

面向海洋监测的海空地协同边缘架构与拓扑控制

金志刚¹, 尹欢^{1,2}, 洪叶¹, 苏毅珊¹

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 300072, 天津; 2. 天津大学国际工程师学院, 300072, 天津)

摘要: 针对现有海洋监测网受限于光缆技术可达深度及传统集中式处理的网络架构存在中心节点压力大的问题,提出了一种面向海洋监测的海空地协同边缘计算架构。在该架构中,水声传感器网络是海洋数据监测平台,协同边缘计算架构将复杂处理任务从远程云中心分散至边缘端,将水下异常数据传达到边缘端进行预处理后,再上传到云数据中心,必要时发出预警。针对水下传感器容易出现能量不足、链路中断的问题,提出了水下滑翔机辅助拓扑控制算法。该算法中终端节点和边缘节点呈3:1比例部署,通过节点的链路失效模型判断失效概率,当超出失效概率阈值时,便通知水下滑翔机利用改进的粒子群优化算法执行拓扑修复,并以覆盖率和连通性最大为优化目标求解最优修复位置。仿真结果表明:所提新架构端到端时延约为传统架构的1/3,能量效率得到明显提升;与传统深度调节方法对比,所提拓扑控制算法覆盖率与连通度提升至87.9%、9.3。

关键词: 水声无线传感器网络;海洋监测;拓扑控制;海空地一体架构;边缘计算

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202306006 **文章编号:** 0253-987X(2023)06-0047-09

Sea-Air-Ground Collaborative Edge Computing Architecture and Topology Control for Marine Monitoring

JIN Zhigang¹, YIN Huan^{1,2}, HONG Ye¹, SU Yishan¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of International Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing marine monitoring network is limited by the reachable depth of optical cable technology, and the heavy pressure of central node caused by traditional centralized processing network architecture, a sea-air-ground collaborative edge computing architecture for marine monitoring was proposed. In this architecture, the underwater acoustic sensor network is a platform for marine data monitoring, and the collaborative edge computing architecture disperses complex processing tasks from the remote cloud center to the edge, and transmits the underwater abnormal data to the edge for preprocessing before uploading it to the cloud data center, giving an early warning if necessary. In addition, in view of the problems that underwater sensors are prone to energy shortage and link interruption, an autonomous underwater glider-assisted topology control algorithm was proposed. In this algorithm, terminal nodes and edge nodes are deployed at a ratio of 3:1, and the failure probability is judged through the node's link failure model. When the failure probability threshold is exceeded, the underwater

glider is notified to use the improved particle swarm optimization algorithm to perform topology repair, and the optimal repair location is solved with the optimization goal of maximum coverage and connectivity. The simulation results showed that the end-to-end delay of the proposed new architecture is about 1/3 of the traditional architecture, and the energy efficiency is significantly improved; compared with the traditional deep adjustment method, the coverage and connectivity of the proposed topology control algorithm are increased to 87.9% and 9.3.

Keywords: underwater acoustic sensor network; marine monitoring; topology control; sea-air-ground architecture; edge computing

海洋是人类生存发展的重要物质基础,是高质量发展的战略要地^[1],但同时海洋灾害也会对人类生命以及财产安全造成重大威胁^[2-3]。因此,很多国家都开始了海洋观测网的建设,如美国的 OOI 计划和日本的 ARENE、DONET 海洋监测网络^[4],其目的都是收集水下数据,对海洋异常情况进行监测和预防,我国也在南海建立了南海海啸浮标监测网。海洋灾害的发生威力巨大,面向海洋进行研究、监测是必要的,这一应用场景往往对于水下监测节点的稳定性、时效性有较高要求。加强海洋观测技术装备研发,建设海洋综合立体观测体系,已经成为我国海洋科技创新的一个重要方向^[5]。

目前海洋监测技术存在弊端,一方面,已有的海洋监测网监测对象多为近海,海洋有缆观测网与卫星共同构成海空一体化网络^[6-7],但由于卫星技术的限制,卫星及航空遥感只能对海洋表面进行监测,海面以下部分则需要采用其他监测方式,且采用光缆实现观测站点之间的连接不仅缺少灵活性,对于深度也有较高要求的技术限制。水声无线传感网络(UASNs)由于其广泛的应用范围与较强的交互性,在世界各国都引起了关注^[8-9],但水下节点电池能量有限,并且网络拓扑优化缺少合理规划,容易导致网络链路出现中断,若不能及时修复,将导致整个水下监测网络出现瘫痪,水下传感器网络需拓扑控制的方案。然而,目前海域监测网络拓扑控制研究大多集中在 UASNs 节点部署和定位上^[10-12],文献[11]提出在水下物联网通过移动水声阵列网络利用线性调频信号对水下运动目标进行定位。文献[12]提出通过 Voronoi 细分,以最少的传感器节点数实现最大的 3D 覆盖,保持通信的同时最大化节点间的传感间距,但这种方法很难应用于大范围海洋监测网络部署。

