

# 一种基于TDMA的水声传感器网络MAC协议

周 倩<sup>1,2</sup>, 林 文<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>福州海洋研究院海工智能化研究中心, 福建 福州

<sup>2</sup>闽江学院计算机与控制工程学院, 福建 福州

收稿日期: 2023年9月10日; 录用日期: 2023年10月9日; 发布日期: 2023年10月16日

## 摘 要

由于水声信道的传播时延很高, 传统的TDMA协议存在时隙过长导致吞吐量下降的问题。本文提出一种基于TDMA的改进型MAC协议, 该协议允许发送节点在一个时隙内发送多个数据包或在时隙中间时刻发送数据包, 改善长时隙对TDMA协议性能的影响。仿真结果表明该协议可以有效提高时隙的利用率并提升网络吞吐量。

## 关键词

水声传感器网络, TDMA, MAC协议

# A TDMA-Based MAC Protocol for Underwater Acoustic Sensor Network

Qian Zhou<sup>1,2</sup>, Wen Lin<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Marine Engineering Intelligence Research Center of Fuzhou Ocean Research Institute, Fuzhou Fujian

<sup>2</sup>College of Computer and Control Engineering, Minjiang University, Fuzhou Fujian

Received: Sep. 10<sup>th</sup>, 2023; accepted: Oct. 9<sup>th</sup>, 2023; published: Oct. 16<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Due to the high propagation delay of the underwater acoustic channel, the traditional TDMA protocol has the problem of throughput degradation due to long time slots. This paper proposes an improved MAC protocol based on TDMA, which allows sending nodes to send multiple packets in one time slot or send packets at intermediate time slots. This mechanism improves the impact of long time slots on the performance of the TDMA protocol. Simulation results show that the protocol can effectively improve the utilization of time slots and improve network throughput.

\*通讯作者。

## Keywords

### Underwater Acoustic Sensor Network, TDMA, Mac Protocol

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国海域辽阔, 随着时代发展, 对于海资源的利用和开发是必然趋势, 其中水下通信网络的研发是不可或缺的一部分。在水下环境中, 声学通信是在众多通信方法中最被广泛使用的通信方法。水声传感器网络(Underwater Sensor Networks, UWSN)在海洋开发中的众多领域得到应用, 例如: 灾害预防、气候预测、辅助导航和生物监测等[1] [2] [3]。但由于声信道具有很大的信号传播时延和较窄的带宽等特点, 使无线网络中的媒体接入控制(Medium Access Control, MAC)协议不适合直接应用在水声传感器网络中[4] [5] [6]。由于 MAC 协议直接影响水声传感器网络的性能, 所以研究如何设计适合于水声传感器网络的 MAC 协议是具有重要的研究意义。

UWSN 的 MAC 协议可以大致分为两类, 分别是竞争型接入协议和非竞争型接入协议。竞争型接入协议主要包括随机接入协议和握手协议, 通常当网络负载较轻时, 随机接入协议是一种较好的选择, 如 ALOHA 和 CSMA 等经典接入协议。然而随着负载的增加, 数据包发生碰撞的概率变大。为了减少数据包碰撞, 通常会采取握手协议, 如 MACA、FAMA 等经典握手协议[7] [8] [9]。在握手协议中, 发送节点在数据包传输之前要先发送控制包, 如果接收节点成功接收到控制包, 并和发送节点完成控制包交互, 则发送节点将可以发送数据包。握手协议通过频繁交换控制包来避免数据包传输的冲突, 提高网络吞吐量。然而, 相对于水声传感器网络, 竞争型协议更适合陆地上的传感器网络。因为水下声波的传播延迟、所需的传输功率和能量消耗都要比空气中的无线电波大得多。因此, 在竞争型协议中, 在包重传、等待、监听和控制包交互等方面花费了大量的时间和能耗, 尤其是对于高负载网络。

