

天地一体化网络关键技术研究综述*

蒋长林¹, 李清¹, 王羽¹, 赵丹¹, 赵达毅¹, 江勇^{1,2}, 徐明伟^{1,3}



¹(鹏城实验室, 广东 深圳 518055)

²(清华大学 深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

³(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

通信作者: 李清, E-mail: liq@pcl.ac.cn

摘要: 作为地面网络的补充和延伸, 卫星网络有助于加速弥合区域间的数字鸿沟, 扩展地面网络的覆盖和服务范围. 然而卫星网络拓扑动态性高、传播时延大、星上计算能力和存储能力均受限, 因此实现卫星网络与地面网络的有机融合, 构建覆盖全球的天地一体化网络面临路由扩展性、传输稳定性等技术挑战. 针对天地一体化网络的研究挑战, 从网络架构、路由、传输和基于组播的内容分发等方面介绍了国内外的研究现状, 并展望了天地一体化网络的发展趋势.

关键词: 天地一体化网络; 路由; 传输; 软件定义网络; 网络功能虚拟化

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 蒋长林, 李清, 王羽, 赵丹, 赵达毅, 江勇, 徐明伟. 天地一体化网络关键技术研究综述. 软件学报, 2024, 35(1): 266–287. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6753.htm>

英文引用格式: Jiang CL, Li Q, Wang Y, Zhao D, Zhao DY, Jiang Y, Xu MW. Survey on Key Technologies in Space-ground Integrated Network. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2024, 35(1): 266–287 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6753.htm>

Survey on Key Technologies in Space-ground Integrated Network

JIANG Chang-Lin¹, LI Qing¹, WANG Yu¹, ZHAO Dan¹, ZHAO Da-Yi¹, JIANG Yong^{1,2}, XU Ming-Wei^{1,3}

¹(Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, China)

²(Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

³(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As a complement and extension of the terrestrial network, the satellite network contributes to the acceleration of bridging the digital divide between different regions and can expand the coverage and service range of the terrestrial network. However, the satellite network features highly dynamic topology, long transmission delay, and limited on-board computing and storage capacity. Hence, various technical challenges, including routing scalability and transmission stability, are encountered in the organic integration of the satellite network and the terrestrial network and the construction of a global space-ground integrated network (SGIN). Considering the research challenges of SGIN, this study describes the international and domestic research progress of SGIN in terms of network architecture, routing, transmission, multicast-based content delivery, etc., and then discusses the research trends.

Key words: space-ground integrated network (SGIN); routing; transmission; software defined network (SDN); network function virtualization (NFV)

据国际电信联盟 (international telecommunication union, ITU) 统计, 截至 2022 年, 全球约 49 亿人口在使用互联网. 但是, 仍然有约 27 亿人口受限于地域、经济条件等多方面因素, 未接入互联网^[1]. 随着 2020 年美国太空探索技术公司 (SpaceX)^[2]部署的低轨卫星星座星链 (Starlink)^[3]开始提供卫星网络公测服务, 卫星网络作为地面网络

* 基金项目: 鹏城实验室重大攻关项目 (PCL2021A03-1); 国家自然科学基金 (61972189)

收稿时间: 2022-02-17; 修改时间: 2022-06-21; 采用时间: 2022-07-25; jos 在线出版时间: 2022-10-27

CNKI 网络首发时间: 2023-02-09

的有效补充,为全球用户提供广覆盖的网络服务,越来越受到学术界和工业界的重视。

按照卫星轨道高度,大致可以将卫星分为地球同步轨道卫星(亦称高轨道卫星)、中轨道地球卫星和低轨道地球卫星3类,分别简称为 GEO (geostationary orbit)、MEO (medium earth orbit) 和 LEO (low earth orbit) 卫星。3类卫星的轨道高度分别距离地球表面约 36 000 公里,2 000 至 20 000 公里,500 至 1 500 公里。在实际部署时,网络提供商会根据应用需求确定采用单层网络还是多层网络。目前的卫星网络主要采用 Walker delta (倾斜星座) 和 Walker star (极轨道星座) 两种星座设计^[4]。在发展初期,卫星只能与地面网关通信,通信能力受限于卫星过顶时间。近年来,随着星间链路 (inter-satellite link, ISL) (有两类星间链路^[4],一类是连接同一轨道面的卫星之间的链路,称为 intra-plane ISL,一类是连接不同轨道面的卫星之间的链路,称作 inter-plane ISL) 的引入,卫星网络可以减少对地面网关的依赖,能够更为灵活地进行路由选择,通信能力得到显著提升。

相比于地面互联网,卫星网络具有以下几个显著的优势。

第一,覆盖范围广。理论上讲,3颗 GEO 卫星几乎就可实现全球覆盖。虽然 MEO/LEO 卫星的覆盖范围不如 GEO 卫星,但通过部署一定数量的中低轨卫星,也能形成一个覆盖全球的卫星网络。而且卫星网络可以覆盖沙漠、海洋等难以建立基站的区域,以及人烟稀少、部署成本高、经济回报低的偏远地区。依赖无缝的覆盖范围,卫星网络可以具有较大范围的机动性,在任何时间、任何地点都具备网络服务能力。

