



研究与开发

基于NOMA的双无人船海上通信资源分配与功率优化

林炯勋¹, 黄俊锟², 廖生涛²

(1. 广西科技大学电子工程学院, 广西 柳州 545006;

2. 华南师范大学华南先进光电子研究院, 广东 广州 510631)

摘要: 针对海上作业区域通信资源匮乏的问题, 提出了一种基于非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 的双无人船海上辅助通信物联网系统模型。该模型通过联合优化用户通信调度与传输功率, 最大化系统吞吐量。仿真结果表明, 与正交多址接入 (OMA) 技术相比, 基于NOMA的双无人船物联网系统具有更高的吞吐量, 并通过部署具备低成本、按需配置特点的无人船, 为海上风电机组维修人员提供必要的通信保障。同时, 引入NOMA技术可提升频谱资源利用率, 有望突破海上频谱稀缺的瓶颈。

关键词: 物联网; 无人船; 非正交多址接入; 资源分配; 吞吐量最大化

中图分类号: TN914.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.DXKX250355

Resource allocation and power optimization for maritime communication of dual USV based on NOMA

Lin Jiongkun¹, Huang Junkun², Liao Shengtao²

1. School of Electronic Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China

2. South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Abstract: To address the issue of limited communication resources in maritime operation areas, a maritime-assisted Internet of things (IoT) system model based on non-orthogonal multiple access (NOMA) and supported by dual unmanned surface vehicles (USV) was proposed. In this model, the system throughput was maximized through the joint optimization of user communication scheduling and transmission power. Simulation results demonstrate that, compared with orthogonal multiple access (OMA) technology, the NOMA-based dual-USV IoT system achieves higher throughput, and necessary communication support for maintenance personnel on offshore wind turbines is provided through the deployment of USV characterized by low cost and on-demand configurability. Furthermore, the introduction of NOMA technology was intended to enhance spectrum resource utilization, and the bottleneck of scarce spectrum scarcity at sea was expected to be broken through.

Key words: IoT, USV, NOMA, resource allocation, throughput maximization

0 引言

海洋工程作为人类开发利用海洋资源的关键领域,其通信保障对于施工安全和作业效率具有决定性影响。随着我国海洋强国战略的深入实施,海上风电、海洋石油平台、深海养殖等海洋工程项目建设规模不断扩大,对实时、可靠的通信服务需求日益迫切。特别是在海上风电机组的运维作业中,技术人员需要实时与陆地指挥中心保持稳定的数据传输和语音通信,以确保设备状态监测、故障诊断和应急响应的及时性。然而,传统海上通信方式在应对当前海洋工程建设需求时,在传输速率、通信质量、通信功能等方面存在诸多局限性,特别是在复杂的海况条件下,施工人员可能面临严重的通信障碍^[1]。通信中断不仅影响作业效率,更可能诱发安全事故,给人员生命财产安全带来重大威胁。可以说,海上通信基础设施薄弱已成为制约当前海洋工程发展的核心技术瓶颈。海洋工程的特殊作业环境,对通信系统提出了高可靠性、强抗干扰性和广覆盖范围等严苛要求,传统通信手段已难以满足现代海洋工程的发展需要。一方面,通信节点数量相对有限,且分布极为分散,节点间通信距离往往非常遥远,在浩瀚海域中呈稀疏布局。海上风电场等工程项目通常位于距离海岸数十千米甚至上百千米的海域,远超出传统无线通信的有效覆盖范围。另一方面,海洋气象条件极端恶劣且变化多端,设备长期面临高湿度、高盐雾侵蚀以及剧烈温差变化。海浪、风暴等恶劣海况还会导致通信设备的物理损坏和信号传输的严重衰减,进一步加剧了海上通信的复杂性。受此影响,海上无线信道环境不稳定,电磁传播条件复杂,为构建高性能、高可靠性的海上无线通信系统带来重重困难^[2]。因此,迫切需要开发适应海洋环境特点的新型通信技术和系统架构,为海洋工程提供稳定、高效的通信保障。

物联网技术的快速发展为解决海上通信难题提供了新的技术路径。相比传统通信方式,物联网系统模型在提升通信可靠性、扩展覆盖范围方面展现出显著优势^[3]。然而,传统物联网系统主要依赖固定基站构建网络架构,这种模式难以适应海洋环境的特殊性。首先,海洋空间广阔且缺乏固定支撑点,传统基站的部署面临巨大技术和经济障碍;其次,海洋环境复杂多变,固定基站的维护成本高昂且通信质量难以保证。若基站位置部署不当,不仅会导致传感器设备的整体覆盖范围减小,还会进一步推高部署基站的整体成本^[4]。在这种情况下,利用无人机低成本、高机动、可按需部署的优势,将其作为空中基站辅助物联网,成为一种可行的解决方案。与依赖固定位置且受海洋复杂环境诸多限制的地面基站相比,无人机与物联网设备之间构建的信道通常可呈现为视距传输状态。这种视距信道能够显著减少信号传输过程中的遮挡、干扰与衰减,从而有效提升无人机辅助物联网的通信质量^[5-9]。

