

12-13-2019

## Dynamic Simulation of Marine Pasture Water Quality Monitoring Network Based on AUG

Wenxia Xue

*College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

Bin Lin

*College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

Hu Xu

*College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

Jingbo Zhang

*College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Dynamic Simulation of Marine Pasture Water Quality Monitoring Network Based on AUG

## Abstract

**Abstract:** The development of marine pastures puts forward higher requirements for water quality monitoring. In order to achieve large-scale and long-term underwater water quality monitoring, *AUG-based Underwater Sensor Network (AUSN)* is studied. The AUG is introduced as the underwater sink node of the sensor network and the sleep scheduling mechanism is adopted for the sensors, which can effectively reduce the total energy consumption of the network. Based on the analysis of energy consumption characteristics of underwater sensor networks, the energy consumption calculation formula of underwater sensor networks is discussed. Combined with the virtual visualization technology, the underwater sensor network simulation platform is constructed. Visualization technology is used to show the working process of AUG in water quality monitoring and real-time energy consumption of the network.

## Keywords

water quality monitoring, AUG, visual simulation, real-time data

## Recommended Citation

Xue Wenxia, Lin Bin, Hu Xu, Zhang Jingbo. Dynamic Simulation of Marine Pasture Water Quality Monitoring Network Based on AUG[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(12): 2758-2767.

# 基于 AUG 的海洋牧场水质监测网络动态仿真

薛文霞, 林彬, 胡旭, 张晶泊

(大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 海洋牧场的发展对水质监测提出了更高的要求, 为了实现大规模、长时间的水下水质监测, 针对一种基于水下滑翔机(Autonomous Underwater Glider, AUG)的传感器网络(AUG-based Underwater Sensor Network, AUSN)开展研究。该网络引入 AUG 作为传感器网络的水下汇聚节点, 对传感器采用休眠调度机制, 能够有效降低网络总能耗。在分析水下传感器网络的能耗特点的基础上, 论述了传感器网络的能耗计算公式。结合虚拟可视化技术, 构建了 AUSN 仿真平台, 用可视化技术展现 AUG 在水质监测的工作过程及网络实时能耗。

**关键词:** 水质监测; 水下滑翔机; 可视化仿真; 数据实时性

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 12-2758-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0287

## Dynamic Simulation of Marine Pasture Water Quality Monitoring Network Based on AUG

Xue Wenxia, Lin Bin, Hu Xu, Zhang Jingbo

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** The development of marine pastures puts forward higher requirements for water quality monitoring. In order to achieve large-scale and long-term underwater water quality monitoring, AUG-based Underwater Sensor Network (AUSN) is studied. The AUG is introduced as the underwater sink node of the sensor network and the sleep scheduling mechanism is adopted for the sensors, which can effectively reduce the total energy consumption of the network. Based on the analysis of energy consumption characteristics of underwater sensor networks, the energy consumption calculation formula of underwater sensor networks is discussed. Combined with the virtual visualization technology, the underwater sensor network simulation platform is constructed. Visualization technology is used to show the working process of AUG in water quality monitoring and real-time energy consumption of the network.

**Keywords:** water quality monitoring; AUG; visual simulation; real-time data

## 引言

我国是海洋大国, 近年来, 随着海洋牧场以及

海洋自然保护区的建立, 水质监测成为一个维护海洋产业的重要手段。目前水质监测多是人工进行水质采样, 然后进行实验室分析, 这种方法虽然精度高, 但是太过消耗人力物力且实时性不高, 人工采样监测周期长。在水质精度要求不高的应用场景, 实用性不高且不能满足对大规模水域的监测。

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)的出现正是解决了传统水质监测不能大区域



收稿日期: 2019-05-30 修回日期: 2019-07-05;  
基金项目: 2019 年大连市科技创新基金重点学科重大课题(2019J11CY015);

作者简介: 薛文霞(1994-), 女, 山东泰安, 硕士, 研究方向为移动通信; 林彬(1977-), 女, 辽宁大连, 博士, 教授, 博导, 研究方向为海上无线宽带通信与网络技术, 网络规划, 系统优化仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2758 •

实时监测的问题。无线传感器网络部署完成后能脱离人工, 长时间独立作业。传感器节点能够感知环境的物理因素并将其转换成电信号, 传感器之间以多跳的形式传递信息, 最后一跳传感器将信息传递至汇聚节点, 然后信息向岸边逐级传递。

但是, 水下环境复杂, 传感器节点能量有限, 不易部署更换。网络中的信息以多跳的形式向上级节点传输, 这就要求上级节点不仅要感知信息, 还要转发下级节点传来的信息。距离基站最近的传感器称为最后一跳传感器, 最后一跳传感器数据转发的压力最大, 也就最容易耗尽节点能量, 形成网络能量空洞。一旦某一条传输路径上的最后一跳传感器的能量耗尽, 这条路线就无法将下级节点感知的信息传到基站, 这条路线感知的环境信息也就无法上传至岸上。

