

【引用格式】明彦坤, 董昊楠, 吴以宁, 等. 基于MQTT与LoRa的海洋机器人水面协同通信系统设计[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(4): 411-418.

基于MQTT与LoRa的海洋机器人水面协同通信系统设计

明彦坤^{1,2}, 董昊楠³, 吴以宁^{1,2}, 张润锋^{1,2,*}, 刘振忠^{1,2}, 王巨涛^{1,2}

- 天津理工大学 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384;
- 天津理工大学 机电工程国家级实验教学示范中心, 天津 300384;
- 天津理工大学 计算机科学与技术学院, 天津 300384)

摘要 研究了海洋机器人的水面协同通信对于实现海洋数据观测的关键性作用, 并提出了一种基于MQTT与LoRa协同通信的解决方案, 该方案能够有效解决海洋通信盲区和缺乏通用海洋机器人数据采集与控制一体化系统设计的问题。MQTT通信协议具备轻量级、低带宽消耗和可靠性高等特点, 适用于海洋环境中的数据传输。LoRa通信技术则具备远距离传输和穿透障碍物的能力。通过结合这2种通信技术, 可以克服海洋通信盲区和距离短的问题, 实现水下机器人在水面的远距离数据传输和控制。此外, 还通过模拟实验验证了数据传输链路的合理性, 结果表明该系统能够有效解决水下机器人通信距离短和海上通信覆盖盲区问题。因此, 认为这种基于MQTT与LoRa协同通信的方案具备协同作用, 能够为未来海洋物联网的搭建提供理论与技术基础, 并推动物联网技术在透明海洋建设中的应用进程。

关键词 水下机器人; 数据采集; 机器人控制; MQTT; LoRa

中图分类号 TP242.6; U665.26

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)04-0411-08

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.04.008

Design of Surface Cooperative Communication System for Underwater Vehicles Based on MQTT and LoRa

MING Yankun^{1,2}, DONG Haonan³, WU Yining^{1,2}, ZHANG Runfeng^{1,2,*},
LIU Zhenzhong^{1,2}, WANG Jutao^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory for Advanced Mechatronic System Design and Intelligent Control, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 3. School of Computer Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract The crucial role of surface cooperative communication of underwater vehicles in facilitating ocean data observation is investigated in this paper. A cooperative communication solution based on MQTT and LoRa is

收稿日期: 2023-12-21

作者简介: 明彦坤 (2002-), 男, 本科, 主要从事水下机器人软件系统设计。

*通信作者: 张润锋 (1993-), 男, 博士, 讲师, 主要从事水下机器人设计与组网观测理论等研究。

基金项目: 天津市自然科学基金“伴中尺度涡的亚中尺度过程水下滑翔机编队观测理论研究”(19JCQNJC03700); 天津理工大学大学生创新创业训练计划基于模块化的仿生水下机器人岸基操控平台设计(202310060113)。

proposed. The challenges of blind areas of marine communication and the lack of an integrated system for data acquisition and control of underwater vehicles are effectively addressed by this solution. The MQTT communication protocol is characterized by lightweight, low bandwidth consumption, and high-reliability, making it suitable for data transmission in marine environment. Additionally, the LoRa communication technology enables long-distance transmission and obstacle penetration. By combining these two communication technologies, the limitations of short communication distances and blind areas in marine communication can be overcome, and surface long-distance data transmission and control of underwater vehicles can be realized. Then, the rationality of the data transmission link is verified by simulation experiments, and the results show that the system can efficiently solve the problem of limited communication distance for underwater vehicles and blind areas in maritime communication coverage. Consequently, it is asserted in this paper that the proposed MQTT and LoRa cooperative communication scheme exhibits a synergistic effect, which can provide a theoretical and technical foundation for the construction of Marine Internet of Things in the future, and facilitate the application of Internet of Things technology in transparent ocean construction.

