步的增大了。

### 3.2 仿真分析

#### 3.2.1 采用 Fisher 信息矩阵的仿真过程

式(8)描述了锚节点的位置误差对待定位节点的定位误差影响模型, 在该模型下 RIPS 测量的条件密度函数形式如下:

$$x | u \sim N(\mu(u), \Sigma(u)) \quad (10)$$

式中:  $\mu(u)$  为测量值;  $\Sigma(u)$  为测量误差。

为了描述锚节点位置噪声对未知节点定位的影响, 引入 Fisher 信息矩阵来对信息量进行度量。高斯过程下 Fisher 信息矩阵为:

$$\begin{aligned}[G(u)]_{ij} = & \left[\frac{\partial \mu(u)}{\partial u_j}\right]^T \Sigma^{-1}(u) \left[\frac{\partial \mu(u)}{\partial u_j}\right] \\ & + \frac{1}{2} \text{tr} \left[ \Sigma^{-1}(u) \frac{\partial \Sigma(u)}{\partial u_i} \Sigma^{-1}(u) \frac{\partial \Sigma(u)}{\partial u_j} \right]\end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $i, j$  为  $x, y$ ;  $u_i$  和  $u_j$  分别为待定位节点的  $x$  和  $y$  的坐标。

该文在 Matlab 仿真环境中选择  $120 \times 120$  的区域作为仿真区域, 节点  $A(60, 70)$ 、节点  $B(40, 50)$  和节点  $C(70, 50)$  作为锚节点, 采用 Fisher 信息矩阵的行列式来表示信息量的大小。图 2 所示为仿真流程图。

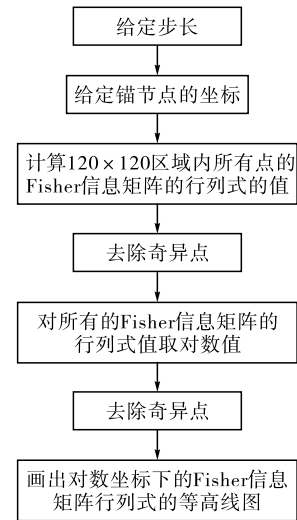


图 2 仿真流程图

#### 3.2.2 忽略锚节点位置误差情况下的仿真分析

在忽略锚节点自身位置误差的理想环境下, 根据上述仿真过程得到图 3 所示仿真结果, 该图对数坐标下 Fisher 信息矩阵行列式的分布图。图中不同的颜色代表不同的信息量大小, 图中色棒由上往下信息量由大逐渐变小。3 个锚节点中间的深红色区域代表 Fisher 信息量是最大的, 越往外 Fisher 信息量越小, 表明定位精度越小。中间有一些蓝色的

条状区域,这些区域的信息量是很小的,这是由于RIPS测量方法中的多径效应会影响相位测量的精度,从而影响定位精度,导致这部分区域的定位误差比较大。

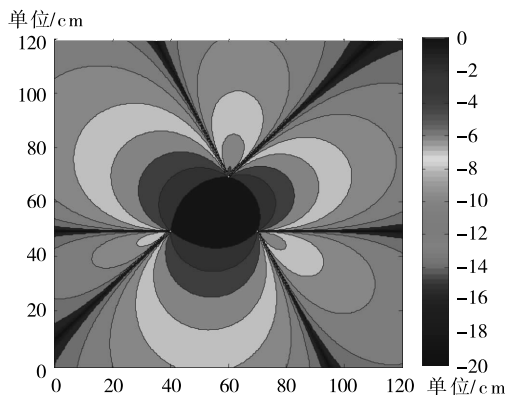


图3 理想情况下 Fisher 信息矩阵行列式的分布图

### 3.2.3 考虑锚节点位置误差情况下的仿真分析

在考虑式(8)中所描述的锚节点位置误差的情况下,图4所示为对数坐标下 Fisher 信息矩阵行列式的分布图。图4中 Fisher 信息的分布和图3的分布类似,但图4中相应位置的 Fisher 信息量较图3中的减小了,这是因为在该场景中考虑了锚节点自身的位置误差。锚节点自身的位置误差在定位过程中会影响距离的测量和距离估计,最终体现在定位误差增大,所以图4中相应区域的 Fisher 信息量就减少了。可见锚节点自身的位置误差在实际中对于定位精度的影响不能忽略不计。

