

【引用格式】郝帅峰, 杨道宇, 马伯乐, 等. 近海海洋环境对水声网络性能影响试验评估[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(2): 137-145.

## 近海海洋环境对水声网络性能影响试验评估

郝帅峰<sup>1, 2</sup>, 杨道宇<sup>1, 2</sup>, 马伯乐<sup>3</sup>, 童峰<sup>1, 2, \*</sup>, 陈东升<sup>1, 2</sup>

(1. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361005; 2. 导航与位置服务技术国家地方联合工程研究中心(厦门大学), 福建 厦门 361005; 3. 中国人民解放军 92150 部队, 浙江 舟山 316000)

**摘要** 水声网络已成为海洋信息获取、传输和感知的关键技术, 并得到广泛研究。目前的水声通信研究主要集中于考虑时延、多径等水声信道影响因素。当海洋环境发生变化时, 水声信道中的时延、多径的特性也会相应发生变化, 从而影响水声通信系统的性能。然而, 对于复杂海洋环境现象与水声网络性能的直接关联性的研究还较为有限。基于厦门海域进行的水声网络实验, 从平均端到端时延、丢包率等网络性能指标评估风、浪、潮汐等典型近海海洋环境因素对水声网络性能的影响, 并基于试验结果对海洋环境与水声网络性能进行关联性分析, 实验结果表明: 水声通信网络的时延受到温度、风速和潮位变化的影响, 存在一定程度的关联性。评估分析结论可为复杂近海海洋环境下水声通信网络的设计和应用提供参考。

**关键词** 水声通信网络; 海洋环境; 多径; 潮汐

中图分类号 TN929.3

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)02-0137-09

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.02.001

### Experimental Evaluation of Influence of Offshore Marine Environment on Underwater Acoustic Network Performance

HAO Shuaifeng<sup>1, 2</sup>, YANG Xiaoyu<sup>1, 2</sup>, MA Bole<sup>3</sup>, TONG Feng<sup>1, 2, \*</sup>, CHEN Dongsheng<sup>1, 2</sup>

(1. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Navigation and Location Service Technology (Xiamen University), Xiamen 361005, China; 3. No. 92150 Unit of PLA, Zhoushan 316000, China)

**Abstract** Underwater acoustic network has become the key technology of ocean information acquisition, transmission and perception, and has been widely studied. At present, the research of underwater acoustic communication mainly focuses on the factors affecting underwater acoustic channels such as delay and multipath. When marine environment changes, the characteristics of delay and multipath in underwater acoustic channel will change accordingly, which will affect the performance of underwater acoustic communication system. However, study on the direct correlation between complex marine environmental phenomena and underwater acoustic network performance is still limited. Based on the underwater acoustic network experiment conducted in Xiamen sea area, the impact of typical offshore marine environmental factors such as winds, waves and tides on the underwater acoustic

收稿日期: 2023-11-14

作者简介: 郝帅峰(2000-), 男, 硕士生, 主要从事水声通信与组网研究。

\*通信作者: 童峰(1973-), 男, 博士, 教授, 主要从事水声通信与组网研究。

基金项目: 国家重点研发计划项目“面向海洋环境监测的信道感知水声传感网络”(2018YFE0110000); 上海市科学技术委员会“科技创新行动计划”项目适用于典型浅海条件的高效高可靠水声通信设备(21DZ1205500); 厦门市海洋产业项目“海域安防多平台立体信息终端的研发及产业化”(22CZB012HJ13)。

network performance are evaluated from the average end-to-end delay, packet loss rate and other network performance indicators. Based on the test results, the correlation between the marine environment and the underwater acoustic network performance is analyzed. The experimental results show that the delay of underwater acoustic communication network is affected by temperature, wind speed and tide level. The evaluation and analysis results of this paper can provide reference for the design and application of underwater acoustic communication network in complex offshore marine environment.

**Key words** underwater acoustic communication network; marine environment; multipath; tide

## 0 引言

水声通信网络利用声波在水中传播的特性进行信息传输,相对于其他无线通信技术,水声通信网络具有更好的穿透力和隐蔽性,可以在水下传输大量的数据,并且具有良好的抗干扰能力。在海洋科学研究领域,水声通信网络在海洋科学研究中应用广泛,例如测量海洋环境参数(如温度、盐度、水压、流速等)和海底观测等<sup>[1]</sup>。利用水声通信网络可以传输各种传感器的数据,并进行海洋环境的监测和控制。在海洋环境保护领域,水声通信网络在海洋环境保护中也有广泛应用。例如:在海洋污染检测<sup>[2]</sup>方面,可以使用水声通信网络用于检测石油的泄露等海洋环境保护问题。在海洋军事领域,水声通信网络在海洋军事中也有广泛应用。例如,在潜艇通信、水雷探测和 underwater 通信等方面,水声通信网络都是不可或缺的技术手段<sup>[3]</sup>。