基于无人机的物联网系统模型需要在三维空域中进行复杂的路径规划与导航控制,不仅要应对气流扰动带来的不确定性,还要解决高度变化所致的信号传输衰减问题。这种多维度的挑战直接影响了系统模型的鲁棒性与可靠性。另外,无人机在垂直起降模式下的能量消耗显著,导致系统模型续航能力受限,且存在载重能力与飞行时间之间的相互制约关系。相比之下,无人船(unmanned surface vehicle, USV)具有灵活的机动性和部署能力,能够有效提升海上通信的覆盖范围和传输性能,其相对固定的工作高度也有利于信号的稳定传输。因此,基于无人船的物联网辅助通信系统模型在通信可靠性、系统持续性及环境适应性等多个维度上都展现出明显优势^[10-12]。

无人船通常采用传统正交多址接入(orthogo-



nal multiple access, OMA) 技术, 包括时分多址 (time division multiple access, TDMA)、频分多址 (frequency division multiple access, FDMA) 和正交频分多址 (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA), 通过为不同用户分配时频资源来实现多用户通信。然而, 此类技术虽然能够降低用户间干扰, 但其存在频谱利用率受限且资源分配灵活性不足的问题, 难以满足无人船在高密度、高动态场景下的通信需求。针对上述挑战, 非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 因其在功率域复用用户信号的特性, 展现出显著优势^[13]。与传统的正交多址技术相比, NOMA 能够在频谱效率和用户公平性方面实现显著提升。Luo 等^[14]研究了一种时延最小化的契约奖励机制, 结合 NOMA 和多接入边缘计算 (multi-access edge computing, MEC) 网络, 以实现无人船的效用最大化。姜微等^[13]在存在窃听设备的海域中, 基于 NOMA 对发射源无人船的任务卸载比率、传输功率、计算资源分配进行了联合优化。Qian 等^[15]在满足保密机制和延迟约束的前提下, 通过联合优化无人船上传数据的全局精度、局部精度、传输功率以及模型上传时长, 将完成数字孪生训练的总能耗降至最低。然而, 上述研究在关注资源分配与能耗优化的同时, 忽略了轨迹优化问题, 且缺乏对海上用户的通信支持, 也未能充分体现海洋场景的特殊性。

基于上述研究, 本文提出了一种基于 NOMA 的双无人船海上辅助通信物联网系统模型。该模型旨在通过联合优化用户通信调度与无人船传输功率, 在现有参数约束条件下实现通信资源的合理分配, 如每个时隙下的用户调度分配和每个时隙下的传输功率分配, 以最大化系统模型的吞吐量。仿真结果表明, 该方案能有效地提高海上物联网辅助通信系统的吞吐量。

1 系统模型和问题建模

1.1 系统模型

本文提出一种双无人船辅助海洋物联网通信系统, 该系统包括两艘无人船和海上风电机组用户两部分, 系统架构如图 1 所示。在该系统中, 共有 G 个海上风电机组均匀随机分布于特定海域内。考虑 NOMA 技术中用户节点的分组要求, 根据用户相对于无人船的距离, 设定每组存在远近两个用户节点。两艘搭载单天线的无人船作为基站节点, 分别占用互不重叠的频谱资源, 二者间不存在通信干扰。两艘无人船在该海域中巡航, 为海上风电机组中的两位用户提供通信服务支持。在 NOMA 中, 无人船采用叠加编码向用户发送不同功率水平的信号, 每个节点则利用连续干扰抵消 (successive interference cancellation, SIC) 技术对接收到的信号进行解调。基于 SIC 机制, 距离无人船较远的用户被分配更高的传输功率水平, 而位于无人船附近的用户可以通过 SIC 解码过程有效减轻来自高功率信号的干扰。无人船基于用户空间分布及信道状态信息动态调整发射功率, 以确保通信服务质量。据此, 两位用户可表示为 $K_{g,i}$, 其中, $g=\{1,2,\dots,G\}$, $i\in\{1,2\}$, 分别表示距离无人船较近的用户和较远的用户。

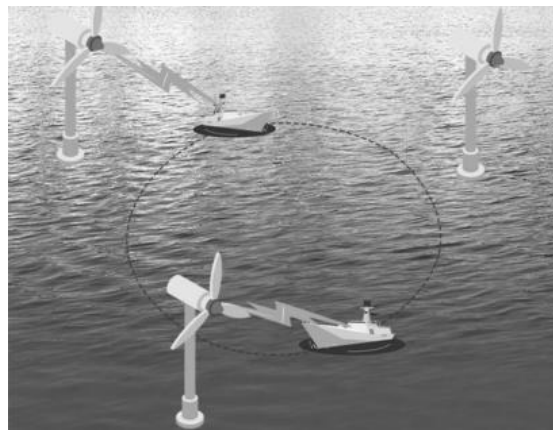


图1 系统架构

本文构建二维笛卡儿坐标系,用以描述海上风电机组用户的空间分布特性,并假设风电机组用户位于距离海平面 100 m 的空中,用户的空间位置可用向量表示为 $\mathbf{q}_i = (x_i, y_i, H)$ 。无人船在海平面执行遍历式巡航任务,将无人船的航行周期 T 量化为 N 个离散时间片段,每个时隙用 δ_t 表示。无人船位于海平面之上,两艘无人船的瞬时空间坐标表示为 $\mathbf{q}_m(t) = (x_m(t), y_m(t), 0)$, 其中 $t = \{1, 2, \dots, T\}$, $m \in \{1, 2\}$ 。因此,无人船与用户间的距离 $d_{m,g,i}$ 可表示为:

$$d_{m,g,i} = \sqrt{\|\mathbf{q}_{g,i} - \mathbf{q}_m\|^2 + H^2} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{q}_{g,i}$ 表示用户 i 在水平面(海平面)上的位置向量, $\mathbf{q}_m$ 表示用户 m 在水平面(海平面)上的位置向量, H 表示用户相对于海平面的垂直高度。

