



专题：海洋物联网

海洋数据传输网络体系结构及挑战

姜胜明, 葛丽阁, 徐艳丽

(上海海事大学信息工程学院海洋互联网技术实验室, 上海 201306)

摘要: 海洋数据传输网络与陆地网络相比具有以下明显特征: 网络边界和路径以及通信资源的高度动态性和不确定性、通信介质的异构性和节点性能的非对称性、海洋通信网络资源构成的复杂性和能力局限性以及海洋空间网络用户构成的复杂性和大流动性及低密度分布等。针对上述特点, 从业务特征、网络构成、网络特点、体系架构方面探讨海洋数据传输网络体系, 重点指出体系架构面临的 5 个方面挑战, 包括自适应性、智能组网、透明传输、漫游支持、安全传输。

关键词: 海洋数据传输网络; 网络体系架构; 海洋互联网

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021142

Architecture and challenges of system models for marine data transmission networks

JIANG Shengming, GE Lige, XU Yanli

Marine Internet Laboratory, College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

Abstract: Marine data transmission networks are different from terrestrials in the following aspects: high dynamics and uncertainties in network boundary, network path and communication and networking resources, heterogeneities of communication media and asymmetric communication performance, complexity of marine communication network resources with limited capabilities and ability, and high complexity and mobility of marine users with low distribution densities etc. In view of the above peculiarities for communication network in the marine space, an SM for marine data transmission network was studied from the aspects of business characteristics, network composition, network characteristics and architecture, and five challenges faced by the architecture were focused on, including adaptability, intelligent networking, transparent transmission, roaming support and secure transmission.

Key words: marine data transmission network, network system architecture, marine internet

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-21

基金项目: 国家自然科学基金委员会与广东省联合基金项目 (No.U1701265); 上海教委科研创新计划自然科学重大项目 (No.2021-01-07-00-10-E00121)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China-Guangdong Joint Fund (No.U1701265), The Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission of China (No.2021-01-07-00-10-E00121)

1 引言

目前,在海洋环境中常用的数据传输手段是卫星传输,但存在一些缺点影响其普及率^[1-3]:其性价比较低,更无法用于水下通信;近地轨道卫星的传播时延长,需要特制的收/发终端和传输协议;中低轨道卫星绕地球高速运转,增加了高质量通信组网的难度。另一个广泛使用的海洋通信系统是海事无线电,由于受带宽的限制,它主要用于语音通信,无法支持高速数据传输^[4-5]。现代移动通信技术也被少量应用到港区和航道提供互联网服务^[6],但相对于海洋,其覆盖范围太小,无法大规模部署在海域。目前无论海上战备通信、应急救援或常规数据传输,还是军用、商用或民用,都需要稳健性强、性价比高和泛在的海洋数据传输服务。但目前还没有一种通信网络系统能单独构建一个性价比高、覆盖范围广和使用方便的海洋数据传输系统,海洋数据高效传输是亟待解决的重要课题。

海洋涵盖天空、海岸、水面和水下的广阔空间(本文称“海洋空间”),特殊的地理和气候条件使海洋空间陆基网络设施的建立和维护变得非常困难和昂贵。虽然目前海洋空间中已经部署了多种通信网络系统,但是它们的归属不同、掌管部门和运作单位众多、部署形式多样以及通信制式和标准不统一。目前缺乏有效的方法和规范统筹使用,它们之间无法有效方便地协作和互联互通。海洋的特殊环境及海洋数据传输技术的现状决定了要改变上述局面是个艰难的任务,而且水下通信的瓶颈在短时间内很难获得突破,导致大面积水下高速组网仍需依赖水面及以上的通信系统。为了系统性地解决海洋数据传输的相关问题,提高海洋通信宝贵资源的利用率,需要统筹协调海洋空间中各种通信网络系统,实现空天地海潜一体化、应急与常规系统、战时与平时系统相互支撑的共同体,以此构建稳健性强和高效的海洋

