

摘要

水下无线传感网络（Underwater Sensor Networks, UWSNs）是专为水下环境设计的网络系统，其核心任务是收集和传输水下环境中的各类数据，如水温、水压、海水流动速度和生物分布等。这些数据对于海洋生态系统的探索、自然灾害预测、海洋资源实时监测与管理，以及提供灾害预警、支持海上军事和安全操作等至关重要。

与陆地上的无线传感器网络（Terrestrial Wireless Sensor Networks, TWSNs）相比，UWSNs 拓扑构造更加复杂，数据传输速率低且时延大，节点资源有限，水声链路稳定性更差，因此网络呈现高动态性。基于上述特点，地面 WSNs 路由协议无法直接用于 UWSNs。因此如何设计一个能适应水声传输高动态性的路由协议成为 UWSNs 研究的主要挑战。本文针对 UWSNs 路由协议面临的挑战进行深入研究，提出了自适应锥体矢量路由协议（Adaptive Cone-based Vector Routing Protocol, ACVRP）和基于延迟奖励的 Q 学习 ACVRP 路由协议（Q-Learning Adaptive Cone-based Vector Routing Protocol based on Delay Rewards, QL-ACVRP-DR）的设计，具体研究内容如下。

1. 自适应锥体矢量路由协议研究（ACVRP）。针对 UWSNs 在复杂的水下环境中面临的投递率低、传播延迟高和节点能耗大等问题，提出了自适应锥体矢量路由协议（ACVRP），以锥体作为候选节点区域，根据节点密度自适应调整锥体区域大小和方向，减少冗余通信和网络能耗，并根据节点的剩余能量和节点在锥体区域中的位置确定节点转发优先级，以提高投递率、减少传输跳数。仿真实验结果表明，与 VBF、AHH-VBF 以及 AHHC-VBF 协议相比较，ACVRP 在包投递率、能效和端到端延迟方面均表现更佳，有效提高了网络性能。

2. 基于延迟奖励 Q 学习的 ACVRP 协议（QL-ACVRP-DR）研究。针对 ACVRP 协议在 UWSNs 高动态环境中的适应性问题，引入强化学习以及时获取环境变化并进行下一跳中继节点的选择，但水声通信的长时延使得环境信息无法得到及时反馈，为 UWSNs 中强化学习的可靠性提出了挑战。本文提出了基于延迟奖励的 Q 学习自适应锥体矢量路由协议（QL-ACVRP-DR），在 ACVRP 协议的基础上，引入 Q 学习方法进行中继节点的动态选择，通过延迟奖励机制为当前的奖励匹配对应的行为，提高强化学习在 UWSNs 路由协议中的可靠性。仿真实验结果表明，QL-ACVRP-DR 协议除了保持 ACVRP 协议的性能优势外，比 ACVRP 在包投递率和端到端延迟方面又有进一步提升。

关键词：水下传感器网络；自适应锥体矢量路由协议；机器学习；延迟奖励；
NS-3

Abstract

Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) are network systems designed specifically for underwater environments, with the core task of collecting and transmitting various types of data in the underwater environment, such as water temperature, water pressure, seawater flow velocity, and biological distribution. These data are crucial for exploring marine ecosystems, predicting natural disasters, real-time monitoring, and management of marine resources, providing disaster warning, supporting maritime military and security operations, and more.

In compared to Terrestrial Wireless Sensor Networks (TWSNs), Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) exhibit a more intricate topology, a diminished data transmission rate, and a higher latency. Additionally, they are constrained by limited node resources and exhibit a less stable hydroacoustic link. Consequently, the network exhibits high dynamics. The above characteristics indicate that terrestrial WSN routing protocols cannot be directly applied to UWSNs. Consequently, the design of a routing protocol that can adapt to the high dynamics of hydroacoustic transmission has become a significant challenge in the research of UWSNs. This paper presents an in-depth study of the challenges faced by routing protocols for UWSNs and proposes two new protocols: the Adaptive Cone-based Vector Routing Protocol (ACVRP) and the Q-Learning Adaptive Cone-based Vector Routing Protocol based on Delay Rewards (QL-ACVRP-DR). The specific research methodology is described in detail below:

1. Research on the Adaptive Cone-based Vector Routing Protocol (ACVRP). The Adaptive Cone Vector Routing Protocol (ACVRP) is proposed to address the issues of low delivery rate, high propagation delay, and high node energy consumption in complex underwater environments faced by UWSNs. ACVRP considers a cone as a candidate node area and adaptively adjusts the size and direction of the cone area based on the node density to reduce redundant communication and network energy consumption. Additionally, it determines the node's residual energy and forwarding priority to improve the delivery rate and reduce the number of transmission hops. The simulation experimental results indicate that the ACVRP protocol outperforms the VBF, AHH-VBF, and AHHC-VBF protocols in terms of packet delivery rate, energy efficiency, and end-to-end delay, effectively improving network performance.

