

【引用格式】代君, 韩松, 赵海红, 等. 水声通信网络的资源分配发展综述[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 293-300.

# 水声通信网络的资源分配发展综述

代君, 韩松\*, 赵海红, 李鑫滨

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 随着陆地资源的枯竭, 人类逐渐把目光转向了蓝色海洋。水声通信网络 (Underwater Acoustic Communication Network, UACN) 能够有效实现水下信息交互, 是认识、开发、利用海洋的重要工具, 并在推动“智慧海洋”建设中发挥着重要作用。但是, 水下节点的发射功率、转发中继、通信信道等通信资源严重受限, 这将无法满足 UACN 长期且有效作业的需求。资源分配技术能够在不提升网络硬件成本的情况下有效改善网络能量效率、抗干扰性等相关性能, 在水下信息交互需求激增的背景下具有极高的研究意义与应用价值。因此, 如何对有限的网络资源进行合理分配已成为 UACN 领域的研究热点之一。首先对 UACN 系统进行了简要介绍, 然后研究分析了 UACN 资源分配技术及意义, 并重点指出了其资源分配的发展现状、趋势和面临的挑战。

**关键词** 海洋开发; 水声通信网络; 资源分配

**中图分类号** TN929.3      **文献标识码** A      **文章编号** 2096-5753(2022)04-0293-08

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.04.003

## Development Overview of Resource Allocation in Underwater Acoustic Communication Networks

DAI Jun, HAN Song\*, ZHAO Haihong, Li Xinbing

(College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract** As land resources have been depleted, the blue ocean has attracted extensive attention. Underwater acoustic communication network (UACN) can effectively achieve underwater information interaction. It is an important tool for understanding, developing and utilizing the ocean, and plays an important role in promoting the construction of smart ocean. However, the severe constraints of network communication resources (e.g., transmission energy, relay, communication channel) will lead to a failure to meet the long-term and effective operation requirements of UACN. Without increasing the cost of network hardware, the resource allocation technology can effectively improve network performances such as energy efficiency and anti-interference. It is of great research significance and application value under the background of rapidly increasing demand for underwater information interaction. Therefore, the proper resource allocation for limited network resource has gradually become a research hotspot in the field of UACN. In this paper, the UACN system was firstly introduced, and then the technology and significance of UACN resource allocation were discussed. Finally, the development status, trend and challenges of

---

收稿日期: 2022-06-14

作者简介: 代君 (1995-), 女, 本科, 主要从事水声通信网络资源分配方向的研究。

\*通信作者: 韩松 (1989-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水声通信网络研究、多水下机器人任务分配和路径规划研究。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目“基于对抗性 MAB 理论的异构多水下机器人系统分布式任务规划”(62003295); 国家自然科学基金“深远海低成本、长航时协同导航定位系统关键技术研究”(41976182); 国家自然科学基金“面向未知环境的多海洋机器人系统协同探测与协作控制方法研究”(61873224); 河北省自然科学基金面上项目“基于轻量化需求的水声协作通信网络在线联合资源优化(F2022203025)”。

UACN resource allocation were put forward.

**Key words** ocean exploitation; underwater acoustic communication network; resource allocation

## 0 引言

海洋覆盖地球表面积的 71%，不仅蕴藏了丰富的海底宝藏，储备了巨大的动力能源，还满足了人类生存所需的供给空间。因此，维护海洋权益、保证海上安全、开发海洋资源、发展蓝色经济成为 21 世纪海洋强国创新发展的共识<sup>[1]</sup>。我国一贯重视海洋事业发展，在十八大报告中首次提出了提高海洋资源开发能力，发展海洋经济，保护海洋生态环境，坚决维护国家海洋权益，建设“海洋强国”的战略；在十九大报告中又再次指出要坚持陆海统筹，加快建设海洋强国，把推进地方级“智慧海洋”建设作为实现我国海洋强国建设实施的长远战略抓手。