现有的面向水质监测的水下传感器网络很少考虑能耗问题。如文献[1]提出了数据驱动的拓扑控制技术, 实现了水污染信息自动化收集, 文献[2]设计了一种基于 Zigbee 的水质监测传感器网络, 该系统包括一个报警组件, 异常事件发生后发送邮件报警。文献[3]介绍了一种用无人船进行水质监测的方法。可以在岸站控制无人船, 无人船也可以自主巡航。实现了实时水质监测, 提高了监测效率。但是, 这种方式只适合水面水质监测, 不适合水下水质监测。文献[4]提出了一种“空天地海”网络结构, 但没有对架构能耗进行参数分析。综合看来, 大多数研究只是提出一种针对水质监测的网络架构, 并没有考虑水下环境的水质监测以及其传感器网络的能耗问题。

AUG 是一种可以按照工作人员预先设定的路线进行工作的水下机器人, 它可以完成水下地形探测、水下环境参数感知等工作。引入水下滑翔机的水下传感器网络可以有效地均衡网络负载, 降低整个网络的能耗。这类水下传感器网络的优点是水下滑翔机具有移动性, 可以作为移动的汇聚节点在传感器之间收集信息, 可以让更多的节点直接跟汇聚节点进行通信, 减少信息中继, 延长网络寿命。文

献[5]分析发现, 在网络中引入一个移动中继, 整个网络的生命期可以延长 4 个数量级, 这显示了移动中继为传感器网络带来的巨大好处。

在 AUG 的实际应用中, 由于 AUG 的航行速度相对于自主式水下潜器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 是较慢的, 因此当海面的风浪较大、海况恶劣时, AUG 会失去控制, 被水流冲走, 造成财产损失以及实验数据的丢失。因此, 在恶劣天气下减少 AUG 的室外工作, 对 AUG 的工作过程进行实验室的仿真演示, 可以减少财产损失。

目前, 大多数研究使用 MATLAB 工具对水下传感器网络进行仿真展示。MATLAB 的编程效率高, 具有高效方便的矩阵和数组运算, 但是其仿真结果不够形象直观, 不能展示仿真场景的细节及变化。因此, 直观清晰的可视化仿真的优势就凸显出来。可视化仿真便于研究人员宏观把握网络的整体推进过程; 可以对非视觉物理量, 比如声音信号进行可视化演示, 简洁形象地向非专业人员展现网络架构, 进行网络工作演示。

文献[6]构建的海上无线传输虚拟可视化仿真平台可以在虚拟环境中实时显示通信质量, 但是该平台只能反映海上的传输损耗特点, 没有完整的海上通信网络架构, 也不能感知水下环境。哈尔滨工程大学的复杂海洋环境中的声呐探测性能分析实验教学平台, 利用虚拟可视化的优势, 打破海洋与声呐难于进入课堂的瓶颈, 该平台虽然能够展现水声通信的声呐特性, 但是平台的扩展性受教学内容的限制, 可扩展性差。本文研究的 AUSN 仿真平台可以直观展现水下传感器网络架构, 实时显示网络能耗数据, 不受教学内容等因素限制, 可扩展性好, 适用于海洋无线传感器网络的实验室研究等科研领域, 也适用于宣传海洋科学的科普教育领域。

综上所述, 我们针对 AUSN 进行研究, 并将其与可视化技术相结合, 构建了可视化的仿真平台。本文的贡献主要有 2 个方面: (1) 针对 AUSN 进行研究, 引入水下滑翔机作为水下汇聚节点, 以

实现均衡网络负载，延长网络寿命的目的；(2) 采用虚拟可视化技术，构建了一种直观展现全貌，增强用户理解的仿真平台，平台具体包括传感器网络网元节点行为仿真、信息在网元节点的传递以及网络能耗的实时显示。