2. Research on the Q-Learning Adaptive Cone-based Vector Routing Protocol based on Delay Rewards (QL-ACVRP-DR) and its adaptability in highly dynamic environments in UWSNs. To address this issue, reinforcement learning is introduced to acquire environment changes in real-time and make the next-hop relay node selection. However, the long latency of hydroacoustic communication makes it difficult to obtain environment information in a timely manner, which poses a challenge for the reliability of reinforcement learning in UWSNs. This paper proposes the Q-learning adaptive cone vector routing protocol based on delayed reward (QL-ACVRP-DR). The protocol introduces the Q-learning method for the dynamic selection of relay nodes based on the ACVRP protocol, improving the reliability of reinforcement learning in the routing protocol of UWSNs. The corresponding behaviors are matched for the current reward through the delayed reward mechanism. The simulation experiment results indicate that the QL-ACVRP-DR protocol maintains the performance advantages of the ACVRP protocol while also improving packet delivery rate and end-to-end delay. This suggests that the QL-ACVRP-DR protocol is better suited for the dynamic hydroacoustic network environment.

Key Words: Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs); Adaptive Cone-based Vector Routing Protocol (ACVRP); Machine Learning; Delayed Rewards; NS-3

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
目录.....	V
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 水声传感网络简介	2
1.1.2 UWSNs 路由协议设计面临的挑战.....	2
1.1.3 研究意义.....	3
1.2 研究现状.....	4
1.2.1 UWSNs 国内外研究现状	4
1.2.2 UWSNs 路由协议研究现状	5
1.3 研究目标和研究内容.....	9
1.4 论文组织结构.....	10
第 2 章 相关技术和平台介绍.....	12
2.1 UWSNs 路由技术.....	12
2.1.1 UWSNs 路由分类	12
2.1.2 UWSNs 机会路由介绍	13
2.1.3 典型的 UWSNs 路由协议	15
2.1.4 UWSNs 路由协议评价标指标	19
2.2 强化学习简介.....	20

2.3 仿真实验平台和工具介绍.....	21
2.3.1 NS-3 网络模拟器	21
2.3.2 Aqua-Sim Next Generation.....	21
2.3.3 NS3-Gym: 扩展 OpenAI Gym	22
2.4 本章小结	23
第 3 章 自适应锥体矢量路由协议.....	24
3.1 ACVRP 设计思想	24
3.2 基于密度的自适应锥体候选区域划分	25
3.2.1 锥体区域内邻居节点的数量计算.....	25
3.2.2 锥体内节点密度计算	26
3.2.3 锥体区域动态调整设计.....	27
3.3 下一跳节点的优先级设计.....	28
3.4 仿真实验与结果分析.....	29
3.4.1 能耗模型	29
3.4.2 仿真参数设置	30
3.4.3 实验结果分析	30
3.5 本章小结	36
第 4 章 基于延迟奖励的 Q 学习 ACVRP 协议.....	37
4.1 基于 Q 学习的延迟奖励机制 (DRM-QL)	37
4.2 QL-ACVRP-DR 的详细设计	38
4.2.1 候选转发集的选择	38
4.2.2 中继节点的选择	40
4.3 仿真实验与结果分析.....	42

4.3.1 仿真参数设置	42
4.3.2 实验结果分析	44
4.4 本章小结	47
第 5 章 总结与展望	48
5.1 研究总结	48
5.2 研究展望	49
参考文献	50
攻读学位期间发表的学术论文和研究成果	54
致谢	55

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

在过去的几十年中，随着全球海洋资源开发和海洋环境保护意识的不断提升，水下无线传感器网络（Underwater Wireless Sensor Networks, UWSNs）^[1]已经成为海洋科学与技术领域的一个关键研究方向^[2]，UWSNs 模型图如图 1.1。UWSNs 由众多的水下传感器节点组成，主要功能是在水下环境中收集各类数据，如水温、水压、海流速度和生物分布情况等，将收集到的数据通过各节点间进行传输。这些数据对于探索海洋生态系统、预测自然灾害（如海啸和风暴）、进行海洋资源实时监测与管理，以及提供灾害预警、支持海上军事和安全操作等至关重要^[3]。

