

## 定向接收低冲突率水声网络媒体接入控制协议

郑茂醇 韩笑\* 葛威 孙瑶 殷敬伟

<sup>①</sup>(哈尔滨工程大学水声技术全国重点实验室 哈尔滨 150001)

<sup>②</sup>(海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学) 工业和信息化部 哈尔滨 150001)

<sup>③</sup>(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

**摘要:** 在全向水声通信网络场景中, 较大的传播时延和较高的数据包碰撞率严重影响了网络性能。相比全向接收技术, 声矢量传感器的声压和振速通过线性加权组合可以形成单边指向性, 实现定向接收某个方向上的信号, 进而提高网络的空间复用率。该文首先分析了声矢量传感器定向接收模式下的网络中断概率, 验证定向接收技术网络应用的可行性。然后, 提出了定向接收低冲突率媒体接入控制协议(DRLCP-MAC)。该协议利用指向性接收波束握手机制建立稳定的数据传输链路, 通过状态转移策略构建多对并行通信链路, 缩小虚拟载波监听范围, 提高网络的空间复用度。仿真结果表明, 与水下冲突避免多址接入协议(MACA-U)和时隙地面多址接入协议(Slotted-FAMA)相比, DRLCP-MAC协议使信道接入成本降低了约50%和60%, 网络吞吐量提升了约60%和400%, 端到端时延降低了约50%和85%。

**关键词:** 水声网络; 定向收音; 矢量传感器; 媒体接入控制协议

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)03-0925-09

DOI: 10.11999/JEIT230153

## Directional Reception Low Collision Probability MAC Protocol for Underwater Acoustic Networks

ZHENG Maochun HAN Xiao GE Wei SUN Yao YIN Jingwei

<sup>①</sup>(Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

<sup>②</sup>(Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security(Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China)

<sup>③</sup>(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In the omni-directional underwater acoustic communication network, large propagation delay and high packet collision rate seriously affect the network performance. Compared with the omni-directional reception, the sound pressure and vibration velocity of the acoustic vector sensor can form a unilateral directivity through the linear weighted combination, so as to realize the directional reception of signals in a certain direction, and then effectively improve the network spatial multiplexing rate. The network outage probability in the directional reception mode of single vector sensor is analyzed, and its feasibility is also verified. Then, a Directional Reception Low Collision Probability Media Access Control (DRLCP-MAC) protocol is proposed, which uses a directional reception beam handshake mechanism to establish a stable data transmission link, and constructs multiple pairs of parallel communication links through state transition strategy, so as to reduce virtual carrier monitoring range and improve spatial reuse of the network. Simulation results show that compared with Multiple Access Collision Avoidance for Underwater (MACA-U) protocol and Slotted Floor Acquisition Multiple Access (Slotted-FAMA) protocol, the channel access cost of DRLCP-MAC is reduced by 50% and 60%, the network throughput is increased by about 60% and 400%, and the end-to-end delay is reduced by about 50% and 85%.

**Key words:** Underwater acoustic networks; Directional reception; Vector sensor; Media access protocol

收稿日期: 2023-03-13; 改回日期: 2024-01-17; 网络出版: 2024-01-29

\*通信作者: 韩笑 hanxiao1322@hrbeu.edu.cn

基金项目: 国家杰出青年科学基金(62125104)

Foundation Item: The National Science Foundation for Distinguished Young Scholars (62125104)

## 1 引言

近年来,水声网络(Underwater Acoustic Network, UAN)受到日益广泛的关注<sup>[1]</sup>。媒体接入控制(Medium Access Control, MAC)协议作为水声网络中重要的组成部分,负责保证将数据包正确交付到下一跳节点。如何通过优化调度机制最大化网络吞吐量是UAN-MAC协议的研究热点和难点<sup>[2,3]</sup>。UAN-MAC协议面临水声信号的长传播时延、较低的传输速率和动态多变的通信环境带来的挑战<sup>[4]</sup>。

在UAN-MAC协议的研究中,竞争式访问模式备受关注,该模式在高动态性的分布式水声网络拓扑场景中适用性较高。竞争式MAC协议分为基于随机接入ALOHA类和基于请求发送(Request-to-Send, RTS)/清除发送(Clear-to-Send, CTS)的握手类协议<sup>[5]</sup>。时隙ALOHA是ALOHA协议的改进<sup>[6]</sup>,它将网络时间划分为相等的时隙,且节点只允许在时隙开始时发送数据。文献<sup>[7]</sup>揭示了水下时隙ALOHA协议存在的无冲突场景下的时间耦合关系,并提出了一种低复杂度的启发式调度算法,在星型网络中提升了水下时隙ALOHA的网络性能。而在随机分布的拓扑场景中,基于握手模式的MAC协议具有更好的适应性<sup>[3]</sup>。该模式在发送数据前进行信道预约,以满足无冲突或低冲突网络通信。时隙地面多址接入(Slotted Floor Acquisition Multiple Access, Slotted-FAMA)<sup>[8]</sup>和冲突避免多址接入(Multiple Access Collision Avoidance for Underwater, MACA-U)<sup>[9]</sup>是UAN中两种典型的基于握手机制的MAC协议。Slotted-FAMA协议通过分时隙预约发送机制,以最大传输距离作为划分时隙的依据,很好地解决了节点通信隐藏终端问题。但是,最大的时隙长度将导致大量的空闲信道资源。因此,Slotted-FAMA协议的信道利用率和网络吞吐量相对较低。MACA-U协议采用基于状态转移的节点决策模式,节点随网络状态的转移而采取不同的策略,因此信道利用率较高。在全向通信技术背景下,握手机制虽然可以减少冲突的发生,但是仍存在空闲信道浪费和空间复用度较低的问题。

由于水声定向通信技术的发展,定向通信的MAC协议受到研究者的日益关注。与全向收发网络不同,基于定向通信的UAN通过较高网络资源的空间复用度提升协议的网络吞吐量<sup>[10]</sup>。文献<sup>[11]</sup>分析了定向通信下UAN的理论中断概率,推导了浅海多径效应下定向通信网络容量。文献<sup>[12]</sup>针对邻居节点发现机制存在的问题,提出了基于定向收发的邻居节点发现机制,克服“聋”节点问题,提高了邻居节点的发现效率。文献<sup>[13]</sup>提出一种全双

