

面向异构水声传感网的分布式负载均衡算法*

陈秋丽¹, 何明^{1,2}, 凌晨³, 刘勇¹, 仇功达¹

(1. 解放军理工大学指挥信息系统学院 南京 210007; 2. 装备发展部第61研究所 北京 100071;
3. 后勤保障部科学研究所 北京 100071)

摘要:水声传感网中节点能量有限,大多采用多跳通信。为解决通信过程中的负载均衡问题,提出了一种基于质距优化机制的水声传感器网络多跳通信策略,设计自适应负载均衡算法,加权评估普通传感器的通信质量与距离选择下一跳;在此基础上,提出了基于AUVs节点的数据平衡传输算法,分布式的实现了网络性能的进一步优化,以获得网络生命周期的最大化。最后,通过仿真实验验证了该方法的合理性和有效性。

关键词:水声传感器网络;多跳通信优化机制;数据平衡传输算法;负载均衡

中图分类号: TP393 TH70 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

Distributed load balancing algorithm for heterogeneous underwater acoustic sensor networks

Chen Qiuli¹, He Ming^{1,2}, Ling Chen³, Liu Yong¹, Qiu Gongda¹

(1. College of Command Information System, PLA Science and Technology University, Nanjing 210007, China;
2. The 61th Research Institute of Equipment Development Department, Beijing 100071, China; 3. Scientific Research Institute of Logistics Support Department, Beijing 100071, China)

Abstract: Multi-hop communication is applied to underwater acoustic sensor networks, since nodes energy is limited. In order to balance load in communication process, this paper proposes an optimization mechanism based on nodes' quality and distance for multi-hop communications, and designs an adaptive load balancing algorithm. The nodes communication quality and distance between each other are weighted for evaluating and selecting the next hop. Then balanced-based data transmission algorithm based Autonomous Underwater Vehicles is proposed. The performance of networks can be further optimized and the lifetime of networks can be maximized. Finally, the simulation results show the rationality and effectiveness of the proposed method.

Keywords: underwater acoustic sensor networks (UASNs); multi-hop communication optimization mechanisms; balanced-based data transmission algorithm; load balancing

1 引言

水声传感网 (underwater acoustic sensor networks, UASNs) 通信过程中的数据转发能力受多路径机制影响^[1-2]。节点信息传播范围有限,通信一般采用多跳来实现,部分节点的通信链路需要经常改变,而位于关键路径上的转发节点则面临着能量最快消耗殆尽的危险,导致

网络存在一系列的负载不均衡问题^[3-4]。

当前,研究学者在多跳通信路由算法的设计上已取得一些成果^[5-6]。Petrioli C 等人^[7]提出了通信竞争转发机制,竞争能力较强的节点主动承担转发任务,但对竞争能力的界定不够完善;Javaid N 等人^[8]提出了基于能量分级的负载均衡数据传输方法,为传感器节点设置不同能量级数,不同的能量级数对应不同的数据传输策略,有效提升了数据转发效率,但节点能级的判断过程较为复

杂;文献[9]根据节点与网关之间的间距,赋予节点不同的初始电量,并设计了混合传播能量均衡(energy balance hybrid, EBH)方法。该方法需要在初始部署时有针对的放置不同能量的节点,同时,传感器硬件制作时也更为复杂,难以适应动态变化的水下环境。文献[10]设计了节点距离网关的最小跳数算法,适用于非均匀部署的水下网络。但仍存在多个节点与网关距离相同的情况,此时这些节点将采用相同的路径进行数据转发,不能较好地实现负载均衡。文献[11]提出的最短路径法与文献[12]提出的最优路径法是当前解决网络最优下一跳选择问题的两种主要方法。最短路径法是指节点选择距离自身最近的邻居节点作为数据转发的下一跳,尽可能地减少自身传输数据所产生的能耗。最优路径法则是通过计算邻居节点的属性值,选择当前负荷最小的节点作为下一跳,尽可能均匀地分摊网络的整体能耗。这两者主要针对传统的同构水声传感器网络。

然而,随着国内外研究学者们对自主式水下航行器(autonomous underwater vehicles, AUVs)的关注,在传统的UASNs中加入自主式水下航行器的异构混合式水下网络已经成为研究的主流网络。如何有效利用可移动、能量大、速度快、智能化的AUVs,使其与普通传感器节点共同协作,保障网络动态演化,解决负载均衡问题,提升网络性能是亟待解决的问题。