Key words underwater vehicle; data acquisition; MQTT; LoRa

0 引言

海洋在地球系统中扮演着重要的角色,它不仅蕴含着丰富的海洋资源和复杂的海洋多尺度动力过程,也是科学研究的重要场所^[1]。然而,由于海洋观测技术和数值仿真技术的不断进步,导致海洋传输数据量不断增大,并且海洋通信条件恶劣,水下洋流环境复杂等原因使得通信网络覆盖不足^[2-3]。此外,传统的海洋物联网存在网络架构封闭、不灵活等缺点^[4]。因此,构建满足各种业务应用需求的协同通信系统,对于海洋物联网的发展具有重要意义^[5]。

在海洋物联网中,主流物联网通信技术如 ZigBee、Bluetooth(蓝牙)和 NB-IoT(Narrowband Internet of Things)由于其网络覆盖局限性,已逐步被 LoRa(Long Range)和 MQTT(Message Queuing Telemetry Transport,消息队列遥测传输协议)等通信协议所替代^[6]。学者胡奔^[7]、熊渊琳^[8]等人分别采用 LoRa 技术和 WiFi 通信,设计开发了相关的控制硬件和软件,实现了水质检测、无人船控制等功能。侯敏等人则提出了一种基于 MQTT 协议的海洋观测数据推送方案,并对 MQTT 传输数据的安全性及合理性进行了验证,为海洋数据的实时传输提供了参考^[9]。马英翔采用 LoRa 针对浅海网络通信设计了网络节点,并通过大量实验验证了 LoRa 的浅海通信丢包率^[10]。此外,国外学者也对 MQTT 与 LoRa 的海洋应用做了相关研究,如 BRINCAT 等人设计并开发了一种集成的声学/LoRa 水下系

统,可用于通过水下物联网进行多媒体传输和驱动,该团队还在论文中对 LoRa 与 MQTT 的协同通信进行完整阐述^[11]。HASSAN 等人则将 LoRa 通信应用于海洋养殖场,解决了偏远海岸与恶劣条件下的暴露养鱼场的管理问题^[12]。此外, SU 等人也将 MQTT 通信应用于水产养殖,并利用其实时性特点完成了数字孪生系统的搭建^[13]。

以上学者对 MQTT 和 LoRa 通信进行了研究,并为海洋物联网的数据采集与海洋机器人的控制系统开发方向做出了相关贡献,为本文的研究提供了理论支持。然而,现有研究仍然存在着我国海上无线通信技术更新不足、水下机器人通信距离较短、海面通信存在盲区等问题^[14]。因此,本文在上述学者研究的基础上,以水下机器人为研究对象,对海洋机器人的水面通信方式提供了解决方案。本设计以上述学者研究内容为理论依据,提出了基于 MQTT 和 LoRa 协同通信的水下机器人数据采集与控制一体化系统,通过将 MQTT 和 LoRa 通信与水下机器人集成,有效克服了海洋通信盲区的问题,实现了远距离的数据传输和控制指令的发送与接收。同时,利用 MQTT 传输数据到云端进行储存,为后续的数据分析与处理提供支持,并为物联网技术应用到海洋观探测领域奠定了通信基础。

1 系统架构及设计分析

水下机器人数据采集与控制一体化系统基于 MQTT 与 LoRa 协同通信技术。该系统旨在解决水下机器人通信距离短、海面通信存在盲区的问题。为了实现远距离的数据传输和控制指令的发送与

接收, 我们采用了先进的通信协议和技术。

具体地, 将 MQTT 和 LoRa 协同通信技术应用于水下机器人的海洋数据与控制指令的传输过程如下。首先, 水下机器人通过 MQTT 协议将数据和指令发送至与其相连的水下通信设备。然后, 这些数据和指令通过 LoRa 技术实现海面到岸站的传输, 打通了海洋到岸站的通信链路。数据和指令传输至基站后, 将被接收并传输至互联网服务器进行存储和网络传输。这样, 我们就能够实现远距离的数据传输和控制指令的发送与接收。系统组成如图 1 所示。

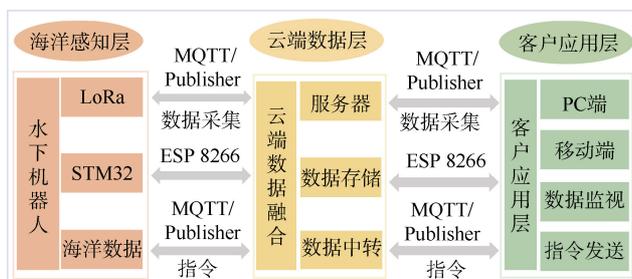


图 1 系统总体框架

Fig. 1 System overall framework

该系统的总体架构包括水下机器人、通信模块、云平台 and 控制中心。水下机器人负责执行任务和采集数据, 通信模块包括 MQTT 和 LoRa 通信模块, 云平台用于接收、存储和管理传输的数据, 控制中心用于发送控制指令和监控水下机器人的状态。