第二,支持大规模灵活通信。借助卫星的多波束能力、星上交换和处理技术,卫星可实现在指定区域内同时跟踪数百个目标,可对指定波束功率进行灵活调整,可按需实现点对点、一点对多点、多点对一点和多点对多点等通信方式。

第三,可应用于抗险救灾、应急通信等特殊场景。在发生自然灾害或战争情况下,地面通信设施一旦被损坏,地面网络将陷入瘫痪。卫星网络对地面基础设施依赖程度较低,不受自然灾害和战争等情况的影响,可以提供持续有效的通信服务。

正是由于卫星网络具有上述优势,它可以作为地面 5G 等移动通信网络的有效补充^[5-7],与地面网络融合,构建天地一体化网络,为全球用户提供按需网络服务。然而天地一体化网络是将异构网络互联,而且卫星网络拓扑动态性高、传播时延大、星上计算能力和存储能力均受限,因此实现卫星网络与地面网络的有机融合面临诸多的技术挑战^[8-10]。

第一,网络资源高动态与复杂业务对不同网络服务质量 (quality of service, QoS) 需求之间的矛盾。如何基于天地一体化动态组网的 IP 基座,研究网络功能柔性分割和动态编排机制,实现网络资源动态管控,适应用户不同的业务需求,是天地一体化网络面临的一个技术挑战。

第二,高动态异构网络与网络服务稳定性需求之间的矛盾。为了按需向上层应用提供稳定的网络服务,需要动态感知端到端路径中传输、计算及存储等网络资源,卫星网络拓扑高度动态时变的特性会对智能匹配复杂业务与多维资源、端到端路由寻址、用户切换等技术带来不小的挑战。

第三,空间链路时延大、间歇性连接等特性与端到端可靠传输之间的矛盾。空间链路一般采用带宽较大的微波或者激光链路,且传输距离远,具有较大的带宽时延积 (bandwidth delay product, BDP),再加上卫星网络拓扑高度动态时变特性,进一步加剧了端到端链路保持的难度和时延抖动的幅度,对端到端可靠传输技术带来了挑战。

面对天地一体化网络发展的重大机遇与关键挑战,本文主要介绍天地一体化网络架构、路由与传输等关键技术研究现状,并讨论天地一体化网络的研究与发展趋势。本文第 1 节简要介绍了天地一体化网络的发展现状,包括天地一体化网络部署情况和相关协议体系。第 2 节介绍天地一体化网络架构方面的研究进展,在传统天地一体化网络架构简要介绍基础上,结合软件定义网络 (software defined networking, SDN)^[11]和网络功能虚拟化 (network function virtualization, NFV)^[12]技术,讨论新的网络架构的研究进展。第 3 节总结归纳了天地一体化网络路由方面的研究进展,重点介绍基于 IP 的面向无连接的路由协议。第 4 节总结了天地一体化网络传输方面的研究进展。第 5 节介绍基于组播技术的天地一体化网络内容分发机制。最后,在第 6 节展望了天地一体化网络的发展趋势。

1 天地一体化网络发展现状

1.1 天地一体化网络部署情况

目前国外发达国家已经部署或正在快速部署多个卫星星座:高轨卫星星座的代表是国际海事卫星通信系统

Inmarsat^[13]. Inmarsat 目前由 14 颗距地球表面约 36000 公里的地球静止轨道卫星和位于地面的船站、岸站、网络协调站等主要部分组成,其客户主要包括各国政府、媒体机构、远洋船只和飞机等,为全球用户提供语音和数据传输服务.中轨卫星星座的代表是 O3b^[14].O3b 中轨星座最初由 O3b Networks 公司运营,整个星座由 20 颗距离地面表面约 6000 公里的中轨卫星组成,2014 年 3 月开始向客户提供服务.2016 年,O3b Networks 公司被欧洲卫星公司收购.为应对日益增长的用户需求,欧洲卫星公司目前正致力于打造下一代中轨星座 O3b mPOWER^[15],该星座由波音公司制造的 11 颗软件定义卫星^[16]构成,系统容量达 Tb 量级^[17].第 1 批 O3b mPOWER 卫星计划于 2022 年第 3 季度发射升空^[18].低轨卫星星座的主要代表包括 Iridium^[19]、OneWeb^[20]和 Starlink 等.其中,Iridium 系统于 1997 年开始部署第 1 代,由 66 颗距地球表面约 780 公里的低轨卫星构成,每颗卫星与其他 4 颗卫星相连,构成覆盖全球的一个低轨卫星星座,主要为用户提供语音服务.在经历破产、重组后,2019 年部署完成第 2 代铱星系统,为全球用户提供语音和数据(窄带、宽带)等多种服务.OneWeb 是一个由 648 颗低轨卫星组成的星座,目标是为全球用户提供互联网宽带服务.截止 2022 年 5 月底,OneWeb 公司共进行了 13 次发射活动,成功部署了 428 颗卫星^[21].Starlink 是 SpaceX 提出的一个巨型低轨卫星星座,卫星距地球表面约 550 公里,为全球用户提供宽带服务.Starlink 初期规划部署约 12000 颗卫星,最终目标部署超过 4 万颗卫星^[22].截止 2022 年 5 月底,Starlink 已经完成 2373 颗卫星的部署^[23].Starlink 目前已经在美国、加拿大、澳大利亚和英国等国家开展公测服务.澳大利亚一位用户对 Starlink 的移动测速试验结果表明,在百公里时速下,Starlink 可以达到 200 Mb/s 的下行速率^[24].