数据传输系统^[3]。这种由多个系统有机组成、功能更完备、协作互助的复合通信网络系统通常称为网络体系^[7]。而目前国内外对海洋数据传输网络体系的研究非常缺乏。

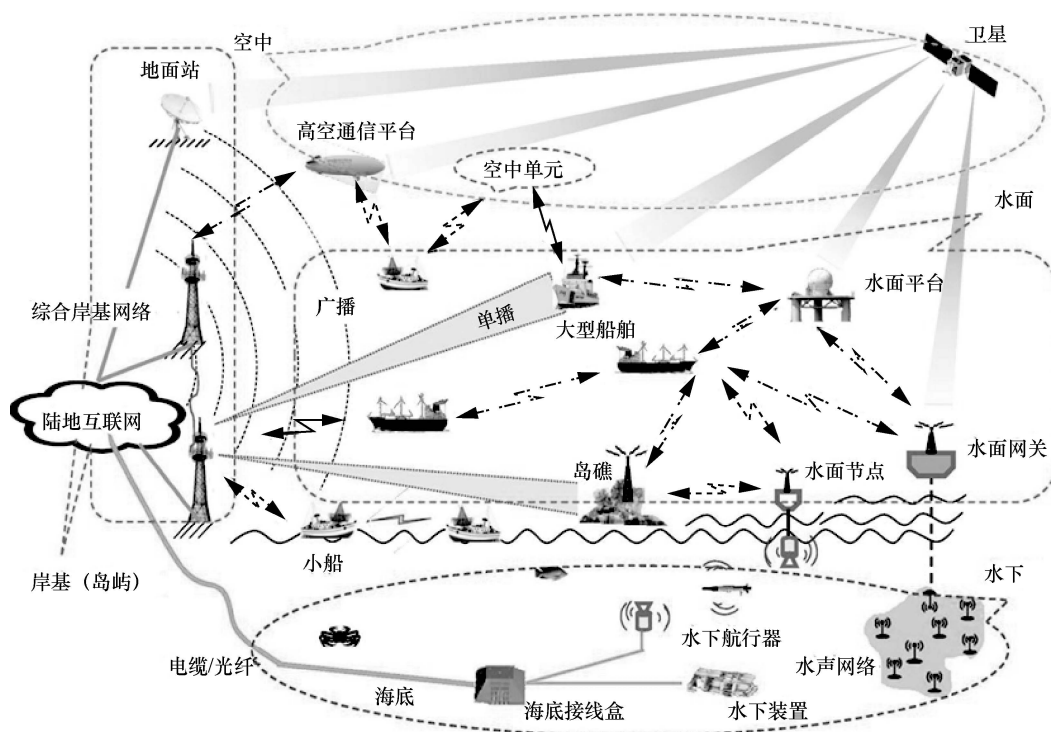
2 海洋数据传输网络的概况和体系架构

2.1 业务特征

随着涉海活动逐渐增加,业务多样化,数据业务逐步代替传统语音业务,这些都对通信网络安全提出更高的要求。另外,海洋数据分布稀疏、多源异构,具有高维度、时空性、敏感性和多模态等特征,导致数据信息交互独立、共享度低。近年新型海洋应用(如E-navigation^[8])的出现,以及对未来应用(如无人船舶^[9]等)的研究,都对海洋通信业务提出了新的要求,以支持相关新型数据的有效传输,例如及时、可靠、安全和大量的数据高速传输以支持船岸一体化信息集成与融合,提升航保服务的性能、节约航行能耗、减少航运排放以及高密度无人船舶航行的安全性和稳定性等。

2.2 网络构成

海洋数据传输网络由覆盖天、空、岸、海及水下的综合性通信网络节点组成,是关键的海洋信息化基础设施^[10]。海洋数据传输网络系统组成如图1所示,共分成四大部分^[11],即岸基、水面、空中和水下。当前正在运营的岸基和空中通信网络主要包括海事无线电、卫星和局部部署的移动通信系统。有线海底观测网是目前相对成熟的水下通信系统,例如美国的MARS^[12]和我国在南海、东海和黄海所部署的观测网络^[10]。除此之外,也有一些基于中低轨道卫星的庞大星座项目计划,例如,美国SpaceX公司的Starlink项目计划采用12 000颗低轨道卫星提供宽带服务^[13];中国航天科技集团有限公司的“鸿雁”星座计划用300余颗低轨道小卫星构建通信网络,首星已在2018年年底成功发射^[14]。人们也在探讨其他通信网络技术,如高空通信平台和无线自组织网络。高空通信平台能

图1 海洋数据传输网络系统组成^[32]