非竞争型接入协议则根据协议规则为网络中的节点分配专用时隙或信道, 避免数据包冲突, 实现更高的传输效率。经典的非竞争型协议包括频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)、时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)和码分多址(Carrier Sense Multiple Access, CDMA)。对于基于 CDMA 的非竞争型接入协议, 目前缺乏较为完善的水下相关技术支持。同时, 基于 FDMA 的非竞争型协议需要将水声信道划分成多个子信道, 由于水声信道的带宽有限, 相关协议在水声传感器网络中的性能受到一定的限制。在传统的 TDMA 协议中, 协议为网络中的每个节点分配一个时隙, 只要保证网络中节点时间同步, 如果所有节点在属于各自的时隙内都准备好传输数据, 那么 TDMA 的信道利用率将得到充分利用, 因此与基于 FDMA 和 CDMA 的非竞争型协议相比, 基于 TDMA 的协议由于其协议运行机制简单和灵活而被认为是 UWSN 中 MAC 协议的较好选择。

在本文中, 我们设计一种改进型 MAC 协议来提升传统 TDMA 协议在水声传感器网络中的性能。基于水声链路的传输速率和距离之间的关系, 根据时隙的长度动态地改变发送节点的传输规则, 同时该协议在单个时隙中运行部分发送节点传输多个数据包, 提升网络吞吐量。

## 2. TDMA 协议

TDMA 协议是一种经典的无竞争类型的 MAC 协议。在 TDMA 协议中将时间划分成一个一个等长时隙,

并将时隙分配给网络中的所有节点, 节点只能在分配给它们的时隙开始时刻发送数据包, 然后在其他不属于它的时隙内接收数据包。在星形拓扑结构网络中只有中心节点在接收数据包, 因此其他子节点只需在发送时隙醒来进行传输, 其他时隙可以进入休眠节省能量损耗, 因此 TDMA 在水声传感器网络中可以以相对较低的能耗有效避免数据包冲突, 尤其是在流量负载较高的情况下。然而, 当将具有固定时隙的经典 TDMA 协议应用于传播延迟较长的 UWSN 时, 会受到长时间通道空闲和通道效率低等问题的困扰[10]。

TDMA 协议不需要很多控制信息, 且在一个良好的时钟同步网络中就能有效工作。网络中的所有节点都会被分配一个固定的时隙用来传送数据, 但数据必须在时隙开始时刻发送。TDMA 协议仅根据当前网络拓扑预先分配时隙, 因此它们对节点的移动和拓扑变化不敏感, 难以确保快速、可靠地分配时隙。由于受到水声信道长传播时延的影响, TDMA 协议在水声传感器网络中存在着以下问题: 信道利用率低和用于时间同步的开销高。首先在网络提供的负载较低的情况下, 部分时隙内没有数据包到达, 那么这些时隙就处于空闲状态了, 同时其他节点也无法使用这些时隙, 由此信道利用率不高。其次在水声传感器网络中的传播速度大约在 1500 米/秒, 网络中通信的最大距离越长, 数据传播时延就越长, 时隙长度也就越长, 信道利用率就越低。尤其当节点密度增加时, 信道利用率低的问题更加严重。最后, 在水声传感器网络中, TDMA 协议要实现精确的时间同步是一个比较困难的事情, 需要引入较大的保护间隔来确保协议的顺利运行, 因此造成时隙长度的增加和信道利用率的降低, 并且时间同步的开销对水声传感器网络来说是昂贵的。

### 3. 改进型 TDMA 协议

#### 3.1. 改进思路

在水声传感器网络中, TDMA 协议时隙大小的设置必须保证所有节点都能够在一个时隙内完成数据包的传输和接收, 因此时隙的大小是由网络节点之间最大传播时延决定的。由于声波的传播速度仅约为 1500 m/s, TDMA 协议设置的时隙时间较长, 从而导致信道利用率较低, 特别是出现节点在时隙内无数数据包发送情况时。传统 TDMA 协议应用于水声传感器网络中常出现以下两种影响网络吞吐量的情况:

(1) 在网络负载较低的情况下, 当节点在属于它的发送时隙内有数据包传输需求时, 在传统 TDMA 协议中该节点将会把该数据包暂存并等待下一个发送时隙开始时刻发送, 而当前发送时隙就浪费。这种情况在网络负载较低的时候时常会出现。