### 1 仿真平台设计

我们的仿真平台主要是构建一种基于 AUG 的水下传感器网络，并针对传感器网络的实时能耗进行计算，仿真平台框图如图 1 所示。

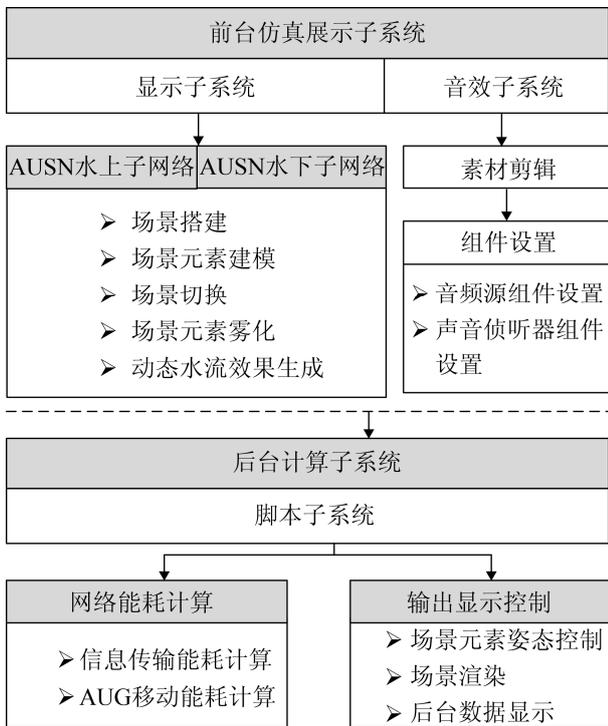


图 1 仿真平台框图  
Fig. 1 Diagram of simulation platform

该仿真平台主要是由前台仿真展示子系统和后台计算子系统组成，前台仿真展示子系统包括显示子系统、音效子系统。显示子系统分别显示传感器网络的水上和两个子网络，首先是搭建两个场景并通过 3DMAX 软件对场景元素进行建模导入，通过场景中的按键可以实现场景之间的切换，最后是对场景的视觉优化，具体包括场景元素的雾化以及动态水流的仿实现。音效子系统能够增加场景的沉浸感，使仿真更具真实感，让用户得到更

好的体验，通过视觉与听觉的结合，构建一个有机连贯的仿真平台。后台计算子系统即脚本子系统，在脚本子系统中，我们主要进行网络能耗的后台计算以及对前台输出的显示控制。计算网络能耗时，我们综合考虑水下传感器网络中的节点信息传输的能耗与 AUG 的移动能耗，建立了能够实时显示网络能耗及 AUG 移动距离的仿真平台，同时，通过脚本子系统能够控制前台输出显示，主要包括场景元素姿态控制、场景渲染以及后台数据显示。

### 2 基于水下滑翔机的水下传感器网络

#### 2.1 AUSN 架构

如图 2 所示，AUSN 的网元实体包括：传感器节点(Sensor Node, SN)、AUG 节点、浮标节点、高空平台(High Altitude Platform, HAP)、岸上基站和岸基控制中心。下面针对每一个网元实体进行详细介绍。

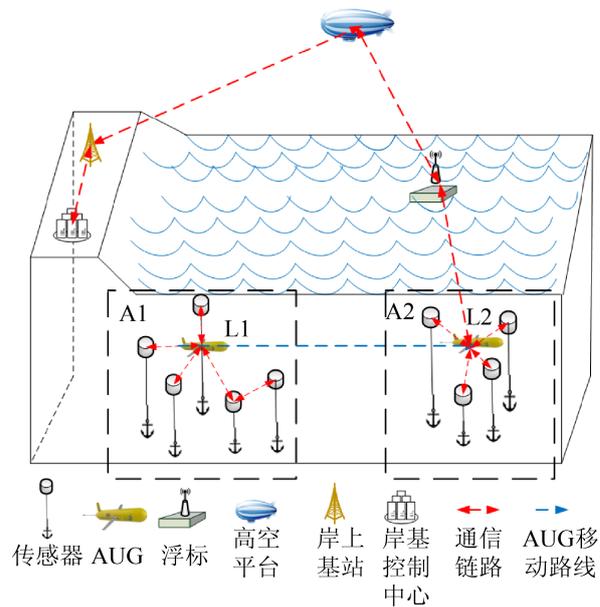


图 2 AUSN 架构  
Fig. 2 Architecture of AUSN

SN 节点的功能是监测目标区域内的环境状态比如叶绿素值、pH 值等，然后将监测信息上传至 AUG。根据中华人民共和国国家标准海洋监测规范，部署 SN 节点时要部署在能提供有代表性信息

的位置。由于 SN 点感知的消息要通过其他 SN 中继传输, 所以, SN 之间的距离需要满足通信的要求。SN 点有两种状态: 休眠状态及活跃状态。休眠状态是指 SN 只能感知周围信息并将收集到的信息暂时存储在本地, 待 AUG 将 SN 唤醒后, SN 进入活跃状态, 将感知到的信息传至 AUG。

在本架构中 AUG 作为水下汇聚节点, 它的功能是移动收集 SN 节点信息, 减少信息中继, 并将收集的信息传至浮标。AUG 有两种状态: 移动状态与静止状态。如图 2 所示, 移动状态是指 AUG 在 L1 位置移动到 L2 位置, 在这个过程中 AUG 不需要唤醒传感器, 也不需要通信, 只是进行地理位置的转移。静止状态是指当 AUG 移动到 L1 位置后会处于静止状态, 唤醒 A1 区域中的 SN, A1 区域的 SN 进入活跃状态并将感知的信息以无线的形式传递给 AUG。A1 区域信息收集完毕后, AUG 接着移动至 A2 区域的 L2 位置, A1 区域的 SN 进入休眠状态。AUG 进入 A2 区域后, 以同样的方式收集信息。AUG 的位置信息在 AUG 下水工作之前提前计算出来并输入 AUG。网络中的 AUG 具有移动性, 为了降低网络能耗, SN 节点采用休眠调度机制, 即当 AUG 进入 A1 区域时, A1 区域的 SN 节点处于活跃状态, A2 及其他区域的 SN 节点处于休眠状态; 当 AUG 移动到 A2 区域时, A2 区域的 SN 节点被 AUG 唤醒, 处于活跃状态, A1 及其他区域的 SN 节点处于休眠状态。采用休眠调度机制能够有效地节约 SN 节点的能耗, 避免网络通信链路因 AUG 位置的变化而频繁变化。

