

基于自组织图算法的水下传感器网络优化部署研究

梁静霖¹, 孙 茜¹, 王小艺¹, 许继平¹, 王 立¹, 杨增顺²

(1. 北京工商大学 人工智能学院, 北京 100048;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 水下传感器网络部署是开展水下传感器网络相关应用的基础, 良好的传感器节点部署方案可以有效提高目标的监测质量; 针对水环境中随机事件的突发性和不确定的特点, 提出了基于自组织图算法的水下传感器网络优化部署方案; 首先, 随机部署传感器节点, 预设随机事件呈 L 型不均匀分布, 当随机事件发生在传感器覆盖漏洞处时, 采用自组织图算法确定传感器节点需要移动到的目标位置; 仿真结果表明, 基于自组织图算法的水下传感器网络优化部署方案可以显著提高对随机事件的覆盖率, 实现对水环境的有效监测。

关键词: 水下传感器网络; 自组织图算法; 部署; 随机事件; 覆盖率

Research on Optimal Deployment of Underwater Sensor Networks Based on Self-Organizing Map Algorithm

LIANG Jinglin¹, SUN Qian¹, WANG Xiaoyi¹, XU Jiping¹, WANG Li¹, YANG Zengshun²

(1. Beijing Technology and Business University, College of Artificial Intelligence, Beijing 100048, China;
2. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd, Beijing 100041, China)

Abstract: The deployment of underwater sensor nodes is the basic work for the application of underwater sensor networks. A good deployment scheme of sensor nodes can effectively improve the monitoring quality of targets. In view of the high dynamic and uncertain characteristics of random events in the water environment, an optimal deployment scheme of underwater sensors networks based on self-organizing map algorithm is proposed. Firstly, the sensors are deployed randomly, and the random events are assumed to be unevenly distributed in L shape. When a random event occurs at the blind area, the self-organizing map algorithm is used to determine the target position to which the underwater sensor needs to move. The simulation results show that the optimal deployment scheme of underwater sensors networks based on self-organizing map algorithm can significantly improve the coverage of random events and achieve effective monitoring of the water environment.

Keywords: underwater sensor network; self-organizing map algorithm; deployment; random events; coverage

0 引言

海洋是生命的摇篮, 人类以及地球上所有生命都依赖于海洋, 海洋对于人类社会生存和发展具有重要意义^[1]。近年来, 随着各沿海国家对领海主权的日益

重视和海洋资源争夺的日益白热化, 以及水下无线传感器网络(UWSNs, underwater wireless sensor networks)在海洋环境监测、海洋数据收集、地质灾害预报等领域的重要应用价值, 水下传感器网络研究及

收稿日期: 2021-10-22; 修回日期: 2021-11-26。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61802010)。

作者简介: 梁静霖(1995-), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事水下传感器网络部署方向的研究。

通讯作者: 孙 茜(1985-), 女, 山东烟台人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事复杂网络部署及抗毁性方向的研究。

引用格式: 梁静霖, 孙 茜, 王小艺, 等. 基于自组织图算法的水下传感器网络优化部署研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 295-300.

应用得到了越来越多的关注,已成为当前研究热点之一^[2-3]。水下传感器网络部署是水下传感器网络应用的基础,具有重要的研究意义^[4]。

水下环境复杂多变,常伴有随机事件的发生。针对随机事件的发生,国内外许多学者对 UWSNs 的传感器部署进行了深入的研究。文献 [5] 针对水环境中随机事件的突发性和不确定特点,提出一种区别于传统鱼群行为的类鱼行为部署方法。该部署方案通过初始部署传感器和类鱼探索行为来实现扩展传感器搜寻空间的目的,有效提高了水下随机事件的覆盖率,提高了传感器节点能效。文献 [6] 针对水域中存在的某些孤立的随机事件提出了一种分层不均匀分簇的传感器优化部署算法。首先通过静态分层部署方式,进行概率统计分析,然后推导出无线传感器网络的部署期望值和分布密度,并进行分簇,在保证网络连通性的前提下,可以有效提高网络覆盖率,延长网络生命周期。文献 [7] 在事件驱动下,针对随机事件的优先模型和节点感知误差函数推导出基于 Voronoi 剖分时感知误差最小,并定义了传感器有效覆盖权值,然后结合虚拟力提出一种分布式优化算法,在能够快速实现对区域部署的同时,也保证了较高的覆盖率。文献 [8] 针对水域中水流等因素导致随机事件具有突发性和不确定的问题,受到鱼群运行机制的启发,提出了一种模拟鱼群觅食行为的传感器优化部署算法,使得传感器能够自主地向随机事件移动,同时通过构建信息池,使互相连通的传感器节点可以共享数据信息,增强传感器的搜索能力,避免节点盲目移动,减少节点移动过程中的能量消耗,并有效提高了事件覆盖率。