在未知、多变的海洋环境中，水声通信网络<sup>[2]</sup>（Underwater Acoustic Communication Network，UACN）能够有效地对水下环境信息进行监测、传输和处理，实现水陆一体化信息集成与融合，是人类认识、开发、利用海洋的重要工具。与相对成熟的水下有缆通信网络相比，UACN 不依赖于特定通信设施，具有自组织能力强、隐蔽性好、造价低、收发简单、操作灵活等优势，在海洋立体观测、海洋灾害预警、海洋固碳等领域得到了广泛应用<sup>[3-4]</sup>。随着“智慧海洋”建设的不断发展，水下信息交互需求日益激增，而水下节点的发射功率、转发中继、通信信道等通信资源严重受限，且不合理的资源分配结果将增强网络中各节点间的通信干扰和能量消耗，严重影响 UACN 在水下应用中的作业性能<sup>[5]</sup>。因此，针对复杂的 UACN，如何对受限的通信网络资源进行合理分配，在节能的同时对网络进行有效的干扰管理，提高网络数据传输可靠性，以支持相关水下智能应用数据的长期有效传输，逐渐成为了 UACN 领域的研究热点之一。

本文首先对 UACN 系统进行了简要介绍，然后从能效管理和干扰管理入手对 UACN 资源分配

技术进行了简要分类，并重点指出了其发展现状和面临的挑战，为我国 UACN 领域的研究提供了借鉴和参考。

## 1 UACN 系统简介

电磁波、光波、声波是无线通信网络中常见的 3 种通信方式。在未知、多变的海洋环境中，海水是水下无线通信设备进行数据传输时均会通过的特殊介质。然而，电磁波在水中衰减很快，即使在 30~300 Hz 的低频段内也只能穿透 100 m 左右的海水，且通信速率低。水下光通信具有低功耗、小型化、高速率等优点，存在波长为 450~570 nm 的蓝绿光窗口，其通信损耗比相邻频段低 3~4 个数量级，使 100 m 以内的水下高速光通信成为可能，但其仅对水下短距离通信具有较高的研究价值。水声通信具有带宽有限、时延长、能耗高、衰落强等固有特性，且受海洋环境和噪声的影响，水声信道往往伴随着多径效应，多普勒频移、频率色散及其状态强时变等现象。可以说，水声信道是自然界中最复杂、最严酷的无线信道之一<sup>[6]</sup>。但是，水声通信是目前唯一能在水下实现远距离信息传输的无线通信方式。因此，水声通信是大范围水下组网信息传输方式的主要方式。

UACN 系统在实现海洋认知“数字化”、“透明化”中起着重要作用，是人类更好地经略海洋的有利工具。该系统是采用覆盖空、天、岸、海及水下的综合性通信节点组成的动态异构复杂系统，可以对海洋应用数据信息进行有效感知、处理和传输，具有跨时空，跨介质的结构属性。同时，随着科学技术的发展，能量收割（Energy Harvesting，EH）技术<sup>[7]</sup>被提出应用于 UACN，即每个节点均配备了能量收割装置以有效解决网络能量供给问题。但是，由于该技术目前对硬件成本及技术要求较高，现阶段基于 EH 的 UACN 还未得到广泛应用，使得解决能量受限问题依然是 UACN 面临的主要挑战。UACN 系统模型如图 1 所示。