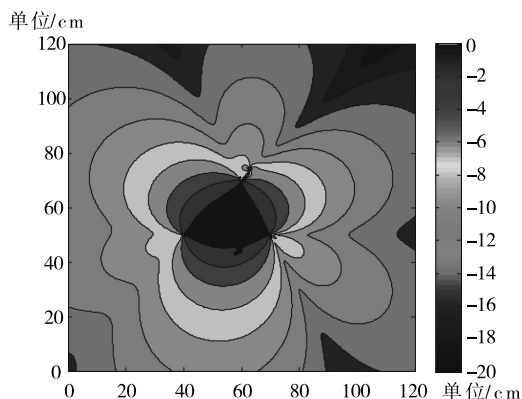


图4 考虑锚节点位置误差 Fisher 信息矩阵行列式的分布

## 4 基于锚节点位置误差的传感器定位节点分配研究

由第3节的研究结果可知,当锚节点数量过少时,多次使用已定位的未知节点作为锚节点,或者使用多跳锚节点作为参考节点,定位的误差也会逐渐

累积且慢慢增大,所以也不能使用太远距离的锚节点作为参考节点。对于RIPS系统,定位1个未知节点需要3个位置已知的节点,此时需要在该待定位节点周围位置已知的锚节点和升级之后的锚节点中选择3个节点作为定位该节点的锚节点。在这些可选的锚节点中选择定位所需的3个锚节点的选取准则有误差约束或者资源约束。

### 4.1 问题描述

假设在无线传感器网络中仅有3个锚节点 $A_1$ 、 $A_2$ 和 $A_3$ , $n$ 个未知节点 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 。节点定位过程如下:

(1)定位节点 $U_1$ :利用RIPS测量方法根据节点 $A_1$ 、节点 $A_2$ 和节点 $A_3$ 的位置定位节点 $U_1$ 的位置。因为RIPS测量方法存在测量误差,所以通过定位算法得到的节点 $U_1$ 的位置存在误差,记为 $\Sigma_1$ ;

(2)定位节点 $U_n$ :在确定了前面的节点 $U_1 \sim U_{n-1}$ 的位置后,考虑这些已定位节点的位置误差和节点间的距离等因素,在节点 $A_1$ 、节点 $A_2$ 和节点 $A_3$ 与节点 $U_1 \sim U_{n-1}$ 中选择定位节点 $U_n$ 的3个锚节点。在每一步定位过程中,锚节点自身的位置误差随着定位过程的累加而随之累积并且在网络中传播。所以在传感器定位节点分配问题中将该误差转换为定位误差,用于确定传感器定位节点分配的方案。

综上所述,基于锚节点位置误差的无线传感器网络定位节点分配问题,即为在位置已知的3个锚节点和已经定位的带有定位误差的节点中选择对待节点进行定位的3个锚节点的问题。

### 4.2 基于锚节点位置误差的无线传感器网络定位节点分配方案

针对4.1节所述的问题,可以将其转化为1个优化问题,则解决该优化问题的步骤如图5所示。首先根据问题模型建立目标函数,然后确定满足该问题的所有可能的解,构成优化参数集,最后选择1个寻优方法找到最优解。

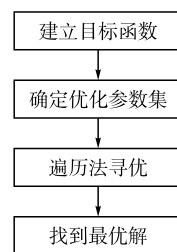


图5 寻优流程图

传感器节点分配算法的实现步骤如下:

(1) 初始化  $k=1$ ;

(2) 确定  $k$  时刻的优化参数集  $T_c$ , 确定优化参数集的容量大小  $N$ ;

(3) 给定期望协方差阵, 计算  $k$  时刻的优化参数集中每个解对应的协方差阵, 计算目标函数的大小, 直到遍历优化参数集  $T_c$  中的每一个解;

(4) 找到使得目标函数最小的那个解作为该时刻的最优解;

(5)  $k=k+1$ , 回到步骤(2), 继续下一个节点, 直到将所有节点全部定位。

#### 4.2.1 建立目标函数

该文研究的是锚节点自身位置误差对待定位节点的定位精度影响。为了简化模型, 不考虑其他因素的影响, 仅仅考虑误差因素, 以最小化定位误差为目标。因此, 在该优化问题中以误差方差大小作为选择定位待定节点的锚节点的准则。误差方差表达式如下:

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_{s1}^2, \sigma_{s2}^2) \quad (12)$$

其中:

$$\begin{aligned} \sigma_{s2}^2 &= 2 \left[ 1 - \frac{(x_a - u_x)(x_a - x_b) + (y_a - u_y)(y_a - y_b)}{d_{AD}d_{AB}} \right] \sigma_a^2 \\ &+ 2 \left[ 1 - \frac{(x_a - x_b)(x_c - x_b) + (y_a - y_b)(y_c - y_b)}{d_{AB}d_{BC}} \right] \sigma_b^2 \\ &+ 2 \left[ 1 - \frac{(x_c - x_b)(x_c - u_x) + (y_c - y_b)(y_c - u_y)}{d_{BC}d_{CD}} \right] \sigma_c^2 \\ \sigma_{s1}^2 &= 2 \left[ 1 - \frac{(x_a - u_x)(x_a - x_c) + (y_a - u_y)(y_a - y_c)}{d_{AD}d_{AC}} \right] \sigma_a^2 \\ &+ 2 \left[ 1 - \frac{(x_b - u_x)(x_b - x_c) + (y_b - u_y)(y_b - y_c)}{d_{BC}d_{BD}} \right] \sigma_b^2 \\ &+ 2 \left[ 1 - \frac{(x_a - x_c)(x_b - x_c) + (y_a - y_c)(y_b - y_c)}{d_{AC}d_{BC}} \right] \sigma_c^2 \end{aligned} \quad (13)$$

该方差  $\Sigma$  是一个二阶对角阵。该文选择期望协方差阵  $I_d$  和式(13)中的方差阵  $I$  的差的绝对值的迹和行列式作为优化目标函数:

$$T_{opt1} = \arg \min_{T_c} \text{tr}(\text{abs}(I - I_d)), s. t. T_c \subseteq T \quad (14)$$

$$T_{opt2} = \arg \min_{T_c} \det(\text{abs}(I - I_d)), s. t. T_c \subseteq T \quad (15)$$

式中:  $I_d$  为期望协方差阵,  $I$  为式(12)所示的方差阵,  $T_c$  为优化参数集, 由于该问题为无约束优化问题, 所以  $T = T_c$ 。

#### 4.2.2 确定优化参数集

假设在定位节点  $U_n$  的过程中, 传感器定位节点分配问题要解决在目前位置已知的锚节点  $A_1$ 、节点

$A_2$  和节点  $A_3$  与节点  $U_1 \sim U_{n-1}$  中选择 3 个节点作为待定位的节点  $U_n$  的锚节点。假设所有的节点均在通信半径之内, 则优化参数集为  $A_1, A_2, A_3$  和  $U_1 \sim U_{n-1}$  中任意 3 个节点的组合, 共  $C_{n+2}^3$  ( $n$  为待定位节点的编号) 种选择, 记该优化参数集为  $T_c$ 。

#### 4.2.3 确定最优解

在优化参数集中选择一个解使得目标函数最优化。该问题可以简化为寻找一个  $x \in T_c$ , 使得目标函数最小化问题。可以采用迭代法或者遍历法等方法找到使得目标函数最小的解记为最优解。得到的最优解即为使得定位误差最小的锚节点组合。

## 5 结语

该文主要研究了基于 RIPS 测量的锚节点位置误差传播问题以及传感器定位节点分配方案。在高斯噪声假设的前提下, 对含有噪声项的非线性量测进行近似, 建立了一个易于分析和研究算法的等价量测模型。在此基础上, 研究了锚节点位置误差在网络中的传播模型。研究结果表明, 考虑锚节点自身位置误差情况下 Fisher 信息量减少, 测量误差增大, 定位精度减小。针对这个问题, 提出了传感器节点分配方案。将该问题转化为一个优化问题, 根据问题模型建立目标函数, 确定满足该问题的所有可能的解, 构成优化参数集, 最后选择一个寻优方法找到最优解。

