

# 一种可调节转发区域的水下传感器路由

王鑫<sup>1,2</sup>, 张文森<sup>2</sup>, 覃琴<sup>2</sup>

(1. 桂林电子科技大学 计算机与信息安全学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林电子科技大学 海洋信息工程学院, 广西 北海 536000)

**摘要:** 水下无线传感器网络路由是水下物联网重要组成部分, 可靠高效节能是水下无线传感器网络路由最关心的问题; 针对水下无线传感器网络节点路由中能量消耗不均衡和过多冗余转发增加能耗而导致水下无线传感器网络生存周期缩短的问题, 提出一种可调节转发区域的水下传感器路由协议 (ESAFDBR); ESAFDBR 路由协议考虑了当前节点深度和剩余能量, 还考虑节点两跳邻域内信息, 以这种方式有效减少网络遇到空洞的可能性, 平衡网络能量; 此外, 为抑制冗余节点参与转发, 设计划分转发区域, 并可根据节点密集程度自适应调整划分区域, 有效地提高网络性能。

**关键词:** 水下无线传感器网络; 生命周期; 节点密度; 转发区域; 剩余能量

## An Energy-saving Underwater Opportunistic Routing Protocol with Adjustable Forwarding Area

WANG Xin<sup>1,2</sup>, ZHANG Wensen<sup>2</sup>, QIN Qin<sup>2</sup>

(1. College of Computer and Information Security, Guilin University Of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. College of Ocean Information Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Beihai 536000, China)

**Abstract:** Underwater wireless sensor network routing is an important part of the underwater Internet of Things. Reliability, high efficiency and energy saving are the most concerned issues of underwater wireless sensor network routing. Aiming at the problem of unbalanced energy consumption in the routing of underwater wireless sensor network nodes and excessive redundant forwarding and increasing energy consumption, the life cycle of underwater wireless sensor networks is shortened. An underwater sensor routing protocol with adjustable forwarding area is proposed (An energy-saving underwater opportunistic routing protocol with adjustable forwarding area, ESAFDBR). The ESAFDBR routing protocol considers the current node depth and remaining energy, and also considers the information in the node's two-hop neighborhood. In this way, it effectively reduces the possibility of the network encountering holes and balances the network energy. In addition, in order to prevent redundant nodes from participating in forwarding, the division of forwarding areas is designed, and the divided areas can be adjusted adaptively according to the density of nodes, effectively improving network performance.

**Keywords:** UWSN; life cycle; node density; forwarding area; residual energy

## 0 引言

当前水下无线传感器网络路由主要挑战依旧是传感器节点携带能量有限, 且充电难度大。水下无线传感器网络部署在水环境中, 采用水声通信, 声波信号衰减快、通信时延高<sup>[1]</sup>, 节点在水下充电困难<sup>[2]</sup>, 给无线传感器网络的应用带来极大的挑战。近年来, 越来越多的机构<sup>[3-5]</sup>和高校<sup>[6-10]</sup>研究者们致力于设计可靠、高效、负载均衡的节能路由协议<sup>[11]</sup>。文献 [12] 提出经典的 DBR 路由协议, 节点通过深度信息转发数据。文献 [13] 在 DBR 基础上进行改进, 提出基于分层的路由协议 Layered-DBR, 节点进行一次信息广播后, 只允许指定深度范围内的节点进行信息接

收, 以达到控制网络副本的目的<sup>[14]</sup>。为了延长 DBR 协议的网络生存周期并平衡能量消耗, 文献 [15] 提出一种考虑剩余能量水平的能量有效路由协议 EEDBR, 在 EEDBR 协议中, 通过比较节点深度信息和剩余能量的加权权重决定每个节点转发数据的优先级。当节点接收到广播的数据包后, 考虑深度和能量计算自身的权重值。文献 [16] 和文献 [17] 基于分簇对路由进行研究。文献 [18] 将强化学习应用到路由算法中, 提出了一种基于深度的 Q-Learning 机会路由协议 EDORQ。文献 [19] 提出一种基于蚁群优化算法的水下无线创拿起网络分簇路由算法, 通过蚁群算法提高寻找最优路径效果。

上述这些路由协议都是基于 DBR 思想进行改进, 在路

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-13。

基金项目: 广西自然科学基金项目(2019GXNSFAA245053); 广西科技重大专项(桂科 AA19254016)。

作者简介: 王鑫 (1976-), 男, 陕西西安人, 硕士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事无线传感器网络及与计算技术方向的研究。

覃琴 (1985-), 女, 广西桂林市人, 硕士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事无线传感器网络方向的研究。

引用格式: 王鑫, 张文森, 覃琴. 一种可调节转发区域的水下传感器路由[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(10): 233-238.

