

# 水下无线光通信传感器网络路由算法的研究

秦浩然, 解志斌\*, 翁智辉

江苏科技大学电子信息学院, 江苏 镇江 212000

**摘要** 水下环境的多变性导致水下无线光通信传感器网络中个别节点无法满足视距传输的要求。为了恢复节点间的有效通信, 基于中继协作传输方式, 将混合指数广义伽马模型中的误码率作为中继选择指标提出了一种中继路由算法。为了确保所选中继节点在低能耗条件下能解决传感器网络中的链路故障问题, 在中继选择时考虑了节点成功通信的功率阈值。仿真结果表明, 该重建传输链路的中继协作路由算法可以在保证节点传输误码率符合要求的同时最大化网络的生命周期。

**关键词** 光通信; 水下无线光通信; 中继选择; 混合指数广义伽马模型; 误码率

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1106009

## Research on Routing Algorithm in Underwater Wireless Optical Communication Sensor Networks

Qin Haoran, Xie Zhibin\*, Weng Zhihui

*School of Electronic and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212000, China*

**Abstract** Due to the variability of the underwater environment, individual nodes in the underwater wireless optical communication sensor network cannot meet the requirements of line-of-sight transmission. In order to restore effective communication between nodes, this paper proposes a relay routing algorithm based on relay cooperative transmission method, and the bit error rate of the mixture exponential-generalized Gamma model is used as the relay selection metric. In order to ensure that the selected relay node can solve the link failure problem in the sensor network under the condition of low energy. In terms of relay selection, consider the power threshold when the node communicates successfully. The simulation results show that the relay cooperative routing algorithm for reconstructing the transmission link can guarantee low bit error rate and maximize the network lifecycle simultaneously.

**Key words** optical communications; underwater wireless optical communication; relay selection; mixture exponential-generalized Gamma model; bit error rate

**OCIS codes** 060.4510; 060.4251; 060.4257

## 1 引言

水下无线通信指在水环境中通过无线方式传输

数据, 载体可以是声波、光波。相比传统声学方法, 水下无线光通信(UWOC)在短距离内能提供更高的传输速率, 且具有传输时延小、收发机成本低的优

收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2020-12-07; 录用日期: 2020-12-17

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20190956)

\*E-mail: xiezhbin@just.edu.cn

势,逐渐引起了研究人员的关注<sup>[1-3]</sup>。在 UWOC 的传输环境方面,Oubei 等<sup>[4]</sup>研究了水下温度变化时湍流对 UWOC 系统信道衰落的影响,结果表明,可以用广义伽马分布模拟温度引起的湍流。Zedini 等<sup>[5]</sup>提出的混合指数伽马模型可以有效表征 UWOC 中湍流对信道的影响,并进一步研究了气泡、温度和盐度梯度对 UWOC 系统信道衰落的影响,提出了一种混合指数广义伽马(EGG)分布模型,可描述气泡和温度引起的辐照度变化<sup>[6]</sup>。孙艳玲等<sup>[7]</sup>提出了一种基于涡旋光干涉条纹偏移检测的水下湍流识别方法。对于 UWOC 系统性能的研究,大多假设发射机和接收机之间的光链路理想对准。如 Simpson 等<sup>[8]</sup>用数字信号处理和纠错技术增强 UWOC 传感器网络的可靠性和鲁棒性。Li 等<sup>[9]</sup>用蒙特卡罗模型研究了 UWOC 系统的信道容量。Anees 等<sup>[10-11]</sup>研究了混合射频与 UWOC 双跳通信系统的性能,主要考虑的性能指标为误码率(BER)和中断概率,未考虑系统的能耗问题。Li 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于多代理强化学习的路由协议。Celik 等<sup>[13]</sup>分析了在位置不确定情况下系统的端到端性能。

水下传输环境的复杂性,如海水波动导致的光传输链路对准有效性问题以及网络的能耗问题都会影响 UWOC 系统的传输性。针对上述问题,本文提出了一种更符合实际的 UWOC 网络中继协作传输算法,可解决 UWOC 中源节点与目标节点间无法直接通信的链路故障问题。该算法用中继节点进行协作传输,以 BER 为准则,考虑了发射机的功率阈值(TTP),在恢复链路有效通信的同时最大化网络的生命周期。仿真结果表明,该算法可以有效解决链路故障问题,同时减小网络的能耗。