虽然专家学者们做了大量的研究,但由于水下环境的动态性,随机事件往往是突发的和不确定的,这为水下无线传感器网络部署带来了很大的困难。为此,针对随机事件的突发性,提出了一种基于自组织图算法(SOM, self-organizing map)的水下无线传感器网络优化部署方案。首先在水环境中随机部署传感器,预设随机事件呈 L 型不均匀分布,当随机事件发生在传感器感知范围外时,采用自组织图算法确定水下传感器需要移动到的目标位置以达到有效监测的目的。在 Matlab 平台上进行仿真实验,验证了自组织图算法在水下传感器网络优化部署中的可行性和优越性。

1 水下传感器网络体系结构

在水下传感器网络中,传感器节点通常被部署在水下监测区域,通过水下节点感知监测区域的海洋信息,达到监测的目的。水下无线传感器网络是一种特殊的水下监测系统,它是由一定数目的具有智能感知和通信能力的传感器组成,这些传感器可以在一些水下辅助设备例如自主式水下航行器(AUV, autonomous underwater vehicle)的帮助下进行移动以达到实时监测水环境的目的^[9-10]。

图 1 为水下无线传感器网络结构图。将若干个具有感知和通信能力的传感器随机部署在监测水域中,在传感器节点部署完成之后,水下无线传感器网络可以对节点感知范围内的各种物理信息(如温度、声音、压力、pH 值等)进行实时采集并监测,然后将传感器节点监测到的各种信息数据通过声波通信以一跳或者多跳的传播方式传输到水面的汇聚节点或者基站^[11],随后汇聚节点或者基站将收集到的物理信息利用电磁波转发到卫星,最后卫星或者互联网将其所收集的海洋数据信息传输到数据处理中心进行处理,达到有效监测水环境的目的。

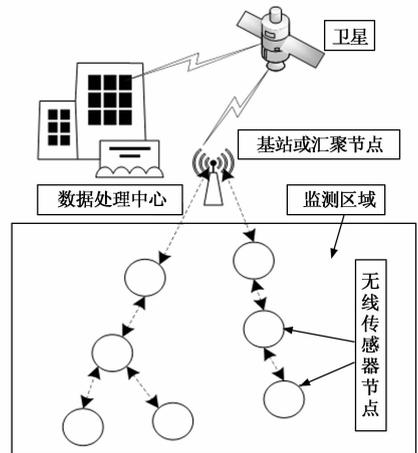


图 1 水下传感器网络结构

2 模型建立

水下传感器网络由 m 个具有感知能力和通信能力的移动传感器节点组成,用 S_i 表示水下传感器网络中第 i 个传感器节点, $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 为传感器节点的集合。在同构网络中,所有传感器节点具有相同的属性,设置任意传感器节点 S_i 均具有相同的感知半径和通信半径 r 。节点随机部署在面积范围一

定的二维区域内, m 个传感器之间使用无线方式进行通信, 且都具有移动性, 在一定的通信协议下, 它可以移动到网络区域内的任意位置。传感器节点能够感知监测区域的物理信息, 并与其邻居节点进行通信, 以获取邻居节点的状态信息。传感器节点的任务是感知其覆盖范围内的随机事件, 收集海洋数据信息并保持节点间的连通性, 通过声波通信以一跳或者多跳的方式进行传播。节点通过节点间的自组织, 对水环境进行监测^[12-13]。

2.1 节点感知模型

在水下无线传感器网络中进行传感器节点的部署研究, 比如随机事件监测问题, 则需要对传感器节点的感知模型进行研究。节点感知模型与水下传感器收集数据信息的服务质量以及无线传感器网络的整体监测效果紧密相关。

