

基于垂直采样的水下三维传感网覆盖算法^①



张彤¹, 马欣媛², 赵太飞²

¹(西安理工大学 计算机科学与工程学院, 西安 710048)

²(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

通讯作者: 赵太飞, E-mail: zhaotaifei@163.com

摘要: 针对水下环境的三维传感器网络节点随机部署时存在覆盖率低的问题, 设计一种基于垂直采样的水下三维传感网络覆盖算法, 用于提高水下三维传感器网络覆盖率和连通性. 垂直采样算法首先对三维监测区域进行垂直平面采样, 然后再对该平面进行直线采样, 把三维空间的覆盖问题转化为多平面内的直线覆盖优化问题, 达到对整个三维网络覆盖优化的目的. 仿真结果表明, 在 100 m×100 m×100 m 的三维监测水域, 垂直采样算法比三维随机部署策略可提高约 4%~28% 的覆盖率, 在节点数为 40 时对覆盖率的提升程度最大.

关键词: 水环境; 传感网; 覆盖算法; 垂直采样; 网络覆盖率

引用格式: 张彤, 马欣媛, 赵太飞. 基于垂直采样的水下三维传感网覆盖算法. 计算机系统应用, 2019, 28(2): 125-131. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6768.html>

Underwater 3D Sensor Network Coverage Algorithm Based on Vertical Sampling

ZHANG Tong¹, MA Xin-Yuan², ZHAO Tai-Fei²

¹(Faculty of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

²(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to solve the problem of low coverage rate when nodes are deployed randomly in underwater three-dimensional (3D) sensor networks, an underwater 3D sensor network coverage algorithm based on vertical sampling is designed to improve the coverage and connectivity of underwater 3D sensor network. The coverage algorithm of underwater 3D sensor network based on vertical sampling firstly samples the 3D monitoring area in vertical plane, and then samples the plane in a straight line, which transforms the coverage problem of 3D space into the optimal problem of linear coverage. From the local to the whole, the goal of optimizing the coverage of the whole 3D network is achieved. The simulation results show that in the 100 m×100 m×100 m 3D monitoring area, the vertical sampling algorithm can increase the coverage by about 4%~28% compared with the 3D random deployment strategy, and the maximum degree of increase is obtained when the number of nodes is 40.

Key words: water environment; sensor network; coverage algorithm; vertical sampling; network coverage

引言

水环境对于人类来说较为恶劣, 很难通过传统的人工部署方式在水域中进行大规模的资源勘测和开发

等活动, 依靠技术手段来对水环境进行探索这一方式已达成普遍共识^[1,2]. 因此, 水下无线传感网的研究成为目前的研究热点之一^[3]. 水下传感器网络在水质监测、

① 基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目 (17-JF024); 陕西省水利科技项目 (2016s1kj-30)

Foundation item: Scientific Research Program of Education Bureau, Shaaxi Province (17-JF024); Hydraulic Science and Technology Program, Shaaxi Province (2016s1kj-30)

收稿时间: 2018-07-16; 修改时间: 2018-08-09, 2018-08-30; 采用时间: 2018-09-18; csa 在线出版时间: 2019-01-28

地理信息采集、灾难预防、军事领域应用等方面均具有广泛的应用前景^[4-9]。

覆盖问题是研究无线传感器网络的基本问题。近年来,国内外有很多比较成熟的覆盖算法。Zou Y 等人^[10]最先提出了一种集群分布式的虚拟力覆盖算法和一种新的概率目标定位算法,用于提高传感器节点初始部署后的覆盖率。黄俊杰等人^[11]提出三维水下传感网络覆盖优化算法,利用虚拟力覆盖算法消除网络中的覆盖重叠区和覆盖盲区,进而提高整个区域的覆盖率。杜晓玉等人^[12]提出了一种基于虚拟势场的定向移动的覆盖优化算法,该算法对网络中节点位置进行微调,多次迭代后节点位置达到稳定,实现网络的优化覆盖。王兴民等人^[13]提出一种基于连通树的水下传感网络覆盖算法,由汇聚节点开始构建多个连通子树将网络组织成森林保证网络连通,通过减小每棵树内父子节点间覆盖冗余以达到提升整个网络覆盖率的目的。王雪等人^[14]提出一种无线传感网布局的虚拟力导向微粒群算法,结合虚拟力与微粒群算法的优点,在提高网络覆盖率的同时减少算法耗时。

