空洞避免和负载均衡的水声网络路由协议研究

石柳月，覃琦超 *
北部湾大学，广西 钦州 535000
DOI: 10.61369/TACS.2026090054

摘　　要： 水声传感网络在军事和民用领域具有广阔的应用前景和极高的研究价值。然而，水声网络部署稀疏、拓扑动态、能量受限等特性将导致路由空洞问题和降低网络能效。针对以上问题，提出了自适应空洞避免和负载均衡的路由协议。此协议根据节点的能耗模型联合预测节点的生命周期，提出了基于节点可持续性和生命状态二维考量指标的空洞避免方案。同时，给出了一种新的节点位置状态确定方法。最后，联合节点的状态和前进有效距离设计数据机会转发策略。仿真结果表明，所提出的协议能够有效处理路由空洞问题，呈现出较高的数据包投递率的同时提升网络其他性能。

关 键 词： 水声传感网络；路由协议；空洞避免；负载均衡

Void-Avoidable and Energy-Balancing Routing Protocol for Underwater Acoustic Seneor Network

Shi Liuyue, Qin Qichao*
Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi 535000

Abstract: Underwater acoustic sensor networks have broad prospects and application value in both military and civilian fields. However, due to their sparse deployment, dynamic topology, and limited energy, these networks tend to suffer from routing void problems and low energy efficiency. To address these issues, this paper proposes an adaptive routing protocol that combines void avoidance with load balancing. The protocol first estimates the lifetime of each node based on its energy consumption model, then develops a void avoidance scheme using two metrics, namely node sustainability and life state, while also introducing a new method for determining node position states. Finally, a data forwarding strategy is designed by combining node states with the effective forward distance. Simulation results show that the proposed protocol can effectively handle routing void problems, achieving a relatively high packet delivery ratio while also improving other network performance metrics.

Keywords: Underwater acoustic sensor network; Routing Protocol; hole avoidance; Load balancing

引言

随着海洋科技不断进步，海洋资源开发、海上交通以及海洋军事等领域日益受到重视，而水下通信在整个海洋开发进程中发挥着关键性的支撑作用[1]。然而，要在复杂的水声环境下设计高效可靠的水声传感网络路由协议还存在着许多挑战。首先，节点移动和网络稀疏部署会产生空洞区域，从而降低网络的连通性和可靠性，增加丢包率[2]。另外，在设计路由协议时，必须充分考虑水声信道特性，如路径损耗严重、传输时延高、噪声严重、带宽受限和多径效应等[3]。此外，水下传感器通常由电池供电，且在水下环境更换电池比较困难，尤其是在深海等恶劣的环境中，因此能源资源的限制加大了路由设计的挑战。

路由协议既要为数据包确定从源节点到目的节点的传输路径，也要负责流量控制和拥塞控制等相关的问题[4]。文献[5]提出了基于深度的路由协议 (Depth-based routing for underwater sensor networks, DBR)，只要节点的深度小于上一跳节点，就可以作为转发报文的备选节点。然而，在稀疏网络场景下，容易出现路由空洞问题，降低包投递率和提高网络能耗。文献[4]提出拓扑感知水下传感网络路由算法，通过 Beacon 包交互感知全局拓扑、建立邻居信息表，结合节点剩余能量与链路可靠性筛选最优下一跳。文献[5]提出 DALRP 协议，依据目的节点方位划定转发区域，随节点密度动态调整转发角度并仿真寻优，采用概率转发机制，为距目的节点更近节点分配更高转发优先级，优化路由性能。文献[6-8]也对水下无线传感器网络路由协议进行了研究。其中，文献[6]设计了一种基于拓扑控制的空洞恢复模式。当节点发现自己位于空洞区域时，向邻居节点广播空洞通知包，并等待回复。然后基于回复包中邻居节点的位置信息，计算并移动至新的深度以恢复通信。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

本文提出了一种空洞避免和负载均衡的水声网络路由协议 (Void-avoidance and energy-balancing routing protocol，VERP)。针对节点移动引发的边缘效应，设计了一种节点位置状态判定方法；同时，借助可持续度识别并筛除空洞节点，分析能耗模型以预估生命周期，达到负载均衡与寿命延长的目的；在此基础上，加权综合位置与生命状态因素构造转发适合度函数，再联合前进有效距离作为节点优先级度量，用于调度数据包沿最优路径传至海面接收点。