国内方面,中国航天科技集团的“鸿雁”星座、中国航天科工集团的“虹云”星座、中国电科的“天象”星座均只发射了一至两颗实验星或技术验证星;银河航天于 2022 年 3 月 5 日成功发射 6 颗低轨宽带通信卫星,构建了星地融合 5G 试验网络“小蜘蛛网”,通过该网络可实现单次 30 分钟左右的不断断低轨卫星宽带通信服务^[25].2021 年 4 月 28 日,中国卫星网络集团有限公司在雄安新区挂牌成立,对“虹云”“鸿雁”“天象”等多个星座进行统筹协调,加快推进国内卫星互联网事业高质量发展.

1.2 天地一体化网络协议体系

针对空间网络特点,空间网络标准化组织空间数据系统咨询委员会(consultative committee for space data systems,CCSDS)为国际空间站和深空探测器等在轨飞行器制定了一系列覆盖物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层的标准协议^[26],为不同国家航天任务之间开展协作与资源共享提供了统一的通信接口^[27].CCSDS 在物理层制定了无线射频和调制系统和 Proximity-1 空间链路协议,其中无线射频和调制系统定义了航天器与地面站之间空间链路的物理层协议,Proximity-1 空间链路协议定义了邻近空间链路的物理层特性.在数据链路层,CCSDS 定义了两个子层,分别是数据链路协议子层和同步与信道编码子层,数据链路协议子层工作在同步与信道编码子层之上,为遥控(telecommand,TC)、遥测(telemetry,TM)、高级在轨系统(advanced orbiting system,AOS)和邻近空间(Proximity-1)分别定义了传输变长数据的空间数据链路协议,这些协议的集合统称为空间数据链路协议(space data link protocols,SDLP)^[28].在网络层,通过定义空间分组协议(space packet protocol,SPP)^[29]实现空间网络路由功能.传输层使用 SCPS-TP(space communications protocol specification-transport protocol)^[30]协议实现端到端的可靠数据传输.在应用层,定义了文件传输协议(CCSDS file delivery protocol,CFDP)(严格地说,CFDP 同时工作在应用层和传输层)^[31]和各类压缩协议(例如:lossless data compression^[32]和 image data compression^[33]协议)等应用协议.

针对端到端传播时延大、且中间链路连通性无法保证的网络,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)喷气推进实验室提出了时延容忍网络(delay-tolerant networking,DTN)协议体系^[34,35],主要应用场景包括星际互联网(interplanetary Internet,IPN)、军事网络、空间网络等.由于链路的可用性不确定,与 TCP/IP 协议尽可能地以最快速度完成数据传输不同,时延容忍网络协议的目标是尽可能地实现数据的正确传输,并不追求传输的时效性.为实现上述目标,DTN 协议体系基于传统协议参考模型,在应用层与网络层之间增加了 Bundle 层,为每个节点配置了数据存储设备(如磁盘),采用“存储-携带-转发”消息传输机制,逐跳保证数据传输的可靠性和安全性.本质上来说,Bundle 层的功能与网关类似,可以实现底层不同传输协议的相互转换.

Licklider 传输协议是 DTN 体系中的另一核心协议, 可针对不同的需求, 提供可靠传输与不可靠传输两种模式. NASA 通过太空 DTN 计划, 进行了一系列的试验对 DTN 协议体系进行验证, 应用领域包括遥感、深空探测、中断通信等^[8]. 国际空间站上的实验载荷数据传输业务也使用了 DTN 协议^[27].

为实现空间网络与地面网络的融合, CCSDS 制定了 IP Over CCSDS 标准^[36], 提供了对 IP 协议的支持. 2022 年 3 月完成系统设计的 3GPP Release17 版本^[37], 定义了非地面网络 (non terrestrial networks, NTN) 与地面 5G 移动网络的融合标准, 将空间网络全面纳入全球无线标准体系. 通过借鉴互联网发展经验, 我们认为基于 IP 的协议体系将是天地一体化网络协议体系的发展趋势, 未来应在 CCSDS、DTN 等现有协议体系与 IP 协议体系融合成果的基础上, 充分考虑空间网络与地面网络的特点差异, 开展一体化协议体系的研究与验证, 确保异构网络的互联互通和高效一体化融合.

除了目前主流的射频技术, 无线光通信技术因容量大、速率高、抗干扰能力强等优势, 近年来越来越受到广泛关注^[38]. 但无线光链路与射频链路的物理特性不同, 对上层协议的设计带来了挑战. 赵雄文等人^[38]分析了无线光通信技术在天地一体化网络中的研究现状, 重点调研了无线光链路物理层和数据链路层的标准化工作, 进一步分析无线光链路对上层协议设计提出的挑战, 并总结了相关的研究进展.