由过程中,所有的数据包都是从深度较深的节点向上转发给深度较浅的节点,沿着汇聚节点的方向发送数据,很容易导致负载不均衡和能量消耗不均衡。本章针对水下无线传感器网络能量消耗不均衡和路由过程中过多冗余节点参与转发增加能耗的问题,提出一种可调节转发区域的水下传感器路由协议(ESAFDBR, an energy-saving underwater opportunistic routing protocol with adjustable forwarding area)。该算法可以实现能量平衡和减少冗余节点转发产生的能耗。在 ESAFDBR 中,通过划分转发区域,并根据邻居节点密集程度自适应调整转发区域,有效抑制冗余节点参与转发。其次,考虑节点的深度、剩余能量和节点两跳邻域内节点数计算加权值控制转发节点的转发优先级。整体上实现负载均衡,均衡网络节点能量消耗,从而提高整体网络的生存周期。

## 1 系统模型

### 1.1 网络结构

ESAFDBR 采用多汇聚节点(Sink)的水下无线传感器网络结构模型,如图 1 所示。

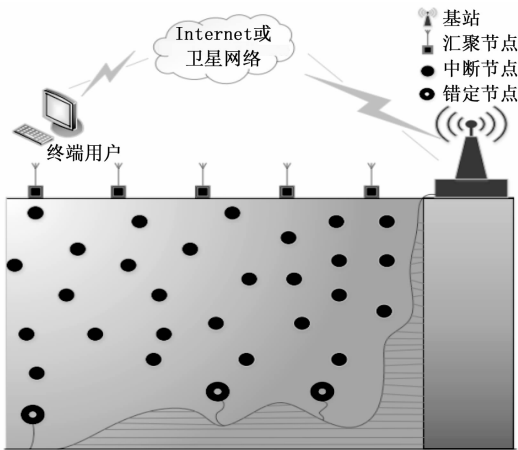


图 1 水下无线传感器网络结构图

水下无线传感器网络可由部署在水面和在水下的节点组成。部署在水下的节点可分为锚定节点和中继节点,其中锚定节点固定在海洋等水底部,位于网络最底层的用于采集数据的节点,锚定节点一般发送数据不接受数据。中继节点随机分布在水中不同位置,配置有声学调制解调器,既可以发送数据也可以接收数据,通常担任源节点和目的节点间通信的中继者身份。部署在水面的节点通常称为汇聚节点,配置有声学调制解调器和无线电调制解调器。汇聚节点可以控制从水下节点收发声学信息,也可以发射和接收远程射频信号,以便与岸上基站进行通信。汇聚节点是水下传感器节点和陆地上基站中通信间的一个中继节点,收集到的数据可用于本地或者连接到另一个网络用于某种特定目的<sup>[20]</sup>。由于信号在水中的衰减特性,在水下,声学通信是最流行和使用最广泛的通信介质。汇聚节点可通过

无线电等介质与岸上基站通信。基站通过 Internet 或卫星网络将处理好的信息发送给终端用户使用。假设锚定节点采集到数据后,向汇聚节点发送消息,只要消息顺利到达汇聚节点后,都会成功传送到陆地基站。ESAFDBR 只专注于将消息从锚定节点成功发送到汇聚节点的过程。

### 1.2 能耗模型

水下环境影响能量消耗和声信号的传播速度,本章节采用的是 Stojanovic 提出的典型水下信道传播模型<sup>[21]</sup>。水声信道在水下传感器网络中衰减模型可以表示为:

$$10\log A(d, f) = k \times 10\log d + d \times \log \alpha(f) \quad (1)$$

其中: $k$ 是扩散系数, $k$ 的值可能是 1, 1.5 和 2,当  $k=1$  时表示浅水区的圆柱性扩展,当  $k=1.5$  时为实际扩展,当  $k=2$  时意味着深水区域的球形扩展。 $f$  为信号频率, $\alpha(f)$  表示水环境的吸收系数,其与信号频率  $f$  的关系可以表示为:

$$10\log \alpha(f) = \frac{0.1f^2}{1+f^2} + \frac{40f^2}{4100+f^2} + \frac{2.75f^2}{10^4} + 0.003 \quad (2)$$