工定向碰撞避免MAC协议,利用在不同的工作频段下的定向通信技术解决“聋”节点问题,抑制“暴露终端”的问题。

文献<sup>[11-13]</sup>中均采用基于多模态水声换能器的定向收发技术。而近年来声矢量传感器的偶极子指向性及指向性电子旋转技术备受关注<sup>[14]</sup>。在水声通信中利用声矢量传感器声压和振速联合加权处理带来的空间增益,有效抵消各向同性干扰、提高解码信噪比和降低误码率<sup>[15]</sup>。若将声矢量传感器应用于UAN中,可以利用其空间指向性实现定向接收某个方向上的信号,即利用其空间复用的优势进行通信<sup>[15,16]</sup>。

基于矢量水听器(采用声矢量传感器为接收器的水声换能器简称为矢量水听器)的定向接收特性,本文提出一种定向接收低冲突概率UAN媒体接入控制协议(DRLCP-MAC)。本文主要工作如下:

- (1) 推导了矢量水听器指向性接收下的水声网络中断概率,验证了矢量水听器在UAN中定向接收的有效性和可行性。
- (2) 利用矢量水听器定向接收的空间复用特性,提出一种定向接收模式下的握手机制和节点状态转移策略,缩小静默节点的范围,提升网络的容量。

## 2 定向接收技术

### 2.1 声矢量信号处理

矢量传感器可以同步共点地获得声场的标量和矢量信息,增加了信息种类和数量,扩展了后置信号处理空间,且矢量传感器可以实现声压水听器阵才能测量的目标方位信息,具有良好的指向性<sup>[17]</sup>。

在满足声学欧姆定律条件下,2维矢量水听器输出模型为

$$\left. \begin{aligned} p(t) &= x(t) \\ v_x(t) &= x(t) \cos \theta \\ v_y(t) &= x(t) \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $t$ 是网络时间, $x(t)$ 为目标信号, $p(t)$ 为声压信息, $v_x(t)$ 和 $v_y(t)$ 是振速分量, $\theta$ 为信号的水平入射角度。根据文献<sup>[17]</sup>所述,通过电子旋转 $v_x$ 和 $v_y$ ,引导方位为目标方位 $\psi$ ,得到组合振速 $v_c$ 和 $v_s$ :

$$\left. \begin{aligned} v_c(t) &= v_x \cos \psi + v_y \sin \psi = x(t) \cos(\theta - \psi) \\ v_s(t) &= -v_x \sin \psi + v_y \cos \psi = x(t) \sin(\theta - \psi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

利用在线测得的信源方位信息即可通过声压和振速线性加权组合来调整矢量水听器的单边指向性,使其指向期望用户,进而屏蔽波束范围外的干扰源。为保证接收端获得最大信噪比,本文采用 $p + 2v_c$ 的矢量组合<sup>[18]</sup>,其指向波束如图1(a)所示。

$$p(t) + 2v_c(t) = (1 + 2\cos(\theta_i - \psi))x(t) \quad (3)$$

## 2.2 定向接收下的网络中断概率分析

虽然矢量传感器的指向性接收波束可以定向接收某个方位的信号，但是如图1(a)所示，方位范围为 $240^\circ \sim 300^\circ$ 内存在明显旁瓣且指向性波束宽度较大，导致并发通信链路间可能存在同频干扰。本文通过建立节点中断概率模型分析所使用的定向接收技术的抗干扰能力，以验证网络化应用的可行性。

如图1(b)所示，若干个传感器节点随机分布在2维水平面内，每个节点使用Aloha协议接入网络。设存在一对发送端TX<sub>0</sub>和接收端RX<sub>0</sub>，RX<sub>0</sub>的矢量水听器接收波束极大值方向指向TX<sub>0</sub>。以RX<sub>0</sub>为圆心，半径 $r \in [R_{\min}, R_{\max}]$ ，方位角 $\theta \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ 组成的灰色区域A内存在K个干扰端TX<sub>i</sub> ( $i = 1, 2, \dots, K$ )，其中， $R_{\min}$ 和 $R_{\max}$ 分别为区域A内节点间最小和最大通信距离， $\varphi_{\min}$ 和 $\varphi_{\max}$ 分别为区域A内节点最小和最大入射方位。

在全向接收模式下，接收端RX<sub>0</sub>处的接收信号可以表示为

$$y_0(t, \nu) = \sum_{i=0}^K H_i(d_i, \nu)x_i(t) + N_0 \quad (4)$$

其中， $\nu$ 是通信载波频率， $d_i$ 是TX<sub>i</sub>到RX<sub>0</sub>的欧氏距离， $H_i(d_i, \nu)$ 是TX<sub>i</sub>信号到达RX<sub>0</sub>的信道增益， $x_i$ 表示TX<sub>i</sub>发送的信号； $N_0$ 表示加性高斯白噪声。

假设干扰端TX<sub>i</sub>与接收端RX<sub>0</sub>接收指向方向的夹角为 $\theta_i$ ，指向性接收采用 $p + 2v_c$ 的矢量组合模式，则干扰端TX<sub>i</sub>发送的信号在接收端RX<sub>0</sub>处的输出为

$$y_{0,i}(t, \nu) = H_i(d_i, \nu)x_i(t)[1 + 2\cos(\theta_i)] \quad (5)$$

根据文献[19]可知发送端TX<sub>i</sub>发送的水声信号

在接收端处的信道增益 $H_i(d_i, \nu)$ 服从复高斯分布，该分布的方差为

$$\sigma_i^2(d_i, \nu) = d_i^{-\alpha} a(\nu)^{-d_i} \quad (6)$$

其中， $\alpha$ 是与海洋地理环境有关的传播系数， $a(\nu)^{-d_i}$ 是与距离 $d_i$ 和频率 $\nu$ 有关的吸收系数。

接收端RX<sub>0</sub>处的信干噪比(SINR)模型表示为

$$\text{SINR} = \frac{P_{\text{TX}} \cdot [H_i(d_i, \nu)]^2 \cdot G(0)}{\sum_{j=1}^K P_{\text{TX}} \cdot [H_j(d_j, \nu)]^2 \cdot G(\theta_j) + P_N} \quad (7)$$