另一方面,当海洋发生异常情况是,会导致水下环境发生较大变化^[13-14],例如海底发生地震时,会释放大量的二氧化碳气体,海水的酸碱性也会发生改

变,面向海洋监测的水下传感器所需收集的数据量庞大。文献[15-16]提出将云端复杂庞大的计算任务分散到边缘端的方法,这种方法首先在智能家居、物联网等应用领域取得成就。文献[17]构建了一种云边协同架构的珊瑚礁监测新机制,在水下边缘端进行大批量数据的分析处理工作,仿真实验表明该架构能够明显降低网络传输时延和能耗。

随着水下物联网技术的不断发展,众多学者开始研究多智能移动设备协同水下传感器节点共同执行水下任务^[18-19]。水下自主航行器(AUV)依靠自带能源在水下航行,但由于其有限的作业时间,并不适合执行大范围长时间数据任务。水下滑翔机(AUG)是一种具有独特的驱动方式的新型水下机器人,可重复回收使用,更适用于深海大范围的任务场景。

基于以上问题,本文提出了面向海洋监测的 UASNs 边缘架构与拓扑控制算法(TCSDM)。首先构建一种面向海洋监测的海空地协同边缘架构,将处理任务由传统集中式云中心分散至边缘端,减缓中心节点对海量数据处理的压力,减少端到端时延,同时满足陆地研究中心对水下灾害异常数据及时研究分析的需求。边缘节点是海洋监测的重要一环,为了保证边缘节点与其他节点间链路的正常通信,提出利用 AUG 在深海运动的优势以及长续航的特性,重点对由于能量耗尽或水下环境异动,导致边缘节点及其他出现异常的节点进行拓扑控制,避免“路由空洞”的出现,保证海洋监测数据的正常上传,保持水下传感器网络的稳定性,满足主要面向海洋的监测网高可靠、长稳定的需求。

1 TCSDM 机制

1.1 系统模型

本节首先构建了一种协同边缘计算的 3 层海域立体监测网络系统模型:第一层水声子网采用若干电池供电的网络节点组成,包括终端水下传感器、

AUG、边缘节点;第 2 层海面无线子网由携带射频通信装置的无人船组成;第 3 层由搭载云上数据中心的卫星和带有射频通信设备的无人飞行器^[20]组成。网络架构图如图 1 所示。

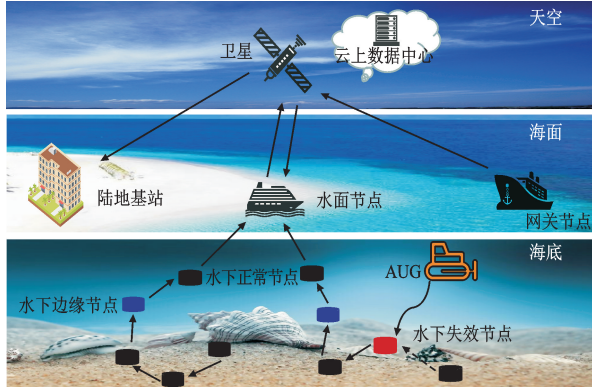


图 1 面向海洋监测的新架构

Fig. 1 A new architecture for ocean monitoring

海洋灾害多发的深海是 UASNs 的研究领域,终端水声无线传感器节点执行采集数据任务,边缘节点执行对于水下异常数据的计算、融合、压缩等任务。终端节点与边缘节点之间可以相互通信,形成链路。保障节点链路的正常通信,保持水声传感器网络拓扑的稳定性是面向海洋监测的重要条件之一。

AUG 节点负责动态执行拓扑控制任务,其本身携带终端节点和边缘节点作为补给,当水下节点(包括边缘节点和终端节点)由于能量耗尽或者水下环境改变导致通信链路失效时,节点发送数据包给 AUG。AUG 编队收到修复请求时,进入 AUG 选择模型,选择最合适的 AUG 执行拓扑控制工作,将所携带的补给节点部署到指定位置,以保证监测数据的正常上传,TCSDM 模型监测机制如图 2 所示。

