延迟利用的多节点协同预约式水声网络 MAC 协议

张阳1.2,张扬帆2,黄海宁2

(1. 中国科学院大学,北京100190; 2. 中国科学院声学研究所,北京100190)

摘要:水声网络媒体接入控制(Media Access Control, MAC)层为水声节点提供接入和冲突避免服务。由于水声信道面临着传播延迟高、带宽窄等困难,水声网络 MAC 协议的性能较低。文章在 MACA-U 协议的基础上,针对水声网络 传播延迟高的特点,对信道预约的长等待时间进行利用,提出了一种 RS-MACA 协议。该协议在负载较低时与 MACA-U 协议兼容;在负载较高时,邻近节点可采用"并行发送"的方式发送,显著提高了吞吐量性能。发射节点 在信道预约等待时间内,同时接受符合条件的邻节点的发送预约,邻节点不需要消耗额外时间进行信道预约。完成 预约的节点按照时隙进行数据发射,避免了数据包的碰撞。NS3 软件仿真结果表明,与 MACA-U 协议相比,改进后 的协议吞吐量性能有明显的提升。

关键词:水声网络;媒体接入控制;吞吐量;传播延迟 中图分类号:TB56 文献标识码:A DOI编码:10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.04.005

文章编号: 1000-3630(2017)-04-0320-07

Propagation delay utilized MAC protocol in underwater acoustic networks

ZHANG Yang^{1,2}, ZHANG Yang-fan², HUANG Hai-ning² (1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

Oniversity of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China,
 Institute of Acoustic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: MAC protocol provide node access and conflict avoidance service for underwater acoustic networks (UANs). Due to the high propagation delay and narrow bandwidth characteristics of underwater acoustic channel, the performance of MAC protocols in UAN is very low. In this paper, we propose a RS-MCAC protocol based on MACA-U protocol. The protocol utilizes the long channel reservation time that comes with the long propagation delay. When packet load is heavy, RS-MACA can send packets in parallel. A sender accepts the reservation of neighbor nodes in its own reservation stage. The neighbors do not need to spend extra time to reserve channel. Neighbors send their packet according to the time slot to avoid conflict. Performance evaluation is conducted by using NS3, and confirms that the proposed protocol significantly outperforms MACA-U protocol in terms of throughput.

Key words: underwater acoustic network; media access control; throughput; propagation delay

0 引 言

地球 70%的表面由水构成,海洋成为仅剩的未 探明之地。人类在探索海洋的时候,离不开水下通 信设备。水声通信网(Underwater Acoustic Network, UAN)由多个水下传感器和移动航行器组成,通过 协作完成重要的水下任务,如污染监测、海洋监测、 地理勘探、应急救援等。近些年来,随着水声通信 技术^[1-3]和无线传感器技术^[4-5]的快速发展,水声传感 器网络也进入高速发展期^[1.6-7]。但是,相比于日渐 成熟的无线传感器网络^[4-5],水声传感网网络的发展 方兴未艾。

与陆上无线传感器网络不同,水声信道的复杂 性对水声通信网 MAC 协议的设计提出了极大的挑 战。水声信道除了面临高传播延迟和窄带宽问题, 还存在时空变化剧烈等问题。路径损失、噪声、多 径、多普勒效应都会影响水声通信。传统的无线 MAC 协议在水下网络中遇到了极大的困难,因此 必须为水声通信网设计新的 MAC 协议。

近些年来,国内外研究者提出了许多适合水声

收稿日期: 2016-10-13; 修回日期: 2016-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61671263)

作者简介:张阳(1990一),男,河南信阳人,博士研究生,研究方向为水 声通信网。

通讯作者:黄海宁, E-mail: hhn@mail.ioa.ac.cn

网络的 MAC 协议^[8-10],大体上可以分为分配式和竞 争式两类。在分配式 MAC 协议中,时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)方式需要进行节 点间的同步,这在高传播延迟和延迟起伏的水声网 络中有很大的困难^[11];频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)方式需要较多的频率资源, 而水声通信的可用频带十分有限;码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)方式存在远近问 题,在信道变化的水声环境实现闭环功率控制是一 大难题^[12-13]。

