

【引用格式】李从改, 刘锋, 徐浣砾, 等. 智能水下应急通信一体化探讨[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 285-292.

智能水下应急通信一体化探讨

李从改, 刘锋*, 徐浣砾, 姜胜明
(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

摘要 目前海洋应急通信主要关注海面部分, 较少涉及水下部分, 不能满足水下应急需求。为此, 对水下应急通信进行探讨。首先, 分析了可能的多种应用场景, 讨论了基本的需求和性能指标。其次, 从网络拓扑、工作机制和节点类型几方面探讨了系统的体系结构。然后, 对关键技术进行了阐述, 包括: 节点多模通信及功能一体化、网络快速机动部署、网络模式快速切换、水上水下联合一体化等。最后, 介绍了智能化可以采用的机器学习和元学习方法, 探讨了水下应急通信智能化的思路。

关键词 智能; 水下; 应急通信; 一体化

中图分类号 TN929.3 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2022)04-0285-08
DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.04.002

Discussion on Integration of Intelligent Underwater Emergency Communication

LI Conggai, LIU Feng*, XU Wanping, JIANG Shengming
(College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract At present, the marine emergency communication mainly focuses on the surface part and rarely involves the underwater part, which cannot meet the requirements of underwater emergency. Therefore, the underwater emergency communication is discussed in this paper. First, a variety of possible application scenarios are analyzed, and the basic requirements and performance measurements are discussed. Secondly, the system architecture is discussed from the aspects of network topology, working mechanism and node types. Then, the key technologies are described, including multi-mode communication and functional integration of nodes, rapid mobile deployment of network, rapid switching of network modes, and joint integration of underwater and water surface, etc. Finally, the machine learning and meta-learning methods that can be used in intelligence are introduced, and the ideas of intelligent underwater emergency communication are discussed.

Key words intelligent; underwater; emergency communication; integration

0 引言

海洋应急通信是指在海洋环境中出现紧急情况时的通信, 是通信的一种特殊类型。紧急情况包括但不限于: 自然灾害(例如台风、地震、海啸)

出现时的告警与救援、事故(例如舰艇碰撞、飞机失事)发生后的搜救, 及常规通信基础设施出现故障时的应急通信等。海洋应急通信能够支撑紧急情况下的应急管理, 保障人类生命与财产安全, 是实现海洋强国战略和海上丝绸之路的重要技术手段。

收稿日期: 2022-06-14

作者简介: 李从改(1979-), 女, 博士, 讲师, 主要从事无线通信研究。

*通信作者: 刘锋(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事无线通信研究。

基金项目: 上海市教育委员会科研创新计划自然科学重大项目“基于海洋互联网的一体化海上应急战备通信系统关键技术研究”(2021-01-07-00-10-E00121)。

由于人类活动主要集中于陆地,陆上应急通信技术获得了较多研究与应用,海洋应急通信技术相对较少。早在1975年就出现了海底防喷器应急通信声学系统^[1],以支持石油的安全开采;近来又出现了基于水声的应急通信技术^[2],但都基于单一通信方式。最近,面向6G的空天地^[3-4]一体化框架,出现了基于空天地海一体化^[5]的海上应急通信网络^[6],可以为海事活动提供重要的信息技术保障。由于空天地海框架主要集中于水面及以上场景,又出现了空天地水^[7]或空天地海潜等一体化概念,增加了对水下场景的考虑。因为紧急情况所涉及的空间范围往往由水面延伸至水下,故需要对水下应急通信的一体化展开研究。但这方面还没有出现相关文献资料。

海洋互联网^[8]是陆地互联网在海洋环境中的延伸,覆盖水下、水面和空中,其思想是综合利用一切可用通信资源,进行实时动态组网,并根据需要及时调整组网方法以满足应用需求。后来,海洋物联网^[9]的概念被提出,进一步增加了感知功能。海洋互联网能成为空天地海潜一体化系统和海洋物联网的实现平台,可以作为海洋应急通信的基础网络。同时,海洋物联网可以提供海洋应急通信所需的感知功能。