现有的文献中对水环境二维传感网覆盖问题研究较多,对水下三维传感网问题研究较少^[15]。本文设计一种基于垂直采样的水下三维传感网覆盖算法(Underwater 3D sensor network coverage algorithm based on Vertical Sampling, UVS),先对三维监测区域进行平面采样,将三维传感网覆盖问题转化为二维异构传感网覆盖问题,再对二维平面进行直线采样,将二维的覆盖问题转化为一维直线的覆盖问题,目的是在传感器节点耗能最少的情况下将采样直线更多覆盖,最终达到提升三维区域传感网的覆盖率。

1 垂直采样算法网络模型

网络由3部分构成,包括水下感知节点、锚和水面通信节点构成,如图1所示。网络初始时,由飞机或船舶将感知节点、锚和通信节点抛洒到监测区域。抛洒后锚位置固定,防止传感器因为海水流动和风力因素偏离目标区域,从而降低目标区域的覆盖率。由于初始时节点被锚定,所以假设传感器节点只能在竖直方向上运动,不能在水平方向上运动。然后根据部署算法计算出浮标距离传感器节点缆绳的长度,利用控制电机调节绳索长度,达到调节传感器节点位置的目的^[16]。

由于在水环境中无线电波衰减严重,采用无线电

波通信需要加装很长的接收天线,并且通信时的能耗非常大,不适用于水下传感网这种稀疏环境。如果采用激光通信的方式,不仅对节点间对准程度要求非常高,而且水环境的浊度对激光通信的影响也很大。而声波通信虽然传播速度不及以上两种通信方式,但是在水中传播的衰减小、传播距离长^[17]。综上,考虑到水环境传感网的这种稀疏环境采用声学通信的方式。

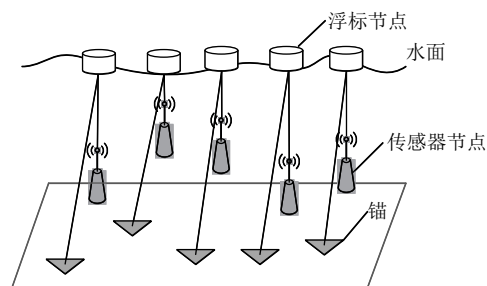


图1 三维水下传感网模型

该网络具有如下特点:

(1) 网络分为水面通信节点和水下感知节点两部分。水下感知节点包括浊度传感器、余氯传感器、PH值传感器等,负责对水质参数进行监测;水面通信节点负责与基站进行通信;水下感知节点通过电缆与水面通信节点相连,并可以进行通信。

(2) 节点抛洒在监测区域后,感知节点只能在竖直方向上运动,不能在水平方向上运动。

(3) 传感器节点加速度为零,即节点运动时做匀速直线运动,节点到达稳定状态时速度瞬间为零。

(4) 传感器节点同构,采用布尔感知模型,节点的通信半径 R_c 为感知半径 R_s 的2倍,每个节点与基站间至少存在一条通信链路。

2 基于采样的三维水下传感网部署算法

三维监测区域传感器节点分布如图2所示,图中球体为传感器节点的感知范围。

由于对三维空间水平平面采样求解困难,采用对垂直平面采样的方式进行网络的覆盖优化。首先对三维监测区域在垂直方向进行平面采样,如图3所示,图中圆形为采样平面与感知球体相交得到的截面。图3(a)中,矩形EFGH为三维监测区域中与 xz 轴平行的一个垂直采样平面,平面方程为 $y=y_0$ 。图3(b)中,矩形EFGH为三维监测区域中与 yz 轴平行的一个垂直采样平面,平面方程为 $x=x_0$ 。虽然感知球体同构,但由于球心距采