## 2 系统模型

假定水下环境包含温度变化造成的气泡和湍流,则 UWOC 链路符合 EGG 分布的衰落模型<sup>[6]</sup>。图 1 为 UWOC 中继协作传输示意图,其中,S 为源节点,R 为中继节点,D 为目标节点,各节点均为锚定节点。实线为保持链路,虚线为待选链路。与源节点 S 相连的节点为备选中继节点,目标节点 D 可以相互通信。数据在传输过程中分为三个阶段:1)中继节点 R 以广播形式发送数据信号,源节点 S 接收到数据信号后确定备选中继节点集合;2)源节点 S 根据 BER 以及发射功率选择最优中继节点;3)所选最优中继节点 R 接收到数据信号后转发至

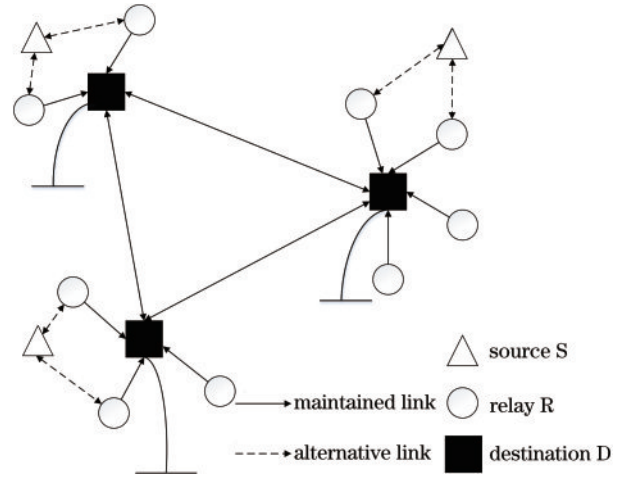


图 1 UWOC 中继协作传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the UWOC relay cooperative transmission

目标节点 D,未被选择的中继节点保持休眠。

节点间使用光波进行通信时,假定激光束穿过具有加性高斯白噪声(AWGN)的混合 EGG 湍流信道,则接收信号可表示为

$$y = \eta I x + n, \quad (1)$$

式中, $\eta$ 为光电转换系数, $I$ 为归一化辐照度, $x$ 为传输比特, $n$ 为 AWGN(均值为 0,方差为  $N_0/2$ , $N_0$ 为双边功率谱密度函数)。中继节点 R 处的瞬时信噪比(SNR)可表示为

$$\gamma = \mu_r I^r, \quad (2)$$

式中, $r$ 为指定光电检测类型的参数,由光电检测方式决定。如强度调制/直接检测(IM/DD)时, $r=1$ ;光外差检测(HD)时, $r=2$ 。当  $r$  分别取 1,2 时, $\mu_1, \mu_2$  可分别表示为

$$\mu_1 = \bar{\gamma}, \quad (3)$$

$$\mu_2 = \frac{\bar{\gamma}}{2\omega\lambda^2 + b^2(1-\omega)\Gamma(a+2/c)/\Gamma(a)}, \quad (4)$$

式中, $0 < \omega < 1$  为混合权重, $\lambda$  为指数分布中的参数, $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数, $a, b, c$  为广义伽马分布函数的参数,分别表示吸收系数、散射系数和吸收系数与散射系数之和,具体取值如表 1 所示。 $\bar{\gamma}$  为关于辐照

表 1 吸收和散射系数的典型值

Table 1 Typical values of absorption and scattering

Water type	coefficients		unit: $m^{-1}$
	$a$	$b$	
Pure sea water	0.114	0.037	0.151
Clean ocean	0.179	0.220	0.339
Turbid harbor	0.366	1.829	2.195

