

10-14-2020

## Optimization and Simulation of Offshore Edge Computing Network for e-Pilotage

Bin Lin

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

Chenchen Song

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

Yajing Zhang

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

Jianli Duan

*1. College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; ;2. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, 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.

---

# Optimization and Simulation of Offshore Edge Computing Network for e-Pilotage

## Abstract

**Abstract:** In order to improve the safety of the ship's piloting process, an *INA-based offshore edge computing network (IOECN) architecture is proposed* to provide navigation assistance information. The *Layout Optimization Problem (LOP) of network element nodes in the network is mainly studied*. The *mathematical model is used to convert the LOP into an Integer Linear Programming (ILP) problem*. On condition of the required network coverage and connectivity, aiming to minimize the network cost, being solved by Gurobi and simulated and demonstrated by Matlab, the network optimization on different scales is obtained and the correctness and scalability of the model is verified.

## Keywords

INA, edge computing, ILP, network optimization

## Recommended Citation

Lin Bin, Song Chenchen, Zhang Yajing, Duan Jianli. Optimization and Simulation of Offshore Edge Computing Network for e-Pilotage[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(10): 1989-1996.

## 面向 e-引航的近海边缘计算网络优化与仿真

林彬<sup>1</sup>, 宋晨晨<sup>1</sup>, 张雅静<sup>1</sup>, 段建丽<sup>1,2</sup>

(1. 大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026; 2. 青岛理工大学理学院, 山东 青岛 266525)

**摘要:** 为提高船舶引航过程安全性, 提出了一种基于智能航标(Intelligent Navigation Aid, INA)的近海边缘计算网络(INEC-based Offshore Edge Computing Network, IOECN)架构, 以提供助航信息保障。重点研究网络中网元节点的布局优化问题(Layout Optimization Problem, LOP)。通过数学建模, 将 LOP 转化为整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)问题。在满足网络覆盖率及连通性条件下, 以网络成本最低为求解目标, 并使用 Gurobi 进行求解、运用 Matlab 进行仿真展示, 最终得到不同规模下的网络优化方案, 验证了模型的正确性及可扩展性。

**关键词:** 智能航标; 边缘计算; 整数线性规划; 网络优化

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 10-1989-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-FZ0306

## Optimization and Simulation of Offshore Edge Computing Network for e-Pilotage

Lin Bin<sup>1</sup>, Song Chenchen<sup>1</sup>, Zhang Yajing<sup>1</sup>, Duan Jianli<sup>1,2</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

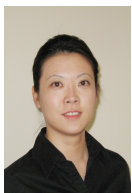
**Abstract:** In order to improve the safety of the ship's piloting process, an INA-based offshore edge computing network (IOECN) architecture is proposed to provide navigation assistance information. The Layout Optimization Problem (LOP) of network element nodes in the network is mainly studied. The mathematical model is used to convert the LOP into an Integer Linear Programming (ILP) problem. On condition of the required network coverage and connectivity, aiming to minimize the network cost, being solved by Gurobi and simulated and demonstrated by Matlab, the network optimization on different scales is obtained and the correctness and scalability of the model is verified.

**Keywords:** INA; edge computing; ILP; network optimization

## 引言

新时代引航事业为建设“交通强国”和“海洋强国”、助力“一带一路”、发展“引航智慧”和“引航力量”做出重要贡献。“引航”作为港口与航运之间的纽带, 发挥关键作用。现阶段, 在引航过程中面临

的问题主要有<sup>[1-2]</sup>: (1) 随着港口贸易量和船运量的不断增多, 通航环境变得极为复杂, 引航风险逐渐增加; (2) 在恶劣气象和复杂水文等诸多不利条件下, 如海上能见度、航标亮度、水流等因素直接影响船舶的航行与靠离泊安全; (3) 现已使用的雷达、GPS 导航定位、AIS 等助航设备极大提高了引航员的工作效率, 但这些设备不能保证在第一时间给引航员提供直观、精确的航道信息, 很大程度上需要引航员靠目视和工作经验做出判断。航标作为航道中的重要助航设施, 是船舶引航安全的重要保



收稿日期: 2020-04-30 修回日期: 2020-06-05;  
基金项目: 国家自然科学基金(61971083, 51939001),  
大连市科技创新基金重点学科重大课题(2019J11  
CY015);  
作者简介: 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、边缘计算、系统优化仿真。

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

• 1989 •

障,充分利用航标为航行船舶提供航行信息,对于解决引航过程中面临的问题具有重要意义。

针对助航服务远不能满足日益发展的航运事业需求的问题,国内外许多学者进行了多方面的研究。文献[3]设计了基于物联网的智能航标系统,不仅可以实现水文数据的采集与定位,还能与监控中心进行数据传输。文献[4]建立的基于 AIS 航标综合水文气象系统,可对各种传感设备获取的数据信息进行解析。文献[5]提出由多功能航标终端、通信链路和监控中心组成的多功能航标系统,可实现数据信息采集、报警、信息发布及远程维护的功能。然而,现有航标多具有信息采集与通信功能,却很少涉及航标直接对传感信息及船舶信息的处理与计算。