样平面的距离不同, 所以感知球体与采样平面相交的圆的大小不同, 采样截面可以看作平面异构传感网。

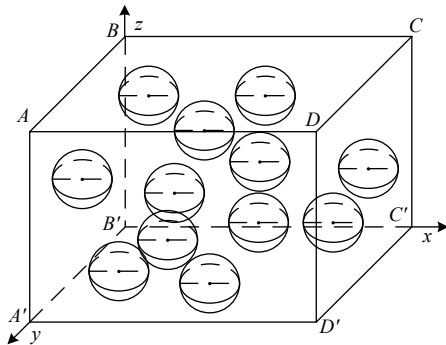
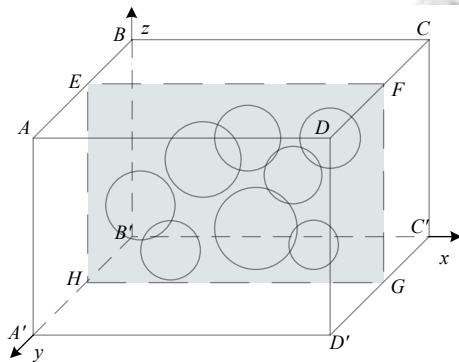
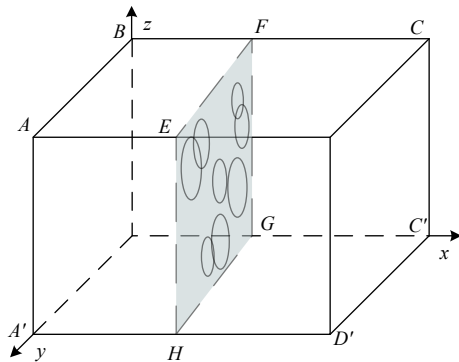


图2 三维空间传感器节点分布示意图



(a) 采样平面与xz轴平行



(b) 采样平面与yz轴平行

图3 三维空间垂直采样示意图

如图4所示, 矩形EFGH为三维监测区域中的一个垂直截面. MN为截面中一条平行于z轴的直线. 图中, $(s_1, s_2, s_3, \dots, s_n)$ 是与直线MN相交的n个异构感知圆, 代表n个水下传感器节点. 对应三维空间中感知圆球的圆心坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 如图5所示, 感知圆球与采样平面相交的感知圆的半径为:

$$r_i = \sqrt{R^2 - (y_0 - y_i)^2} \quad (1)$$

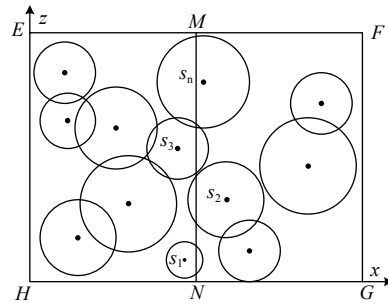


图4 垂直平面覆盖示意图

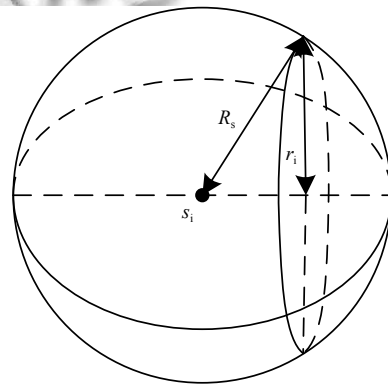


图5 感知圆球与采样平面相交示意图

如图6所示, 感知圆与采样直线MN相交的上交点纵坐标为 $z_{ih} = z_i + r_i$, 下交点的纵坐标为 $z_{il} = z_i - r_i$. 则感知圆 s_i 与直线MN的两个交点分别为 (x_0, z_{il}) 、 (x_0, z_{ih}) , 其中, $z_{il} < z_{ih}$. n个感知圆与采样直线相交所得的交点为 $(x_0, z_{1l}), (x_0, z_{1h}), (x_0, z_{2l}), (x_0, z_{2h}), (x_0, z_{3l}), (x_0, z_{3h}), \dots, (x_0, z_{nl}), (x_0, z_{nh})$. 感知圆与采样直线相交所得的线段可以表示为: $Z_1 = \{z | z_{1l} \leq z \leq z_{1h}\}, Z_2 = \{z | z_{2l} \leq z \leq z_{2h}\}, Z_3 = \{z | z_{3l} \leq z \leq z_{3h}\} \dots = \{z | z_{nl} \leq z \leq z_{nh}\}$.