度的平均信噪比,可表示为

$$\bar{\gamma} = \frac{[\eta E(I)]}{N_0}, \quad (5)$$

式中,  $E$  为数学期望。

### 3 基于混合 EGG 模型的中继选择算法

采用中继协作传输方式解决 UWOC 传感器网络中的链路故障及能耗问题,基于混合 EGG 模型的 BER 闭合表达式简化系统性能指标的分析计算复杂度,有利于实现 UWOC 传感器网络的有效通信。以 BER 为中继选择指标,假定 BER 小于  $10^{-4}$  时,系统链路可实现有效通信,此时的发射功率为 TTP。对中继节点进行通信,以实现中继协作传输,从而恢复故障节点通信。

#### 3.1 混合 EGG 模型

混合 EGG 模型是 Zedni 等<sup>[6]</sup>提出的一种统计模型,仿真结果表明,该模型与不同信道条件下的测量数据完全匹配,可用于表征 UWOC 系统中由温度和气泡导致的辐照度波动。实验用期望最大化 (EM) 算法进行参数估计,用混合 EGG 模型下的 BER 闭合表达式,以 BER 为选择中继节点的指标,实现中继协作传输,恢复故障节点通信。混合 EGG 模型中的辐照度分布可表示为指数分布与广义伽马分布的加权和,即

$$f_I(I) = \omega f(I; \lambda) + (1 - \omega) g(I; a, b, c), \quad (6)$$

其中,指数分布  $f$  和广义伽马分布  $g$  可表示为

$$f(I; \lambda) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{I}{\lambda}\right), \quad (7)$$

$$g(I; a, b, c) = c \frac{I^{a-1} \exp[-(I/b)^c]}{b^{ac} \Gamma(a)}. \quad (8)$$

UWOC 系统 BER 的概率密度函数可表示为

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{\omega}{\lambda \mu_r} \exp\left(-\frac{\gamma}{\lambda \mu_r}\right) + \frac{c(1-\omega)}{\Gamma(a)\gamma} G_{0,1}^{1,0} \left[ \left(\frac{\gamma}{b \mu_r}\right)^c \middle| - \right]. \quad (9)$$

#### 3.2 BER 性能指标

在 UWOC 中, BER 可以作为衡量通信系统可靠性和信道质量的指标。文献[6]给出了不同调制方式下的 BER 统一表达式,即

$$P_e = \frac{\delta}{2\Gamma(p)} \sum_{k=1}^n \int_0^\infty \Gamma(p, q_k \gamma) f_\gamma(\gamma) d\gamma, \quad (10)$$

式中,  $n, \delta, p, q_k$  为不同调制方式下 BER 计算中的系数,取决于光电检测方式以及调制方式,具体数值如表 2 所示。(10) 式适用于不同的光电检测方式,如 IM/DD、HD,也可以适用于不同的调制方式,如关键控(OOK)、二进制相移键控(BPSK)、多进制相移键控(M-PSK)、多电平正交幅度键控(M-QAM),其中,  $M$  为进制数。

表 2 不同调制方式对应参数<sup>[6]</sup>

Table 2 Corresponding parameters of different modulation methods<sup>[6]</sup>

Modulation	$\delta$	$p$	$q_k$	$n$	Detection
OOK	1	1/2	1/4	1	IM/DD
BPSK	1	1/2	1	1	HD
M-PSK	$\frac{2}{\max(\log_2 M, 2)}$	1/2	$\sin^2\left[\frac{(2k-1)\pi}{M}\right]$	$\max\left(\frac{M}{4}, 1\right)$	HD
M-QAM	$\frac{4}{\log_2 M(1-1/M)}$	1/2	$\frac{3(2k-1)^2}{2(M-1)}$	$\frac{\sqrt{M}}{2}$	HD

将(9)式代入(10)式,基于文献[14]得到 BER 的闭合表达式为<sup>[6]</sup>

$$P_e = \frac{\delta}{2\Gamma(p)} \sum_{k=1}^n \left\{ \omega H_{2,2}^{1,2} \left[ \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{q_k \mu_r}\right)^{\frac{1}{r}} \middle| \begin{matrix} (1,1)(1-p, \frac{1}{r}) \\ (1,1)(0,1) \end{matrix} \right] + \frac{(1-\omega)}{\Gamma(a)} H_{2,2}^{1,2} \left[ \frac{1}{b^c} \left(\frac{1}{q_k \mu_r}\right)^{\frac{c}{r}} \middle| \begin{matrix} (1,1)(1-p, \frac{c}{r}) \\ (a,1)(0,1) \end{matrix} \right] \right\}, \quad (11)$$

