

纪念马大猷先生诞辰 110 周年

综合链路质量认知的水声传感网络路由优化方法*

郝帅峰^{1,2} 郑思远^{1,3} 童 峰^{1,2†} 陈东升^{1,2}

(1 厦门大学 海洋与地球学院 厦门 361102)

(2 厦门大学 导航与位置服务技术国家地方联合工程研究中心 厦门 361005)

(3 自然资源部第三海洋研究所 厦门 361005)

2024 年 7 月 4 日收到

2024 年 9 月 3 日定稿

摘要 针对水声传感网络 (UASN) 在复杂多变海洋环境条件下网络路由适应性差, 导致网络性能起伏严重、鲁棒性低的问题, 通过不同层面、不同机制的环境认知进行链路质量评估及路由优化, 提出一种综合链路质量认知路由方法。首先, 定义了由莱斯因子、信噪比、节点负载等多维度参数组成的综合链路质量特征, 对变化海洋环境下的信号、信道、链路信息进行综合感知, 并通过结合多址接入交互与监听实现低开销链路质量评估; 在此基础上, 根据理想解相似排序法设计多属性优化机制进行 UASN 路由的认知优化。仿真及实际海洋环境下开展的水声传感网络试验结果表明, 所提方法可获得优于固定路由及常规认知路由方法的网络数据包投递率等网络指标, 验证了通过认知优化改善水声传感网络对海洋环境适应性的有效性。

关键词 水声传感网络, 认知路由, 综合链路质量, 多属性优化

PACS: 43.60, 43.30

DOI: 10.12395/0371-0025.2024191

CSTR: 32049.14.11-2065.2024191

A comprehensive link quality cognitive routing protocol for underwater acoustic sensor networks

HAO Shuaifeng^{1,2} ZHENG Siyuan^{1,3} TONG Feng^{1,2†} CHEN Dongsheng^{1,2}

(1 College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University Xiamen 361102)

(2 National and Local Joint Engineering Research Center of Navigation and Location Service Technology, Xiamen University Xiamen 361005)

(3 Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources Xiamen 361005)

Received Jul. 4, 2024

Revised Sept. 3, 2024

Abstract In response to the poor adaptability of network routing in complex and dynamic marine environments for underwater acoustic sensor network (UASN), which leads to significant fluctuations in network performance and low robustness, a comprehensive link quality cognitive routing protocol (CLQ-CR) is proposed. This protocol evaluates link quality and optimizes routing through environmental cognition at different levels and mechanisms. Firstly, the comprehensive link quality factor, such as the K -factor, signal-to-noise ratio, and node load, is defined to comprehensively qualify the UASN link from the perspective of signal, channel, and link feature in the marine environment. Low-cost link quality assessment is achieved by combining multiple access contention and monitoring. Based on this, a multi-attribute optimization mechanism is designed using the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) for cognitive optimization of UASN routing. The simulation and experimental results of UASN conducted in practical shallow sea environment show that the proposed method can achieve better network performance indicators such as packet delivery rate than fixed routing and conventional cognitive routing methods, thus verifying the effectiveness of improving the adaptability of underwater acoustic sensing networks to marine environments through cognitive optimization.

Keywords Underwater acoustic sensor network, Cognitive routing, Comprehensive link quality, Multi-attribute optimization

* 国家重点研发计划项目 (2018YFE0110000) 和上海市科委“科技创新行动计划”项目 (21DZ1205502) 资助

† 通讯作者: 童峰, ftong@xmu.edu.cn

引言

随着海洋信息获取、传输与感知需求的快速增加,水声传感网络(UASN)在海洋环境监测、信息中继、水下无人平台集群等领域得到了广泛的重视^[1]。然而,水声通信给UASN的设计带来了诸多限制,比如声速传播较慢,在长距离通信中可能出现数百毫秒甚至数秒级的传播时延^[2];此外,受潮汐涌浪等环境因素影响,网络拓扑呈现不稳定性,节点间通信易受水声信道时变、多径特性影响^[3];而电池供电能量严重受限导致UASN对协议开销高度敏感。针对复杂海洋场景下UASN面临的挑战,近年来网络多址接入、路由、拓扑优化等关键技术得到了广泛的研究^[4]。

路由对于保证数据从源节点传递到网络中的最终目的节点至关重要,对数据包投递率、端到端时延均产生很大影响,也是UASN研究的热点。当前,基于地理位置、基于能量和基于链路状态等路由优化策略均通过设计网络路由优化代价函数,以节点交互的方式实现路由优化^[5-7]。如,Wang等提出了一种基于位置的自适应路由协议,通过限制备选节点选择范围,优化转发概率和转发时延,与现有协议相比降低了数据包碰撞概率、时延和平均能耗^[5]。Liu等提出了一种可靠长寿命路由协议(LRP)的新型路由策略,通过多路径渗流式路由和能量控制来保证网络的可靠性和延长网络的寿命^[6]。Zhu等提出了一种基于粒子群优化算法的自适应路由协议,通过优化剩余能量和最小化跳数降低丢包率和能量消耗^[7]。

认知路由是一种源自无线网络的路由优化技术,其核心在于节点与周围环境交互信息,感知并利用空闲频谱,以达到降低冲突提高信道利用率的目的,具有很高的灵活性和适应性^[8-9]。针对水下频谱资源被海洋中动物和UASN同时占用,导致相互影响和干扰的问题,Bicen等提出了一种频谱感知通信网络(SUN),仿真实验验证了SUN可达到比传统固定频谱方法更高的容量^[10]。Yu等提出一种接收端发起的频谱管理系统,接收端对周围传感器节点进行数据收集并对流量进行预测,智能调控传感器节点发送数据的时间。仿真结果表明其在能源效率、吞吐量和时延等方面均优于传统的多用户冲突避免协议。

Basagni等提出了一种基于信道感知的路由协议(CARP)^[11],该协议根据中继节点成功传输的历史记录和距离汇聚节点跳数评估与各邻居节点链路的质量,选择质量最高的邻居节点作为下一跳的中继节点,仿真和海试实验表明其在数据包投递率、能耗

和时延等方面均优于聚焦波束路由协议和基于洪泛的路由协议。需指出,由于UASN海试实验的组织 and 部署复杂度高、实施难度大,当前水声认知路由协议研究多采用NS2、NS3、OPNET等网络仿真工具进行评估分析,海试实验相对较少。而仿真环境与实际海洋环境存在诸多差异,其中包括海洋环境中的噪声、海面波浪、海底地形等方面的差异。这些差异导致仿真结果无法全面反映实际海洋环境下认知路由协议的性能,需要结合实地海试实验全面评估其性能与可行性。

本文设计了一种用于UASN的综合链路质量认知路由方法(Comprehensive Link Quality Cognitive Routing, CLQ-CR),该方法通过对信号、信道、链路质量等多维度信息进行综合认知并进行多属性优化,同时,认知过程依托监听及多址接入交互进行,因而不需额外增加探测协议包,从而有效减少网络认知路由的开销,提升变化海洋环境下的路由性能。最后,面向海洋环境监测应用场景,通过仿真及在实际海洋环境下开展组网实验对所设计的认知路由方法进行性能分析验证。

1 综合链路质量认知路由方案设计

1.1 综合链路质量定义

考虑到复杂海洋环境对水声信道造成的影响,综合链路质量的准确评估对于UASN的路由选择至关重要,然而,单一指标往往难以全面表征链路特性。因此,采用多参数组合的方法,以充分利用各参数的优势,更全面地评估链路质量。所涉及的硬件参数包括莱斯因子^[12]和信噪比等与信号解调直接相关的物理层指标,其特点是评估速度快且成本低,可以由接收机直接读取;软件参数则包括数据包平均传输次数和节点负载等,相对于硬件参数,软件参数可以更客观地反映链路的真实状态。这种综合链路质量因子的评估涉及信号层面、信道层面以及链路层面的多维信息。