二维平面上, 水下传感器节点感知模型的感知区域是一个以传感器节点为圆心, 节点的感知半径 r 为半径的圆形区域 $D = \pi r^2$, 如图 2 所示。

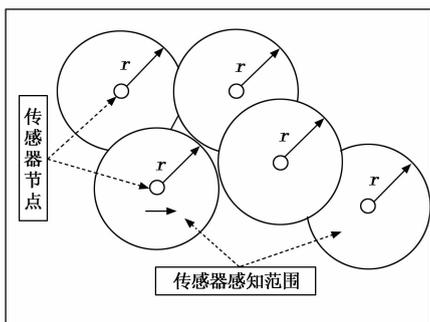


图 2 水下传感器节点感知模型

设二维空间中传感器节点 S_i 的坐标为 (x_i, y_i) , 任意一点 P 的坐标为 (x_j, y_j) , 那么该点到传感器节点的欧式距离如式 (1) 所示:

$$d(S_i, P) = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (1)$$

点 P 被传感器节点 S_i 感知的概率如式 (2) 所示:

$$P(S_i) = \begin{cases} 1, & d(S_i, P) \leq r \\ 0, & d(S_i, P) > r \end{cases} \quad (2)$$

若点 P 在传感器感知范围内, 则被监测到的概率为 1, 否则为 0。

2.2 基于随机事件的监测模型

水下传感器网络的任务是采集并监测水环境中的各种数据信息 (如温度、声音、压力、pH 值等)。

水下传感器节点部署, 即是通过某种方式在水域中对传感器进行合理部署, 达到实时监测的目的^[14-15]。水下传感器部署和陆地传感器部署相比具有特殊性^[16], 水下环境比较复杂, 随机事件具有突发性和不确定的特点, 因此需要考虑随机事件发生时传感器如何能够根据环境和随机事件的变化自主调整位置, 以达到实时监测随机事件的目的。

当随机事件位于传感器的覆盖范围内时, 可以被节点有效监测, 反之则无法被传感器监测。传感器监测随机事件的模型如图 3 所示。

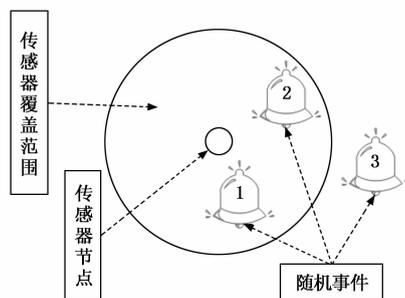


图 3 传感器监测随机事件模型

3 基于 SOM 算法的传感器优化部署

水下复杂环境发生随机事件并且事件发生在传感器覆盖漏网区域时, 则需要通过将传感器移动到事件所在地, 对事件进行实时监测。水下传感器网络中所有传感器均可以在部署后移动, 这就使节点能够移动到随机事件区域进行监测。水下无线传感器网络的主要关注点是确定传感器需要移动到的目标位置, 以达到最优的监测效果。为了确定传感器需要移动的理想位置, 采用了 SOM 算法^[17-18], 将未发生随机事件区域的传感器移动到目标位置。

3.1 SOM 算法原理

自组织神经网络的无导师学习方式类似于人类大脑中生物神经网络的学习, 其最重要的特点是通过自动寻找样本中的内在规律和本质属性, 自组织、自适应地改变网络参数和结构。这种学习方式大大拓宽了神经网络在模式识别与分类方面的应用。SOM 算法是一种无导师的自组织的具有竞争性的网络, 此算法的原理是根据生物神经元中“胜者为王”的思想提出的。它首次是在 1958 年由 Rosenblatt 提出, 然后芬兰赫尔辛基大学教授 Kohonen 于 1981 年正式提出了自组织图神经网络模型。这种算法目前已经得到学者

广泛应用，它可以根据目标的相似性和客观规律进行分类，达到聚类的目的。

自组织图算法训练数据样本的原理及依据符合大脑神经元对于陌生事物经历从认识阶段到熟知阶段的一种规律。具体可以通过模拟大脑神经元的认知过程来理解，人类大脑了解新鲜事物的过程是从感性认识阶段不断上升到理性认识阶段的。感性认识阶段即通过不断地接触外界，在大脑中出现对新事物的印象并不断深化；理性认识阶段是在感性认识的前提下，大脑神经元不断思考发现事物的内在规律和本质属性。自组织图算法首先输入样本得到对于样本空间拓扑结构的感性认识，然后在训练中不断发现事物的相似性和客观规律，最终实现分类的目的^[19]。