针对以上研究成果的不足,本文以文献[2]设计的多网关UASNs为研究基础,针对普通传感器节点提出了下一跳节点选择优化机制,并进一步设计基于AUVs节点的数据平衡传输算法,构建了分布式负载均衡策略,有效增强了网络抗毁性,提升了网络的生存周期。

2 问题描述和模型建立

2.1 问题描述

负载均衡问题直接影响了网络生存周期的长短,当负载不均时,网络中部分节点由于负载过大进而能量消耗过快并最终失效,导致整个UASNs不能够正常运行。因此,要解决UASNs的负载均衡问题,就是要解决网络能耗分摊的问题,即通过转移能量消耗较大节点的负载到闲置节点的方式来延长UASNs的生存周期。节点的能耗 E_n 可表示为:

$$E_n = E_c + E_s \quad (1)$$

即通信能耗 E_c 与感知能耗 E_s 的总和。通信能耗是节点工作过程中的主要耗能,是本文重点讨论的内容,其大小不仅与节点硬件条件有关,还取决于节点长期的工作状态。通信能耗是指在一段时间内,节点用于通信所消耗的能量。在计算节点通信能耗时,需要考虑两个关键因素。1)节点发送单位数据的能耗 E_c , E_c 的大小与节

点的传输距离有关,且随距离的增加而增大;2)节点通信过程中需要转发的数据量 n , n 值越大,表示需转发的数据越多,消耗的能量也就越大。这里以节点 s_i 为例,其通信能耗大小为:

$$E_c = n_{s_i} \times E_e \quad (2)$$

在多跳通信的UASNs中,为保障网络负载均衡,源节点如何选择下一跳至关重要。选择过程中,源节点既不能让自身传输数据的能耗过大,也不能使整个网络能耗的分摊不均匀化。由于源节点自身传输数据的能耗与其和下一跳节点间的距离有关,而保证整个网络能耗分摊的均匀则取决于所选下一跳节点的当前负荷。显然,若某个邻居节点当前负荷过大时,再被选中作为下一跳转发节点,则可能过早耗尽能量,导致节点失效,从而引发网络瘫痪等一系列问题。

本文结合最短路径和最优路径两种方法的优势,提出了质距结合优化机制,加权评估下一跳节点的通信质量与间距,择优选择,初步实现网络通信的负载均衡。随后根据异构UASNs特点,进一步设计了基于AUVs节点的数据平衡传输算法。

2.2 模型建立

如图1所示,本文所讨论的异构水声传感网包括水面网关节点、水下普通传感器节点、具有自主移动能力的AUVs节点。在目标监测区域 D 中,不均匀地分布了 M 个需监测的目标事件,初始时已构建了近似最优的UASNs网络拓扑:水面网关的部署基于文献[2]中的线性规划方法,根据监测环境中的数据传输守恒约束来确定数量及位置。普通传感器节点采用文献[13]随机下沉的方式在目标监测区域 D 中完成了非均匀部署,所有传感器节点保持网络全局连通,整个网络对目标事件的覆盖率达到90%以上;另外,采用鱼群启发算法^[14]对AUVs节点进行部署,并按照文献[15]中的运动模式实现AUVs分布密度与传感器节点分布密度相匹配。普通传感器与AUVs均为全向感知。为便于研究和计算,所有节点均采用布尔感知模型。水下传感器节点感知目标事件,并依据网络拓扑转发监测数据,AUVs节点能够感知其范围内的传感器节点状态及位置信息。

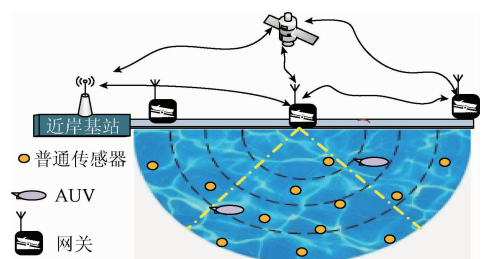


图1 异构水声传感网示意图

Fig.1 The schematic diagram for heterogeneous UASNs

为方便网络中 AUVs 节点与普通传感器节点之间的协同通信与任务保障,在 AUVs 的部署完成后,为每个 AUV 分配一定规模的传感器节点,对于任意 AUV 节点,所负责的传感器节点集合互不相交^[16]。这部分工作属于课题组前期的研究成果,此处不再赘述。图 2 所示为传感器节点 s_1 、 s_2 分别分配给 AUV1、AUV2 的具体流程示例。