式中,  $H$  为 Fox-H 函数。(11) 式可适用于 OOK、BPSK、M-PSK、M-QAM 调制方式,此外,在中继节

点 R 处 SNR 远大于 1 时,(11) 式可简化为 BER 的近似形式<sup>[14]</sup>

$$P_e \approx \frac{\delta}{2\Gamma(p)} \sum_{k=1}^n \left[ \omega \Gamma\left(p + \frac{1}{r}\right) \left(\frac{1}{\lambda^r q_k \mu_r}\right)^{\frac{1}{r}} + \frac{(1-\omega)}{\Gamma(a+1)} \Gamma\left(p + \frac{ac}{r}\right) \left(\frac{1}{b^r q_k \mu_r}\right)^{\frac{ac}{r}} \right]. \quad (12)$$

### 3.3 TTP 性能指标

在 UWOC 系统中,通常假设光接收机的接收机平面与发射机激光束的光束轴垂直。其次,在接收机平面上将接收机孔径中心到接收机平面光束中心位置的距离定义为偏移距离。当偏移距离为 0 m 时,表示发射机和接收机精准对齐。图 2 为偏移距离的几何示意图,其中,  $z_{src}$  为发射机位置,  $z_{rec}$  为接收机平面,  $d$  为偏移距离。节点间进行通信时,通常需要保证接收机的 BER 在某个特定值以下,如果不

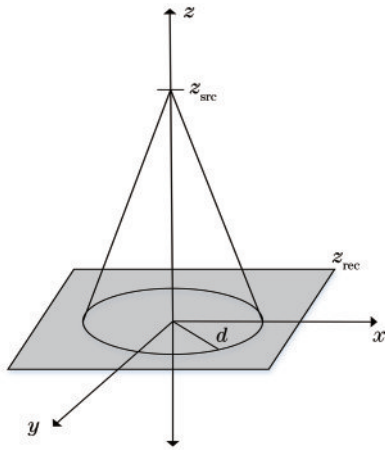


图 2 偏移距离的几何示意图  
Fig. 2 Geometric diagram of the offset distance

能达到设定阈值,可能会造成节点间不能正常通信。由于通信时系统的 BER 随发射功率的增高而降低,因此,可以将接收机 BER 达到设定阈值时的发射功率作为 TTP。水下环境的多变性导致发射机和接收机通常无法精准对齐,此时,可将 UWOC 传感器网络中节点的辐照度分布当作偏移距离和通信链路距离的函数。

文献[16]将辐照度分布表示为

$$B(L, d) = K_s \frac{4h\nu}{\pi\eta D^2 T_s}, \quad (13)$$

式中,  $L$  为通信链路的距离,  $h, \nu, \eta, D, T_s$  分别为普朗克常量、光源频率、探测器的量子效率、接收机孔径以及时隙宽度,实验中分别为  $6.6 \times 10^{-34}$ 、 $5.6 \times 10^{14}$  Hz、0.5、8 mm、3.9  $\mu$ s,  $K_s$  为接收机的信号计数,可表示为

$$K_s = \frac{\eta P T_s}{h\nu}, \quad (14)$$

式中,  $P$  为接收信号的功率。结合(13)式和激光源的辐照度分布可以得到 TTP 函数,该函数同样是关于偏移距离和通信链路距离的函数,可表示为

$$P_i(L, d) = \frac{B(L, d)}{E_1 + E_2} \exp(cL), \quad (15)$$

其中,  $E_1, E_2$  可分别表示为

$$E_1 = \frac{1}{2\pi\sigma_s^2(L)} \exp\left[-\frac{d^2}{2\pi\sigma_s^2(L)}\right], \quad (16)$$

$$E_2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \exp\left[\frac{-\nu^2\sigma_s^2(L)}{2}\right] \times \left\{ \exp\left\{ \int_0^L bs[\nu(L-l)] dl \right\} - 1 \right\} J_0(\nu d) \nu d\nu, \quad (17)$$

