

# 基于粒子群算法的弹性水声通信网络拓扑优化

林温敏<sup>1,2</sup>, 陈东升<sup>1,2</sup>, 郝帅峰<sup>1,2</sup>, 童峰<sup>1,2\*</sup>, 陶毅<sup>1,2</sup>

(1. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361102; 2. 导航与位置服务技术国家地方联合研究中心  
(厦门大学), 福建 厦门 361102)

**摘要:** [目的] 为应对水声网络因信道传输条件差、时延长、能量严重受限, 易出现网络节点通联质量不平衡、节点异常失效等问题导致的网络弹性差, 对提高水声网络, 特别是含汇聚节点网络的弹性问题进行研究。[方法] 在浅海水声信道多径传输条件及复杂海洋环境节点异常失效的情况下, 本文以提升网络弹性作为目的, 从网络拓扑结构优化的角度, 提出了一种基于粒子群的弹性水声网络拓扑优化算法。该算法以网络的覆盖率和连通率为约束条件, 综合考虑包括网络弹性指标在内的多项网络性能指标, 旨在通过拓扑优化提升水声网络性能的同时保证网络弹性。[结果] 仿真实验结果表明, 网络拓扑结构经所提算法优化后, 网络通信投递率有所提升, 在节点随机异常失效的情况下, 其网络仍能保持覆盖率和连通率优于其他部署算法。[结论] 本文模型和算法部署的水声网络具有很好的网络弹性, 能有效应对海洋环境下网络节点随机失效的问题。

**关键词:** 水声网络; 网络弹性; 汇聚节点; 拓扑优化; 粒子群

中图分类号: TN 929.3

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)04-0660-09

## Topology optimization of resilient underwater acoustic networks based on particle swarm optimization

LIN Wenmin<sup>1,2</sup>, CHEN Dongsheng<sup>1,2</sup>, HAO Shuaifeng<sup>1,2</sup>, TONG Feng<sup>1,2\*</sup>, TAO Yi<sup>1,2</sup>

(1. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center for Navigation and Location Service Technology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**Abstract:** [Objective] Compared with wireless networks, underwater acoustic networks (UAN) are severely limited by factors such as poor channel transmission conditions, long delay, and severe energy constraints. These factors can lead to uneven node connectivity quality, abnormal node failures and other problems, resulting in great fluctuations in network performance and poor network resilience. To address this issue, research is being conducted on improving the resilience of aquatic networks, especially those with aggregation nodes. [Methods] We start from the optimization of network topology, with the goal of effectively enhancing network resilience under various constraints. A topology optimization algorithm for resilient underwater acoustic networks based on particle swarm optimization is proposed. Then, network coverage and connectivity are taken as constraints, and multiple network performance indicators are comprehensively considered to improve network performance while the network resilience is ensured. [Results] Simulation results show that the UAN topology structure after optimization by the proposed algorithm has improved the network communication delivery rate. In the case of random node failure, the proposed algorithm outperforms other deployment algorithms in terms of the coverage and the connectivity of the network. [Conclusion] The UAN deployed by the model and algorithm in this article has good network resilience and can effectively cope with the problem of random node failures in marine environments.

**Keywords:** underwater acoustic networks; network resilience; sink node; topology optimization; particle swarm

收稿日期: 2024-08-24 录用日期: 2025-02-09

引文格式: 林温敏, 陈东升, 郝帅峰, 等. 基于粒子群算法的弹性水声通信网络拓扑优化[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(4): 660-668.

Citation: LIN W M, CHEN D S, HAO S F, et al. Topology optimization of resilient underwater acoustic networks based on particle swarm optimization[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(4): 660-668. (in Chinese)



水声网络通过接发声信号的方式实现多个水下节点互联互通,从而大大提高海洋信息的获取与传输效率,在海洋的资源探测、数据采集以及军事领域等方面均有着广泛应用.建立水声网络的拓扑结构,是建立水声网络的第一步,其设计的优劣影响着网络的整体通信性能和可靠性.网络的弹性,即网络在面对各种故障和正常运行的挑战时提供和维持可接受服务水平的能力<sup>[1]</sup>,是近年来网络可靠性研究的一个新方向. Hosseini 等<sup>[2]</sup>将弹性的评估方法分为定性和定量两大类,按照不同的容错机理,可以将弹性评估分为基于结构和拓扑的弹性评估和基于性能的弹性评估.其中,基于结构和拓扑的弹性评估主要通过通过对网络物理层拓扑的鲁棒性和容侵性进行建模,然后基于模型分析网络弹性<sup>[3]</sup>.在水声通信中,由于水下环境复杂多变,节点电池更换困难,且洋流流动、水下生物的接触以及自然灾害<sup>[4]</sup>等影响因素的存在,使得水声网络性能起伏严重,网络弹性逐渐成为水声传感器网络拓扑优化研究中一个需要重点考虑的性能.

在拓扑结构的研究中:针对二维和三维网络结构, Pompili 等<sup>[5]</sup>提出了一种三角网格部署算法,使用最少的传感器数量来实现最优的目标感知和通信覆盖,并通过部署冗余节点来提高网络在节点故障时的鲁棒性.但其只提供了所需冗余传感器的数量估计,且随着观测事件的增加,需要在水中部署更多的节点,部署成本大. Su 等<sup>[6]</sup>提出一种基于 Voronoi 的优化深度调整部署方案,通过建立 Voronoi 图,减少节点之间的覆盖重叠,使网络获得更高的覆盖率,同时帮助网络获得更长的寿命.此外,还有许多基于深度调节的水下节点部署算法<sup>[7-9]</sup>,但均较少考虑节点故障导致网络性能起伏的问题,即网络弹性问题.