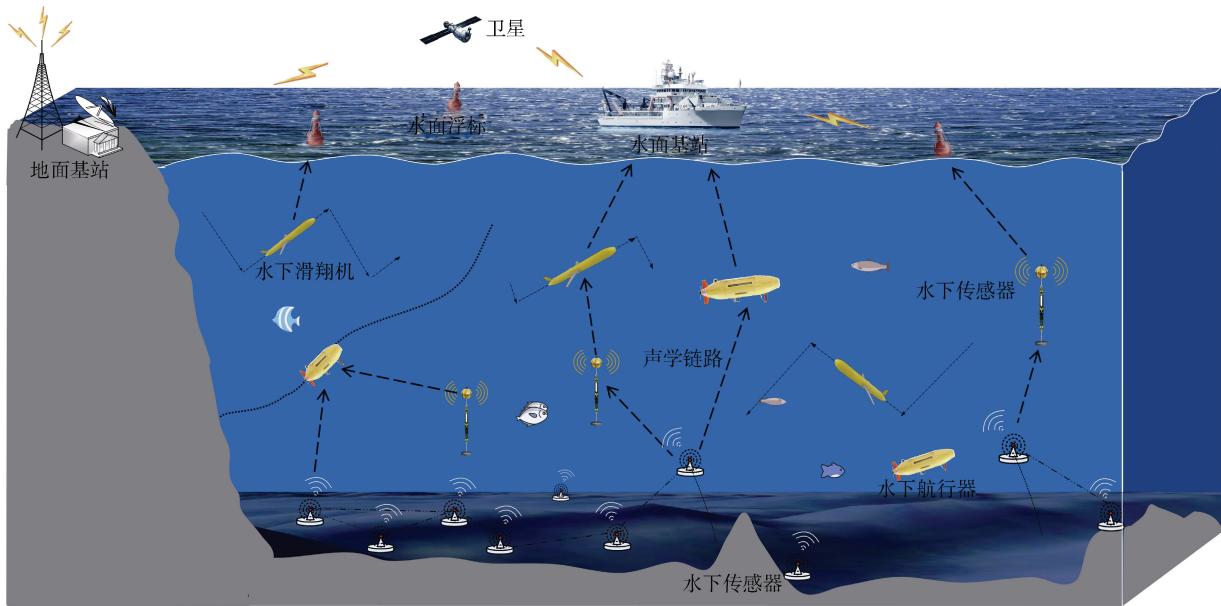


图 1 UACN 系统模型  
Fig. 1 Systems model of UACN

水声通信网络是一种针对水声传播特性的水下多跳自组织网络。以水面为分割面, 将 UACN 系统分为水面通信子系统和水下通信子系统。在水面通信子系统中, 基站、水面浮标等水面网关节点是水声与地面无线通信的枢纽, 通常以电磁波的方式与陆地上的基站或空中卫星进行通信, 从而对水下环境信息实现远程监测; 在水下通信子系统中, 水下滑翔机、水下航行器和水下传感器等具有传感、计算和声学通信能力的水下通信节点(水下用户)通过感知海洋环境对海洋数据进行监测、收集和处理, 并在相应信道下以一定的发射功率通过合适的转发中继将数据发送到水面网关节点进行进一步的分析和处理, 从而为系统网络层、应用层的相关操作提供真实准确的数据基础。

## 2 UACN 资源分配技术的分类

随着“海洋强国”战略的推进, 海洋已逐步跨入高速的多元化信息时代, 水下通信呈现出信息交互剧增、通信业务类型扩展和水下智能应用对通信质量要求越来越高的局面, 使得有限的功率、信道、中继等网络通信资源变得极为珍贵。面对现有通信局面及特殊的水声信道, 资源分配<sup>[8]</sup>可以在不提升

网络硬件成本要求下有效改善网络能量效率、抗干扰性等相关性能, 是最直接、最有效的通信网络能效管理和干扰管理手段。所谓资源分配是指通过对有限的 UACN 资源进行合理分配, 实现多资源相互协调使用, 从而有效提高资源利用率、降低通信干扰、降低网络能耗、最大化网络生命期, 在节能的同时满足用户的服务质量要求。因此, 合理的资源分配将在很大程度上改善网络系统性能。

本文从能效管理和干扰管理入手, 对现有的 UACN 的资源分配技术进行简要分类, 如图 2 所示。

图 2 根据资源在网络间的可调度性, 可以将现有的资源分配技术划分为固定资源分配技术、动态资源分配技术和两者结合的混合式资源分配技术。

### 1) 固定资源分配技术。

所谓固定资源分配技术是指在通信网络固定资源内, 为水下节点分配其中的一组通信资源。与陆地通信网络相比, UACN 资源严重受限, 若水下相同作业区域内部署了不同的 UACN, 各网络将根据所估计的业务负荷、拓扑结构获取相应的网络资源。同时, 为了降低不同网络间的通信干扰, 作业区内各网络间的通信资源在频域上是相互隔离的, 即只有相隔一定距离的网络才可以对相同信道等