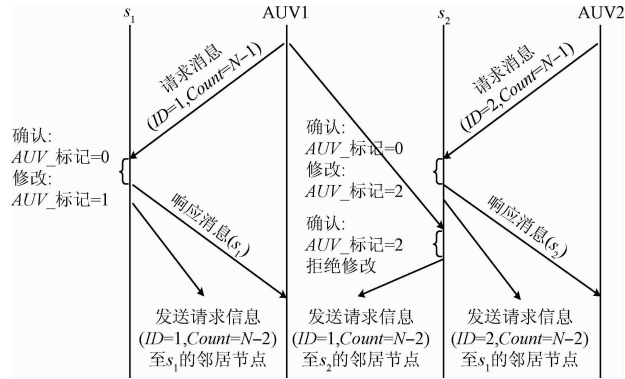


图 2 AUVs 分配消息传递流程

Fig. 2 AUVs allocation messaging process

为便于模型分析和求解,在符合实际应用场景,保证可实现性的前提下给出如下假设:

1) 水下传感器节点具备辅助定位系统,能够知道自身位置及邻居节点位置,并通过信息交互获取邻居节点的邻居集合。

2) $r^s < r_a^s, r^c < r_a^c$,即传感器节点的感知、通信半径小于 AUVs 节点的感知通信半径,且 AUVs 能够根据需要在最大值范围内调节感知半径和通信半径的大小。

3) AUVs 节点能量远大于普通传感器节点,不考虑 AUVs 节点意外失效情况。

3 算法设计

本文所设计的分布式负载均衡算法含两个部分。一是基于质距优化机制的 UASNs 多跳通信方法,二是基于 AUVs 节点的数据平衡传输算法。通过这两个部分的联合优化,实现对 UASNs 通信负载的分布式均衡。

3.1 基于质距优化机制的 UASNs 多跳通信方法

UASNs 中的网关节点均设立在水面上,当水中普通传感器节点感知到目标事件信息时,需通过多跳将数据向水面传输。质距优化机制主要解决普通传感器节点对下一跳的最优选取。

以图 3 为例,当节点 s_i 收集到监测数据时向网关传递时,其邻居节点有编号 1~6 个节点。由于数据向上传递给最近网关,因此,其可选择的下一跳为距离水面更近的 4 个邻居节点,分别为 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 。传统的基于最短

距离的方法中, s_i 将选择离它最近的 s_1 作为通信下一跳。三维水下环境中,节点 s_i 与 s_1 之间的欧氏距离可通过下式进行计算:

$$d(i,1) = \sqrt{d_x(i,1)^2 + d_y(i,1)^2 + d_z(i,1)^2} \quad (3)$$

为综合考察距离值对能耗的影响,本文继续计算邻居节点 s_1 与最近网关的间距值:

$$d(1, \text{sink}) = \sqrt{d_x(1, \text{sink})^2 + d_y(1, \text{sink})^2 + d_z(1, \text{sink})^2} \quad (4)$$

并利用上述两者的加权作为选取下一跳节点的距离参数:

$$L_{i1} = \alpha \times d(i,1) + (1 - \alpha) \times d(1, \text{sink}) \quad (5)$$

式中: α 作为加权参数,一般取 0.5。但当节点 s_1 不仅仅是节点 s_i 的最近邻接点时,其他节点也会通过距离最近选择法,将数据传递给节点 s_1 ,使 s_1 陷入超负荷工作状态,容易过早崩溃,影响网络性能。

因此,为实现网络通信的负载均衡,节点 s_i 在选择通信下一跳节点时,不仅要考虑与各邻居节点之间的距离参数 L_j ,还应当考虑各邻居节点当前的通信质量,质距结合,以选取最优下一跳节点。

以节点 s_1 为例,其通信质量与当前的工作负荷有关,包括节点 s_1 当前缓存数据的队列长度,平均发包数,以及最大工作容量。其中,当前队列长度表示节点 s_1 即将传送的报文数量,用 P 表示;平均发包数表示该节点单位时间内传送成功的报文数量,不包含丢失的报文数,用 K 表示;最大工作容量表示该节点在通信过程中能够承受的最大工作负荷,用 F_p 表示。

当节点 s_i 请求发送报文包的大小为 N_b 时,计算其邻居节点 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 的工作负荷分别为:

$$G_j = \min\{(P + N_b)/K, F_p\} \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

通过比较 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 的大小,评定各邻居节点的预期通信质量, G_j 越小,表示该节点当前的工作负荷越小,进而预期的通信质量越好,越适合作为下一跳数据转发节点。