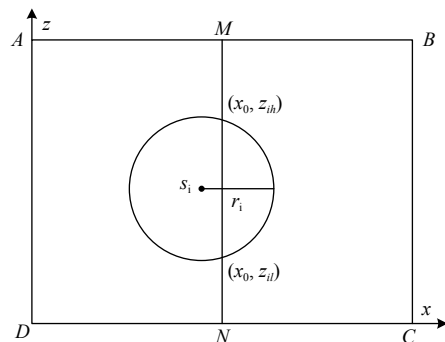


图6 感知圆与采样直线相交示意图

优化后感知圆与长度为 l 的采样直线 MN 相交的线段总长度 L 可表示为:

$$L = \sum_{i=1}^n (z_{ih} - z_{il}) \quad (2)$$

感知圆对直线的覆盖需分两种情况讨论: 第一种情况是感知节点移动后, 感知圆可将采样直线完全覆盖, 即 $L \geq l$. 第二种情况是感知节点移动后, 感知圆不能将采样直线完全覆盖, 即 $L < l$.

(1) 优化后感知圆可将采样直线完全覆盖. 如果优化后 n 个感知圆可将直线 MN 覆盖完全, 即感知圆与采样直线相交所得的线段集合的并集包含采样直线的线段集合 $X = \{0 \leq x \leq l\}$, l 是矩形监测区域的长度. 如果优化后直线 l 可被感知圆完全覆盖, 则每个感知圆 s_i 与直线 l 的下交点至少在另一个感知圆上交点的下边, 上交点至少在另一个感知圆下交点的上边. 式 (3) 为约束条件:

$$\begin{cases} \min(z_{1l} + \Delta d_1, z_{2l} + \Delta d_2, \dots, z_{nl} + \Delta d_n) < 0 \\ z_{2l} + \Delta d_2 < z_{1h} + \Delta d_1 \\ z_{3l} + \Delta d_3 < \max(z_{1h} + \Delta d_1, z_{2h} + \Delta d_2) \\ \vdots \\ z_{nl} + \Delta d_n < \max(z_{1h} + \Delta d_1, z_{2h} + \Delta d_2, \dots, z_{(n-1)h} + \Delta d_{n-1}) \\ \max(z_{1h} + \Delta d_1, z_{2h} + \Delta d_2, \dots, z_{nh} + \Delta d_n) > l \end{cases} \quad (3)$$

其中, Δd_i 表示第 i 个传感器移动的距离, l 为矩形区域的长度. 由于式 (3) 为非线性二次规划, 求解困难, 为方便求解, 依据感知圆位置顺序不变时, 对采样直线 l 完全覆盖所需移动距离之和小于改变顺序时移动的距离之和, 将非线性约束条件转化为线性约束条件进行求解.

根据部署算法优化之后, 感知圆可以完全覆盖采样直线, 约束条件转化为任意一个感知圆与采样直线 l 相交的下交点在上一个感知圆上交点的下边, 任意一个感知圆的上交点在下一个感知圆下交点的上边, 约束条件为:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n \Delta d_i^2 \\ z_{1l} + \Delta d_1 \leq 0 \\ z_{2l} + \Delta d_2 \leq z_{1h} + \Delta d_1 \\ z_{3l} + \Delta d_3 \leq z_{2h} + \Delta d_2 \\ \vdots \\ z_{nl} + \Delta d_n \leq z_{(n-1)h} + \Delta d_{n-1} \\ z_{nh} + \Delta d_n \geq l \end{cases} \quad (4)$$

(2) 优化后感知圆不能将采样直线完全覆盖. 如果优化后 n 个感知圆不能将直线 l 覆盖完全, 式 (4) 无解. 在这种情况下, 当感知圆互不相交时, 感知圆对采样直线的覆盖程度最大, 即任意一个感知圆与采样直线相交的下交点在上一个感知圆上交点的上边, 任意一个感知圆与采样直线相交的上交点在下一个感知圆下交点的下边, 约束条件为:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n \Delta d_i^2 \\ z_{1l} + \Delta d_1 \geq 0 \\ z_{1h} + \Delta d_1 \leq z_{2l} + \Delta d_2 \\ z_{2h} + \Delta d_2 \leq z_{3l} + \Delta d_3 \\ \vdots \\ z_{(n-1)h} + \Delta d_{n-1} \leq z_{nl} + \Delta d_n \\ z_{nh} + \Delta d_n \leq l \end{cases} \quad (5)$$

3 算法描述

三维水下传感器网络覆盖算法具体描述如下:

步骤 1. 设置监测区域范围 $L \times W \times H$ 、传感器节点个数 N 、感知半径 R_s 、通信半径 R_c 、采样次数、最大迭代次数;