竞争式协议可以分为基于 ALOHA 和基于握手 式两类。基于 ALOHA 的协议有 ALOHA 协议和载 波侦听多路访问(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)协议, ALOHA 协议在负载轻时有较好的性 能,但在负载加重时会产生大量的数据帧冲突,这 不仅会导致吞吐量的下降,而且会浪费大量能量; 另外,由于水声信道的传播延迟很高,采用载波侦 听的 CSMA 协议并不能有效减少数据冲突^[14]。

基于握手的 MAC 协议通过握手来预约信道, 减少了 ALOHA 方式的数据帧冲突^[15-18]。MACA、 MACAW 是典型的基于握手的 MAC 协议。文献[15] 在无线 MACA 协议基础上,设计了一种适用于水 声网络的 MAC 协议——MACA-U 协议,MACA-U 采用坚持等待的策略,减少了退避次数,提高了 MACA 协议在水声网络的吞吐量。文献[16]在文献 [15] 的基础上,将坚持等待的策略推广到了 MACAW 协议当中,设计了一种适合于水声网络 UW-CSMA/CA 协议,同样提高了吞吐量。但是 MACA-U和UW-CSMA/CA 协议都没有考虑传播延 迟对静默时间的影响,在计算静默时间时简单地采 用最大传播延迟。

地理式路由协议是当前水声路由协议研究的 热点方向,随着水下定位技术的成熟,将有极大的 应用前景^[19-21]。但是,与地理信息相结合的 MAC 协议的研究还不够成熟。本文在 MACA-U 协议的 基础上,针对水声网络高传播延迟环境,设计了一 种改进式的 RS-MACA(Resveration Save MACA)协 议。RS-MACA 协议利用节点位置信息,对 MACA-U 协议的 RTS-CTS 握手等待时间进行利用,使源节 点附近有发送需求的邻节点在此段时间内完成信 道预约,而不必在源节点发送完成后再竞争预约信 道。这样,在一次常规预约时间后,多个节点可以 "并行"进行数据包发送,显著地提高了 MACA-U 协议的吞吐量性能。

本文简要地对 MACA-U 协议进行回顾,分析

RS-MACA 协议的原理和优化方法;对 RS-MACA 和 MACA-U 协议进行仿真比较,并对结果进行分析;最后对全文进行了概括和总结。

1 RS-MACA 协议

1.1 MACA-U 协议回顾

在 MACA-U 协议中,节点有五种状态: IDLE、 CTD、WFCTS、WFDATA 和 QUIET,示意图如图 1 所示。当源节点有数据包需要发送时,会从 IDLE 转到 CTD 状态,当 CTD 状态结束,源节点会发送 一个 RTS,然后转到 WFCTS 状态,WFCTS 的超 时时间设置为 $P_{\text{max}} \times 2 + T_{\text{cts}}$,其中 P_{max} 为最大传播延 迟, T_{cts} 为 CTS 持续时间。目的节点接收到 RTS 后, 立即发送 CTS,然后转入 WFDATA,WFDATA 的 超时时间设置为 $P_{\text{max}} \times 2 + T_{\text{data}}$,其中 T_{data} 为数据包持 续时间。源节点接收到 CTS 后,立即发送 DATA。 其他邻居节点接收到不是给自己的数据包后,会进 入 QUIET 状态。

为了减少竞争产生的退避,MACA-U协议进一步对控制规则进行了优化:

(1) 如果节点在 WFCTS 状态,节点采用坚持 等待策略,只有收到目的地址不是自己的 CTS 帧 时,才进入 QUIET 状态;

(2) 如果节点在 WFDATA 状态,节点等待数据 包直到超时,抛弃接收到的任何非等待的帧;

(3) 如果节点在 QUIET 状态, 若监听到的数据 包的静默时间比当前的长, 则重新设置静默时间, 否则保持不变。



Fig.1 MACA-U protocol sequence diagram

1.2 RS-MACA 协议

为了方便描述,首先在表1中给出下面将使用 到的符号和其意义,如表1所示。

表 1 文中部分变量及其含义 Table 1 List of symbols in the paper and their meaning

符号	表示含义
$T_{\rm type}$	传输 type 类型包所需要的时间,type ∈
	{RTS,CTS,RES,DATA,TIME}
RX _{i,type}	节点 i 收到 type 类型报文的时刻
TX _{i,type}	节点 i 发射 type 类型报文的时刻
$T_{\rm use}$	可供邻节点利用的预约时间
$P_{i,j}$	节点 i 和 j 之间的传播延迟
S	源节点
D	目的节点
K	源节点的邻节点集合
k_i	集合 K 中的元素
N_i	集合 K 中到源节点 S 的传播延迟小于 P _{kis} 的邻
	节点的集合
n_i	集合 N 中的元素
$N_{\rm max}$	具有参与本次"并行发送"资格的邻节点集合
$TX_{ni,type}(j)$	节点n _i 占用第j个时隙,发送 type 报文的时间
R	实际参与本次 "并行发送" 的节点集合