同时,根据不同用户距离无人船的距离信息,假设 $d_{m,g,1} \leq d_{m,g,2}$ 。

在海上环境中,当无人船与高空中的用户之间保持最优通信距离时,视距(line-of-sight, LoS)传播占主导地位,空-海界面信道可以近似为视距路径。因此,从无人船到各个海上用户的信道功率增益可以表示为:

$$|h_{m,g,i}|^2 = \beta_0 d_{m,g,i}^{-2} \quad (2)$$

其中, β_0 表示在参考距离 $d_0=1$ 处的信道功率增益系数。

根据用户距离的设定, $|h_{m,g,i}|^2$ 满足:

$$|h_{m,g,1}|^2 \geq |h_{m,g,2}|^2 \quad (3)$$

在 NOMA 中, SIC 机制为信道较弱的用户分配更高的传输功率,保证了不同距离用户的公平性。无人船分配给用户的传输功率定义为 $P_{m,g,i}$, 根据用户距离, $P_{m,g,i}$ 满足:

$$0 \leq P_{m,g,1} \leq P_{m,g,2} \quad (4)$$

$$P_{m,g,1} + P_{m,g,2} \leq P_{\max} \quad (5)$$

那么,用户 $K_{g,1}$ 和 $K_{g,2}$ 的信干噪比 (signal to

interference plus noise ratio, SINR) 可以分别表示为:

$$\text{SINR}_{m,g,1} = \frac{P_{m,g,1} |h_{m,g,1}|^2}{\sigma^2} \quad (6)$$

$$\text{SINR}_{m,g,2} = \frac{P_{m,g,2} |h_{m,g,2}|^2}{\sigma^2 + P_{m,g,1} |h_{m,g,2}|^2} \quad (7)$$

其中, σ^2 表示加性高斯白噪声。

因此,不同距离用户的可达速率可以表示为:

$$R_{m,g,1} = \log \left(1 + \frac{P_{m,g,1} |h_{m,g,1}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (8)$$

$$R_{m,g,2} = \log \left(1 + \frac{P_{m,g,2} |h_{m,g,2}|^2}{\sigma^2 + P_{m,g,1} |h_{m,g,2}|^2} \right) \quad (9)$$

因此,单一无人船在航行时间 T 内实现的系统总吞吐量的数学表达式和双无人船系统总吞吐量的数学表达式如下:

$$R_m = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I s_{m,g}(t) (R_{m,g,1}(t) + R_{m,g,2}(t)) \quad (10)$$

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 \quad (11)$$

其中, R_m 表示第 m 艘无人船在整个航行周期 T 内所能实现的系统总吞吐量, $s_{m,g}(t)$ 表示调度指示变量。

1.2 问题建模

本文提出的系统框架通过联合优化通信调度 $S = \{s_{m,i}(t), \forall i, t\}$ 和传输功率 $P = \{P_{m,i}(t), \forall i, t\}$, 实现系统吞吐量的最大化。其中,通信调度 $s_{m,i}(t)$ 表示两艘无人船在每个时隙下是否为用户提供通信服务的二进制变量,通常取值为 0 或 1。取值为 0 时,表示在该时隙下两艘无人船均没有对该用户提供通信服务;取值为 1 时,表示该用户在该时隙下被通信服务覆盖。对通信调度进行优化的目的在于确保两艘无人船在整个航行过程中都能够为每个用户节点提供通信服务。传输功率 $P_{m,i}(t)$ 表示无人船在为用户节点提供通信服务



时所使用的信号传输功率。对其进行优化的目的是, 在各项约束条件和模型参数的共同限制下, 最大化无人船对用户节点的通信服务质量。

优化问题可以表示为:

$$\max_{S, P} R_{\text{total}} \quad (12)$$

$$\text{s.t. } s_{m,g}(t) \in \{0, 1\}, \forall m, g, t \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^2 s_{m,g}(t) \leq 1, \forall g, t \quad (14)$$

$$\sum_{g=1}^G s_{m,g}(t) \leq 1, \forall m, t \quad (15)$$

$$P_{m,g,i}(t) \geq 0, \forall m, g, i, t \quad (16)$$

$$0 \leq p_{m,g}(t) \leq p_{\max}, \forall m, g, t \quad (17)$$

$$s_{m,g}(t) R_{m,g,i} \geq R_{\min}, \forall m, g, i, t \quad (18)$$

$$s_{m,g}(t) |h_{m,g,1}(t)|^2 \geq s_{m,g}(t) |h_{m,g,2}(t)|^2, \forall m, g, t \quad (19)$$

$$0 \leq P_{m,g,1}(t) \leq P_{m,g,2}(t), \forall m, g, t \quad (20)$$

在单个时隙内, 约束式 (13) 表示各用户仅存在被调度和不被调度两种状态; 约束式 (14) 表示用户在某一时隙下只能被一艘无人船调度; 约束式 (15) 规定无人船在某一时隙下只能为一组用户提供通信服务; 约束式 (16) 可确保对所有用户实现全覆盖的通信服务; 约束式 (17) 将分配至各用户的发射功率限制在最大阈值以下; 约束式 (18) 确保用户的吞吐量超过阈值; 约束式 (19) 和式 (20) 分别表示不同用户间的信道条件约束和传输功率约束。