本综述重点关注天地一体化网络在组网、传输与路由层面的研究进展, 不涉及物理层与数据链路层的研究. 下文重点从网络架构、路由及传输协议和基于组播的内容分发机制等方面对天地一体化网络的研究进展进行分析.

2 天地一体化网络架构

2.1 传统天地一体化网络架构

根据组网方式, 天地一体化网络架构的演进过程大致可以划分为 3 个阶段^[10]: 天星地网, 最初卫星之间没有星间链路, 卫星网络通过地面信关站与地面网络实现互联. 典型案例为 Inmarsat 系统. 天基网络, 采用该网络架构的网络仅通过卫星星间链路互联, 无需地面信关站, 直接为用户提供覆盖全球的信息服务. Iridium 系统就采用该网络架构. 天网地网, 卫星节点不仅通过星间链路互联组网, 同时卫星网络与地面互联网和移动网络联接与融合. 美国转型卫星通信系统 (transformational satellite communications system, TSAT)^[39]采用的就是这种网络架构. 由于在境外部署地面信关站面临的挑战性较大, 因此“天网地网”架构是未来天地一体化网络的发展趋势^[8,10].

图 1 显示了采用天网地网架构的一种天地一体化网络架构, 天基网络由各级卫星星座和地基节点网 (包含地面信关站等地面基础设施) 组成, 地面网络主要由地面互联网和移动互联网组成, 天基网络与地面网络通过天地一体化网络互联节点连接. 在卫星网络发展初期阶段, 高轨卫星星座主要提供宽带服务, 中/低轨卫星星座主要提供窄带服务^[40], 但随着技术的发展, 不同轨道高度的卫星星座信道容量的界限越来越模糊, 例如 O3b Networks 公司打造的下一代中轨星座 O3b mPOWER 系统容量高达 Tb 级别, 可按需提供几十 Mb/s 至 Gb/s 级别的带宽^[17]. 另外, 在某些网络架构中, 还包括由无人机、飞艇、飞机等组成的浮空网络部分, 例如欧盟的 ABSOLUTE 系统^[41]、谷歌提出的热气球网络计划 (loon)^[42]、Facebook 提出的 Aquila 无人机组网计划^[43], 但上述项目都因经费等原因叫停, 未得到大规模应用, 因此本文不包含浮空网络部分的研究内容.

近年来, SDN 和 NFV 技术在地面网络中得到了广泛应用. 本质上来讲, SDN 将所有的控制逻辑放到控制器中, 控制器按照上层应用的需求计算路由, 通过 OpenFlow 协议^[11]与网络设备通信, 动态设定转发表, 网络交换设备只需按照转发表完成最纯粹的数据转发功能即可. NFV 将网络功能从传统的专用硬件设备中抽离出来, 通过虚拟化技术以软件的形式运行在通用设备上, 并通过对这些服务进行动态编排, 实现对用户的按需服务. 由于 SDN 将网络的控制平面与数据平面分开, NFV 将设备的管理平面与操作平面分开, 可以大幅提升网络的可管理性和灵活性, 使得快速部署新的网络功能成为现实. 因此, 在学术界和工业界, SDN 和 NFV 技术在天地一体化网络中的应用也成为近年来的研究热点. 已有的网络架构方案中, 一类仅运用了 SDN 技术, 另一类融合了 SDN 和 NFV 技术. 下面分别对这两类方案进行介绍, 最后给出所有方案的分析比较.