式中,  $J_0$  为 0 阶贝塞尔函数,  $\sigma_s^2(L)$  为接收机平面上激光源的方差,该参数由激光器的光源以及通信链路距离  $L$  决定。通过(15)式,可以计算不同通信链路距离 ( $L$ ) 和偏移距离 ( $d$ ) 链路的 TTP。链路的对齐性能越差, TTP 越高;反之,对齐性能越好, TTP 越低。

### 3.4 中继选择

针对 UWOC 传感器网络中的链路失效及能耗问题,给出了基于混合 EGG 模型的中继选择算法。首先,选择符合 BER 要求的节点作为待选中继节点集合。然后,在节点可以成功通信的前提下以 TTP 为筛选指标,从待选中继节点集合中选择所需发射

功率最小的节点。此时,被选中的节点作为最终符合要求的中继节点进行中继协作传输。UWOC 传感器网络中继选择算法的伪代码如表 3 所示。其中,  $i$  为节点编号,  $j$  为链路故障节点编号,  $S(i)$  为第  $i$  个节点的相关信息, NULL 表示没有进行中继协作传输。

## 4 仿真分析

仿真时,将 UWOC 传感器网络部署在长、宽、高分别为 200 m、200 m、40 m 的沿海水域中,随机部署  $m$  个节点并采用 OOK 调制方式,任意两个节点间的距离为 20~150 m,链路故障节点数为  $n_i$ ,每个节点

表 3 基于 EGG 模型的中继选择路由算法伪代码

Table 3 Pseudo code of the relay selection routing algorithm based on the EGG model

```

Input: link range  $L$ , offset distance  $r$ , absorption coefficient  $a(\lambda)$ , scattering coefficient  $b(\lambda)$ , attenuation coefficient  $c(\lambda)$ 
Output: relay node  $X_{Relay}$ 

get the total nodes number  $X_{nodes}$ 
get the fault nodes number  $f_{nodes}$ 
get the initial information of all nodes  $S$ 

for  $i$  in  $X_{nodes}$ 
  if  $S(i)$ . type == fault then
    for  $j$  in  $X_{nodes}$ 
      if  $S(i)$ . type == normal then
        compute the BER between  $i$  and  $j$ :  $pe\_res$ 
         $[a(\lambda), b(\lambda), c(\lambda)]$ 
         $BER = [BER, pe\_res]$ 
        compute the TTP between  $i$  and  $j$ :  $pt\_res(L, r)$ 
         $TTP = [TTP, pt\_res]$ 
      end if
    end for
  end if
end for

for  $i$  in  $X_{nodes}$ 
  if  $S(i)$ . type == fault then
    if  $BER(i) > 10^{-4}$  then
       $X_{nodes} = \text{index of min}(TTP); S(i)$ . relay is  $X_{nodes}$ 
    else if  $BER(i) \leq 10^{-4}$  then
       $S(i)$ . relay is NULL
    end if
  end if
end for

```

的初始能量为 80 J, 数据包传输速率为 10 Mb/s, 平均数据包大小为 4000 bit, 单位比特能耗为 50 nJ<sup>[17]</sup>。激光光源的波长为 532 nm, 使用孔径为 8 mm 的光接收机。在沿海海水环境中, 将背景噪声功率设置为 -86.17 dBm, 具体仿真参数如表 4 所示。

图 3 为不同气泡水平(BL)时的 BER 变化曲线, 其中, BL 的单位为 L/min, 表示每分钟通过的气体体积。可以发现, 随着 SNR 的增加, BER 呈下降趋势。在相同 SNR 下, BER 随 BL 的增加而增加。如 SNR 为 30 dB, 气泡水平从 2.4 L/min 上升至 4.7 L/min 时, 误码率从  $6.4 \times 10^{-4}$  上升至  $1.3 \times 10^{-3}$ 。这表明