然而,水下环境的复杂性和声波传播的特性也对水声通信网络的设计和应用提出了新的挑战。在水下环境中,声波的传播路径受到水温、水深、水盐度、水流、海底地形等因素的影响,从而影响声波的传输速度和传输路径。此外,由于水中存在其他声源干扰和噪声,特别是近海海域,在潮汐、船舶航运、施工等自然或者人为的环境因素影响下,水深、水流等自然环境参数以及船舶的引擎声和螺旋桨的噪声可能会影响信号的传输和接收<sup>[4]</sup>。这些因素也会影响水声通信网络的传输效率和可靠性。

在 MAST (Marine Science and Technology Programme) III 计划的支持下,欧盟进行了水声通信和水声通信网络 (Underwater Acoustic Communication Network, UACN) 等试验项目,目的是为了提

升水声通信网络对海洋环境变化的适应性和稳健性,并进行了海试验证<sup>[5]</sup>。SUNRISE (Sensing, monitoring and actuating on the Underwater world through a federated Research InfraStructure Extending the future internet) 是欧洲多所科研院校和机构共同合作建立的 UACN 联合试验项目,目标是建立工作在不同海域下的 UACN。

APARICIO 开发并评估了一个真实的海洋噪声模型。该模型将风、雨、船舶、介质的热激发和自身噪声视为噪声源,并研究这些现象对扩频信号检测的影响<sup>[6]</sup>。LIU 分析了海浪对浅水水声通信性能影响<sup>[7]</sup>, SILVIA 指出,在使用物联网和传感器的智能环境监控系统对海洋环境进行的监测时,针对海洋环境对水声网络影响研究却相对较少<sup>[8]</sup>。

国内水声通信组网研究领域已广泛展开了协议仿真工作,主要依赖 AquaSim、OPNET 等软件进行模拟研究。华南理工大学提出了一种名为 SDR-Uan<sup>[9]</sup> 的软件定义远程水声网络仿真,该方法是基于多核水声调制解调器硬件和公有云平台的组合实现,该平台可以实现水声 MAC 协议的设计和验证。然而,长时间的海上试验较少,主要有中国科学院声学研究所、厦门大学、哈尔滨工程大学等机构有实现水声通信网络海上试验。其中,厦门大学设计并实现了水下物联网网络测试平台,通过海上实验验证了该平台对水下物联网网络性能的评估是有效的<sup>[10]</sup>。中国科学院声学研究所设计了一种工作频率在 10~15 kHz 之间的水声网络节点,支持 MFSK 和 QPSK 2 种调制方法。经过夏季和初冬 2 个季节的湖试,实验结果表明该系统可以通过切换调制方法来实现稳定的性能,适应不同的环境<sup>[11]</sup>。哈尔滨工程大学于 2018 年 7 月在中国黑龙江省松花江进行了水下定位实验,提出了一种基于传播损耗的 UWSNs 定位方案。实验结果表明,该方案能够提供相对较高的精度,并能够降低网络资源消耗,

延长网络寿命<sup>[12]</sup>。然而,目前试验对海洋环境与水声网络性能的关联评估较少。

因此,本文旨在评估风、浪、潮汐等典型近海海洋环境因素对水声网络性能的影响,通过在厦门港海域构建水声实验网络,开展为期 24 h 的海试实验,对海洋环境变化对水声网络性能指标的影响进行分析评估,以期探究其对水声通信网络传输效率和可靠性的影响为水声通信网络的设计和 optimization 提供参考。

## 1 试验水声网络模型及设置

### 1.1 网络模型

传统上,水声网络系统模型类似于开放系统互联协议栈模型,存在物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层 5 层结构,考虑到本文目的在于评估海洋环境因素影响,试验网络采用简化的网络分层模型,由物理层、数据链路层、网络层<sup>[13]</sup>组成(如图 1 所示)。

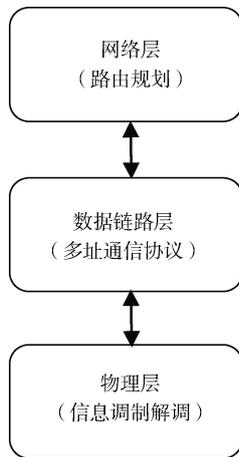


图 1 水声通信网络结构

Fig. 1 Structure of underwater acoustic communication network

物理层主要负责实现信息流数据的调制和解调。在本文水声网络中,需要考虑水声网络通信的稳定性和长时间组网实验所带来的功耗问题。因此,需要具备高稳定性和低功耗的水声通信节点。考虑到近海浅海海域严重多径信道影响,而本文侧重评估海洋环境因素对网络性能的影响,因此物理层采用直接序列扩频技术方案<sup>[14]</sup>,具备较强的抗信道衰落、抗干扰、抗多径等优点,具有较