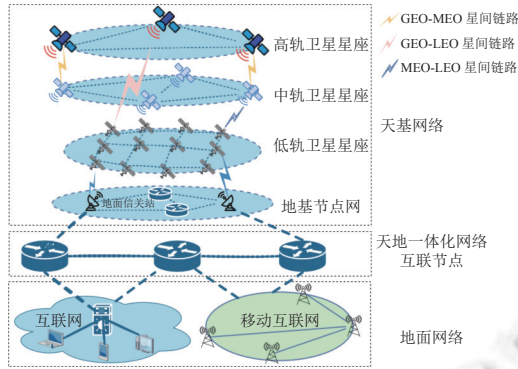


图 1 天地一体化网络架构

2.2 基于 SDN 的天地一体化网络架构

Bao 等人首次将 SDN 技术引入卫星网络, 提出了一个基于 SDN 的卫星网络架构 OpenSAN^[44]. OpenSAN 利用 SDN 技术将卫星网络的控制平面和数据平面剥离开, 同时增加一个管理平面. 其中, 数据平面包括非高轨卫星和地面的交换设备, 控制平面为高轨卫星, 管理平面由位于地面的网络操作控制中心 (network operation control center, NOCC) 构成, 实施对卫星网络的控制, 如路由计算、移动性管理等. 基于 OpenSAN 的设计思想, Tang 等人提出了一个更完善的网络框架 SDSN^[45], 如图 2 所示, 主要由 3 部分组成: 卫星网络、地面信关站 (ground station, GS) 和 NOCC. 其中, GS 对应 SDN 架构中的控制器 (controller), 负责接收来自 NOCC 的路由表和应用配置策略, 将其转化为卫星能够识别的数据结构, 并上传至各卫星. 同时, GS 监测卫星星座的运行状态, 接收卫星发来的网络状态信息. NOCC 接受来自 GS 的网络状态信息, 据此计算路由. 根据计算结果, 确定星上硬件配置 (如波束大小、功率分配、调制模式等). 最后, 路由计算结果和配置信息通过 GS 上传至卫星. 为了保证信息上传的效率, 在大规模信息更新的时候, GS 将指令上传至 GEO, 由 GEO 通过组播方式分发给相应的 LEO. 小规模信息更新时, GS 直接将指令上传至相应的 LEO. 相较于传统网络架构, 该架构更易实现全局最优的路由和配置策略, 提升网络的灵活性和可控制性, 同时可以有效降低卫星的制造成本. 但在实际部署时, 一方面控制器的接口设计可能会受限于目前技术的限制 (如 OpenFlow 规则的不丰富性等), 另一方面对卫星载荷的设计也提出更高的要求, 需要考虑未来的应用需求, 尽可能地延长在轨寿命. Feng 等人基于 SDN 技术提出一个应用于快速响应空间 (operationally responsive space, ORS) 的卫星网络架构 SDN-SatArc^[46], 如图 3 所示. SDN-SatArc 将主要的控制逻辑部署在计算和存储资源充足的地面网络, 主要包括任务控制中心和 SDN 控制器. 其中, 任务控制中心负责向 SDN 控制器提出任务需求, SDN 控制器根据任务需求计算所需资源, 并将相关指令上传至对应的卫星, 卫星仅执行指令. 从参考模型角度来看, SDN-SatArc 包括各类交换设备构成的物理层, 运行各类控制软件的控制层和为用户提供各类服务的应用层. 物理层与控制层之间通过 OpenFlow 接口通信, 控制层与应用层之间通过应用编程接口通信, 实现 ORS 卫星网络与其他网络的融合, 提升了网络在应对紧急情况下的灵活性.

上述方案都是将集中控制器部署在高轨卫星或者地面, 文献 [47] 针对由多层卫星网络、高/低空平台和地面网络组成的融合网络, 提出一种跨域的 SDN 架构, 将集中控制器同时部署在高轨卫星、高空平台和地面网络中, 低轨卫星和低空平台仅作为数据平面, 接受控制器的指令, 实施数据转发. 由于高轨卫星和高空平台具有较广的覆盖范围, 通过对控制信息实施分层管理, 能够较之前的方案更加高效地实现对低轨卫星和低空平台的控制. Tang 将多层卫星网络和地面网络组成的天地一体化网络划分为控制域 (control domain)、超级控制域 (super control domain) 和自治域 (autonomous domain) 这 3 层^[48], 网络架构如图 4 所示. 多个控制域构成一个超级控制域, 多个超级控制域构成一个自治域. 一般地, 对于空间网络, 一个卫星星座构成一个自治域, 地面网络按照运营实体划分为若干个自治域. 控制域和超级控制域分别配置一个控制器 (controller) 和超级控制器 (super controller), 实现分层的控制架构. 基于该网络架构, 提出基于时隙的天地一体化网络协作传输机制 DEEPER, 使用链路种类、可用带宽和

流量负载定义网络中每条链路的传输代价, 在每个时隙开始时, DEEPER 为各控制域的边缘节点矩阵计算传输代价矩阵, 按照流量需求, 基于传输代价最小的原则, 确定每条流在不同层级控制域的传输路径, 通过在异构网络中同时传输数据实现最大吞吐量.