表 4 仿真分析的参数

Table 4 Parameter of the simulation analysis

Parameter	Value
Range / (m × m × m)	200 × 200 × 40
Total number of nodes $m$	20/40/60/80
Number of fault nodes $n_f$	5/10
Link distance $L$ / m	20 < $L$ < 150
Data transmission rate / (Mb · s <sup>-1</sup> )	10
Data package size / bit	4000
Initial energy of nodes / J	80
Unit bit energy consumption / nJ	50

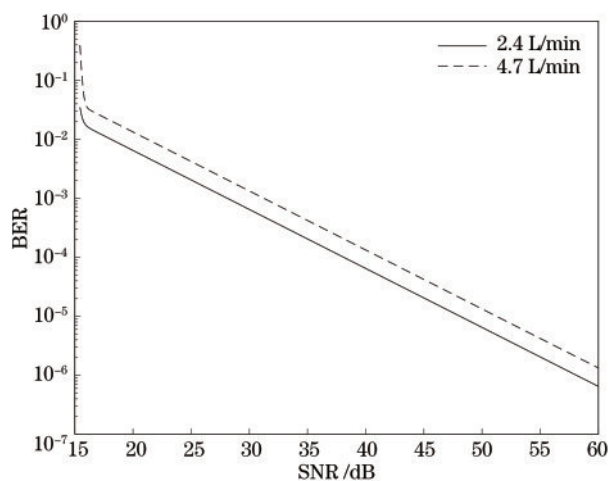


图 3 不同 SNR 下的 BER 曲线

Fig. 3 BER curves under different SNR

在相同水域环境下, 水中气泡越多, 相同 SNR 下系统的 BER 就越高。

图 4 为不同链路距离下偏移距离与 TTP 之间的关系, 可以发现, TTP 随偏移距离的增加而增加,

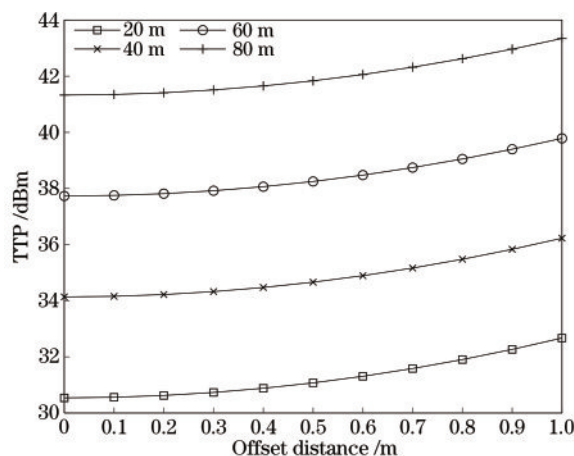


图 4 不同链路距离下的 TTP 与偏移距离曲线

Fig. 4 Curves of TTP and offset distance under different link distances

这表明在同一链路距离下, TTP 随偏移距离的增加而增大。在相同偏移距离条件下, 当链路距离增加时, TTP 也会相应增加。如偏移距离为 0.3 m, 链路距离分别为 20, 40, 60, 80 m 时, TTP 分别为 30.71, 34.33, 37.92, 41.51 dBm。

当故障节点数为 5 和 10 时, 不同网络节点总数下的网络生命周期如图 5 和图 6 所示。其中, 网络生命周期以轮为单位, 1 轮为故障节点匹配到中继节点且完成中继协作通信后所需的时间, 当网络中出现首个能量耗尽节点时历经的轮次为网络生命周期。可以发现, 在网络总节点数相同的条件下, 网络的生命周期随故障节点数的增加而缩短。当故障节点数不变时, 网络生命周期随网络总节点数的增加而增加。这表明当故障节点数不变, 非故障节点数相应增加时, 有更多中继节点可供选择。因此, 可以根据