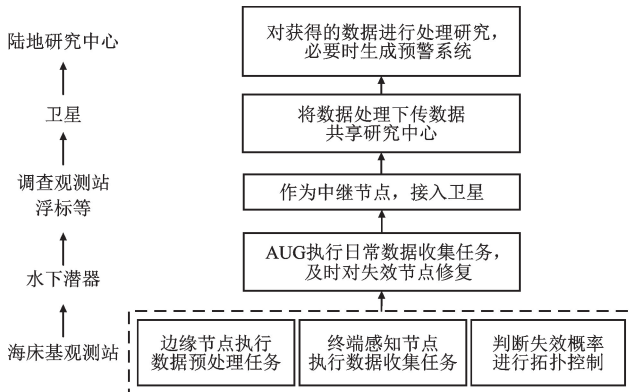


图 2 TCSDM 模型监测机制

Fig. 2 TCSDM model monitoring mechanism

1.2 协同边缘计算架构

由于水下采用声信号进行传播,相比电磁波,速度降低 5 个数量级,因此整个过程延迟的情况主要发生在水下,水下延迟包括终端感知节点到边缘节点之间的延迟 $T_{e,e}$ 、边缘节点进行预处理所产生的延迟 T_p 、边缘节点上传到卫星云端所产生的延迟 $T_{e,c}$ 这 3 个部分,考虑终端水下传感器由于水流或者电池能量不足容易出现与上行链路中断的情况,此时需要 AUG 进行救援,因此 $T_{e,e}$ 又可以分为数据本身存在的中继延迟 T_{re} 和 AUG 前来救援所导致的延迟 T_{AUG} ,总延迟为

$$T_t = T_{re} + T_{AUG} + T_p + T_{e,c} \quad (1)$$

每个节点能量有限,能耗模型表达式为

$$E_t = E_{rd} + E_{td} + E_{pr} + E_{AUG} = NC_{rd} + MC_{td} + E_{pr} + E_{AUG} \quad (2)$$

式中: E_t 为发送数据所需能耗; E_{rd} 为接收数据所需能耗; E_{pr} 为边缘处理任务的能耗开销; E_{AUG} 为 AUG 进行节点修复时消耗的格外开销; C_{rd} 为发送单个数据包所需能耗; C_{td} 为接收单个数据包所需能耗; N 、 M 分别为发送、接收数据包的数量。

2 TCSDM 算法

2.1 概念定义

设定所有水下传感器节点具有相同的感知半径和通信半径,对算法中的连通度、覆盖率和节点感知模型进行定义。

定义 1 假设水下传感器节点承担上传任务的数量为 n_{de} ,传感器节点总量为 N ,所以连通度为

$$C_{on} = \frac{n_{de}}{N} \quad (3)$$

定义 2 传感器节点用集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 表示。若将监测对象或用户感兴趣的动态点 e 称为事件,则在监测区域 A 内,事件集合可描述为 $e = \{e_i | e_i \in A, i = 1, 2, 3, \dots, M\}$,表示目标区域有 M 个需要被监测的事件,水下传感器的任务是覆盖事件,收集监测事件的信息并保持节点间的连通性。定义事件 e_i 被传感器节点 s_j 覆盖的覆盖率如下

$$C_{ov} = \frac{M_e(s_j)}{M} \quad (4)$$

为了将计算简化,采用布尔传感器覆盖模型,若事件在节点的感知范围内则被认为是有效覆盖。定义事件 e_i 被传感器节点 s_j 覆盖的概率为 $p(e_i, s_j)$ 。传感器 s_j 覆盖的事件数用 $M_e(s_j)$ 表示,水下三维空

间事件集 e 被节点 s_j 覆盖的概率为 $p(e, s_j)$

$$M_e(s_j) = p(e, s_j) \quad (5)$$

$$p(e, s_j) = p(e_1, s_j) \cup p(e_2, s_j) \cup p(e_3, s_j) \cup \dots \cup p(e_i, s_j) = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - p(e_i, s_j)) \quad (6)$$

定义 3 水下传感器节点本文选择三维布尔感知模型, 节点感知半径用 r 表示。定义如下: 首先假设濒临失效节点的上行节点 a 的坐标为 $y_a = (y_1, y_2, y_3)$, 第 Q 个水下滑翔机的坐标可表示为 $X_Q = (x_1, x_2, x_3)$, 失效节点的下行节点 b 坐标表示为 $Z_b = (z_1, z_2, z_3)$, 那么 AUG 与节点 a 之间的距离 $r(s_a, s_{AUG_Q}) = \|X - Y\|$, AUG 与节点 b 之间的距离 $r(s_b, s_{AUG_Q}) = \|X - Z\|$, 则水下滑翔机 Q 与节点 a, b 之间的欧几里德距离可表示为

$$d(s_a, s_{AUG_Q}) = \sqrt{(y_1 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2 + (y_3 - x_3)^2} \quad (7)$$

$$d(s_b, s_{AUG_Q}) = \sqrt{(z_1 - x_1)^2 + (z_2 - x_2)^2 + (z_3 - x_3)^2} \quad (8)$$

所以 Q 水下滑翔机被上行节点 s_a 和下行节点 s_b 感知到的概率为

$$p(s_{ab}, s_{AUG_Q}) = \begin{cases} 0, & \text{其他} \\ 1, & r \geq d(s_a, s_{AUG_Q}), r \geq d(s_b, s_{AUG_Q}) \end{cases} \quad (9)$$