高的稳健性<sup>[15]</sup>。

数据链路层是 UACN 的中间层。它的主要作用是分配带宽资源,从而实现节点之间高效的通信。在本次试验中,数据链路层采用多址 MACA (Multi Access with Collision Avoidance) 协议,多址 MACA 协议利用随机退避和请求/响应机制,在发送数据前检查信道状态,以避免碰撞、减少数据包的冲突和丢失,从而提高网络通信的效率和可靠性。

网络层是规划数据包从发送端到达接收端的路径。考虑到侧重近海海洋环境对水声网络性能影响试验评估,为了使网络中的端到端时延保持相对稳定,以及尽可能地避免复杂的路由导致的撞包,本文实验采用固定路由的方式。在这种方式下,网络中的节点被预先固定在特定位置,每个节点只能与特定的节点通信。这使我们能够观测由于海洋环境在一天之中的变化而引起的水声通信网络性能指标的变化。

### 1.2 网络设置

试验水声网络物理层主要参数如表 1 所示。物理层水声通信采样率为 75 kHz,信号中心频率为 15.5 kHz,带宽 2.3 kHz,采用 DSSS 调制。信号帧结构<sup>[16]</sup>为同步、保护间隔和保护组网格格式段、信息段的信息序列部分 3 个部分。

表 1 水声通信系统相关参数

Table 1 Parameters related to underwater acoustic communication system

水声通信系统相关参数	参数值
采样率/kHz	75
信号中心频率/kHz	15.5
信号带宽/kHz	2.3
调制方式	DSSS
单个扫频点数	1 700

网络负载设置,网络运行过程中,如果不考虑负载均衡情况,那么节点将随机选择与另外节点进行通信传输,有可能会造成局部拥塞现象<sup>[17]</sup>,在本实验中,各个节点的负载是固定的,每 600 s 产生一个数据包。为了防止不同节点在同一时刻发送信息包到同一目标节点,从而导致碰撞,降低网络性能,我们在每个节点的负载基础上,节点生成数据包后,采用随机数的方式在 3 min 的时

间窗口内随机发送到目的节点，以最大程度地避免局部拥塞的发生。当数据包在汇聚节点发生碰撞时，也就是说汇聚节点无法顺利解调数据包，发送数据包的节点将在等待一段退避时间后尝试重新发送数据包，旨在确保数据包能够顺利传送到汇聚节点。在此情况下，通常规定了最多重传 3 次的次数限制。如果即便尝试了 3 次重传后仍然无法成功接收到正确的协议包，那么发送节点将判定此次数据包为丢失。

海试实验中，发射和接收端换能器入水深度为 2 m，节点 1 与节点 2 相距约 1 800 m，节点 2 和节点 3 相距约 500 m。图 2 为实验海域地图，平均水深 12 m。网络分为 2 种模式：网络模式 1：5 点-10 点、17 点-22 点路由为节点 3 和节点 2 直接与节点 1 进行通信；网络模式 2：11 点-16 点，23 点-4 点（第 2 天），路由为节点 3 的信息由节点 2 转发给节点 1，节点 2 直接与节点 1 进行通信。信号发射间隔约为 10 min，实验持续约 24 h。



网络模式 1：3-1-2；网络模式 2：3-2-1

图 2 海试实验的网络拓扑图

Fig. 2 Network topology of sea trial experiment

## 2 试验期间海洋环境

试验期间对厦门港的潮位，流速，风速，温度等海洋环境要素采集。图 2 为实验海域地图，平均水深 12 m。

11 月 20 日 13 点-21 日 12 点，海洋环境信息如图 3-7。

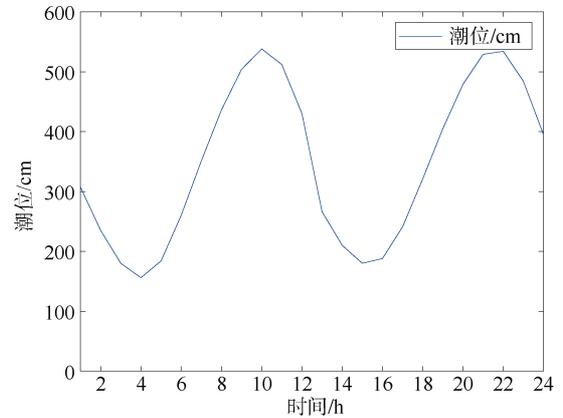


图 3 11 月 20 日 13 点-21 日 12 点潮位变化  
Fig. 3 Change of tidal level from 13:00 on 20th November to 12:00 on 21st November