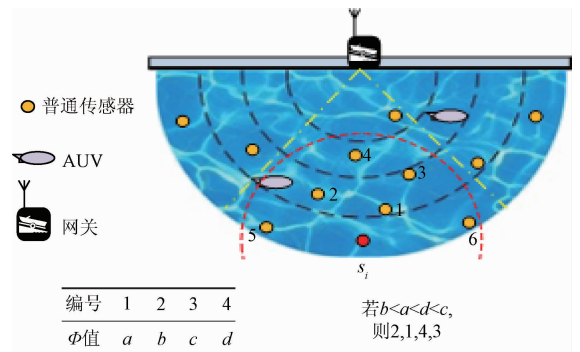


图 3 最优下一跳选择示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the optimal next hop selection

当节点 s_i 需要转发数据时,应当综合考虑下一跳节点的质量参数 G_j 和距离参数 L_j 。两者分别具有一定权重,质距结合后其性能为:

$$\Phi_j = \xi \frac{G_j}{e_g} + (1 - \xi) \frac{e_d}{d_j} \quad (7)$$

式中: $G_j/e_g, e_d/d_j$ 表示将质量参数 G_j 和距离参数 d_j 单位化。 ξ 为权重系数,且 $\xi > 1 - \xi$ 。这是因为数据转发节点应更加重视邻居节点的通信质量,才能对周围信息进行综合掌控。若更为关注节点之间的间距,只考虑如何减少自身能耗,则缺乏调节网络全局能耗,使之分摊的更均匀这一意识。且随着目标事件的随机插入,重视通信质量的优势将更为明显。

经计算后,图3中若 $b < a < d < c$,则代表下一跳的最优选择排序为 $2 < 1 < 4 < 3$ 。故节点 s_2 为最优下一跳。

3.2 基于AUVs节点的数据平衡传输算法

上述优化机制已经能在一定程度上确保网络通信负载均衡,但当某一区域目标事件过多,大部分节点达到自身最大工作容量时,无论如何选取下一跳节点,都无法优化网络性能,此时则需要利用异构网络优势,采用基于AUVs节点的数据平衡传输算法解决该问题。

举例来说,目标事件是随机产生的,如图4所示,可划分为两个重点监测区域。处于重点监测区域1中的节点 s_i 希望向上多跳转发数据至网关,但重点监测区域1中事件过多,节点 s_i 的3个邻居节点 s_1, s_2, s_3 均已达到自身最大工作容量,无法再接受新的数据。若节点 s_i 强行将数据传输给 s_1, s_2, s_3 中的任意一个,则极有可能导致其负载过量而失效瘫痪。然而节点 s_i 的非邻居节点 s_4, s_5 则相对空闲,此时,若根据2.2节中的网络模型,利用节点 s_i 从属的AUV1进行数据转发,则可有效调节网络通信能耗。

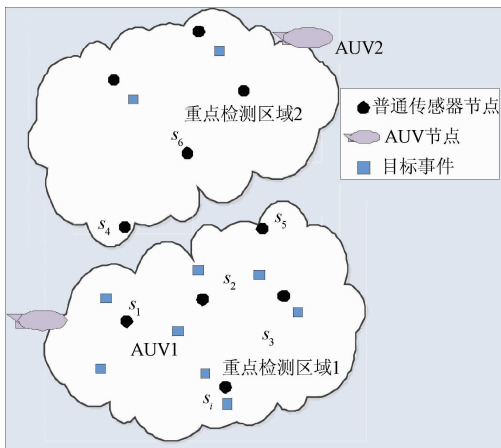


图4 事例说明示意图

Fig.4 Schematic diagram of illustrating examples

故本文进一步设计了基于AUVs节点的数据平衡传输算法。首先定义节点数据转发过程中的通信模式,普通传感器节点包含两种通信模式:

定义1:通信模式 Smode1 (sensor mode 1):普通传感器节点 s_i 通过多跳通信的方式将数据传送给网关节点。

定义2:通信模式 Smode2 (sensor mode 2):普通传感器节点 s_i 的邻居节点均不适合做通信下一跳, s_i 将数据直接传递给其从属AUV节点。

对于AUVs节点来说,也包含两种通信模式:

定义3:通信模式 Amode1 (AUV mode 1):AUV节点收到其所属普通传感器节点 s_i 的数据包,通过多跳通信的方式将数据传送给网关节点。

定义4:通信模式 Amode2 (AUV mode 2):需要转发数据的AUV节点周围无合适下一跳,根据假设2)按需自动调整其通信半径和通信功率,直接将数据传输到最近的网关节点。