边缘计算以安全性高、低时延、低带宽的优势已被运用于众多领域。文献[6]针对大规模自动驾驶场景,将传感、通信和计算的思想深度融合,提出了感知-通信-计算融合的智能车联网方法。文献[7]将边缘计算技术应用于智慧电网平台,分析了智慧电网的不同应用场景相应的边缘计算解决方案。现有对边缘计算的研究多用于陆上,在海上的研究甚少。由于缺少陆地基础设施支持,海域通信网络的计算资源配置非常有限,无法完成大量计算任务,造成任务执行过程中的明显时延。利用边缘计算模式,将繁重的计算任务主动迁移至智能航标进行处理,将是解决这一难点最为有效的方案<sup>[8-9]</sup>。

综上,本文对 IOECN 布局优化问题进行研究,主要贡献包括:(1)将边缘计算的概念引入智能航标,提出 IOECN 架构,实时处理水文、航行数据,为航行船舶提供实时、可靠的航行信息;(2)建立 IOECN 数学模型并求解仿真,为解决实际工程部署问题提供理论参考。

## 1 网络架构及问题描述

为提升海域信息的收集及处理能力,为航行船舶提供实时、可靠的航行信息,本文将智能航标与边缘计算、水下无线传感器网络相结合,提出了一种新型的 IOECN 架构服务于船舶引航。水下无线传感器网络实时监测航道的水流、水压、水深等信

息,传感器之间通过水声通信以多跳的传输方式互相进行信息传递;智能航标作为汇聚节点,通过边缘计算单元将水下传感信息、航行船舶信息与自身内置传感器模块感知的气象等数据进行计算和存储,再发送给航行船舶与岸基边缘数据中心,完成网络通路的信息传输。整个网络具有低带宽、低时延的优势,可提升海上信息资源的共享性、可用性 & 可扩展性。

### 1.1 IOECN 网络架构

图 1 所示为 IOECN 网络架构图,该架构由六个部分组成:一是随机分布的测试点(Test Point, TP),用来测试网络的覆盖率及连通性;二是系泊在海床上的水下传感器,需要对 TP 进行全覆盖,并将收集的水文信息转发给智能航标;三是航行船舶,通过与智能航标通信传递航行相关信息;四是布设在海面的智能航标,在收集传感器与航行信息的同时,通过边缘计算模块对数据进行分析处理,以无线通信的方式传送至航行船舶和岸基边缘数据中心。一方面航行船舶可实时获取航行信息,减少了信息传递过程的时延,另一方面经智能航标处理后信息再传输至岸基边缘数据中心,可减少海上数据传输所占用的带宽;五是布设在港口的岸基边缘数据中心(Land-based Edge Data Center, LEDC),可实时掌握网络拓扑,对智能航标接收到的信息进行快速处理,并下发操作信息,实现自动化管理和调度,从而进行网络集中化控制,最终实现计算、存储资源的自主管理,完成数据和信息的共享;六是岸基控制与云计算中心(Land-based Control and Cloud Computing Center, LCCC),由高性能的服务器集群组成,具有强大的计算和存储能力,可进行海上交通管控,制定合理的交通方案。

### 1.2 LOP 描述

本文采用树形拓扑网络结构,具有结构简单且易于扩展的优势。图 2 所示为 IOECN 树形拓扑结构图,需要在满足网络连通性、覆盖率的前提下,最小化整个网络的部署成本。