2 问题转化与分解

目标函数及约束条件呈现非凸性, 导致上述优化问题难以直接求解。为此, 本文将原问题分解为通信资源调度优化子问题与传输功率优化子问题。在此基础上, 基于交替迭代优化理论, 提出一种迭代求解算法, 以实现对上述两个子问题的联合优化与求解。

2.1 通信资源调度优化

对于任意给定的传输功率 P , 优化问题可以分解为:

$$\max_S R_{\text{total}} \quad (21)$$

$$\text{s.t. } \sum_{m=1}^2 s_{m,g}(t) \leq 1, \forall g, t \quad (22)$$

$$\sum_{g=1}^G s_{m,g}(t) \leq 1, \forall m, t \quad (23)$$

$$s_{m,g}(t) \in \{0, 1\}, \forall m, g, t \quad (24)$$

约束是一个难以求解的离散整数规划问题, 因此将二元变量 $s_{m,g}(t)$ 扩展为连续变量, 其数学表达式可重新表示为:

$$0 \leq s_{m,g}(t) \leq 1, \forall m, g, t \quad (25)$$

因此, 优化问题可以进一步表示为:

$$\max_S R_{\text{total}} \quad (26)$$

$$\text{s.t. } \sum_{m=1}^2 s_{m,g}(t) \leq 1, \forall g, t \quad (27)$$

$$\sum_{g=1}^G s_{m,g}(t) \leq 1, \forall m, t \quad (28)$$

$$0 \leq s_{m,g}(t) \leq 1, \forall m, g, t \quad (29)$$

2.2 传输功率优化

第二个子问题包括在给定通信调度 S 的条件下, 优化无人船传输功率 P 。该优化问题可以表示为:

$$\max_P R_{\text{total}} \quad (30)$$

$$\text{s.t. } P_{m,g,i}(t) \geq 0, \forall m, g, i, t \quad (31)$$

$$0 \leq p_{m,g}(t) \leq p_{\max}, \forall m, g, t \quad (32)$$

$$s_{m,g}(t) R_{m,g,i} \geq R_{\min}, \forall m, g, i, t \quad (33)$$

$$0 \leq P_{m,g,1}(t) \leq P_{m,g,2}(t), \forall m, g, t \quad (34)$$

其中, 目标函数式 (30) 和约束条件式 (33) 呈现凸性。

因为存在系统总吞吐量在时间、用户及无人船维度的线性加和性, 所以式 (30) 可以表示为:

$$\left(\sum_{i=1}^T \sum_{g=1}^G s_{1,g}(t) (R_{1,g,1}(t) + R_{1,g,2}(t)) \right) + \left(\sum_{i=1}^T \sum_{g=1}^G s_{2,g}(t) (R_{2,g,1}(t) + R_{2,g,2}(t)) \right) \quad (35)$$

因此, 可以拆分成以下两个子问题。

$$\max_{P_1} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I s_{1,g}(t)(R_{1,g,1}(t) + R_{1,g,2}(t)) \quad (36)$$

$$\text{s.t. (31)~(34)} \quad (37)$$

$$\max_{P_2} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I s_{2,g}(t)(R_{2,g,1}(t) + R_{2,g,2}(t)) \quad (38)$$

$$\text{s.t. (31)~(34)} \quad (39)$$

其中, $P_1 = \{P_{1,i}(t), \forall i, t\}$ 和 $P_2 = \{P_{2,i}(t), \forall i, t\}$ 分别表示两艘无人船的发射功率分配情况。

本文引入泰勒展开来解决上述各子问题。首先, 式 (36) 和式 (37) 可拆分为:

$$\begin{aligned} R_{1,g,1} &= \sum_{t=1}^T \text{lb}(1 + \text{SINR}_{1,g,1}) \\ &= \sum_{t=1}^T \text{lb} \left(1 + \frac{P_{1,g,1}(t) |h_{1,g,1}(t)|^2}{\sigma^2} \right) \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} R_{1,g,2} &= \sum_{t=1}^T \text{lb}(1 + \text{SINR}_{1,g,2}) \\ &= \sum_{t=1}^T \text{lb} \left(1 + \frac{P_{1,g,2}(t) |h_{1,g,2}(t)|^2}{\sigma^2 + P_{1,g,1}(t) |h_{1,g,1}(t)|^2} \right) \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} R_{2,g,1} &= \sum_{t=1}^T \text{lb}(1 + \text{SINR}_{2,g,1}) \\ &= \sum_{t=1}^T \text{lb} \left(1 + \frac{P_{2,g,1}(t) |h_{2,g,1}(t)|^2}{\sigma^2} \right) \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} R_{2,g,2} &= \sum_{t=1}^T \text{lb}(1 + \text{SINR}_{2,g,2}) \\ &= \sum_{t=1}^T \text{lb} \left(1 + \frac{P_{2,g,2}(t) |h_{2,g,2}(t)|^2}{\sigma^2 + P_{2,g,1}(t) |h_{2,g,1}(t)|^2} \right) \end{aligned} \quad (43)$$