SOM 网络结构属于层次型结构，有多种类型，其共同特点是都具有竞争层。最简单的结构具有一个输入层和一个竞争层，如图 4 所示。输入层先输入样本做数据预处理，然后把处理过的数据传送到竞争层，即输入层负责接收外界信息并将输入模式向竞争层传递，起观察作用。在竞争层进行理性认识阶段，发现样本的客观规律，即竞争层负责对该模式进行分析比较，找出规律以正确归类。它的基本思想是：网络的竞争层各神经元竞争对输入模式响应的机会，最后仅有一个神经元成为竞争的获胜者。这一获胜神经元则表示对输入模式的分类^[20]。

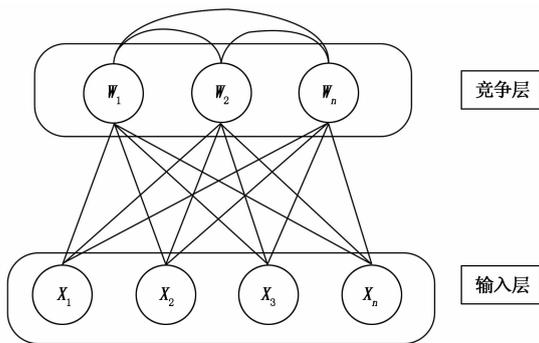


图 4 SOM 神经网络结构

水下环境发生随机事件时，我们希望能够得到传感器需要移动到的目标位置，可以将其看成是聚类，即对随机事件进行分类，通过 SOM 算法得到聚类中心，聚类中心即为传感器需要移动到的目标位置，使随机事件被某个水下节点覆盖以达到监测目的。

3.2 基于 SOM 的传感器网络优化部署

SOM 采用一种无导师的自适应的学习训练方式，

输入样本是通过相似性度量来进行分类、聚类的。水环境中发生随机事件时，将其看成是聚类，即对随机事件进行分类，使之被某个传感器感知以达到监测的目的。

SOM 的算法步骤如下：

- 1) 向量归一化，随机设定输入层以及映射层的权值。
- 2) 选择向量 x 输入神经网络，并计算向量 x 与权值向量的欧式距离，寻找获胜神经元，表达式如式 (3) 所示：

$$d_j = || X - W_j || = \sqrt{\sum_{i=1}^m [x_i(t) - w_{ij}(t)]^2} \quad (3)$$

式 (3) 中， w_{ij} 是输入层神经元 i 与映射层神经元 j 的权值。

- 3) 网络输出与权值调整。胜者为王竞争学习算法规定，获胜神经元输出为“1”，其余输出为“0”。对于获胜神经元权值计算如式 (4)：

$$w_j(n+1) = w_j^*(n) + \alpha [a_i - w_j^*(n)] \quad (4)$$

对于其他神经元权值计算如式 (5) 所示：

$$w_j(n+1) = w_j(n) \quad (5)$$

其中： α 表示学习率， $0 < \alpha < 1$ 。

其流程图如图 5 所示。

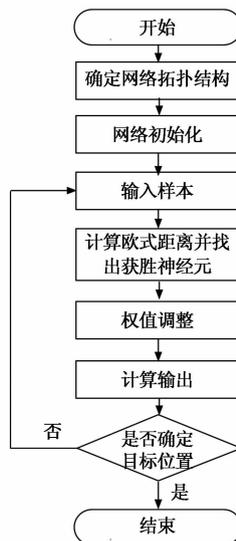


图 5 基于 SOM 的网络优化部署流程图

4 仿真结果

4.1 仿真环境以及参数设置

为了更好地分析基于自组织图算法的传感器优化部署方案，需要对其进行仿真研究，采用 Matlab 软

件实现对传感器优化部署的仿真测试。在仿真开始之前, 首先需要初步对参数进行设定。

将传感器节点部署在水域 30 m×20 m 的二维平面上, 设置传感器个数为 25, 传感器半径为 2.5 m, 随机事件为 100 件。其参数设定如表 1 所示。