(1) 莱斯因子(K 因子)

水下通信环境中,由于海底或海面的反射,导致信号接收端出现显著的多径效应。此情况通常适用于莱斯衰落分布模型。 K 因子衡量了信道系统中直达径能量与非直达径能量之间的比值。 K 因子的值越大,表明信道质量越好,误码率越低。为将 K 因子用作链路质量评估的参数,需要对信道进行估计。UASN的物理层利用线性调频(LFM)信号作为信号的到达检测和同步。利用接收到的LFM信号与本

地 LFM 信号进行相关处理, 得到信道响应 $\mathbf{H}$ 。 K 因子的计算公式为

$$K = \frac{|\mathbf{H}_{\max}|^2}{\sum |\mathbf{H}|^2 - |\mathbf{H}_{\max}|^2}, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{H}_{\max}$ 表示信道直达径的能量, 这是因为在浅海环境中, 直达径的能量一般最大, 若只有直达径, 则将 K 因子值设置为 20。在实际应用中, 由于硬件解调时所使用的缓冲区长度通常超过 LFM 信号的长度, 通过相关处理得到的信道响应结果并不准确, 但可通过相关后的结果估计出多径簇, 利用多径簇的峰值进行多径的判定^[13]。设置判断多径的最小值 $\mathbf{H}_{\min} = 0.3\mathbf{H}_{\max}$ 。

(2) 信噪比 (SNR)

SNR 与误码率有着高度相关性^[14], 因此信噪比是评估链路质量的重要指标之一。通过信号段与噪声段的功率比计算信噪比 R_{SN} :

$$R_{\text{SN}} = \frac{P_s}{P_n}, \quad (2)$$

其中, P_s 为信号段功率, P_n 为噪声段功率。

(3) 数据包平均传输次数 (RNP)^[15]

RNP 代表数据包在成功传输到目的节点之前需要进行传输或重新传输的次数。它反映了当前链路成功传输一次数据所需的平均成本。 N_{RP} 计算方法如下:

$$N_{\text{RP}} = \frac{\text{Num}_0}{\text{Num}_1}, \quad (3)$$

其中, Num_0 表示数据包发送次数, Num_1 表示数据包发送成功次数。

(4) 节点负载^[16]

在网络运行过程中, 若某个节点与邻节点之间的链路质量非常好, 如果不考虑节点负载情况, 则周围节点将都倾向于选择该节点进行传输, 然而这种情况可能导致网络局部负载过高, 从而引发拥塞状况。拥塞不可避免地增加了碰撞概率, 降低数据包投递率。从能量消耗的角度来看, 高负载节点的能量耗尽速度加快, 不利于延长网络的平均寿命。通过监听邻居节点的握手情况, 并统计其发送数据包 (DATA) 和确认信号 (ACK) 的数量, 作为衡量负载的依据, 即

$$N_{\text{load}} = N_{\text{DATA}} + N_{\text{ACK}}, \quad (4)$$

其中, N_{DATA} 表示节点发送 DATA 的数量, N_{ACK} 代表节点发送 ACK 的数量。通过统计邻居节点发送的 DATA 数量, 可以获取邻居节点自身生成的数据包数; 对 ACK 数量进行计数则可以得到邻居节点转发

的数据包数。

链路质量参数在环境变化下呈现时变性, 可能在短时间内发生显著波动, 采用瞬时链路质量参数值来判断是不全面的, 因此需要利用历史数据对链路质量参数进行平滑处理。对于计算资源有限的 UASN 节点而言, 最简单有效的方法是采用一次指数平滑, 其公式为

$$E_t = \alpha E_t' + (1 - \alpha) E_{t-1}, \quad (5)$$

其中, E_t' 代表此时刻的参数值, E_{t-1} 代表上一时刻的参数值, E_t 代表平滑后的参数值。 α 为平滑系数, α 越接近 1, 代表历史数据对现在的影响越小, 应用于快时变环境; α 越接近 0, 代表历史数据对现在的影响越大, 应用于慢时变环境。

需指出, 上述提及的四种综合链路质量因素并不能反映链路质量的所有方面, 因为链路质量还受到节点运动、网络拓扑变化等其他多种因素的影响。从方法框架的角度来看, 诸如多普勒效应和节点间距离等因素均可纳入综合链路质量的评估中, 以供后续决策参考。

1.2 基于多址接入交互的综合链路质量认知

常见的 MAC 层协议主要包括固定分配类协议和随机竞争类协议。固定分配类协议通过预分配信道资源避免冲突, 但缺乏节点间的交互, 无法提供认知路由所需的双向链路信息。随机竞争类协议中的随机接入协议存在隐藏终端和暴露终端问题, 而基于握手的避免碰撞多路访问 (MACA) 协议通过握手解决这些问题, 并提供双向链路信息, 为认知路由决策提供必要的链路信息。MACA 协议的工作流程^[17]如图 1 所示, 两个节点通过相互发送 RTS (Request to Send) 和 CTS (Clear to Send) 信息来预约信道, 从而避免冲突。

所提 CLQ-CR 协议对多址交互过程进行利用, 以交互直接获取、监听被动获取等方式进行链路质量感知。需指出, 单向链路的导通并不意味着双向链路的导通^[18], 这意味着收发节点之间的信道并不具备完全一致性。为获取双向信道信息, 将 RTS/CTS 握手过程与双向信道信息获取相结合。当目的节点接收到源节点发送的 RTS 后, 回复 CTS 时会携带自身计算出的硬件参数, 使得源节点在接收到 CTS 后能够获得往返的双向信道信息。同样地, 当目的节点收到源节点发送的 DATA 包时, 也能获取往返的双向信道信息。

与硬件参数不同, N_{RP} 和 N_{load} 等软件参数无法通

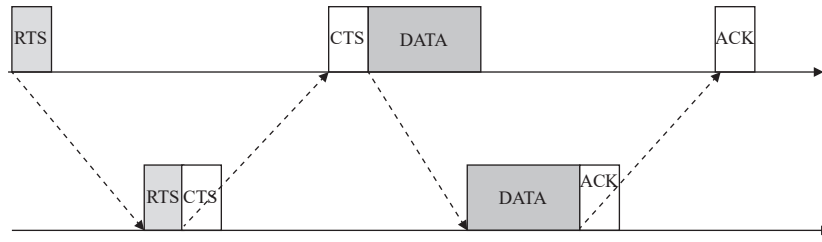


图 1 MACA 协议流程图

过一次信号的收发直接获取,它们需要对网络数据进行一段时间的统计。由于水下环境受限,发送大量探测包评估链路质量会消耗大量资源。为了不增加额外信令开销,通过监听信道获取信息。

如上图所示,MACA 协议严格遵循步骤: RTS→CTS→DATA→ACK。根据这个过程可以将节点计算 N_{RP} 的公式改写为

$$N_{RP} = \frac{N_{RTS}}{N_{ACK}}, \quad (6)$$

其中, N_{RTS} 为节点发送 RTS 次数, N_{ACK} 为节点接收到 ACK 的次数。

1.3 路由信息的发现与维护

每个节点的缓存当中存储一张路由表,用作记录邻居节点和链路质量参数。路由表中存储的部分信息如表 1 所示。其中,节点 ID 项中存储所有能与本节点直接通信的邻居节点 ID,并在监听到非存储在节点 ID 中的邻居节点时,根据其 ID 在对应行建立起新的邻居节点。

链路质量参数项中存储前文提到的各项链路质量参数的参数值。跳数项中存储节点距离汇聚节点的跳数。评估结果项中存储 CLQ-CR 协议给出的结果值,用于衡量与邻居节点之间的链路质量。