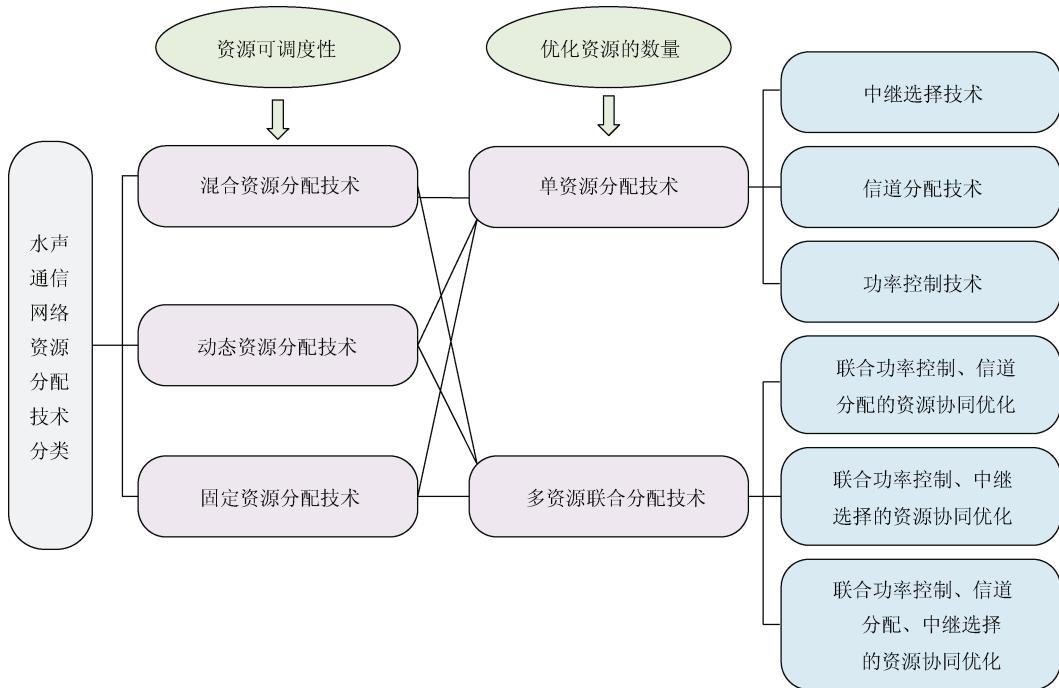


图 2 资源分配技术  
Fig. 2 Resource allocation technology

资源进行重利用。固定资源分配技术实现起来比较简单,也易对信道间的干扰进行管理。但该技术自适应能力差,无法适应海洋内波、湍流及鱼群活动等环境因素所引起的网络业务负荷、拓扑结构等网络状态的不确定性变化,以对 UACN 系统资源实现最优分配。例如,网络状态的不确定性变化容易导致各网络所获取信道数量的合理性极不稳定,过少的信道数量会加重网络节点间的通信干扰,而过多的信道数量会造成网络资源浪费。

### 2) 动态资源分配技术。

相对固定资源分配,其网络间的资源分配过程是动态的,即在通信网络的非固定资源内,为水下节点分配其中的一个通信资源。在水下作业系统中,系统不以固定分配的形式将通信资源分配给各个网络,而是通过调度器进行统一调度。但在网络资源严重受限且网络状态未知、时变的 UACN 应用环境中,对资源进行集中调度的难度较大。所谓调度是指通信中的时隙和频率资源,将由基站内的调度器,在规定的时间内分配给某个网络<sup>[9]</sup>。它将根据网络负荷情况,以及各水下通信节点的信道通信条件等诸多因素,为节点分配最佳的信道资源。

采用动态资源分配的系统,能够自适应系统业务负荷情况,灵活的为网络分配通信资源。另外,在多通信节点接入的情况下,该技术可以根据各个节点的业务服务等级及其信道通信条件来动态调整节点资源分配,以满足水下节点用户的服务质量 (Quality of Service, QoS) 需求,从而优化系统吞吐量和资源利用率。但是,提供高性能的集中式处理水下基站及配套计算服务的同时也提高了 UACN 的通信成本和难度。