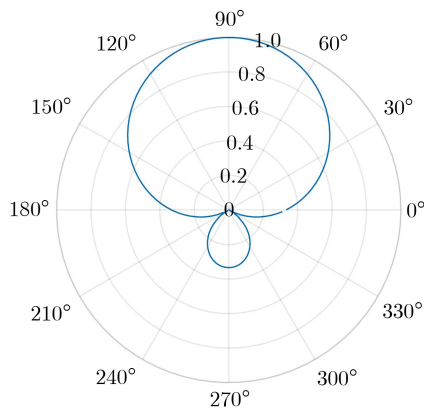
其中， $P_{\text{TX}}$ 表示发送端TX<sub>i</sub>的发送功率， $P_N$ 表示接收端RX<sub>0</sub>处的噪声功率。设声压噪声功率为 $\sigma_n^2$ ，则其振速噪声功率为 $\sigma_n^2/2$ ，在 $p + 2v_c$ 线性组合中噪声功率为 $3\sigma_n^2$ ，所以 $P_N$ 在全向和定向接收模型下的值分别为 $\sigma_n^2$ 和 $3\sigma_n^2$ 。 $\theta_j$ 表示发送端TX<sub>j</sub>到接收端RX<sub>0</sub>的方位与RX<sub>0</sub>极大值指向方位之间的夹角， $G(\theta_j)$ 表示该方位夹角 $\theta_j$ 产生的空间增益， $G(\theta_j)$ 取值为式(8)所示。

$$G(\theta_j) = \begin{cases} 1, & \text{全向接收} \\ [1 + 2\cos(\theta_j)]^2, & \text{定向接收} \end{cases} \quad (8)$$

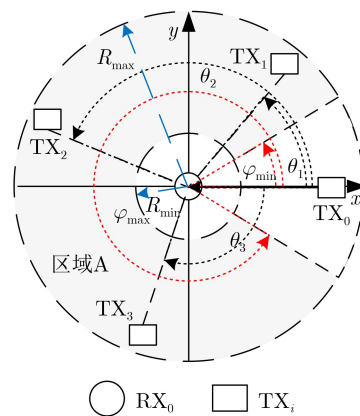
假设 $I_k$ 为K个干扰端在接收端RX<sub>0</sub>处的干扰功率之和，则有

$$I_k = \sum_{j=1}^K P_{\text{TX}} \cdot [H_j(d_j, \nu)]^2 \cdot G(\theta_j) \quad (9)$$

由于 $H_j(d_j, \nu)$ 服从复高斯分布，则 $I_1$ 服从指数分布，即 $I_1 \sim E(\lambda)$ ，其中 $\lambda = d_j^{-\alpha} a(\nu)^{-d_j} P_{\text{TX}} G(\theta_j)$ 。为保证正确接收到发送端TX<sub>0</sub>的信号，在接收端处的信干噪比需大于一定的解码门限 $Z_{\text{th}}$ 。在接收端RX<sub>0</sub>处发生通信中断的概率为



(a)  $p + 2v_c$ 的指向性图



(b) 定向接收模式下的干扰端分布图

图1 基于单矢量水听器的定向接收技术



$$\begin{aligned} \Pr[\text{SINR} \leq Z_{\text{th}}] &= \Pr\left[H_0 < Z_{\text{th}} \left(\frac{1}{r_0} + \frac{I_K}{G(0)P_{\text{TX}}}\right)\right] \\ &= \int_0^{\infty} \Pr\left[H_0 < Z_{\text{th}} \left(\frac{1}{r_0} + \frac{x}{G(0)P_{\text{TX}}}\right)\right] \\ &\quad \cdot f_{I_K}(x) dx \\ &= 1 - e^{-\eta_0 Z_{\text{th}}/r_0} M_{I_K}\left(-\frac{\eta_0 Z_{\text{th}}}{G(0)P_{\text{TX}}}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $\eta_0 = d_0^\alpha a(\nu)^{d_0}$ ,  $r_0 = G(0)P_{\text{TX}}/P_N$ ,  $f_{I_K}(x)$  表示  $I_K$  的概率密度,  $M_{I_K}(s)$  表示  $I_K$  的矩量母函数 (Moment Generating Function, MGF)。根据文献[20]可知, 由于干扰信号的独立性,  $f_{I_K}(x)$  为  $f_{I_1}(x)$  的  $k$  重卷积 (如式(11)所示), 所以  $I_K$  的  $M_{I_K}(s)$  与  $I_1$  的  $M_{I_1}(s)$  的关系如式(12)所示。

$$f_{I_K}(x) = f_{I_1}(x) \otimes f_{I_1}(x) \otimes f_{I_1}(x) \otimes \cdots \otimes f_{I_1}(x) \quad (11)$$

$$M_{I_K}(s) = [M_{I_1}(s)]^K \quad (12)$$

在给定的区域  $A$  内,  $f_{I_1|z}(x|z)$  为位置  $z$  时干扰功率  $x$  的概率密度,  $f_z(z)$  为位置  $z$  的概率密度, 则  $f_{I_1}(x)$  为

$$f_{I_1}(x) = \int_{z \in A} f_{I_1|z}(x|z) f_z(z) dz \quad (13)$$

位置  $z$  可由干扰端到接收端  $\text{RX}_0$  的距离  $r$  和水平入射角  $\theta$  表示, 则  $f_{I_1}(x)$  变换为

$$f_{I_1}(x) = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} f_{I_1|r,\theta}(x|r,\theta) \cdot f_R(r) \cdot f_\Theta(\theta) dr d\theta \quad (14)$$

其中,  $f_R(r)$  和  $f_\Theta(\theta)$  分别是  $r$  和  $\theta$  的概率密度函数,  $f_{I_1|r,\theta}(x|r,\theta)$  是  $r$  和  $\theta$  条件下  $I_1$  的概率密度函数。根据随机几何原理,  $f_R(r)$  与  $f_\Theta(\theta)$  分别为

$$\left. \begin{aligned} f_R(r) &= \frac{2r}{R_{\max}^2 - R_{\min}^2}, R_{\min} \leq r \leq R_{\max} \\ f_\Theta(\theta) &= \frac{1}{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}, \varphi_{\min} \leq \theta \leq \varphi_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

根据式(13)–式(15)且  $I_1$  服从指数分布, 则  $I_1$  的 MGF 表示为

$$\begin{aligned} M_{I_1}(s) &= \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \frac{r^\alpha a(\nu)^r / [G(\theta)P_{\text{TX}}]}{\frac{r^\alpha a(\nu)^r}{G(\theta)P_{\text{TX}}} - s} \\ &\quad \cdot f_R(r) \cdot f_\Theta(\theta) dr d\theta \end{aligned} \quad (16)$$