操作流程如下: 海洋数据通过传感器采集并发送给主控板, 然后通过 LoRa 模块将数据发送到岸站。岸站通过 MQTT 协议将数据发送到云平台的指定主题中, 客户端可以通过订阅相应主题获取数据。控制指令也可以通过相同的方式发送到岸站, 并通过 LoRa 传输至主控板。

2 MQTT 与 LoRa 协同通信

协同通信是指多个设备或系统之间通过合作与协作实现数据传输、共享和处理的过程。在海洋环境中, 通过 MQTT 与 LoRa 协同通信可以解决通信盲区问题, 使得海洋数据能够实现全面互联和共享。

1) 解决通信盲区问题。

海洋环境中存在许多通信盲区, 如水下山脉、

岩石、海洋生物等会阻碍无线信号的传播, 使用 LoRa 通信技术可以克服这些障碍。LoRa 是一种长距离、低功耗的无线通信技术, 具有强大的穿透力和抗干扰能力。通过 LoRa 通信模块, 水下机器人可以在海洋盲区中传输数据, 实现远距离的通信。

2) 实现多机互联效果。

MQTT 是一种轻量级的发布/订阅消息传输协议, 具有高度可靠性和灵活性。通过 MQTT 协议, 可以实现水下机器人与地面控制中心、其他设备之间的数据交互和共享。水下机器人可以通过 MQTT 协议将数据发布到特定主题, 其他设备可以通过订阅相应的主题来获取数据。这种多机互联效果使得海洋数据可以被多个设备共享和处理, 提高了数据的传输效率和系统的整体性能。

3) 协同执行海洋数据互联任务。

使用 MQTT 与 LoRa 协同通信, 水下机器人可将数据通过 LoRa 通信模块传输到地面控制中心, 然后通过 MQTT 协议将数据发布给其他需要访问该数据的设备, 因此海洋数据可以实现多机互联和协同工作。该方案不仅可以实现水下机器人与地面控制中心的无缝连接, 还可方便其他设备获取和利用海洋数据。通过协同通信, 可以实现海洋数据的全面互联和共享, 推动海洋科学研究和资源开发的进步。

为了使海洋数据能够完成从通信盲区万物互联的效果, 本文选择 MQTT 与 LoRa 协同通信作为水下机器人实现互联的基础与保障, 其中使用 LoRa 通信解决海洋通信盲区的问题, MQTT 通信实现多机互联的效果, 两者协同完成海洋数据实现多机互联的任务。

2.1 长距离通信技术选择

本文选用 MQTT 通信作为主要的通信方式, MQTT 是一种由 IBM 公司发明的轻量级的即时通信协议, 该协议以 TCP/IP 为基础, 现已成为物联网领域的重要通信协议之一^[15]。MQTT 的设计以精简、轻巧、开放、规范, 易于实现为原则, 并且不强求传输数据的类型与格式, 拥有高灵活性, 以上特点均适合目前的物联网环境, 特别是对于环境受限的物联网智能设备间的通信^[16]。

2.1.1 MQTT 工作原理

MQTT 采用发布-订阅模式, 包括 2 种角色:

发布者 (Publisher) 和订阅者 (Subscriber)。发布者将消息发布到特定的主题 (Topic)，而订阅者可以订阅感兴趣的主题，以接收相关的消息。代理服务器 (Broker) 负责接收和传递消息，其通信框架如图 2 所示。

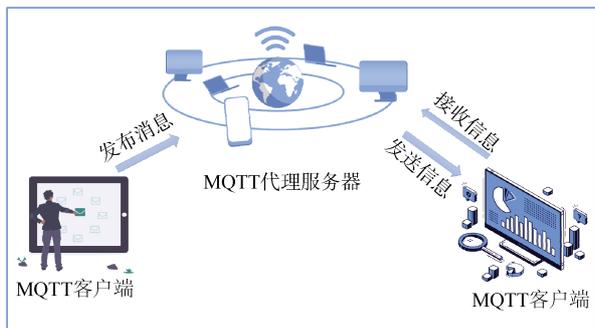


图 2 MQTT 通信框架
Fig. 2 MQTT communication framework

MQTT 协议的架构由客户端和代理服务器组成。与同步式的请求/响应模式并不一样，发布/订阅模式解耦了发布消息的客户端 (发布者) 与订阅消息的客户端 (订阅者) 之间的关联性，这表明二者之间无需直接进行联系^[17-18]。客户端可以是传感器、物联网设备或应用程序等。代理服务器是 MQTT 网络的核心，负责消息的传递。多个客户端可以同时连接到代理服务器，并通过其进行消息交换。客户端通过 TCP/IP 协议建立与代理服务器的连接。一旦连接建立，客户端可以选择创建会话，并选择是否保持持久性会话，持久性会话保证即使在客户端重连时，订阅的主题和未接收的消息状态也能得到保留。