表 1 仿真参数设定

参数名称	变量值
监测水域的长	30 m
监测水域的宽	20 m
传感器数量	25
传感器感知半径	2.5 m
随机事件数量	100

4.2 仿真结果分析

将传感器节点随机部署在水域 30 m×20 m 的二维平面上。传感器网络初始部署如图 6 所示。

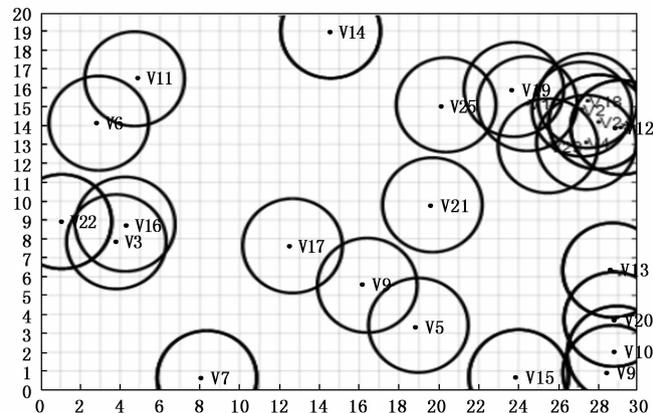


图 6 传感器网络初始部署图

预设水环境中随机事件呈 L 型不均匀分布, 基于随机事件的区域模型如图 7 所示, 其中图中星号代表 L 型不均匀分布的随机事件。

从图 7 分析可以得出, 随机事件大部分发生在传感器的覆盖漏洞处, 无法被传感器有效监测。因此需要通过将传感器移动到事件所在地, 对随机事件进行监测。UWSNs 主要关注点是确定传感器需要移动到的目标位置, 采用自组织图算法将未发生随机事件区域的传感器移动到理想位置, 以达到最优的监测效果。其仿真图如图 8 所示, 其中正方形代表传感器需要移动到的目标位置。图 7 和图 8 对比可以看出, 使用基于 SOM 的传感器优化部署方法可以将节点有效地移动到随机事件发生区域, 以达到实时监测水环境

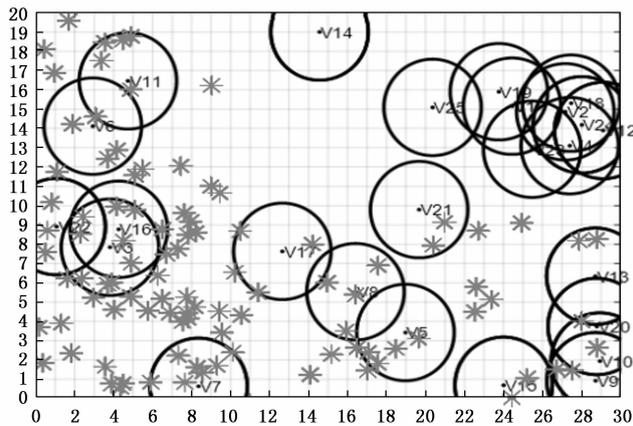


图 7 基于随机事件的区域模型图

的目的。

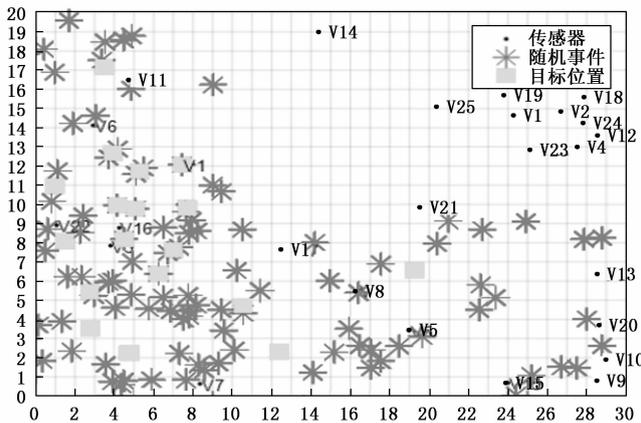


图 8 基于 SOM 确立的传感器目标位置

仿真实验中在相同的区域面积部署相同数量及大小的传感器节点。考虑到开始随机部署的不确定性对实验结果的影响, 进行了多次实验。表 2 表示随机部署和使用基于 SOM 的传感器优化部署两种方式的覆盖率对比情况, 从表 2 可以看出, 使用 SOM 优化部署可以有效提高随机事件的覆盖率, 实时监测水环境。