拓扑优化问题一般被认为是 NP-难问题,智能算法在近似求解 NP-难问题上具有显著优势,大部分智能算法为模拟自然过程的算法,如粒子群、蚁群、遗传算法等,其能够较大程度避免局部最优解,提高找到全局最优解的概率,且能够简化问题模型,尤其适用于多目标优化.因此近年来,越来越多水声网络拓扑优化的研究与智能算法相结合.比如: Du 等<sup>[10]</sup>提出一种粒子群启发的传感器自部署算法,该部署算法可以使水声无线传感器网络有效实现某区域的探测目的; Sun 等<sup>[11]</sup>提出了一种虚拟力和粒子群优化的组合部署算法,能有效提高网络的覆盖率,避免覆盖空洞; Yi 等<sup>[12]</sup>采用了一种改进的贪婪算法,在水下目标分布不规则的情况下,有效保证了水声通信网络的覆盖性能和连通性; Dong 等<sup>[13]</sup>针对具体的应用场景,受磷虾觅食

行为启发,提出一种应用于分布式水声网络的节能传感器部署策略,该策略以降低能耗为目标,同时考虑覆盖阈值以提高收敛性,以最小的能量消耗实现最优覆盖.

目前关于水声网络拓扑优化的研究大都旨在提高网络的连通性、覆盖率以及通信性能(比如带宽、延迟、抖动等),相比而言,无线网络在网络弹性上的研究则更成熟.在水声网络中,传播介质多为海洋,复杂的海洋环境、界面条件以及传播特性使得水声网络与无线网络的网络模型有较大差异,但二者均为通信系统,水声网络的研究依旧可以借鉴无线网络中的研究思路.

无线网络中面向森林监测、灾害管理等场景,开展了一系列使用拓扑控制提高网络弹性的研究<sup>[14]</sup>.在无线网络中,一般使用指标  $k$  定量指示网络弹性,如果网络最多可以容忍  $k-1$  个节点故障,并且最终网络仍然是连通的,则该网络称为  $k$ -连通网络.许多提高通信网络弹性的研究,都是通过建立  $k$ -连通网络提高网络弹性<sup>[15-16]</sup>.在研究网络的  $k$ -连通时,通常会考虑到一个问题,即一个节点要多少个邻居(或节点度)才能使整个网络  $k$ -连通<sup>[14]</sup>.即考虑  $k$ -连通以提高网络弹性,实际上可以认为在考虑节点度.而另一种用于抵抗随机失效的一个有效方法是引入无标度网络特性<sup>[17]</sup>,无标度网络是节点度分布(近似)为幂律分布的网络模型.在水声网络中,也有引入无标度特性以提高网络容错的研究<sup>[18]</sup>.

但当网络结构为有汇聚节点的网络模型时,考虑节点的度或者  $k$ -连通,并不能很好反映网络特性.这是因为,当网络中的某一节点与汇聚节点失去连接后,该节点在某种程度上已经脱离网络,而原先通过该节点与汇聚节点相连的节点若没有其他路径到达汇聚节点,也将随之脱离网络,此时使用指标  $k$  就难以定量分析网络的弹性.同样地,由于汇聚节点网络中,节点的重要性并不相同,因此简单地考虑节点的度或者平均度,也难以提升网络的弹性,需要进一步构建新的适合的网络模型进行弹性分析<sup>[14]</sup>.

综上,本文以受海洋环境随机因素影响下提升水声网络弹性为目的,借鉴无线网络中的相关思路,构建汇聚节点网络模型,提出基于粒子群的弹性水声网络拓扑优化算法设计(Particle swarm optimization-resilience, PSO-r),并开展仿真验证工作.

## 1 模型介绍

### 1.1 感知及覆盖模型

#### 1.1.1 感知模型

本文主要考虑二维水下传感器网络,网络感知模

型采用经典圆盘模型,其示意图如图 1 所示.

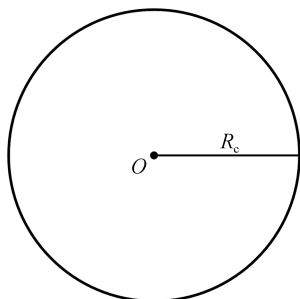


图 1 圆盘感知模型  
Fig. 1 Disk-based perception model

在某一平面上,以传感器节点为圆心,  $R_c$  为半径的圆区域内,信号被感知的概率为 1,若有节点  $B$  在节点  $A$  的感知区域内,认为两节点连通;此区域外的感知概率为 0,若节点  $B$  在节点  $A$  的感知区域外,认为两节点无法连通.用  $C_{i,j}$  表示两节点  $i,j$  之间是否连通,根据上述模型,节点间连通关系的表达式为

$$C_{i,j} = \begin{cases} 1, & d(i,j) \leq R_c, \\ 0, & d(i,j) > R_c, \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $d(i,j)$  表示节点  $i,j$  之间的欧式距离,  $R_c$  表示节点的感知半径.在汇聚节点网络中,保证节点的全连通性是首要目标,网络中所有普通节点需保证能与汇聚节点直接或多跳连通.只有保证了连通性,才能确保网络能够正常运行,后续的覆盖率等指标才有意义.

通过式(1)可知网络中任意两节点之间的连通关系,可进一步通过该关系得到各节点是否能够直接或多跳与汇聚节点连通,更新式(1).若要满足网络的全连通性,则需满足式(2):

$$\sum_{i=1}^N C_i = N, \quad (2)$$

其中,  $C_i$  表示节点  $i$  与汇聚节点之间的联通关系,  $N$  表示网络中除汇聚节点外的节点总数.