(2) 在网络负载较高的情况下, 每个节点都有数据包在排队等待发送时隙到达。在传统 TDMA 协议中节点在一个发送时隙内只能发送一个数据包, 后续数据包需要等待下一个发送时隙, 从而提高了网络的端对端时延, 影响网络的吞吐量。

因此为了解决上述两个问题, 本文提出了一种改进型 MAC 协议。针对上述第一个问题, 该协议不要求节点只能在时隙的开始时刻才能发送数据包, 可以根据时隙剩余时间来判断是否适合在时隙中间时刻发送数据包, 一定程度提高时隙的利用率; 针对上述第二个问题, 该协议不限制节点在一个属于它的发送时隙内发送数据包的个数, 在保证相对应的接收节点能够在同一时隙内完整接收到数据包的情况下, 发送节点尽最大可能提升数据包发送的个数, 提升网络的吞吐量。

#### 3.2. 协议流程

##### 3.2.1. 水声传感器网络模型

TDMA 协议是一个基于时隙的 MAC 协议, 因此协议的运行需要网络中的节点位置固定, 因此, 本文构建水声传感器网络模型时有以下三个假设: 首先, 网络拓扑是单跳网络, 所有节点处于半双工

状态, 每个节点位置固定; 其次, 每个节点都是独立存在并且产生数据包的间隔服从泊松分布, 节点可以随机选择其他任何节点作为目标节点; 最后, 所有节点之间时间同步, 并且假设声波传输速率固定为 1500 m/s。

本文中涉及的变量定义如表 1 所示。

**Table 1.** List of variables  
**表 1.** 变量列表

变量名	变量所代表的含义
	时隙时间
$T_{residue}^x$	当前时隙 $x$ 剩余可用时间
	数据包到达距离当前时隙开始时间
$T_{comm}^{i,j}$	节点 $i$ 和节点 $j$ 之间的通信时间
	数据包传输时延
$T_{begin}^x$	当前时隙 $x$ 开始时间
	数据包到达时间
$T_{prop}^{i,j}$	节点 $i$ 和节点 $j$ 之间的传播时延
	网络拓扑中节点之间最大传播时延
	网络拓扑中节点之间最小传播时延

### 3.2.2. 低负载情况下协议流程

改进型协议的运行流程与传统 TDMA 相似, 协议初始化阶段设置时隙的长度并为网络中每个节点平均分配相应的发送时隙, 每个节点只能在属于各自的发送时隙内才能发送数据包, 时隙长度根据节点之间最大传播时延和数据包的传输时间决定的, 计算公式如下:

$$T_{slot} = T_{frame} + T_{prop}^{\max} \quad (1)$$

在低负载情况下, 当节点在发送时隙内有数据包需要发送时, 发送节点根据收发节点的传播时延和当前时隙剩余可用时间, 判断该数据包能否在该时隙结束前到达接收节点。如果剩余时间充足, 则直接发送该数据包, 而不需要等待下一个时隙开始时刻再发送, 反之则安排在下一个发送时隙开始时刻发送。如图 1 所示, 时隙 1 和时隙 4 均属于节点 2 的发送时隙, 在时隙 1 期间到达了一个需要发送给节点 3 的数据包, 按照传统 TDMA 协议, 该数据包需要在时隙 4 开始时刻被发送, 而在改进型协议中, 因为时隙 1 内剩余可用时间足够满足节点 2 与节点 3 之间完成通信, 所以该数据包在当前时隙立即被发送, 而不需要等到时隙 4 开始时刻再被发送。