为避免环路现象的产生,如果在最近的数据传输中,节点接收到邻居节点传输来的中继任务,则在“上游节点”项对其进行标记。在挑选目的节点时,

将不考虑已被标记为上游节点的邻居节点。

每当节点接收到邻居节点的任何消息,立即将本地时间填入“更新时间”项。用于判断链路质量的时效性。

1.4 基于理想解相似排序法的多属性认知路由优化策略

理想解相似排序法 (TOPSIS)^[19] 方法具有真实可靠、直观合理、计算简便等优点,并且能够充分利用原始数据,对数据类型和数量没有严格要求。本文采用 TOPSIS 方法,对中继节点进行排序和优选。基于 TOPSIS 的多属性决策模型一般步骤如图 2 所示。

(1) 构造初始决策矩阵

假设源节点具有 n 个备选的邻居节点,即存在 n 个决策方案。链路质量的评估参数包括 K , R_{SN} , N_{RP} , N_{load} 。因此,初始决策矩阵可表示为

$$X = \begin{pmatrix} K_1 & R_{SN1} & N_{RP1} & N_{load1} \\ K_2 & R_{SN2} & N_{RP2} & N_{load2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_n & R_{SNn} & N_{RPn} & N_{loadn} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

链路模型可表示为

$$I = \{K_{ij}, R_{SNij}, N_{RPij}, N_{loadij}\}, \quad (8)$$

其中, i 为需要发送信息的源节点, j 为目的节点集合, K_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的链路质量中的 K 因子。

节点 i 到节点 j 的链路需要满足以下条件:

表 1 路由信息表

节点ID	K 因子	SNR	RNP	节点负载	跳数	评估结果	上游节点	更新时间
------	--------	-----	-----	------	----	------	------	------

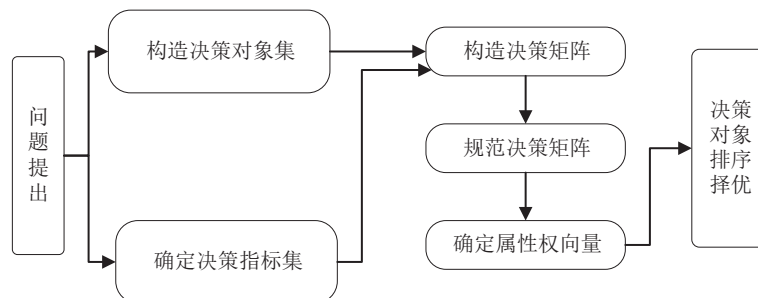


图 2 基于 TOPSIS 的多属性决策模型一般步骤

$$\begin{cases} K_{ij} \geq K_{th}, \\ R_{SNij} \geq R_{SNth}, \\ N_{RPij} \leq N_{RPth}, \\ N_{loadij} \leq N_{loadth}, \\ T - T_{ij} \leq T_{th}, \\ N_{hopij} \leq N_{hopth}, \end{cases} \quad (9)$$

其中, K_{th} , R_{SNth} , N_{RPth} , N_{loadth} , T_{th} 均是确保可靠传输的门限指标, 一条通信链路的链路质量参数可能各不相同, 当某个参数特别差时, 其他参数的良好表现可能导致整体加权结果仍然表现为最优解, 这显然是不合理的。因此, 通过设置可靠传输的指标门限, 可以在路由选择过程中舍弃不符合要求的节点。 N_{hopth} 为节点自身跳数, 为防止产生环路现象, 备选节点跳数不得大于自身跳数。 T 代表路由表中该行的更新时间, 如果长时间未收到邻居节点的任何消息, 可能意味着该邻居节点已经无法正常运作。

(2) 规范决策矩阵

由于链路质量各指标存在数量级差异, 因此需要对其进行规范化处理。在评估指标中, 可以将其分为成本型和效益型两类。效益型指标的数值越大越有利, 而成本型指标则是数值越小越有利。在处理效益型指标时, 需要进行如下操作:

$$x_{ij}' = \frac{x_{ij} - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)}, \quad (10)$$

对于成本型指标:

$$x_{ij}' = \frac{\max(X_j) - x_{ij}}{\max(X_j) - \min(X_j)}, \quad (11)$$

其中, x_{ij}' 是第 i 行第 j 列元素的规范化值, x_{ij} 是原始数据, $\min(X_j)$ 和 $\max(X_j)$ 分别是第 j 列的最小值和最大值。 K 为效益型指标, R_{SN} , N_{RP} , N_{load} 为成本型指标。规范化后的决策矩阵为

$$X' = \begin{pmatrix} K_1' & R_{SN1}' & N_{RP1}' & N_{load1}' \\ K_2' & R_{SN2}' & N_{RP2}' & N_{load2}' \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_n' & R_{SNn}' & N_{RPn}' & N_{loadn}' \end{pmatrix}. \quad (12)$$

(3) 构造加权矩阵

采用 C-OWA 算子^[20] 对参数进行加权, 各指标的权重分别为 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, 经过加权后的决策方案可表示为

$$Y_i = \alpha K_i' + \beta R_{SNi}' + \gamma N_{RPi}' + \delta N_{loadi}', \quad (13)$$

各指标权重与相应指标相乘构成加权规范化矩阵:

$$Y = \begin{pmatrix} \alpha K_1' & \beta R_{SN1}' & \gamma N_{RP1}' & \delta N_{load1}' \\ \alpha K_2' & \beta R_{SN2}' & \gamma N_{RP2}' & \delta N_{load2}' \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha K_n' & \beta R_{SNn}' & \gamma N_{RPn}' & \delta N_{loadn}' \end{pmatrix}. \quad (14)$$

(4) 确定正负理想方案

根据 Y 中每个指标的最大值确定正理想方案:

$$Y^+ = (\max\{y_{11}, y_{21}, \dots, y_{n1}\}, \max\{y_{12}, y_{22}, \dots, y_{n2}\}, \dots, \max\{y_{1m}, y_{2m}, \dots, y_{nm}\}) = (Y_1^+, Y_2^+, \dots, Y_m^+). \quad (15)$$

根据 Y 中每个指标的最小值确定负理想方案:

$$Y^- = (\min\{y_{11}, y_{21}, \dots, y_{n1}\}, \min\{y_{12}, y_{22}, \dots, y_{n2}\}, \dots, \min\{y_{1m}, y_{2m}, \dots, y_{nm}\}) = (Y_1^-, Y_2^-, \dots, Y_m^-). \quad (16)$$

(5) 计算贴近度

计算每个方案到正负理想方案的距离:

$$L^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Y_j^+ - y_{ij})^2}, L^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Y_j^- - y_{ij})^2}. \quad (17)$$

计算各方案与最优方案的贴近程度:

$$C_i = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-}. \quad (18)$$

(6) 节点排序

计算出各方案的贴近度后, 考虑到跳数对数据传输的影响, 需要对跳数等于源节点 i 的链路增加惩罚因子 k , 将惩罚因子 k 与贴近度相乘得到最终排序值 F_i :

$$F_i = kC_i, \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} k = 1, & N_{hopj} < N_{hopi}, \\ k < 1, & N_{hopj} = N_{hopi}. \end{cases} \quad (20)$$

链路质量最优的中继节点与正向理想方案之间的偏差最小, 而与负向理想方案的偏差最大。因此, F_i 值越大, 链路质量越优。最终, 选择 F_i 中最大值对应的邻居节点作为中继节点, 从而完成了路由选择的决策过程。

2 仿真验证与分析

2.1 基于声学认知网络仿真平台的仿真

为了验证 CLQ-CR 协议的性能, 本节使用声学认知网络仿真平台^[21] 对 CLQ-CR 协议、CARP 协议和固定路由 (FR) 协议的数据包投递率以及平均能量消耗等性能进行仿真与量化评估分析。传统网络仿