将式(16)代入式(10)可得出定向接收模式和全向接收模式下的中断概率。设  $\nu = 15$  kHz,  $\alpha = 1.76$ ,

$P_{\text{TX}}/P_N = 60$  dB,  $R_{\min} = 0.2$  km,  $R_{\max} = 2$  km。基于以上参数, 当干扰节点数量为0且  $d_0$  为2 km时  $\text{RX}_0$  处的接收信噪比大约为5 dB, 所以  $Z_{\text{th}}$  设置为5 dB。从图1(a)可知指向性接收波束主瓣3dB宽度约为110°, 所以干扰端在  $\text{RX}_0$  处的入射方位最大范围设置为  $[55^\circ, 305^\circ]$ 。在UAN场景中节点密度较为稀疏, 干扰节点数量  $K$  从1到3可满足实际应用。当  $K = 1$  时不同干扰方位范围  $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$  和距离范围  $[R_{\min}, R_{\max}]$  的网络中断概率如图2(a)–图2(c)所示, 在不同  $d_0$  和  $K$  条件下的全向和定向模式下的网络中断概率如图2(d)–图2(f)所示。

从图2(a)–图2(c)可以得出, 在定向接收模式下, 当干扰端  $\text{TX}_i$  方位低于  $90^\circ$  或距离小于0.5 km时对  $\text{RX}_0$  的干扰较大, 当干扰端  $\text{TX}_i$  方位大于  $90^\circ$  和距离大于0.5 km时对  $\text{RX}_0$  的干扰较小; 方位范围为  $[160^\circ, 180^\circ]$  时虽然处于主波束范围外但由于  $180^\circ$  处存在旁瓣导致存在较大的中断概率。从图2(d)–图2(f)中看出, 在定向接收模式下, 当  $d_0$  较小时, 接收波束范围外的  $\text{TX}_i$  对于  $\text{RX}_0$  的干扰程度显著小于全向接收模式; 当  $d_0$  超过1.4 km时, 即使在定向接收模式下, 其受到其它节点的干扰仍然较大。综上所述, 若采用定向接收模式可以有效降低一定方位和距离范围内的干扰, 但干扰端应根据实际的干扰方位和通信距离判断是否对接收端产生干扰, 在设计UAN-MAC协议时节点需要对定向接收链路的抗干扰能力进行判别。

### 3 协议设计

#### 3.1 协议简介

本文DRLCP-MAC协议定义3种数据包: 请求发送包 (RTS), 清除发送包 (CTS) 和数据包 (DATA)。本文协议认为网络数据传输失败只能由数据包碰撞引起, 不考虑数据在水声信道中发生传输错误的情况。在DRLCP-MAC中, 当某一个节点  $S$  需要发送数据时, 需要在竞争窗口时间内侦听信道。若未侦听到其他节点发送CTS包, 则在竞争时间结束后发送RTS包。当目的接收端节点  $R$  接收到RTS包后, 通过在线测到信源节点  $S$  的方位角  $\alpha$ , 将矢量水听器的极大值方向指向该方位。节点  $R$  将方位角  $\alpha$  和接收功率等相关信息写入CTS包中, 全向发送该包并进入等到DATA包状态。其它节点接收到CTS包后, 提取发送节点方位角和功率等信息, 计算是否会影响节点  $R$  接收数据。若不影响, 则丢弃该包。若影响, 则进入静默状态。节点  $S$  接收到CTS包后, 在线测得信源方位角  $\beta$ , 将极大值方向指向该方位。节点  $S$  全向发送DATA包。节点  $R$  接收到DATA包后完成此次数据传输。

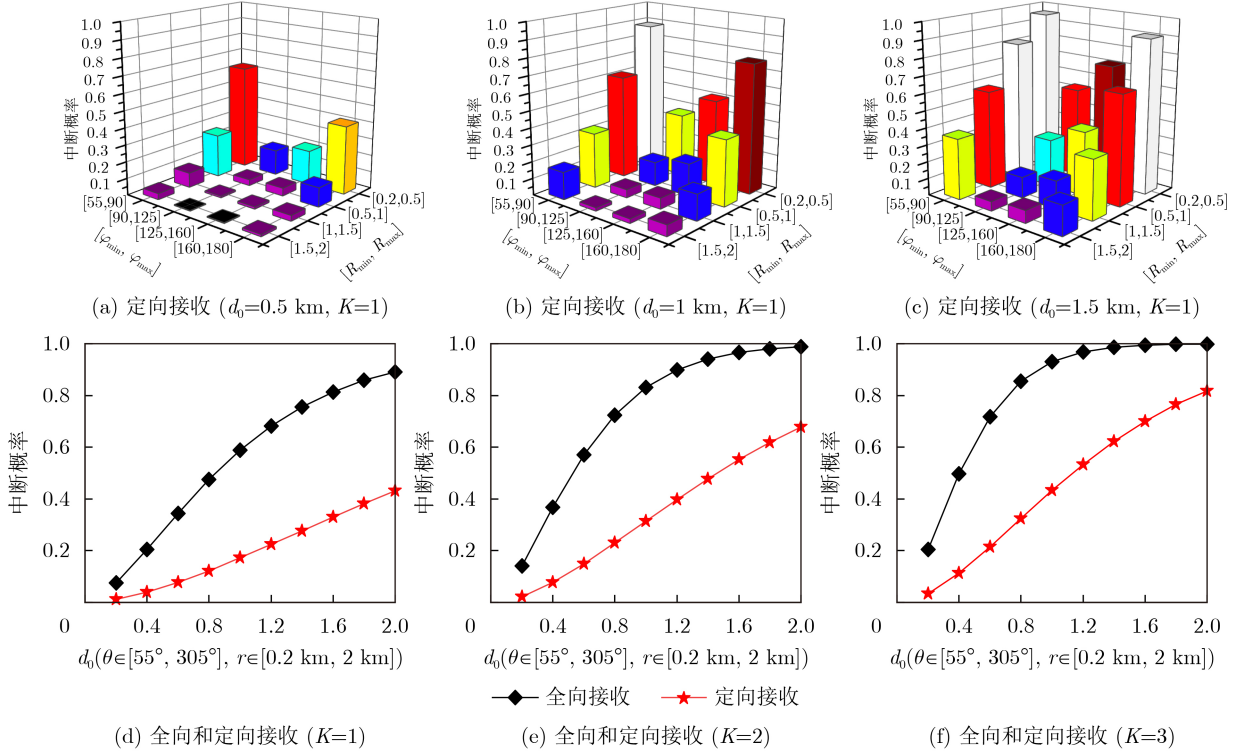


图2 网络中断概率

### 3.2 定向接收模式下的握手机制设计

如图3所示，在全向接收模式下，当节点 $n_i$ 一跳内的邻居节点 $n_c$ 接收到其发送的RTS包时，作为节点 $n_i$ 的邻居节点应保持静默状态。节点 $n_i$ 的邻居保持静默的原因是邻居节点发送数据可能影响节点 $n_i$ 接收CTS包。由于节点 $n_c$ 接入信道时需要进行握手流程，节点 $n_i$ 接收CTS包主要受到节点 $n_c$ 发送的RTS或CTS包的影响。由于水声网络传播时延较大而控制包长度较小，所以节点 $n_c$ 发送的控制包与节点 $n_i$ 处的CTS包发生冲突的概率较小。