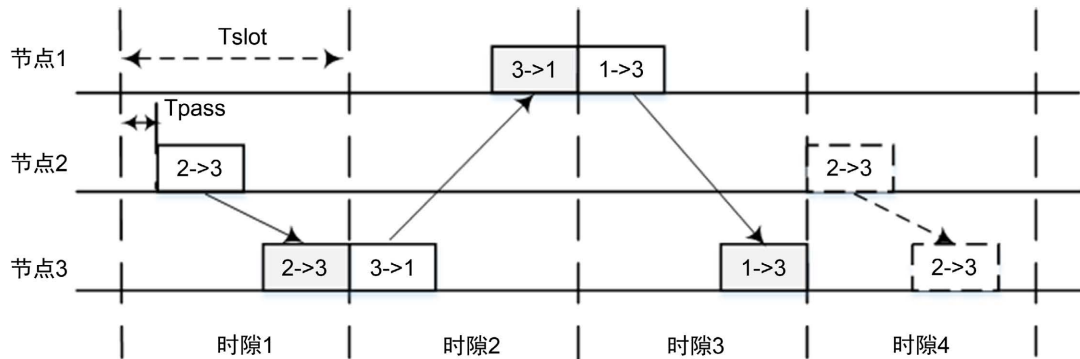
低负载情况下的改进型协议重点内容是如何判断剩余时间是否满足一次完整数据包传输, 在改进型协议中判断需要发送的数据包的发送时隙流程如下: 当发送节点  $i$  在发送时隙内有数据需要发送时, 记录该数据包的产生时刻并计算该发送时隙的剩余可用时间:

$$T_{residue}^x = T_{slot} - T_{pass} \quad (2)$$

然后计算发送节点  $i$  与目标节点  $j$  之间一个完整通信需要的时间长度:

$$T_{comm}^{i,j} = T_{prop}^{i,j} + T_{frame} \quad (3)$$

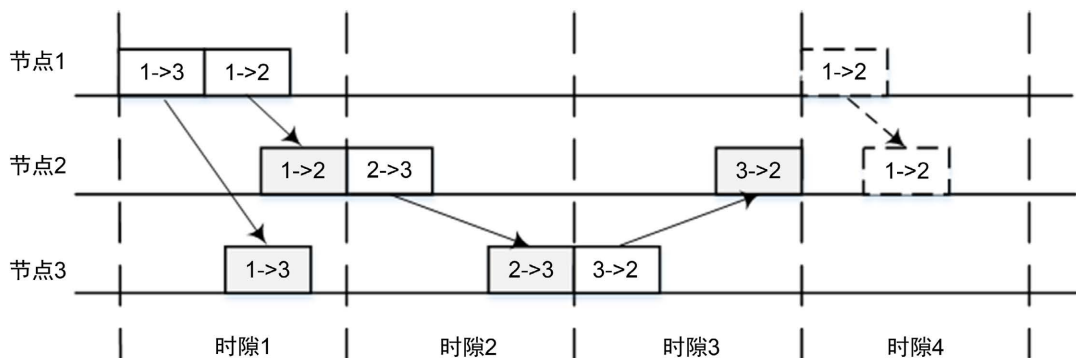
最后判断  $T_{residue}^x$  与  $T_{comm}^{i,j}$  的大小, 如果  $T_{residue}^x$  大于或等于  $T_{comm}^{i,j}$ , 则安排数据包在该发送时隙内立即发送, 反之, 则安排数据包在下一个发送时隙开始时刻发送。



**Figure 1.** Improved protocol mechanism under low network load  
**图 1.** 网络低负载情况下改进型协议机制

### 3.2.3. 高负载情况下协议流程

在高负载情况下, 因为每个节点都有数据包在排队等待发送, 改进型协议要求节点只能在发送时隙的开始时刻发送数据包, 但是在保证相对应的接收节点能够无冲突地接收数据包的情况下, 不限制节点在发送时隙内发送数据包的个数, 尽最大可能提升数据包发送的个数。这种方案特别适合于网络各个节点之间距离差较大的拓扑结构。如图 2 所示, 时隙 1 是属于节点 1 的发送时隙, 在该发送时隙内节点 1 有两个数据包要发送给节点 2 和节点 3, 节点 1 与节点 3 之间的距离比较远, 节点 1 和节点 2 之间的距离比较近。在时隙 1 开始时刻节点 1 正常发送数据包给节点 3, 由于节点 1 与节点 2 之间的距离较近, 在时隙 1 结束前这两个节点还能够进行一次数据包交互。在传统 TDMA 协议中, 节点 1 应该在下一个发送时隙(时隙 4)发送数据包给节点 2。然而在改进型协议中, 节点 1 在时隙 1 中可以以数据包链的方式连续发送两个数据包给不同的节点(节点 2 和节点 3)。