提供大范围、高速率且相对廉价的通信服务，主要问题是如何将它们长期部署在特定空域以提供不间断的通信服务^[15]。无线自组织网络不依赖于特定通信网络设施，有很强的自组织和自愈能力^[16-20]，适应动态不稳定的海洋网络环境；例如，船舶自组织网络和网状网络^[18, 21-23]以及由飞行器构成的航空无线自组织网络^[24]等。但是，这种网络容量和通信质量均不稳定，动态网络拓扑使网络连通性得不到保障，无法提供不间断的网络服务^[25]。水下通信网络环境更加复杂多变，因为适合水下通信的主要介质是声波，其传输速率和传播速度都非常低、通信质量不稳定^[26-31]。

2.3 网络特点

陆基数据传输网络系统主要基于固定的光纤骨干网络，无线主要用在“最后一公里”的接入部分。而海洋数据传输网络是跨时空，甚至跨介质（如声电融合传输）的动态异构复杂系统，且以无线为主^[3, 11, 32]，这导致了海洋数据传输网络在拓扑动态性、系统异构性和不稳定性以及通信资

源构成的复杂性等方面都比其他网络更突出。这些特点对数据传输的性能影响非常大，导致了现行数据传输网络体系无法适应于海洋空间，因为前者基于相对稳定和单纯的通信网络资源、拓扑结构和系统构成。它们之间主要不同之处具体表现在以下4个方面。

（1）网络边界和路径以及通信资源的动态性和不确定性

一条海洋数据传输网络的路径可能一端在水下，另一端在陆上。在卫星被摧毁或者费用太高时^[34]，该网络路径可能不使用卫星，而是经过水声自组织网络、船舶自组织网络、航空自组织网络和岸基网络等。在这些网络中，除岸基网络外，其余都会由于节点的移动性而实时动态变化，极不稳定，甚至会引起网络边界和网络形态发生频繁变化。例如，岸基网络与船舶自组织网络之间的边界以及不同自组织网络之间的边界会随着节点（如船舶）移动发生变化。同样，节点移动会使常规型自组织网络转变成机会性网络，反之亦

然。这些变化会导致网络路径的经常性中断,但目前还没有网络体系考虑过如此动态变化的网络系统,没有相关体系能适用于这种复杂情形。

(2) 通信介质的异构性和性能的非对称性

当数据传输跨越水下和水面并延伸到陆地上时,水下主要的通信介质为声波,其信号传播速度和通信速率与水面及陆地上所使用的电磁波相差甚远。电磁波以光速传播,通信速率能达到 Gbit/s 级;而声波在海水中的传播速度只有 1.5 km/s,最大通信速率在 kbit/s 级别。当前的网络体系没有完全考虑这些非对称性,只是把处理这些非对称性交给网络之间的转换节点。这种做法只适用于具有固定边界的网络,不适用于动态边界的异构网络。另外,网络之间的转换节点主要解决传输速率的非对称性(含协议的异构性),没有考虑信号传播速度的巨大差异性,因为传统网络是基于电磁波的。这种巨大差异对传输层端到端传输协议的性能造成很大影响,特别是 TCP (transmission control protocol)^[29],因为它的运作是基于端到端来回时延的。目前针对无线网络改进的 TCP 主要解决了对网络拥塞状况误判的问题^[33],并没有考虑传播速度的非对称性及长时延,所以无法适用于海洋传输网络。

(3) 海洋通信网络资源的复杂性和局限性

除卫星外,能用于构建岸基网络的通信技术主要包括移动通信系统(如 3G、4G)、无线城域网(如 WiMAX)。它们能提供高性价比的通信网络服务,但其覆盖范围相对于海域就显得太渺小。海事无线电虽能长距离传输,但速率低,主要适用于语音传输。各种类型的无线自组织网络能一定程度弥补其他网络的缺陷^[34],如延伸岸基网络的覆盖距离和提高其覆盖效率,但其本身的性能和稳定性无法保障。把各种海洋信网络资源尽量有机地融合是非常必要的,但这种融合网络是目前网络体系无法支持的,主要因为该体系为转发型网络(forwarding network)而设计,即网络节

点只转发路过它的数据包,不进行存储。在海洋通信网络中,当转发型网络缺失或无法提供全覆盖时,只能寄希望于机会性网络进行补充甚至替代。机会性网络需要存储-携带-转发(store-carry-forward)数据包甚至消息。目前这种机会性网络转发只能在现有体系的应用层上实现^[35],无法与网络层的转发进行有机融合和联合优化提高数据传输的效率。