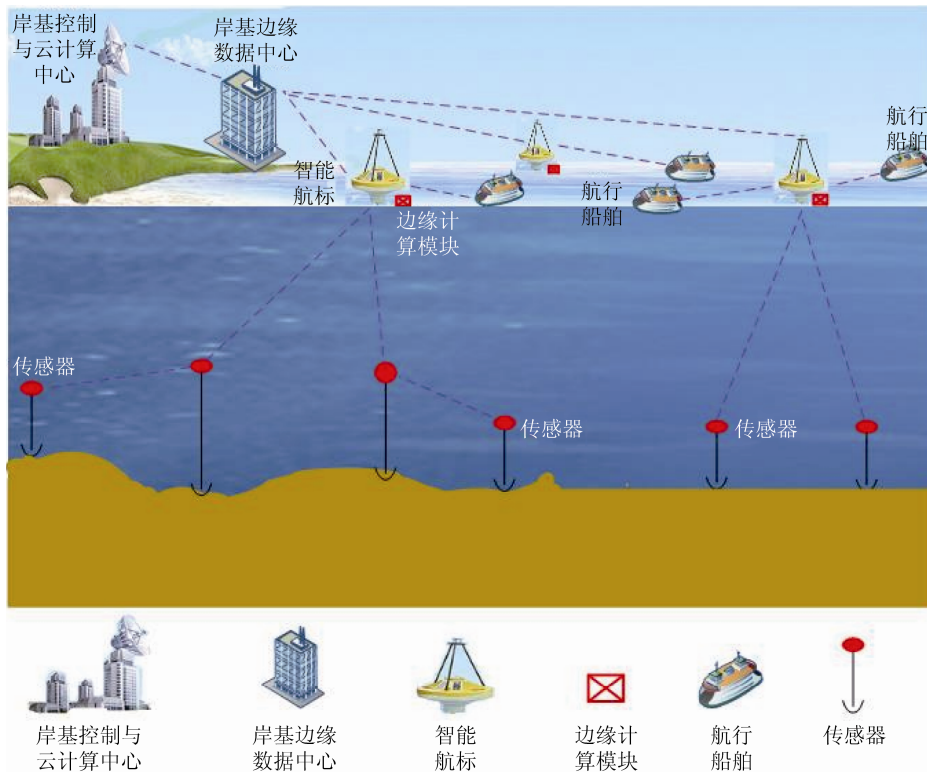


图 1 IOECN 架构  
Fig. 1 Architecture of IOECN

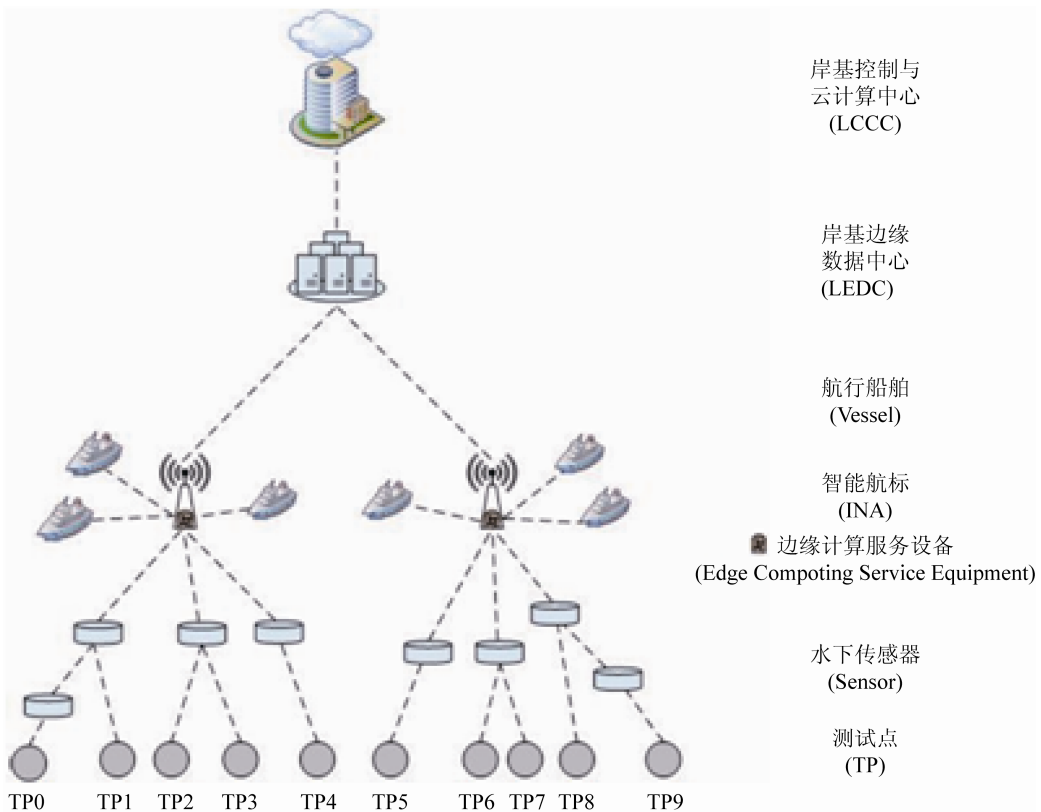


图 2 IOECN 树形拓扑结构  
Fig. 2 Tree topology architecture of IOECN

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

输入条件:

(1) 网络的树形拓扑结构由水下、水面和岸基节点组成。水下节点包含 TP 和传感器, 水面节点包含智能航标和航行船舶, 岸基节点包含控制与云计算中心和边缘数据中心;

(2) 给定航道区域内随机分布的 TP 地址、航行船舶地址和岸基控制与云计算中心的地址, 已知水下传感器、智能航标和岸基边缘数据中心的候选地址;

(3) 设定水下传感器的成本、智能航标成本和智能航标的单次维护成本;

(4) 设定水下传感器的感知距离、通信距离;

(5) 设定智能航标的覆盖范围、最大容量、维护次数;

(6) 设定从智能航标经过水下传感器到 TP 流的最大跳数值。

约束条件:

(1) 确定各层节点间的关系以保证网络满足树形拓扑结构;

(2) 各层网络节点间连通性满足需求;

(3) 各层网络节点的通信距离限制;