2.2 面向海洋监测的拓扑控制算法

基本粒子群算法求解优化函数时, 容易陷入局部最优, 文献[21]提出应用随机权重粒子群算法提高全局搜索能力。本文以随机分布的方式获得惯性权重, 并以标准差 σ 来控制随机惯性权重的偏离程度, 提高算法的全局收敛性。将 UASNs 拓扑控制问题描述如下: 假设要对某海域进行监测, 以最大化连通度和覆盖率为目标, 对海域立体监测网络进行拓扑控制。拓扑控制算法流程图如图 3 所示。

该问题的输入条件包括失效节点的距离、AUG 自身位置以及当前位置与失效节点间距离、水下传感器节点的通信半径和感知半径、水下传感器节点的初始能量及相关参数。改进的粒子群算法通过求解, 获得如下输出条件: 粒子群算法求解后的目标函数值, 拓扑控制方案, 选择的 AUG 节点及救援路径等, 优化求解时间。目标函数包括几个部分, 其中 $\partial(f)$ 表示声波在海水中的吸收系数, f 表示频率, $x=20$ 为远距离通信时的球面模型的系数。

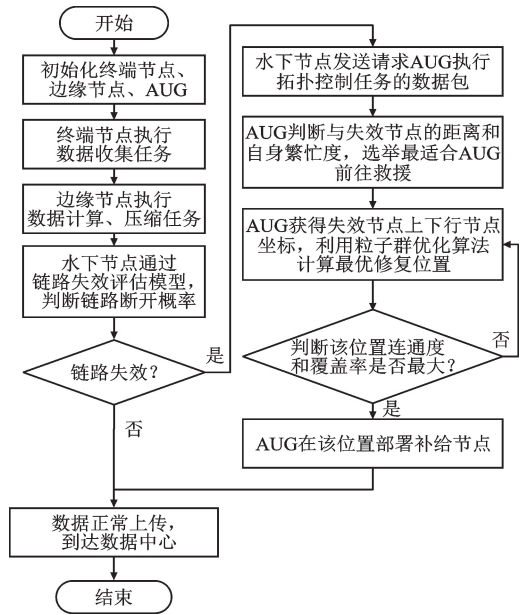


图 3 AUG 辅助拓扑控制流程

Fig. 3 AUG-assisted topology control flow chart

AUG 与节点 a 之间的传播损失可表示为

$$F_1 = L_{Ta} = x \log(1000r(s_a, s_{AUG_Q})) + \partial(f)r(s_a, s_{AUG_Q}) \quad (10)$$

AUG 与节点 b 之间的传播损失可表示为

$$F_2 = L_{Tb} = x \log(1000r(s_b, s_{AUG_Q})) + \partial(f)r(s_b, s_{AUG_Q}) \quad (11)$$

最大化 AUG 与对于 i 个事件的覆盖率

$$F_3 = \frac{1}{M_e(S_j)} = \frac{1}{\sum_{e_i \in e} p(e_i, s_j)} \quad (12)$$

通过将以上目标进行线性加权求和标准化, 建立多目标优化函数

$$\min \left(\partial_1 \frac{F_1 - F_1^{\min}}{F_1^{\max} - F_1^{\min}} + \partial_2 \frac{F_2 - F_2^{\min}}{F_2^{\max} - F_2^{\min}} + \partial_3 \frac{F_3 - F_3^{\min}}{F_3^{\max} - F_3^{\min}} \right) \quad (13)$$

其中式(13)满足 $\partial_1 + \partial_2 + \partial_3 = 1$ 。

$$\begin{cases} 0 < \log(1000r(s_a, s_{AUG_Q})) + \partial(f)r(s_a, s_{AUG_Q}) < L_{Srec1} - T_{rec1} - L_{Nrec1} + G_{Drec1} \\ 0 < \log(1000r(s_b, s_{AUG_Q})) + \partial(f)r(s_b, s_{AUG_Q}) < L_{Srec2} - T_{rec2} - L_{Nrec2} + G_{Drec2} \end{cases} \quad (14)$$

式中: L_S 为示源节点发射信号等级; T 为接收机节点的信噪比检测门限; L_N 为噪声等级; G_D 为指向性增益。

为了评估不同情况下的链路可靠度,借助节点物理层信噪比信息,引入了节点可靠度评估公式,判断节点失效概率为

$$P_i = 1 - 0.5(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 4/10^{R_{SN}/10}}}) \quad (15)$$

式(15)中信噪比 $R_{SN}=L_S-L_T-L_N+G_D$,可知节点的可靠度随着 R_{SN} 的增高而增高,通信链路可靠度与 R_{SN} 呈正比关系。