当节点 $n_j$ 接收到RTS包后，将接收波束的极大值方向指向节点 $n_i$ 的方位。节点 $n_i$ 收到CTS包后，将接收波束的极大值方向指向节点 $n_j$ 方位。通过上述握手过程，节点 $n_i$ 和节点 $n_j$ 建立了定向接收的通信链路。若某个节点收到发送给其它节点的CTS包，则应该判断是否会影响该通信链路的接收端接

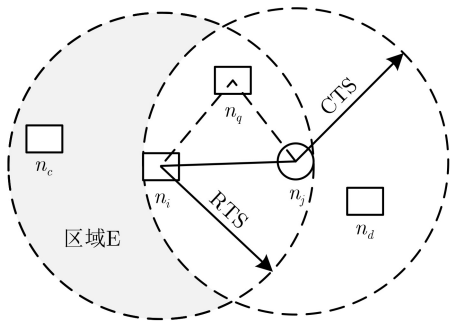


图3 RTS/CTS握手机制示意图

收DATA包。若影响接收端接收DATA包，则静默时间设置为 $\tau + T_{DATA}$ 。其中， $\tau$ 是网络的最大传播时延， $T_{DATA}$ 为物理层发送DATA包所需时长。通过本文第2节分析，需要根据实际的方位与干扰距离计算以获得邻居节点是否影响目标节点接收数据。如式(17)所示， $IT_{ij}^q$ 表示节点 $n_q$ 对接收端 $n_j$ 的干扰值， $\angle ijq$ 表示节点向量 $\vec{j_i}$ 和 $\vec{j_q}$ 之间的夹角， $P_{RX}^{qj}$ 和 $P_{RX}^{ij}$ 分别表示在全向接收模式下节点 $n_q$ 和节点 $n_i$ 发送的信号在节点 $n_j$ 处的接收功率， $G(\Delta\theta)$ 是式(8)所示干扰夹角 $\Delta\theta$ 条件下的空间增益。 $N_{th}^I$ 是协议规定接收端所能容忍的干扰节点数量，即 $\delta_{th}$ 表示接收端的干扰功率容忍平均值。当 $IT_{ij}^q < \delta_{th}^{ij}$ 时，节点 $n_q$ 不会对 $n_j$ 接收数据产生干扰。

$$\left. \begin{aligned} \delta_{th}^{ij} &= \frac{1}{N_{th}^I} \left( \frac{G(0)P_{RX}^{ij}}{Z_{th}} - P_N \right) \\ IT_{ij}^q &= G(\angle ijq)P_{RX}^{qj} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

节点 $n_i$ 的邻居节点可能受到节点 $n_i$ 发送的DATA包的干扰，导致邻居节点握手失败。节点 $n_i$ 的邻居节点收到发送给节点 $n_i$ 的CTS包时说明节点 $n_i$ 和节点 $n_j$ 已成功握手，为了避免被节点 $n_i$ 干扰，所以节点 $n_i$ 的邻居节点此时不应主动进行竞争信道。如图3所示，若节点处于灰色区域E内将无法收到 $n_j$ 发送给 $n_i$ 的CTS包，区域E内节点无法判断节点 $n_i$ 和节点 $n_j$ 是否已成功握手，所以协议容忍节点 $n_i$ 对区域E处节点产生的干扰问题。

综上所述, 在应用矢量水听器定向接收模式的场景中, DR-UAMC协议的定向接收握手机制设计模式如下:

(1) 某个节点收到发送给其它节点的RTS包(xRTS)时, 不需要进入静默状态。

(2) 某个节点收到发送给其它节点的CTS包(xCTS)时, 需要根据IT值判断是否会对该定向接收通信链路产生影响。若该定向通信链路的发送端是该节点的邻居节点, 则该节点需在 $\tau + T_{\text{DATA}}$ 时间内禁止主动竞争信道。

### 3.3 协议状态转移策略

RTS, CTS和DATA包的结构中, “包类型”、“源地址”和“目的地址”是各类包的基础字段。在CTS包中设置“接收方位”和“干扰功率平均容忍值”字段使得邻居节点可以根据式(17)判断是否干扰该定向接收链路。“DATA”包中设置“数据包号”和“数据”字段记录本次握手需要发送的实际数据。本文协议中节点状态为空闲(IDLE)、竞争(CONTEND)、静默(QUIET)、竞争静默(QUIET\_CTD)、等待CTS包(WFCTS)和等待DATA包(WFDATA)。协议节点具体的状态转移策略如下:

(1) 当节点需要发送数据且状态为IDLE时, 将状态切换CONTEND状态, 该状态保持时间为 $T_{\text{CTD}}$ , 其中 $T_{\text{CTD}} = \text{Random}(0, W_{\text{CTD}})$ ,  $\text{Random}(a, b)$ 表示取 $a$ 与 $b$ 之间的随机数,  $W_{\text{CTD}}$ 表示最大竞争窗口时间( $W_{\text{CTD}} = \tau + T_{\text{CTS}}$ )。当 $T_{\text{CTD}}$ 结束后, 节点将当前时间写入RTS包的时间戳中并广播该包。

(2) 当节点收到RTS包时, 若节点状态是IDLE、CONTEND或QUIET\_CTD, 首先根据RTS包的接收功率和本节点处环境噪声功率按照式(17)计算本次接收的 $\delta_{\text{th}}$ 值, 然后将本次接收到RTS包的接收方位和 $\delta_{\text{th}}$ 值写入CTS包中并广播该包。最后, 本节点切换为WFCTS状态(状态保持时长为 $2\tau + T_{\text{CTS}}$ , 其中 $T_{\text{CTS}}$ 是物理层发送CTS包所需的时长)。若节点状态为QUIET、WFCTS或WFDATA, 则保持原状态, 并丢弃该包。