表 2 事件驱动下覆盖率对比 %

部署方法	1	2	3	4	5
SOM	70	78	73	76	81
随机部署	54	47	41	58	52

5 结束语

合理部署传感器节点是水下无线传感器网络组建的一个关键环节, 一个好的节点部署方案能够有效

提高目标的监测质量,为传感器网络的整体运行提供坚实的支撑。由于水下环境的特殊性,水下传感器网络优化部署研究与陆地无线传感器网络部署研究相比具有独特性:水下环境复杂多变,随机事件动态性强,传感器节点可移动性好。针对水环境中随机事件的突发性和不确定性,提出了水下无线传感器网络优化部署方案,首先在水环境中随机部署传感器,预设随机事件呈 L 型不均匀分布,随机事件发生在传感器覆盖漏洞处时,采用基于自组织图算法的传感器优化部署方法确定传感器需要移动到的目标位置。仿真结果表明该方案可以有效提高对随机事件的覆盖率,达到实时监测水环境的目的。在下一步计划中,将研究网络中移动和静止传感器节点的动态配置问题,在保证网络有效监测的前提下降低硬件成本。

参考文献:

- [1] JAWHAR I, MOHAMED N, AL-JAROUDI J and ZHANG S. An architecture for using autonomous underwater vehicles in wireless sensor networks for underwater pipeline monitoring [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15 (3): 1329 - 1340.
- [2] 王长生. 水下传感器网络节点布置方法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- [3] 兰羽. 一种低功耗无线传感器网络节点设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (2): 262 - 266.
- [4] ULLAH I, CHEN J, SU X, ESPOSITO C and CHOI C. Localization and detection of targets in underwater wireless sensor using distance and angle based algorithms [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 45693 - 45704.
- [5] 李泊, 陈诚. 基于类鱼行为搜寻策略的水下传感器布置 [J]. *南京理工大学学报*, 2019, 43 (2): 244 - 249.
- [6] 刘帅. 三维水下无线传感器网络节点部署算法研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2017.
- [7] 刘军, 程良伦, 王建华, 等. 移动传感器网络非均匀事件区域节点部署优化 [J]. *电子学报*, 2015, 43 (12): 2402 - 2407.
- [8] 王辉. 三维水下传感器网络覆盖优化控制算法研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2019.
- [9] MUZZAMMIL M, AHMED N, QIAO G, et al. Fundamentals and advancements of magnetic-field communication for underwater wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68, (11): 7555 - 7570.
- [10] LIN C, DENG D and WANG S. Extending the lifetime of dynamic underwater acoustic sensor networks using multi-population harmony search algorithm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16 (11): 4034 - 4042.
- [11] 戴天虹, 李昊. 基于改进蚁群算法的无线传感器网络路由的优化 [J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24 (2): 321 - 324.
- [12] 罗强, 潘仲明. 一种小规模水下无线传感器网络的部署算法 [J]. *传感技术学报*, 2011, 24 (7): 1043 - 1047.
- [13] 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.
- [14] JOUHARI M, IBRAHIMI K, TEMBINE H and BEN-OTHTMAN J. Underwater wireless sensor networks: a survey on enabling technologies, localization protocols, and internet of underwater things [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 96879 - 96899.
- [15] SAEED N, CELIK A, AL-NAFFOURI T Y and ALOUINI M. Localization of energy harvesting empowered underwater optical wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18 (5): 2652 - 2663.
- [16] LATIF K, JAVAID N, AHMAD A, et al. On energy hole and coverage hole avoidance in underwater wireless sensor networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16 (11): 4431 - 4442.
- [17] 杨黎刚, 苏宏业, 张英, 等. 基于 SOM 聚类的数据挖掘方法及其应用研究 [J]. *计算机工程与科学*, 2007, (8): 133 - 136.
- [18] 王艺陶, 周宇飞, 李丰先, 等. 基于主成分和 SOM 聚类分析的高粱品种萌发期抗旱性鉴定与分类 [J]. *作物学报*, 2014, 40 (1): 110 - 121.
- [19] 张莹, 潘保芝. 基于主成分分析的 SOM 神经网络在火山岩岩性识别中的应用 [J]. *测井技术*, 2009, 33 (6): 550 - 554.
- [20] AN F, ZHANG X, CHEN L and MATTAUSCH H J. A memory-based modular architecture for SOM and LVQ with dynamic configuration [J]. *IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems*, 2016, 2 (4): 234 - 241.