(4) 智能航标经过水下传感器到 TP 流的跳数限制;

(5) 航道内的航行船舶至少被智能航标一重覆盖;

(6) 海床上的 TP 至少被水下传感器一重覆盖;

(7) 智能航标的容量限制。

求解目标:

(1) 网络的部署总成本最小化, 包括智能航标设备成本、水下传感器成本及智能航标维护成本;

(2) 网络的布局优化方案, 包括从水下传感器、智能航标、岸基边缘数据中心的候选地址中选定水下传感器、智能航标及岸基边缘数据中心的位置, 选定各个节点之间的链路关系, 岸基边缘数据中心与智能航标之间的覆盖关系, 智能航标与航行船舶、水下传感器之间的覆盖关系, 水下传感器与

TP 之间的覆盖关系;

(3) 方案的求解时间。

## 2 数学建模

为了研究 IOECN 架构中各层节点的布局优化问题, 本文使用有向图  $G=(\Omega, E)$  表示。其中,  $\Omega$  表示所有节点的集合, 包含岸基控制与云计算中心集合  $\Omega_C$ 、岸基边缘计算中心集合  $\Omega_E$ 、智能航标集合  $\Omega_{INA}$ 、航行船舶集合  $\Omega_{vessel}$ 、水下传感器集合  $\Omega_{sensor}$ 、测试点集合  $\Omega_{TP}$ ,  $\Omega = \Omega_C \cup \Omega_E \cup \Omega_{INA} \cup \Omega_{vessel} \cup \Omega_{sensor} \cup \Omega_{TP}$ 。  $E$  表示网络中任意 2 个节点  $i$  和  $j$  之间边  $e_{ij}$  的集合, 即  $e_{ij} \in E$ 。

### 2.1 参量设定

对网络中所有参量设置如表 1 所示。

### 2.2 变量设定

对网络中所有节点与链路是否存在, 本文用二进制 0~1 变量表示, 变量设定如下:

(1) 岸基边缘数据中心、智能航标、水下传感器的位置矩阵分别为  $H=(h_r)_{1 \times r}$ ,  $A=(a_s)_{1 \times s}$ ,  $C=(c_m)_{1 \times m}$ , 并且将这 3 种不同的网元设备放置在不同的候选点位置  $PS_r$ 、 $PS_s$ 、 $PS_m$  上。

$$h_r = \begin{cases} 1, & \text{将LEDC放置在候选点}PS_r\text{上} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$a_s = \begin{cases} 1, & \text{将INA放置在候选点}PS_s\text{上} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$c_m = \begin{cases} 1, & \text{将SENSOR放置在候选点}PS_m\text{上} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

(2) 智能航标与航行船舶之间的关系矩阵为:

$$L=(l_{st})_{s \times t}$$

$$l_{st} = \begin{cases} 1, & \text{航行船舶}b_t\text{被智能航标}a_s\text{覆盖} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

(3) 水下传感器与测试点之间的关系矩阵为:

$$Z=(z_{mn})_{m \times n}$$

$$z_{mn} = \begin{cases} 1, & \text{测试点}d_n\text{被水下传感器}c_m\text{覆盖} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

(4) 路径选择矩阵为:

$$E = (e_{ij})_{ij}, \forall i \in \Omega_C \cup \Omega_E \cup \Omega_{INA} \cup \Omega_{vessel} \cup \Omega_{sensor}, \forall j \in \Omega_{TP} \cup \Omega_{vessel} \cup \Omega_{sensor} \cup \Omega_{INA}$$

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果选择的路径是从节点 } i \text{ 到节点 } j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

(5) 为了限制水下传感器的跳数并进行流向控制, 设置了流向控制矩阵  $F$ :

$$F = (f_{ij}^{sn})_{i \times j}, \forall i \in \Omega_{INA} \cup \Omega_{sensor}, \forall s \in \Omega_{INA}, \forall j \in \Omega_{TP} \cup \Omega_{sensor}, \forall n \in \Omega_{TP}$$

$$f_{ij}^{sn} = \begin{cases} 1, & \text{如果从 INA 到 TP 的流经路径 } e_{ij} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