(4) 海洋空间网络用户的流动性和低密度性及构成的高复杂性

由于海洋空间的开放性,其网络用户(如海员、邮轮乘客、渔民等)往往来自不同的国家和地区,临时性地聚集在某一国/地区内或国际海域,并随船舶做集体性移动。而海洋大部分区域是无人居住的区域,用户密度比陆上低得多。目前支持陆上移动性的系统基于固定网络边界和固定基站;在海洋中,除动态的网络边界外,网络基站往往也安装在船舶上(船上用户通过网络基站接入其他网络),并随船舶移动;目前没有相应的移动支持方法,因为现有的网络体系形成于 20 世纪 70 年代,当时还没有移动性支持的概念,所以体系中缺乏相关设计。另外,目前所采用的移动性支持主要涉及网络“最后一公里”的接入部分,对固定的骨干网络是透明的。整个海洋通信网络是动态变化的^[36]。另外,船舶的移动性往往使得采用不同频段、通信制式和容量设备的用户临时性聚集在同一海域,目前没有相关的体系能支持他们之间的直接互联互通。

2.4 体系架构

为了提高海洋空间通信网络资源的利用率,我们在 2013 年提出了海洋互联网(marine internet)的概念^[37-38],2018 年 6 月,《电信科学》期刊组织了一期“海洋互联网”专题^[39]。海洋互联网的核心思想是综合利用海洋空间一切可以利用的通信网络资源进行动态实时组网,使系统不依赖任何一种特定网络资源,并根据需要实时调整



组网策略最大限度地满足服务质量和性价比等方面的要求^[3,11,40]。一个基于海洋互联网的海洋数据传输网络体系构想如图 2 所示,在现有计算机网络体系架构的基础上,通过尽最大努力实时组网实现一体化融合的海洋数据传输系统。该结构主要包括 3 部分:海洋空间通信网络资源的管理、可用资源探测与融合以及网络体系管理。第一部分主要涉及海洋空间通信网络资源的表征、归类、认证、授权和发布等;第二部分主要涉及海洋通信网络资源的探测和使用、实时动态组网、端到端数据传输及用户移动性管理等;第三部分主要涉及通信界面、协作激励机制、优先级支持与安全策略实施和用户认证等方面。

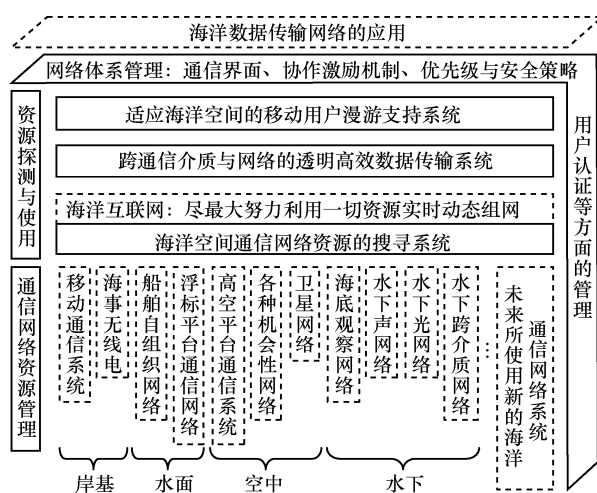


图 2 一个基于海洋互联网的海洋数据传输网络体系构想

3 体系架构面临的主要挑战

海洋空间通信网络特殊的环境导致了海洋数据传输网络拓扑的动态变化性和通信资源构成的复杂性、系统异构性以及不确定性。这些特点对构建鲁棒、高效、稳定的海洋数据传输网络体系提出了巨大的挑战,主要体现在以下几个方面。

3.1 海洋数据传输网络体系的自适应性

海洋空间通信网络环境的特点要求传输网络体系能够尽量利用一切可使用的通信网络资源进行实时动态组网,以最大限度地实现可靠高效传

输。但是这些资源分布不均匀,其可用性无法得到保障。而且它们的异构性高,边界不清晰稳定,通信性能差异大,标准制式和性价比也不同,无法直接互联互通。目前比较成熟的网络体系是 ISO 七层参照模型和 TCP/IP 五层实用模型,它们都是基于固定且对等层之间的数据传输结构,针对具有确定边界网络而设计的体系。所以,它们可以在不同网络的交界处设立转换节点解决网络之间的异构性和网络容量、传播特性等方面的不对称性问题,实现互联互通。但是,在海洋空间中无法确定这类转换节点的位置,使这种方法不适用于海洋空间网络。在这种情况下,当一个移动节点 A 遇到异构节点 B 时,即使 B 能为 A 提供与外界通信的最后机会, A 也无法充分利用 B。这就要求传输网络体系能快速地适应上述特点和环境变化,克服非对称性和异构性所带来的通信障碍,尽最大努力协作组网,最大化海洋通信网络的互联互通性。