步骤 2. 初始化网络, 随机部署传感器节点;

步骤 3. 对垂直平面进行平面采样, 依此判断每个感知圆球与采样平面是否相交, 如果相交, 则根据式 (1) 计算感知圆球与采样平面相交形成圆的圆心位置和圆的半径, 并保存;

步骤 4. 判断感知圆与采样直线相交的线段总和和 L 与采样直线长度 l 的大小关系, 若 $L \geq l$, 则根据式 (4) 计算新的节点移动位置, 若 $L < l$, 则根据式 (5) 计算新的节点移动位置;

步骤 5. 循环迭代, 当达到最大迭代次数时跳到步骤 6, 否则跳到步骤 3;

步骤 6. 算法结束.

4 算法仿真与性能分析

为了验证基于采样的水下三维传感网覆盖算法的有效性, 在 MATLAB 环境下对垂直采样算法进行仿真. 在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的三维监测区域随即部署若干传感器节点, 取节点感知半径 R_s 为 30 m , 应用基于垂直采样的水下三维传感网覆盖算法对传感器网络进行优化部署.

图7为节点数不同时覆盖率与采样步长的关系。当采样步长选取较小时,相邻两个采样平面、采样直线之间的距离较小,优化结果会互相影响,这样不仅会增加算法的运算量,而且对覆盖率还会造成负影响。当采样步长选取过大时,无法对整个监测区域的覆盖情况进行优化,同样覆盖率不能得到有效的提高。综合这两方面的因素考虑,选取采样步长为10米。

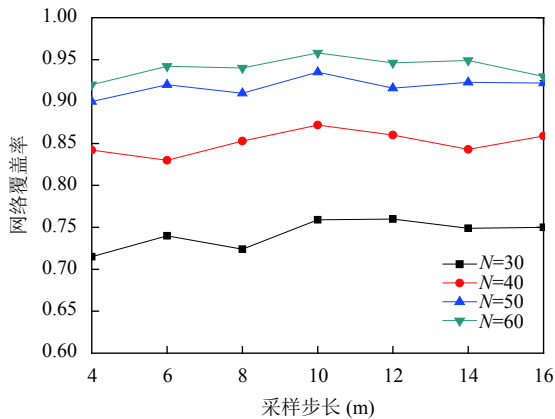


图7 覆盖率与采样步长的关系

图8为感知节点数不同时,随机部署与迭代两次的UVS算法的网络覆盖率的比较。从图中可以看出在节点数相同时,UVS算法可以显著地提高网络覆盖率。

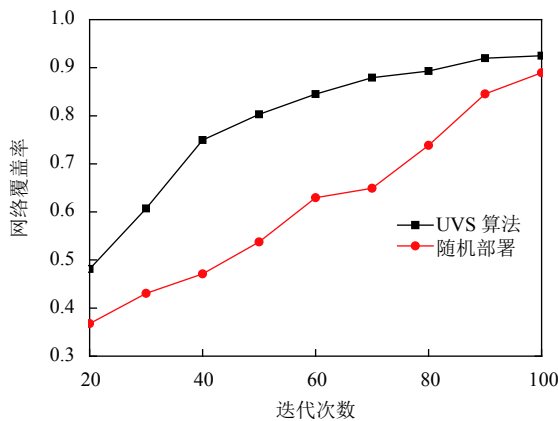


图8 覆盖率与节点个数的关系

图9为UVS算法与基于连通树的深度调节(Connected Tree Depth Adjust, CTDA)算法^[13]进行比较。UVS算法与CTDA算法模型相同,均为在水下三维空间中,传感器节点仅在垂直方向运动。其中,节点数均为50个,感知半径为30m。在迭代次数为3时,UVS算法的网络覆盖率为91%,CTDA算法的网络覆盖率为