对式 (41) 和式 (43) 进行展开, 形式如下。

$$\begin{aligned} R_{1,g,2} &= R_{1,g,2}^a - R_{1,g,2}^b \\ &= \sum_{t=1}^T \text{lb}(|h_{1,g,2}(t)|^2 (P_{1,g,1}(t) + P_{1,g,2}(t)) + \sigma^2) \\ &= \sum_{t=1}^T \text{lb}(|h_{1,g,2}(t)|^2 P_{1,g,1}(t) + \sigma^2) \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} R_{2,g,2} &= R_{2,g,2}^a - R_{2,g,2}^b \\ &= \sum_{t=1}^T \text{lb}(|h_{2,g,2}(t)|^2 (P_{2,g,1}(t) + P_{2,g,2}(t)) + \sigma^2) \\ &= \sum_{t=1}^T \text{lb}(|h_{2,g,2}(t)|^2 P_{2,g,1}(t) + \sigma^2) \end{aligned} \quad (45)$$

其中, a 项表示包含目标信号功率、干扰信号功

率以及噪声功率在内的总信号强度对数项, β 项表示仅包含干扰信号功率与噪声功率的干扰对数项。

式 (44) 和式 (45) 均表现出非凸性质。对其进行一阶泰勒展开得到其全局上界 $R_{1,g,1}^{[\text{ub}]}$ 和 $R_{2,g,1}^{[\text{ub}]}$, 其表达式如下。

$$R_{1,g,1}^{[\text{ub}]} = A_{1,g,1}^r + B_{1,g,1}^r (P_{1,g,1} - P_{1,g,1}^r) \quad (46)$$

$$R_{2,g,1}^{[\text{ub}]} = A_{2,g,1}^r + B_{2,g,1}^r (P_{2,g,1} - P_{2,g,1}^r) \quad (47)$$

其中, P^r 表示在计算过程的第 r 次迭代中分配给用户的传输功率。 $A_{1,g,1}^r$ 、 $B_{1,g,1}^r$ 、 $A_{2,g,1}^r$ 、 $B_{2,g,1}^r$ 分别可以表示为:

$$A_{1,g,1}^r = \sum_{t=1}^T \text{lb} \left(1 + \frac{P_{1,g,1}(t) |h_{1,g,1}(t)|^2}{\sigma^2} \right) \quad (48)$$

$$B_{1,g,1}^r = \sum_{t=1}^T \frac{|h_{1,g,1}(t)|^2 \ln 2}{|h_{1,g,1}(t)|^2 P_{1,g,1}^r(t) + \sigma^2} \quad (49)$$

$$A_{2,g,1}^r = \sum_{t=1}^T \text{lb} \left(1 + \frac{P_{2,g,1}(t) |h_{2,g,1}(t)|^2}{\sigma^2} \right) \quad (50)$$

$$B_{2,g,1}^r = \sum_{t=1}^T \frac{|h_{2,g,1}(t)|^2 \ln 2}{|h_{2,g,1}(t)|^2 P_{2,g,1}^r(t) + \sigma^2} \quad (51)$$

由于 $R_{1,g,2}^b$ 和 $R_{2,g,2}^b$ 的存在, $R_{1,g,2}$ 和 $R_{2,g,2}$ 表现出非凸性质。因此, 对其进行一阶泰勒展开, 得到其全局上界 $R_{1,g,2}^{[\text{ub}]}$ 和 $R_{2,g,2}^{[\text{ub}]}$, 其表达式如下:

$$R_{1,g,2}^{[\text{ub}]} = A_{1,g,2}^r + B_{1,g,2}^r (P_{1,g,2} - P_{1,g,2}^r) \quad (52)$$

$$R_{2,g,2}^{[\text{ub}]} = A_{2,g,2}^r + B_{2,g,2}^r (P_{2,g,2} - P_{2,g,2}^r) \quad (53)$$

$A_{1,g,2}^r$ 、 $A_{2,g,2}^r$ 和 $B_{1,g,2}^r$ 、 $B_{2,g,2}^r$ 分别可以表示为:

$$A_{1,g,2}^r = \sum_{i=1}^T \text{lb}(\sigma^2 + P_{1,g,1}^r(t) |h_{1,g,2}(t)|^2) \quad (54)$$

$$B_{1,g,2}^r = \sum_{t=1}^T \frac{|h_{1,g,2}(t)|^2 \ln 2}{|h_{1,g,2}(t)|^2 P_{1,g,1}^r(t) + \sigma^2} \quad (55)$$

$$A_{2,g,2}^r = \sum_{i=1}^T \text{lb}(\sigma^2 + P_{2,g,1}^r(t) |h_{2,g,2}(t)|^2) \quad (56)$$



$$B_{2,g,2}^r = \sum_{t=1}^T \frac{|h_{2,g,2}(t)|^2 \ln 2}{|h_{2,g,2}(t)|^2 P_{2,g,1}^r(t) + \sigma^2} \quad (57)$$