浮标作为水面汇聚节点, 主要任务是接收 AUG 收集的信息并将其传至高空平台。一般来说, AUG 只有浮出水面才能通过卫星进行远距离通信。部署浮标的主要目的是避免 AUG 时常浮出水面而造成的能量浪费。浮标同时具备水下通信能力及与高空平台无线通信的能力。AUG 在水下收集完一轮信息之后将信息传递给浮标, 以便信息进一步向岸上传输。

HAP 节点是处于距离地面 20km 的高空平流

层的高空平台, 其搭载有无线网络收发器。它的任务是接收来自浮标的信息并将其发送至岸上基站。浮标、HAP 以及岸上基站之间的通信是以特制的无线收发器实现的。因为卫星通信的成本高、时延大, 部署 HAP 节点可以避免浮标与卫星通信。浮标传来的信号经过 HAP 节点的中继传至岸上, 可以减少网络的通信成本, 降低网络时延。

部署岸上基站(Base Station, BS)是为了接收 HAP 节点传来的水质监测信息并将其进一步传递给岸基控制中心。

岸基控制中心的功能是最终接收并处理水下水质监测信息, 以直观的形式展现给用户。

## 2.2 AUG 信息收集流程

AUSN 信息收集流程如图 3 所示, 将 AUG 投放入海之后, AUG 会根据存储的位置信息寻找第一个停留点, 当 AUG 移动到第一个养殖区的停留点时, 只唤醒部署在该养殖区的 SN, 其他区域的 SN 处于休眠状态, 即只感知环境信息, 不传输信息。



图 3 AUG 信息收集流程图

Fig. 3 Flow chart of AUG information collection

该养殖区中被唤醒的 SN 将信息传递至 AUG，一段时间后，AUG 离开该养殖区移动到下一养殖区，该养殖区的传感器进入休眠状态，下一养殖区的 SN 被 AUG 唤醒传递信息，AUG 及 SN 按照上述同样的方式收集传递信息。AUG 移动过程中不进行通信，只有到达某一养殖区的固定位置后才进行通信。当 AUG 遍历收集完成水下所有传感器的信息后，就将信息上传至浮标，然后浮标经高空平台传递至岸上基站，最后信息由岸上基站传至岸上控制中心，至此，一轮信息收集完成。

### 2.3 AUSN 网络能耗计算

对水下节点来说，感知环境所需的能量与接收信息所需的能量远远低于发送信息所需的能量。所以本文只考虑 AUG 的移动能耗及网络节点传输信息的能耗。假设网络中传感器节点均匀部署，节点之间距离近似相等。

#### 2.3.1 AUSN 链路能耗计算

AUSN 传输链路模型如图 4 所示。节点 1 的信息经节点 2 中继传至 AUG，节点 1 与节点 2 为一条通信链路，同理节点 3、节点 4、节点 5 也构成一条通信链路。

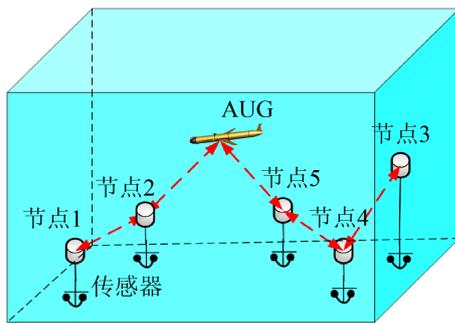


图 4 AUSN 传输链路模型  
Fig. 4 Model of AUSN transmission link

本文论述的链路能耗为一条链路上  $N$  个传感器信息传输能耗之和。

链路能耗  $E$  可以表示为<sup>[7]</sup>:

$$E = E_{tx}(d) + 2E_{rx}(d) + 3E_{tx}(d) + \dots + NE_{tx}(d) \quad (1)$$

式中的  $E_{tx}(d)$  为一个节点单跳向另一个节点传输信

息所需的能耗，可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$E_{tx}(d) = P_r \times T_p \times A(d) \quad (2)$$

式中的  $d$  为这两个节点之间的距离，传感器网络中的两个节点若是能够相互通信，则要求这两个节点之间的距离小于这两个节点中较小的通信半径，可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$d \leq \min(R1, R2)$$

式中： $d$  为两节点之间的欧式距离； $R1$ 、 $R2$  分别为两个节点的通信范围， $\min()$  表示取最小值。

式(2)中的  $T_p$  表示传输一个数据包所需要的时间，可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$T_p = \frac{M_b}{S_v}$$