#### 参考文献:

- [1] 李跃飞. 基于锚节点分布特性的跳距修正的 DV-HOP 定位算法[J]. 传感技术学报, 2021, 34(10): 1379-1384.
- [2] 王家威, 薛亚辉, 魏子尧. 基于 ISSA-GRNN 的无线传感器网络定位优化算法[J]. 齐鲁工业大学学报, 2022, 36(06): 21-27.
- [3] 柏植, 许海峰, 郭凯, 等. 基于坐标修正的改进 WSN 节点定位算法[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2020, 20(12): 117-121.
- [4] 方旺盛, 汪洲, 吴伟伟, 等. 节点密度加权及距离修正的粒子群优化定位算法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(07): 127-129+133.
- [5] 任克强, 潘翠敏. 融合 RSSI 跳数量化与误差修正的 DV-Hop 改进算法[J]. 传感技术报, 2020, 33(05): 718-724.
- [6] 褚银菲, 吕惠芳. 基于测距修正的差分进化的 DV-Hop 定位算法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(06): 33-37.

(下转第 122 页)

结构大类	部件名称	材质
上方仪表	电子壳体	钢 AISI 316 退火不锈钢条
	法兰	钢 AISI 316 退火不锈钢条
	敏感元件	钢 AISI 316 退火不锈钢条
软管	电路板	FR4 circuit board
	软管	钢 AISI 316 退火不锈钢条
底部	DN50 法兰	钢 AISI 316 退火不锈钢条
	压力变送器传感器	钽

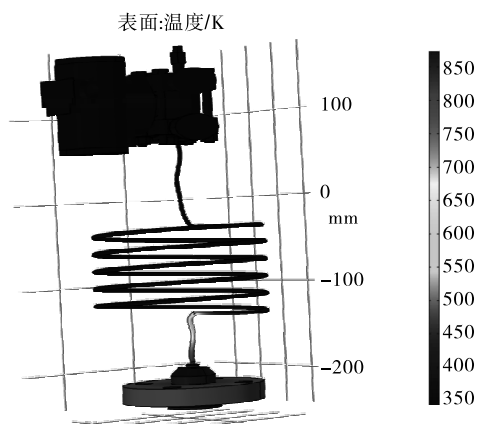


图 6 仪表温度分布

从图 6 中可以看到在进入稳态后,底部法兰的温度上升至近 580 ℃,已经接近压力变送器传感器的工况温度。随着软管距离的增大温度也在逐步的下降,在上方仪表及其内部电路板的部分,其工作温度比较稳定,在 50 ℃ 左右,与环境温度接近,不会影响到仪表电路系统的使用,说明其软管散热设计达到了较好的效果。

## 5 结论

该研究设计的压力变送器,耐高温、耐腐蚀,解决了高温熔盐压力测量的难题。根据热仿真软件分析结果可知,该方案高温熔盐压力变送器的优化设计起到了较好的效果,提高了高温熔盐压力变送器的可靠性水平,对其他仪表的技术研究也具有推广普及的借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] 陶小利,高嵩,黄宏伟,等. 耐高温压力变送器在特殊场合应用的分析[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(6):112-113.
- [2] 黄宏伟,郭文来,孔祥剑,等. 一种具有压力远传功能的一体式压力传感器: ZL202020600540. 4[P]. 2020-04-21.
- [3] 陈昱伦,关敏仪,梁佩博,等. 基于 FMEA 的某型高温熔盐压力变送器可靠性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2023(02):33-39.
- [4] 李广,付一川,喇培清,等. 光热发电用不锈钢的熔盐腐蚀评价及机理[J/OL]. 材料工程, 1-18[2024-08-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1800.TB.20240408.1031.002.html>.
- [5] 高彬彬,顾庆生. 压力变送器研究现状及发展趋势[J]. 自动化仪表, 2024(01):1-7.
- [6] 褚卫华,刘展,顾正华,等. 多通道温度测量整体校准系统仿真分析[J]. 计量与测试技术, 2024(02):32-37.

(上接第 118 页)

- [7] 匡博,王颖,李杰,等. 无线传感网中基于半定规划的定位修正算法[J]. 现代电子技术, 2018, 41(16):84-87.
- [8] Maróti M, Völgyesi P, Dóra S, et al. Radio interferometric geolocation[C]// Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, 2005: 1-12.
- [9] BETAILE D F, CROSS P A, EULER H J. Assessment

and improvement of the capabilities of a window correlator to model GPS multipath phase errors[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2006, 42(2):705-717.

- [10] CHENG Y, WANG X, CAELLI T, et al. Optimal nonlinear estimation for localization of wireless sensor networks[J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 2011, 59(12):5674-5685.

**欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎刊登广告!**