基于AUVs节点的数据平衡传输算法中,通过设计各类节点通信模式的转换机制,解决基于优化机制的UASNs多跳通信方法所不能处理的无最优下一跳节点可选问题。初始时,普通传感器节点均处于 Smode1 通信模式,AUVs节点均处于 Amode1 通信模式。基于AUVs节点的数据平衡传输算法主要过程如下:

- 1) 普通传感器节点首先对监测的目标事件进行感知,传输数据时,调用优化机制,判断是否存在最优邻居节点作为下一跳;
- 2) 若存在最优下一跳节点,则节点采用当前 Smode1 通信模式,将数据传输给最优下一跳节点;
- 3) 若无最优下一跳时,节点切换自身通信模式至 Smode2,将数据转发给自身从属的AUV节点;
- 4) 当AUV节点接收到转发数据时,首先采用当前 Amode1 通信模式,调用优化机制,判断是否存在最优邻居节点作为下一跳;
- 5) 若存在最优下一跳节点,则AUV节点采用当前 Amode1 通信模式,将数据传输给下一跳节点;
- 6) 若无最优下一跳时,AUV节点切换自身通信模式至 Amode2,按需自动调整其通信半径和功率,直接将数据传输到最近的水面网关节点。

特殊地,当节点需要转发的数据超过自身所能承载的最大工作容量时,无法再作为其他节点的下一跳,直接切换自身工作模式至 Smode2。此时,当需要转发数据的节点 s_i 发现其邻居节点 s_j 已经工作在 Smode2 模式下时,则说明 s_j 负荷过重,或 s_j 找不到合适的邻居节点作为其下一跳。则节点 s_i 无需计算 s_j 的当前通信质量与距离,自动放弃对 s_j 的选择。

4 仿真与性能分析

本文采用的仿真实验平台是机会网络环境 (opportunistic network environment, ONE) 仿真器。ONE 仿真系统整合了移动、通信、分析等模块,实现了仿真中节点移动建模、相互通信、消息处理等功能。通过 ONE 平台进行较大规模的各种环境下的 UASNs 仿真实验,能够对 UASNs 的网络优化机制和算法进行细致和深入的分析 and 验证。

对于基于优化机制的 UASNs 多跳通信策略,采用 Monte Carlo 方法在 ONE 平台上进行 100 轮仿真实验。基于 ONE 平台的移动模块完成了前期节点的部署,基于 ONE 平台的网络通信模块完成本文负载均衡算法的验证。利用 MATLAB 仿真工具进行实验数据统计与分析。模拟 $500\text{ m} \times 500\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的水下监测区域中,200 个普通传感器节点,20 个 AUVs 节点与 4 个网关节点对随机产生非均匀部署的 300 个目标事件监测过程中的数据流动,普通传感器节点和目标事件受洋流模型^[17]影响产生位置变化。为了评估网络的生存周期,更好的检验负载均衡效果,本文将时间分为轮,并假设每个节点在一轮时间内产生一个数据包。同时将网络生存周期定义为“从网络运行开始,到网络中第 1 个节点能量耗尽时所经历的通信轮数”。表 1 所示为实验参数设置。

表 1 实验参数设置

Table 1 Experimental parameters setting

符号	描述	取值
r^s	传感器感知半径	4 m
r^c	传感器通信半径	6 m
r_a^s	AUV 感知半径	40 m
r_a^c	AUV 通信半径	60 m
V_t	水下声传播速度	1 500 m/s
E_e	发送单位数据的能耗	0.001 J
e	传感器节点初始能量	4 J
α	距离权重参数	0.5
ξ	质距权重参数	0.7

分别进行以下 3 组实验:

1) 实验 1: 节点模式转换阈值 N_p 大小与网络生存期的关系。

节点模式转换阈值 N_p 是指节点剩余最大工作量为 N_p 时,自动切换到 Smode2 通信模式。设计合理的模式转换阈值能够有效维持传感器节点寿命。为使网络寿命最大化,可通过改变节点模式转换阈值 N_p 大小,进行多次试验,探究 N_p 与网络寿命之间的关系。在实验中,假定每个普通节点默认分配的电池能量为 4 J,当节点剩余