本文针对海洋应急通信一体化的水下部分展开研究,基于海洋互联网和海洋物联网,进行场景和需求分析,介绍其中关键技术,并对其智能化进行了阐述。可以为水下应急通信系统的建设与运行提供参考,补全海洋应急通信一体化水下部分的版图。

1 场景分析

1.1 场景与需求

顾名思义,水下应急通信是指水下区域发生紧急情况下使用的通信技术和网络。此时,一般存在一个水上或水下指挥中心,在了解现场情况后下发相关指令,并根据最新情况进行决策;同时在水下区域存在多个通信节点,协同感知现场情况并把相关数据发给指挥中心,同时协同完成指挥中心下发的相关任务。为简单起见,我们称指挥中心到现场

节点之间的通信为下行,节点到中心之间的通信为上行,现场节点之间的通信为并行。根据业务情况,下行数据量一般不大,上行数据量往往较大,故存在显著的上下行不对称。

根据紧急情况发生地点,可以分为2种场景:近海、远海。前者离陆地较近,可用的通信技术和系统较多,包括:岸基通信基础设施、海底观测网、水下传感网、水下自组网等,可以综合使用有线、无线电磁波、水下声/光/磁等通信方式;后者远离陆地,可用的通信技术和系统较少,包括舰艇间通信网、水下自组网等,主要采用水声/光等无线通信方式。此外,水上部分的通信资源也应该能够提供一定的支持,例如卫星、飞机、热气球、无人机等,特别是水面节点(例如船舶、浮标等)将是重要的网关,可以提供水下与水上通信之间的转换^[10]。在一些情况下,空中节点可以和水下节点直接进行跨介质通信^[11]。这2种场景中,近海应急通信是重点,因为目前人类水下活动仍然主要集中于这个区域。

根据发生紧急情况的空间范围,可以分为小范围与大范围2种场景。对于小范围的情况,一般可以使用较少的通信资源即可完成相关任务;对于大范围的情况,往往需要调用较多的通信资源,建立多个现场指挥中心及总指挥中心,进行统一指挥调度并通过协作才能完成相关任务。

根据目标位置是否确定,还可以分为位置已知与位置未知两种场景。如果位置已知,即便是大范围,也可以直接开展相关任务;如果位置未知,还必须先确定目标位置,才能进行下一步的处理。例如水下搜救时,如果目标位置不确定,必须先找到目标,这将导致搜索范围扩大、搜索时间延长等问题,可能会影响到最终搜救效果。在寻找目标时,往往需要一边定位一边对目标进行识别,可以考虑水下通信+定位+识别一体化技术^[12]。一旦发现目标,还需要通过定位和导航功能赶赴现场,这就对通信+定位+导航一体化^[13-14]提出了需求。

此外,如果事故的位置范围已知,但不清楚具体情况,那么往往需要首先了解现场情况,才能进一步布置后续相关任务。这就需要网络或节点具有

现场感知能力,可以通过海底观测网或水下传感网获得空间状态信息,也可通过水下探测+通信一体化^[15]技术来实现。如果需要,还可以进一步设计具有水下探测+通信+控制一体化^[16]的节点来进行后续控制任务。

1.2 性能指标

对于水下应急通信而言,其总体要求是:快速、可靠、安全地完成任务相关的指令下发、现场情况上报,协同感知现场,辅助控制现场并完成相关任务。

对于水下应急通信的具体评价,可以基于以下性能指标。

首先,有效性方面主要是数据传输速率和网络时延,特别是上行链路要提供足够高的容量,例如支持语音、图片、乃至视频传输,以便指挥中心掌握足够详尽的信息。

其次,可靠性方面主要是误码率,特别是下行链路应该提供高可靠性,以确保指挥中心的指令正确地传递到现场节点。

最后,安全性方面的指标较多,包括完整性、可用性、机密性、可控性、抗抵赖性等。水下应急通信主要涉及前3项。

对于上述指标,不同的应用场景有不同的优先级,可以根据需要进行具体设定。例如民用情况下主要考虑有效性和可靠性,可靠性优先;军用则必须优先考虑安全性,然后是可靠性,最后才是有效性。但在整体上,应该保证一定的有效性,特别是网络时延要足够低,这样才能有充分的时间来完成应急任务。