由公式(2)可以得出,吸收系数  $\alpha(f)$  随着信号频率  $f$  增加而增加,也就是说,频率越高将会造成信号的衰减越严重,这也是为什么水声信号在水中可用的带宽有限的原因。公式(2)适用于高频信号,当信号频率是低频信号时,吸收  $\alpha(f)$  与  $f$  可以使用如下公式表示:

$$10\log \alpha(f) = \frac{0.1f^2}{1+f^2} + 0.001f^2 + 0.002 \quad (3)$$

水下信道噪声由各种噪声叠加,在水环境中影响比较严重的噪声有湍流噪声  $N_t(f)$ 、船舶航运噪声  $N_s(f)$ 、海浪噪声  $N_w(f)$  和热噪声  $N_m(f)$ , 可以表示为:

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_m(f) \quad (4)$$

在水声信道中,当声信号频率为  $f$ ,传播距离为  $d$  出的接收器处信噪比可表示为:

$$SNR(f, d) = P(f) - A(d, f) - N(f) + DI \quad (5)$$

其中: $P(f)$ 表示发射器频率为  $f$  的发射功率, $A(d, f)$  为衰减, $N(f)$  为噪声, $DI$  是方向性指数,通过重定向水听器来避免噪声的节点质量。除此外,声音调制解调器也会对水声通信有影响,因为它也是声音通道中的组成部分。

## 2 问题描述

传统 DBR 路由协议路由过程中,所有的数据包都是从深度较深的节点向上转发给深度较浅的节点,沿着汇聚节点的方向发送数据。每个数据包都携带记录发送该数据包节点的深度信息的字段,并且在每次发送信息的时候更新。接收节点计算与上一节点深度差,深度差越大该节点获得的转发权限优先级越高。这很容易导致负载不均衡和能量消耗不均衡,因为处于较好位置的节点会被频繁选为转发节点,容易陷入局部最优。如图 2 所示,接收到节点 S1 和 S2 转发数据的节点中, A 点都处于最佳转发节点的位置,因此 A 节点会被频繁选为转发节点过度消耗能量。

此外,在图 2 中可以观察到,当 A 选做转发节点转发

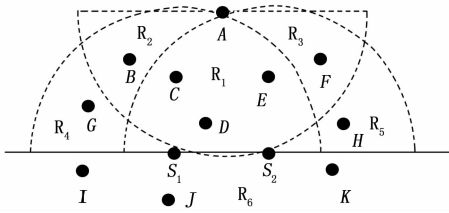


图 2 传统 DBR 路由策略

数据包时,  $R_1, R_2, R_3$  区域的节点都可以收到节点 A 的抑制作用, 不会继续转发数据包。而  $R_4$  和  $R_5$  区域内的节点在等待时间结束后会继续转发接收到的数据包, 因为它们并不在节点 A 的转发范围内, 无法接收到节点 A 发送的抑制信号。这样, 造成冗余转发而浪费能量, 若在节点分布稀疏区域, 冗余转发可以提高通信的可靠性, 但是如果是在密集区域内就会造成多余的能量消耗。

本章提出一种可调节转发区域的水下传感器路由协议 ESAFDBR, ESAFDBR 不仅考虑了节点的深度信息和剩余能量信息, 在传输过程中使网络实现负载均衡。同时还考虑了两跳节点邻域信息, 以此避免节点陷入局部最优。为了减少冗余转发增加能耗, ESAFDBR 设计划分转发节点区域策略, 将初始转发区域划分为 Reuleaux 三角形, 利用 Reuleaux 三角形特性抑制冗余节点, 并且设计转发区域可根据节点邻域内的节点密集程度自适应调整, 增强网络的鲁棒性和自适应性。以下结构介绍 ESAFDBR 的设计。

### 3 ESAFDBR 路由算法设计

#### 3.1 ESAFDBR 数据包结构

ESAFDBR 包含 3 种数据的信息, 分别为邻居请求消息 (NEIGHBOR INVITE), 应答消息 (ACK) 以及数据信息 (DATA), 每种消息类型通过数据包携带的数据类型 ID 字段区分, 分别为 00, 01, 10。在同一个水下传感器网络中, 每个传感器节点都有自身独立的 ID 编号, 且不会有重复的 ID 编号。