因此，该优化问题可以表示为：

$$\max_P R_{\text{total}} \quad (58)$$

$$P_{g,i}(t) \geq 0, \forall g, i, t \quad (59)$$

$$0 \leq P_{m,g}(t) \leq P_{\max}, \forall m, g, t \quad (60)$$

$$s_{m,g}(t) R_{1,g,1}^{[\text{ub}]} \geq R_{\min}, \forall g, t \quad (61)$$

$$s_{m,g}(t) R_{2,g,1}^{[\text{ub}]} \geq R_{\min}, \forall g, t \quad (62)$$

$$s_{m,g}(t) (R_{1,g,2}^{\alpha} - R_{1,g,2}^{[\text{ub}]}) \geq R_{\min}, \forall g, t \quad (63)$$

$$s_{m,g}(t) (R_{2,g,2}^{\alpha} - R_{2,g,2}^{[\text{ub}]}) \geq R_{\min}, \forall g, t \quad (64)$$

$$0 \leq P_{m,g,1}(t) \leq P_{m,g,2}(t), \forall m, g, t \quad (65)$$

上述约束可采用 CVX 求解。

2.3 迭代优化算法设计

本文提出了一种交替迭代优化算法，通过与无人船相关的两个优化子问题进行交替迭代优化来求解原始问题 (11)，该算法的伪代码见算法1。

算法1：迭代优化算法

输入： 用户位置 $q_{g,i}$ ，无人船轨迹 $q_m(t)$ ，噪声功率 σ^2

输出： 优化后的无人船通信调度结果 S 、无人船发射功率结果 P

初始化： 最大迭代次数 $I_{\max}$ ，迭代指数 $I=1$ ，无人船通信调度参数 S' 、无人船发射功率参数 P'

Repeat：

固定无人船发射功率 P' ，求解式 (25) ~ 式 (29)，得到无人船通信调度参数 $S'+1$

固定无人船通信调度 S' ，求解式 (58) ~ 式 (64)，得到无人船发射功率参数 $P'+1$

更新迭代指数 $I=I+1$

Until $I > I_{\max}$ 或者目标值收敛

3 仿真结果与分析

在模拟环境中，无人船所服务的海洋区域设

置为一个满足 $\forall x, \forall y \in [-1\ 200, +1\ 200]$ 的正方形区域，无人船航行轨迹如图2所示。无人船航行于海平面上，被服务的3组用户分别位于高度为100 m的海上风电机组内，这3个海上风电机组两两之间的距离为1 000 m。信道功率增益为-30 dB，噪声功率为-80 dBm，时隙长度为0.5 s，无人船的最大发射功率为1 W，航行半径为550 m。

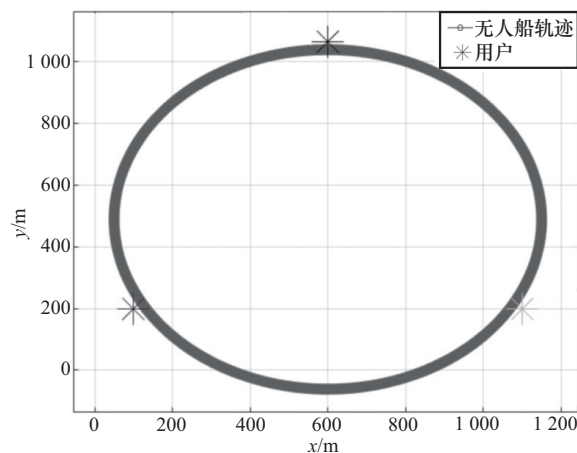


图2 无人船航行轨迹

实验对比了 NOMA-USV 模型和 OMA-USV 模型在不同发射功率下的系统吞吐量，对比结果如图3所示。其中，OMA 采用频分多址方案。从结果可知，NOMA-USV 模型比 OMA-USV 模型具有更高的系统吞吐量。

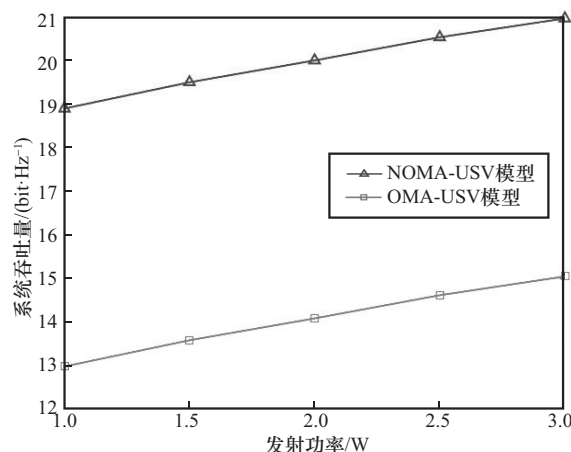


图3 两种模型在不同发射功率下的系统吞吐量

本文将圆形轨迹方案和固定位置方案进行对比, 其吞吐量如图4所示。从图4可以看出, 无人船在圆形轨迹方案下收敛后的吞吐量远大于固定位置方案的吞吐量。原因在于, 为无人船设定圆形航行轨迹, 使得每个时隙下无人船的位置都能更靠近用户, 从而获得更大的信道增益。此外, 不同功率设定下的吞吐量不同, 在两个方案中都呈现出吞吐量随功率增加而增大的趋势。这是由于信干噪比与功率呈正相关, 吞吐量与信干噪比同样呈正相关关系。