### 1.1.2 覆盖模型

将目标区域划分为若干个网格,假设除汇聚节点外,所有普通节点均部署在网格点上,根据上述感知模型,则可根据每个节点覆盖的网格数计算出所生成的拓扑结构对应的覆盖率.

在常规算法中,若网格的四个顶点均被覆盖,则认为该网格被覆盖.如图 2(a)所示,在位置  $A$  和位置  $B$  各有一传感器,对于图中阴影标出的网格,其四个顶点均在传感器节点的覆盖范围内,则认为网格被覆盖.但是实际上,传感器  $A$  和  $B$  的覆盖范围并未重叠,

即网格中存在部分区域实际未被传感器节点覆盖,此时在实际通信中就会发生覆盖空洞的问题.

为避免该情况,本文采用另一种覆盖率计算方法,即当至少一个传感器同时覆盖网格的四个顶点时才认为该网格被覆盖,否则认为该网格未被覆盖<sup>[19]</sup>,其示意图 2(b) 如所示.

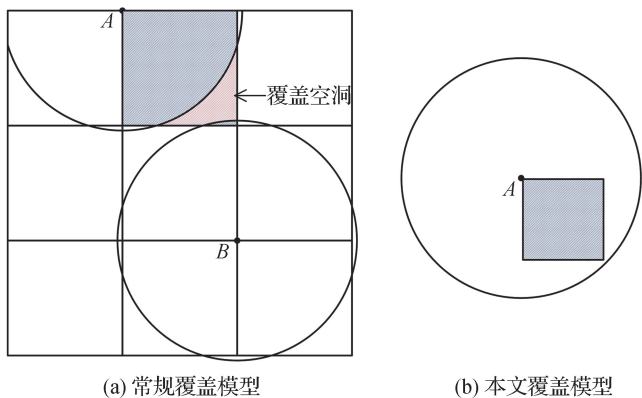


图 2 覆盖模型  
Fig. 2 Coverage model

根据上述覆盖模型,网络的覆盖率可按式(3)计算.其中,  $r_{cov}$  表示覆盖率,  $g_{suc}$  表示有效覆盖的网格数,  $g$  表示目标区域网格总数.

$$r_{cov} = \frac{g_{suc}}{g} \times 100\%. \quad (3)$$

## 1.2 汇聚节点网络模型

当网络中存在一汇聚节点时,网络中所有普通节点传输数据的最终目的地均为该汇聚节点,若某个或某几个节点无法通过单跳或多跳与汇聚节点连通,则认为该普通节点对于网络而言已经失效.如图 3,图中节点 5、6、7 虽然互相连通,但均无法与汇聚节点连通,则认为节点 5、6、7 对于网络而言均为失效节点.

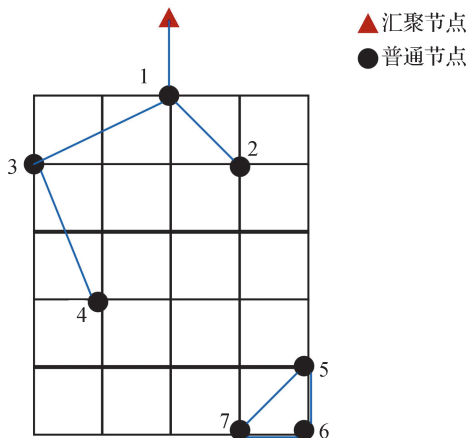


图 3 汇聚节点网络模型  
Fig. 3 Sink node network model

在汇聚节点网络模型中,由于汇聚节点的存在,使得各普通节点的重要程度有所不同.一般而言,越靠近汇聚节点,其重要程度越高.在如图 3 所示的网络中,节点 1 为各节点与汇聚节点连通的必经节点,其重要程度远大于其他节点.为表示各节点在汇聚节点网络中的重要程度,引入节点介数的概念.

节点介数定义为网络中所有最短路径中经过该节点的路径数目占最短路径总数的比例.若节点中某一节点的介数较大,表明该节点相对于其他节点的重要程度更高.若网络中存在  $N$  个节点(包括汇聚节点),参照文献[20],节点介数  $B_i$  为

$$B_i = \sum_{j \neq k, j=1}^{N-1} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (4)$$

其中:  $n_{jk}$  表示节点  $j, k$  之间的最短路径个数;  $n_{jk}(i)$  表示节点  $j, k$  之间的最短路径中,经过节点  $i$  的个数;  $k$  始终为汇聚节点.

在复杂的海洋环境下,当网络中存在如节点 1 这样的节点时,若节点 1 异常失效,会导致水声网络性能发生严重起伏,这通常意味着网络的容错性较低,弹性较差.若要提高该网络模型的网络弹性,则各普通节点的重要程度应较为相当,才能较大程度上避免由于某个节点失效导致网络性能大幅降低的问题.

综上,为提高网络弹性,本文的优化目标之一为最小化节点介数的标准差.

### 1.3 传播模型

传播损失模型采用 Bellhop 水声传播模型<sup>[21]</sup>. Bellhop 模型依据高斯波束射线跟踪法,计算水平非均匀环境的声场,从而在海洋环境中预测声压.

在通信网络中,一般而言,若链路有较高的信噪比,其对应的误码率就会较低,根据声呐方程,可知信噪比  $R_{SN}$  为

$$R_{SN} = L_S - L_T - L_N + I_D, \quad (5)$$

其中,  $L_S$  为声源级,  $L_T$  为传播损失,  $L_N$  为环境噪声,  $I_D$  为指向性指数.在确定声源发射功率后,信噪比主要取决于传播损失以及环境噪声,因此本文考虑最小化通信网络的平均传播损失,进而提高网络的通信性能.网络平均传播损失  $L_{ave}$  计算公式如下:

$$L_{ave} = \sum_{i,j=1}^N (L_{i,j}) / n_{link}, \quad (6)$$

其中,  $L_{i,j}$  表示可通信的发送节点  $i$  和接收节点  $j$  之间的传播损失,  $n_{link}$  表示网络可通链路的总数.节点之间的传播损失由 Bellhop 模型获得.