(3) 当节点收到xRTS包时将该包发送地址存入本节点邻居节点表中, 保持原有状态不变并丢弃该包。

(4) 当节点收到CTS包时, 若节点状态是WFCTS, 则立即发送DATA包, 发送完毕后检测缓存中是否存在数据包未发送, 若存在待发送的数据包, 则节点状态切换为CONTEND, 进入新一轮的信道竞争阶段; 若没有待发送的数据包, 则节点状态切换为IDLE。

(5) 当节点收到xCTS包时, 若节点为IDLE,

CONTEND, QUIET或QUIET\_CTD, 则需根据以下步骤判断是否在影响接收端接收DATA包。

如图3所示, 假设本节点为 $n_q$ , 该CTS包由节点 $n_j$ 发送给节点 $n_i$ 。

(a) 节点 $n_q$ 提取CTS包中的接收方位信息, 结合在线测得的节点 $n_j$ 方位信息, 利用三角关系可计算出干扰方位 $\angle ijq$ 。

(b) 由于每个节点的发送功率相同, 根据节点 $n_j$ 在节点 $n_q$ 处的接收功率 $P_{\text{RX}}^{jq}$ , 可估计出节点 $n_q$ 信号在节点 $n_j$ 处的接收功率 $P_{\text{RX}}^{qj}$ , 即 $P_{\text{RX}}^{qj} \approx P_{\text{RX}}^{jq}$ 。

(c) 将上述数值代入式(17)计算 $IT_{ij}^q$ , 提取CTS包中的干扰功率平均容忍值 $\delta_{\text{th}}^{ij}$ 。若 $IT_{ij}^q > \delta_{\text{th}}^{ij}$ , 则状态切换为QUIET, 保持时长为 $\tau + T_{\text{DATA}}$ 。若 $IT_{ij}^q \leq \delta_{\text{th}}^{ij}$ 且节点 $n_i$ 是本节点的邻居节点, 则状态切换为QUIET\_CTD, 保持时长为 $\tau + T_{\text{DATA}}$ 。

(6) 当节点收到DATA包时, 则将本节点状态切换为IDLE。当节点收到发送给其它节点的DATA时, 均保持原状态。

(7) 当WFCTS状态保持时间结束时, 将状态切换为QUIET。本文协议中QUIET状态的保持时间计算方法与MACA-U协议相同, 采用二进制指数退避算法。

(8) 当节点QUIET、QUIET\_CTD或WFDATA状态保持时间结束后, 检测缓存中是否存在数据包未发送, 若存在待发送的数据包, 则节点状态切换为CONTEND, 进入新一轮的信道竞争阶段; 若没有待发送的数据包, 则节点状态切换为IDLE。

## 4 仿真验证

在NS-3平台的水声网络UAN仿真模块上对DRLCP-MAC协议进行仿真, 水声信号的传播损失采用Thorp模型<sup>[21]</sup>, 定向与全向接收的信干噪比模型采用式(7)所示。与MACA-U协议和Slotted-FAMA协议在随机拓扑场景对比信道接入成本、网络吞吐量和端到端时延性能。为保证实验公平性, 对MACA-U协议和Slotted-FAMA协议进行修改, 即在握手成功后均切换为定向接收模式。发射换能器的声源级为135 dB, 解码信噪比门限为6 dB, 有效通信距离为2 km, 载波频率为15 kHz, 通信速率为2 kbps。由于文献[11–13]协议场景均采用多模态换能器定向收发技术, 而本文协议采用矢量水听器定向收信技术并验证该技术的网络应用可行性。基于应用场景和物理层通信硬件设备的不同, 本文协议不与现有定向通信类协议进行量化对比。

网络拓扑范围为4 km × 4 km的海域, 为保证网络覆盖率, 将网络划分为16个1 km × 1 km的网



格。本文进行100次随机实验，每次仿真时间为1000 s，取全部仿真结果的平均值。每个网格内随机部署一个水声通信节点。在16个节点中随机选择5个节点作为发送端，每个发送端随机选择某个邻居节点作为接收端。每个节点装配有矢量水听器，接收模式可在全向与定向之间切换，定向接收模式采用 $p + 2v_c$ 组合指向性。DRLCP-MAC中的参数 $N_{ch}^I$ 取3。

### 4.1 协议接入信道成本

利用仿真时间内发送RTS包的数量与成功接收到的DATA包数量之间的比值验证不同协议接入信道的成本，即每成功传输一个DATA包，需要发送多少个RTS包。仿真结果如图4所示。从图4中可以看出Slotted-FAMA的RTS/DATA比值最高，MACA-U和DRLCP-MAC的信道接入成本低于Slotted-FAMA。由于在Slotted-FAMA协议中，节点如果侦听到任意目的地址非本节点的控制包均需要进入静默退避状态。而在MACA-U和DRLCP-MAC中根据其状态转移策略进行选择退避操作。DRLCP-MAC协议的信道接入成本低于MACA-U协议，根据DRLCP-MAC的握手规则，节点收到xCTS时进行选择静默进而允许多对通信链路存在，而在全向接收模式下的MACA-U协议中，节

点若收到xCTS包，为防止发生数据碰撞则需要保持静默状态。

### 4.2 协议网络吞吐量性能

利用仿真时间内成功传输的数据量衡量协议的网络吞吐量。仿真结果如图5所示，协议的吞吐量与发包率呈现正比关系，当发包率增大到一定程度时，吞吐量增长缓慢达到协议性能极限。由于Slotted-FAMA将网络时间划分为固定的时隙，其吞吐量性能受到固定时隙的影响，导致吞吐量在不同网络负载下相似。MACA-U协议采用基于状态转移的机制，其对网络负载的变化适应性较强，但是由于握手机制导致的沉默区域影响，其效率低于基于定向接收机制的DRLCP-MAC。DRLCP-MAC协议利用矢量水听器的定向接收特性，建立一种基于定向收信的节点状态转移策略，缩小了沉默区域的范围，提高了网络资源的空间复用率。当发包率小于0.08时，DRLCP-MAC与MACA-U的吞吐量相似。这是因为当网络负载较小且在相同的网络时间内，DRLCP-MAC和MACA-U均可将产生的负载数据交付到下一跳节点。在高网络负载下，DRLCP-MAC的吞吐量性能明显高于MACA-U协议，这是因为随着网络负载的增加，网络数据碰撞加剧，DRLCP-MAC采用基于定向接收的状态转移机制提高数据