在无线信道中,由于电磁波传播速度很快,传 播延迟远小于数据包的持续时间,因此静默时间中 的传播延迟部分对性能的影响很小。但是在水声环 境下,由于水声传播速度很慢,水声传播延迟与数 据包长度相比一般不能忽略,当距离较远或者数据 包长度较短时,传播延迟甚至会远大于数据包持续 时间,这种现象在握手类协议 MACA-U 中更加严 重,造成网络吞吐量低下。在 RS-MACA 协议中, 利用 RTS-CTS 的长握手等待时间,对源节点 S 的 邻节点进行调度,使有发送任务的邻节点免于耗费 额外时间预约信道,降低了端到端延迟,提升了水 声网络的吞吐量。

1.2.1 RS-MACA 协议概述

如图 2 所示, RS-MACA 协议可以分为两个阶段, 信道预约阶段和数据发送阶段。预约阶段通过 RTS-RES-CTS 的握手, 批量为多个节点预约信道; 数据发送阶段, 协议根据收到的 RES 包数量, 调度 相关邻节点的发送时间, 使数据包沿着时隙边沿到



下ig.2 RS-MACA protocol sequence diagram

达目的节点 D, 避免了多组数据包在接收节点 D 处的冲突。

在信道预约阶段, 当源节点 S 需要向目的节点 D 发送数据包时,首先发起信道预约过程。与 MACA-U 协议不同,在发送 RTS 包之前, RS-MACA 协议会根据位置信息确定 S、D 之间的传播延迟, 从而估计出 CTS 包的返回时间,即信道预约时间。 在水声信道中,信道预约时间往往远大于数据包发 送时间,这样会造成信道利用率低下。RS-MACA 协议将信道预约时间,按照一定的规则划分时隙, 分配给源节点 S 的邻节点。如果邻节点 N 有需要发 送到目的节点 D 的数据包,则在监听到 xRTS 包后 向 S 节点发送 RES 包,源节点 S 接收并统计收到 的 RES 包。信道预约过程在源节点收到目的节点的 CTS 包后结束,在此期间,收到的 RES 包数目表示 了同时预约了"并行发送"的邻近节点数目。

在数据发送阶段,源节点 S 首先根据收到的 RES 包的信息和节点位置信息,计算邻节点发送数 据包的时刻,使不同节点发送的数据包能够依次达 到目的节点 S,然后通过 TIME 包广播发射时间信 息。如果在预约阶段,没有收到 RES 包,则仍按照 MACA-U 协议进行数据包发送,即 S 收到 CTS 包 后,立刻发送自己的数据包。发送完 TIME 包后, 源节点 S 立刻发送自己的数据包;其他邻节点在收 到 TIME 包后,根据其中携带的发送时间信息,来 确定自己的发送时机。最终,各节点的数据包按照 时隙顺序,依次到达目的 D 处。

虽然水声信道的时变特性会使节点间的传播 延迟发生变化,从而给地理式 MAC 协议带来困难, 但是大传播延迟会带来充裕的可利用时间。一般情 况下,传播延迟会比控制包的传输时间高 1~2 个 数量级。因此,可以通过时隙之间添加足够的保护 时间,来避免不同时隙的报文发生碰撞,解决时变 信道带来的时隙同步问题。