AUG 选择模型可以用以下公式解释,其中 β_1 、 β_2 分别表示 AUG 与失效节点的距离权重、工作状态的权重。工作状态的值采用 0-1 模型,当前有正在执行的任务用 0 表示,当前处于空闲状态用 1 表示。AUG 之间可相互通信,并由此比较各自的 D 值(β_1 与失效节点的距离和 β_2 工作状态), D 值最大的 AUG 选举为最佳执行拓扑控制的节点。

粒子群算法的收敛性如图 4 所示,可知在前 24 次的迭代中,目标函数值快速下降,之后下降的速度减缓到逐渐趋于平稳,大约迭代 84 次后,目标函数值不再发生变化,说明粒子群算法已经达到收敛,完成 AUG 的最佳修复位置计算任务。

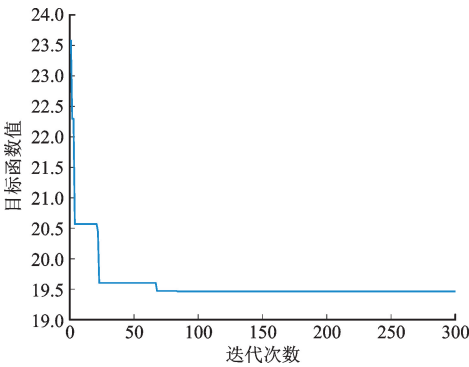


图 4 粒子群算法的收敛性

Fig. 4 Convergence of particle swarm optimization

3 实验与性能评价

通过 Matlab 软件进行仿真实验,根据本文所提拓扑控制方法和协同边缘计算架构对覆盖率、连通度、时延性能和能量效率的表现进行实验结果分析,将所提方案与其他方法进行对比,说明所提方案的优势。

3.1 实验场景设置

一般来说,AUG 的数量对于拓扑控制的速度有较大影响,AUG 的数量越多,拓扑修复的时间越短,但 AUG 的造价昂贵,放置过多的 AUG 现实实用性较差。文献[22]中的仿真场景为在 5 000 m×

5 000 m×4 000 m 的海域中均匀放置了 4 个水下自主航行器(AUV),为了尽量和文献[22]仿真场景保持一致,并保证实验与真实场景贴合,选取两个场景:日本地震频繁的 NanKai 海域 20 000 m×20 000 m×4 000 m,与地球最深处马里亚纳海沟 50 000 m×20 000 m×10 000 m,并在当中均匀放置了 5 个 AUG。

在实验场景中根据不同传感器的功能在三维海域中分别部署 50、70、100 个异构传感器节点,其中终端感知节点与水下边缘处理节点的比例约为3:1,边缘节点承担异常数据预处理的同时承担水下数据收集工作。

实验在水面部署 4 个位置已知的 sink 节点,水下均匀部署 5 个能获取自身位置的 AUG。AUG 在水下 1 000 m 处执行日常任务,假设 AUG 获取自身位置的误差忽略。实验中所需要的参数如表 1 所示。

表 1 算法参数设置
Table 1 Experiment parameter

参数	数值
水下传感器节点数	$50 \leq n \leq 100$
滑翔机数	5
水声传播速度/(m·s ⁻¹)	1 500
水下节点感知半径/m	1 000
初始能量/J	10 000
数据包大小/B	300
数据包生成速率 λ/(包·s ⁻¹)	0.01~0.1
实验运行数	50
监测事件数	100
通信半径/m	1 500
粒子群种群数	50
粒子群迭代数	300
发送功率/W	10
接收功率/W	1

3.2 拓扑控制算法性能评价

本文对所提的海空地协同边缘架构的拓扑控制方案关于覆盖率、连通度进行评价分析。文献[22]提出利用深度调节的方法 DODA 进行拓扑控制,仿真实验中所用方法的覆盖率达到 了 95.87%。文献[23]中所提利用 AUV 进行拓扑控制的方法 PVPR,同样对节点的有效覆盖率进行了实验。本文所提方法与文献[22-23]所提拓扑控制中的两类经典算法关于覆盖率对比如图 5 所示。由图 5 可知,3 种方法随着

节点数的增加覆盖率也在对应的增加,当节点数达到 100 时, DODA、PVPR 和本文方法 TCSDM 覆盖率分别为 82.7%、85.6% 和 87.9%, AUG 辅助进行拓扑控制的方法在覆盖率上明显提升,这是因为改进后的粒子群中权重一直向期望值靠近,全局收敛速度和精度提升。且 AUV、AUG 两者都摆脱了线缆的束缚,但随着水下作业深度的提高,由于续航能力 AUV 不能进行长期工作。而 AUG 作为一种新型的水下动态节点,它不仅能够满足长时间、广海域的环境监测需求,并且低噪声大大降低了对海洋环境的影响;另一方面,水下航行器执行拓扑修复任务时,需要具有稳定的驻留能力, AUG 本身具有翼升融合外观,其稳定性相比 AUV 也更高^[24-25]。