式中： $M_b$  为数据包的大小； $S_v$  为数据包的传输速度。

式(2)中的  $P_r$  表示接收端接收信息所需的功率阈值，为了接收端的接收功率能够达到  $P_r$ ，发射端的功率阈值就需要达到  $P_r \times A(d)$ ， $A(d)$  为能量衰减。可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$A(d) = d^\lambda \times \beta^d \quad (3)$$

式中： $\lambda$  为能量扩散系数( $\lambda=1$  表示圆柱形扩散， $\lambda=1.5$  表示实际的扩散方式， $\lambda=2$  表示球形扩散)。

式(3)中的  $\beta$  是由吸收系数  $\alpha(f)$  得到的频率相关项，可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$\beta = 10^{\frac{\alpha(f)}{10}} \quad (4)$$

式中：吸收系数  $\alpha(f)$  可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$\alpha(f) = \frac{0.11 \times 10^{-3} f^2}{1 + f^2} + \frac{44 \times 10^{-3} f^2}{4100 + f^2} + \frac{2.75 \times 10^{-7} f^2}{3 \times 10^{-6}}$$

#### 2.3.2 AUG 移动能耗

AUG 的移动能耗  $M_e$  我们定义为 AUG 的移动距离  $m_d$  与移动单位距离能耗  $e_{mu}$  的乘积，可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$M_e = m_d \times e_{mu}$$

#### 2.3.3 AUSN 网络能耗

AUSN 网络能耗  $E_{total}$  定义为网络所有链路的链路能耗与 AUG 的移动能耗之和，可以表示为:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^L E + M_e$$

式中:  $L$  为网络中总的链路个数。

### 2.3.4 AUSN 实时能耗

在本文研究的网络中, 传感器采用休眠调度机制。不同区域的传感器不会在同一时间一起传输信息, AUG 移动至某一区域时, 该区域的传感器才会因传输信息产生能耗, 其他区域的传感器因处在休眠状态而不会产生能耗。AUSN 实时能耗会随着 AUG 的移动及传感器的状态更换而发生变化。

AUSN 实时能耗定义为自  $t_0$  时刻 AUG 下水开始, 至当前时刻  $T$  这一时间段的 AUG 移动能耗与这一时间段内  $k$  条已传输信息的链路能耗之和, 实时能耗  $E_{rt}$  可以表示为:

$$E_{rt} = \sum_{t=t_0}^T e_{mu} \times v \times t + \sum_{k=1}^K E$$

式中:  $v$  为 AUG 的平均移动速度。

## 3 仿真平台可视化关键技术

### 3.1 水下场景雾化

在现实生活中, 物体向远处移动时, 会随距离的增加逐渐不可见, 在 Unity 仿真中, 这种现象为雾化。为了最大程度地仿真水下环境, 我们给场景做了雾化效果。雾化可以自动消隐远景实体, 让场景效果更贴合实际, 场景中融入这种效果无论对系统的实时性还是场景的真实性都大有好处。雾化具体体现为离镜头越远的物体的颜色表示为灰色与物体本身的颜色混合, 来达到在远处隐藏物体的目的。Unity 引擎给出了 3 种雾化模式, 分别是 Linear、Exponential 和 Exp2, 在我们的平台中采用的是 Linear 雾化模式, 公式为:

$$g = \frac{D_{\max} - |z|}{D_{\max} - D_{\min}}$$

式中:  $z$  为物体距离摄像机的距离;  $D_{\max}$  和  $D_{\min}$  为受雾影响的距离起点和终点。传感器雾化前后效果比较图如图 5 所示。

图 5(a)为传感器雾化之前的效果图, 该传感器

距离镜头近, 可以清晰看清传感器的形态, 图 5(b)为传感器雾化之后的效果图, 该传感器距离镜头较远, 传感器的轮廓比较模糊, 颜色是红色与背景色的混合。



(a) 传感器雾化之前效果图 (b) 传感器雾化之后效果图

图 5 传感器雾化效果比较图

Fig. 5 Comparison of sensor atomization effect

### 3.2 动态水流效果生成

为了还原真实的水下环境, 我们对水下环境的水流做了动态模拟, 动态模拟水下水流无论是从视觉效果还是信息表达方面都给用户提供了更准确的信息。动态模拟水流的方法主要是两种: 一种是通过改变纹理贴图的位置来实现水流的效果, 我们在编写脚本时, 每一帧都对水流的纹理坐标进行偏移变化, 当纹理的偏移能够无缝衔接时, 就可以模拟水体的流动; 另一种方法是多个纹理图片的替换, 也就是说在三维场景下随时间推移更换水流纹理图片, 以此来实现水体流动, 但是这种方法需要创建一套表示水流的纹理图片, 时间成本高, 工程周期长, 因此, 我们采用第一种方法。