表 1 参量设置  
Tab. 1 Parameters setting

参量	定义
$\Omega_C$	LCCC 的位置 $\Omega_C = \{PS_w   w=1\}$
$\Omega_E$	LEDC 的候选点位置集合 $\Omega_E = \{PS_r   r=0, 1 \dots R-1\}$
$R$	LEDC 的候选点数
$\Omega_{INA}$	INAs 的候选点位置集合 $\Omega_{INA} = \{PS_s   s=0, 1 \dots S-1\}$
$S$	INAs 的候选节点数
$\Omega_{vessel}$	所有 Vessels 的位置集合 $\Omega_{vessel} = \{PS_t   t=0, 1 \dots T-1\}$
$T$	Vessels 的节点数
$\Omega_{sensor}$	Sensors 的候选节点位置集合 $\Omega_{sensor} = \{PS_m   m=0, 1 \dots M-1\}$
$M$	Sensors 的候选节点数
$\Omega_{TP}$	所有的 TPs 位置集合 $\Omega_{TP} = \{PS_n   n=0, 1 \dots N-1\}$
$N$	TPs 的节点数
$LEDC_{com}$	LEDC 的通信距离
$INA_{cov}$	INAs 的覆盖范围
$SENSOR_{sen}$	Sensors 的感知距离
$SENSOR_{com}$	Sensors 的通信距离
$D$	曼哈顿距离矢量 $D=(d_{ij})$ , 其中 $d_{ij}$ 表示 LCCC, LEDC, INAs, Vessels, Sensors 和 TPs 点之间的距离
$H_{max}$	INA 经过 Sensor 到 TP 链路的最大跳数
$C^S$	部署同种类型 Sensor 设备的平均成本
$C^I$	部署 INA 设备的平均成本
$C^M$	INA 设备每次维护成本
$T$	INA 设备的维护次数
$Q$	INA 设备的负载容量

### 2.3 数学模型

本文将 LOP 转化为 ILP 问题进行求解, 其数学模型表示如下:

目标函数:

$$\text{Minimum } C = C^I \times \sum_{s \in \Omega_{INA}} a_s + C^S \times \sum_{m \in \Omega_{sensor}} c_m + C^M \times T \times \sum_{s \in \Omega_{INA}} a_s \quad (1)$$

式(1)表示此 IOECN 的布局优化目标是最小化网络的部署成本, 包括智能航标设备成本、水下传感器设备的成本以及智能航标的总维护成本。

约束条件如下:

$$\sum_{i \in \Omega_C} w_i = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \Omega_E} e_{ij} \geq w_i, \forall i \in \Omega_C \quad (3)$$

式(2)~(3)是对岸基控制与云计算中心进行约束。式(2)表示只存在一个岸基控制与云计算中心。式(3)表示岸基控制与云计算中心可以连接多个岸基边缘数据中心。

$$\sum_{j \in \Omega_C} e_{ij} = h_i, \forall i \in \Omega_E \quad (4)$$

$$\sum_{j \in \Omega_{INA}} e_{ij} \geq h_i, \forall i \in \Omega_E \quad (5)$$

式(4)~(5)是对岸基边缘数据中心进行约束。式(4)表示如果岸基边缘数据中心存在, 那么只存在一条到岸基控制与云计算中心的边。式(5)表示岸基边缘数据中心可以连接多个智能航标。

$$\sum_{j \in \Omega_{LEDC}} e_{ij} = a_i, \forall i \in \Omega_{INA} \quad (6)$$

$$\sum_{j \in \Omega_{sensor} \cup \Omega_{vessel}} e_{ij} \geq a_i, \forall i \in \Omega_{INA} \quad (7)$$

$$\sum_{j \in \Omega_{sensor} \cup \Omega_{vessel}} e_{ij} \leq Q, \forall i \in \Omega_{INA} \quad (8)$$

式(6)~(8)是对智能航标进行约束。式(6)表示如果智能航标存在, 则其只能有一条到岸基边缘数据中心的边。式(7)表示如果智能航标存在, 那么至少存在一条到水下传感器或航行船舶的边。式(8)表示智能航标连接的传感器和航行船舶不能超过其负载容量。

$$\sum_{j \in \Omega_{sensor} \cup \Omega_{INA}} e_{ij} = c_i, \forall i \in \Omega_{sensor}, i \neq j \quad (9)$$

$$\sum_{j \in \Omega_{sensor} \cup \Omega_{TP}} e_{ij} \geq c_i, \forall i \in \Omega_{sensor}, i \neq j \quad (10)$$

式(9)~(10)是对水下传感器进行约束。式(9)表示如果水下传感器存在, 那么其只能有一个父节

点水下传感器或智能航标。式(10)表示如果水下传感器存在,那么至少存在一条到水下传感器或 TP 的边。

$$\sum_{j \in \Omega_{INA}} e_{ij} = b_i, \forall i \in \Omega_{vessel} \quad (11)$$

$$\sum_{s \in \Omega_{INA}} l_{st} \geq 1, \forall t \in \Omega_{vessel} \quad (12)$$

式(11)~(12)是对航行船舶进行约束,表示如果航行船舶存在,则其只能有一个父节点智能航标且至少被一个智能航标覆盖。

$$\sum_{m \in \Omega_{sensor}} z_{mn} \geq 1, \forall n \in \Omega_{TP} \quad (13)$$

$$z_{mn} \leq c_n, \forall m \in \Omega_{sensor}, \forall n \in \Omega_{TP} \quad (14)$$