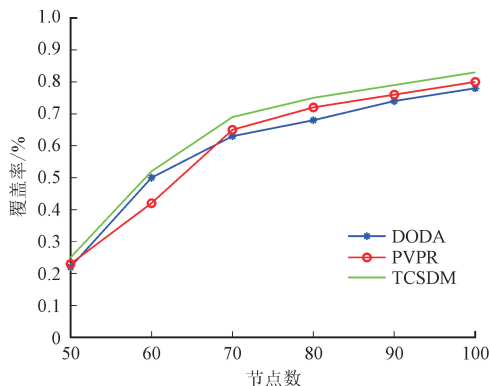


图 5 3 种方法覆盖率对比

Fig. 5 Coverage comparison experiment

本文所提方法与文献[19-20]在连通度指标上的对比如图 6 所示。由图 6 可知,随着节点数的增加,节点之间的连通度也在增加。当节点部署数增加为 60 时,每种方法的节点连通度大于 3,这代表拓扑网络中的每个节点都至少拥有自己的一个父节点和子节点,数据的上传、下行是有效的。随着节点数增加到 100, DODA、PVPR 和本文方法 TCSDM 增加到 5.44、7.34 和 9.3,这表示拓扑正在趋于稳定,每个节点拥有更多邻居节点集合。TCSDM 算法在节点数递增的过程中,相比 DODA 算法,其连通度一直保持明显优势。这是因为 DODA 算法使用深度调节方法进行拓扑控制的过程中,原节点位置的移动会使得整体网络拓扑结构发生变化,当节点数增加,节点覆盖的冗余度增加,节点共用上下行节点的概率也会随之增加,反而会加速关键节点的死亡,降低网络连通度。TCSDM 算法分两步执行拓扑控制:节点首先通过链路可靠度评估自身失效概率,节点在完全失去连通能力前就会通知 AUG

前来救援,这大大降低了网络出现“路由空洞”不连通的风险;TCSDM 算法中边缘协同的架构也降低了水声通信中固有的时延特性,减少了节点请求拓扑修复的信息滞后。

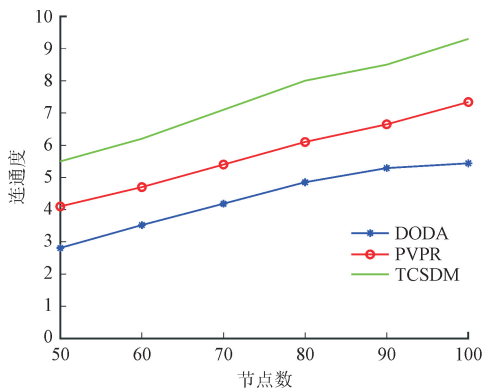


图 6 3 种方法连通度对比

Fig. 6 Connectivity degree comparison experiment

3.3 海空地协同边缘计算架构性能评价

为了验证海空地协同边缘计算架构在面向海洋监测应用中的有效性,首先模拟海洋感知节点进行监测事件的收集,假设数据包的生成速率为 0.1 包/s,并且加入数据异常参数 γ 为异常数据数与总数数据数的比,用来模拟不同个数数据异常的情况。 γ 的取值为 0~1,其中 $\gamma=0$ 时表示数据全部正常, $\gamma=1$ 则表示所有的数据都出现异常,当数据异常时将触发数据包上传机制。由于协同边缘架构的数据处理策略更靠近数据源端,异常数据传输至边缘处理节点所经过的跳数少所以边缘节点协同处理耗费时间更短。通过端到端时延和能量效率来验证所提海空地一体架构协同边缘计算的有效性,并进行归一化处理。本实验通过 VBF 路由协议进行上传,并且假设了 VBF 500、1 000 m 的管道半径分别说明边缘计算节点的有效性,最后通过控制变量与传统的海洋监测网络架构进行对比。

同一种数据包生成速率下,基于协同海空地边缘架构的海洋监测网络中在 VBF1000、VBF500 的路由协议下,分别与传统的海空地海洋监测网络架构在 VBF1000 路由协议下的端到端时延指标对比图如图 7 所示。由图 7 可以看出,在同一种路由协议下,相比传统的海洋监测网络架构,针对海洋监测网络数据上传问题所提协同边缘计算的架构在端到端时延性能上有明显提升。这是因为所提新架构将集中处理的任务下沉到边缘端,预处理的过程更加靠近数据源,原始数据的传输路径和跳数相应减少,从而减少了端到端时延。随着数据包生成速率的增