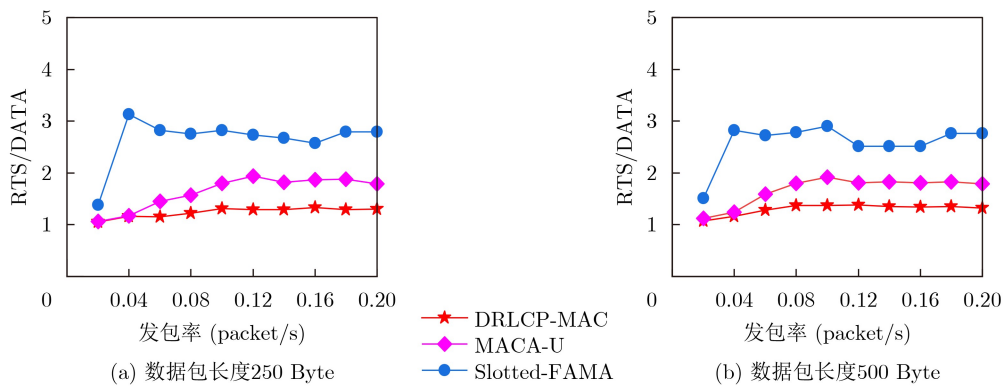


图4 不同发包率下的信道接入成本对比

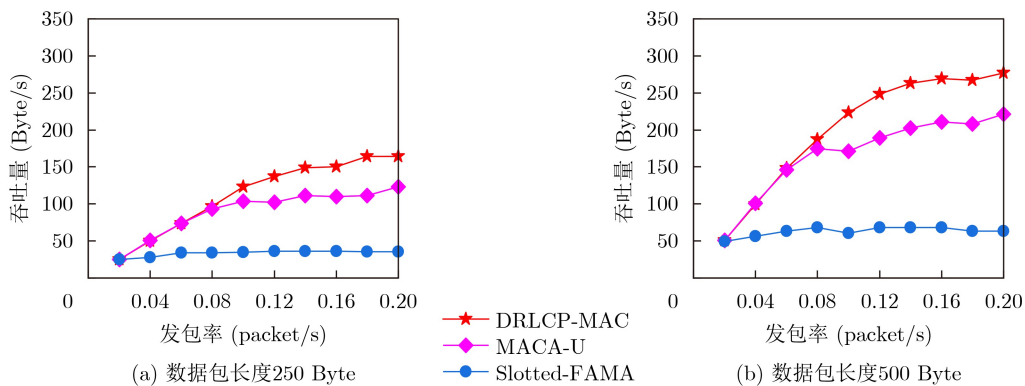


图5 不同发包率下的吞吐量对比

链路的并行度, 减弱了网络拥塞的影响。在数据包长度为500 Byte的仿真场景中, DRLCP-MAC协议性能比数据包为250 Byte更为优良, 由此可见, 在高负载高数据量的情况下, DRLCP-MAC具有更高的吞吐量性能优势。

### 4.3 协议网络端到端时延性能

图6为不同发包率下端到端时延对比, 可以看出信道的竞争程度随发包率的增长而加剧, 导致协议的端到端时延增加。Slotted-FAMA在时隙开始时发送数据, 并且每发送一个数据包需要消耗3个时隙进行握手和确认, 所以Slotted-FAMA的端到端

时延远大于DRLCP-MAC和MACA-U协议。MACA-U和DRLCP-MAC协议在发包率较小时端到端时延性能接近。这是由于当发包率较小时信道竞争度较低, 所以定向接收的性能发挥的作用较少。随着网络负载的增加, DRLCP-MAC协议的端到端时延性能优于全向模式下的MACA-U协议。较高的网络负载会造成较为严重的网络拥塞问题, 导致节点接入信道的时间成本增加。在定向接收模式下干扰范围被缩小, DRLCP-MAC的状态转移策略可建立多个并行的定向接收通信链路, 所以DRLCP-MAC缓解了网络拥塞问题, 保证了网络较低的端到端时延。

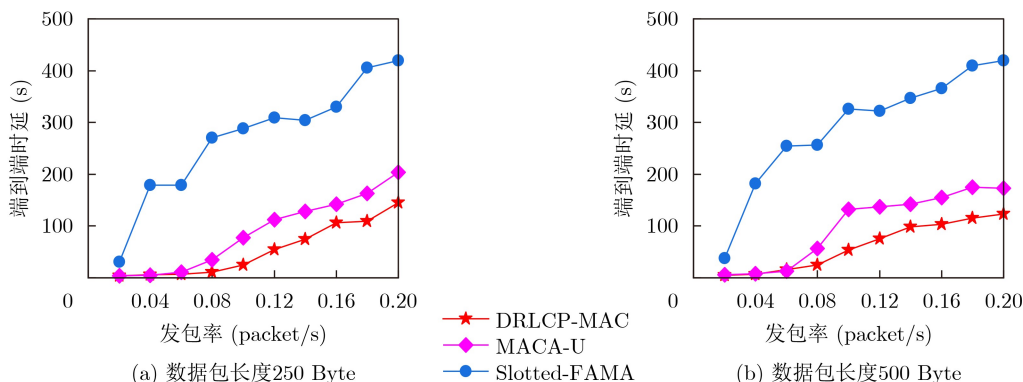


图6 不同发包率下的端到端时延对比

## 5 结论

本文阐述和利用矢量水听器的定向接收性能, 验证了定向收信特性在水声网络中的适用性, 推导了定向接收模式下网络中断模型。利用定向收信的理论, 提出了定向接收低冲突率水声网络MAC协议, 建立了一种基于定向收信的握手机制, 设计了定向接收模式下的节点状态转移策略。在NS3平台上进行了仿真验证, 仿真结果表明本文提出的DRLCP-MAC协议在高网络负载的情况下比MACA-U和Slotted-FAMA协议拥有更低的信道接入成本、更高的网络吞吐量和更低的端到端时延, 且可有效提升水声网络的性能。因此, 在装配矢量水听器的水下组网场景中有着较高的适用性。