2.1.2 MQTT 报文

MQTT 协议的轻量级体现与其独特的报文结构也有着密不可分的关系。其报文结构由固定报文头 (Fixed Header)、可变报文头 (Variable Header) 和负载 (Payload) 3 部分组成，其固定报头格式如表 1 所示。

表 1 MQTT 报文组成
Table 1 MQTT message composition

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Byte 1	Message Type		DUP flag	QoS level		RETAIN		
Byte 2	Remaining Length							

由表可知，MQTT 固定头部报文包含 2 个字节，其中第 1 字节包含 1 个消息类型 (Message Type) 和 3 个标志位 (DUP、QoS、RETAIN)^[19]。MQTT 消息类型由固定头部第一个字节的第 4~7 位表示消息类型，其主要消息类型如表 2 所示。

表 2 MQTT 固定头部常用消息类型
Table 2 Common message types in MQTT fixed header

名字	报文流动方向	功能
CONNECT	客户端到服务端	请求与服务端建立连接
CONNACK	服务端到客户端	向客户端发送连接确认报文
SUBSCRIBE	客户端到服务端	客户端发送订阅请求报文
SUBACK	服务端到客户端	代理服务器，告知订阅是否成功以及实际分配的 QoS 级别
PUBLISH	客户端到服务端	发布者向代理服务器发送发布消息报文

2.1.3 QoS 级别解析

MQTT 协议提供 3 个不同的 QoS (Quality of Service) 级别，以适应不同的应用需求。其中，QoS 0 表示消息至多 1 次传递，消息的传递完全依赖底层的 TCP/IP 网络，消息没有定义应答和重发机制，即消息在周期内最多到达服务端 1 次，或者没到达，不保证可靠性。QoS 1 表示客户端则会重发这条在消息头中设置了 DUP 为 1 的消息。至少 1 次传递，确保消息至少被传递 1 次，有可能存在重复消息。QoS 2 表示只有一次传递，确保消息仅被传递 1 次，且保证不会出现重复消息^[19]，3 种模式的交互关系如图 3 所示。

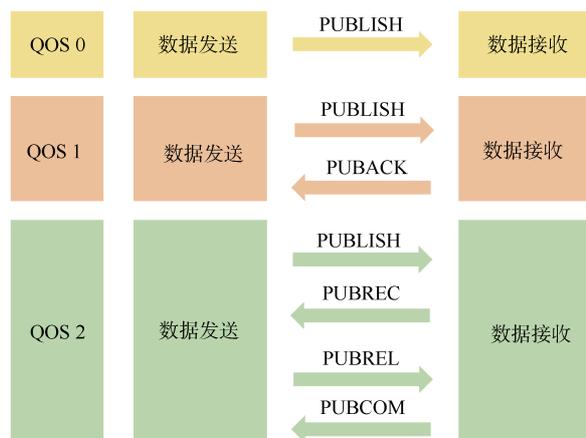


图 3 QoS 质量服务
Fig. 3 QoS levels

2.1.4 MQTT 安全性

MQTT 协议提供多种安全机制来保护通信数据的安全性。

1) 认证。客户端可以使用用户名和密码进行身份验证, 确保只有经过授权的设备可以连接到代理服务器。

2) 加密通信。通过使用 TLS/SSL 协议对 MQTT 的通信进行加密, 确保消息在传输过程中的机密性。

3) 访问控制。代理服务器可以根据订阅者的身份和权限对消息进行访问控制, 以限制对敏感数据的访问。

2.2 海面通信技术选择

当前, 较为成熟的无线传感网络的网络协议主要有 Bluetooth、ZigBee、NB-IoT、LoRa 等, 主要性能比较如表 3 所示^[20]。Bluetooth 是一种短距离的无线通信技术, 常用于个人设备之间的数据传输。优点包括广泛的设备兼容性、简单易用、较高的数据传输速率; 缺点是较短的传输距离和相对较高的功耗^[21-22]。ZigBee 技术是基于 IEEE 802.15.4 协议发展起来的一种低功耗、短距离、低数据速率的无线通信技术, 适用于低功耗的无线传感器网络^[23]。NB-IoT 是一种低功耗、窄带宽的无线通信技术, 专为物联网设备设计, 其优点包括较长的传输距离、较低的功耗、较高的网络覆盖性, 缺点是较低的数据传输速率和较高的时