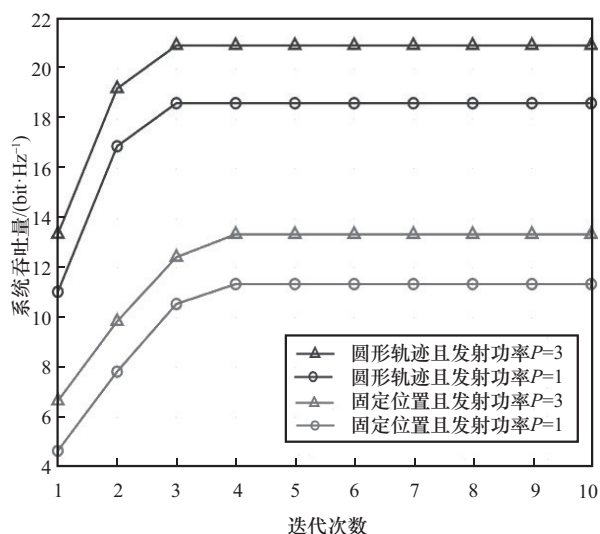


图4 不同优化方案的系统吞吐量

两艘无人船在全时隙下对3组用户的通信调度如图5所示。从图5可以看出, 每艘无人船在自己的运动周期中均与3个用户完成了通信, 并且与各个用户的通信时间较为平均。原因在于无人船匀速行驶在规定海域, 途径各个用户的时长接近, 因此与用户通信的时长也较为均衡。

无人船辅助通信系统的吞吐量随轨迹半径的变化情况如图6所示。从图6可以看出, 吞吐量随着无人船轨迹半径的增加而增加。原因在于, 更大的轨迹半径使得无人船在各个时隙下距离用户更近, 从而获得更大的吞吐量。

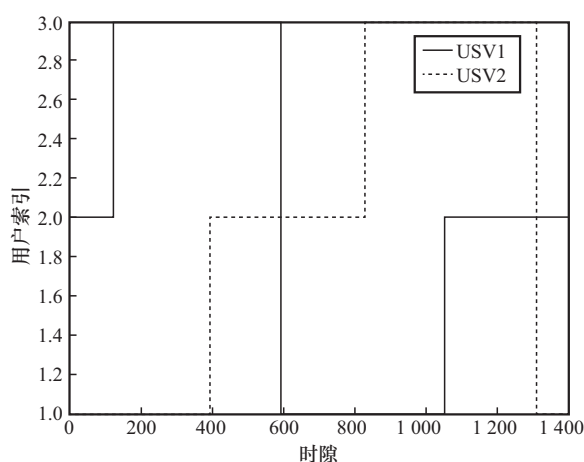


图5 无人船通信调度

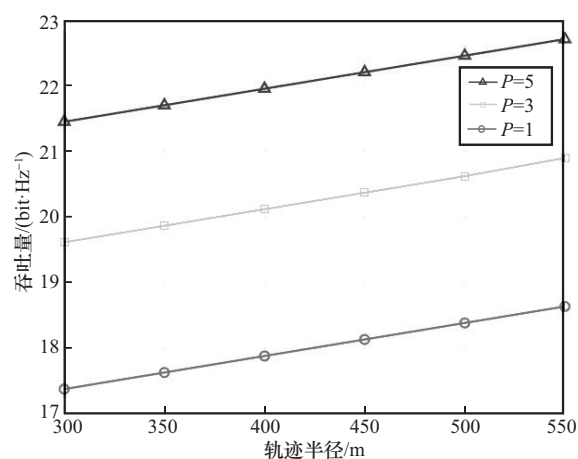


图6 吞吐量随轨迹半径的变化情况

每个NOMA用户组中远近用户的吞吐量如图7所示。从图7可以看出, 由于NOMA中式(8)、式(9)和约束式(19)的存在, 不同的信道条件使得同组内不同用户之间的吞吐量存在差异。具体而言, 近端用户离无人船更近, 信道条件更好, 信道增益相对较大。根据香农公式, 在噪声功率一定的情况下, 信道增益越大, 信号质量越好, 数据传输速率越高, 吞吐量也就越大。远端用户信道增益较小, 信号在传输过程中衰减严重, 接收信号质量较差, 这也限制了其吞吐量。与此同时, NOMA系统通常遵循“强者弱传、弱者强传”的功率分配原则, 即给信道增益较差的远端用户分配更高功率, 以保障其基本连接质量, 而信道增益较



好的近端用户则以较低功率传输。虽然远端用户分配的功率高,但由于其信道增益小,根据吞吐量计算公式,其吞吐量提升有限。近端用户虽分配功率低,但凭借良好的信道增益,能有效利用信号功率,反而能获得较高的吞吐量。