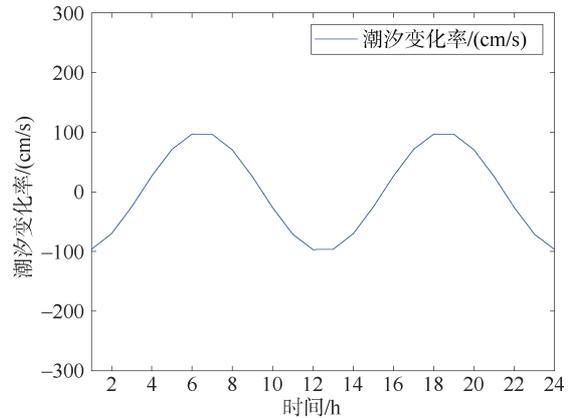


图 4 11 月 20 日 13 点-21 日 12 点潮位变化率变化  
Fig. 4 Change of tidal level change rate from 13:00 on 20th November to 12:00 on 21st November

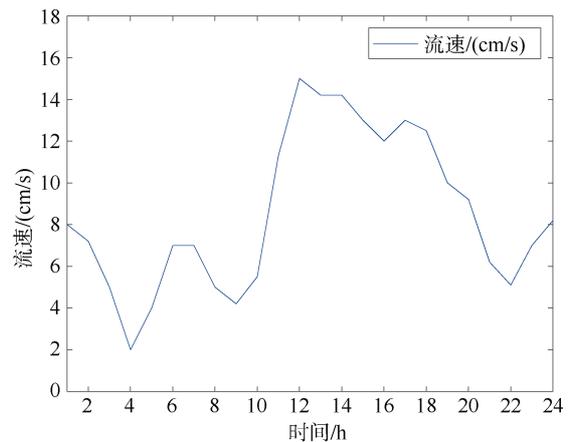


图 5 11 月 20 日 13 点-21 日 12 点流速  
Fig. 5 Change of flow rate from 13:00 on 20th November to 12:00 on 21st November

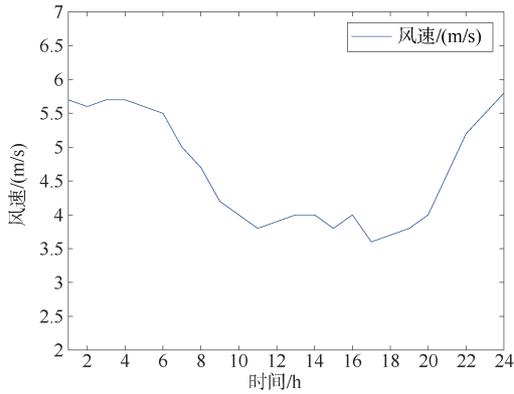


图 6 11 月 20 日 13 点-21 日 12 点风速变化  
Fig. 6 Change of wind speed from 13:00 on 20th November to 12:00 on 21st November

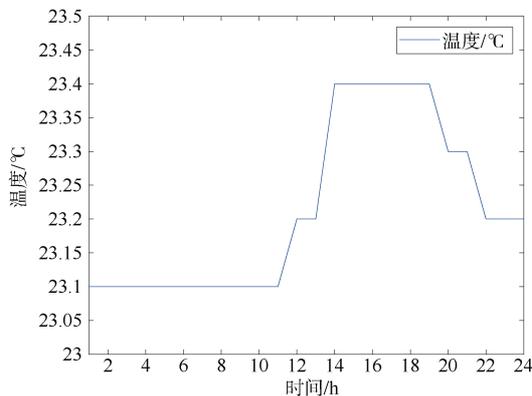


图 7 11 月 20 日 13 点-21 日 12 点流速变化

Fig. 7 Change of velocity from 13:00 on 20th November to 12:00 on 21st November

观测时间为 11 月 20 日-11 月 21 日, 根据图 3-7 所示的数据, 可获得以下信息:

潮汐情况: 厦门港的潮汐为半日潮, 即一天中有 2 次高潮和 2 次低潮。具体来说, 高潮点分别在 0 点和 22 点。

海流流速变化: 从数据中可以看出, 在下午 17 点之后海流流速逐渐减小, 在上午 9 点之后开始增加。

风速状况: 风速采集高度约 5 m, 风速在 20 点之后开始增加, 并在 23 点-6 点之间保持较高的风速。6 点之后开始下降, 在 9 点之后保持较低的风速。

海水温度变化: 海水表层温度在中午 12 点之后开始增加, 在 13 点-18 点之间保持较高的水温。18 点之后开始下降, 在 24 点-10 点保持较低的水温。

### 3 实验结果与分析

本文主要从平均端到端时延、数据包丢包率 2 个指标来评估海洋环境对水声网络性能的影响。为了对

11 月 20 日在厦门港进行的水声通信网络实验采集的数据进行信道估计, 利用信号帧中同步部分的线性调频信号, 通过与本地线性调频信号进行相关处理获得信道响应<sup>[18]</sup>。从图 8 中可以看出, 在观测时间 24 h 中, 多径现象随着观测时间在不断变化。在午夜时对信道的估计结构清晰, 原因可能是晚上行船少, 传播噪声少, 另外晚上的水温, 风速和流速都较为稳定。在白天时信道的多径效应明显。