**Figure 2.** Improved protocol mechanism under high network load  
**图 2.** 网络高负载情况下改进型协议机制

在高负载情况下, 当发送节点  $i$  在属于它的发送时隙到来时有多个数据包需要传输, 则该节点需要判断在一个发送时隙内能够成功传输数据包的数量, 即数据包链中包含的数据包个数  $n$ , 假设数据包链



中最后一个数据包的目标节点是节点  $j$ , 则  $n$  的计算公式如下:

$$n \leq \frac{T_{slot} - T_{prop}^{i,j}}{T_{frame}} \quad (4)$$

## 4. 仿真结果与分析

### 4.1. 仿真环境

本文采用新加坡国立大学声学研究实验室的 UnetStack 网络仿真平台进行水声传感器网络 MAC 协议仿真, 相关仿真参数如表 2 所示。

**Table 2.** Setting of simulation parameters  
**表 2.** 仿真参数设置

变量名	变量所代表的含义
Channel.model	ProtocolChannelModel
Channel.sounSpeed	1500.mps/300000000.mps
Modem.dataRate	[2400, 2400].bps
Modem.frameLength	[2400/8, 2400/8].bytes
Modem.txDelay	0.ms
Simulation time	100.minutes
loadRange	[0.1, 2.0, 0.2]

仿真中采用网络的归一化吞吐量(Normalized throughput)指标衡量协议的性能, 归一化吞吐量是指网络中所有节点在单位时间内成功接收到的信息的总比特数, 计算公式如下:

$$\text{Normalized throughput} = \frac{\text{no. of packets received} \times \text{frame duration}}{\text{simulation time}} \quad (5)$$

其中, no. of packets received 表示成功通信的次数, frame duration 表示数据包传输时延, simulation time 表示仿真模拟时间。

### 4.2. 低负载网络仿真结果

本次仿真共设置了 10 个传感器节点, 所有节点以线性方式均匀分布, 最大传播距离为 5000 米。如图 3 所示, TDMA 协议和改进型协议的归一化吞吐量随着网络负载的增加而增加, 最终达到一个最大值并保持恒定。符合基于 TDMA 类型的 MAC 协议的吞吐量变化趋势。改进型协议在网络负载较低的时候, 即包的到达率低于 0.23 时, 网络归一化吞吐量高于 TDMA 协议, 这是因为改进型协议允许发送节点在一个发送时隙内发送数据包, 在网络负载较低的时候。当网络负载增大时, 每个节点在发送时隙均有数据包发送, 因此改进型协议性能和传统的 TDMA 协议基本一样。

### 4.3. 高负载网络仿真结果

本次仿真共设置了 10 个传感器节点, 所有节点以线性方式均匀分布, 最大传播距离为 5000 米。如图 4 所示, 改进型协议在负载较低时吞吐量与传统的 TDMA 协议差不多, 随着网络负载的不断提升,

改进型协议的最大吞吐量高于传统的 TDMA 协议。这是因为随着负载的增加, 发送节点在一个发送时隙内有多个数据包要发送, 改进型协议采用数据链发送机制, 允许在一个发送时隙内发送多个数据包, 提升了网络的吞吐量。由于每个时隙内可以发送的数据包数量趋于饱和, 最后归一化吞吐量也逼近一个最大值。