能量小于 4×10^6 nJ 时,认为是能量耗尽。故 N_p 的大小应该在 4×10^6 nJ ~ 4 J 之间。

经过多次实验取平均值,图 5 所示为 N_p 大小与网络生存周期的关系, N_p 越大,表示节点转换模式时剩余能量越大,网络生存周期越长。这是因为, N_p 越大时,普通传感器节点几乎全部采用 Smode2 通信模式,直接将数据传输给所属 AUVs,整个网络基本依靠 AUVs 节点进行通信,普通节点的寿命长,因而网络生存周期长。但此时,AUVs 传输数据过多,内部数据包队列过长,普通节点的价值未能很好的体现,导致整个网络通信时延长,质量较低。而 N_p 过小时,此时普通节点的剩余能量严重不足,已被使用过度,通信时延较长,且容易出现失效,导致网络生命终止。图 5 显示,实验中 N_p 取 1.6 J 左右时,网络通信平均时延最小,且此时的网络生存周期轮数约 1.4×10^5 。故后续实验中均将节点模式转换阈值设为 1.6 J。

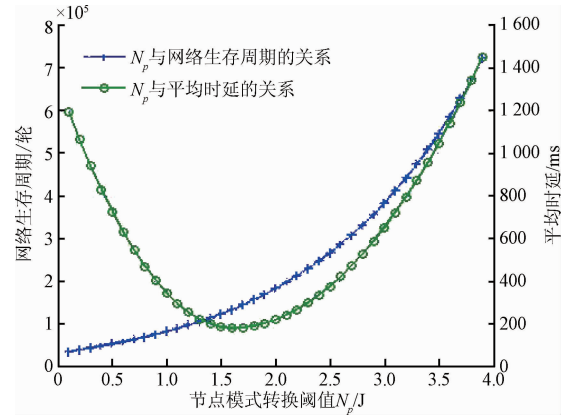


图 5 N_p 与网络生存期及通信时延间的关系

Fig. 5 Relationship between N_p and network lifetime and communication delay

2) 实验 2: 质距加权法与最短路径法^[11]以及最优路径法^[12]负载均衡效果对比。

在仿真实验中,水下传感器的默认工作频率为 25 kHz,当普通节点剩余能量小于 4×10^6 nJ 时,认为节点能量耗尽,此时节点不能再进行工作。

统计 50 次随机实验中,采用 3 类算法得到的网络生存周期如图 6 所示。可以看出,采用最短路径法、最优路径法后的网络生存周期轮数则维持在 $1.19 \times 10^5 \sim 1.29 \times 10^5$,波动较大。但这两者平均生存周期差距不大,有时最短路径法优于最优路径法,有时最优路径法又优于最短路径法。这是因为网络中的目标事件是随机产生的,目标事件的位置不同,导致选取最短路径法、最优路径法的效果不同。而质距加权法生存周期轮数维持在 $1.33 \times 10^5 \sim 1.38 \times 10^5$,相较于最短路径法和最优路径法,网络总体性能提升了 10% 左右。

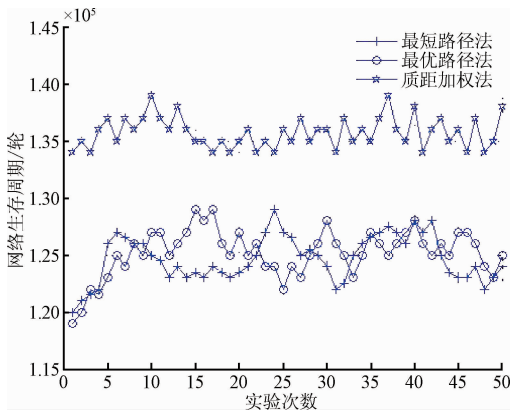


图6 质距加权法与最短路径法、最优路径法对比
Fig. 6 Contrast of quality and distance weighted method, the shortest path algorithm and the optimal path method

3) 实验3:采用基于 AUVs 节点的数据平衡传输算法与不采用该算法的网络生存周期对比。

将基于 AUVs 节点的数据平衡传输算法的网络与仅采用 3.1 节优化机制的网络进行生存周期对比。进行多次实验探究网络生存期之间的差异,如图 7 所示。

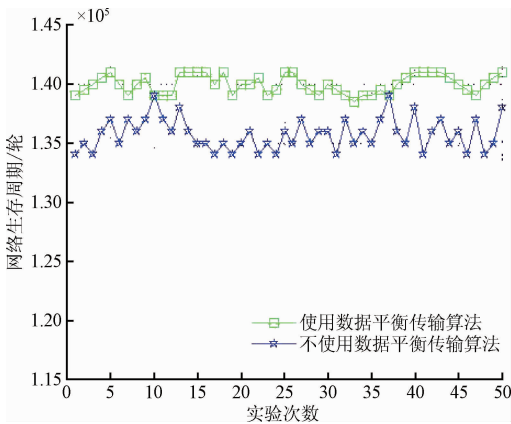


图7 是否采用基于 AUVs 节点的数据平衡传输算法的网络生存周期对比
Fig. 7 Network lifetime of whether using the algorithm data transfer balance based AUVs