邻居请求信息用来查找邻域信息, 统计自身可用路由数量, 其包括 4 个域, 如图 3 所示, 数据类型 ID 为 “00”, 源节点 ID 表示发送邻居请求消息的传感器节点 ID, 该节点的深度和能量存放数据包节点深度和剩余能量字段中。包序号用来区别不同数据包, 数据包的编号可由 “数据类型 ID+源节点 ID+发送序号” 组成。

数据类型ID	包序号	源节点ID	节点深度	剩余能量
--------	-----	-------	------	------

图 3 邻居请求和回应数据包格式

应答信息用来回应邻居请求信息。数据包格式与邻居请求消息格式一样, 如图 3 所示, 其数据类型 ID 为 “01”, 源节点 ID、节点深度和剩余能量字段的信息分别为自身节点 ID、当前深度和当前剩余能量。包序号保留接收到请求的包序号, 表示此消息是回应邻居请求的消息。

数据信息格式包括 7 个域, 如图 4 所示。其数据类型 ID 为 “10”, 源节点 ID 为转发节点 ID, 包序号为锚定节点首次发送时组成的序号, 中间转发不能修改包序号, 以免同一节点重复多次转发相同的数据包。源节点 ID、深度和能量分别为发送数据包节点的 ID, 当前深度和当前剩余能量。转发角是控制划分转发区域, 有 60, 120 和 180 三个值, 当为 60 值选择使用 Reuleaux 三角形转发区域, 当值为 120 时选择使用张角为 120 度的锥形转发区域, 当值为 180 时, 与 DBR 路由协议一样所有接收到数据的节点都是潜在转发节点。

数据类型ID	包序号	源节点ID	深度	能量	转发角	DATA
--------	-----	-------	----	----	-----	------

图 4 数据信息格式

每个节点在存储器中需记录邻居信息请求过程中收集到的邻居节点的个数, 以此判断邻居节点的密集程度, 转发数据时更新数据包中的转发角字段。

#### 3.2 转发区域

ESAFDBR 划分转发区域是为了更好地抑制冗余节点, ESAFDBR 将转发区域节点尽量限制在  $S_0$  区域, 区域  $S_0$  是一个 Reuleaux 三角形形状的区域。如图 5 所示, 假设水下无线传感器节点的通信范围半径为  $R$ 。

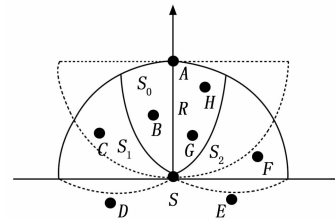


图 5 ESAFDBR 转发区域的划分

$S_0$  区域是由 3 个半径为  $R$  的圆环相交得到的 Reuleaux 三角形。根据 Reuleaux 三角形的性质<sup>[22]</sup>, 所划分出来的莱洛三角形内任意两点的距离最大为  $R$ 。所以, 在图中当节点 S 发送数据是, 区域内节点 A、B、C、D、E、F、G、H 都可以接收到数据包, D、E 因为深度小于 S 的深度, 判断为没有转发权限丢弃数据包。C、F 计算自身的位置并不在  $S_0$  转发区域内, 不具备转发节点的权限也丢弃数据包。A、B、G、H 节点通过计算优先级, 节点 A 优先级较高, 最先发送转发数据包, 当节点 A 转发数据包时, B、G、H 节点都能接收到数据包, 因为 A、B、G、H 都位于同一个半径为  $R$  的 Reuleaux 三角形中, 在这区域中任何节点都能接收到节点 A 发送的数据信息, 因此都能收到节点 A 的抑制作用, 从而也达到了限制冗余节点转发的效果。

#### 3.3 确定所属区域

如图 6 所示, 主转发区域是由 3 个半径为  $R$  的圆组成的 Reuleaux 三角形,  $L_1, L_2, L_3$  三条弧线可以使用式 (6) 表示:

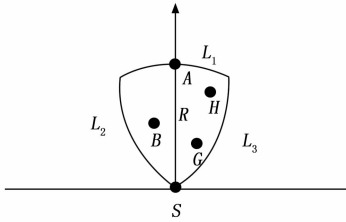


图 6 Reuleaux 转发区域的数学模型

$$\begin{cases} L_1: x^2 + y^2 = R^2, (-\frac{R}{2} \leq x \leq \frac{R}{2}) \\ L_2: (x - \frac{R}{2})^2 + (y - \frac{\sqrt{3}R}{2})^2 = R^2, (-\frac{R}{2} \leq x \leq 0) \\ L_3: (x + \frac{R}{2})^2 + (y - \frac{\sqrt{3}R}{2})^2 = R^2, (0 \leq x \leq \frac{R}{2}) \end{cases} \quad (6)$$

转发区域内节点都在这 3 条弧线围成的区域内，可以通过如下式子表示：

$$\begin{cases} x^2 + y^2 \leq R^2, (-\frac{R}{2} \leq x \leq \frac{R}{2}) \\ (x - \frac{R}{2})^2 + (y - \frac{\sqrt{3}R}{2})^2 \leq R^2, (-\frac{R}{2} \leq x \leq 0) \\ (x + \frac{R}{2})^2 + (y - \frac{\sqrt{3}R}{2})^2 \leq R^2, (0 \leq x \leq \frac{R}{2}) \end{cases} \quad (7)$$

当邻域内水下传感器节点密度大的时候，以控制冗余转发为主要目的，可以使用式 (7) 确定 Reuleaux 三角形区域选择转发节点。当邻域内水下传感器节点比较稀疏时，冗余节点参与转发数据有利于增强水下传感器网络的可靠性，此时，ESAFDBR 自适应调整夹角，扩大转发区域，转换为锥形转发区域，如图 7 所示，依次扩大转发区域夹角，分别为 120°和 180°。当夹角变为 180°时，则是 DBR 路由协议的路由策略。

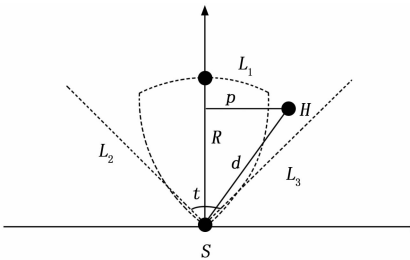


图 7 锥形转发区域

通过以下式子确定节点是否属于锥形转发区域内的节点，设 H 节点位置为  $(H_x, H_y)$ ，S 节点位置为  $(S_x, S_y)$ ，三维坐标同样的计算方式， $\theta$  是存放在数据包中的数据，通过邻居信息收集时得到的邻居节点数判断邻居节点的数量决定  $\theta$  的值。当  $\theta = 180$  时，其实就变成 DBR 路由协议。

$$\begin{cases} \sin(t) = \frac{p}{d} \\ d = \sqrt{(H_x - S_x)^2 + (H_y - S_y)^2} \\ p = H_x - S_x \\ t < \theta \end{cases} \quad (8)$$

### 3.4 ESAFDBR 计算加权策略

为了更好地选择转发节点，ESAFDBR 路由协议中，既考虑了节点的能量效率，还将节点信息的计算扩展到了两跳邻域。计算当前节点的深度、剩余能量以及拥有下一跳潜在转发节点的数量，通过这样既可以平均能量消耗，实现负载均衡，还能提前预测空洞，避免节点遇到空洞信息。数据包转发优先级通过计算转发等待时间  $HT$  (holding time) 来实现，节点转发时间  $HT$  越小则越先转发数据包。每个节点接收到数据包后，要先计算自己转发等待时间  $HT$ ，计算  $HT$  可以使用以下公式：

$$HT = \frac{2\tau}{\delta} (\lambda_1 \times (R - \Delta d) + \lambda_2 \times (1 - \frac{E_{cur}}{E_{init}}) + \lambda_3 \times b), \delta \in (0, R] \quad (9)$$

$$\tau = \frac{R}{c} \quad (10)$$

$R$  为水下传感器节点的传输范围， $\Delta d$  为当前节点与上一跳节点的深度差， $E_{cur}$  和  $E_{init}$  分别表示节点当前剩余能量和节点初始能量， $b$  表示当前节点存在下一跳的节点数，该数据在发出邻居信息请求时，统计收到的回应消息，选择并统计合适的节点数，并存放在节点存储器中，保持实时更新。 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  分别为深度差加权系数、剩余能量加权系数和下一跳邻域节点数量加权系数。 $\delta$  随具体环境变化需要取值，如果选择较小的  $\delta$ ，数据包的  $HT$  会增长，参与转发的数据包能够得到更好的抑制，能耗也会减少，但是节点间端到端的延时则会增加。 $\tau$  的计算 (10)， $c$  为声音在水中的传播速度，约等于 1 500 m/s。