综上,为提高网络的性能,本文的优化目标之一为最小化式(6).

### 1.4 故障模型

网络中,将故障建模为节点和链路的移除.水下节点受海洋环境随机因素影响,会异常失效.在故障模型中随机删除若干个节点及其对应链路,以此来模拟水下节点异常失效的情况.

## 2 PSO-r 算法介绍

粒子群 (particle swarm optimization, PSO) 算法<sup>[22]</sup>通过模拟鸟类觅食行为,利用每个粒子的信息共享找到最优解.粒子群算法作为典型的智能算法,算法通用性强,原理简单,容易实现,其算法复杂度为  $O(N \times M)$ ,  $N$  为粒子数目,  $M$  为迭代次数,因而其收敛速度较快,算法复杂度低.在多个研究工作中被应用于水声网络优化.其算法流程如图 4 所示.本文的 PSO-r 算法基本参照传统应用于水声网络优化的 PSO 算法框架,但为了提升网络弹性,PSO-r 在适应度函数中还引入节点介数标准差来表征网络的弹性.

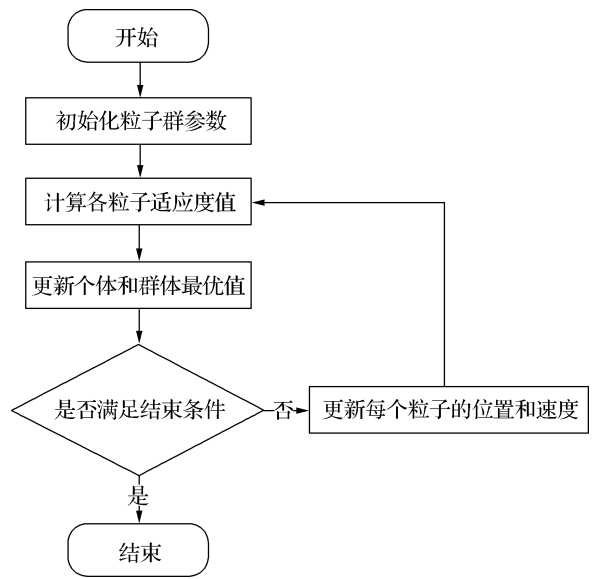


图 4 粒子群算法流程

Fig. 4 Flow of particle swarm optimization

### 2.1 基本原理

PSO 算法通过设计一种无质量的粒子来模拟鸟类,粒子的位置和速度为 PSO 算法中粒子的两个基本属性.在 PSO 中,无需对粒子进行编码,通过更新粒子自身的位置和移动速度来表示不同的粒子性质<sup>[23-24]</sup>.

假设在一个  $D$  维目标搜索空间内,种群规模为  $N$ ,其中第  $i$  个粒子表示为一个  $D$  维向量:  $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ .第  $i$  个粒子的速度也是

一个  $D$  维向量,表示为:  $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}), i = 1, 2, 3, \dots, N$ .

粒子会根据个体历史最优和全局历史最优来调整自身的速度和位置,而每个位置的优劣则由适应度值来决定,适应度值即为 PSO 算法的目标优化函数.

第  $i$  个粒子目前搜索到的个体最优位置记为  $\mathbf{P}_{ibest} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}), i = 1, 2, 3, \dots, N$ . 整个种群目前搜索到的全局最优位置记为  $\mathbf{g}_{best} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ .

在迭代过程中,粒子  $i$  的速度  $\mathbf{V}_i$  根据如下公式进行更新.

$$\mathbf{V}_i(k+1) = \omega \cdot \mathbf{V}_i(k) + c_1 \cdot r_1 (\mathbf{P}_{ibest}(k) - \mathbf{X}_i(k)) + c_2 \cdot r_2 (\mathbf{g}_{best}(k) - \mathbf{X}_i(k)), \quad (7)$$

其中:  $\omega$  表示惯性权重,通过改变惯性权重,以平衡收敛的全局性和收敛速度;  $c_1$  表示个体学习因子,  $c_2$  表示群体学习因子,一般两个学习因子取 2 左右的值;  $r_1$  和  $r_2$  为两个在  $[0, 1]$  之间的随机数,用于增加搜索的随机性,避免粒子陷入局部最优.

粒子  $i$  的位置  $\mathbf{X}_i$  更新公式如下:

$$\mathbf{X}_i(k+1) = \mathbf{X}_i(k) + \mathbf{V}_i(k+1), \quad (8)$$

其中,  $k$  表示第  $k$  次迭代.

## 2.2 PSO-r 适应度函数

适应度值为 PSO 算法的目标优化函数. 本文以提升水声网络通信性能及弹性为目的.

根据第 1 节所述模型,可知待优化的两个指标分别为点介数标准差和网络平均传播损失,以分别优化网络弹性及通信性能. 综上,将 PSO-r 适应度函数整理为式(9),指导粒子群进行移动,使输出目标为最优拓扑结构,具有较小的介数标准差和网络平均传播损失.

$$f = \alpha \cdot B_{std} + \beta \cdot L_{ave}, \quad (9)$$

其中,  $f$  表示适应度值,  $B_{std}$  表示节点介数标准差,  $L_{ave}$  表示平均传播损失,  $\alpha, \beta$  则分别表示  $B_{std}$  和  $L_{ave}$  在适应度函数中的权重.