可见,采用基于 AUVs 节点的数据平衡传输算法网络生存期总体高于仅采用优化机制的网络。这是因为基于 AUVs 节点的数据平衡传输算法能够较好的均衡网络的负载,使得每个节点都能充分展现自身价值,且采用该算法后,网络生存周期数值较为稳定,维持在 1.4×10^5 上下,将网络性能再次提升了5%左右。而仅采用优化

机制的网络,其生存周期波动较大,网络鲁棒性差。

5 实验验证

5.1 实验环境

为进一步验证算法性能,使用实验室简易水床环境部署传感器节点如图 8 所示,搭建水声传感器网络实验测试平台。将 30 个普通传感器节点,5 个 AUVs 节点,50 个目标事件按照文献[16,18]部署覆盖 $200 \text{ cm} \times 200 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ 的水床区域。为适应水床规模,将节点感知半径调节至 8 cm,通信半径调节至 12 cm,AUV 节点感知半径调节至 20 cm,通信半径调节至 30 cm。传感器初始能量为 2 J,节点模式转换阈值设置为 0.7 J。经测试,水下节点能够对目标事件实现全面覆盖。

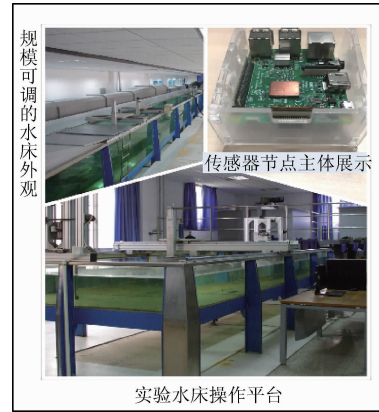


图8 实验环境

Fig. 8 Experimental environment

5.2 实验结果分析

图 9 所示质距加权法和数据传输算法在简易水床平台上运行的可行性。可以看出基于 AUVs 节点的数据平衡传输算法能够较好稳定网络的生成周期。这是因为该网络规模较小,每个 AUV 节点负责的普通传感器节点较少,能够更加合理地调控传感器节点的数据包转发。但质距加权法的生存周期波动幅度相比于仿真平台波动更大。这是因为真实水下环境对节点的要求更高,且网络规模小,节点随目标事件部署更为集中。简易水床的水位深度不足,导致多数节点位于水面和多数节点位于水底两种情况的实验效果相差较大。进而说明,本文算法更适用于大规模的水下网络。

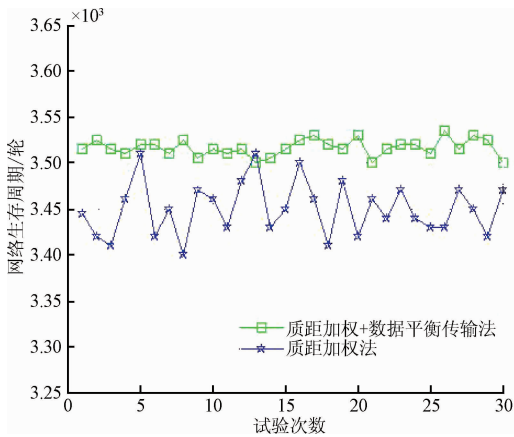


图9 质距加权法与数据平衡传输算法验证对比
Fig.9 Comparison of quality and distance weighted method and data transfer balance algorithm

6 结 论

UASNs 多跳通信问题是水下传感器网络拓扑领域的一个重要研究点,本文提出了一种基于质距优化机制的 UASNs 多跳通信方法,综合评估节点间的距离与邻居节点的通信质量,择优选择通信下一跳;并设计多个通信模式利用 AUVs 节点进一步保障数据转发的平衡,整个算法采用了分布式的结构,各节点无需知晓整个网络的通信情况,有效降低了节点能耗,以获得最大的网络生存周期。该方法具有一定的通用性,若结合空地一体环境,可用于无人机网络中通信链路的规划;若结合军事需求,用于战术物联网^[18]中各单位节点的部署与不同等级的数据传输链路搭建。这部分具体内容将作为下一步的研究工作。

参考文献

[1] WANG J, LU K, ZHANG S, et al. An efficient communication relay placement algorithm for content-centric wireless mesh networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2015, 28(2): 262-280.