### 3.3 后台数据显示

文献[10]介绍了 Unity 游戏引擎的基础框架和脚本系统中几个重要的方法, 其中 Update()方法用于控制游戏的按帧刷新, 该方法在每一帧都会被调用。在本文的仿真场景中, 每一帧都会伴随 AUG 位置的移动或者网络节点信息的传输, 这将直接导致能耗计算公式中变量的改变, 我们将能耗的计算公式写进 Update()方法, 每一帧能耗也就随之更新。为了将能耗值展现在仿真界面上, 我们加一个

UI 的 Text 组件, 在 Text 组件下挂一个脚本去读取计算能耗脚本中的能耗值, 将读取函数同样放在 Update()方法下, 这样就能实现实时监测网络能耗。

### 3.4 场景切换

场景切换是通过添加一个控制场景切换的 Button 组件, 在这个 Button 组件下挂一个脚本来控制场景的激活与销毁。场景的激活是指场景中 Hierarchy 视图中的所有对象在切换场景的时候都会被加载。在场景切换之前需要给场景生成序号, 以确定需要激活的场景。在 File 下拉菜单中选择 Build Settings, 在 Scenes In Build 中添加需要切换的场景, Unity 将会自动生成序号。最后在 Inspector 面板中的 Button 组件中注册点击事件。场景的激活与销毁是通过 MonoBehaviour: OnLevelWasLoaded()方法实现的, 当调用这个方法时, 之前场景中的物体将会被删除并激活指定的场景。

## 4 仿真

对 AUSN 的仿真主要是分为场景元素的搭建、水下水下网络仿真以及水上子网络仿真。在仿真平台中, 通过主界面的导航可以进入相应的场景, 在每一个场景都有返回按钮可以回到主界面。这两个子网络构建了 AUSN 网络架构, 在场景界面中能够展现网元实体的姿态行为及信息传输、显示 AUG 的实时移动距离、监测实时网络能耗; 通过这个仿真平台, 能够在实验室中仿真 AUG 的工作过程, 减少恶劣天气下 AUG 的室外工作, 降低了因海况恶劣造成的 AUG 及实验数据的丢失的可能性; 还能帮助用户了解水下传感器网络, 监测网络的实时能耗。

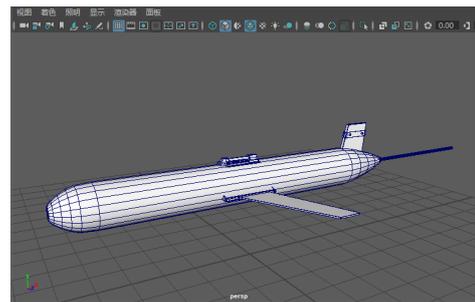
### 4.1 AUG 的建模仿真

AUG 是一种新型水下移动观测平台, 通过搭载传感器可以对水下环境进行监测。其由浮标技术与水下机器人技术相结合, 在浮力驱动和水平机翼的作用下获得推进力, 具有能耗低, 续航力大的特点, 其巡航时间可达数月。图 6 为中国科学院沈阳

自动化研究所研制的“海翼 300”水下滑翔机实物与模型对比图, 其中图 6(a)为“海翼 300”水下滑翔机实物图, 其参数为作业水深 300 m, 巡航速度 0.5~1 节, 续航时间 40 天。图 6(b)为“海翼 300”水下滑翔机的 MAYA 模型图。对于模型的创建, 首先, 在建模之前要收集有关“海翼 300”水下滑翔机的三视图, 将其作为参考进行模型绘制。其次, 用多边形创建模型主体, 用曲面创建弯曲弧度。最后用对齐命令进行组合修饰。



(a) “海翼 300”水下滑翔机实物图



(b) “海翼 300”水下滑翔机 MAYA 模型图

图 6 “海翼 300”水下滑翔机实物与模型对比图

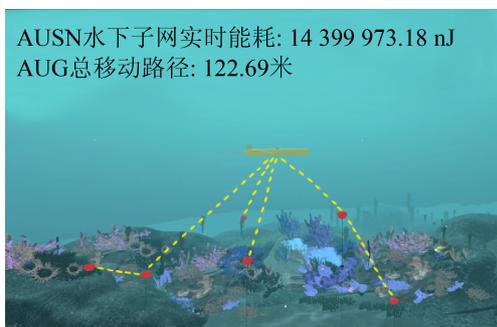
Fig. 6 Contrast diagram of “Haiyi 300” AUG’s objects and model

### 4.2 AUSN 水下水下网络仿真

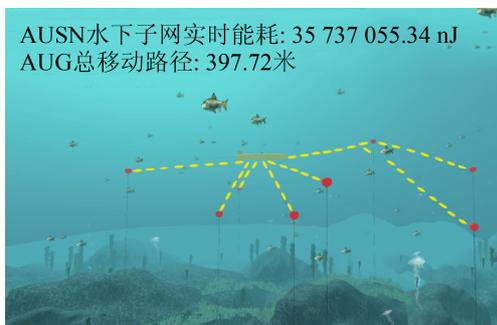
对于 AUSN 的区域划分, 我们结合实际的海洋牧场的养殖方式, 分为 3 个区域, 分别为珊瑚养殖区、鱼类养殖区、藻类养殖区。