真平台 (如 OPNET、NS2、NS3) 的物理层通信模块和信道模型并不直接适用于 UASN。为了模拟水声信道, 需要对无线通信信道进行特殊的修改和配置。此外, 传统平台无法提供足够的外部环境信息和节点内部信息支持水声认知网络。而声学认知网络仿真平台集成了物理层、数据链路层和网络层三层模型, 使用环境驱动的水声信道模型, 可以方便地实现各种水声认知网络协议的测试和评估。

2.2 仿真设置

设定近海海洋环境监测为本文水声传感网络应用场景^[22], 在该应用场景下网络节点采集温度、盐度等典型海洋环境参数并经水声传感网络进行网络化传输。近海海域的水声信道特性受潮汐变化、环境噪声等因素的影响显著。参照厦门海域水深约 20 m, 潮差 3 m, 潮汐为半日潮周期特性进行信道参数设置, 利用 Bellhop 模型生成随潮位变化的近海海

域仿真时变信道^[23]如图 3 所示, 可以看到多径随水深呈周期性变化; 同时, 为了模拟近海海洋环境噪声的影响, 选择厦门港实录风浪噪声、水下生物声、船舶噪声作为不同种类加性噪声与接收信号叠加生成信噪比分别为 -5 dB, 0 dB, 5 dB, 10 dB 的仿真接收信号。在接收节点接收信息时, 随机选择一种环境噪声作为加性噪声, 然后进行信号的解调。

在网络物理层设置上: 一方面, 考虑到温度、盐度等海洋环境参数的时间变化尺度较大^[24], 传感信息数据量低、网络负载小, 需在保证网络通联效率的前提下减少物理层性能波动对网络协议性能的影响; 另一方面, 考虑到电池供电的水声传感网络节点长时部署对低发射功率的要求, 在仿真及下节海试实验均选择可靠性高、速率低、可工作于较低接收信噪比的扩频通信^[25]作为物理层通信制式。

以风浪噪声和船舶噪声为例, 图 4 为其波形图和时频图。可以观察到, 风浪噪声主要集中在低频

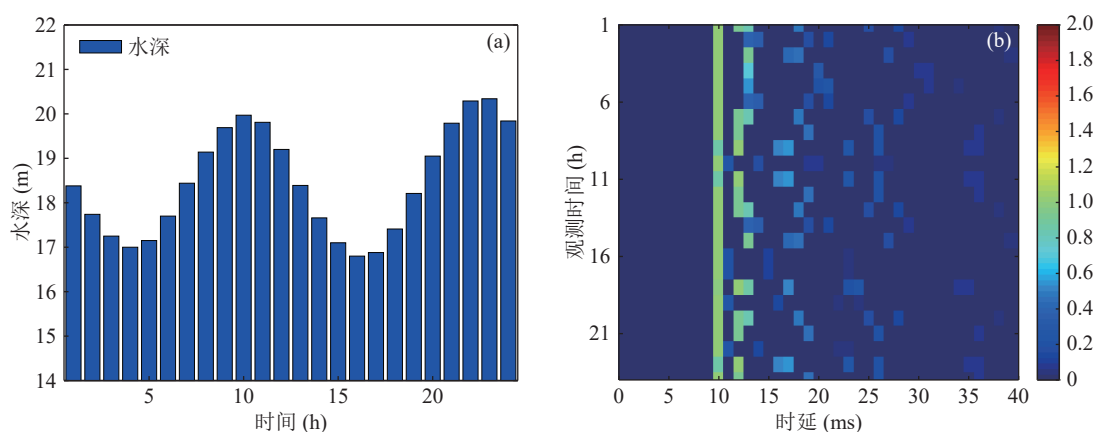


图 3 仿真实验水深变化与时变信道 (a) 24 h 水深变化; (b) 时变仿真信道

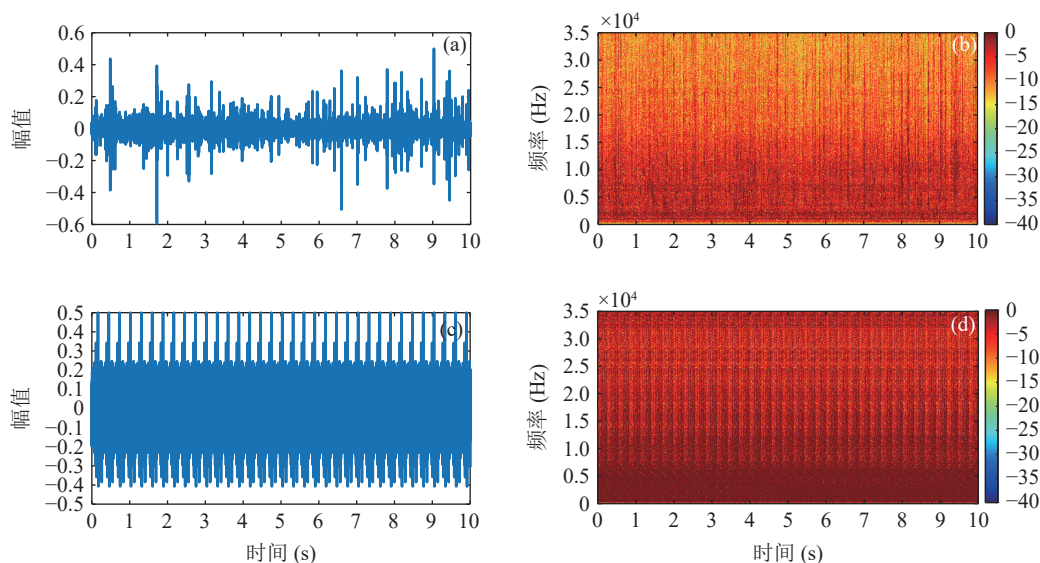


图 4 仿真实验噪声波形与时频图 (a) 风浪噪声波形图; (b) 风浪噪声时频图; (c) 船舶噪声波形图; (d) 船舶噪声时频图

区域, 而船舶噪声在频域上呈现明显的线谱特征。

仿真实验在 $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ 的二维平面内随机生成了 16 个节点, 其中节点 6 和节点 11 被设定为汇聚节点。MAC 层采用 MACA 协议, 协议包发送时长设定为 2 s, 数据包发送时长设定为 8 s。仿真实验的具体参数如表 2 所示。数据包的生成遵循泊松分布, 参数 $1/\lambda$ 被设置为 100 到 1800 之间。当 $1/\lambda$ 为 800 时, 意味着网络中每个节点平均每 800 s 生成一个数据包, 整个网络平均每 50 s 生成一个数据包。

表 2 仿真实验参数

参数	取值
仿真区域 ($\text{km} \times \text{km}$)	6×6
节点传输半径 (km)	3
节点数	16
汇聚节点数	2
调制方式	DSSS
信号中心频率 (kHz)	15.5
信号带宽 (kHz)	3
发射功率 (W)	50
物理层通信速率 (bit/s)	55
最大重传次数	3
网络运行时间 (h)	24
数据包生成间隔 (s/packet)	100~1800

仿真实验的拓扑结构如图 5(a) 所示, 初始路由根据节点间距离初始化。对于距离汇聚节点较近的节点, 跳数设定为 1, 与汇聚节点直接通信。对于距离汇聚节点较远的节点, 则选择最近的节点进行中继通信, 跳数设定为 2, 详见图 5(b)。

2.3 仿真实验结果与分析

数据包投递率 (PDR)^[26] 指节点成功发送的数据包数量与节点产生数据包总数之间的比值, R_{PD} 计算公式为

$$R_{\text{PD}} = \frac{N_r}{N_0}, \quad (21)$$

其中, N_0 表示全网产生的数据包总数, N_r 表示汇聚节点接收到的数据包总数。

节点发送数据包的能量消耗由发送 RTS 协议包的能量消耗和发送 DATA 数据包的能量消耗之和构成, 表达式为

$$E_t = n_{\text{RTS}} E_{\text{RTS}} + n_{\text{DATA}} E_{\text{DATA}}, \quad (22)$$