厦门港 11 月 20 日 13 时-21 日 12 时节点 3 与节点 2 之间的信道响应如图 8。

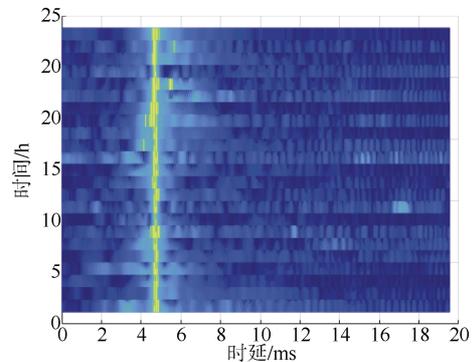


图 8 海试实验信道响应

Fig. 8 Channel response of sea trial experiment

多径强度剖面如图 9 所示。

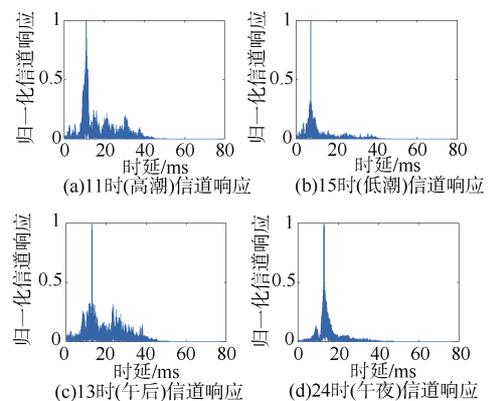


图 9 多径强度剖面

Fig. 9 Multi-path strength profile

为了证实风、浪、潮汐等典型海洋环境因素对水声网络性能的影响的相关性, 对网络性能和海洋环境因素进行皮尔逊相关分析。2 个变量之间的皮尔逊相关系数定义为 2 个变量之间的协方差和标准差的商<sup>[19]</sup>, 即

$$\rho_{X,Y} = \frac{E[(X - EX)(Y - EY)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (1)$$

式 (1) 为皮尔逊相关系数的计算公式, 其值为正时, 代表 2 个变量之间正相关; 为负时, 代表 2 个变量之间负相关, 而其所代表的相关性如表 2 所示。

表 2 相关性参数

Table 2 Correlation parameters

$ r $	相关强度
0.8~1.0	极强相关
0.6~0.8	强相关
0.4~0.6	中等程度相关
0.2~0.4	弱相关
0.0~0.2	极弱相关或无相关

在持续时间为 24 h 的组网试验中, 本文以网络平均端到端时延为研究对象, 分别考察了潮位变化率、潮位和风速对其的影响, 计算了这 3 个因素与网络平均端到端时延之间的皮尔逊相关系数。

### 3.1 平均端到端时延

端到端时延定义为数据包从源节点到达汇聚节点所经历的时间<sup>[20]</sup>, 包括由于距离产生的传播时延、节点发射数据的传输时延、等待产生的处理时延和排队时延。其中, 节点发射数据的传输时延是一个固定值。端到端时延越长则表示数据包在传输过程中延误的时间越长。平均端到端时延是对数据包的端到端时延取平均值, 如下式所示:

平均端到端时延 =

$$\frac{\sum(\text{汇聚节点接收时间} - \text{数据包发送时间})}{\text{汇聚节点成功接收数据包总数}} \quad (2)$$

本实验各节点之间平均端到端时延的结果如图 10 所示。

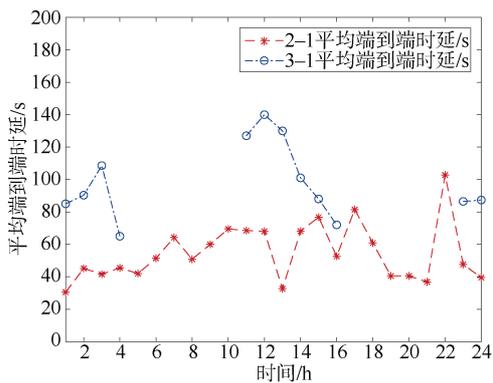


图 10 节点 3 与节点 2 之间的平均端到端时延和节点 2 与节点 1 之间的平均端到端时延

Fig. 10 Average end-to-end delay between node 3 and node 2 and average end-to-end delay between node 2 and node 1