由于  $B_{std}$  和  $L_{ave}$  的量级不同,因此在进行适应度值的计算之前,需要对其进行归一化处理. 此处采用的归一化方法如式(10),  $X_{norm}$  表示归一化后的数据,  $X$  表示待归一化的数据,  $X_{max}, X_{min}$  分别表示数据集的最大值和最小值.

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}. \quad (10)$$

## 2.3 约束条件

约束条件为算法中所需要满足的前提条件. 对于水声网络的拓扑优化而言,最重要的考虑因素就是

传感器网络的全连通性和覆盖率,因此本文将传感器网络的全连通性和覆盖率作为优化算法的约束条件.

文献[19]指出,在其设置的场景下,100% 覆盖率所需部署的网络节点数量要远大于 90% 覆盖率所需部署的网络节点数量. 而在现实情况下,传感器节点成本昂贵,100% 覆盖并不是必须的<sup>[19]</sup>,因此此处将覆盖率约束在 90% 以上. 在粒子群算法每进行一次迭代后,均要判断其生成的结构是否满足约束条件. 根据感知和覆盖模型,若需满足全连通性和目标覆盖率,则需满足式(2),同时满足式(3)大于 90%. 若输出的拓扑结构不满足约束条件,则设置适应度值为无穷大,表示该方案不可用,以达到约束目的.

## 3 仿真验证

### 3.1 场景设定

仿真基于 MATLAB 搭建水声通信网络,仿真环境为浅海海域. 仿真采用 Bellhop 声学模型构造浅海水声信道,浅海信道参数设置如表 1.

表 1 浅海属性设置

Tab. 1 Shallow sea property setting

| 参数                              | 设置    |
|---------------------------------|-------|
| 发射频率/Hz                         | 5 500 |
| 声源深度/m                          | 50    |
| 海域深度/m                          | 100   |
| 海底声速/ (m · s <sup>-1</sup> )    | 1 600 |
| 海底密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )   | 1.8   |
| 海底衰减系数/ (dB · λ <sup>-1</sup> ) | 0.8   |
| 海面形状                            | 正弦函数  |
| 海底地形                            | 平坦    |

注:  $\lambda$  为通信波长.

Bellhop 仿真 50 km 水平范围内声场传播损失如图 5 所示.

在浅海中,水平尺度远大于垂直尺度,因此开展二维层面上的仿真验证. 仿真中,将目标区域划分为网格,假设节点只能部署在网格点上. 仿真基本参数设置如表 2 所示. 在仿真水声网络中,将目标区域划分为若干个网格,其中水平步长即为网格边长. 适应度函数如式(9),  $\alpha, \beta$  的值通过实验结果来确定. 经过多次实验和调优,选择  $\alpha, \beta$  取值如表 2.

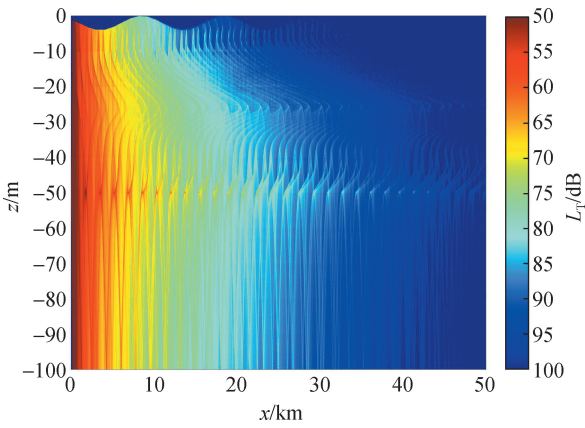


图 5 Bellhop 仿真信道传播损失

Fig. 5 Propagation loss of Bellhop simulation channel

表 2 仿真参数设置

Tab. 2 Simulation parameter setting

| 参数                     | 取值         |
|------------------------|------------|
| 节点数目/个                 | 15         |
| 汇聚节点位置(x,y,z)/m        | [11,5,-50] |
| 通信半径/m                 | 3 000      |
| 节点深度/m                 | 50         |
| 目标区域范围/km <sup>2</sup> | 10×10      |
| 水平步长/km                | 1          |
| 连通率                    | 100%       |
| 覆盖率                    | >90%       |
| 适应度函数权重[α,β]           | [0.5,0.5]  |

在保证网络全连通性的前提下,将所提算法与基于粒子群的虚拟力部署(记为 VF-PSO)<sup>[11]</sup>、粒子群优化部署(记为 PSO)<sup>[25]</sup>以及随机部署作对比,分析其结果.其中,VF-PSO 最早在无线网络中被提出<sup>[26]</sup>,可以改善虚拟力算法优化能力不足的问题,同时使粒子有效避免陷入局部最优解.近年,该算法也被应用于水声无线传感器网络的部署中<sup>[11,27]</sup>. PSO<sup>[25]</sup>则以声场传播损耗和网络运行寿命为目标函数,对水声网络拓扑结构进行优化.

本次仿真基于上述场景设定,主要从以下两方面进行验证分析.

网络的通信性能方面,从通信网络的投递率  $R_{PD}$  入手,分析比较不同部署算法的投递率,来反映网络的通信性能.投递率公式如下,

$$R_{PD} = \frac{c_{recv}}{c_{total}}, \quad (11)$$

其中  $c_{recv}$  表示节点接收的数据包数,  $c_{total}$  表示产生的数据包总数.本文分析了不同部署算法在不同部署节

点下以及不同负载情况下的投递率,来进行网络通信性能的分析比较.其中,负载在本文定义为网络中各节点平均每秒产生的任务数,或称每秒发送的数据包的数量.在本文的研究中,通过考量各节点的平均负载,能够有效消除网络规模因素对研究结果的干扰.这一处理方式可确保投递率的变动并非由网络规模的变化所引发,从而使研究结论更具可靠性.