其中, n_{RTS} 和 n_{DATA} 分别表示节点发送的 RTS 和 DATA 包的数量, E_{RTS} 和 E_{DATA} 分别表示发送一次 RTS 和 DATA 包的能量消耗。因此, 发送单个数据包的平均能量消耗 (AET)^[27] 为

$$\text{AET} = \frac{E_t}{N_{\text{DATA}}}, \quad (23)$$

其中, N_{DATA} 为节点产生的数据包总数。

数据包投递率随负载变化的趋势如图 6 所示。可以观察到, 三种路由协议的 PDR 均随 $1/\lambda$ 的增大而增大, 且增大的速率逐渐减缓。当 $1/\lambda$ 较低时, 三种路由协议的性能均不理想, 这是由于节点间信息传输时间不可避免, 导致 MAC 层使用的 MACA 协议发生严重碰撞, 从而使得无论是 CLQ-CR 还是 CARP 协议都因负载过重而失效。随着 $1/\lambda$ 增大, 三种路由协议的 PDR 逐渐增加, 当 $1/\lambda$ 逐渐增大至节点间信息传输时间对 MACA 协议影响较小时, 三种路由协议的 PDR 趋于稳定。当 $1/\lambda$ 大于 600 时, CLQ-CR 协议的 PDR 明显高于 CARP 和 FR 协议。CARP 协议通过对节点传输历史的学习, 避免选择传输失败次数过多的节点, 从而提高了 PDR, 但仍低于 CLQ-CR 协议。由于固定路由无法改变, FR 协议的 PDR 最低。

平均能耗随 $1/\lambda$ 变化如图 7 所示。当 $1/\lambda$ 较大时, 由于冲突较少, 三种协议的平均能耗都较小。

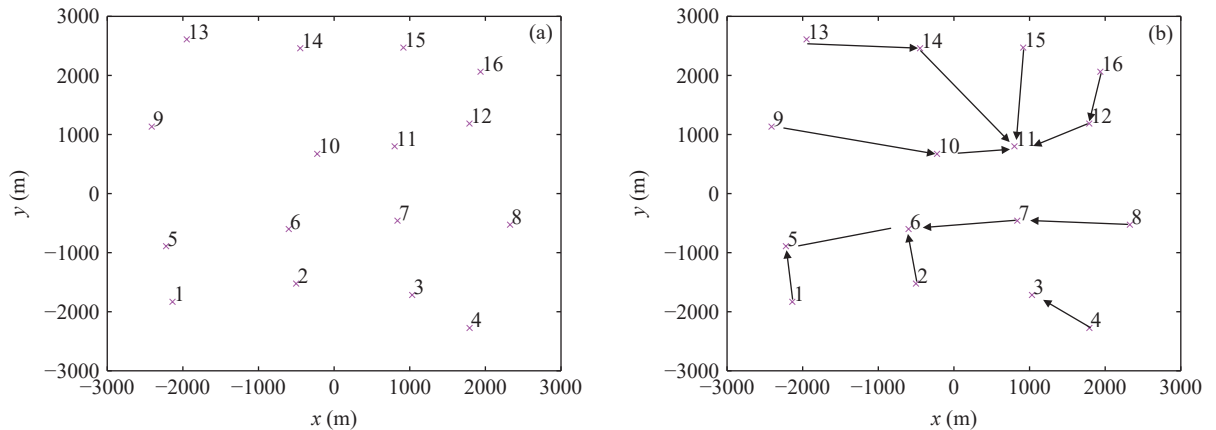


图 5 仿真实验拓扑图 (a) 16 节点网络拓扑图; (b) 16 节点网络初始路由

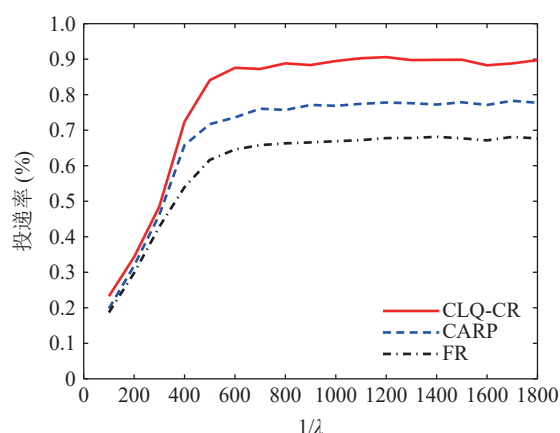


图6 投递率随负载变化

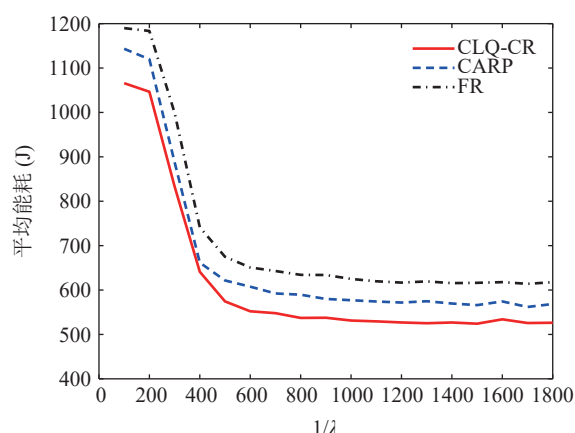


图7 平均能耗随负载变化

FR 协议由于路由无法改变, 在节点间链路不通时一直重发协议包至门限, 因此平均能耗最高。相比之下, CARP 协议根据传输历史避免选择失败次数过多的节点进行中继, 导致平均能耗有所降低。而 CLQ-CR 协议则对链路质量进行综合认知, 选择链路质量最佳的中继节点进行数据传输, 因此平均能耗最低。在 $1/\lambda$ 较低时, 由于 MAC 层竞争和信道预约等冲突导致三种协议的平均能耗急剧增加。然而, 由于 CLQ-CR 协议和 CARP 协议会选择链路质量较好的节点, 因此在 $1/\lambda$ 较低时, 平均能耗增加相对较少。

综合图6和图7可知, CLQ-CR 协议在数据包投递率和平均能耗方面均优于 CARP 协议和 FR 协议。

3 海试实验

3.1 海试实验场景设置与节点部署

在厦门港海域进行水声传感网络海试实验。实验区域水深约 20 m、潮差约 4 m、潮汐周期为半日潮, 水深变化如图8(a)所示, 声速剖面如图8(b)所示。图9(a)和图9(b)展示了节点之间信道和信噪比随时间变化的情况。图9(a)显示, 由于海面反射影响, 大

多数时段接收端会收到来自海面的反射径; 然而, 由于节点布放深度较浅且换能器为水平全向, 受海浪波动影响, 部分时段仅有直达径而无反射径。图9(b)则表明, 受海洋环境噪声和船舶噪声等因素影响, 接收信噪比在 -7 dB 至 1 dB 之间波动不定。

水声传感网络拓扑结构如图10所示, 与仿真类似, 网络节点物理层采用扩频水声通信体制^[28]。实验水声网络由四个网络节点组成, 以节点1作为汇聚节点, 节点2, 3, 4与节点1之间的间距分别约为 1.5 km, 2.5 km, 5.5 km, 节点4与节点2, 3之间的间距分别约为 3.9 km 和 4.5 km。