延特征。

表 3 无线通信技术参数对比

Table 3 Comparison of technical parameters of wireless communication

通信协议	频段	传输速度	传输距离
Bluetooth	2.4 GHz	1~3 Mbps	1~10 m
Zigbee	Unlicensed	250 kbps	10~75 m
NB-IoT	License 频段, 运营商基站	100 kbps	10 km
LoRa	Sub-GHZ	0.3-50 kbps	20 km

由表 3 可知, LoRa 与 ZigBee、Bluetooth 物联网通信技术相比, 该技术最为突出的特点是通信距离远, 在无中继的情况下其通信距离可达到千米级。与 NB-IoT 相比, 该技术无需依赖基站以及 SIM 卡。此外, 该技术还拥有抗干扰能力强, 功耗低等优点, 因此非常适合在环境复杂且设备分散的情况下使用^[24], 并且由于本文的使用场景为海面, 因此没有大量基站等中介设备。根据上述原因, 将 LoRa 物联网通信技术应用在海面至岸站通信链路, 能够较好地解决海洋中存在通信盲区的弊端。

3 系统搭建

3.1 系统框架搭建

本系统主要采用 Python 语言进行编程, 其中水下机器人的数据来源为 MQTT 与 LoRa 协同通信提供, 系统主体框架如图 4 所示, 数据处理流程如图 5 所示。