83%。从图中可以看出,UVS算法的收敛速度比CTDA算法更快,并且覆盖程度比CTDA算法更好。

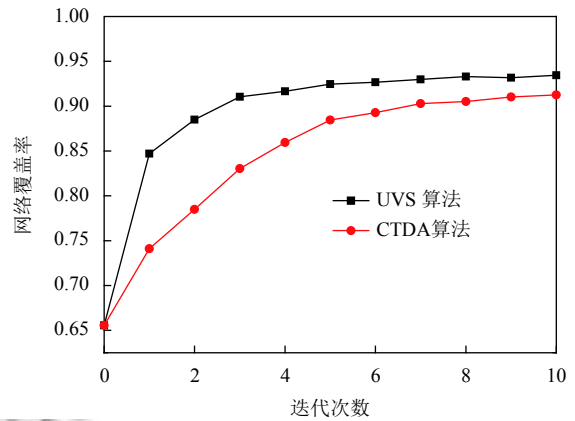


图9 UVS算法与CTDA算法对比

图10为节点感知半径不同时网络覆盖率随迭代次数的变化。其中,四条曲线的传感器节点数均为40个,采样步长为10m。考虑到节点的感知半径不定,如果采样步长也不定将无法对不同半径时的网络覆盖率进行比较,因此只考虑采样步长为10m的情况。在迭代次数为5时, $R_s=30$ 的覆盖率为76%, $R_s=40$ 的覆盖率为86%, $R_s=50$ 的覆盖率为91%, $R_s=60$ 的覆盖率为94%。从图中可以看出,在迭代次数相同时,感知半径越大覆盖率越大。在迭代次数为0到2时,UVS算法对网络覆盖率的提升效果最好,经过3次迭代之后,覆盖率只在小幅度范围内变化,说明算法的收敛速度很快。

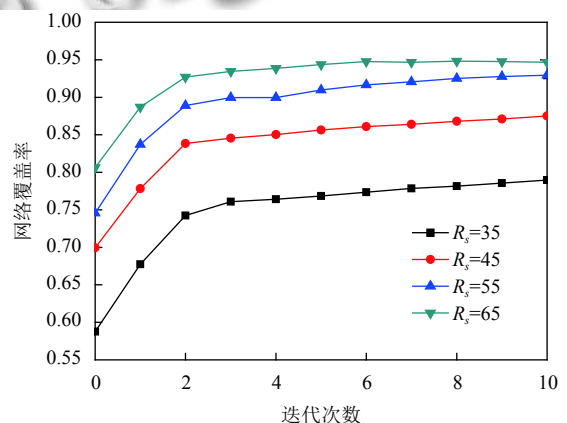


图10 感知半径不同时覆盖率与迭代次数的关系

图11为节点数不同时网络覆盖率随迭代次数的变化。其中,传感器节点的感知半径为30m,采样步长为10m。在迭代次数为5时, $N=30$ 的覆盖率为77%,

$N=40$ 的覆盖率为 86%, $N=50$ 的覆盖率为 92%, $N=60$ 的覆盖率为 96%。从图中可以看出, 在迭代次数相同时, 节点数量越多网络覆盖率越大。迭代次数从 0 增加到 2 时, 网络覆盖率增长得最快, 随着迭代次数的增加网络覆盖率先快速增长然后趋于平稳, 经过 3 次迭代网络就已经能到达较好的覆盖率。当迭代次数大于 3 时, 覆盖率只在小范围内变化。

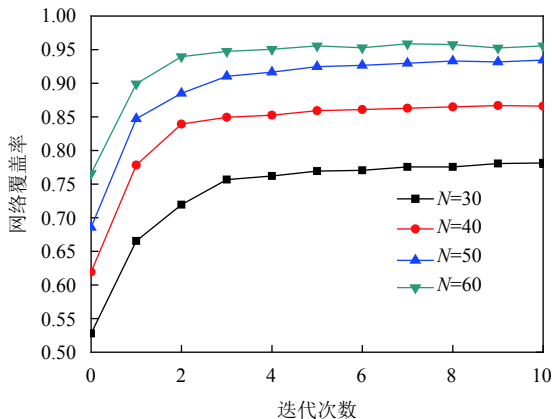


图 11 节点数不同时覆盖率与迭代次数的关系

图 12 为节点平均移动距离随迭代次数增长的变化, 算法每迭代一次会更新传感器节点的位置信息, 传感器节点移动到算法每次迭代后优化的位置。从图中可以看出, 算法前两次迭代节点移动距离较大, 从第三次迭代开始随着迭代次数增加节点移动距离减少, 并且变化不大。可以看出算法前两次迭代的效果最明显, 说明算法收敛速度很快。