#### 3.1.1 平均端到端时延与潮位变化率相关关系分析

如图 11 所示, 在网络模式 2 下, 经过计算发现节点 3 和节点 1 之间的平均端到端时延与潮位变化率之间的相关系数为  $|\rho_{X,Y1}| = 0.93$  这表明 2 个因素之间有着极强的相关关系。原因是在网络模式 2 的时间段内海洋处于落潮阶段, 潮位变化大, 节点距离海底的高度发生变化, 信道多径结构发生改变, 使得部分声线无法到达目标节点<sup>[21]</sup>, 从而导致协议包重发重传的次数增加, 节点丢包率增加, 并且由于协议包重发重传的次数增加, 协议包和数据包在缓冲区内堆积, 端到端时延明显增加。

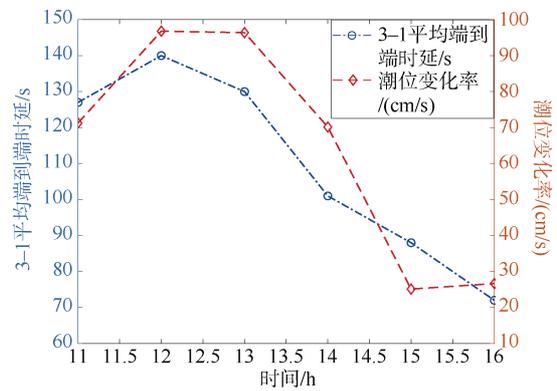


图 11 网络模式 2 下潮位变化率与平均端到端时延  
Fig. 11 Rate of tidal level change and average end-to-end delay in network mode 2

#### 3.1.2 平均端到端时延与潮位相关关系分析

如图 12 所示, 节点 3 与节点 1 之间的平均端到端时延与潮位之间的相关系数为  $|\rho_{X,Y2}| = 0.77$ , 这表明平均端到端时延与潮位之间存在着强相关的相关关系。由图 9 可知, 节点 3 与节点 2 之间的水声通信信道, 在高潮时, 多径情况严重, 在低潮时, 多径情况不明显。原因是网络节点搭载在浮标上, 距离海面的距离固定, 当潮位上升时, 节点距离海底的距离也随之增加, 导致了多径传播情况的显著增加, 从而导致信号的叠加和相位干扰, 使得物理层通信性能明显下降, 节点的解调准确性也随之降低。平均端到端时延明显增加, 然而, 当潮位变低时, 多径传播情况减少, 节点解调效果更好, 协议包重发次数也相应减少, 这使得水声通信网络的时延降低。总之, 潮汐变化对于水声通信网络的性能产生了显著影响, 特别是在多径传播情况增加时, 会导致时延的明显增加。

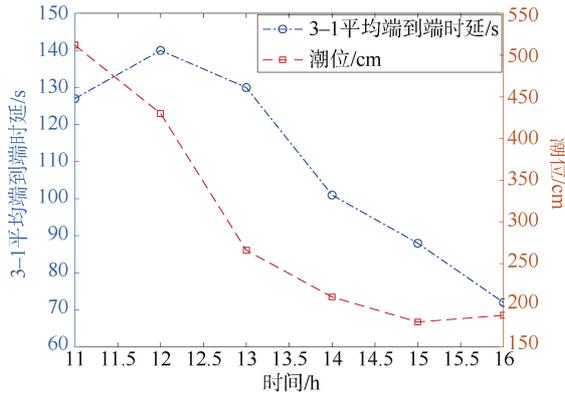


图 12 网络模式 2 下潮位与平均端到端时延  
Fig. 12 Tidal level and average end-to-end delay in network mode 2

3.1.3 平均端到端时延与流速相关关系分析:

信号通过计算发现在网络模式 2 的情况下, 节点 3 和节点 1 之间的平均端到端时延与流速之间的相关系数为  $|\rho_{X,Y3}| = 0.43$ , 这表明这 2 个因素之间存在中等强度的负相关关系。在高流速环境中, 声波会发生更复杂的多径传播, 并且会导致声波信号的衰减更快。

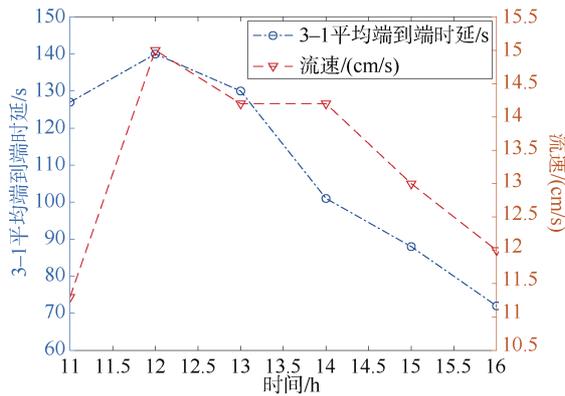


图 13 网络模式 2 下流速与平均端到端时延  
Fig. 13 Flow rate and average end-to-end delay in network mode 2

3.1.4 平均端到端时延与温度相关关系分析:

进行通过计算发现在网络模式 2 的情况下, 节点 3 和节点 1 之间的平均端到端时延与温度之间的相关系数为  $|\rho_{X,Y3}| = 0.86$ , 这表明这 2 个因素之间存在强相关, 从图 14 可以观察到, 在上午 11 点后, 海水温度逐渐上升, 直至下午 2 点海水温度达到最高值。在海水温度上升的过程中, 节点 3 与节点 1 之间的网络通信时延较大。然而, 从下午 2 点开始, 海

水温度保持稳定, 此时网络通信时延逐渐减小。这种情况主要是由于厦门港海域属于浅海, 受阳光直射影响较大, 因而海水表面温度波动较大。当海水温度上升时, 声线传播路径发生改变, 导致信道质量下降, 从而限制了物理层通信性能, 导致网络的平均端到端时延增加。而当海水温度稳定时, 信道也变得稳定, 网络的平均端到端时延便开始减小。

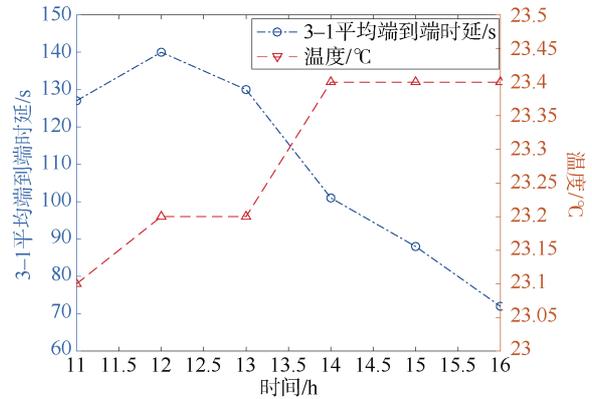


图 14 网络模式 2 下温度与平均端到端时延  
Fig. 14 Temperature and average end-to-end delay in network mode 2

3.2 数据包丢包率

数据包丢包率 (Packet Loss Rate, PLR) 定义为节点在传输过程中丢失的包的数量与产生的数据包总数的比值<sup>[19]</sup>, 如下式所示:

$$PLR = \frac{\text{节点传输过程中丢失的包的数量}}{\text{节点产生数据包总数}} \quad (3)$$

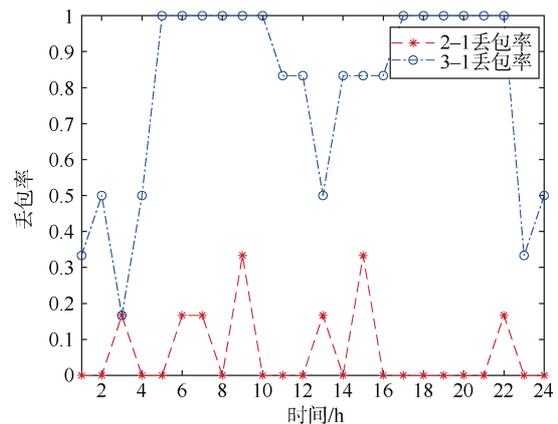


图 15 节点 3 与节点 1 之间的丢包率和节点 2 与节点 1 之间的丢包率

Fig. 15 Packet loss rate between node 3 and node 1 and packet loss rate between node 2 and node 1

数据包丢包率用来衡量网络性能,在理想的情况下,传输成功率为1,数据包丢包率为0。实验结果越接近0则表示网络性能越好,接近1则表示网络中有大量的数据包被丢弃。

在图15中可观察到,同样是在网络模式2的情况下,11点到16点期间,节点3到节点1的丢包率明显高于23点到4点时期的丢包率。在图9中,午后的多径效应明显强于午夜时段,这是由于中午12点之后阳光直射,海水表面温度开始上升,根据射线声学模型和 Snell 定律<sup>[22]</sup>可知声线将向下弯曲,导致更多的声损失,这将导致丢包率上升。随着海水表面的持续升温以及风浪涌动等海水运动导致的海水混合,海水温度趋于一致,丢包率下降。

在网络模式1下,节点3与节点1之间的丢包率为1,这表明节点3与节点1没有成功建立通信通道。通过对节点行为中协议包的收发进行观察,我们发现节点3发送的请求发送协议包(Request to Send, RTS)能够被节点1和节点2接受并正确解调,而节点2则进行了退避操作。然而,当节点1发送允许发送协议包(Clear to Send, CTS)时,节点3解调错误。此时,海洋正处于涨潮期,潮位变化幅度较大,海面存在随机的波动和散射现象,导致声波传播受到较大干扰,使得部分声线无法远距离传播<sup>[20]</sup>。由于节点3与节点1的通信距离较远,这种干扰影响进一步增大,最终导致节点3与节点1之间的通信无法建立。但通过改变网络运行模式,节点3能够借助节点2转发信息,成功实现与节点1之间的通信。在水声网络中,不同节点所处的海洋环境不同,这将直接影响节点间的通信状况。通过选择合适的路由路径,可以有效提高通信效率。