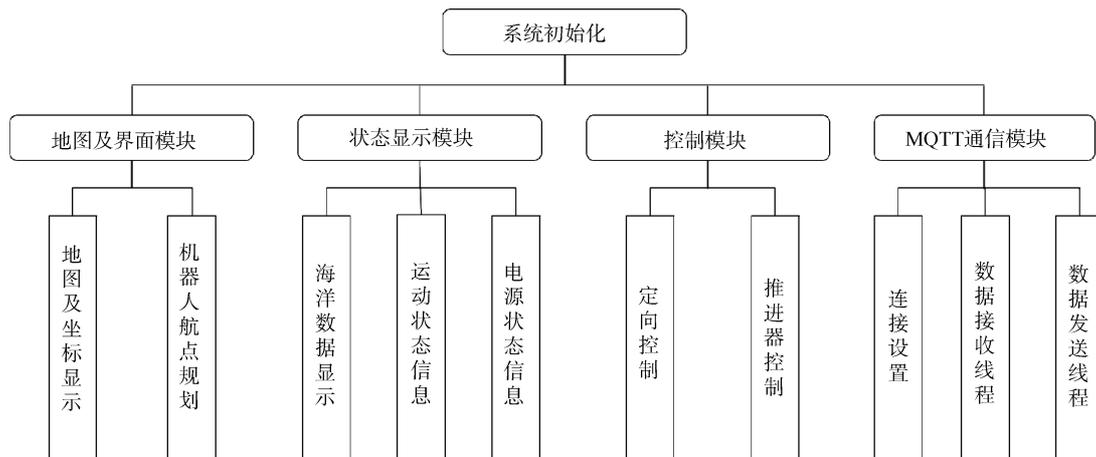


图 4 系统主体框架

Fig. 4 System main framework

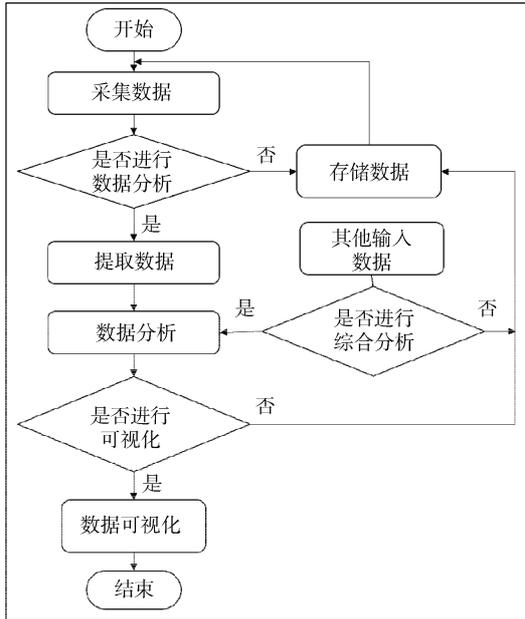


图 5 数据处理流程

Fig. 5 Data processing flowchart

程序初始化前,先用构造函数 MQTT Client 构建 MQTT 客户端对象: client = ****。MQTT Client (client_id, server, port) 中: client_id 是客户端 ID, 具有唯一性; MQTT server 是服务器地址, 可以是 IP 或者网址; MQTT port 是服务器端口, 默认是 1883。

其程序采用 Python 编写, 使用 PyCharm 作为开发环境, 除此以外, 为了保证数据的安全性, 所有下发数据采用特殊的通信协议进行传输。该通信协议为帧头 FF, 帧尾 0D0A 与中间的特殊字符组成, 如前进的指令为 FD5A0D0A, 同时上位机的接收为

数据以@开头, 根据顺序与数字位数进行解析。

3.2 UI 设计

UI 界面采用 QT Designer 进行设计, 界面包括 LoRa 通信的设置界面、MQTT 通信的设置界面以及地图显示界面, 该设计能够完成数据的实时显示与指令下发, 并且能够完成水下机器人的航行显示。

4 验证分析

为了验证以上理论的可行性, 本团队依托天津理工大学所研发的水下机器人作为研究对象, 于天津理工大学明理湖进行了多次水面实验, 其实验过程如 6 所示, 主要展示了本次的实验数据与水下机器人的运行轨迹。由于 LoRa 所得数据将全部传送至 MQTT 进行下一步传输, 因此为了保证数据传输的完整性, 本文对 MQTT 通信的性能进行了分析, 实验搭建 XMeter 压力机模拟 10 万 MQTT 客户端向 EMQX 发起连接, 新增连接速率为 10 000/s, 客户端心跳间隔 (keep alive) 300 s。所有连接成功后每个客户端每秒发送一条 QoS 为 1, payload 为 200 B 的消息, 所有消息通过 WebHook 规则引擎桥接至 WebHook 服务器。如图 7 所示, 通过实验测试, 得出结论: MQTT 通信方式在海洋数据传输中表现出高吞吐量 (97, 158.6158), 支持大量消息传输; 最大虚拟用户数达到 100 000, 并且经过请求吞吐量的差值曲线可知, 该方式下的吞吐量在开机与关机时会有较大波动, 但在正常运行时全部处于稳定状态。具备良好的扩展性和并发连接处理能力; 而且根据通信测试的折线图可知,