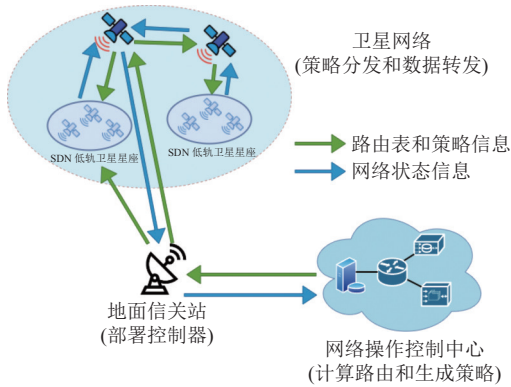


图2 SDSN 网络控制架构

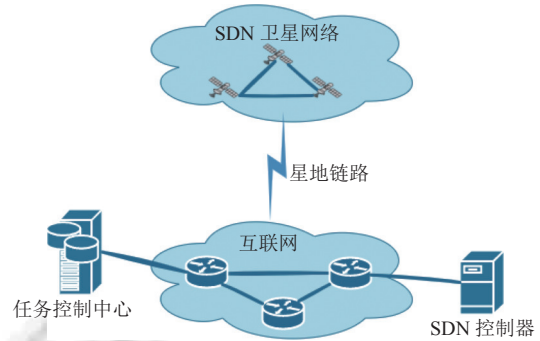


图3 SDN-SatArc 网络架构

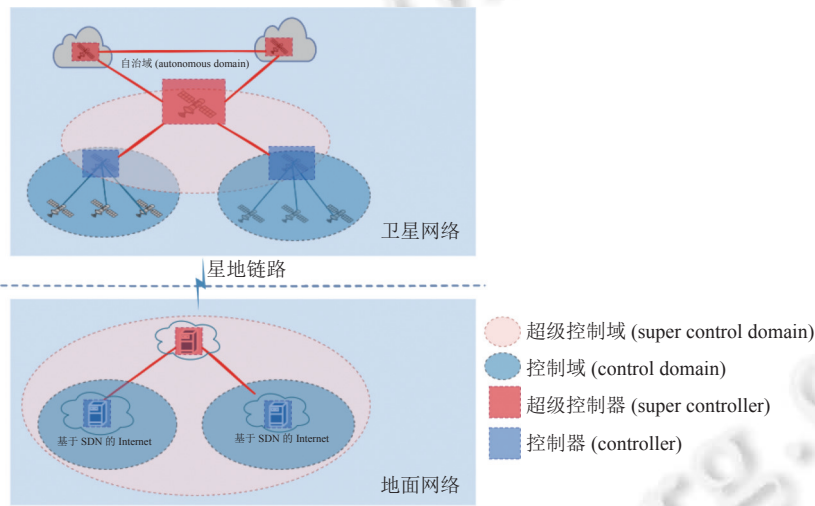


图4 基于 SDN 的分层控制网络架构

除了对运用 SDN 技术的网络架构和应用方案的研究外, Papa 等人对基于 SDN 的低轨卫星网络中控制器动态放置问题进行研究^[49]. 作者将控制器动态放置问题归约为一个整数线性规划问题, 求解目标是给定一个流的集合, 最小化平均流建立时间. 为了计算所有通信对之间的通信路径, 作者采用“快照”技术屏蔽卫星网络的高动态性, 每隔一小时计算未来一小时的所有“快照”, 并基于每个“快照”计算路由. 仿真结果显示, 静态放置无法适应流量波动, 动态放置控制器性能优于静态放置. 但在实际部署时, 还需仔细考虑控制器的迁移成本. 李恒智等人提出了基于 SDN 的卫星网络分布式移动管理方案 SDN-DMM^[50]. SDN-DMM 的核心思想是在卫星中部署负责终端接入和数据转发的锚点 (anchor), 在地面网关中部署负责位置管理和数据转发的锚点. 借助 SDN 对网络的灵活控制, 在地面网关中实现位置共享, 并根据移动节点位置动态、快速地更新路由表项, 保证移动节点总能通过最近的网关接收数据, 减少标准移动 IP 协议中外地代理与家乡代理间交互的控制信息对卫星网络宝贵的带宽资源和计算资源的占用.

2.3 融合 SDN 与 NFV 的天地一体化网络架构

Ferrús 等人^[51]通过卫星网络虚拟化与多租户、4G/5G 卫星回传业务和卫星与地面网络混合接入服务 3 个案

例, 从不同角度深入阐述了在卫星网络中运用 SDN 与 VNF 技术对卫星运营商、卫星网络运营商、网络接入服务提供商、服务提供商等不同角色带来的优势和存在的挑战, 较全面地展示了 SDN 和 VNF 技术可以大幅提升卫星网络灵活性. 在此基础上, Ahmed 等人提出了一个基于 SDN 和 VNF 技术的卫星无线接入网络架构 SatCloudRAN^[52]. SatCloudRAN 以基于 DVB-S2 和 DVB-RCS2 协议的高轨卫星网络为例, 讨论了基于 SDN 和 VNF 技术的网络控制架构, 确定了数据平面和控制平面的组成, 并就网络功能进行了虚拟化和非虚拟化的划分. 最后通过按需分配带宽、动态 QoS 保证等用例, 展示了 SatCloudRAN 利用云基础设施和网络虚拟化技术, 可以为用户提供高性价比的资源可获得性和灵活的资源共享. Sheng 等人结合 SDN 和 NFV 技术, 提出一个由基础设施层、虚拟网络层和应用层组成的卫星网络架构 FRBSN (flexible and reconfigurable broadband satellite network)^[53], 如图 5(a) 所示. 其中基础设施层的硬件支持 SDN, 虚拟网络层运用 NFV 技术将来自不同基础设施提供商的网络资源进行切片. 与传统网络一个应用任务独占相应的网络资源不同, FRBSN 可以将具有相同服务需求 (对应图中的应用任务) 的应用任务聚合, 基于应用层不同的用户需求构建相应的覆盖网络, 为用户提供服务. 图 5(b) 给出了一个简单的 FRBSN 部署示意图. 为了实现全网资源的最优配置, FRBSN 配置了网络重构控制器, 该控制器部署在地面的网络操作控制中心. 网络重构控制器基于全网资源计算最优资源配置规则, 通过地面站上传至各卫星节点, 卫星节点只做规则的翻译和执行即可. 为计算最优资源配置规则, FRBSN 创新性地提出随时间演进的资源图 TERG (time-evolving resource graph), 从时间和空间两个维度表示各类资源的可持续性和相互关系. 基于 TERG, 将网络资源分配问题归约为网络效用最大化 (network utility maximization, NUM) 问题, 通过求解该问题生成最优的资源配置规则. Ferrus 等人提出的网络架构^[54]主要包含 3 部分: 一是虚拟化的网络基础设施, 网络资源、计算资源和存储资源全部虚拟化; 二是虚拟化的卫星网络, 利用 NFV 技术将大部分卫星网络的功能以软件模块形式实现; 三是管理模块, 包括 NFV 资源管理器、服务编排器和卫星基带资源控制器等, 实施卫星通信服务虚拟化和动态编排. 基于该网络架构, 文献 [54] 给出了实例化一个虚拟卫星网络的业务流程, 并用一个简单的试验环境对方案进行了验证.