[2] AYUB T, DEB S, SHABY S M. Surface-level gateway deployment for underwater sensor networks [C]. IEEE International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIECS), 2015: 1-6.

[3] IBRAHIM S, LIU J, AL-BZOOOR M, et al. Towards efficient dynamic surface gateway deployment for underwater network [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(8): 2301-2312.

[4] WANG Y, SUN D, FAN W, et al. Low consumption dynamic time synchronization for mobile and high latency underwater acoustic communication networks[C]. Ocean

Acoustics (COA), 2016: 1-7.

[5] 刘洲洲,张雷雷. 混合型无线传感器网络覆盖空洞修复算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 1090-1197.

LIU ZH ZH, ZHANG L L. WSN network coverage scheme based on SA-PSO algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(7):1090-1197.

[6] 范仕军,付敬奇. 基于目标簇树的 Zigbee 路由算法研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 177-181.

FAN SH J, FU J Q. Research of zigbee routing algorithm based on target Cluster-tree[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(3): 177-181.

[7] PETRIOLI C, NATI M, CASARI P, et al. ALBA-R: Load-balancing geographic routing around connectivity holes in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(3): 529-539.

[8] JAVAID N, SHAH M, AHMAD A, et al. An enhanced energy balanced data transmission protocol for underwater acoustic sensor networks [J]. Sensors, 2016, 16(4): 487.

[9] LUO H, GUO Z, WU K, et al. Energy balanced strategies for maximizing the lifetime of sparsely deployed underwater acoustic sensor networks[J]. Sensors, 2009, 9(9): 6626-6651.

[10] HAN G, JIANG J, BAO N, et al. Routing protocols for underwater wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(11): 72-78.

[11] CHEEMA S, JAVAID N, SHEIKH S A, et al. A balanced energy adaptive routing protocol with sector based node selection in underwater WSNs [C]. IEEE 19th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS), 2016: 84-90.

[12] DELESCLUSE M, FUNCK T, DEHLER S A, et al. The oceanic crustal structure at the extinct, slow to ultraslow Labrador Sea spreading center [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(7): 5249-5272.

[13] WU J, WANG Y, LIU L. A voronoi-based depth-adjustment scheme for underwater wireless sensor networks[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent System, 2013, 6(1): 244-258.

[14] 夏娜,王长生,郑榕,等. 鱼群启发的水下传感器节点布置[J]. 自动化学报, 2012, 38(2): 295-302.

XIA N, WANG CH SH, ZHENG R, et al. Fish swarm inspired underwater sensor deployment [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(2): 295-302.

- [15] 何明, 陈秋丽, 陈希亮, 等. 鱼群启发的三维 Ad hoc 网络节点随机移动优化模型[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2826-2834.
HE M, CHEN Q L, CHEN X L, et al. Fish swarm inspired Ad hoc networks node random mobility optimization model in 3D environment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35 (12): 2826-2834.
- [16] 何明, 梁文辉, 陈秋丽, 等. 水下移动无线传感器网络拓扑愈合与优化[J]. 控制与决策, 2015, 30(2): 251-255.
HE M, LIANG W H, CHEN Q L, et al. Topology self-healing algorithm of mobile underwater wireless sensor networks [J] Control and Decision, 2015, 30 (2): 251-255.
- [17] CARUSO A, PAPARELLA F, VIEIRA L F M, et al. The meandering current mobility model and its impact on underwater mobile sensor networks[C]. 27th Conference on Computer Communications, 2008: 221-225.
- [18] 贾静. NI 平台助力物联网时代[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 14-16
JIA J. NI platform power of the internet of things era[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(11): 14-16.

作者简介



陈秋丽, 分别在 2012 年和 2015 年于解放军理工大学获得学士学位和硕士学位, 现为解放军理工大学博士研究生, 主要研究方向为水声传感器网络。

E-mail: idonghe@126.com

Chen Qiuli received her B. Sc. degree and M. Sc. degree from PLA Science and Technology University in 2012 and 2015, respectively. Now she is a Ph. D. Candidate in PLA Science and Technology University. Her main research interest is underwater acoustic sensor networks.



何明(通讯作者), 分别在 2000 年、2003 年和 2007 年于解放军理工大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为解放军理工大学教授, 主要研究方向为水声传感器网络、物联网等。

E-mail: paper_review@126.com

He Ming (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from PLA Science and Technology University in 2000, 2003 and 2007, respectively. Now he is a professor in PLA Science and Technology University and his main research interests include underwater acoustic sensor networks and Internet of things.