UWSNs 的设计和部署在技术上极具挑战性，主要原因在于水下环境的特殊性。与陆地上的无线传感器网络相比，UWSNs 面临着更为严苛的环境条件和有限的通信能力。近年来，随着技术的进步和对海洋环境认识的深入，UWSNs 的研究和开发取得了显著进展。新型传感器技术、能源高效的通信协议、数据处理算法以及自适应网络设计等方面的突破，不仅提高了 UWSNs 的性能，而且扩大了它们在海洋科学研究和实际应用中的潜力^[4]。此外，通过整合机器学习和人工智能技术，UWSNs 可以更智能地处理和分析收集到的大量数据，从而为海洋领域探索者提供了更深入的洞察手段。

近年来，机器学习^[5]作为一种强大的数据分析和模式识别工具，在许多领域展现出了其巨大的潜力。其在 UWSNs 中的应用，不仅可以极大地提高数据处理的效率和准确性，还能优化网络性能和节点管理，从而推动海洋科学和相关技术的发展。

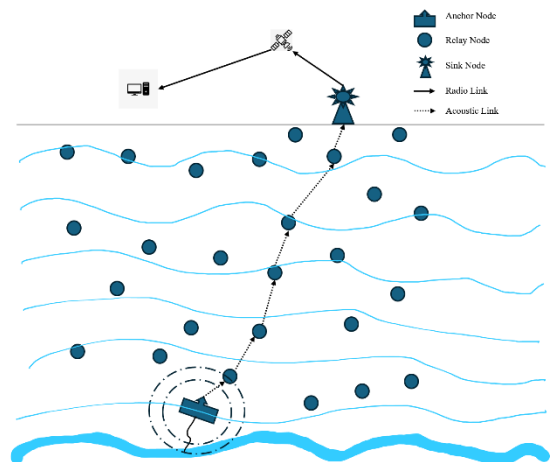


图 1.1 网络架构图

1.1.1 水声传感网络简介

水下声学无线传感网络（UWSNs）是一种在无线网络的基础上衍生的专门为水下环境设计的网络，这种网络利用一系列部署在水下的传感器节点进行收集、处理和传输数据^[6]。

由于与地面无线传感器网络（TWSNs）所面临的环境不同，UWSNs 和 TWSNs^[7]在许多方面有显著的区别，主要由于它们所在的环境和使用的技术不同^[8]。以下是一些主要的区别：

（1）通信媒介和技术

在通信方式上，UWSNs 主要使用声波进行通信，因为在水下环境中，电磁波（尤其是高频波）的传播效果不佳；TWSNs 通常使用无线电波（如 Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth^[9]等）进行通信，因为在空气中，这些波段的传播效率更高。传播速度和延迟方面，在 UWSNs 中，声波的传播速度约为 1500 米/秒，远低于空气中电磁波的速度（光速约 300,000 公里/秒），导致更高到通信延迟；而 TWSNs 中的信号几乎即时传播，延迟相对较低。

（2）能源消耗和管理

在能源效率上，UWSNs 中的节点由于能源限制（如电池供电），并且更换电池在水下环境中极为困难，因此对能源效率的要求更高；TWSNs 的节点通常更容易访问和维护，因此能源管理虽然重要，但相对容易。

（3）网络拓扑和稳定性

网络动态性上，UWSNs 中的节点可能受水流、水下生物活动等影响，导致网络拓扑频繁变化；TWSNs 通常处于更稳定的环境，节点位置相对固定，网络拓扑更稳定。

（4）应用场景和目标

在应用领域，UWSNs 主要用于海洋探索、资源勘探、环境监测、灾害预警、军事应用等，TWSNs 则广泛应用于家具自动化、工业监控、农业、健康监护等地面应用。

UWSNs 与 TWSNs 在许多方面有显著的不同，这些差异不仅反映在它们的通信方式、能源管理和网络拓扑上，还体现在它们所面临的设计挑战和应用目标上。随着技术的发展，UWSNs 将在海洋科学、环境监测和资源探索等领域扮演越来越重要的角色。未来的研究将集中在提高网络的能源效率、增强通信质量和降低网络延迟方面，此外，机器学习等技术的广泛利用，为深海探索和监测提供更强大和可靠的技术支持。

1.1.2 UWSNs 路由协议设计面临的挑战

在 UWSNs 中，路由协议的设计面临着一系列独特且复杂的挑战。这些挑战主要源于水下环境的特殊性以及与地面无线传感网络相比的显著差异。以下是 UWSNs 路由协议设计面临的主要挑战：