### 3) 混合资源分配技术。

该资源分配是前 2 种分配技术的折中。它将系统资源分成固定和动态 2 部分资源。固定部分采用固定资源分配技术,被分配到作业区的各个网络。动态部分采用动态资源分配技术,由作业区内的各个网络共享。当固定信道资源分配完时,再根据网络负荷情况动态分配动态资源部分。混合资源分配技术更适合在“智慧海洋”建设中广泛应用,具有更广阔的应用前景,但依然面临着与前 2 种分配技术相同的挑战。

上述资源分配技术通过对 UACN 系统资源的合理分配,可以对水下相同作业区内不同网络间的

通信干扰进行有效管理, 在一定程度上改善了网络数据传输的可靠性。但是, 面对 UACN 应用环境的复杂性和时变性, 如果各网络自身未能对所获得的功率、信道、中继等资源进行合理分配, 那么节点间依然会遭受较强的通信干扰。因此, 合理地对各网络获得的通信资源在网络节点间进行再分配, 有利于进一步增强网络能效、干扰管理。根据各网络中优化资源的数量可以将资源分配技术划分为单资源分配技术和多资源联合分配技术<sup>[10]</sup>。在现有工作中, 单资源分配技术主要包含功率控制技术、信道分配技术和中继选择技术, 是指网络系统仅仅只关注功率、信道或中继等某一个资源的分配情况。而多资源联合分配技术表示系统以联合分配的方式对多个网络资源进行协同优化(如联合功率控制、信道分配的资源协同优化; 联合功率控制、中继选择的资源协同优化; 联合功率控制、信道分配、中继选择的资源协同优化等), 以有效降低节点能耗、减少节点间的通信干扰, 从而对网络能效和干扰进行有效管理。

### 1) 功率分配技术。

能量是保障网络系统正常作业的基本支撑, 但水下通信节点所有操作所需能量均由不可充电的电池提供, 且由于水下复杂的传播环境导致水声节点更换电池设备的难度大、成本高。在网络能量受限的情况下, 网络中的部分节点会随着网络运行而能量耗尽, 造成节点失能, 引发级联失效<sup>[11]</sup>, 从而破坏网络拓扑结构, 甚至导致网络断连、瘫痪等大面积故障, 使得整个网络通信终止。因此, 降低网络能耗、提高能量资源利用率, 构建通信可靠的拓扑结构往往是 UACN 进行资源分配所需满足的首要条件。功率控制技术<sup>[12]</sup>可以通过合理调整节点发射功率, 不仅能够降低网络能耗使其尽可能地长时间工作, 还可以在节能的同时可靠地传输数据。因此运用功率控制技术, 可以有效地降低网络能耗, 提高能量利用率。

### 2) 中继选择技术。

当 UACN 通过功率控制具有较为稳定的拓扑结构后, 由于水下传感器网络的多跳特性决定了某些节点会充当中继节点, 对其他节点的数据进行协

作传输, 同时这些中继节点可能还承担着数据采集任务, 故而具有较重的能量负担。在协作传输信息过程中, 如果发射节点没有选择合适的中继节点进行数据转发, 不仅会加速该中继节点失效, 还会增加节点数据发生冲突的概率。中继选择技术<sup>[13]</sup>是在网络通信节点有限的情况下, 考虑网络的系统吞吐量等性能指标和网络中节点间的干扰, 在满足某些约束条件情况下, 根据链路状况确定中继节点。该技术不仅能够均衡网络节点能量, 还可以通过增大分集增益提高网络的吞吐量。因此运用中继选择技术, 可以有效地降低节点数据发生冲突的概率, 提高网络吞吐量。

### 3) 信道分配技术。

在发射节点-中继节点物理转发链路上的数据传输依赖于节点的频谱资源, 即信道。然而, 随着 UACN 的广泛应用, 信道资源愈加短缺。如果在传输信息过程中, 并没有为节点分配合理的信道, 将造成节点间具有较高的干扰, 严重影响数据传输, 增大信息延迟, 使得数据具有一定的滞后性, 甚至造成大量的额外数据重传能耗、加速节点失效。由此可见, 信道分配不合理不仅可以破坏网络结构, 对于实时性要求较高的 UACN 上层应用而言, 严重影响了该应用所需基础数据的完整性与实时性。因此, 合理分配信道可以提高网络频谱资源利用率, 实现网络干扰管理以确保数据的成功传输<sup>[14]</sup>。