3.2 海洋通信网络资源的快速探测和智能组网

海洋通信网络资源指海洋空间中具有通信和组网功能的节点和其服务能力;海洋空间通信网络是缺乏协调中心、时空跨度大的分布式网络。一个节点能拥有的通信网络资源数量取决于其周围节点的分布密度和它们相关能力以及该节点本身的探测能力。发现邻居节点的速度和力度是这种能力的主要体现,其方法大致可分主动和被动两种。前者是节点通过广播探测消息,收到该信息的节点应答^[41]。在被动探测中^[42],节点仅侦听周围的发送活动,并根据侦听到的结果认知邻居节点。主动探测效率高,但消耗更多能量,也对其他通信造成干扰。而被动侦听没有上述问题,但当一个节点需要邻居节点组网时,这种方式可能无法及时满足要求。主动探测能力主要取决于节点的最大发射功率,被动探测能力主要取决于节点的接收灵敏度。发射功率越强,探测能力也越大,但造成的干扰也越大;同样,探测的频谱

越宽,探测能力也越强,但探测时间也更长。如何在大搜索域中快速发现最多邻居节点、减少对其他通信的干扰、满足海洋空间动态组网要求需要做进一步研究。

在广阔海洋空间中,通信节点具有多样性(如不同的通信介质、制式和能力)、分布和可用性不确定等特点。另外,节点的移动性会导致邻居关系的快速变化,影响网络的连通性,尤其在节点分布稀疏的情况。所以,需要经常性及时快速地探测才能有效支持实时动态组网。与此同时,节点还要掌握探测节点的通达能力,并量化表征其状态和预测其未来可能的变化。针对传统无线网络,特别是无线自组织网络,已经有许多类似的研究成果^[43]。但是无线网络中节点的复杂性、异构性、非对称性和动态性以及分布空间的尺度及维度都无法与海洋空间网络相比,导致这些成果无法直接适用。海洋空间网络在选择中继节点时,需要考虑更多、更复杂的因素,尽量在构建网络路径时,采用非对称性和差异性小的链路,以最大化数据传输的性价比和可靠性。

3.3 海洋数据透明传输和优先级支持

数据透明传输指应用层将数据从源节点传输给目的节点的过程中,相关操作独立于下层的通信与网络系统。例如,目前互联网传输协议之一的TCP,只有源节点和目的节点参与相关操作,中间节点不参与。在这种情况下,海洋数据传输网络体系的开放性和兼容性可在不改变应用的前提下,不断地将新发展的通信网络技术融入海洋数据传输体系,以不断提高数据传输的性价比、可靠性和稳定性。TCP原先是为有线网络设计的,将拥塞控制功能放在了传输层,只有源节点和目的节点参与,以简化中间节点的复杂度。但传输层无法及时准确掌握网络层的拥塞情况,只能通过数据接收成功情况推测网络的拥塞状况。这种做法在无线网络中造成很多拥塞误判,因为,多跳无线网络有很多非拥塞因素也会导致数据丢

失^[44]。目前部分针对无线网络修改的TCP方案^[34],除了针对近地轨道卫星外,其无线网络的规模都比较小,节点类型单一,无法与海洋空间无线网络相比。对于近地轨道卫星,地面站与卫星之间没有其他节点,情况简单,在海洋空间通信网络中,节点情况复杂。

海洋数据传输网络体系不仅融合海洋空间各种通信网络资源,同时也支持海洋各种应用和用户。通信网络资源有限不可避免地导致资源使用的竞争,需要优先级机制支持不同级别的应用和用户。例如与应急救援相关的数据需优先传输,指挥者比一般用户需优先接入网络等。陆基网络优先级机制主要基于接入控制和网络或数据链路层的调度算法,一般需要对资源实现统一分配,每个中间节点需要安装相应的调度功能^[45]。其在固定结构的有线网络中比较容易实现,而海洋空间通信网络空间跨度大、异构复杂、网络边界不清晰和网络连通性不稳定,很难实现统一管理。