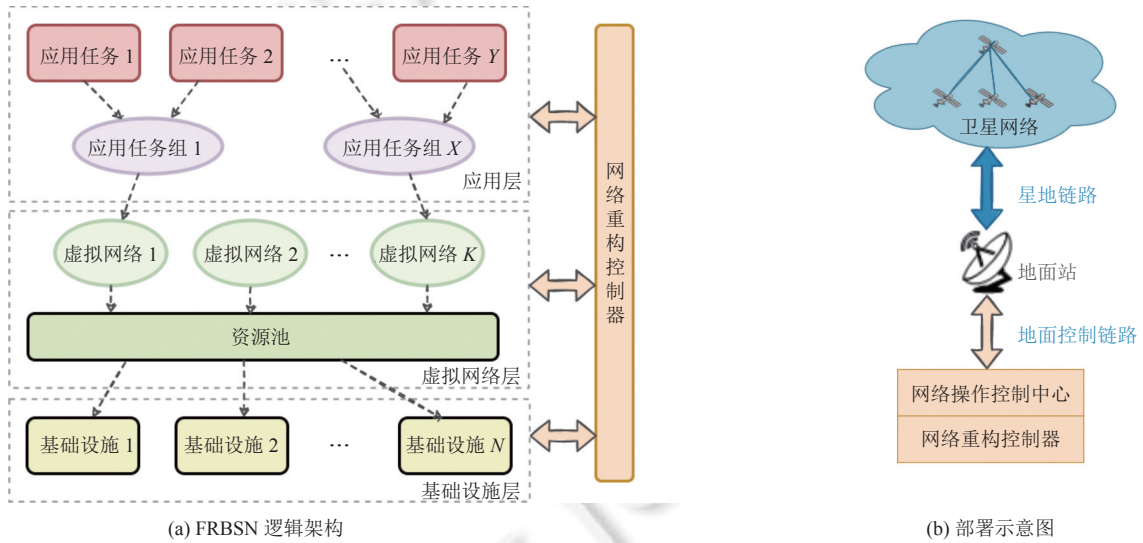


图 5 FRBSN 逻辑架构和部署示意图

上述的方案均未考虑卫星网络与地面网络的整合, 下述方案通过运用 SDN 和 VNF 技术实现了天地网络的融合: Feng 等人提出了网络架构 HetNet^[55], 一方面运用位置/身份分离和信息中心网络 (information-centric network, ICN) 技术解决传统 IP 网络路由可扩展性差、移动支持弱、无法提供有效的流量工程等问题; 另一方面借助 SDN 技术将网络的数据平面与控制平面剥离, 并利用 VNF 技术将网络功能软件化、实施按需部署, 实现异构网络互联和对用户需求的快速响应, 提升了网络的灵活性和控制性. Li 等人提出的网络架构 SERvICE^[56]分为管理平面、控制平面和转发平面 3 部分, 如图 6 所示. 其中, 管理平面由位于地面的卫星网络管理中心 (satellite network

management center, SNMC) 构成, 根据网络状态信息和用户需求生成路由、安全、QoS 等各类策略. 控制平面由 GEO 卫星、位于数据中心和卫星网关中的控制器组成, 收集链路状态等信息并发送给 SNMC, 同时接受来自 SNMC 的各种策略, 并将其分发给转发平面. 转发平面包括空间网络中的 MEO 和 LEO 卫星, 以及地面网络中的各类交换设备, 包括但不限于路由器、交换机和网关等. 为了更好地融合卫星网络与地面网络, SERvICE 运用了 VNF 技术, 将地面网络与卫星网络之间的部分通信功能抽象为各类 VNF, SNMC 通过调用这些 VNF 实现这两个网络的融合.

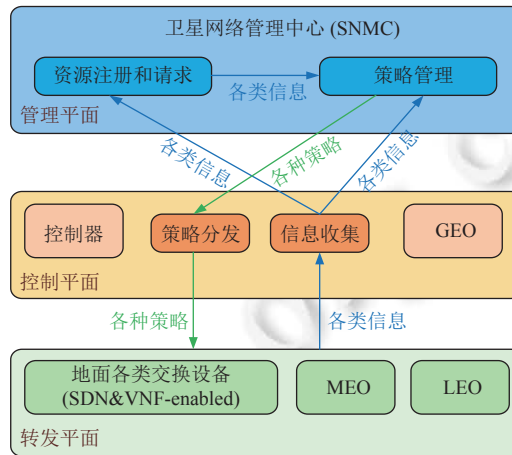


图6 SERvICE网络架构

除了上述对网络架构的研究, Ferrus 等人通过端到端最优路径计算和拥塞/故障预防两个案例分析, 展示了如何在卫星网络中运用 SDN 和 VNF 技术实施端到端流量工程^[57]. Bertaux 等人研究了通过运用 SDN 和 VNF 技术, 实现中间件虚拟化、促进卫星网络与地面网络融合、提升虚拟网络运营商服务等多个案例的可行性^[58], 并就达成上述目标所需的工作进行了讨论.