2 体系结构

2.1 网络拓扑

水下应急通信应该通过水上节点与海上应急通信相融合,构成完整的海洋应急通信系统,并接入空天地海一体化体系。下面仅针对水下应急通信系统的网络拓扑进行讨论。

如果应急处理范围内刚好被海底观测网所覆盖,那么可以直接利用现有基础设施完成相关通信任务,此时指挥中心可以不用部署在海面上,通过

陆上通信即可完成指挥调度。如果指挥中心刚好在海面上,那么可以通过卫星、岸基、舰船等无线通信方式与观测网数据中心相连。下面考虑指挥中心在水域中,且必须通过水下方式与水下节点通信的情况。图1给出了水下应急通信示意图。指挥中心可以同时通过各种通信方式与不同实体进行信息交互,包括:与水下节点通过水下通信链路,与其他水面节点水面通信链路。此外,指挥中心还可以通过空天通信链路与卫星、飞机等进行通信,形成水上+水下联合一体化体系。

如果是小范围内的浅海应急通信,最简单的是采用星型拓扑,所有水下节点均直接单跳与指挥中心进行通信,此时甚至采用有线方式也是可能的。如果水下节点之间还需要相互通信,那么可以采用自组网的方式进行无线联通。如果是深海情况,超过单跳通信能力,则需构建多跳网络。

如果涉及范围较大,需要较多水下节点,可以采用水下传感网的方式来构建,将水下信息汇聚至指挥中心。当涉及范围超出一定程度时,仅使用水下节点往往难以胜任,此时需要部署1个或多个水面节点来收集其邻近海域数据,并转发给指挥中心。

2.2 工作机制

根据紧急情况的时空分布情况,可以确定水下应急通信系统的工作机制。

在近海区域,人类活动较多,紧急情况分布程度较为密集,也有较多现成通信基础设施可用。为了统一协调调度,需要预先部署好应急通信工作机制,临时性征调相关通信资源来完成应急任务。正常情况下,这些网络工作在常规模式,完成各自的工作;紧急情况下,这些网络将切换为应急模式,优先处理应急相关任务。在现有网络不能覆盖的地方,还需要进行必要的基础设施建设,或者通过临时部署通信节点来实现覆盖。

在远海区域,人类活动主要是远洋航行,可以在主要航线下铺设海底光缆,或者利用现有海底光缆获取基础设施支持。由于海洋面积/体积太大,只能通过无线方式进行全海域通信覆盖。普通模式下,可以进行粗颗粒度的通信能力部署;应急情况