网络弹性方面,弹性的目标是建立容错网络<sup>[14]</sup>,因此本文用节点随机异常失效后,网络的连通率和覆盖率的大小来反映网络的弹性.其中连通率为:当节点失效后,网络中仍能与汇聚节点相连通的节点数  $n_{suc}$  占网络所有节点数  $n$  的比例(式(12)).覆盖率,即节点失效后,网络仍能有效覆盖目标区域范围的占比(式(3)).

$$r_{con} = \frac{n_{suc}}{n} \times 100\%. \quad (12)$$

### 3.2 网络投递率验证

本文所提算法考虑通信网络的平均传播损失,以期提高水声通信网络的投递率,投递率计算式如式(11)所示.利用 Bellhop 仿真信道传播损失,考虑平均传播损失对节点间距离进行调整后,所提算法的网络投递率与 VF-PSO、PSO 部署算法的对比结果如图 6 所示.可见随着网络节点数目的增加,本文所提部署算法生成的拓扑结构,其通信的投递率高于 VF-PSO 部署算法,与 PSO 部署算法相近.这是因为在 PSO 算法中,其适应度值中也将节点间的传播损失考虑在内,因此在投递率方面,所提算法的结果与 PSO 较为相近.且两者均高于不考虑传播损失的 VF-PSO 算法.

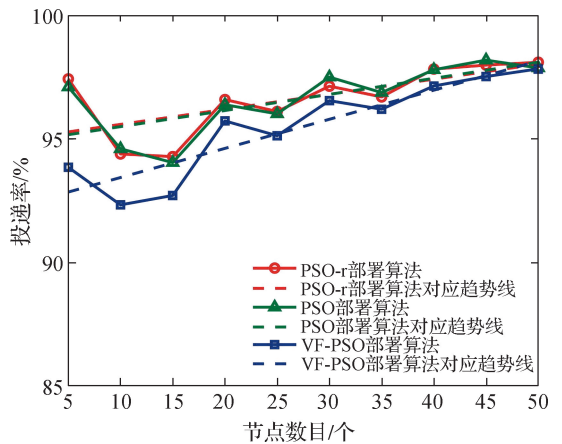


图 6 不同部署算法投递率随网络节点数变化对比

Fig. 6 Comparison of delivery rate of different deployment algorithms with the number of network nodes

随着网络负载的增加,网络的投递率必然会不断下降.但本文通过仿真结果(图 7)可知,本文所提

部署算法生成的拓扑结构,随着网络负载不断增加,其投递率依旧高于 VF-PSO 部署算法,与 PSO 部署算法相近.

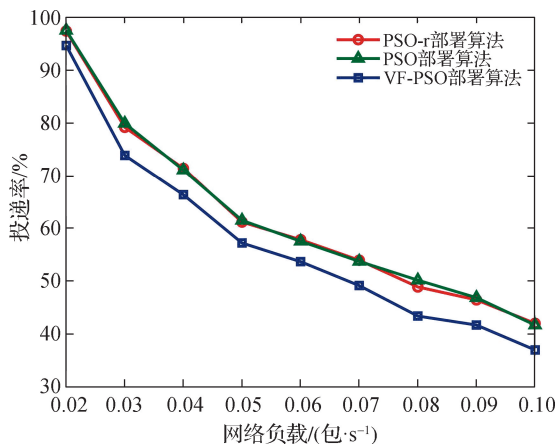


图 7 不同部署算法随网络负载变化的投递率

Fig. 7 Packet delivery rate of different deployment algorithms varies with network load

### 3.3 网络弹性验证

为了验证不同部署算法下网络的弹性,本文利用不同部署算法生成 15 节点时对应的水声网络拓扑结构,结果如图 8 所示. 然后让节点随机异常失效后,考

察网络的覆盖率和连通率随节点失效数目的变化,其计算公式如式(3)和(12)所示. 从图 8 中可知,随机部署中,网络的覆盖率看似较高,但是实际上许多节点无法真正与图中的汇聚节点连通,即节点无法正常通信,因此后续进行网络覆盖率计算时,计算的是有效覆盖率,即只有能够通过单跳或多跳到达汇聚节点的节点才为有效节点,其覆盖范围才计入网络覆盖率.

在如图 8 所示拓扑结构下,通过随机删除网络中的节点来模拟水下网络节点在复杂海洋环境条件下随机异常失效的场景. 将本文提出部署算法与 VF-PSO、PSO 部署算法以及随机部署作对比,得到不同部署算法下网络的连通率和覆盖率随失效节点数目变化曲线如图 9 和 10 所示.

由图 9 和 10 可知,本文所提优化算法生成的拓扑结构面对网络节点随机失效的情况时,其最后的连通率和覆盖率均高于其他对比部署.

当随机失效节点个数为 4 时,本文所提算法的网络连通率比 VF-PSO 提高了约 87%,相比 PSO 部署算法提高约 71%,相比随机部署提高约 93%;覆盖率较 VF-PSO 算法高约 95%,较 PSO 算法高约 68%,较随机部署高了约 89%,证明本文所提算法产生的拓扑结构有较高的随机容错性,网络的弹性更好.