（1）高动态网络拓扑

水流、海洋生物的活动以及其他自然因素导致水下传感器节点位置频繁变化，这使得网络拓扑持续动态变化，对路由协议的稳定性和适应性提出了高要求。

（2）三维空间的路由设计

与传统的二维地面网络不同，UWSNs 需要在三维空间中进行路由设计，考虑到深度因素，这增加了路由决策的复杂性^[10]。

（3）声波通信的限制

声波通信的传播速度较慢且带宽有限，导致了较高的延迟和数据传输率的限制。这些因素对路由协议的效率和性能提出了挑战。

（4）能源效率的优化

由于水下传感器通常依赖于有限的电池供电，路由协议需要高度能源效率，以延长节点的工作寿命和整个网络的稳定性^[11]。

（5）可靠性和容错性

水下环境中的物理干扰和噪声较多，路由协议需要具备高可靠性和容错性，确保在恶劣的条件依然能够有效传输数据。

（6）实时数据传输需求

对于某些应用（如灾害预警和实时监测），路由协议需要支持实时或近实时的数据传输，这在带宽有限和高延迟的环境下尤为挑战。

1.1.3 研究意义

UWSNs 的发展对海洋科学研究具有极其重要的意义^[12]。其广泛应用于提高海洋环境监测的效率准确性、促进海洋资源的可持续利用、增强海洋灾害预警能力、支持深海探索和科学研究以及加强海洋安全和防御能力等。这些应用基本都涉及到 UWSNs 如何利用传感器节点从海洋中将获取到的信息传递到地面上的信息处理中心，作为 UWSNs 的核心技术，路由协议在 UWSNs 中有着极其重要的作用。但是 UWSNs 路由协议仍然面临的主要挑战包括整体网络的能源消耗过高、数据包投递率不高以及端到端时延过长等问题。

本文深入研究 UWSNs 路由协议面临的挑战，通过引入强化学习，增强 UWSNs 的自我学习和自我优化的能力，以实现能够适应复杂的高动态的水下环境的路由协议，为 UWSNs 路由协议的设计和优化提供了新的思路，为未来深

入探索 UWSNs 应用提供理论支撑，也将为今后 UWSNs 的发展及广泛应用提供技术支持和技术储备。

1.2 研究现状

1.2.1 UWSNs 国内外研究现状

水下无线传感器网络(UWSNs)作为一种新型的水下监测手段，近年来受到广泛关注。在国外，美国主导并引领了 UWSNs 研究方向；欧洲国家则凭借良好的通信基础设施，开展了大规模海洋试验。国内起步则相对较晚，目前正着力解决仿真平台建设、节点设计、网络协议等方面的问题。尽管仍面临持续通信、节能技术等挑战，UWSNs 在水下资源勘测、环境监测、目标跟踪等方面已展现出广阔的应用前景。未来研究将继续推动 UWSNs 核心技术的创新与突破，使其成为深海开发的重要支撑手段。

1.2.1.1 UWSNs 国外研究现状

美国在 UWSNs 研究方面占据领先地位。美国海军研究实验室（SPAWAR）于 2006 年起推出一系列水下传感器网络项目以来，已在电子与传感器小型化、数字通信编码、网络层数据优化等多个方面取得进展^[13]，不仅在开发 Wi-Fi 与蓝牙的水下通信技术方面遥遥领先，而且测试设计了多种网络拓扑结构^[14]。加州大学圣迭戈分校的浮游生物网络实验室（BWN Lab）在海试基础上，也进行了大量室内外试验，开发出商用化的自主水下飞行器传感器网络系统，实现水质在线监测^[15]。与此同时，杜克大学、麻省理工学院等高校与企业如 Woods Hole Oceanographic Institution 也开展了相关研究，构建模型分析节点部署策略对于数据包交付成功率的影响，为后续大规模部署提供了参考^[16]。目前美国的 UWSNs 研究主要集中在网络协议、系统框架、能量补给技术等方面。

欧洲国家凭借良好的通信基础设施，开展了大规模的试验用于测试 UWSNs 系统性能，侧重系统级考量和海试。英国的 Loughborough 大学在英吉利海峡部署通信链路超过 30 公里的大规模 UWSNs 用于测试通信链路质量，Eastern Channel 观测系统采用自适应多跳路由协议，为解决节点流动性对拓扑变化的影响^[17]；希腊和土耳其的研究机构在地中海区域设立的深海观测网融合光、声链路实现异构数据的有效传输，用于海底环境监测。这些试验验证了网络在复杂环境下的可靠性，为后续设备与网络协议设计提供了宝贵的数据支持。此外，欧洲国家还开展了利用自主水下飞行器（gliders）构建 UWSNs 的创新研究。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/698135022105006137>