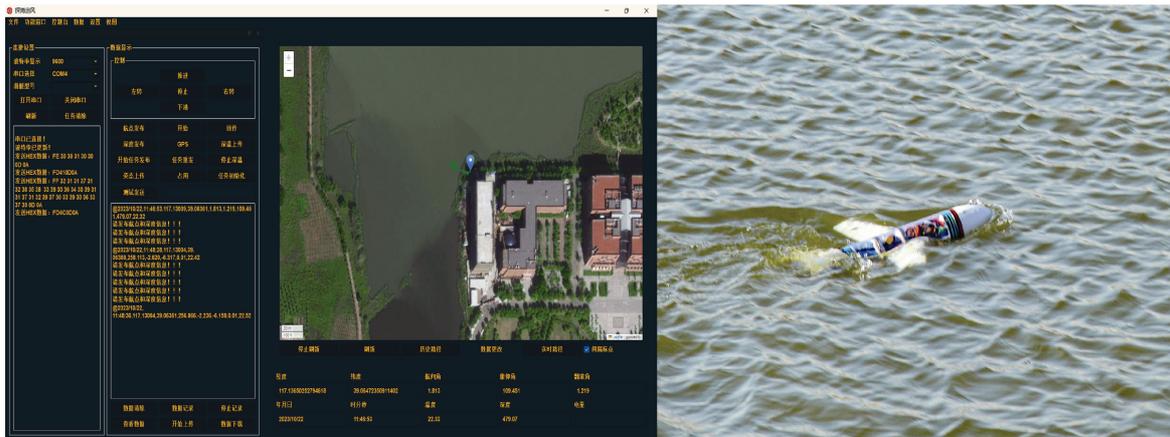


图 6 水下机器人的水面通信实验

Fig. 6 Lake test for underwater vehicle

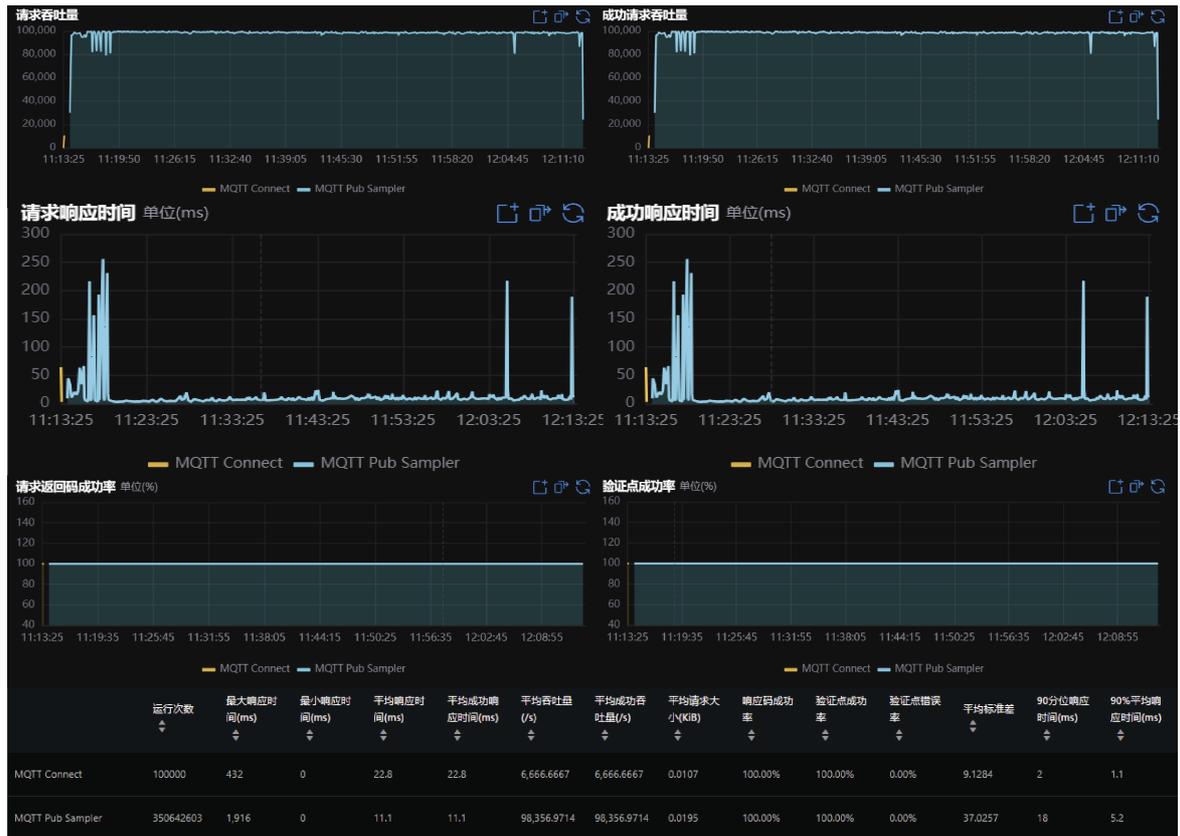


图 7 通信性能测试

Fig. 7 Communication performance test

MQTT 的最大请求响应时间与成功响应时间为 251 ms, 出现次数占整个测试的 5%, 平均响应时间为 11.1 ms, 延迟较低; 请求响应码成功率和验证点成功率均为 100%, 显示出高可靠性和稳定性。

综上所述, MQTT 通信方式是海洋数据传输中一种高效、扩展性强、延迟低、可靠性高的选择。该实验结果证明了 LoRa 与 MQTT 协同通信的可行性, 为本文所提出的协同通信提供了强有力的支持。

5 结束语

针对海上无线通信覆盖不足、存在视野盲区以及市面上缺乏通用的海洋机器人系统的问题, 本团队以水下机器人为研究对象, 设计并开发了一款基于 MQTT 与 LoRa 协同通信的水下机器人数据采集与控制一体化系统, 针对该设计, 本文主要结论如下:

1) 基于 MQTT 与 LoRa 协同通信, 设计了水下机器人数据采集与控制一体化系统, 为水下机器

人智能化提升提供了新思路;