3.4 海洋空间移动用户的漫游支持

漫游支持指移动通信用户在不需更改其联系信息(如手机号码)的情况下,可以自由漫游而不失去连通性,这种特性是目前移动通信系统的独特优势。海洋空间通信网络的用户大多数是移动用户(如渔民、海员和游客等)。但是,目前陆基移动通信网络支持用户漫游的方法不适用海洋环境主要原因是两者网络结构的差异。陆基移动通信网络的无线部分主要是接入网,即把用户手机连接到基站的部分(如4G、Wi-Fi),用户漫游时会不断地切换连接其手机的基站,这些基站通过有线连接固定的骨干网。虽然用户是移动的,但基站是固定的,可通过确定用户所连接的基站就能与该用户进行通信。手机号码与用户注册地的网络相关联,当用户离开其注册地到访其他区域时,到访地会给漫游用户的手机分配一个与到访地关联的临时号码,并把这个号码告知其注册地。其他用户的手机可通过其原来的号码先访问



其注册地而得知其临时号码,再连接该用户手机。整个过程对用户是透明的^[46]。

在海洋空间通信网络中,海洋移动用户往往通过安装在船舶上的基站连接卫星、岸基网络或者另一个船舶基站。当连接静地轨道卫星时,由于卫星覆盖范围大,船舶的移动不影响通信,在这种情况下,可以采用陆基漫游支持方法维护海洋移动用户的连通性。但是在后两种情况下,其他用户首先要设法连接移动的船舶基站,才能连接海洋移动用户。当该船舶基站与岸基网络基站直接相连时,这个问题可采用类似于陆基漫游支持方法加以解决。当目的船舶基站经过一个或多个船舶基站与岸基基站相连时,中间基站的移动性会使问题变得更加复杂,陆基漫游支持方法不再适用于该场景。另外,陆基漫游支持方法基于可靠的网络连通性,即网络中任意两节点都能及时可靠传输数据。在海洋空间通信网络中,当卫星无法用时,网络连通性就无法得到保障。

3.5 安全数据传输

海洋通信网络环境主要由海岸线、水面、天空和水下等组成,用户主要由高机动性用户构成,且往往来自不同国家或地区,并可能运行特定应用(如军事通信、海上运输数据传输)。与陆地网络环境和用户的构成显著不同,使海洋网络数据传输的安全问题面临比陆地网络更多的挑战。大多数陆地网络安全系统依赖基于加/解密方案和稳定的中央系统,如认证服务器和公钥基础设施(public key infrastructure, PKI)等。这些系统要求较高的网络容量和可靠网络连接支持。高动态网络拓扑、不可靠网络连接和低通信容量是海洋通信网络的主要特点,该网络主要由各种基于岸基和水面的无线网络、覆盖范围广、可靠但昂贵的卫星网络和低速海事无线电系统组成,无法提供如陆地网络一样的可靠、高速网络连接支持网络安全方案。当网络的一部分是水声网络时,其安全部分将面临更多的挑战^[47]。海面网络节点稀

疏且移动,在有些情况下需要节点的协作组网才可能完成数据传输,如何在缺乏可靠数据传输保障的情况下确认参与协作节点的安全性,尤其当节点来自不同国家和地区时,需要研究相应的方法。

4 结束语

本文简要讨论了高效海洋数据传输目前所面临的主要问题,阐述了海洋空间通信网络与陆地通信网络的主要区别,在此基础上指出了研究适用于海洋通信环境的新型网络体系的必要性,并提出了基于海洋互联网的数据传输网络体系架构设想以及需要进一步研究的相关问题。由此可见,相关研究还处在初始阶段,其中,通信网络的体系结构既为根本也是统领通信系统研发的核心部分,需要做深入研究。

参考文献:

- [1] CHINI P, GIAMBENE G, KOTA S. A survey on mobile satellite systems[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2010, 28(1): 29-57.
- [2] VENKATESAN R, ARUL M, RAMESH K, et al. Satellite communication systems for ocean observational platforms: societal importance and challenges[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2013, 8(3): 47-73.
- [3] 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.
JIANG S M. Marine Internet: strategies, tactics and challenges[J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(6): 2-8.
- [4] JIANG S M. Fostering Marine Internet with advanced maritime radio system using spectrums of cellular networks[C]//*Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [5] 夏明华, 朱又敏, 陈二虎, 等. 海洋通信的发展现状与时代挑战[J]. *中国科学: 信息科学*, 2017, 47(6): 677-695.
XIA M H, ZHU Y M, CHEN E H, et al. The state of the art and challenges of marine communications[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2017, 47(6): 677-695.
- [6] Huawei Technologies Co., Ltd. Huawei eWBB LTE Solution[EB]. 2013.
- [7] 姜胜明. 海洋互联网与海洋网络信息体系[R]. 2019.
JIANG S M. Marine Internet and marine network information system[R]. 2019.
- [8] 云泽雨. E-航海下的海上安全通信保障研究[J]. *数字通信世*

- 界, 2018(3): 3-5.
- YUN Z Y. Research of maritime safety communication support under E-navigation environment[J]. Digital Communication World, 2018(3): 3-5.
- [9] 高宗江, 张英俊, 孙培廷, 等. 无人驾驶船舶研究综述[J]. 大连海事大学学报, 2017, 43(2): 1-7.
- GAO Z J, ZHANG Y J, SUN P T, et al. Research summary of unmanned ship[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2017, 43(2): 1-7.
- [10] 王积鹏, 戴磊, 肖琳, 等. 海洋信息网络建设思考[C]//海洋网络信息体系高峰论坛论文集. 北京: 出版社不详, 2019(7): 2-16.
- WANG J P, DAI L, XIAO L, et al. On the construction of marine information network[C]//Proceedings of Marine Network Information System Summit Forum. Beijing: s.n., 2019(7): 2-16.
- [11] JIANG S M. Marine internet for internetworking in oceans: a tutorial[J]. Future Internet, 2019, 11(7): 146.
- [12] Monterey bay aquarium research institute, monterey accelerated research system (mars) cabled observatory[EB]. 2019.
- [13] FCC OKs SpaceX's plan for 7 500 satellites in very low Earth orbit (and its rivals plans)[EB]. 2018.
- [14] 韩沁珂. 中国低轨卫星通信系统首星上天, 要让全球永不失联[EB]. 2018.
- HAN Q K. China's first low earth orbit satellite communication system launched into the sky[EB]. 2018.
- [15] TOZER T C, GRACE D. High-altitude platforms for wireless communications[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 2001, 13(3): 127-137.
- [16] LAARHUIS J H. MaritimeManet: Mobile ad-hoc networking at sea[C]//Proceedings of 2010 International Water Side Security Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [17] PATHMASUNTHARAM J S, KONG P Y, ZHOU M T, et al. TRITON: High speed maritime mesh networks[C]//Proceedings of 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-5.
- [18] KIM Y, KIM J, WANG Y P, et al. Application scenarios of nautical Ad Hoc network for maritime communications[C]//Oceans 2009, [S.l.:s.n.], 2009: 1-4.
- [19] LAMBRINOS L, DJOUVAS C. Creating a maritime wireless mesh infrastructure for real-time applications[C]//Proceedings of 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2011: 529-532.
- [20] KARRAS K, KYRITSIS T, AMIRFEIZ M, et al. Aeronautical Mobile Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of European Wireless Conference (EW). [S.l.:s.n.], 2018.
- [21] LAARHUIS J H. MaritimeManet: Mobile ad-hoc networking at sea[C]//Proceedings of 2010 International WaterSide Security Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [22] PATHMASUNTHARAM J S, KONG P Y, ZHOU M T, et al. TRITON: High speed maritime mesh networks[C]//Proceedings of 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-5.
- [23] LAMBRINOS L, DJOUVAS C. Creating a maritime wireless mesh infrastructure for real-time applications[C]//Proceedings of 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2011: 529-532.
- [24] KARRAS K, KYRITSIS T, AMIRFEIZ M, et al. Aeronautical mobile ad hoc networks[C]//Proceedings of 2008 14th European Wireless Conference. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [25] JIANG S M. A possible development of marine internet: a large scale cooperative heterogeneous wireless network[M]//Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2015: 481-495.
- [26] KONG J J, CUI J H, WU D P, et al. Building underwater ad-hoc networks and sensor networks for large scale real-time aquatic applications[C]//Proceedings of MILCOM 2005 - 2005 IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2005: 1535-1541.
- [27] Advances in underwater acoustic networking, in mobile ad hoc networking: cutting edge directions[Z]. 2013.
- [28] SOZER E M, STOJANOVIC M, PROAKIS J G. Underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.
- [29] CHITREM, FREITAGL, SOZERE. An Architecture for Underwater Networks[C]//Proceedings of IEEE Oceans 2006 - Asia Pacific. [S.l.:s.n.], 2006.
- [30] DIVYA G, PRAKASHV. Underwater acoustic networks[J]. International Journal of Scientific and Engineering Research, 2011: 72-83.
- [31] JIANG S M. Overview of underwater acoustic communication[M]//Wireless Networking Principles: From Terrestrial to Underwater Acoustic. Singapore: Springer Press, 2018: 233-244.
- [32] JIANG S M. Networking in oceans[J]. ACM Computing Surveys, 2021, 54(1): 1-33.
- [33] YAU K L A, SYED A R, HASHIM W, et al. Maritime networking: bringing Internet to the sea[J]. IEEE Access, 2019(7): 48236-48255.
- [34] LEUNG K C, LI V O K. Transmission control protocol (TCP) in wireless networks: issues, approaches, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2006, 8(4): 64-79.
- [35] LINDGREN A, DORIA A, DAVIES E, et al. Probabilistic routing protocol for intermittently connected networks[R]. RFC Editor, 2012.
- [36] 姜胜明, 戴璐. 一种海洋互联网用户移动性管理系统及其实现方法[P]. 2018.
- JIANG S M, DAI L. A location management method for marine internet users[P]. 2018.
- [37] 姜胜明. 海洋互联网的现状及挑战[Z]. 2013.
- JIANG S M. Marine Internet status and challenges[Z]. 2013.