1.2.2 RS-MACA 原理和时序分析

在信道预约阶段,源节点S根据算法1来确定 哪些邻节点可以利用其等待 CTS 的时间进行信道 预约,算法1如下。

算法 1: 计算得到可以参与并行发送的最大邻 节点集合

Given: T_{res} , K, $P_{i,j}$ Foreach: $j \in K$ Compute: $RX_{s,cts}$, $RX_{s,res}$, T_{use} Find: j, N_{max} Subject to:

$$RX_{s,\text{res}} = P_{s,j} \times 2 + T_{\text{res}} \tag{1}$$

$$RX_{s,cts} = P_{s,d} \times 2 + T_{cts} \tag{2}$$

$$T_{\rm use} = RX_{s,\rm cts} - RX_{s,\rm res} \tag{3}$$

$$\frac{T_{\rm use}}{T_{\rm res} + \Delta t} > N_j \tag{4}$$

 $N_{\max} = N_i, where |N_{\max}| = max \{|N_i|\}$ (5)

通过算法1可以计算得到满足无冲突预约的且 能最大限度利用源节点 S 等待时间的邻节点集合 N_{max} 。式(1)中 $RX_{\text{s res}}$ 表示源节点 S 的任意邻节点 j 的 RES 包达到 S 节点的最小时间,即采取收到即 回复策略;式(2)中RX_{scts}表示源节点S发送RTS包 后,接收到 CTS 应答包的时间;式(3)中 T_{use}用来计 算可以为邻节点 j 利用的预约信道的时间段。注意 到在此时间段内,任何到源节点S的传播延迟小于 P_{s_i} 的节点,即 N_i 中的节点,都可以通过延迟发送 的方式,使自己的 RES 包可以落在 Tuse 内的任意位 置。为了避免多个邻节点的 RES 包在源节点 S 处发 生冲突,将T_{me}按时隙划分,使不同邻节点占有不 同的 RES 包到达时隙。式(4)可以保证可用时隙数 大于参与并行发送的邻节点的个数,这样每个节点 可以至少分得一个时隙,避免冲突发生。考虑到水 声信道的时变特性,可以在时隙两端加上保护时间 Δt ,其大小视信道条件动态调整。

源节点 S 在发送 RTS 前,通过算法1计算得到 可参与本次"并行发送"的邻节点集合 N_{max}。然后 重新设计 RTS 帧结构,除了携带原有类型和地址信 息,还需要增加邻节点集合 N_{max} 信息,具体包括集 合大小、集合元素和为其分配的时隙号。由于信号 在水声信道中具有天然的广播性,在通信范围内的 节点都可接收到该 RTS 包,因此 RTS 包的目的地 址仍然与 MACA-U 协议保持一致,这样可以在负 载较低时向下兼容 MACA-U 协议。节点收到 RTS 包后的处理流程如图2所示。如果是发给自己的, 则按照 MACA-U 协议处理; 如果目的地址不是自 己, 节点仅在 RTS 包中携带的集合 $N_{\rm max}$ 中包含自 己且有数据要发送到目的节点 D 的情况下, 回复 RES包,向其邻近节点S而不是目的节点D进行信 道预约。该过程发生在源节点S的预约等待时间内, 不额外消耗时间,降低了数据包发送的平均预约时 间。其回复 RES 包的时间可以表示为式(6)

$$TX_{n_i, \text{res}}(j) = RX_{s, \text{cts}} - P_{n_i, s} - (|N_{\text{max}}| - j + 1) \times (T_{\text{res}} - \Delta t)$$
(6)

其中, n_j表示集合 N_{max} 中的元素即源节点 S 的一个 邻节点, j 表示分配给该节点的时隙号。由于任意 邻节点对应的 T_{use} 的终止时间是相同的, 即源节点

S 收到 CTS 的时刻 $RX_{s,cts}$ 。因此, T_{use} 的时隙可以沿其终止时间对齐, 而在起点处留出冗余, 以简化计算。

由于 RES 包的达到时间落在不同的时隙,因此 多个邻节点的 RES 包并不会在 S 处发生冲突。在信 道条件较差的情况下,传播延迟变化带来时隙同步 误差,可以增加时隙间隔Δt,留出足够保护时间, 避免冲撞。根据预约等待时间内收到的 RES 包的 数量,源节点 S 对参与本次"并行发送"的邻节点 进行调度,计算其发送 DATA 的时间并通过 TIME 报文广播出去。为了保持对 MACA-U 协议的兼容, 如果在等待 CTS 的时间段内,源节点并没有收到 RES 包,则说明本次为单节点发送,节点按照 MACA-U 协议控制发送,即收到 CTS 包后立刻发 送给 DATA 给目的节点。