一、空洞避免和负载均衡的路由协议

（一）自适应空洞避免方案

1. 空洞节点识别

节点可持续度为节点到达目的地的可达性信息，用于识别节点是否为空洞节点，在网络运行期间，海面汇聚节点会周期性地向整个网络发送通信包 (Communication Package，CP)。CP 由上而下逐级转发，遍历整个网络。CP 包格式如表1所示。

表1 CP 包格式

CP ID	Neigh ID	Dth	Flag

CP 包所含字段包括：CP ID 为控制包标识，Neigh ID 为邻居节点编号，Dth 代表深度信息，Flag 用于标记是否为合格转发节点；节点统计 Flag 即可算出自身可持续度，公式如下。

$$CD(i)=\frac{N_{QFN(i)}}{N_{total(i)}} \tag{1}$$

$N_{total(i)}$ 指的是节点在其有效传输区域内所拥有的邻居节点总数，$N_{QFN(i)}$ 则表示该节点当前可用的下一跳合格转发节点数量，当 CD 取值为 0 时即表明该节点属于空洞节点。

2. 合格转发候选集确定

每个节点的缓存区中设有两个序列，Q1 存放待转发数据包及其等待时间，Q2 记录本节点已发送或更高优先级节点转发过的数据包历史；当节点收到广播数据包时，先将该包标识与两序列中已有标识逐个比对，若已存在则丢弃。若是首次收到该包，则通过可持续度和生命安全状态周期判断自身是否有资格转发数据包。设 $PN(i)$ 为节点 i 的正向邻居集合，该集合中的节点都位于 i 的有效传输区域。i 的合格转发节点的确定条件为：

$$QFNs(i)=\{j\in PN(i)\mid CD(j)>0,T_{safe}>T_{delay}\} \tag{2}$$

T_{safe} 为节点 j 的生命安全状态周期，T_{delay} 为传输数据到下一跳合格转发节点所需的时延。当 j 满足以上条件，则 j 为 i 的合格转发节点，否则，直接丢包。$CD(j)>0$ 表示节点 j 下游链路的节点存在合格转发节点，确保链路可达性，该约束条件将空洞节点排除在路由路径之外。

（二）节点生命状态预测机制

节点传输 m 比特数据包所消耗的能量为：

$$E_{tr}=A(d(i,j),f)\times m\times p_{tr}\times t_{tr} \tag{3}$$

t_{tr} 为传输时间，p_{tr} 为传输功率，$A(d(i,j),f)=A_0\cdot d^k(i,j)\cdot\alpha(f)^{d(i,j)}$ 为路径损耗，其中 A_0，k 和 $\alpha(f)$ 分别为归一化常量，扩散系数和吸收损耗系数，$d(i,j)$ 为传输距离。

节点在接收 m 比特数据时，其能耗表达为式 (4)，式中 p_{re} 代表接收功率，t_{re} 则表示完成数据包接收所需的时间；至于节点监听所产生的能耗，则表示为式 (5)，t_{listen} 为监听时间。

$$E_{re}=m\times p_{re}\times t_{re} \tag{4}$$

$$E_{hear}=E_{listen}\times\left(N_{QFNs(i)}-1\right)\times t_{listen} \tag{5}$$

基于节点的剩余能量，预测节点的剩余生命周期：

$$T_{residual-life}=\frac{E_{left}\times T}{E_{tr}\times\varsigma+E_{re}\times\xi+\left(E_{hear}/T\right)} \tag{6}$$