式(13)~(14)是对 TP 与水下传感器之间的关系矩阵进行约束,表示 TP 能够被水下传感器感知且至少被一个水下传感器覆盖。

$$e_{ij} \leq h_i, \forall i \in \Omega_E, \forall j \in \Omega_{INA} \quad (15)$$

$$e_{ij} \leq a_i, \forall i \in \Omega_{INA}, \forall j \in \Omega_{sensor} \cup \Omega_{vessel} \quad (16)$$

$$e_{ij} \leq c_i, \forall i \in \Omega_{sensor}, \forall j \in \Omega_{sensor}, i \neq j \quad (17)$$

$$e_{ij} d_{ij} \leq \text{SENSOR}_{com}, \forall i, j \in \Omega_{sensor}, i \neq j \quad (18)$$

$$e_{ij} d_{ij} \leq \text{SENSOR}_{sen}, \forall i \in \Omega_{sensor}, j \in \Omega_{TP} \quad (19)$$

$$e_{ij} d_{ij} \leq \text{SENSOR}_{com}, \forall i \in \Omega_{INA}, j \in \Omega_{sensor} \quad (20)$$

$$e_{ij} d_{ij} \leq \text{INA}_{cov}, \forall i \in \Omega_{INA}, j \in \Omega_{vessel} \quad (21)$$

$$e_{ij} d_{ij} \leq \text{LEDC}_{com}, \forall i \in \Omega_{INA}, j \in \Omega_{LEDC} \quad (22)$$

式(15)~(17)是对网络中各层节点的连通性进行约束并满足树形拓扑关系,确保信息能够顺利传输。式(18)~(22)是对网络中各层节点的距离进行约束。

$$f_{ij}^{sn} \leq e_{ij}, \forall i \in \Omega_{sensor}, \forall s \in \Omega_{INA}, \forall j \in \Omega_{sensor} \cup \Omega_{TP}, \forall n \in \Omega_{TP} \quad (23)$$

$$f_{sj}^{sn} \leq e_{sj}, \forall s \in \Omega_{INA}, \forall j \in \Omega_{sensor}, \forall n \in \Omega_{TP} \quad (24)$$

$$\sum_{s \in \Omega_{INA}} \sum_{j \in \Omega_{sensor}} f_{sj}^{sn} \geq a_s, \forall n \in \Omega_{TP} \quad (25)$$

$$\sum_{s \in \Omega_{INA}} \sum_{i \in \Omega_{sensor}} f_{ij}^{sn} = 1, \forall j \in \Omega_{TP}, \forall n \in \Omega_{TP} \quad (26)$$

$$f_{ij}^{sn} \leq a_s, \forall i \in \Omega_{sensor}, \forall j \in \Omega_{sensor} \cup \Omega_{TP}, \forall s \in \Omega_{INA}, \forall n \in \Omega_{TP} \quad (27)$$

$$f_{sj}^{sn} \leq a_s, \forall s \in \Omega_{INA}, \forall j \in \Omega_{sensor}, \forall n \in \Omega_{TP} \quad (28)$$

式(23)~(24)建立了边与链路流的连通性关系,表示从智能航标到 TP 的链路流连通,链路流

经过的边才能连通。式(25)~(28)建立了点与链路流之间的关系。式(25)表示只有智能航标存在,才可能存在由智能航标到 TP 的链路流。式(26)确保了每个 TP 存在于智能航标的输出流中。式(27)~(28)表示只有由智能航标到 TP 的链路流连通,才可能存在智能航标。

$$\sum_{i \in \Omega_{INA} \cup \Omega_{sensor}} \sum_{j \in \Omega_{TP} \cup \Omega_{sensor}} f_{ij}^{sn} \leq H_{max}, \quad \forall s \in \Omega_{INA}, \forall n \in \Omega_{TP} \quad (29)$$

$$\sum_{i \in \Omega_{INA} \cup \Omega_{sensor}} \sum_{j \in \Omega_{sensor}} f_{ij}^{sn} = \sum_{j \in \Omega_{sensor}} \sum_{i \in \Omega_{sensor} \cup \Omega_{TP}} f_{ji}^{sn}, \quad \forall s \in \Omega_{INA}, \forall n \in \Omega_{TP} \quad (30)$$

$$w_i, h_r, a_s, b_i, c_m, l_{st}, z_{mn}, e_{ij}, f_{ij}^{sn} \in \{0, 1\} \quad (31)$$

由于水下传感器能量有限,通过设置跳数来约束传感器能耗<sup>[10]</sup>。式(29)表示从智能航标经过水下传感器到 TP 的流中不能超过设置的最大跳数。式(30)表示如果水下传感器  $sensor_j$  存在于智能航标到 TP 的流中,则满足以水下传感器  $sensor_j$  为中心的输入流  $f_{ij}^{sn}$  等于输出流  $f_{ji}^{sn}$ , 满足流量守恒。式(31)限制网络中的节点、边、流为二进制变量。

### 3 仿真

本文使用 Gurobi 数学规划优化器对 ILP 模型进行求解,并运用 Matlab 对优化结果进行仿真展示。本文使用价格标准单位(general cost unit, gcu),求解目标是通过最小化网络节点个数来最小化网络部署成本。