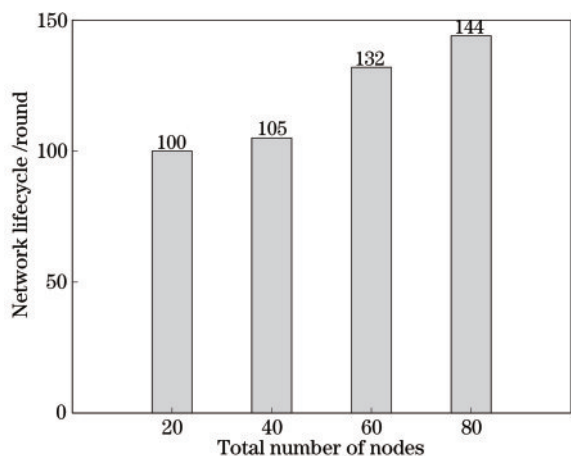


图 5  $n_f=5$  时网络的生命周期

Fig. 5 Lifecycle of the network when  $n_f=5$

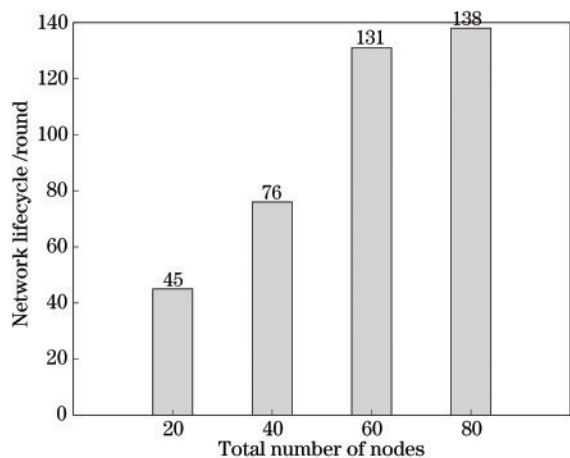


图 6  $n_f=10$  时网络的生命周期

Fig. 6 Lifecycle of the network when  $n_f=10$

BER 和 TTP 为故障链路挑选更优的节点作为中继, 从而延长网络的生命周期。反之, 当网络节点总数不变时, 可供选择的中继节点相应减少, 无法选择更优的节点作为中继, 网络的生命周期较短。

图 7 为不同中继选择算法下的网络生命周期, 可以发现, 在不同网络总节点数下, 当中继选择为随机中继选择时, 其网络生命周期均小于本算法。原因是采用随机中继选择时, 所选中继节点并非满足 BER 条件的最小 TTP 节点, 节点能量会很快耗尽且网络生命周期较短。

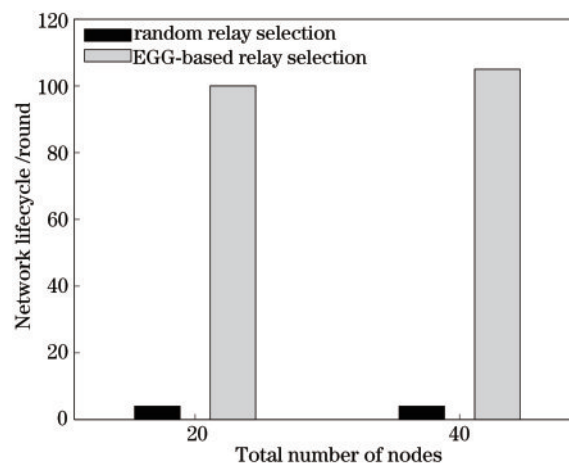


图 7  $n_f=5$  时不同算法的网络生命周期

Fig. 7 Network lifecycles of different algorithms when  $n_f=5$

图 8 为不同中继选择算法下的工作效率, 可以发现, 在不同网络总节点数下, 当中继选择为随机中继选择时, 其运算时间小于本算法。当网络总节点数增加时, 随机中继选择和本算法每轮次的运算时间差距逐渐缩小。