水声网络实验总共进行了 24 h, 网络开始时间为 T_0 时刻, 在时间上分为三个运行不同路由协议的实验阶段: 第1段时间 T_0 时刻至 T_0+6 时刻, 网络采用 CARP 协议运行; 第2段为 T_0+6 时刻至 T_0+12 时刻, 采用 CLQ-CR 协议; 第3段为 T_0+12 时刻至 T_0+24 时刻, 网络采用 FR 协议。网络 MAC 层采用 MACA 协议, 协议包发送时长为 2 s, 数据包发送时长为 8 s。水声传感器节点搭载在浮标上布放深度约为 2 m, 并且在节点下方约 1 m 处安装有水听器。实验的详细参数见表3。

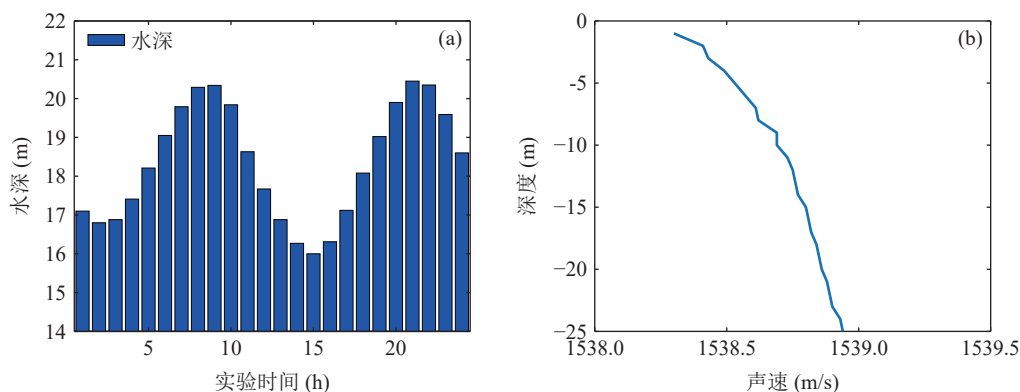


图8 实验期间厦门港海域水深与声速剖面 (a) 水深; (b) 声速剖面

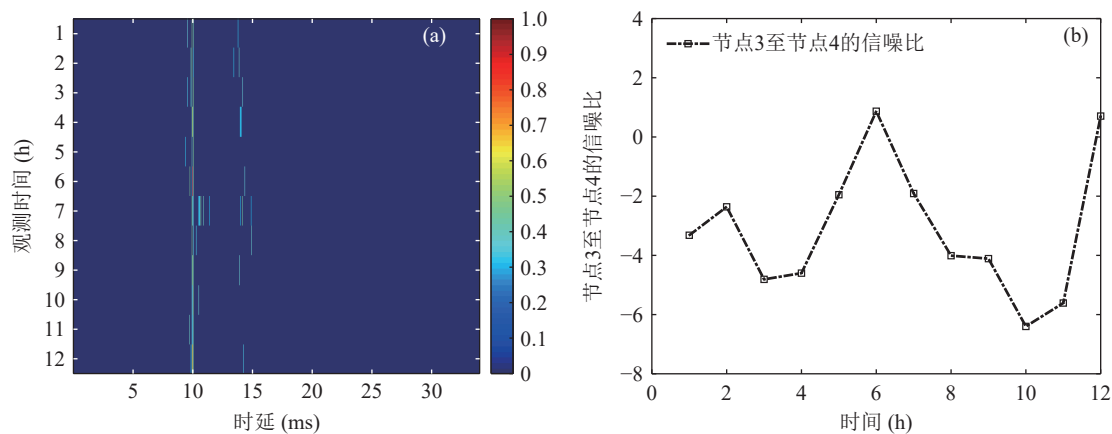


图9 节点间信道估计与信噪比分析 (a) 信道估计; (b) 信噪比变化



图10 海试实验拓扑

表3 海试实验参数

参数	取值
节点数	4
汇聚节点数	1
水声换能器指向性	水平全向
调制方式	DSSS
信号中心频率 (kHz)	15.5
信号带宽 (kHz)	3
物理层通信速率 (bit/s)	55
MAC层最大重传次数	3
CARP协议最大传输次数	3
网络运行时间 (h)	24
数据包生成间隔 (s/packet)	900
平滑系数	0.5

3.2 路由信息的初始化

三种路由协议的路由信息初始化相同: 节点2和节点3的目标节点设置为节点1, 节点4的目标节点设置为节点3。

3.3 海试实验结果与分析

第1, 2段海试实验的投递率见图11。在 T_0 至 $T_0+1.5$ 时段内, 各节点按照初始化的路由信息进行数据传输。随后, 节点4将目的节点更改为节点1。在 T_0+6 至 T_0+8 时段内, 节点4将目的节点更改为节点2。

在第1段网络中, 观察节点4的传输历史, 发现在 $T_0+1.5$ 时刻, 节点4与节点3的RNP值在连续两次的数据包传输中均为3, 超出了CARP协议设置的门限。因此, 节点4排除了节点3作为目的节点的选择范围, 并根据距离汇聚节点的跳数, 选择直接与汇聚节点1进行通信。

$T_0+1.5$ 时刻, 节点3处水听器监听数据如图12所示。

图12(a)的尾部是节点4发送给节点1的RTS信号, 利用信息段与先前的噪声计算信噪比为 -7.69 dB。结合图12(b)的噪声时频特性, 推测节点4变更目的节点原因是环境噪声过大, 节点3无法正确解调来自节点4的数据。