## 3 UACN 资源分配的发展现状、趋势及其面临的挑战

针对未知、时变 UACN 的资源分配问题, 现有研究多为单资源分配, 即使对多个资源进行联合分配也是确定一方决策后再确定另一方的决策, 忽略了各资源分配间存在的强耦合作用关系<sup>[15]</sup>。就节点功率控制与信道分配间的相互作用而言: 一方面, 信道分配受功率控制影响, 即水下节点的发射功率发生改变可能会导致其最优信道发生改变。如图 3 所示, 若增大节点 A 的发射功率, 其干扰范围将由  $r$  增大至  $R$ , 同时与节点 A 使用相同传输信道  $c_1$  的节点 B 也将增加来自节点 A 对其所产生的干

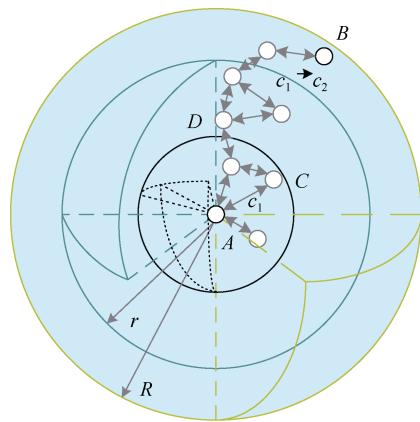


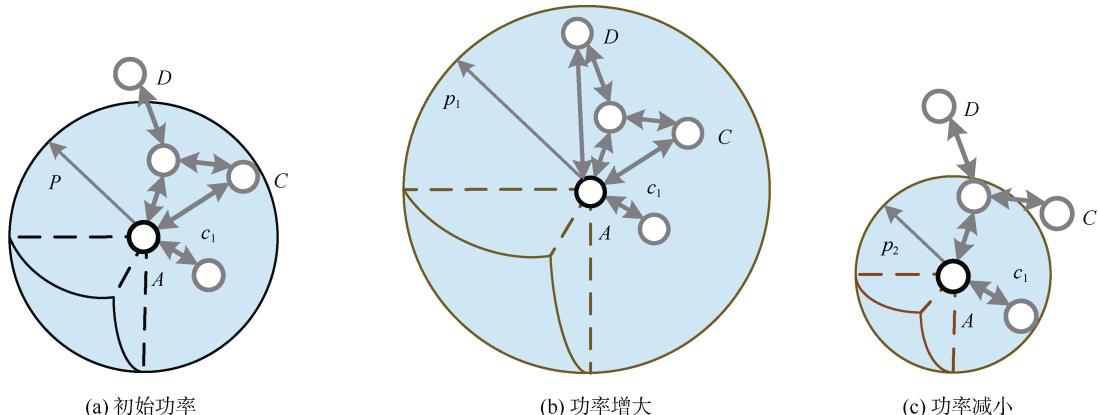
图 3 功率控制对信道分配的影响

Fig. 3 Impact of power control on channel allocation

扰。如果此时对于节点  $B$  而言, 其干扰最小的信道为  $c_2$ , 则该节点所分配的信道将由  $c_1$  调整为  $c_2$ 。

由此可见, 功率控制的结果将影响着信道分配结果。另一方面, 信道分配的结果也影响节点的发射功率。例如, 若图 4 (a) 中节点  $A$  与节点  $C$  之间不存在使二者成功通信的可用信道时, 此时

节点  $A$  的发射功率根据网络通信需求将有 2 种变化趋势。1) 节点  $A$  的发射功率由  $P$  增大为  $p_1$ , 在节点  $A$  与节点  $D$  之间形成可靠的通信链路, 从而保障数据具有成功接收的信道, 并改变网络拓扑结构如图 4 (b) 所示。2) 由于节点  $A$  与节点  $C$  之间无法通信, 造成二者的实质通信断连, 此时节点  $A$  的发射功率在保证网络连通的前提下可降低为  $p_2$ , 从而进一步降低节点能耗与干扰。由此可见, 信道分配的结果将影响节点功率的调整。在考虑网络通信资源间强耦合性的情况下, 尽管现有的基于机器学习的资源分配方案<sup>[15]</sup>能够有效地对抗时空变化的环境, 但其学习效率非常低, 尤其是在未知 CSI 的情况下针对连续资源分配(如功率分配)和离散资源分配(如信道分配)的协同优化的研究还十分缺少。因此, 考虑网络通信资源间的强耦合性, 以联合分配的方式对多资源进行协同优化, 是 UACN 领域研究的必然趋势, 且还有待深入研究。