#### 3.1 实验仿真参数设置

为了验证数学模型的正确性,本文首先在 5 km×300 m×20 m 的航道中部署小规模场景 1,在满足网络覆盖率、连通性及容量的前提下,得到网络最低部署成本的部署方案。网络仿真参数如表 2 所示。

图 3 所示为场景 1 预设点图,共有 7 个 TP、12 个 SENSOR 候选节点、10 艘 VESSEL、8 个 INA 候选节点、1 个 LEDC 和 1 个 LCCC。



表 2 仿真参数设置  
Tab. 2 Parameters setting for simulation

参数	取值
$C^S$	800
$C^I$	2 500
$C^M$	2 000
T	3
Q	6
$LEDC_{com}$	6 000 m
$INA_{cov}$	1 200 m
$SENSOR_{sen}$	400 m
$SENSOR_{com}$	900 m
$H_{max}$	3

### 3.2 仿真结果

通过 Gurobi 优化求解, 场景 1 最终部署图如图 4 所示, 可以看出: (1) 在场景 1 中, 为了覆盖 7 个 TP 和 10 艘 VESSEL, 最终选取了 4 个 SENSOR 和 3 个 INA 节点; (2) 网络连接链路表明 INA 连接 SENSOR 或 VESSEL 节点总数最多为 6, 满足网络设定的容量要求; (3) 每个 TP 和 VESSEL 均可通过选中的 INA 连通 LEDC 与 LCCC, 表明网络可以传递信息, 验证了模型的正确性。