为了保证多个节点发向目的节点 D 的数据不 发生冲突,将目的节点 D 的接收时间按照时隙进行 划分,时隙大小为数据包的持续时间 *T*_{data},可视信 道情况增加保护时间。TIME 报文携带了预约了本 次发送的邻节点列表和为其分配的时隙号。节点发 送的 DATA 包应能在时隙要求的时间内到达,需要 使用算法 2 添加延迟时间 *T*_{min},算法 2 如下

算法 2: 计算发送数据包延迟 Given: T_{data} , R, $P_{i,j}$, $RX_{s,cts}$ For each $i \in R$: Compute: $RX_{d,data}(i)$, $RX_{d,data}$ find: T_{min} Subject to: $RX_{d,data}(i) = RX_{s,cts} + P_{s,i} + T_{time} + P_{d,i}$ (7) $RX_{d,data} = RX_{s,cts} + T_{time} + T_{guard} + P_{s,d} + T_{data}$ (8) $RX_{d,data}(i) > RX_{d,data}$ (9)

 $T_{\min} = \min\left\{T_{\text{guard}}\right\} \tag{10}$

 $RX_{d,data}(i)$ 表示任意邻节点i的数据包能够到达接收节点 D 的最早时间, $RX_{d,data}$ 表示来自源节点 S 的数据包接收完毕的时刻。式(9)表示节点i能够通过延迟发送的方式,使数据包接收时间落在小于 $RX_{d,data}$ 的任意时刻,即可以落在所分配的时隙内。遍历集合 R中的元素,计算 T_{guard} 的最小值 T_{min} ,减少不必要的延迟。

己预约"并行发送"的节点,除了源节点S直 接发送自己的数据包外,其他节点需要解析 TIME 包中为自己分配的时隙号,从而计算自己的发送时 间。数据包在接收节点D处,按照序列的方式依次 到达。节点*i*在时隙号为*j*的情况下,其发送时间 可用式(11)表示:

$$TX_{i,\text{data}}(j) = RX_{s,\text{cts}} + T_{\text{cts}} + T_{\text{time}} + T_{\text{guard}} + j \times T_{\text{data}} - P_{i,d}$$
(11)

1.2.3 静默和等待规则

MACA-U 协议的静默规则可以用式 12 表示:

$$\begin{cases} QUIET _RTS = P_{\max} \times 2 + T_{cts} \\ QUIET _CTS = P_{\max} \times 2 + T_{data} \end{cases}$$
(12)

其中, *P*_{max} 表示节点间的最大传播延迟。MACA-U 协议的静默规则用最大传播延迟 *P*_{max} 来代替任意两 节点间的实际传播延迟,在 *P*_{max} 较大时,静默时间 会变得很长。在许多情况下,这种设置会浪费很多 时间。由于 RS-MACA 协议已经获知节点地理位置 信息,可以计算得到节点间的传播延迟,因此本协 议可以对 MACA-U 协议静默规则进行优化。

如图 2 所示,在 RS-MACA 协议中,节点在发送 RTS、CTS、RES 报文后,需要等待接收相应的报文,其他无关节点在接收到这些报文后,应进行静默。另外,由于 RS-MACA 协议可以通过节点位置计算得到传播延迟,其静默规则可以表示为式(13):

$$\begin{cases} QUIET _ RTS = P_{s,d} \times 2 + T_{cts} + \Delta T \\ QUIET _ RES = P_{s,n} \times 2 + (|N_{max}| - j) \times T_{res} + T_{time} + \Delta T \\ QUIET _ CTS = P_{s,d} \times 2 + T_{time} + |\mathbf{R}| \times T_{data} + T_{guard} + \Delta T \end{cases}$$
(13)

其中, n 表示源节点 S 的任一个邻节点, j 表示为其 分配的时隙号。注意到式(13)中的静默时间是利用 节点间的传播延迟计算得到,由于水声信道具有时 变特性,传播延迟不可避免地会有一定的误差。为 了保证协议的有效性,需要增加保护时间 ΔT ,可 视信道情况,自适应调节 ΔT 的大小。

2 仿真结果及分析

本文在 NS3 软件平台上对 RS-MACA 协议和 MACA-U 协议进行了比较。NS3 是一种广泛使用 的开源的网络仿真软件,包含了水声网络仿真的基 本框架。本文中信道模型采用 Thorp 模型^[22],由 Thorp 公式来对传播损失进行估计。传播延迟不考 虑多径影响,简化为传播距离和声速的比值。