### 3.5 ESAFDBR 算法处理介绍

ESAFDBR 路由协议具体实现步骤如下，分为邻居节点请求信息处理流程和节点收到数据信息时的处理流程。

邻居请求消息处理流程：

Step1: 水下传感器节点定期向邻居广播邻居请求消息，数据类型 ID+源节点 ID+发送序号”组成的包序号，以此区分数据包。

Step2: 收到邻居请求消息的节点，判断数据包时邻居请求类型数据包，然后对比自身深度如果小于数据包中深度，发送回应消息，字段携带有原序列号。

Step3: 发送节点收到回应消息，更新邻居潜在转发节点的个数。

节点收到数据包信息时处理流程如下：

Step1: 判断接收到的数据包文类型是否是数据包类型“10”，判断自身是否是潜在转发节点，如果不是潜在转发节点则不参与转发并丢弃该数据包。如果是潜在转发节点则查看邻居潜在转发节点的个数，如果为 0 则不参与转发并丢弃该数据包，通过这种方式可以避免下一跳遇到空洞，如果邻居潜在转发节点个数不为 0，则继续下面步骤。

Step2: 判断节点是否在转发区域内，如果节点不在转

发区域内, 则不具备转发权限并丢弃该数据包, 继续等待下一个数据包。

Step3: 如果节点位于转发区域中, 计算保活时间, 然后等待发送。

Step4: 等待期间内如果收到该数据包的抑制信号, 该节点将放弃转发该数据包, 否则, 等待时间结束后, 将继续转发该数据包。

## 4 实验仿真与结果分析

本实验将对 ESAFDBR 路由协议与现有路由协议 DBR 和 EEDBR 进行性能比较和分析。

### 4.1 仿真环境

实验的仿真使用 Matlab 建立水下无线传感器网络仿真平台进行路由仿真。在实验仿真过程中, 使用不同数量的传感器节点 (50~600 个) 进行实验仿真。每一次比较的网络拓扑都是随机生布局的, 3 种路由策略作用于同样拓扑结构的网络进行仿真模拟。因为实验可能会产生误差, 为了减少实验结果收误差的影响, 实验结果取 30 次仿真运行的平均值。部分仿真参数如表 1 所示。

表 1 实验参数设置

参数	仿真取值
仿真区域	100 m * 100 m
节点个数	50~60 个
通信半径	20 m
初始能量	100 J
仿真通信速度	1 m/s
数据包大小	64 bytes
MAC 路由	IEEE 802.11
对比的算法	DBR、EEDBR

### 4.2 实验结果与分析

#### 4.2.1 网络生命周期

实验中定义的生命周期为第一个节点的能量消耗完时, 源节点发送数据包的轮次。如图 8 所示, 由于 DBR 深度较小的节点经常被用于转发数据包, 因此这些节点的能量会很快就被耗尽了。本文定义第一个节点的能量完全耗尽时, 即在网络中出现第一个节点死亡时, 源节点发送数据包的轮次数作为网络的生命周期。如图 8 所示, 由于 DBR 选择具有较小深度的节点来频繁地传输数据, 导致这些节点能量被迅速耗尽而死亡。EEDBR 和 ESAFDBR 采用了深度和能量加权的方式, 在深度与能量共同加权的策略下, 传感器节点能够有效地平衡网络节点的能量消耗。因此, 在传感器节点将能更长时间保持活动状态。此外, 较低的冗余能耗是提高网络寿命的另一个因素。DBR 无法避免冗余的分组传输, 具有相似深度的节点也具有相似的保持时间。因为转发节点通信范围外的节点无法接收到抑制消息, 在 DBR 和 EEDBR 中这些相同的分组被相继发送。在 ESAFDBR 中, 能够大量限制这类传感器节点参与转发, 因为转发

节点受到节点的深度和剩余能量限制外, 通过转发区域的划分, 能够避免转发节点传输范围之外的节点继续发送, 随着节点数量的增多, 抑制冗余节点的效果优于 EEDBR 和 DBR。ESAFDBR 转发区域可随着节点密度自适应调整, 能增强网络的鲁棒性。ESAFDBR 考虑了两跳的节点信息, 有效避免遇到空洞情况, 因此, 总体上 ESAFDBR 比 DBR 和 EEDBR 的性能更优。