在采集周期 T 内，节点发送与接收的数据量分别由 ς 和 ξ 表示，剩余能量为 E_{left}。在此基础上，结合能耗率来推算节点在剩余工作时间中进入危险状态的时间节点，据此将其生命状态划分为安全与危险两类，如图1所示，具体计算方式如下：

$$T_{critical}=\frac{E_{left}-E_{critical}}{E_{rate}} \tag{7}$$

$E_{critical}=E_{initial}\times 5\%$ 为节点进入危险状态的能量临界值，$E_{initial}$ 为初始能量。预估节点的生命安全状态周期：$E_{rate}=E_{initial}-E_{left}/T$ 为能耗率。

$$T_{safe}=T_{residual-life}-T_{critical} \tag{8}$$

T_{safe} 越大则表明该节点在剩余生命周期内所能维持的有效工作时长也就越长；数据转发过程中危险状态节点无权参与转发，安全状态节点则根据生命状态指示（Life State Indicator，LSI）按一定规则进行转发，具体表达如下：

$$LSI=\frac{T_{safe}}{T_{simulate}} \tag{9}$$

$T_{simulate}$ 为网络运行时间。LSI 越大说明节点存活状态越好，有效工作时间也越长，在路由选择中优先考虑这类节点，可降低因节点失效而出现网络空洞的概率。

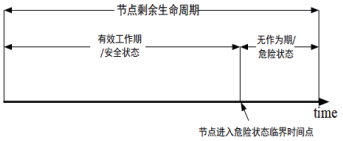


图1节点生命状态示意图

（三）节点位置状态确定

1. 有效传输区域划分

有效传输区域 (Valid Transmission Areas，VTA) 的设定，一方面是为了防止迂回传输现象，另一方面则有助于增加每跳数据转发时的前向有效距离，进而降低传输时延；从图2中可以看到，VTA 被进一步划分为活跃转发区域 A0以及两个良好转发区域 A1和 A2。

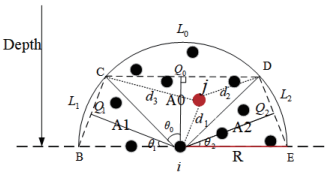


图2 VTA 划分和确定

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

节点收到数据包后先依据与上一跳的相对距离、深度差及几何位置关系判定自身所属区域；在图2中，j 为当前节点，i 为上一跳节点，若 j 的深度小于 i 的深度，则 j 将自身归入 i 的VTA，而后 j 还需判断 i 是否位于以 j 为圆心、d_1 为半径的圆周范围之内，d_1 为 i，j 间的相对距离，$d_1 < R$。满足以上条件后，当 $d_2 < d(C,D) \& d_3 < d(C,D)$，则 $j \in S_{iCL_0D}$，j 判断出其属于 i 的A0区域。当 $d(j,C) < d(C,B) \& d(j,B) < d(C,B)$，即 $j \in S_{iBL_1C}$，则 j 确定其属于 i 的A1区域。否则，当 $d(j,D) < d(D,E) \& d(j,E) < d(D,E)$，$j \in S_{iDL_2E}$，$j$ 属于区域A2。

2. 确定并评估节点位置状态

节点的位置状态由所属区域、可持续度以及通信能力这几方面来共同确定，其中通信能力具体指节点在过去工作周期内对数据分组的传送成功率（Node Packet Delivery Ratio，NPDR），其计算方式见式(10)，

$$NPDR = \frac{TotalPkt_{send}}{TotalPkt_{receive}} \tag{10}$$

式中的 $TotalPkt_{receive}$ 和 $TotalPkt_{send}$ 各自代表节点接收到的总分组数和成功完成转发的分组数；由于不同节点在上述三个指标上存在差异，所对应的位置状态也会有所区分，所以表2依据这三个影响因素对位置状态做了等级划分，对于处在反向位置状态的节点以及被识别为空洞的节点，则直接丢包，不参与后续的数据转发流程。

表2 节点位置状态等级描述

所属区域	可持续度	NPDR	位置状态等级
A0	$\frac{1}{2} < CD < 1$	$0.5 < NPDR < 1$	最优位置状态 S_O
A1或A2	$\frac{1}{2} < CD < 1$	$0.5 < NPDR < 1$	次优位置状态 S_N
A0	$0 < CD < \frac{1}{2}$	$0 < NPDR < 0.5$	良好位置状态 S_G
A1或A2	$0 < CD < \frac{1}{2}$	$0 < NPDR < 0.5$	一般位置状态 S_C
无	*	*	反向位置状态 S_B
*	$CD = 0$	*	空洞节点