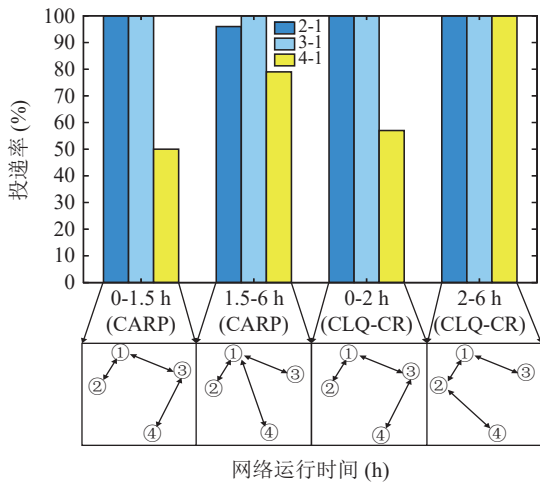


图 11 海试实验数据包投递率

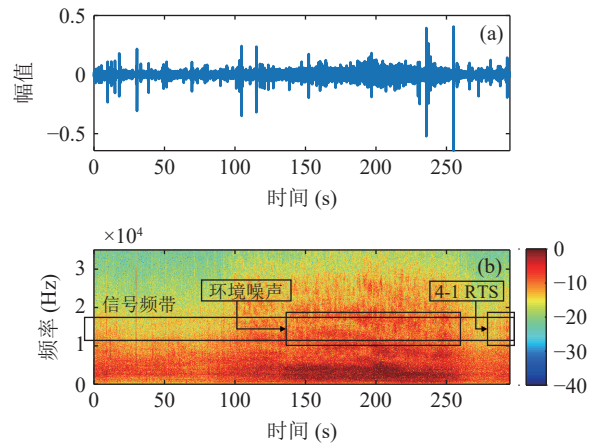
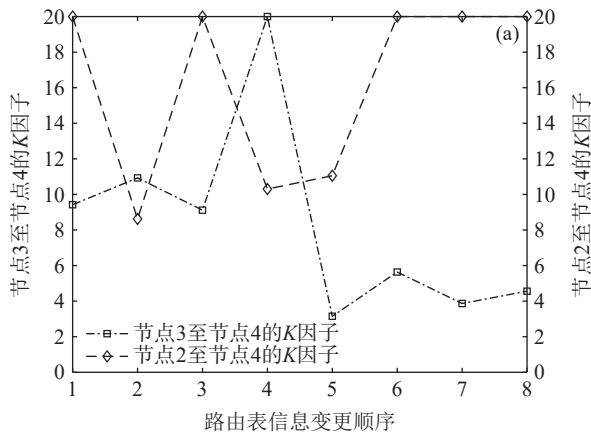
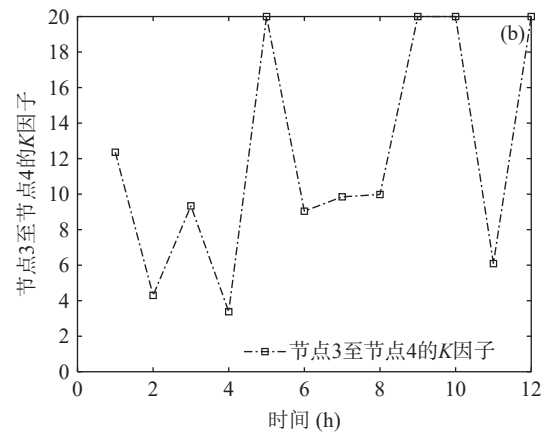
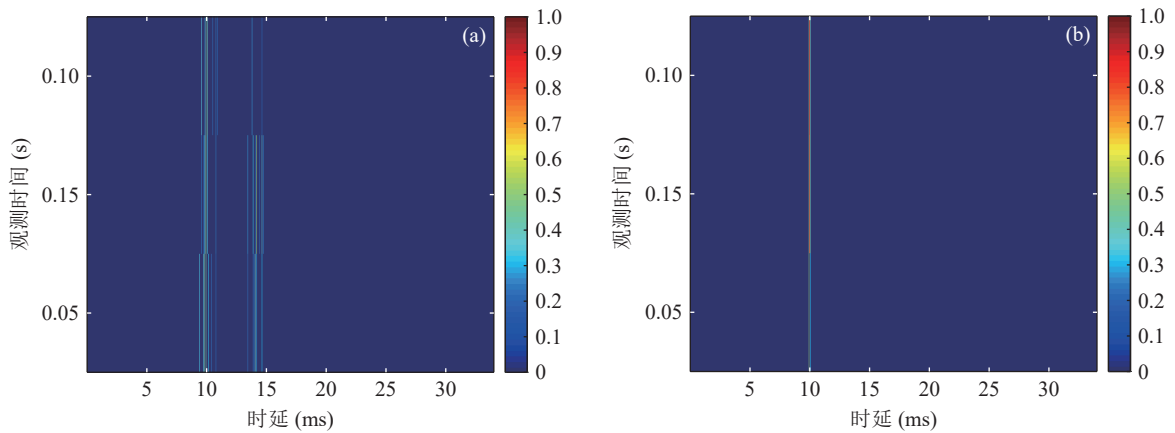
图 12 节点 3 处接收信号分析 (a) $T_0 + 1.5$ 时刻接收信号波形; (b) 接收信号时频图图 13 节点间 K 因子分析 (a) 节点 3 和节点 2 至节点 4 之间的 K 因子; (b) 节点 3 至节点 4 之间的 K 因子 (第 2 段网络)

图 14 节点间信道估计 (a) 节点 3 至节点 4 的信道估计; (b) 节点 2 至节点 4 的信道估计

在 $T_0 + 6$ 至 $T_0 + 8$ 时段内, 节点 3 和节点 2 至节点 4 之间的 K 因子如图 13(a) 所示。整个第 2 段网络运行期间节点 3 至节点 4 之间的 K 因子如图 13(b) 所示。

从图 9(a) 中可知节点间信道结构不断变化。图 13(a) 显示, 在节点 4 改变目的节点之前的连续几帧数据中, 节点 2 与节点 4 之间的 K 因子较高, 该现

象的原因如图 14(b) 所示, 节点 2 至节点 4 的信道只有直达径, 表现为快速衰减信道。而节点 3 与节点 4 之间的 K 因子较低, 这一现象的原因如图 14(a) 所示, 节点 4 接收到来自节点 3 的信号受到海面反射的影响, 这导致一个多路径信号相对于直达信号产生了约 4 ms 的时延, 与水听器的实际布放深度相吻合。

第 2 段网络运行的最初 2 h 期间, 节点 3 和节点

2 至节点 4 之间的 SNR 如图 15 所示, 节点 3 和节点 2 的负载情况如图 16 所示。由图 15 可知, 在 T_0+6 至 T_0+8 时段内, 由于海洋环境噪声或海面波动导致网络节点姿态发生变化, 节点 4 接收到来自节点 3 的信号信噪比略低于来自节点 2 的信号。在图 16 中, 节点 3 的负载明显高于节点 2 的负载。原因是第 2 段网络开始运行至 2 小时期间, 节点 3 除了满足自身的通信需求外, 还承担了来自节点 4 的数据包转发任务。此外, 由于节点 3 与节点 4 之间的链路质量较差, 频繁的重发操作导致了节点 3 的负载增加。综合考虑 K 因子、SNR 和负载均衡, 节点 4 选择节点 2 作为中继节点。

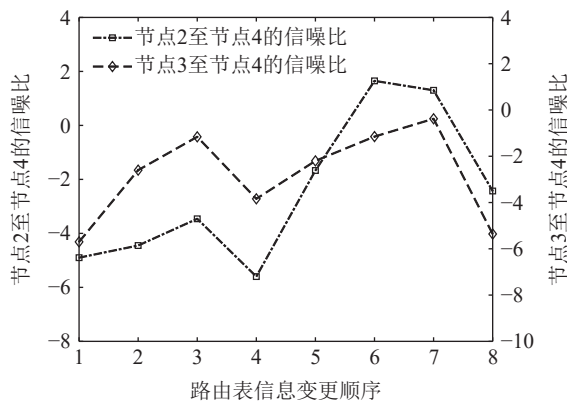


图 15 节点 3 和节点 2 至节点 4 之间的信噪比

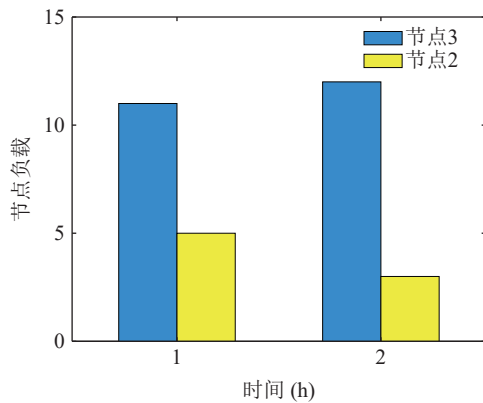


图 16 节点 3 和节点 2 负载

三种路由协议的投递率对比如图 17 所示。与 FR 协议相比, CARP 协议根据中继节点成功传输的历史记录和距离汇聚节点的跳数, 选择与汇聚节点 1 直接通信, 从而在一定程度上提高了数据包投递率。然而, CARP 协议未考虑其他链路质量因素。相比之下, CLQ-CR 协议综合考虑了信道的 K 因子、SNR、节点负载等多种链路质量因素, 并通过多属性决策模型选择链路质量最好的中继节点, 进一步提高了数据包投递率。

海试实验的平均端到端时延如图 18 所示。与

CARP 协议选择的 4-1 链路相比, CLQ-CR 协议选择的 4-2-1 链路导致了平均端到端时延的增加。这主要是因为 CLQ-CR 协议在路由选择时未考虑端到端时延这一因素, 而仅关注链路质量最佳的路由。因此, CLQ-CR 协议选择的最佳链路质量路径并不一定是最短路径。