图 4 信道分配对功率控制的影响  
Fig. 4 Impact of channel allocation on power control

同时, 在具有随机时-空变特性的海水介质中, 海水温度、盐度、深度、内波、鱼类活动等环境要素的时空变化会引起网络拓扑结构、信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 等网络状态呈现未知、不可控的时-空变特征<sup>[16]</sup>。这导致即使通过合理的资源分配使 UACN 具有较长的生命周期, 也无法确保水下节点所采集的数据能够成功传输至控制中心, 因此往往在节省网络能量实现 UACN

长期数据采集的同时还需要通过收包率 (Packet Reception Rate, PRR)、信干噪比 (Signal Interference Noise Ratio, SINR) 等指标保障数据通信质量, 即多个性能目标的同时优化逐渐成为资源分配的研究热点。在多个优化目标之间, 它们主要存在相互统一和相互对立 2 种情况。相互统一的情况是指优化变量对多个优化目标具有相同的变化趋势, 能够同时优化多个网络性能, 且容易求解;

相互对立的情况表示优化变量对多个优化目标具有不同的变化趋势, 即某些优化目标的提高将会造成另外优化目标的降低, 无法实现多目标的同时优化, 而需实现各目标间的均衡优化, 也就是多目标优化问题<sup>[17]</sup>。针对 UACN 资源分配下的多目标优化问题, 现有的传统解决办法是通过加权的方法将其转化为单目标优化问题, 但不管是通过仿真实验<sup>[18]</sup>, 还是通过数量级均衡<sup>[19]</sup>确定各目标权重, 都存在较大的人为干涉。另外, 即使现有的蚁群算法、粒子群算法、差分进化算法、灰狼优化算法能对陆地上的多目标优化问题进行有效求解, 但复杂度较高, 且多为仿真验证算法收敛性, 在理论上缺乏收敛性证明, 尤其是这些已有的算法还不能很好地在未知、时变的 UACN 中进行有效作业, 以及有效地解决节点间的资源竞争问题。因此, 高效可靠的多目标优化算法是 UACN 领域研究的重要方向, 且还有待深入研究。

另外, 随着水下应用的发展, 未来网络架构将逐渐走向异构化和密集化, 水下通信节点逐渐向高机动性发展, 进一步导致海洋数据多源异构且具有高维度、时空性、敏感性和多模态等特征。因此, 如何在缺乏先验统计 CSI 的情况下确认参与中继协作节点的安全性, 尤其当节点来自不同国家和地区时, 保障水下数据安全传输将一直是 UACN 中的一个重要研究方向, 但在 UACN 资源分配中鲜有涉及安全的研究<sup>[20]</sup>。大多数陆地网络安全系统依赖基于加密、解密方案和稳定的中央系统, 这些系统要求较高的网络容量和可靠网络连接支持。而在复杂的海洋环境中, 为 UACN 提供高性能的集中式处理水下基站及配套计算服务极为困难且代价巨大, 且未知、强时变的水下环境因素进一步地加剧了计算负荷。因此, 考虑安全性能指标的资源分配算法也是 UACN 领域研究的关键方向之一, 且还有待深入研究。

#### 4 结束语

本文首先从网络通信技术、网络构成 2 方面对 UACN 系统进行了简单介绍, 然后从资源可调度性和优化资源数量上介绍了资源分配技术, 并阐述了

功率控制技术、信道分配技术和中继选择技术对 UACN 资源分配的重要性。最后, 从海洋环境的复杂性、通信信道的特殊性及资源间的耦合性、数据传输的安全性方面, 提出了当前 UACN 资源分配研究中存在的不足及其面临的挑战。在未来 UACN 资源分配研究, 设计分布式、低复杂度、高经济效益、强自适应能力的轻量化多目标收敛优化算法, 以适应海洋环境的动态变化, 进而有效降低网络通信能耗与干扰、保证数据通信质量, 对推动 UACN 领域的能效管理、干扰管理及其应用普及推广具有重要的理论价值与实际意义。