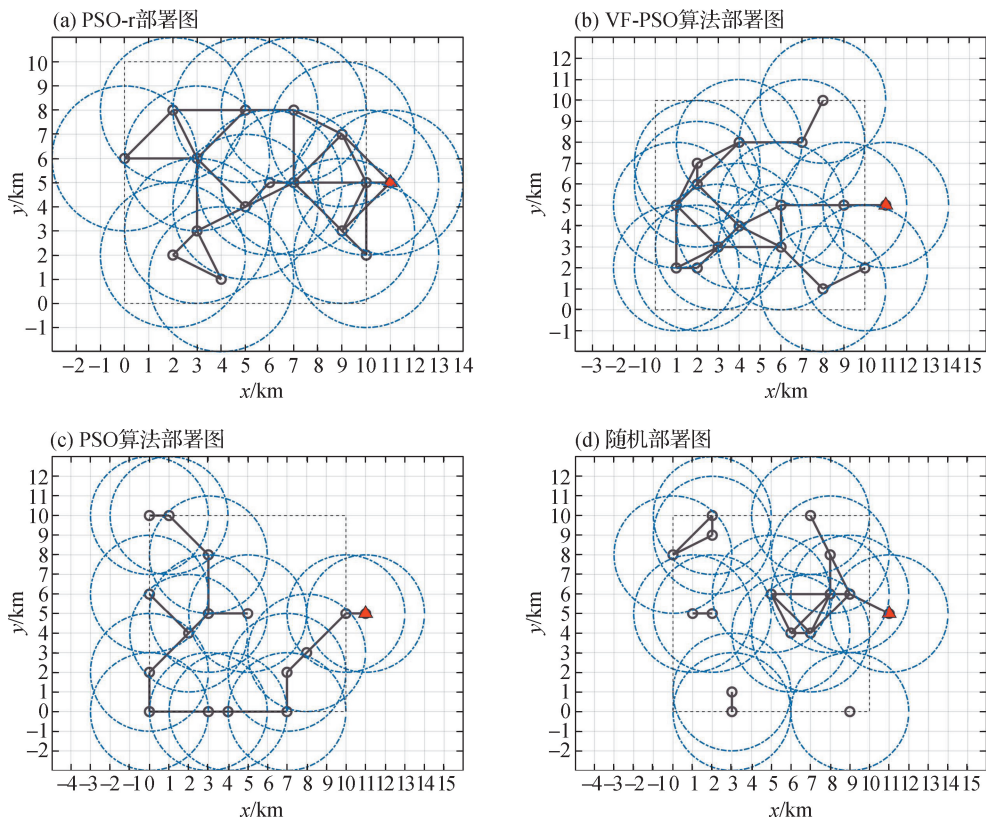


图 8 各部署算法拓扑结构

Fig. 8 Topology diagram of each deployment algorithm

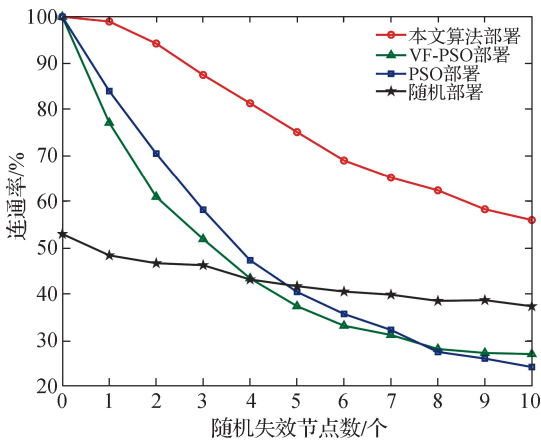


图 9 不同部署算法下网络经节点随机失效后连通率对比  
Fig. 9 Comparison of connectivity rates after random node failures under different deployment algorithms

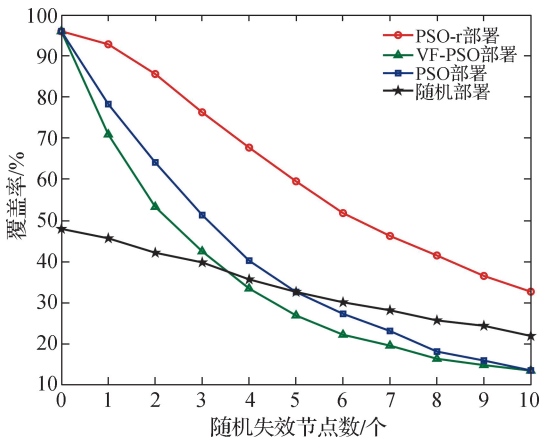


图 10 不同部署算法下网络经节点随机失效后覆盖率对比  
Fig. 10 Comparison of network coverage after random node failures in different deployment algorithms

随着随机失效节点数目的增加,可以看到,随机部署被攻击后的覆盖率和连通率高于 VF-PSO 和 PSO 算法。这是因为随机部署中,并没有保证连通率和覆盖率,部分节点在汇聚节点附近部署密集;而 VF-PSO 和 PSO 为了保证连通率和覆盖率,生成的拓扑结构中节点更加分散,如图 8 所示。因此, VF-PSO 和 PSO 的连通率随大量随机失效节点的失效可能出现部分重要节点失效,进而导致网络的连通率和覆盖率大幅度下降;而随机部署由于刚开始的连通性和覆盖率就不高,因此节点失效后,对于网络的连通性和覆盖率的影响没有那么大。除此之外,随机部署的节点大部分在汇聚节点周围,所以随着失效节点数目的增加,其连通率和覆盖率高于 VF-PSO 和 PSO 节点。

## 4 结 论

本文以在复杂海洋环境造成部分节点异常失效为前提,以水声通信网络的连通率及覆盖率为约束条件,采用粒子群优化进行水声网络拓扑优化,综合考虑包括网络弹性指标在内的多项网络性能指标,并开展了面向浅海海域的水声网络仿真。