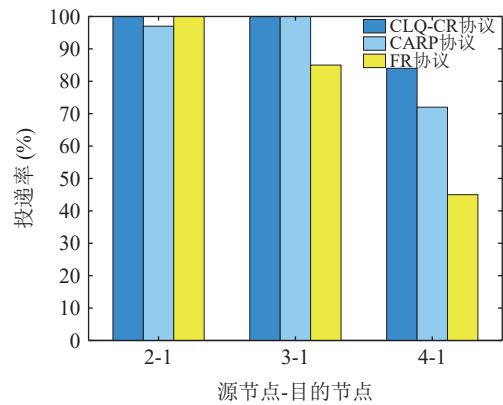


图 17 认知路由与固定路由投递率对比图

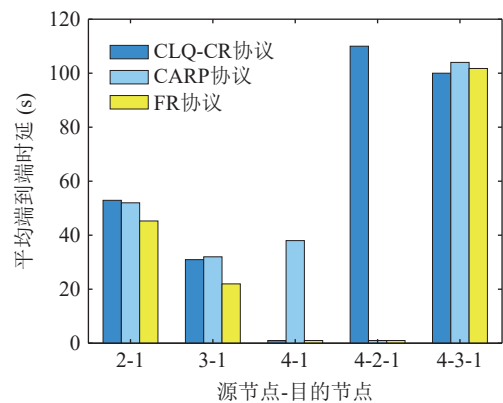


图 18 海试实验节点间平均端到端时延

4 结论

面向复杂海洋环境影响下 UASN 路由适应性差、鲁棒性不足导致网络性能起伏、效率低的问题, 引入由信号域、信道域、链路域参数 (K 因子、SNR、节点负载) 等组成的多维特征, 用于综合评估网络路由的链路质量, 并结合多址接入交互与监听评估链路质量, 从而进行路由多属性优化。

近海海洋环境监测应用背景下的仿真及海试实验结果表明: CLQ-CR 协议充分利用水声通信信号在海洋中的全向传播特性, 网络节点可通过结合被动监听信道及 MACA 协议交互获取双向链路信息, 在进行路由决策时避免了主动发射大量查询、应答数据包, 有效降低了协议复杂度, 提升网络效率; 同时, 结合物理层、网络层多维度特征进行考虑综合链路

质量的路由优化,可避免优化单一指标导致的网络总体性能下降。性能比较表明,与 FR 协议、CARP 协议相比,CLQ-CR 协议能够明显提升数据包投递率,为在实际海洋环境下长期部署的水声传感网络技术研究与应用提供了参考。

需指出,由于所提方法以海洋环境监测作为仿真与试验场景,CLQ-CR 协议未将端到端时延作为链路质量参数,路由优化中节点倾向于选择通信状态良好而非最短路径的节点,可能导致端到端时延的增加,从而影响水声传感网络在时敏任务场景的应用。因此,在所提综合链路质量评估机制的基础上,下一步考虑增加面向多样化任务场景的权重设计,如根据数据包重要性进行区分,对于重要数据包可增加对端到端时延和节点跳数的权重,从而在保证链路质量良好的前提下提升对不同类型应用场景的适应性。

参 考 文 献

- 1 乔钢,刘淞佐,刘奇佩. 水声通信网络协议、仿真与试验综述. *水下无人系统学报*, 2017; **25**(3): 151–160
- 2 Biagi M, Petroni A, Colonnese S, *et al.* On rethinking cognitive access for underwater acoustic communications. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2016; **41**(4): 1045–1060
- 3 Chen Y, Zhu J, Wan L, *et al.* Routing failure prediction and repairing for AUV-assisted underwater acoustic sensor networks in uncertain ocean environments. *Appl. Acoust.*, 2022; **186**: 108479
- 4 杨健敏,王佳惠,乔钢,等. 水声通信及网络技术综述. *电子与信息学报*, 2024; **46**(1): 1–21
- 5 Wang Q, Li J, Qi Q, *et al.* An adaptive-location-based routing protocol for 3-D underwater acoustic sensor networks. *IEEE Internet Things J.*, 2021; **8**(8): 6853–6864
- 6 Liu Y, Wang H, Cai L, *et al.* Longevity-oriented and reliable forwarding percolation routing in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Internet Things J.*, 2024; **11**(6): 11031–11045
- 7 Zhu R, Boukerche A, Yang Q. An efficient secure and adaptive routing protocol based on GMM-HMM-LSTM for Internet of Underwater Things. *IEEE Internet Things J.*, 2024; **11**(9): 16491–16504
- 8 Theis N, Thomas R, DaSilva L. Rendezvous for cognitive radios. *IEEE Trans. Mob. Comput.*, 2011; **10**(2): 216–227
- 9 Komali R, Thomas R, Dasilva L, *et al.* The price of ignorance: Distributed topology control in cognitive networks. *IEEE Trans. Wirel.*, 2010; **9**(4): 1434–1445
- 10 Bicen A, Sahin A, Akan O, *et al.* Spectrum-aware underwater networks: Cognitive acoustic communications. *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 2012; **7**(2): 34–40
- 11 Basagni S, Petrioli C, Petrocchia R, *et al.* CARP: A channel-aware routing protocol for underwater acoustic wireless networks. *Ad Hoc Networks*, 2015; **34**: 92–104
- 12 范钟庆,江虹,王智宁. 基于拟合的莱斯因子估计算法. *激光与光电子学进展*, 2023; **60**(7): 95–101
- 13 赵燕峰,童峰,马伯乐,等. 深海远程单阵元水声通信的逐多径簇联合均衡方法. *声学学报*, 2024; **49**(4): 764–773
- 14 李启虎,李敏,杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的检测: 理论分析. *声学学报*, 2008; **33**(3): 193–196
- 15 Solimini D, Tuset-Peiró P, Boquet G, *et al.* Towards reliable IEEE 802.15. 4g SUN with re-transmission shaping and adaptive modulation selection. *J. Signal Process. Syst.*, 2021; **93**(9): 1027–1044
- 16 郑思远. 认知水声网络组网关键技术研究. 博士学位论文, 厦门: 厦门大学, 2022
- 17 Shahabudeen S, Motani M, Chitre M. Analysis of a high-performance MAC protocol for underwater acoustic networks. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2014; **39**(1): 74–89
- 18 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. *数字海洋与水下攻防*, 2024; **7**(2): 137–145
- 19 Li C, Du X, Wang L. IATLR: Improved ACO and TOPSIS-based layering routing protocol for underwater acoustic networks. *IEEE Sens. J.*, 2023; **23**(3): 3262–3269
- 20 Wu M, Wu S, Zhang Q, *et al.* Enhancing link prediction via network reconstruction. *Physica A*, 2019; **534**: 122346
- 21 Yang X, Zheng S, Zhao Y, *et al.* SPACNet: A simulation platform of an acoustic cognitive network. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2023; **11**: 1827
- 22 Zenia N, Kaiser M, Mahmud M, *et al.* REER-H: A reliable energy efficient routing protocol for maritime intelligent transportation systems. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2023; **24**(12): 13654–13669
- 23 黄海宁,刘崇磊,李启虎,等. 典型北极冰下声信道多途结构分析及实验研究. *声学学报*, 2018; **43**(3): 273–282
- 24 Çavuşlu M, Altuncu M, Özcan H, *et al.* Estimation of underwater acoustic channel parameters for Erdek/Turkey region. *Appl. Acoust.*, 2021; **181**: 108135
- 25 Hu Y, Han S, Li H, *et al.* TCN-based M-ary mobile spread spectrum underwater acoustic communication. *Appl. Acoust.*, 2023; **211**: 109457
- 26 Jiang J, Yan Q, Han G, *et al.* An opportunistic routing based on directional transmission in the Internet of Underwater Things. *IEEE Internet Things J.*, 2023; **10**(18): 16392–16403
- 27 李冲,杜秀娟,王丽娟,等. 基于规则与感知的水声网络 MAC 协议. *通信学报*, 2022; **43**(2): 65–75
- 28 Jiang W, Yang X, Tong F, *et al.* A low-complexity underwater acoustic coherent communication system for small AUV. *Remote Sens.*, 2022; **14**(14): 3405