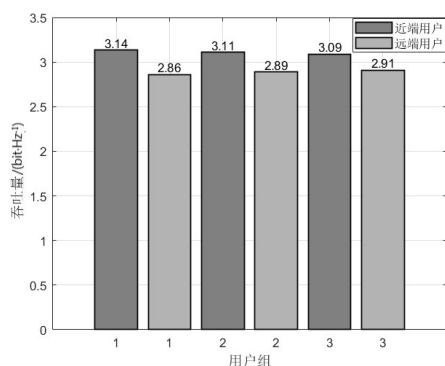


图7 每个NOMA用户组中远近用户的吞吐量

4 结束语

综上所述,本文提出了一种基于NOMA的双无人船辅助通信系统。其中,两艘无人船在规定的海洋区域内做圆周运动,并为位于海上风电机组的用户提供通信服务。通过建立非凸优化问题,旨在最大化物联网系统模型的吞吐量。本文将所构建的非凸优化问题分解为两个子问题,每个子问题都可以转化为凸优化问题,并提出了一种交替迭代优化算法对这两个子问题进行求解。通过仿真模拟,得出以下结论:(1)相比于OMA-USV系统模型,NOMA-USV系统模型能够获得更大的吞吐量;(2)设定无人船为圆形轨迹比将其固定于圆心位置能获得更大的吞吐量;(3)无人船的轨迹半径对系统吞吐量具有显著影响。

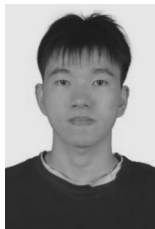
参考文献:

- [1] 杨华,张颖,王化民.海上数字通信新技术[J].中国水运,2014,14(4):84-85,88.
Yang H, Zhang Y, Wang H M. New technology of maritime digital communication[J]. China Water Transport, 2014, 14(4): 84-85, 88.
- [2] 张洪铭,闫实,唐斌,等.海上无线通信技术:现状与挑战[J].无线电通信技术,2021,47(4):392-401.
Zhang H M, Yan S, Tang B, et al. Maritime communications technologies: current progress and challenges[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(4): 392-401.
- [3] 赵涛.物联网的高可靠性和低延迟无线通信挑战、基本原理和实现技术[J].中国新通信,2021,23(17):33-34.
Zhao T. Challenges, basic principles and implementation technologies of high reliability and low delay wireless communication in Internet of Things[J]. China New Telecommunications, 2021, 23(17): 33-34.
- [4] Lin Z Y, Chang J Y, Jeng J T. An efficient intuitionistic fuzzy sets base stations deployment strategy in Internet of Things systems[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2023, 25(5): 1882-1894.
- [5] Liu X, Lai B J, Gou L F, et al. Joint resource optimization for UAV-enabled multichannel Internet of Things based on intelligent fog computing[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021, 8(4): 2814-2824.
- [6] Bushnaq O M, Chaaban A, Al-Naffouri T Y. The role of UAV-IoT networks in future wildfire detection[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(23): 16984-16999.
- [7] Feng W, Wang J C, Chen Y F, et al. UAV-aided MIMO communications for 5G Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 1731-1740.
- [8] Wang Z J, Liu R K, Liu Q R, et al. Energy-efficient data collection and device positioning in UAV-assisted IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(2): 1122-1139.
- [9] Gupta L, Jain R, Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1123-1152.
- [10] Zeng C, Wang J B, Ding C F, et al. Joint optimization of trajectory and communication resource allocation for unmanned surface vehicle enabled maritime wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(12): 8100-8115.
- [11] Zhang J L, Dai M H, Su Z. Task allocation with unmanned surface vehicles in smart Ocean IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(10): 9702-9713.
- [12] Yang Z, Ding Z G, Fan P Z, et al. A general power allocation scheme to guarantee quality of service in downlink and uplink NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7244-7257.
- [13] 姜微,袁寅,王倩,等.基于NOMA的海洋物联网安全计算卸载[J].物联网学报,2024,8(3):102-111.
Jiang W, Yuan X, Wang Q, et al. NOMA-based secure computation offloading in marine Internet of Things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2024, 8(3): 102-111.
- [14] Luo Z S, Dai M H, Wu Y, et al. NOMA-enabled delay minimization for marine multi-access edge computing networks: a contract incentive scheme[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 24th International Workshop on Signal Processing Advances in

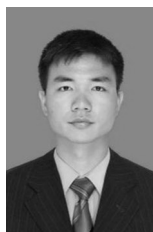
Wireless Communications (SPAWC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 131-135.

- [15] Qian L P, Li M Q, Dong X Y, et al. Energy minimization with secrecy provisioning in federated learning-assisted marine digital twin networks[C]//Proceedings of the ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.

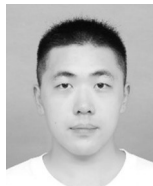
[作者简介]



林炯勋 (2001-), 男, 广西科技大学电子工程学院硕士生, 主要研究方向为无人机安全定位、自然语言处理和通信资源调度优化。



黄俊锐 (1997-), 男, 华南师范大学华南先进光电子研究院硕士生, 主要研究方向为无人机定位、无人机辅助通信、深度学习和通信资源优化。



廖生涛 (2001-), 男, 华南师范大学华南先进光电子研究院硕士生, 主要研究方向为视觉惯性导航系统、无人机自主定位、计算机体系结构原理。