加,3 种架构的端到端时延都在一定幅度内增加,这是因为数据包数的增加会增加包与包之间的碰撞,增加数据传输的失败率,从而导致更多重传的发生。同一种架构下,VBF1000 的端到端时延总是高于 VBF500 的,这是因为随着管道半径的增加,管道内转发节点数也在增加,从而导致更多的时延发生。

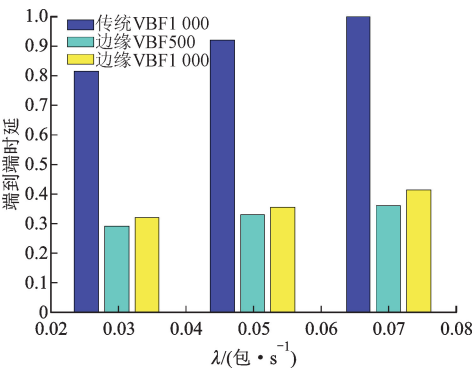


图 7 不同路由协议下端到端时延的对比
Fig. 7 End-to-end delay

能量效率如图 8 所示,表明在 VBF500、VBF1000 的路由协议下,协同边缘计算的架构与传统架构的方案随着数据包生成速率的增加,能量效率都在一定幅度内减小,这也说明了数据包数的增加消耗了水下传感器网络更多的能量。固定数据包生成速率进行对比,当 $\lambda=0.03$ 包/s 时,协同边缘计算以 VBF500 进行路由的架构,相比较在此架构下以 VBF1000 进行路由和传统的 VBF1000 海空地海洋监测架构,能量效率有较大提升,因为本文处理架构更靠近源端,数据的原位处理大大降低了传输过程所需能耗。

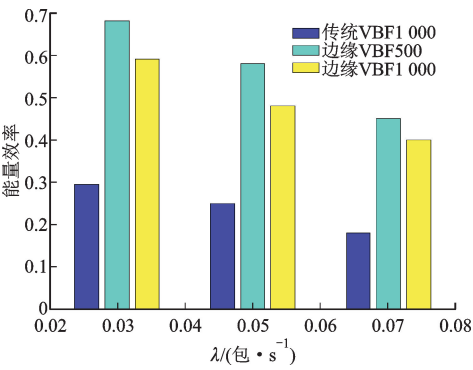


图 8 不同路由协议下能量效率的对比
Fig. 8 Energy efficiency

通过对比在同一路由协议、同一生成速率下的边缘协同、传统架构,可以发现边缘协同的架构相比传统架构能量效率的提升有明显优势。一方面归因

于边缘协同的架构在水下边缘侧就对水下数据进行了预处理,而不是统一上传大量原始数据;另一方面是因为本文提出了异常数据触发的机制,该机制有效避免了海洋监测下海量数据的冗余性,只上传异常数据大幅节约了节点传输能量,对比传统直接上传的网络架构,所提新架构能量效率性能有大幅提升。

4 结 论

建立海洋监测网是保障海洋生物安全、维护人类生命财产安全的重要手段。海洋监测数据的及时上传和水下传感器网络拓扑的控制是建立海洋监测网的重要指标。本文构建了一种面向海洋监测的海空地协同边缘架构,综合分析 AUV 的性能后,提出了利用更适合执行深海任务的 AUG 辅助拓扑控制。由于结合粒子群算法求解 AUG 进行拓扑修复的最佳位置,仿真实验表明,该方法与其他算法对比在连通度与覆盖率指标有明显提升。协同边缘计算架构对水下感知节点收集的数据进行预处理,将处理后的数据再上传到卫星,实验表明,在端到端时延和能量效率方面有较大的提升。

参考文献:

[1] LIU Yuan, WANG Haiyan, CAI Lin, et al. Fundamentals and advancements of topology discovery in underwater acoustic sensor networks: a review [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(19): 21159-21174.

[2] RÉVELARD A, TINTORÉ J, VERRON J, et al. Ocean integration: the needs and challenges of effective coordination within the ocean observing system [J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 8: 737671.

[3] 刘潜. 汤加火山喷发与全球气候变化 [J]. 生态经济, 2022, 38(3): 1-4.

LIU Qian. Volcanic eruption in Tonga and global climate change [J]. Ecological Economy, 2022, 38(3): 1-4.

[4] SUBRAMANIAN R, RANGANATHAN S, RAMASAMY V. Gateway to ocean data management: ocean best practices, information and visualisation for moored ocean observation network [C]//OCEANS 2022 -Chennai. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 1-9.

[5] 张兴林. 区域性海洋灾害监测预警系统研究进展 [J]. 中国新通信, 2022, 24(2): 52-53.

ZHANG Xinglin. Research progress of regional marine disaster monitoring and early warning system [J]. China New Telecommunications, 2022, 24(2): 52-53.