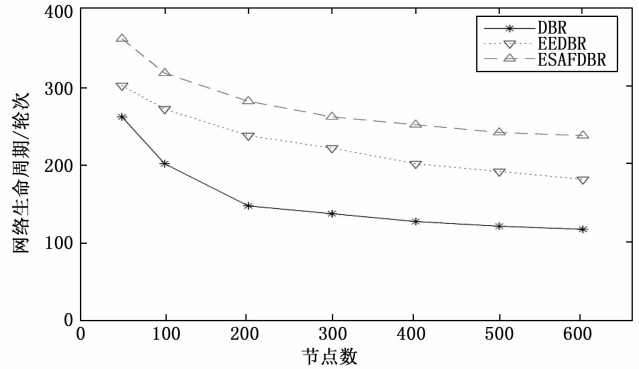


图 8 网络生命周期

#### 4.2.2 能量消耗

本实验定义能量消耗通过数据包从源节点成功发送达到目标节点期间, 水下传感器网络消耗的能量总量来估算。如前所述, DBR 能量消耗比 EEDBR 和 ESAFDBR 更高, 主要是因为在一轮成功转发过程中, DBR 有过多的冗余节点参与了转发, ESAFDBR 通过制定转发区域有更好的抑制冗余节点的作用, 所以图中 ESAFDBR 能耗比 DBR 和 EEDBR 更少。3 种方案能耗都随着节点网络的增加而增加, 这是因为随着网络节点的增加, 更多处于相同深度, 拥有相近保活时间的节点无法被抑制。相比之下, ESAFDBR 通过设置转发区域、深度和剩余能量加权、考虑两跳节点避免空洞等方面更好地抑制冗余及转发。如图 9 所示, 随着网络节点的增加, ESAFDBR 能量消耗小于 DBR 和 EEDBR 的能量消耗。

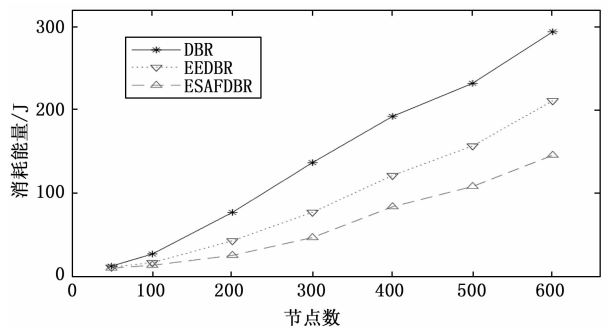


图 9 能效消耗曲线

## 5 结束语

本文针对水下无线传感器网络能量消耗不均衡和路由过程中过多冗余节点参与转发增加能耗的问题, 提出提出

一种可调节转发区域的水下传感器路由协议 ESAFDBR。ESAFDBR 不仅考虑了节点的深度信息和剩余能量信息,在传输过程中使网络实现负载均衡。同时还考虑了下一跳可用邻居节点数,通过这样避免节点陷入局部最优。此外,为了在密集区域中减少冗余转发减少能耗,ESAFDBR 设计划分转发节点区域策略,将初始转发区域划分为 Reuleaux 三角形,利用 Reuleaux 三角形特性有效抑制冗余节点,并且设计的转发区域可根据节点邻域内的节点密集程度自适应调整,增强网络的鲁棒性和自适应性。通过仿真实验可以验证,ESAFDBR 协议能够有效地减少冗余节点参与转发,整体上提高网络的生存周期。

#### 参考文献:

[1] SANDEEP D N, KUMA R V. Review on clustering, coverage and Conecivity in underwater wireless sensor networks: a communication techniques perspective [J]. IEEE Access, 2017, 99: 1-1.

[2] 李志华, 赵 昭, 魏忠诚, 等. UCUBG: 基于等级划分的水下传感器网络非均匀分簇算法 [J]. 控制与决策, 2019, 34 (1): 89-96.

[3] 朱 敏, 武岩波. 水声通信技术进展 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34 (3): 289-296.

[4] 肖星星, 张 阳, 黄海宁. 水下传感器网络高效自适应 TDMA 时隙分配算法 [C] // 中国声学学会 2017 年全国声学学术会议论文集, 中国声学学会, 2017: 2.