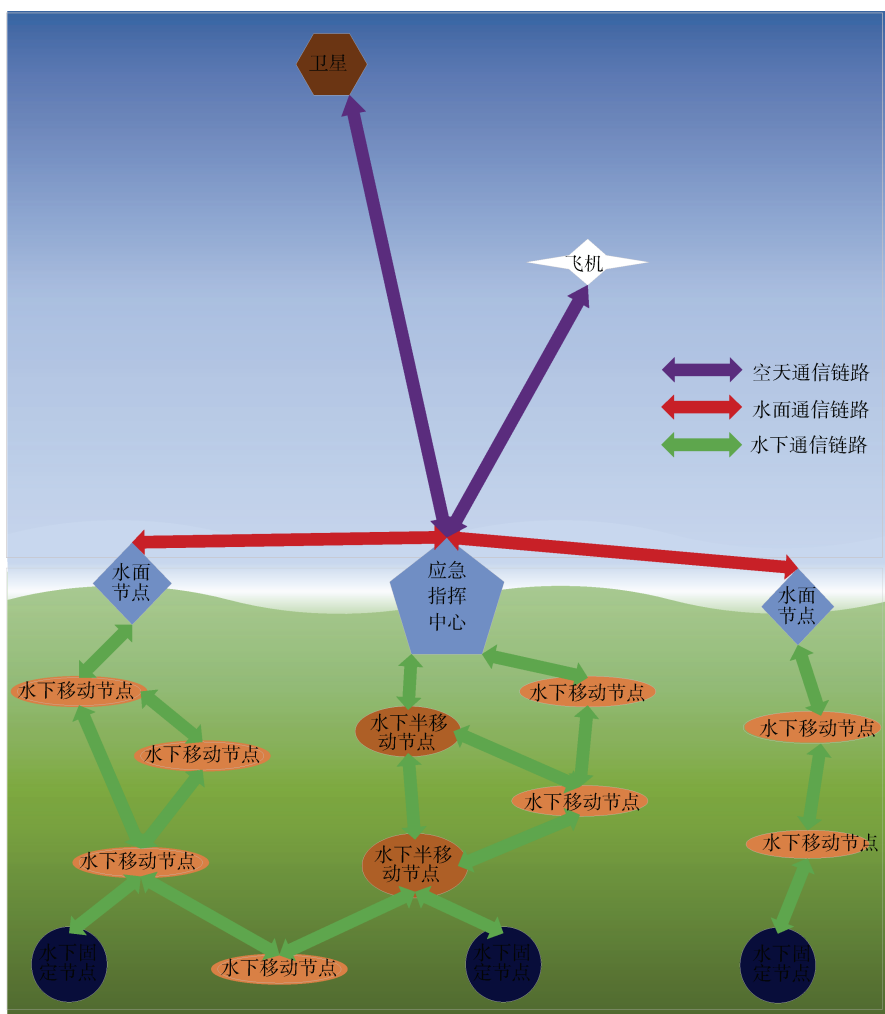


图1 水下应急通信示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underwater emergency communication

下, 需要针对部分海域进行细颗粒度的重点覆盖。因此, 远海区域的应急通信往往需要通过临时部署通信节点来实现覆盖, 且节点一般具备机动能力, 可以根据需要在水下改变位置从而实现灵活组网。

由于设计目标不同, 在紧急情况发生时, 应急通信网络的工作机制与普通网络有显著区别。例如水下自组网和水下传感网一般需要优先考虑提升系统能量效率以延长网络生命周期。但是, 应急通信时以信息传输为首要目标, 能量消耗不再是首要问题。

2.3 节点类型

除了现有基础设施, 水下应急通信系统中包括指挥节点、水面节点和水下节点。

指挥节点通常安装在船舶、潜艇、飞机上, 需

要汇集现场信息并进行指挥调度, 一般配置足够强大的通信、计算、存储及显示能力。

水面节点可以配置在浮标上, 具备水下水上 2 种通信能力, 通过汇聚水下数据并转发给指挥中心。

水下节点数量多, 是水下应急通信的主要执行者。基于海洋互联网和海洋物联网相关概念, 水下节点既是数据的产生者, 也是数据的转发者。同时水下节点还可以是应急相关任务的控制者和执行者。水下节点的能力可以根据实际需要进行配置。

3 关键技术

3.1 节点多模通信及功能一体化技术

应急通信中节点需要具备较强的通信能力以支持多种通信方式, 包括: 有线、电磁波、水声、光、

磁等,即支持多模通信。在普通模式下,可以选择其中 1 种通信方式。在应急模式下,根据任务情况,可能需要启用多种乃至全部通信方式。针对不同的任务,节点自适应地选择合适的通信方式,并对收集到的数据进行整理融合。如何为节点配置合适的通信能力并进行最优的选择是其中的关键问题。

除了通信能力,节点也应该具有其他功能,例如定位、导航、感知、探测、识别、控制等。根据不同的应急通信场景和具体任务情况,可以选配其中一些或全部功能。这些功能可以独立配置,也可以考虑一体化设计。前者相对简单,只需在节点上加载相关模块,但成本较高、体积较大,相互之间也可能产生潜在干扰,同时会加重能量的消耗问题。后者技术上相对复杂,但可以减小体积、降低干扰和能耗及成本。如何为节点配置合适的功能并进行协调是其中的关键问题。