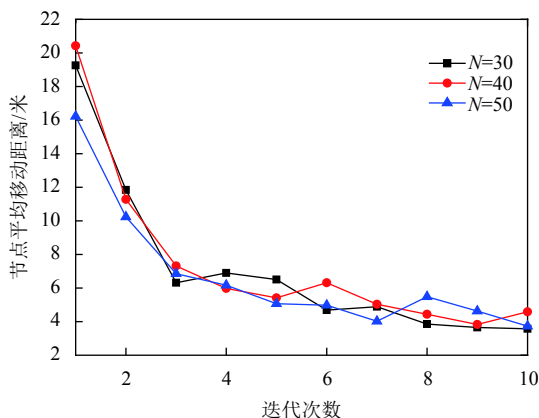


图 12 节点平均移动距离与迭代次数的关系

5 结束语

针对水环境传感器节点随机部署时产生覆盖空洞

和覆盖冗余并且覆盖率较低的问题, 本文采用一种基于采样的水下三维传感网覆盖算法。通过对基于垂直采样的水下三维传感网覆盖算法进行仿真, 对节点个数、节点半径与覆盖率的关系进行分析, 得出以下结论:

(1) 与随机部署策略相比, 基于采样的水下三维传感网覆盖算法可以显著提高网络覆盖率。与 CTDA 算法相比, UVS 算法的收敛速度更快, 并且覆盖程度比 CTDA 算法更好。

(2) 在传感器节点数一定而节点感知半径不同时, 随着迭代次数增加, 网络覆盖率先快速增加然后趋于平稳。在感知半径不同而节点数相同时, 感知半径越大覆盖率越大。在迭代次数为 0 到 2 时, UVS 算法对网络覆盖率的提升效果最好, 经过 3 次迭代之后, 覆盖率只在小幅度范围内变化, 说明算法的收敛速度很快。

(3) 算法前两次迭代节点移动距离较大, 从第三次迭代开始随着迭代次数增加节点移动距离减少, 并且变化不大。

针对水下三维传感网覆盖问题, 设计了基于垂直采样的水下三维传感网覆盖算法, 下一步将考虑降低网络的能耗。

参考文献

- 李岩. 我国的水环境现状研究. 科技风, 2016, (18): 139.
- 杜晓玉. 面向水环境监测的传感网覆盖算法研究[博士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
- Karjee J, Jamadagni HS. Information estimation with node placement strategy in 3D wireless sensor networks. IETE Journal of Research, 2017, 63(4): 523-535. [doi: 10.1080/03772063.2017.1299044]
- Kim D, Cano JC, Wang W, et al. Underwater wireless sensor networks. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014, 2014: 860813.
- Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330. [doi: 10.1016/j.comnet.2008.04.002]
- Huang CF, Tseng YC. The coverage problem in a wireless sensor network. Mobile Networks and Applications, 2005, 10(4): 519-528. [doi: 10.1007/s11036-005-1564-y]
- 刘丽萍, 王智, 孙优贤. 无线传感器网络部署及其覆盖问题研究. 电子与信息学报, 2006, 28(9): 1752-1757.
- 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
- 李世伟, 王文敬, 张聚伟. 基于潜艇深度的水下传感器网络

- 部署. 传感技术学报, 2012, 25(11): 1613–1617. [doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.011.026]
- 10 Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces. IEEE INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. San Francisco, CA, USA, 2003: 1293–1303.
- 11 黄俊杰, 孙力娟, 王汝传, 等. 三维水下传感器网络覆盖优化算法. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2013, 33(5): 69–74.
- 12 杜晓玉, 孙力娟, 郭剑, 等. 异构无线传感器网络覆盖优化算法. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 696–702.
- 13 王兴民. 水下传感器网络覆盖控制算法研究[硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.
- 14 王雪, 王晟, 马俊杰. 无线传感网络布局的虚拟力导向微粒群优化策略. 电子学报, 2007, 35(11): 2038–2042. [doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2007.11.002]
- 15 李享, 李轩涯. 基于虚拟力的三维部署技术研究. 科学技术与工程, 2013, 13(9): 2412–2420. [doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2013.09.020]
- 16 Detweiler C, Doniec M, Vasilescu I, *et al.* Autonomous depth adjustment for underwater sensor networks: Design and applications. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(1): 16–24. [doi: 10.1109/TMECH.2011.2175003]
- 17 郭忠文, 罗汉江, 洪锋, 等. 水下无线传感器网络的研究进展. 计算机研究与发展, 2010, 47(3): 377–389.