为了量化节点的位置状态，设置位置状态指示(Position State Indicator，PSI)：

$$PSI = Grade(\alpha CD + \beta NPDR + \varepsilon VTA) \tag{11}$$

$Grade$ 代表位置状态等级，$\alpha + \beta + \varepsilon = 1$，$\varepsilon$ 为所属区域的调整因子，α 对应可持续度调整因子，β 为通信能力调整因子。由公式可见，若节点同属一个状态等级，还需对比不同位置状态影响因素，以选出位置状态最优者。

（四）机会转发策略

针对水声网络自身特性与客观局限，引入加权机制来计算合格转发节点所对应的转发适合度函数(Forward Fitness Value，FFV)。表示为：

$$FFV = \delta \times PSI + \sigma \times LSI \tag{12}$$

其中位置状态与生命状态分别对应权重因子 δ 和 σ，二者需满足约束条件 $\delta + \sigma = 1$，并且可以结合实际工况与应用场景对这两个权重因子做自适应调节。

合格转发节点收到数据包后，根据自身的转发优先级执行转发策略。VERP基于数据包持有时间来分配节点优先级，等待时间越短，节点的优先级越高。数据包持有时间计算为：

$$T_{retain} = [\eta - \gamma FFV(j)] rand[0,1] + \frac{R - d(i,j)}{v} \tag{13}$$

公式中的 η 和 γ 为给定常量，v 则代表水下声速；引入0到1之间的随机数可防止FFV相等的节点出现重复，进而避免转发冲突，并且FFV取值越大所对应的等待时间就越短，节点的优先级也就越高。第二部分反映了由于距离转发节点的远近不同，节点需要额外等待的时间。

节点收到包后，根据当前自身相关信息在本地自动生成路由决策，以提高协议的动态适应性。数据包转发算法描述如下：

输入：Q1，Q2，T_{retain}，数据包 Pkt
输出：转发或丢弃 Pkt
begin
if $Pkt \in Q_1 \cup Q_2$
丢弃 Pkt
else
if 满足条件：位于转发节点所属区域且 $CD > 0 \& T_{safe} > T_{delay}$
将 Pkt 插入Q1
计算 T_{retain} 并启动定时器
else
丢弃 Pkt
end if
repeat
if 合格转发节点监听到 Pkt 已被高优先级节点转发
其他低优先级节点取消定时器并丢弃 Pkt，同时将 Pkt ID记入Q2
else
高优先级节点转发失败
次高优先级节点转发 Pkt
end if
until T_{retain} 到期
if Pkt 未被转发
更新 Pkt 中的深度并将 Pkt 插入Q1排队等待转发
end if
end

数据包转发策略中，空洞节点通过自我意识并抑制对包的转发，避免了路由空洞现象。由于合格转发节点至少存在一条到达目的地的可持续路径，保障了数据的可靠传输。路由协议总流程图如图3所示。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

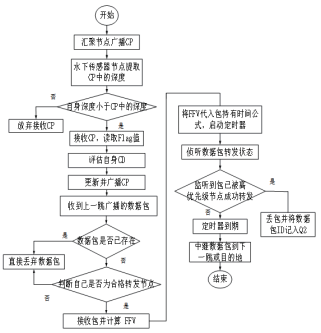


图3路由协议总流程图

仿真结果及分析

为了测试 VERP 的性能，考虑了投递率、网络生存周期、剩余能量标准差以及端到端时延四种指标对网络性能进行仿真分析，并与 DBR 和 GEDAR 协议进行性能对比，具体仿真配置如下：网络场景设定为3km×3km×1.5km 的三维区域，节点数量在100到350之间随机布设，通信半径设为500m，传输速率10kbps，发送功率2W，接收功率0.1W，空闲监听功率为10mW；节点按照泊松分布每5s 生成一个数据包，包大小为50bytes，权重因子分别为和；海面汇聚节点初始能量设为1000J，水下传感器节点为360J，声速取1500m/s；节点移动遵循 Random Walk 2D 模型，在水平方向上以1m/s 至6m/s 的速度做随机运动。

如图4所示，随着节点数量不断增多，各协议的投递率均表现出上升的趋势。VERP 依据数据包保留时长降低转发冲突概率，转发适合度越大的节点优先级越高，同时依靠可持续性与生命状态周期发现并剔除空洞节点，保证链路可达，避免路由空洞丢包。