3.2 网络快速机动部署技术

由于海域过于宽广,突发紧急情况海域周围可能完全没有或没有足够的节点来完成网络构建。此时需要通过机动手段(例如运输机)将节点运送至特定地点并进行投放,从而实现网络的快速机动部署。投放的节点还需根据目标任务完成进度情况实时调整位置,任务完成后还可能需要对相关节点进行回收。如果任务执行期较长,节点能量不足时,可能的应对技术方案包括:节点脱离任务进行充电或更换电池、节点失效、重新补充节点等。

如果涉及海域附近正好有可用机动节点群,此时通过系统调度来迁移相关节点就成为一种可行的低成本方案。这需要网络管理/感知功能及时跟踪了解系统中所有通信资源的时空分布和使用情况,以便进行实时、有效调度。具体各节点如何迁移将是其中关键问题,需要尽快完成新网部署,同时避免碰撞或过度耗能,这样节点才能在应急通信中发挥作用。

3.3 网络模式快速切换技术

在常规情况下,水下传感网或水下自组网通常是基于能量效率或生命周期来进行优化设计的。但是在应急模式下,网络的目标是尽快完成相关任务,而无需考虑能量效率,此时应该及时调整组网方法以满足应用需求。网络各层,特别是路由协议、

MAC 协议及物理层信号处理,需要配置 2 种模式下的协议栈,并根据任务需求快速切换工作模式。切换后需要妥善处理正在进行的业务数据,以便紧急情况结束后恢复常规模式时从断开点继续。

切换时,还需要确定涉及范围,即哪些节点需要切换、哪些节点无需切换。在范围边缘的节点可能需要进入准备状态随时待命。随着时间的推进,该范围可能增大或缩小,故需解决自适应切换问题。

3.4 水上+水下联合一体化技术

海洋应急通信系统包括水上和水下 2 部分。如果涉及范围仅在其中之一,各自进行一体化设计可以分别解决水上空间和水下空间的应急通信问题。但一些紧急情况往往同时涉及水上空间与水下空间,因此还需要进行水上与水下 2 部分的联合一体化设计,才能满足应急系统的实际需要。此时,2 个空间之间的信息交互和任务协作将更为频繁和复杂。如果水上和水下紧急情况关系密切,水上和水下指挥中心合二为一将是更好的选择。这种情况下,指挥中心应该同时了解水上和水下现场情况,然后进行协调相关资源完成应急处理任务。

在空天地海潜一体化的框架下,针对海洋应急通信的一体化内涵如图 2 所示。根据上文内容整理形成水下部分的内涵,水上应急通信一体化内涵目前还未形成确切描述,故在图中用省略号表示,但可参照水下部分进行类似分析。

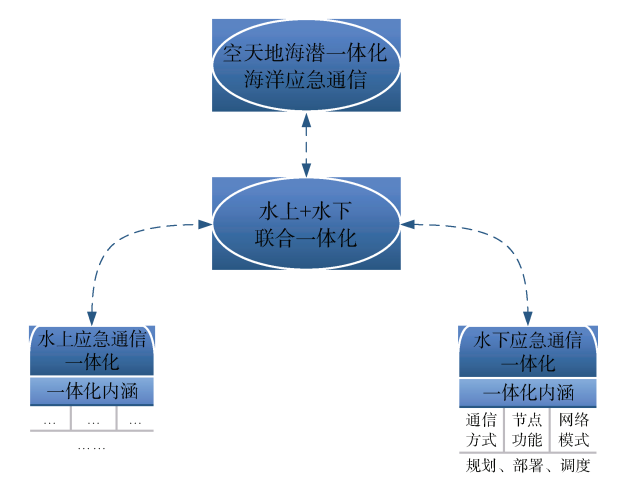


图 2 应急通信一体化内涵示意图

Fig. 2 Schematic diagram of emergency communication integration connotation

4 智能化

随着人工智能的又一次浪潮,基于学习的解决方案在通信与网络的各个层面都获得了应用,这使得通信与网络具有了智能。相较于传统的优化设计,基于学习的方法可以处理更为复杂的问题,且方法具有通用性,因此越来越受到重视。

目前,智能方法已经广泛应用于水声通信^[17]、水下光通信^[18]、空天地一体化^[19]、水下无人系统^[20]等。海洋应急通信也需利用学习方法进行智能化,以更好地服务于应急管理。