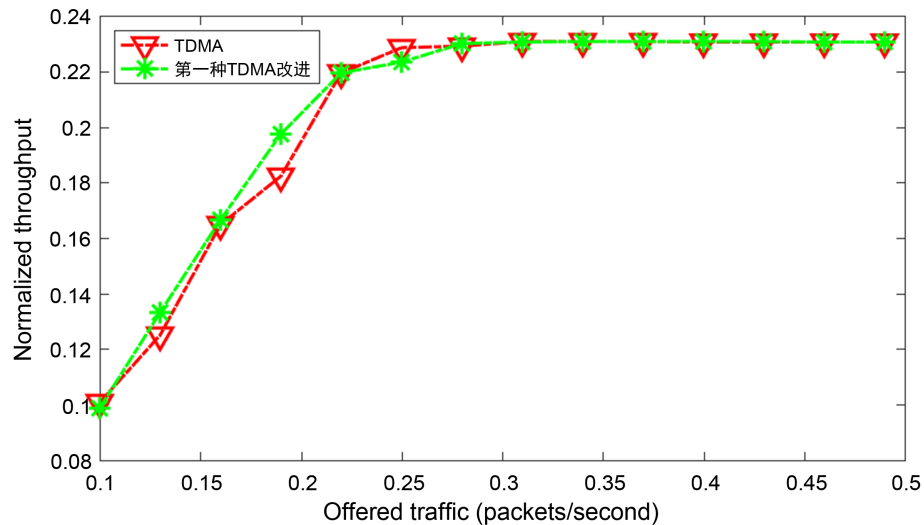


Figure 3. Comparison of through put under low network load

图 3. 网络低负载情况下吞吐量比较

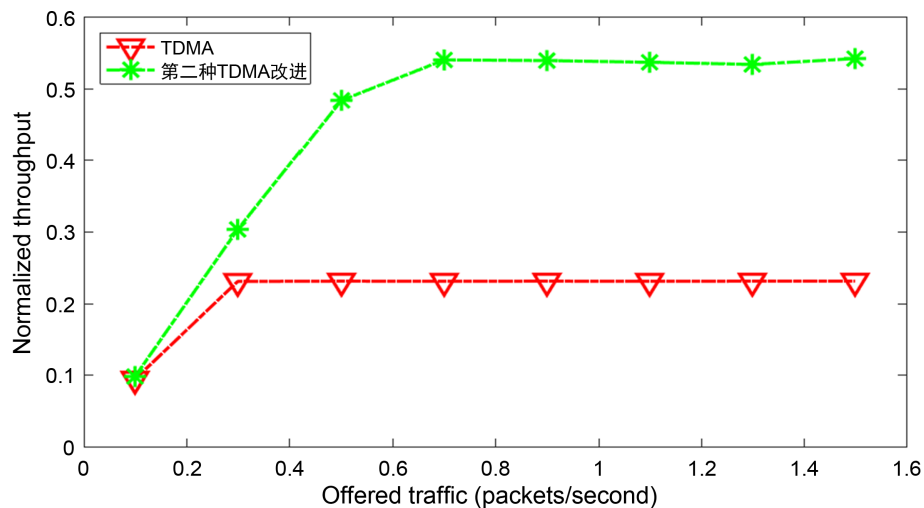
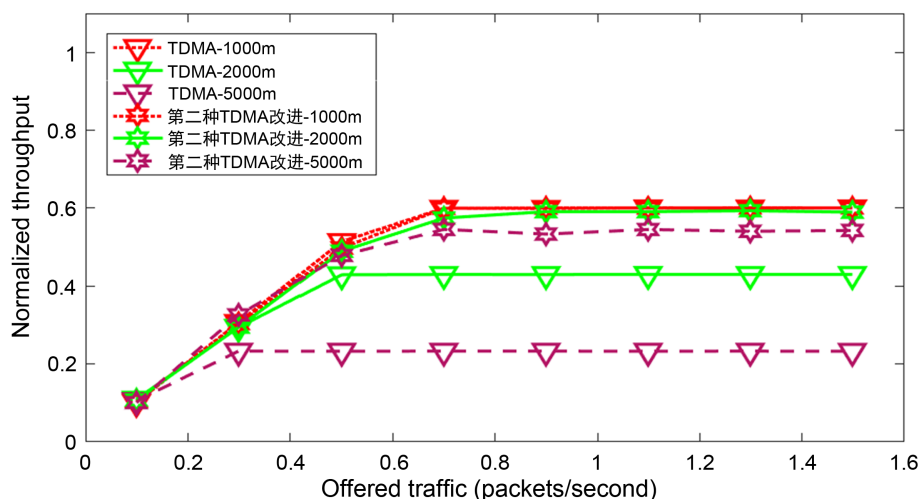