- [6] LIU Zhixin, MENG Xiangyun, YANG Yi, et al. Energy-efficient UAV-aided ocean monitoring networks: joint resource allocation and trajectory design [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(18): 17871-17884.
- [7] ALBALADEJO PÉREZ C, SOTO VALLES F, TORRES SÁNCHEZ R, et al. Design and deployment of a wireless sensor network for the Mar Menor coastal observation system [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 42(4): 966-976.
- [8] XING Guanglin, CHEN Yumeng, HOU Rui, et al. Game-theory-based clustering scheme for energy balancing in underwater acoustic sensor networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(11): 9005-9013.
- [9] FANG Zhengru, WANG Jingjing, JIANG Chunxiao, et al. AoI-inspired collaborative information collection for AUV-assisted internet of underwater things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(19): 14559-14571.
- [10] HAN Guangjie, ZHANG Chenyu, SHU Lei, et al. Impacts of deployment strategies on localization performance in underwater acoustic sensor networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1725-1733.
- [11] SU Ruoyu, GONG Zijun, LI Cheng, et al. Algorithm design and performance analysis of target localization using mobile underwater acoustic array networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(2): 2395-2406.
- [12] SU Yishan, GUO Lei, JIN Zhigang, et al. A Voronoi-based optimized depth adjustment deployment scheme for underwater acoustic sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(22): 13849-13860.
- [13] 臧虎临, 侯贺晟, 安美建, 等. 海域天然地震资料采集方法综述 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5): 2218-2224.
ZANG Hulin, HOU Hesheng, AN Meijian, et al. Seismological data acquisition methods in marine area [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(5): 2218-2224.
- [14] 徐志国, 史健宇, 李宏伟, 等. 南中国海区域海啸预警中心地震监测系统 [J]. 地震科学进展, 2022, 52(10): 473-481.
XU Zhiguo, SHI Jianyu, LI Hongwei, et al. The earthquake monitoring system in the South China Sea Tsunami Advisory Center [J]. Progress in Earthquake Sciences, 2022, 52(10): 473-481.
- [15] XU Xiaolong, LI Yuancheng, HUANG Tao, et al. An energy-aware computation offloading method for smart edge computing in wireless metropolitan area networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2019, 133: 75-85.
- [16] NDIKUMANA A, TRAN N H, HO T M, et al. Joint communication, computation, caching, and control in big data multi-access edge computing [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 19(6): 1359-1374.
- [17] 金志刚, 段晨旭, 羊秋玲, 等. 基于水下云边协同架构的珊瑚礁监测新机制 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(12): 3829-3836.
JIN Zhigang, DUAN Chenxu, YANG Qiuling, et al. A new mechanism for reef coral monitoring based on underwater cloud-edge collaborative architecture [J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(12): 3829-3836.
- [18] 宋保维, 潘光, 张立川, 等. 自主水下航行器发展趋势及关键技术 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 27-44.
SONG Baowei, PAN Guang, ZHANG Lichuan, et al. Development trend and key technologies of autonomous underwater vehicles [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 27-44.
- [19] 陈恩志, 常健, 李斌, 等. 采用干扰观测器的水下滑翔蛇形机器人纵倾运动控制 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(1): 184-192.
CHEN Enzhi, CHANG Jian, LI Bin, et al. Control for pitch motion of underwater gliding snake-like robot based on disturbance observer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(1): 184-192.
- [20] MA Ruofei, WANG Ruisong, LIU Gongliang, et al. UAV-assisted data collection for ocean monitoring networks [J]. IEEE Network, 2020, 34(6): 250-258.
- [21] 王保民, 齐湛江, 闫瑞翔, 等. 基于随机权重粒子群算法的 SCARA 机器人动力学参数辨识 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(9): 20-27.
WANG Baomin, QI Zhanjiang, YAN Ruixiang, et al. Parameter identification of SCARA robot based on random weight particle swarm optimization [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(9): 20-27.
- [22] JIN Zhigang, JI Zhihua, SU Yishan, et al. A deployment optimization mechanism using depth adjustable nodes in underwater acoustic sensor networks [C]// 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 1-6.
- [23] JIN Zhigang, ZHAO Qinyi, LUO Yongmei. Routing void prediction and repairing in AUV-assisted under-

water acoustic sensor networks [J]. IEEE Access, 2020, 8: 54200-54212.

[24] 张宝收, 宋保维, 毛昭勇, 等. 水下滑翔机海底驻留流体动力及稳定性仿真 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(11): 49-55.

ZHANG Baoshou, SONG Baowei, MAO Zhaoyong, et al. Stability simulation for underwater glider parking on seabed [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(11): 49-55.

[25] JIN Zhigang, WANG Ning, SU Yishan, et al. A glider-assisted link disruption restoration mechanism in underwater acoustic sensor networks [J]. Sensors, 2018, 18(2): 501.

(编辑 刘杨 赵炜)