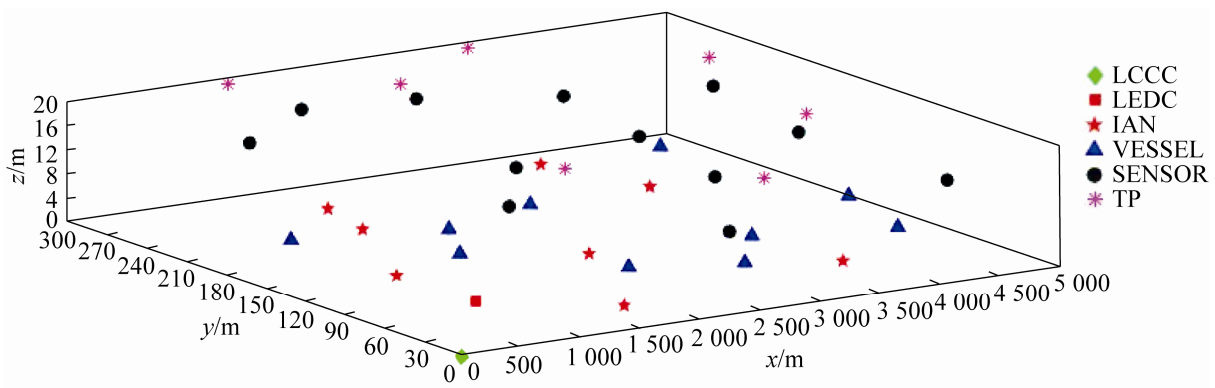


图 3 场景 1 预设点图  
Fig. 3 Preset point map of scenario 1

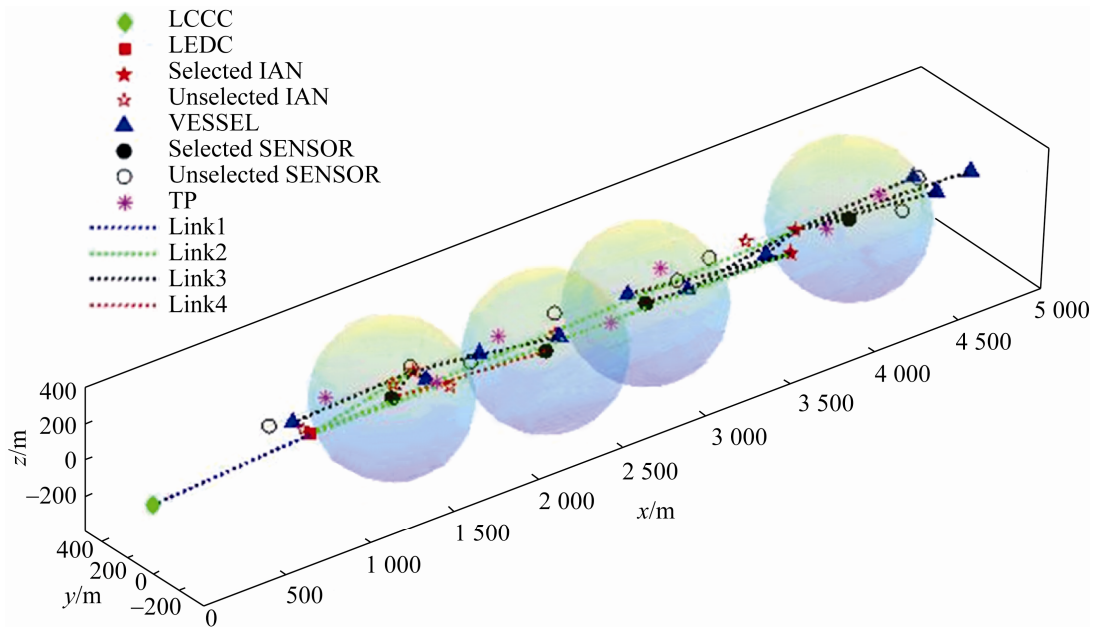


图 4 场景 1 最终部署图  
Fig. 4 Final deployment diagram of scenario 1

为了验证模型的可扩展性,继续在场景 2 中增加点数,同时设置场景 3 的规模为  $10\text{ km}\times 400\text{ m}\times 20\text{ m}$ ,在扩大场景规模的基础上增加点数。最终得到 3 种场景的对比结果如表 3 所示。

表 3 3 种场景对比结果  
Tab. 3 Comparison results of three scenarios

节点	场景 1	场景 2	场景 3
TP、VESSEL 数目	7、10	10、15	16、22
候选 LEDC、INA、 SENSOR 数目	1、8、12	2、12、18	3、18、30
所选 LEDC、INA、 SENSOR 数目	1、3、4	1、3、6	1、5、10
成本/gcu	28 700	30 300	50 500
求解时间/s	1.15	35.39	84.54

## 4 结论

本文针对 e-引航的实际需求,研究了 IOECN 部署优化问题,将网络成本作为优化目标,运用 Gurobi 求解及 Matlab 仿真进行结果展示。在网络覆盖率、连通性约束下,随着场景规模不断增大,所选中的网元节点的数量增大,相应的网络部署成本也逐渐增加。仿真结果通过预设点与所选点验证了模型的正确性,场景规模的扩大验证了模型的可扩展性。今后将设计高效智能算法解决大规模场景求解的低效问题。

## 参考文献:

- [1] 沈建华, 荆晓刚. e 引航概念发展及新技术应用[J]. 港口科技, 2019(12): 6-10.  
Shen Jianhua, Jing Xiaogang. The Concept Development and New Technology Application of e-Pilotage[J]. Port Science & Technology, 2019(12): 6-10.
- [2] 林天伟. AIS 技术在港口引航中的应用[J]. 珠江水运, 2019(23): 86-87.  
Lin Tianwei. Application of AIS Technology in Port Pilotage[J]. Pearl River Water Transport, 2019(23): 86-87.
- [3] 宋庭新, 王垒, 朱清波. 内河航道智能航标系统研究与设计[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(11): 99-101.  
Song Tingxin, Wang Lei, Zhu Qingbo. Research and Design of Intelligent Navigation Aid System for Inland Waterway[J]. China Water Transport, 2018, 18(11): 99-101.
- [4] 董勇. 运用 AIS 航标的综合水文气象系统[J]. 天津航海, 2015(3): 49-50.  
Dong Yong. Integrated Hydrometeorological System Using AIS Aids to Navigation[J]. Tianjin Navigation, 2015(3): 49-50.
- [5] 罗毅, 江蓓, 张红. 三峡航道多功能航标系统设计及应用[J]. 中国水运, 2014(6): 60-61.  
Luo Yi, Jiang Bei, Zhang Hong. Design and Application of Multifunctional Aids to Navigation System in the Three Gorges Waterway[J]. China Water Transport, 2014(6): 60-61.
- [6] 尉志青, 马昊, 张奇勋, 等. 感知-通信-计算融合的智能车联网挑战与趋势[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(1): 45-49.  
Wei Zhiqing, Ma Hao, Zhang Qixun, et al. Challenge and Trend of Sensing, Communication and Computing Integrated Intelligent Internet of Vehicles[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(1): 45-49.
- [7] 张聪, 樊小毅, 刘晓腾, 等. 边缘计算使能智慧电网[J]. 大数据, 2019, 5(2): 64-78.  
Zhang Cong, Fan Xiaoyi, Liu Xiaoteng, et al. Edge computing enabled smart grid[J]. Big Data Research, 2019, 5(2): 64-78.
- [8] 段建丽, 林彬, 王莹, 等. 海上无线宽带网络架构研究现状及相关技术展望[J]. 电讯技术, 2018, 58(8): 981-988.  
Duan Jianli, Lin Bin, Wang Ying, et al. Status of Maritime Wireless Broadband Network Architecture and Prospect for Related Technologies[J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(8): 981-988.
- [9] 丁春涛, 曹建农, 杨磊, 等. 边缘计算综述: 应用、现状及挑战[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(3): 2-7.  
Ding Chuntao, Cao Jiannong, Yang Lei, et al. Edge Computing: Applications, State-of-the-Art and Challenges[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(3): 2-7.
- [10] 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 Networks with High Reliability[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.