[5] 邓大鹏. 水声信号功率放大器的设计与实现研究 [J]. 电子世界, 2019 (2): 165-166.

[6] 胡承昊, 王海斌, 台玉朋, 等. 水声通信信源信道联合均衡译码方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41 (10): 1530-1535.

[7] 廖才强. 水声传感器网络中的分布式波束形成技术 [D]. 厦门: 厦门大学, 2019.

[8] 项 项. 水声信号采集模块研制 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.

[9] 吴雨珊. 自适应调制与功率分配的 OFDM 水声通信技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

[20] 蔡晓云, 尹贺峰. 基于低秩投影与稀疏表示的人脸识别算法 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (17): 244-249.

[21] BASRI R, JACOBS D. Lambertian re ectance and linear subspaces [J]. IEEE PAMI, 2003, 25 (2): 218-233.

[22] GEORGHIADES A S, BELHUMEUR P, KRIEGMAN D. From few to many: illumination cone models for face recognition under variable lighting and pose [J]. IEEE PAMI, 2001, 23 (6): 643-660.

[23] KIM S J, KOH K, LUSTIG M, BOYD S, GORINEVSKY D. A method for large-scale  $l_1$ -regularized least squares [J]. IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2008, 1 (4): 606-617.

[10] 叶 凯. 基于机器学习的水声信号识别技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

[11] 黄 芬, 陈名松. 水下无线传感器网络 DBR 路由协议研究 [J]. 电视技术, 2012, 36 (13): 74-77.

[12] YAN H, Shi Z J, CUI J H. DBR: depth-based routing for underwater sensor networks [C] // Network, 7th International IFIP-7C6, 2008: 72-86.

[13] 彭 舰, 洪昌建, 刘 唐, 等. 基于分层的水下传感器网络路由策略 [J]. 通信学报, 2014, 35 (6): 25-31.

[14] 刘 洋, 彭 舰, 刘 唐, 等. 基于分层的河流水下传感器网络路由算法 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (5): 1183-187.

[15] WAHID, ABDUL, et al. EEDBR: Energy-efficient depth-based routing protocol for underwater wireless sensor networks [C] // Computer Science and Information Technology, 2011: 223-234.

[16] 汪 超. 基于多目标蜘蛛算法的 UWSNs 覆盖保持分簇策略研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2018.

[17] WAN Z P, et al. An energy-efficient multi-level adaptive clustering routing algorithm for underwater wireless sensor networks [J]. Cluster Computing, 2019, 22: 14651-14660.

[18] LU Y J, HE R X, CHEN X J, et al. Energy-efficient depth-based opportunistic routing with Q-Learning for underwater wireless sensor networks [J]. Sensors, 2020, 20 (4): 1-25.

[19] 蒋 华, 蔡振海, 王 鑫. 基于蚁群的水下无线传感器网络能量路由协议 [J]. 微电子学与计算机, 2017, 34 (8): 12-16.

[20] MAINDALKAR, ANURADHA A, ANSARI S M. Design of robotic fish for aquatic environment monitoring [J]. Computer Applications, 2015, 117 (17): 31-34.

[21] XIE P, ZHOU Z, NICOLAOU N, et al. Efficient vector-based forwarding for underwater sensor networks [J]. Wireless Communications and Networking, 2010: 1-13.

[22] BERNARD N C H, YIP F W. Reuleaux triangle disks: new shape on the block [J]. American Chemical Society, 2014, 136 (37): 12840-12843.

[24] JONES J P, PALMER L A. An evaluation of the two-dimensional gabor filter model of simple receptive fields in cat striate cortex [J]. Journal of Neurophysiology, 1987, 58 (6): 1233-1258.

[25] 杜海顺, 张旭东, 金 勇, 等. 基于 Gabor 低秩恢复稀疏表示分类的人脸图像识别方法 [J]. 电子学报, 2014, 42 (12): 2386-2393.

[26] 何林知, 赵建民, 朱信忠, 等. 基于低秩矩阵恢复与协同表征的人脸识别算法 [J]. 计算机应用, 2015, 35 (3): 779-782.

[27] SHEN L, BAI L. A review on gabor wavelets for face recognition [J]. Pattern Analysis and Application, 2006, 9 (2): 273-292.

(上接第 227 页)