3.1 仿真模型

网络的拓扑结构如图 3 所示, 36 个静态节点形成 6×6 的正方形分布。节点并非精确地位于网格的 交叉点上, 而是在水平方向和竖直方向均引入 10% 网格间距的随机偏移。节点的最大通信距离为网格 间距的 1.75 倍。每个节点都有 8 个 1 跳邻节点和

16 个 2 跳邻节点。仿真中,36 个节点中的每个节 点按泊松分布以相同的数据率产生数据包。对于每 个节点,其每个数据包都发往其 2 跳节点,且每个 数据包发往 16 个 2 跳节点的概率是相同的。为了 使边界上的节点也有 16 个 2 跳邻节点,需要对边 界进行扩展,即在四个方向上都扩展 2 层节点,但 是这些额外的节点不会产生数据流,仅作为边界节 点的目标节点和转发节点存在。

仿真频带为 10~20 kHz, 声速设为 1 500 m/s, 传播模型采用简化的 Thorp 公式,即使用频带中心 频率来计算传播损失。分别对不同数据包长度、不 同数据率、不同网格距离下的 RS-MACA 和 MACA-U 协议的吞吐量进行仿真。





2.2 仿真结果

分别对不同数据包长度、不同通信速率和不同 网格间距下的负载-吞吐量关系进行了仿真,结果如 图 4~6 所示。







图 5 不同通信速率下的负载-吞吐量关系 Fig.5 Load-throughtout relationship of different datarates





图4仿真了不同数据包长度下的RS-MACA和 MACA-U协议的吞吐量对比。仿真中通信速率为 1024 bps,平均网格间距为1000m,数据包长度分 别为128 Bytes、256 Bytes和512 Bytes。由图4可 以看出,随着数据包长度的增大,两种协议的吞吐 量都得到了提高,这是因为数据包长度增大后,握 手协议的单次通信的通信效率提升。在相同数据包 长度下,RS-MACA的吞吐量高于原始 MACA-U 协议。

图 5 仿真了不同数据速率下 RS-MACA 与 MACA-U 协议的吞吐量对比。仿真中数据包长度为 512 Bytes,平均网格间距为 1 000 m。从图 5 中可 以看出,随着数据速率增大,两种协议的吞吐量都 会降低,这是因为,数据率提高后,数据包持续时 间长度减小,但是传播延迟未相应减小,因此通信 效率降低。在相同的数据率下,RS-MACA 的吞吐 量明显高于 MACA-U。

图 6 仿真了不同网格间距下 RS-MACA 与 MACA-U 的吞吐量对比。仿真中数据包长度为 512 Bytes,数据率为 1 024 bps,网格间距分别为 1 000、2 000 m 和 4 000 m。从图 6 中可以看出,随着节点间距的增大,传播延迟增大,两种协议的吞吐量都

会降低。在相同网格间距下,RS-MACA 的吞吐量 明显高于 MACA-U 协议。

3 结束语

本文在 MACA-U 协议的基础上,提出了一种 RS-MACA 协议。结合节点地理位置信息,对聚集 节点的信道预约方式进行优化改进,在负载强度较 大时,使多个临近节点可以采用"并行发送"的模 式向远端接收节点发送数据。仿真表明:RS-MACA 协议能有效地利用水声传播的高延迟,比 MACA-U 协议获得了更高的吞吐量。