图 7 为 3 个区域的仿真界面, 其中图 7(a)为珊瑚养殖区, 图 7(b)为鱼类养殖区, 图 7(c)为藻类养殖区。珊瑚多生长在海底, 所以传感器部署位置较低; 鱼类养殖需要较大范围, 所以鱼类养殖区需要部署较多的传感器; 因为藻类的生长需要阳光, 所以藻类养殖区靠近海面, 在该区域部署的传感器位置较高。在仿真场景中, 红色节点为传感器, 由锚

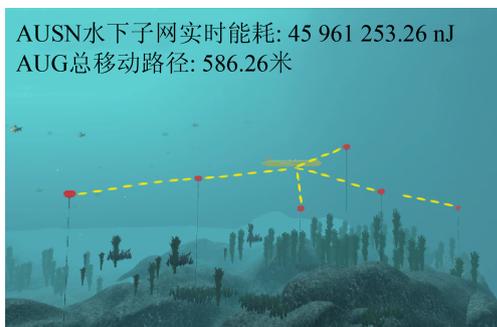
链固定到水底, 黄色点模拟信号。从图 7 中可以看出, 信息的传递方式有 2 种, 一种是传感器直接将信号传递给 AUG, 另一种是传感器通过其他传感器的中继将信息传递至 AUG。随着 AUG 移动, 仿真界面会实时显示 AUG 的移动距离, 此时网络的能耗体现为 AUG 移动能耗, 水下水网络能耗会因为 AUG 的移动而时时改变; 当 AUG 到达某一养殖区的固定位置后, AUG 停留并收集信息, 此时的能耗体现为传感器传递信息的能耗, 当传感器将信息传递给 AUG 时, 界面上显示的水下水网络能耗值也会改变。



(a) 珊瑚养殖区



(b) 鱼类养殖区



(c) 藻类养殖区

图 7 AUSN 水下水网络

Fig. 7 Underwater subnetwork of AUSN

表 1 AUG 移动至不同区域的实时能耗统计  
Tab. 1 Real-time energy consumption statistics of AUG moving to different areas

AUG 移动区域	实时能耗/nJ
下潜—珊瑚养殖区	14 399 973.18
珊瑚养殖区—鱼类养殖区	35 737 055.34
鱼类养殖区—藻类养殖区	45 961 253.26

### 4.3 AUSN 水上子网络仿真

AUSN 水上子网络节点主要包括: 浮标、高空平台以及岸上基站。

如图 8 所示, 我们部署了浮标接收 AUG 传来的信号。浮标进一步将信息传递至高空平台, 最后传递至岸上基站。浮标上装有能够与高空平台通信的无线收发器。这种通过高空平台作为信息中继与通过卫星传输相比大大节约了成本且时延低、衰减少。AUSN 水上子网络的能耗显示在仿真界面左上方。

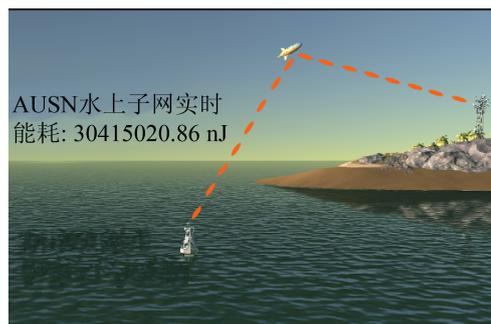


图 8 AUSN 水上子网络

Fig. 8 HAP-seasurface subnetwork of AUSN

### 4.4 AUSN 能耗性能仿真

为验证该算法在网络能耗方面的性能, 本文在 Matlab 下开展相关实验, 分析网络能耗, 并改变能量扩散系数, 对比不同能量扩散系数下归一化的能耗变化, 主要实验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数设置  
Tab. 2 Setting of experimental parameters

参数	值
接收功率( $P_r$ )	0.05 W
数据包大小( $M_b$ )	1 kbit
数据包传输速率( $S_v$ )	5 kbps
载波频率( $f$ )	14 kHz

图 9 为经一轮信息收集后, AUSN 的归一化能耗随传感器节点间距离增加的变化情况。从图 9 中可以看出随着传感器节点间距离的增加, 网络的能耗越来越高, 这是因为为了实现网络通信, 发射端的发射功率及接收端的接收功率都要随着传感器节点之间的距离的增大而增加, 这就会造成传感器网络通信能耗的增大。