4.1 学习方法

机器学习是实现人工智能的重要方法,使用算法来解析数据、从中学习,从数据中自动分析获得规律,并利用规律对未知数据进行预测,或对真实世界中的事件做出决策。面向大数据环境,机器学习使用大量的数据来训练,通过各种算法从数据中学习如何完成任务^[21]。按学习方式分,机器学习可分为:监督学习、无监督学习、半监督学习和强化学习。深度学习采用深度的多层神经网络结构,具有强大的学习能力,是当前热门的机器学习方法。基于深度神经网络模型衍生出一些新的学习方法,例如强化学习、深度强化学习^[22]、深度监督学习等。深度学习及其衍生方法已在许多领域取得了优异成绩。

但是深度学习仍然存在着鲁棒性和泛化性较差、难以学习和适应未观测任务、极其依赖大规模数据等问题。元学习方法^[23]为解决上述问题提供了新的思路。元学习是学习的学习,可以模仿生物利用先前已有的知识来快速学习新的知识。这与实现通用人工智能的目标相契合,可以实现更高级别的智能。

4.2 智能水下应急通信

对于水下应急通信,可以利用上述机器学习和元学习方法在以下方面进行智能化。

首先是水下通信技术的智能化,包括协议各层:物理层、数据链路层、网络层、传输层,乃至应用层。可以先对某种通信技术进行智能化,然后再对多模通信和多种通信技术的融合进行智能化。

其次是水下节点功能的智能化,包括各项功能:通信、定位、导航、探测、识别、控制等。分别实现各项功能的智能化,然后实现多种功能一体化的智能化,使得节点可以根据需要智能地调整自身功能。

再次是网络规划/部署/调度的智能化。根据统计和推理,判断各类紧急情况发生的时空分布概率,根据节点能力和数量对网络进行规划、部署和调度,使得网络能够根据需要智能、机动地组网。

最后是任务执行的智能化。针对各种紧急情况,智能地找到最合适的应急处理方案,并通过水下应急通信一体化系统智能地执行相关任务。同时,实时感知海域空间中的状态变化,智能地对通信和控制进行机动灵活的调整应对。

4.3 实用案例

下面试举几个水下及水上通信在智能化应用方面的实例,说明智能水下应急通信一体化的可行性。

水声通信具有传播衰减较小、传播距离远等优点,是实现远程、广域水下通信的主要方式。由于水声通信的长传播时延特性,传统媒体访问控制协议设计较为复杂,且存在效率不高等问题。文献[24]提出了一种新的基于深度强化学习的水声网络媒体访问控制协议,其中一个采用该协议的代理节点与其他采用传统协议的节点共存。协议代理学习利用水声通信中固有的大传播时延,通过同步或异步传输模式提高系统吞吐量。深度 Q 学习算法应用于同步和异步协议代理,以学习最优策略。理论分析和计算机仿真证明了该协议获得的性能增益。

水下光无线通信具有传输速率高、超宽带、低延迟等优点,近年来成为远程控制和传感等许多应用的一个有吸引力的解决方案。由于恶劣的水下条件,水下光无线通信面临着诸如吸水、散射和定点捕获与跟踪问题等挑战。现有的解决方案基于预定义的模型,假设对环境有充分的了解,不能最佳地处理水下的动态性。文献[25]提出了基于强化学习的波束自适应方法,优化了光的光束宽度和光束方向。提出的基于强化学习的解决方案产生了光源的最佳定位和波束宽度,并提高了通信链路的成功