仿真结果表明,网络弹性方面,随机令网络中的节点失效,随着失效节点数目增加,网络整体的连通率和覆盖率均有所下降,但本文算法生成的拓扑结构依旧能使网络保持较高的连通率和覆盖率,仿真结果表明其在节点失效后能够保持的连通率和覆盖率高于 VF-PSO、PSO 以及随机部署算法,说明所提算法生成的拓扑结构具有高的容错性,其网络的弹性更佳。

在有较好网络弹性的情况下,本文所提算法也考虑了节点间的传播损失,使得通信网络投递率也有所提高。本文所提算法的拓扑结构,随着网络节点数目增加,其通信投递率高于 VF-PSO 算法,而与同样考虑了传播损失的 PSO 算法相近。另一方面,随着网络负载增加,通信网络的投递率随着负载增加而下降,而本文算法生成的拓扑结构,其网络投递率仍高于 VF-PSO 算法,与 PSO 算法相近,证明本文算法的有效性。

## 参考文献:

- [1] STERBENZ J P G, HUTCHISON D, ÇETINKAYA E K, et al. Redundancy, diversity, and connectivity to achieve multilevel network resilience, survivability, and disruption tolerance invited paper[J]. *Telecommunication Systems*, 2014, 56(1):17-31.
- [2] HOSSEINI S, BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J E. A review of definitions and measures of system resilience [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 145: 47-61.
- [3] 郑小禄, 黄宁, 徐侃. 基于超限学习机的通信网络弹性预测方法[J]. *通信技术*, 2018, 51(1):92-100.
- [4] KUMARI S, MISHRA P K, ANAND V. Fault resilient routing based on moth flame optimization scheme for underwater wireless sensor networks[J]. *Wireless Networks*, 2020, 26(2):1417-1431.
- [5] POMPILI D, MELODIA T, AKYILDIZ I F. Three-dimensional and two-dimensional deployment analysis for underwater acoustic sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*,

- 2009,7(4):778-790.
- [6] SU Y S, GUO L, JIN Z G, et al. A voronoi-based optimized depth adjustment deployment scheme for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(22):13849-13860.
- [7] DETWEILER C, DONIEC M, VASILESCU I, et al. Autonomous depth adjustment for underwater sensor networks: design and applications [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(1):16-24.
- [8] SONG X L, GONG Y Z, JIN D H, et al. Nodes deployment optimization algorithm based on improved evidence theory of underwater wireless sensor networks [J]. *Photonic Network Communications*, 2019, 37(2):224-232.
- [9] YAN L H, HE Y Y, HUANGFU Z M. An uneven node self-deployment optimization algorithm for maximized coverage and energy balance in underwater wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2021, 21(4):1368.
- [10] DU H Z, XIA N, ZHENG R. Particle swarm inspired underwater sensor self-deployment[J]. *Sensors*, 2014, 14(8):15262-15281.
- [11] SUN Y J, HU Y F, CHEN L, et al. The coverage optimization method for underwater sensor network based on VF-PSO algorithm[C]// *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Hefei: IEEE, 2020:2008-2013.
- [12] YI J W, QIAO G H, YUAN F, et al. Sensor deployment strategies for target coverage problems in underwater acoustic sensor networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(3):836-840.
- [13] DONG M R, LI H B, LI C, et al. Energy-efficient sensor deployment strategy for optimal coverage of underwater events inspired by krill herd[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(3):3900-3912.
- [14] HUANG Y, MARTÍNEZ J F, SENDRA J, et al. Resilient wireless sensor networks using topology control: a review[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2015, 15(10):24735-24770.
- [15] ABDELMOATY A, NABOULSI D, DAHMAN G, et al. Resilient topology design for wireless backhaul: a deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(12):2532-2536.
- [16] MACKER J P, BOWERS C, KOMPELLA S, et al. Wireless network topology control: adjustable resiliency and network traffic delivery[C]// *Military Communications Conference (MILCOM)*. Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.
- [17] FU X W, PACE P, ALOI G, et al. Toward robust and energy-efficient clustering wireless sensor networks: a double-stage scale-free topology evolution model [J]. *Computer Networks*, 2021, 200:108521.
- [18] DONG M, LI H, YIN R, et al. Energy-saving and fault-tolerant topology for underwater acoustic sensor networks[C]// *OCEANS*. Piscataway: IEEE, 2022:1-5.
- [19] 金合丽, 刘半藤, 陈唯, 等. 基于遗传算法的水下传感器网络节点部署算法研究[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(7):1083-1087.
- [20] FREEMAN L C. A set of measures of centrality based on betweenness[J]. *Sociometry*, 1977, 40(1):35-41.
- [21] PORTER M B, BUCKER H P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, 82(4):1349-1359.
- [22] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C] // *International Conference on Neural Networks*. Prscataway: IEEE, 1995:1942-1948.
- [23] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C]// *International Conference on Evolutionary Computation Proceedings & IEEE World Congress on Computational Intelligence*. Piscataway: IEEE, 1998: 69-73.
- [24] SHI Y, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization [C] // *Congress on Evolutionary Computation-CEC99*. Piscataway: IEEE, 1999: 1945-1950.
- [25] LIN W M, CHEN D S, TONG F, et al. PSO based topology optimization for underwater acoustic sensor network[C]// *International Conference on Underwater Networks & Systems*. New York: ACM, 2023:33.
- [26] WANG X, WANG S, BI D W. Virtual force-directed particle swarm optimization for dynamic deployment in wireless sensor networks [C] // *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications*. Berlin: Springer, 2007:292-303.
- [27] HU Y, SUN Y J, CHEN L. The VF-PSO optimization algorithm for coverage and deployment of underwater wireless sensor network [J]. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences (IJMS)*, 2022, 51(3):219-228.

(责任编辑:任滢滢)