- [38] JIANG S M. On the marine internet and its potential applications for underwater inter-networking[C]//Proceedings of the Eighth ACM International Conference on Underwater Networks and Systems - WUWNet '13. New York: ACM Press, 2013.
- [39] 陈芳炯. 海洋互联网专题[J]. 电信科学, 2018, 34(6): 1-36.
CHEN F J. Topic: marine internet[J]. Telecommunication Science, 2018, 34(6): 1-36.
- [40] 姜胜明, 单翔. 海洋互联网的应用前景[J]. 电信科学, 2019, 35(3): 62-68.
JIANG S M, SHAN X. Application prospects of marine internet[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(3): 62-68.
- [41] 刘桢. 无线 Ad Hoc 网络邻居发现方法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
LIU Z. Research on neighbor discovery in wireless Ad Hoc networks[D]. Suzhou: Soochow University, 2012.
- [42] 李艳芳. 无线机会网络中邻居节点的被动式探测[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
LI Y F. Passive-based neighbor detection in wireless opportunistic networks[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [43] HUANG Y, BHATTI S, SORENSEN A. Adaptive neighbor detection for mobile ad hoc networks[Z]. 2017.
- [44] Decoupling congestion control from TCP (semi-TCP) for multi-hop wireless networks[Z]. 2013.
- [45] Future wireless and optical networks: networking modes and cross-layer design[Z]. 2012.
- [46] 金海旻, 许胤龙, 王石. 无线网络中高效的匿名漫游安全协议[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8): 1961-1967.
JIN H M, XU Y L, WANG S. Highly efficient anonymous roaming for wireless network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(8): 1961-1967.

- [47] 高宗江, 张英俊, 孙培廷, 等. 无人驾驶船舶研究综述[J]. 大连海事大学学报, 2017, 43(2): 1-7.

GAO Z J, ZHANG Y J, SUN P T, et al. Research summary of unmanned ship[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2017, 43(2): 1-7.

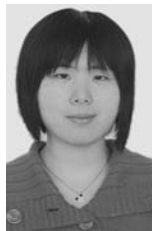
[作者简介]



姜胜明 (1964-), 男, 上海海事大学信息工程学院教授、博士生导师, 长期从事通信网络结构、协议和算法等工作, 2012 年率先提出海洋互联网 (marine internet) 概念, 主要研究方向为大型动态智能无线网络。



葛丽阁 (1992-), 女, 上海海事大学信息工程学院海洋互联网技术实验室博士生, 主要研究方向为基于海洋通信网络的链路预测和资源分配。



徐艳丽 (1984-), 女, 上海海事大学信息工程学院副教授, 主要研究方向为海上无线通信、边缘智能、物联网、移动通信等。