率。与4种不同的水下环境(包括纯净海水、清洁海洋、沿海海洋和混浊港口)的不确定性圆盘静态方法相比,它们还保证了在信噪比方面更好的链路质量。

随着信息技术的不断发展,信息服务的空间范畴不断扩大,各种天基、空基、海基、地基网络服务不断涌现,对多维综合信息资源的需求也逐步提升。空天地一体化网络可以为陆海空天用户提供无缝信息服务,满足未来网络对全时全域全空通信和网络互联互通的需求。文献[4]针对网络结构复杂、动态性高、资源高度约束等问题,提出了基于强化学习的空天地一体化网络设计与优化框架,以进行高效快速的网络设计、分析、优化与管控。同时给出了实例分析,阐明了利用深度强化学习进行空天地一体化网络智能接入选择的方法。并通过搭建空天地一体化网络仿真平台,解决了网络观测稀疏与训练数据难以获取的问题,极大地提升了强化学习的训练效率。文献[19]分析了空天地一体化网络的几个主要挑战,并解释了人工智能如何解决这些问题。然后,以卫星流量平衡为例,提出了一种基于深度学习的方法来提高流量控制性能。仿真结果表明:深度学习技术是一种提高空天地一体化网络性能的有效工具。

水下无人系统是目前探索、开发和利用海洋资源的主要装备之一。随着应用需求的增加以及人工智能技术的发展,水下无人系统的智能化逐渐成为该领域的研究热点。针对水下无人系统智能化的水下通信、智能集群以及水下智能仿生等关键技术,文献[20]回顾了当前发展现状,指出当前水下无人系统智能化亟待突破的大容量/远距离条件下的高速率/高灵敏度信息传输、水下仿生机器人智能驱动与控制、大规模协同及复杂海况下控制理论等技术难点。并对未来水下无人系统智能化的研究方向做出提高水下通信效率、加强智能化等级及开发更先进材料的展望。

目前,我国在海洋资源勘探开发、维权执法、领海/领空保护任务日益繁重且难度巨大,迫切需要借助海洋智能装备提升我国海洋信息收集和安全保障能力。由多个无人艇(USV)、自主式水下机器人(AUV)或无人机(UAV)等无人平台组

成的、以信息交互为手段、以分布式信息处理和决策控制为特征的集群系统逐渐成为海洋信息收集和安全保障领域研究热点。相较于单个无人艇,无人艇集群系统可以实现对水面目标的多角度观测和 underwater 合作目标的大范围协同定位。文献[26]以集群通信为基础,全局协同搜索策略和局部协同搜索策略相结合,实现了对任务区域的均衡覆盖搜索、水面目标探测和 underwater 合作目标的协同定位。在动态分区通信网络中,利用K-中心聚类算法获得了分区内集群中最优聚类个数及其簇首。在动态全区域通信网络中,提出了改进的链路开销计算方法,利用蚁群算法完成了分区间信息传递的最优链路路径计算。在集群个体间实现稳定通信的基础上,针对大范围多岛礁和复杂海底地形区域的搜索任务,提出了射线法分区划分算法,将任务区域划分成一系列搜索分区,构建了分布式USV集群协同区域搜索的多目标任务模型,并通过纳什均衡实现了最优的集群全局协同搜索。经过全局层面的策略协同后,USV进入到被分配的分区内进行水面目标搜索和 underwater 合作目标定位,由于不同传感器的观测噪声存在差异,利用最小二乘支持向量机回归方法构建了集群通用传感器置信度模型。在USV集群局部协同搜索过程中,针对USV集群对环境的认知以及各个USV行动的结果高维动态不确定性和耦合性问题,以搜索图作为协同变量,提出了基于分布式马尔科夫决策过程的集群局部协同搜索策略。海试实验结果显示此协同策略降低了USV集群协同过程中个体间的冲突,实现了分区内水面目标的探测和均衡覆盖搜索。USV集群不仅需要对水面目标进行搜索,还需对跨介质异构无人集群系统中的AUV进行水声协同定位。但水声信号易受环境干扰而产生数据失真问题,为此提出了最佳融合位置估计算法,实现了对失真数据的过滤。针对集群协同定位中不同估计位置间存在水声时差信息重用问题,提出了基于微分熵的改进最佳融合位置估计算法,提高了对AUV位置估计的精度。