#### 参考文献

- [1] 李加林, 沈满洪, 马仁锋, 等. 海洋生态文明建设背景下的海洋资源经济与海洋战略[J]. 自然资源学报, 2022, 37(4): 829-849.
- [2] ABDI A, GUO H H. A new compact multichannel receiver for underwater wireless communication networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3326-3329.
- [3] 吴立新, 陈朝晖, 林霄沛, 等. “透明海洋”立体观测网构建[J]. 科学通报, 2020, 65(25): 2654-2661.
- [4] WANG K, GAO H, XU X L, et al. An energy-efficient reliable data transmission scheme for complex environmental monitoring in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 16(11): 4051-4062.
- [5] ALI M F, JAYAKODY D N, CHURSIN Y A, et al. Recent advances and future directions on underwater wireless communications[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2020, 27(5): 1379-1412.
- [6] 徐文, 鄢社锋, 季飞, 等. 海洋信息获取、传输、处理及融合前沿研究评述[J]. 中国科学(信息科学), 2016, 46(8): 1053-1085.
- [7] ERDEM H E, YILDIZ H L, GUNGOR V C. On the lifetime of compressive sensing based energy harvesting in underwater sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(12): 4680-4687.
- [8] QIU T, ZHAO Z, ZHANG T, et al. Underwater Internet of Things in smart ocean: system architecture and open issues[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(7): 4297-4307.
- [9] DIAMANT R, CASARI P, CAMPAGNARO F, et al.

- Leveraging the near-far effect for improved spatial-reuse scheduling in underwater acoustic networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 16 ( 3 ): 1480-1493.
- [10] XING F Y, YIN H X, SHEN Z W, et al. Joint relay assignment and power allocation for multiuser multirelay networks over underwater wireless optical channels[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7 ( 10 ): 9688-9701.
- [11] FU X W, YAO H Q, YANG Y S. Modeling and optimizing the cascading robustness of multisink wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2021, 70 ( 1 ): 121-133.
- [12] WANG R N, YADAV A, MAKLED E A, et al. Optimal power allocation for full-duplex underwater relay networks with energy harvesting: a reinforcement learning approach[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 9 ( 2 ): 223-227.
- [13] ZHAO H H, LI X B, HAN S, et al. Adaptive relay selection strategy in underwater acoustic cooperative networks: a hierarchical adversarial bandit learning approach[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2021, 1 ( 3 ): 1-12.
- [14] POTTIER A, SOCHELEAU F X, LAOT C. Robust noncooperative spectrum sharing game in underwater acoustic interference channels[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, 42 ( 4 ): 1019-1034.
- [15] HAN S, LI X B, YAN L, et al. Joint resource allocation in underwater acoustic communication networks: a game-based hierarchical adversarial multiplayer multiarmed bandit algorithm[J]. *Information Sciences*, 2018, 454: 382-400.
- [16] LIN C, HAN G J, GUIZANI M, et al. A scheme for delay-sensitive spatiotemporal routing in SDN-enabled underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68 ( 9 ): 9280-9292.
- [17] WU L H, WANG Y N, YUAN X F, et al. Multiobjective optimization of HEV fuel economy and emissions using the self-adaptive differential evolution algorithm[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60 ( 6 ): 2458-2470.
- [18] CHEN B, YAO N, LIU W J, et al. Distributed topology control algorithm based on load balancing evaluation model in wireless sensor networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 109 ( 4 ): 2607-2625.
- [19] 郝晓辰, 姚宁, 解力霞, 等. 联合功率与信道的 WSN 生命期优化博弈算法[J]. 通信学报, 2019, 40 ( 4 ): 62-70.
- [20] LI X B, ZHOU Y, YAN L, et al. Optimal node selection for hybrid attack in underwater acoustic sensor networks: a virtual expert-guided bandit algorithm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 20 ( 3 ): 1679-1687.

(责任编辑: 张曼莉)