Figure 4. Comparison of through put under high network load

图 4. 网络高负载情况下吞吐量比较

如图 5 所示, 当节点间最大距离为 2000 米时, 归一化吞吐量提升近 50%, 当增加到 5000 米时, 性能提升了近 2 倍。因此, 当网络节点间最大距离不断增加的时候, 改进型协议的性能提升越多。这是因为节点间最大距离增加导致时隙长度变长, 改进型协议有更大机会在一个时隙内发送多个数据包, 因此提升了信道的利用率。同时, 当节点间最大距离为 1000 米时, 两种协议性能相同, 这是因为改进型协议对节点的分布距离有一定的要求, 仿真中数据包传输时延为 1 秒, 根据公式 1 可知时隙长度仅为 1.67 秒, 该时隙长度不足以允许发送节点在一个时隙内发送多个数据包, 因此性能没有得到提升。



**Figure 5.** Comparison of throughput under high network load (Different maximum propagation distances)  
**图 5.** 网络高负载情况下吞吐量比较(不同最大传播距离)

## 5. 总结

TDMA 协议引入时隙方案导致信道利用率低和网络吞吐量低。本文提出了一种改进型 TDMA 协议, 该协议允许发送节点在一个时隙内发送多个数据包或在时隙中间时刻发送数据包, 改善长时隙对 TDMA 协议性能的影响。仿真实验表明改进型协议在网络低负载和高负载的情况下均可以有效地提高网络的吞吐量, 提升时隙利用率。

## 基金项目

福建省自然科学基金面上项目(2020J01827)、福州海洋研究院科技项目(2022F09)、国家自然科学基金青年项目(61901207)、闽江学院校长基金项目(103952020028)。

## 参考文献

- [1] Guo, Z.W., Luo, H.J., Hong, F., *et al.* (2010) Current Progress and Research Issues in Underwater Sensor Networks. *Journal of Computer Research and Development*, **47**, 377-389.
- [2] Akyildiz, I.F., Pompili, D. and Melodia, T. (2005) Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges. *Ad Hoc Networks*, **3**, 257-279. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2005.01.004>
- [3] Akyildiz, I.F., Pompili, D. and Melodia, T. (2007) State of the Art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, **11**, 11-22. <https://doi.org/10.1145/1347364.1347371>
- [4] Zhang, W., Wang, X., Han, G., *et al.* (2021) A Load-Adaptive Fair Access Protocol for MAC in Underwater Acoustic Sensor Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, **173**, 102867. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102867>
- [5] Liu, X., Du, X., Li, M., *et al.* (2021) A MAC Protocol of Concurrent Scheduling Based on Spatial-Temporal Uncertainty for Underwater Sensor Networks. *Journal of Sensors*, **2021**, Article ID: 5558078. <https://doi.org/10.1155/2021/5558078>
- [6] Jiang, S. (2017) State-of-The-Art Medium Access Control (MAC) Protocols for Underwater Acoustic Networks: A Survey Based on A MAC Reference Model. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **20**, 96-131. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2768802>
- [7] Sharifyazd, M., Khosravi, M.R. and Moghimi, M.K. (2017) A Survey on Underwater Acoustic Sensor Networks: Perspectives on Protocol Design for Signaling, MAC and Routing. *Journal of Computer & Communications*, **5**, 12-23. <https://doi.org/10.4236/jcc.2017.55002>
- [8] Jiang, S. (2018) *Wireless Networking Principles: From Terrestrial to Underwater Acoustic*. Springer, Berlin.



- <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7775-3>
- [9] Noh, Y. and Shin, S. (2014) Survey on MAC Protocols in Underwater Acoustic Sensor Networks. 2014 *14th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, Incheon, 24-26 September, 80-84. <https://doi.org/10.1109/ISCIT.2014.7011874>
- [10] Jong, Y. and Zhang, W. (2017) A Study on the MAC Protocol for Dynamic Underwater Acoustic Sensor Networks. 2017 *IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*, Guangzhou, 6-8 May 2017, 142-148. <https://doi.org/10.1109/ICCSN.2017.8230095>