2) 通过对水下机器人数据采集与控制一体化系统的开发与测试, 对其数据传输功能及可靠性进行了验证, 为数据鲁棒传输提供新链路;

3) 该系统通过将 MQTT 与 LoRa 技术相结合, 有效解决了传统通信方式存在的通信距离短和海上通信盲区的问题, 为全海域通信互联提供新方法;

4) 本论文为未来海洋观测物联网的搭建以及构建“透明海洋”与“智慧海洋”奠定了理论参考与技术基础。

综上所述, 该系统为海洋物联网的搭建提供了基础, 推动了物联网技术在海洋领域的发展进程, 具有重要的研究意义和应用价值。同时该技术还可同步扩展至无人艇等海洋机器人进行应用, 未来将进一步优化系统的稳定性和可靠性, 探索更高效的数据传输和处理方法, 以满足不断发展的水下机器人应用需求。

参考文献

- [1] 王凡, 冯立强, 曹荣强. 大数据驱动的海洋人工智能服务平台设计与应用[J]. 数据与计算发展前沿, 2023, 5(2): 73-85.
- [2] 封锡盛, 李一平, 徐会希, 等. 深海自主水下机器人发展及其在资源调查中的应用[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2746-2756.
- [3] 闫敬, 张志成, 杨晔, 等. 水下网络系统定位与控制联合设计: 研究现状与发展趋势[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报: 1-13[2023-10-29].
- [4] 罗汉江, 卜凡峰, 王京龙, 等. 海洋物联网水面及水下多模通信技术研究进展[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2023, 42(1): 79-90.
- [5] 方子骞. 岸海通信现状和发展前景[J]. 中国科技信息, 2023(2): 85-88.
- [6] 徐颖. 基于 LoRa 的电机监控系统研究[D]. 西安: 西京学院, 2022.
- [7] 胡奔, 金光, 朱家骅, 等. 基于无人船应用案例的无线网络技术课程教学研究[J]. 数据通信, 2019(2): 1-4.
- [8] 熊渊琳. 水下探测机器人控制系统设计[J]. 信息技术与信息化, 2019(4): 67-69.
- [9] 侯敏, 刘倩, 杨华勇, 等. 基于 MQTT 协议的海洋观测数据推送系统[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(20): 227-231.
- [10] 马英翔. 基于 LoRa 的浅水通信网络节点设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [11] BRINCAT AA, BUSACCA F, GALLUCCIO L, et al. An integrated acoustic/LoRa system for transmission of multimedia sensor data over an Internet of underwater things[J]. Computer Communications, 2022, 192(C): 132-142.
- [12] HASSAN W, FORE M, ULVUND J B, et al. Internet of fish: integration of acoustic telemetry with LPWAN for efficient real-time monitoring of fish in marine farms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104850.
- [13] SU B, BJORNSON F O, TSARAU A, et al. Towards a holistic digital twin solution for real-time monitoring of aquaculture net cage systems[J]. Marine Structures, 2023, 91: 103469.
- [14] 于永学, 王玉珏, 解嘉宇. 海洋通信的发展现状及应用构想[J]. 海洋信息, 2020, 35(2): 25-28.
- [15] 葛天雄. 基于 MQTT 的通用物联网安全系统框架[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [16] 姬广龙, 孙丹, 王珍珍, 等. 关于 MQTT 通信协议的分析与研究[J]. 物联网技术, 2023, 13(1): 63-66.
- [17] 段萍, 高雪, 朱志辉. 基于云服务的大棚温湿度远程监控系统研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(14): 178-181, 186.
- [18] 荣锋, 孟环环. 基于 MQTT 协议的智能网关设计[J]. 现代电子技术, 2023, 46(2): 75-79.
- [19] 戴圣然. 可配置通用物联网系统设计与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [20] 朱永超. 稻田自动灌溉控制系统的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
- [21] 葛敏婕, 赵子涵. 基于蓝牙技术的物联网室内定位系统[J]. 物联网技术, 2021, 11(11): 52-57.
- [22] 汪洋洋. 基于蓝牙通讯的 USB 统一接口技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- [23] 严林波. 基于 ZigBee 技术的无线通信模块研究[J]. 科学技术创新, 2020(29): 88-89.
- [24] 安东, 石学文, 杜勇等. 基于 NB-IoT 的智慧鱼塘管理系统的设计[J]. 电子技术, 2018, 47(12): 63-66.

(责任编辑: 张曼莉)