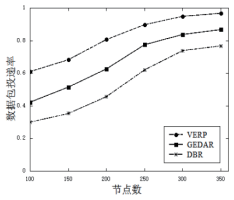


图4投递率 VS 网络密度

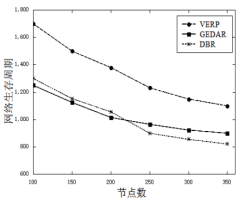


图5网络生命周期 VS 网络密度

图5所示，在 VERP 中，把更高转发优先级赋予生命状态更好的节点，规避消耗过量导致的提前失效，实现网络负载均衡。同时，节点基于本地做出路由决策，减轻信令交互开销，延长了节点工作时间，最终延长整个网络生命周期。

如图6所示，VERP 网络剩余能量标准差表现最为平滑。VERP 基于 FFV 灵活改变节点转发优先级，使得生命安全状态周期越长的节点优先级越高，平衡了网络中节点的负载和能量使用，实现网络负载均衡。

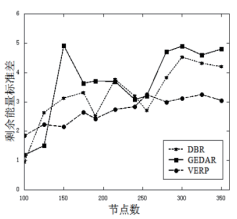


图6剩余能量标准差 VS 网络密度

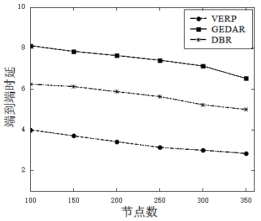


图7端到端时延 VS 网络密度

从图7可以看出，端到端时延随着节点数增加而逐渐降低，这是由于随着节点数增加，可以找到更靠近目的地的节点机会越大。VERP 将数据分组投递到目的地所花时延最少，DBR 次之，而 GEDAR 时延最高。

二、结语

水声传感网络部署稀疏、拓扑动态、能量受限等特性所导致的路由空洞和低能效问题亟待解决。针对节点移动带来的链路不稳定，VERP 协议通过能耗模型完成生命周期预测，再依据可持续性和生命状态两项指标设计空洞避免策略，同时给出节点位置状态的确定方式，并引入加权方法，结合位置和生命状态计算转发适合度，最终联合适合度与前进有效距离实现机会转发。仿真结果显示 VERP 协议在提升投递率的同时也在均衡负载和降低时延方面取得了改善。

参考文献

[1] Roy, A, Roy, S, Metya, SK. Hybrid message encoding based routing protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. TELECOMMUNICATION SYSTEMS, 2026, 89(1): 629-659.

[2] Alqahtani, GJ , Bouabdallah, F . Routing protocols based on node selection for freely floating underwater wireless sensor networks: a survey[J]. EURASIP JOURNAL ON WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING, 2023,(1).

[3] 李冲 . 水下传感器网络路由协议研究 [D]. 西宁：青海师范大学，2024

[4] 杨健敏 , 王佳惠 , 乔钢 , 等 . 水声通信及网络技术综述 [J]. 电子与信息学报 ,2024,46（1）:1-21.

[5] Yan H, Shi Z J, Cui J H. DBR: Depth-based routing for underwater sensor networks[J]. Ad Hoc and Sensor Networks, 2008, 4982: 72-86.

[6] 王冬梅 . 基于拓扑感知的水下传感网络路由 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报 ,2021,19(5):934-938.

[7] 杜汶晋 . 水下无线传感器路由优化与安全性研究 [D]. 电子科技大学 ,2025.

[8] Latif K, Javaid N, Ahmad A, Khan Z A, Alrajeh N, Khan M I. On energy hole and coverage hole avoidance in underwater wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors, 2016, 16(11): 4431-4442.

[9] Nazareth,P and Chandavarkar, BR. Cluster-Based Multi-attribute Routing Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks[J]. WIRELESS PERSONAL COMMUNICATIONS, 2024, 134(2): 781-808.

[10] Wang, Y, Xia, N ,Yin, YT,Wei, SZ .Bargaining Game-Based Opportunistic Routing Protocol for Underwater Sensor Networks[J].IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS,2025,73(11), 10290-10304.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License