### 参考文献

- [1] ISLAM K Y, AHMAD I, HABIBI D, *et al.* A survey on energy efficiency in underwater wireless communications[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2022, 198: 103295. doi: [10.1016/j.jnca.2021.103295](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103295).
- [2] CAMPAGNARO F, STEINMETZ F, and RENNER B C. Survey on low-cost underwater sensor networks: From niche applications to everyday use[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(1): 125. doi: [10.3390/jmse11010125](https://doi.org/10.3390/jmse11010125).
- [3] BELLO O and ZEADALLY S. Internet of underwater things communication: Architecture, technologies, research challenges and future opportunities[J]. *Ad Hoc Networks*, 2022, 135: 102933. doi: [10.1016/j.adhoc.2022.102933](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102933).
- [4] PAL A, CAMPAGNARO F, ASHRAF K, *et al.* Communication for underwater sensor networks: A comprehensive summary[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2023, 19(1): 22. doi: [10.1145/3546827](https://doi.org/10.1145/3546827).
- [5] YANG Yang and YUM T S P. Delay distributions of slotted ALOHA and CSMA[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1846–1857. doi: [10.1109/TCOMM.2003.819201](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2003.819201).
- [6] MA R T B, MISRA V, and RUBENSTEIN D. An analysis of generalized slotted-aloha protocols[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(3): 936–949. doi: [10.1109/tnet.2008.925633](https://doi.org/10.1109/tnet.2008.925633).
- [7] CHEN Weiqi, GUAN Quansheng, YU Hua, *et al.* Medium access control under space-time coupling in underwater acoustic networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(15): 12398–12409. doi: [10.1109/JIOT.2021.3063462](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3063462).
- [8] MOLINS M and STOJANOVIC M. Slotted FAMA: A MAC protocol for underwater acoustic networks[C]. OCEANS 2006-Asia Pacific, Singapore, 2006: 1–7. doi: [10.1109/OCEANS.2006.2825633](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2006.2825633).



- 10.1109/OCEANSAP.2006.4393832.
- [9] NG H H, SOH W S, and MOTANI M. MACA-U: A media access protocol for underwater acoustic networks[C]. IEEE GLOBECOM 2008–2008 IEEE Global Telecommunications Conference, New Orleans, USA, 2008: 1–5. doi: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.165.
- [10] MUZZAMMIL M, AHMED N, QIAO Gang, *et al.* Fundamentals and advancements of magnetic-field communication for underwater wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(11): 7555–7570. doi: 10.1109/TAP.2020.3001451.
- [11] EMOKPAE L E and YOUNIS M. Throughput analysis for shallow water communication utilizing directional antennas[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(5): 1006–1018. doi: 10.1109/JSAC.2012.120615.
- [12] 杨健敏, 乔钢, 聂东虎, 等. 基于定向收发的水声通信网络邻节点发现机制[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(11): 2765–2771. doi: 10.11999/JEIT180108.
- YANG Jianmin, QIAO Gang, NIE Donghu, *et al.* Neighbor discovery mechanism for underwater acoustic communication networks based on directional transmission and reception[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(11): 2765–2771. doi: 10.11999/JEIT180108.
- [13] 刘奇佩, 乔钢, MAZHAR S. 水声网络全双工定向碰撞避免媒体接入控制协议[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(2): 524–533. doi: 10.11999/JEIT211426.
- LIU Qipei, QIAO Gang, and MAZHAR S. Full-duplex directional collision avoidance MAC protocol for underwater acoustic networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(2): 524–533. doi: 10.11999/JEIT211426.
- [14] 姚直象, 惠俊英, 殷敬伟, 等. 基于单矢量水听器四种方位估计方法[J]. *海洋工程*, 2006, 24(1): 122–127,131. doi: 10.16483/j.issn.1005-9865.2006.01.019.
- YAO Zhixiang, HUI Junying, YIN Jingwei, *et al.* Four approaches to DOA estimation based on a single vector hydrophone[J]. *The Ocean Engineering*, 2006, 24(1): 122–127,131. doi: 10.16483/j.issn.1005-9865.2006.01.019.
- [15] 桑恩方, 乔钢. 基于声矢量传感器的水声通信技术研究[J]. *声学学报*, 2006, 31(1): 61–67. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2006.01.010.
- SANG Enfang and QIAO Gang. The study of underwater acoustic communication technology based-on the acoustic vector sensor[J]. *Acta Acustica*, 2006, 31(1): 61–67. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2006.01.010.
- [16] 殷敬伟, 杨森, 杜鹏宇, 等. 基于单矢量有源平均声强器的码分多址水声通信[J]. *物理学报*, 2012, 61(6): 064302. doi: 10.7498/aps.61.064302.
- YIN Jingwei, YANG Sen, DU Pengyu, *et al.* Code divided multiple access underwater acoustic communication based on active acoustic intensity average[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(6): 064302. doi: 10.7498/aps.61.064302.
- [17] 惠俊英, 惠娟. 矢量声信号处理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 6–15.
- HUI Junying, HUI Juan. Vector signal processing fundamental theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 6–15.
- [18] 黄熠, 刘书杰, 刘和兴, 等. 基于单矢量水听器的水声通信接收机的设计与实现[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2021, 16(7): 674–683,697. doi: 10.3969/j.issn.1673-5692.2021.07.007.
- HUANG Yi, LIU Shujie, LIU Hexing, *et al.* Design and implementation of underwater acoustic communication receiver machine based on single vector hydrophone[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2021, 16(7): 674–683,697. doi: 10.3969/j.issn.1673-5692.2021.07.007.
- [19] POLPRASERT C, RITCEY J A, and STOJANOVIC M. Capacity of OFDM systems over fading underwater acoustic channels[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, 36(4): 514–524. doi: 10.1109/JOE.2011.2167071.
- [20] LU Songtao, WANG Zhengdao, WANG Zhaohui, *et al.* Throughput of underwater wireless ad hoc networks with random access: A physical layer perspective[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(11): 6257–6268. doi: 10.1109/TWC.2015.2451625.
- [21] BREKHOVSKIKH L M and LYSANOV Y. Fundamentals of Ocean Acoustics[M]. Berlin: Springer, 1982: 8–11. doi: 10.1007/978-3-662-02342-6.
- 郑茂醇: 男, 博士, 研究方向为水声网络及软件仿真.  
韩笑: 男, 副教授, 研究方向为水声通信及信号处理.  
葛威: 男, 讲师, 研究方向为水声通信及信号处理.  
孙瑶: 女, 博士, 研究方向为水声网络及软件仿真.  
殷敬伟: 男, 教授, 研究方向为水声通信与探测、信号处理及极地声学等.

责任编辑: 马秀强