5 结束语

水下应急通信是海洋应急通信的重要组成,对其进行一体化与智能化具有重要的价值。通过对场

景进行分析,确定了基本需求和性能指标,进一步讨论网络拓扑和工作机制,对节点进行了分类,对潜在的几项关键技术进行了具体阐述,并对水下应急通信的智能化进行了讨论。

参考文献

- [1] DANIELS C. Acoustic backup system for emergency communication to subsea blowout preventers[C]// OCEAN 75 Conference. San Diego: IEEE, 1975.
- [2] TANG Y Y, CHEN Y G, YU W J, et al. Emergency communication schemes for multi-hop underwater acoustic cooperative networks[C]// 2018 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing(ICSPCC). Tsingdao: IEEE, 2018.
- [3] LIU J J, SHI Y P, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [4] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 3-19.
- [5] 朱斌, 胡悦, 王光全. 空天地海协同应用综述[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 47-52.
- [6] 林彬, 张治强, 韩晓玲, 等. “空天地海”一体化的海上应急通信网络技术综述[J]. 移动通信, 2020, 44(9): 19-26.
- [7] LIU J, DU X Q, CUI J H, et al. Task-oriented intelligent networking architecture for the space-air-ground-aqua integrated network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5345-5358.
- [8] 姜胜明. 海洋互联网的战略战术与挑战[J]. 电信科学, 2018, 34(6): 2-8.
- [9] 瞿逢重, 来杭亮, 刘建章, 等. 海洋物联网关键技术研究与应用[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 25-33.
- [10] CHEN F J, JIANG Z L, JI F, et al. Radio-acoustic integrated network for ocean information transmission: framework and enabling technologies[J]. China Communications, 2021, 18(9): 62-70.
- [11] LUO H J, WANG J L, BU F F, et al. Recent progress of air/water cross-boundary communications for underwater sensor networks: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(9): 8360-8382.
- [12] 周海会. 水下通信定位识别一体化波形优化方法[J]. 通讯世界, 2019, 26(8): 216-217.
- [13] 张光普, 梁国龙, 王燕, 等. 分布式水下导航、定位、通信一体化系统设计[J]. 兵工学报, 2007(12): 1455-1462.
- [14] 王鹏, 潘笑, 温雯, 等. 水下通信定位导航技术分析及一体化展望[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(5): 134-138.
- [15] 卢俊, 张群飞, 史文涛, 等. 探测通信一体化研究现状与发展趋势[J]. 信号处理, 2019, 35(9): 1484-1495.
- [16] 闫敬, 关新平, 罗小元, 等. 水下信息物理系统探测-通信-控制一体化: 挑战与进展[J/OL]. 控制理论与应用, 2022. [2022-06-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20211117.1454.046.html>, 2022.
- [17] 陈友淦, 许肖梅. 人工智能技术在水声通信中的研究进展[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(10): 1536-1544.
- [18] LU H Y, JIANG M, CHENG J L. Deep learning aided robust joint channel classification, channel estimation, and signal detection for underwater optical communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(4): 2290-2303.
- [19] KATO N, FADLULLAH Z M, TANG F X, et al. Optimizing space-air-ground integrated networks by artificial intelligence[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(4): 140-147.
- [20] 赵留平, 李环, 王鹏. 水下无人系统智能化关键技术的发展现状[J]. 无人系统技术, 2020, 3(6): 12-24.
- [21] 何清, 李宁, 罗文娟, 等. 大数据下的机器学习算法综述[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(4): 327-336.
- [22] 刘全, 翟建伟, 章宗长, 等. 深度强化学习综述[J]. 计算机学报, 2018, 41(1): 1-27.
- [23] 李凡长, 刘洋, 吴鹏翔, 等. 元学习研究综述[J]. 计算机学报, 2021, 44(2): 422-446.
- [24] GENG X, ZHENG Y R. Exploiting propagation delay in underwater acoustic communication networks via deep reinforcement learning [J/OL]. Neural Networks and Learning Systems, 2022.[2022-05-17]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9776511>.
- [25] ROMDHANE I, KADDOUM G. A reinforcement learning based beam adaptation for underwater optical wireless communications[J/OL]. IEEE Internet of Things Journal, 2022. [2022-05-06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9770197>, 2022.
- [26] 苗润龙. 分布式无人艇集群协同区域搜索与目标定位研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.

(责任编辑: 肖楚楚)