#### 4 结束语

本文针对由于复杂多变的海洋环境导致UACN的性能无法保持稳定的问题,面向近海海洋环境对水声网络性能的影响评估,开展三点水声通信网络实验。本文实验表明:潮位、潮汐海流、温度、以及收发位置等都会影响水声通信网

络的性能。本文一方面验证不同的海洋环境参数与网络的性能之间存在着一定的相关关系;另一方面也揭示了在温度、潮汐海流等海洋环境因素影响下,水声通信网络性能受到了极大的限制时,可望通过不同的网络路由规划,选择合适的拓扑结构等手段,从而提高网络的传输速率和可靠性,为多节点长时间的UACN实验提供了设计参考。

需要指出,海洋环境的复杂性很高,包括海水温度、盐度、潮高潮低、流速、声速等多个因素,因此准确地评估单一的海洋环境因素其对网络性能的影响较为困难。下一步工作中,计划通过对海洋环境与UACN的性能指标的实验数据进行深度学习挖掘,采用海洋环境特征融合的方式,综合多个海洋环境因素对UACN性能的影响,提高评估的准确性和可靠性,以期海洋环境发生显著变化时,为节点的路由选择和其他网络通信策略提供指导,以改进网络设计并增强UACN性能。

#### 参考文献

- [1] MARVALDI J, LEGRAND J, MASSET J F, et al. ROSE project: development and demonstration of a "Mobile Response Observatory" prototype for subsea environmental monitoring[J]. Geophysical Research Abstracts, 2007, 9: 02316.
- [2] KHAN A, JENKINS L. Undersea wireless sensor network for ocean pollution prevention[C]// 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops. Bangalore: IEEE, 2008.
- [3] XU B Y, LIU H M, LIU B. A predictive localization algorithm for underwater wireless sensor networks-based on improved backtracking search optimization and gray wolf optimizer[C]// 41st Chinese Control Conference. Hefei: IEEE, 2022.
- [4] EGGEN T H. Phase coherent communication in the presence of ship noise[C]// Oceans 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Rhode Island: IEEE, 2000.
- [5] 乔钢, 刘淞佐, 刘奇佩. 水声通信网络协议、仿真与试验综述[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(3): 151-160.
- [6] APARICIO J. Evaluation of spread-spectrum signals in realistic underwater noisy environments[C]// Oceans

2016. Shanghai: IEEE, 2016.
- [7] LIU S X, SHEN C C. Impact of sea waves on performance of shallow water acoustic communications[C]// 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (CO-A). Harbin: IEEE, 2016.
- [8] ULLO S L, SINHA G R. Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors[J]. *Sensors*, 2020, 20(11): 3113.
- [9] 罗朝辉. 基于多核处理器的软件定义水声网络验证平台[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [10] ZHENG S Y, JIANG W H, TONG F, et al. Design of a UW-IoT network test platform for shallow water environment[C]// Proceedings of the 14th International Conference on Underwater Networks and Systems. Atlanta: Association for Computing Machinery, 2019.
- [11] ZHANG Z, YAN S F, XU L J, et al. Design of an underwater acoustic network node[C]// 2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Hong Kong: IEEE, 2016.
- [12] QIAO G, ZHAO C, ZHOU F, et al. Distributed localization based on signal propagation loss for underwater sensor networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 112985-112995.
- [13] 刘丽丽. 水声网络节点系统设计研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [14] 李剑汶, 王小阳, 童峰. 浅海信道调频水声语音通信方法比较[J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(1): 127-131.
- [15] 王小阳. 微小型 AUV 水声通信技术及其实现研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [16] 杨道宇, 马伯乐, 周跃海, 等. 面向长时水声通信数据采集与评估的浮标设计与实现[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2022, 5(4): 279-284.
- [17] 郑思远, 刘胜兴, 童峰. 带移动节点水声网络的负载平衡多址协议 [C] // 中国声学学会水声学分会 2015 年学术会议论文集. 北京: 中国声学学会, 2015.
- [18] BOROWSKI B. Characterization of a very shallow water acoustic communication channel[C]// *Oceans 2009*. Biloxi: IEEE, 2009.
- [19] 田毅扬. 基于稀疏表示的特征选择算法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [20] 郑思远, 李斌, 曹秀岭, 等. 跨介质水声网络试验平台设计与试验[J]. *水下无人系统学报*, 2018, 26(6): 618-622.
- [21] 陈文剑, 郎鹏远, 尹爽, 等. 起伏海面环境下水声信道特性及估计方法[J]. *应用声学*, 2018, 37(5): 722-731.
- [22] 许肖梅. 声学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(责任编辑: 张曼莉)