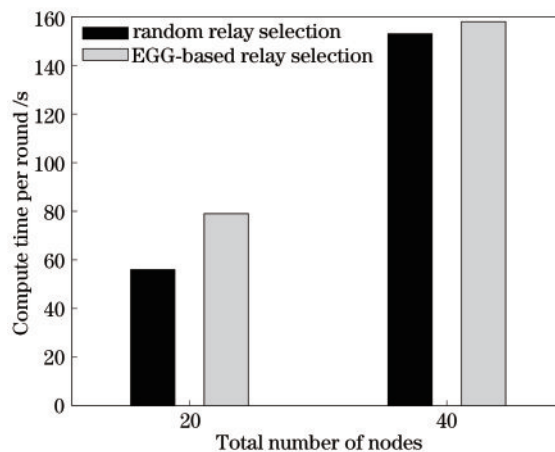


图 8  $n_f=5$  时的运算时间对比

Fig. 8 Comparison of compute time when  $n_f=5$

## 5 结 论

针对水下环境多变导致的通信性能下降问题,采用了基于混合 EGG 模型的中继选择算法恢复节点间的有效通信。此外,考虑了节点成功通信时的 TTP,在解决链路故障问题的同时降低了中继节点的能耗,延长了网络的生命周期。之后还需考虑网络中存在移动中继节点的情况,并进一步研究网络能量均衡问题和路由选择优化算法。

### 参 考 文 献

- [1] Hanson F, Radic S. High bandwidth underwater optical communication[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(2): 277-283.
- [2] Li T S, Yang R K, Gao X, et al. Impulse response modeling for underwater wireless laser transmission[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1101001.  
李天松, 阳荣凯, 高翔, 等. 水下无线激光传输脉冲响应建模[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1101001.
- [3] Wang W, Yang Y G, Zhang W H, et al. Pulsed-laser-sound-signal detection based on frequency-domain energy detector[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0701008.  
王伟, 杨依光, 张卫红, 等. 基于频域能量检测器的脉冲激光声信号检测[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0701008.
- [4] Oubei H M, Zedini E, Elafandy R T, et al. Simple statistical channel model for weak temperature-induced turbulence in underwater wireless optical communication systems[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2455-2458.
- [5] Zedini E, Oubei H M, Kammoun A, et al. A new simple model for underwater wireless optical channels in the presence of air bubbles[C]//GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference, December 4-8, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [6] Zedini E, Oubei H M, Kammoun A, et al. Unified statistical channel model for turbulence-induced fading in underwater wireless optical communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(4): 2893-2907.
- [7] Sun Y L, Zhang J R, Lu Z Z. Propagation characteristics of Laguerre-Gaussian vortex beams in underwater turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1001005.  
孙艳玲, 张家瑞, 鲁振中. 拉盖尔-高斯涡旋光束在水下湍流中的传输特性[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1001005.
- [8] Simpson J A, Cox W C, Krier J R, et al. 5 Mbps optical wireless communication with error correction coding for underwater sensor nodes[C]//OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE, September 20-23, 2010, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [9] Li J, Ma Y, Zhou Q Q, et al. Channel capacity study of underwater wireless optical communications links based on Monte Carlo simulation[J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(1): 015403.
- [10] Anees S, Deka R M. On the performance of DF based dual-hop mixed RF/UWOC system[C]//2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring), April 28-May 1, 2019, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [11] Lei H J, Zhang Y Y, Park K H, et al. Performance analysis of dual-hop RF-UWOC systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 1-15.
- [12] Li X G, Hu X Y, Zhang R Q, et al. Routing protocol design for underwater optical wireless sensor networks: a multiagent reinforcement learning approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9805-9818.
- [13] Celik A, Saeed N, Shihada B, et al. End-to-end performance analysis of underwater optical wireless relaying and routing techniques under location uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(2): 1167-1181.
- [14] Zedini E, Soury H, Alouini M S. Dual-hop FSO transmission systems over Gamma-Gamma turbulence with pointing errors[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(2): 784-796.
- [15] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of integrals, series, and products[J]. *Mathematics of Computation*, 1966, 20(96): 616-617.
- [16] Tang S J, Dong Y H, Zhang X D. On link misalignment for underwater wireless optical communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(10): 1688-1690.
- [17] Tang F. Research on routing algorithms for underwater optical wireless networks based on energy balance[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.  
唐飞. 基于能量均衡的水下无线光网络路由算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.