- Chitre M, Shahabudeen S, Stojanovic M. Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges[J]. Marine Technology Society Journal, 2008, 42(1): 103-116.
- [2] 罗亚松,刘忠,宁小玲. 一种适用于高阶 QAM 信号的抗扰动水声 信道盲均衡算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7): 1452-1457. LUO Yasong, LIU Zhong, NING Xiaoling. Research on a robust blind equalization algorithm suitable for high order QAM signals used in underwater acoustic channels[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(7): 1452-1457.
- [3] 张晓彤,刘金龙,刘兰军,等.水声直接序列扩频通信捕获电路的 优化设计[J]. 仪器仪表学报. 2009, 30(6): 1256-1260. ZHANG Xiaotong, LIU Jinlong, LIU Lanjun, et al. Optimizing design of acquisition circuit for direct sequence spread spectrum in underwater acoustic communication system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(6): 1256-1260.
- [4] 侯维岩,刘伟春,程俊锋,等.面向无线工业网络的数据链路层协议 WICN-Z[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(3): 638-643.
 HOU Weiyan, LIU Weichun, CHENG Junfeng, et al. WICN-Z: A data-link-layer protocol oriented to wireless industrial control network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(3): 638-643.
- [5] 曾桂根, 洪杰, 郑宝玉. 基于 VoWLAN 的 MAC 层接入算法的改进[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(7): 1660-1668. ZENG Guigen, HONG Jie, ZHENG Baoyu. MAC layer access algorithm improvement based on VoWLAN[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(7): 1660-1668.
- [6] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 257-279.
- [7] 李峥,李宇,黄勇,等.水下目标自主连续跟踪与定位算法研究
 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 520-528.
 LI Zheng, LI Yu, HUANG Yong, et al. Study of automatic continuous tracking and location algorithm for underwater target[J].
 Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3): 520-528.
- [8] 许肖梅,邹哲光.水声网络中的跨层设计研究[J]. 声学技术, 2012, 31(3): 239-244.
 XU Xiaomei, ZOU Zheguang. Research on the cross-layer design of underwater acoustic networks[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(3): 239-244.
- [9] 刘旬, 房栋, 李宇, 等. 一种基于 CSMA/CA 的水声网络功率控制 MAC 协议[J]. 声学技术, 2012, 31(2): 209-214.
 LIU Xun, FANG Dong, LI Yu, et al. A CSMA/CA based under-

water MAC protocol for power control[J]. Technical Acoustics, 2012, **31**(2): 209-214.

- [10] 张庆国, 王健培, 崔国平, 等. 基于座底式水声网络节点的跟踪测试技术研究[J]. 声学技术, 2016, 35(3): 193-197.
 ZHANG Qingguo, WANG Jianpei, CUI Guoping, et al. Research on tracking and testing technology based on bottom-seated underwater acoustic network nodes[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(3): 193-197.
- [11] Syed A A, Heidemann J. Time synchronization for high latency acoustic networks[C]//INFOCOM 2006. IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings. IEEE, 2006: 1-12.
- [12] Pompili D, Melodia T, Akyildiz I F. A distributed cdma medium access control for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1899-1909.
- [13] Stojanovic M, Freitag L. Multichannel detection for wideband underwater acoustic CDMA communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(3): 685-695.
- [14] Chirdchoo N. Aloha-based mac protocols with collision avoidance for underwater acoustic networks[C]//INFOCOM 2007. IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE. IEEE, 2007: 2271-2275.
- [15] Ng H H, Soh W S, Motani M. MACA-U: A media access protocol for underwater acoustic networks[C]//IEEE Global Telecommunications Conference, IEEE, 2008: 1-5.
- [16] FANG D, LI Y, HUANG H, et al. A CSMA/CA-based MAC

protocol for underwater acoustic networks[C]//Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010 6th International Conference on. IEEE, 2010: 1-4.

- [17] Guo X, Frater M R, Ryan M J. Design of a propagation-delaytolerant mac protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(2): 170-180.
- [18] Ng H H, Soh W S, Motani M. ROPA: A MAC protocol for underwater acoustic networks with reverse opportunistic packet appending[C]//Wireless Communications and NETWORKING Conference. IEEE, 2010:1-6.
- [19] Erol M, Oktug S. Localization in underwater sensor networks[C]// Signal Processing and Communications Applications Conference, 2009. Siu 2009. IEEE. 2009: 29-32.
- [20] Pouryazdanpanah K M, Anjomshoa M, Salehi S A, et al. DS-VBF: Dual sink vector-based routing protocol for underwater wireless sensor network[C]//Control and System Graduate Research Colloquium. IEEE, 2014: 227-232.
- [21] Chirdchoo N, Soh W S, Chua K C. Sector-based routing with destination location prediction for underwater mobile networks[C] //International Conference on Advanced Information NET-WORKING and Applications Workshops, 2009: 1148-1153.
- [22] Anderson R A, Bryden N A, Polansky M M, et al. Effects of carbohydrate loading and underwater exercise on circulating cortisol, insulin and urinary losses of chromium and zinc[J]. European Journal of Applied Physiology, 1991, 63(2): 146-150.