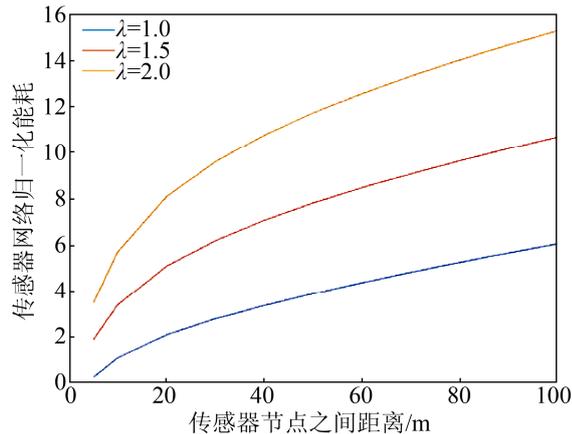


图 9 AUSN 归一化能耗图

Fig. 9 Normalized energy consumption of AUSN

当传感器节点之间的距离固定时, 不同的能量扩散系数会对网络能耗产生影响, 其中通过球形扩散系数计算出的网络能耗值最大, 其次是通过实际的扩散系数计算出的网络能耗值大, 最后通过圆柱形扩散系数计算出的网络能耗值最小, 扩散系数与环境有关, 不同的环境下扩散系数不同, 能耗值也不同。并且我们从图中可以看出, 随着传感器节点间距离的增大, 扩散系数对能耗的影响越来越大, 这是因为水下声音信号会随着传输距离的增大而衰减, 当传感器节点之间的距离增大时, 信号发射端到信号接收端的距离变大, 信号衰减严重, 为了满足通信要求, 发射端需要更大的功率发射信号, 故网络能耗变大。

## 5 结论

本文在传统的水质监测网络不足的基础上, 针对基于 AUG 的水质监测传感器网络进行了研究。引入 AUG 作为水下信息的汇聚节点, 可以减少传

感器网络的信息中继, 改善网络负载均衡, 降低能量空洞形成的概率, 延长网络的生命周期。

基于 Unity 对 AUSN 进行了仿真平台设计与实现。不仅可以仿真 AUG 的移动以及收集信息的过程, 还能动态地、实时地显示网络中的能耗变化。未来可以进一步针对深远海 AUV 集群的航线规划、以及大规模传感器海底观测网的性能开展动态仿真研究。

## 参考文献:

- [1] 许龙飞, 聂菊根, 马向进, 等. 基于无线传感器网络的水环境监测系统设计与实现[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(9): 118-119.  
Xu Longfei, Nie Jugen, Ma Xiangjin, et al. Design and Implementation of Water Environment Monitoring System Based on Wireless Sensor Network[J]. Digital Technology & Application, 2018, 36(9): 118-119.
- [2] Nasser Nidal, Ali Asmaa, Karim Lutful, et al. An Efficient Wireless Sensor Network-based Water Quality Monitoring System[C]. 2013 ACS International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA). Ifrane: IEEE Computer Society, 2013: 1-4.
- [3] Shuo Jia, Yonghui Zhang, Wen Ran, et al. The Unmanned Autonomous Cruise Ship for Water Quality Monitoring and Sampling[C]. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC). Dalian: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017: 700-703.
- [4] 胡旭, 林彬, 王珍. 基于 VDES 的空天地海通信网络架构与关键技术[J]. 移动通信, 2019, 43(5): 2-8.  
Hu Xu, Lin Bin, Wang Zhen. VDES-based Air, Ground and Sea Integrated Communication Networks: Architecture and Key Technologies[J]. Mobile Communications, 2019, 43(5): 2-8.
- [5] 瞿贻. 可移动节点辅助的无线传感器网络能量优化研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.  
Qu Yi, Research on Energy Optimization in Wireless Sensor Network Under Assistance of Mobile Nodes[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [6] 佟禹瑄, 林彬, 任鸿翔, 等. 海上无线传输虚拟可视化仿真平台设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(11): 4227-4235.  
Tong Yuxuan, Lin Bin, Ren Hongxiang, et al. Design and Implementation of Virtual Visual Simulation Platform for Maritime Wireless Transmission[J]. Journal of System

- Simulation, 2018, 30(11): 4227-4235.
- [7] Sozer E M, Stojanovic M, Proakis J G. Underwater Acoustic Networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering (S0364-9059), 2000, 25(1): 72-83.
- [8] Jiang P, Liu J, Wu F, et al. Node Deployment Algorithm for Underwater Sensor Networks Based on Connected Dominating Set[J]. Sensors (S1424-8220), 2016, 16(3): 388.
- [9] 李鑫. 高可靠海上无线传感器网络拓扑优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- Li Xin. Topology Optimization for Maritime Wireless Sensor Network with High Reliability[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [10] 吴志达. 一个基于 Unity3d 游戏引擎的体感游戏研究与实现[D]. 广州: 中山大学, 2012.
- Wu Zhida. Research and Implementation of a Somatic Game Based on the Unity3d Game Engine[D]. Guangzhou: National Sun Yat-sen University, 2012.