2.4 方案对比

为了更直观地展现上述各方案采用的技术路线, 我们从控制器部署范围、控制方式(集中/分布)、应用场景等维度对上文中提及的网络方案进行了对比. 详情见表 1.

表 1 网络软件定义化和虚拟化方案的对比

方案名称	控制器部署范围	控制方式	是否应用 SDN 技术	是否应用 VNF 技术	适用卫星网络拓扑	是否考虑与地面网络的融合
OpenSAN ^[44]	高轨卫星	不限	是	否	多层	否
SDSN ^[45]	地面	集中式控制	是	否	多层	否
SDN-SatArc ^[46]	地面	集中式控制	是	否	多层	是
一个跨域的SDN架构 ^[47]	高轨卫星、高空平台和地面	分布式控制	是	否	多层	是
Tang提出的方案 ^[48]	各级卫星轨道和地面	分布式控制	是	否	不限	是
SatCloudRAN ^[52]	高轨卫星	不限	是	是	高轨卫星网络	否
HetNet ^[55]	地面	分布式控制	是	是	多层	是
FRBSN ^[53]	地面	集中式控制	是	是	多层	否
SERvICE ^[56]	高轨卫星和地面	分布式控制	是	是	多层	是
Ferrus等人提出的方案 ^[57]	不限	不限	是	是	不限	否

实际上,除了上述学术界的研究成果,SDN 技术已经在商业卫星中得到了应用,例如,欧洲卫星公司的下一代中轨星座 O3b mPOWER^[12]就将全部采用由波音公司制造的具备 SDN 功能的卫星^[13],运营商可以通过从地面注入指令对星上载荷功能进行在线重构,以及实施星上各类资源的动态分配,极大提升了卫星的性能和灵活性,延长了卫星在轨寿命;国内 2019 年发射的两颗“天象”试验星,搭载国内首款软件定义的天基路由器成功进入预定轨道,并在轨实施了低轨星间链路组网传输等试验,在国内首次构建了基于软件重构功能的开放式验证平台^[59]。

地面网络的大面积运用已经充分证明 SDN 和 VNF 技术可以大幅提升网络的可管理性和灵活性.本节讨论的若干方案对 SDN 和 VNF 技术在天地一体化网络的应用做出了非常有益的探索,我们认为 SDN 和 VNF 技术能够有效促进异构网络的有机融合,将在天地一体化网络中得到进一步的广泛运用,但随之引入的 controller 放置、动态网络切片等问题值得持续关注。

3 天地一体化网络路由协议

与地面拓扑相对固定不同,空间网络拓扑具有高动态性特点.以典型的 Walker 星座为例,当卫星数量超过 450 时,不到 20 s 就会发生一次拓扑变化^[60].因此,在设计天地一体化网络路由协议时,需满足收敛速度快、协议开销低、路由稳定性高等特点.按照实现机制,我们将天地一体化网络路由协议大致分为两类,面向连接的路由协议和面向无连接的路由协议.在初期阶段,学术界和工业界主要将精力用于研究面向连接的路由协议,主要的研究成果是运用 ATM 技术在卫星网络中实现可靠的数据传输.近年来,随着卫星网络的发展,星上计算能力和存储能力不断提升,网络规模不断扩大,IP 技术在卫星网络中的运用越来越受关注,并提出了一系列面向无连接的路由协议.下面我们分别对这些协议方案进行简要介绍。

3.1 面向连接的路由协议

面向连接的路由协议采用 ATM 技术,把所有卫星作为虚路径 (virtual path, VP) 上的交换节点.为了解决卫星网络高动态性导致的路由不稳定性问题,所有面向连接的路由协议均采用了“快照”技术,把时间进行切片,假设在每一个时间片中卫星网络的拓扑是固定的.基于这样的假设, Werner 提出名为 DT-DVTR 的路由算法^[61],该算法是一个离线算法,即在卫星网络发射之前把路由计算好,并将路由表项注入各卫星.该方案将路由计算划分为两步:第 1 步,按照卫星星座的设计参数,确定每个时间切片内的拓扑,并据此计算出时间片连续情况下所有源到目的端的路径(可能存在多条路径).第 2 步,考虑时延抖动、卫星切换 (handover) 频率等因素,从第 1 步计算出的路径中选取最优路径.在 DT-DVTR 方案的基础上,文献 [62] 为每一条路径引入了权重值,权重值的设定与路径长短、链路连接的可持续性和卫星所处的地理位置有关.通过为每条路径赋值权重,以此表征该条路径的使用代价.算法为所有可能的路径计算总权重值,并将此信息作为优化的输入.优化操作会衡量在当前时间片拓扑环境下使用前一时间片选定的路径的代价是否超过设定的阈值,如果没有超过就继续使用,否则需进行卫星切换,切换到更优的路径.可以看出,该方案优化的目标是在时间片切换后,尽量减少卫星切换、沿用上一时间片的传输路径,从而降低系统开销。

3.2 面向无连接的路由协议

随着星上计算能力和存储能力的不断提升,卫星网络规模的大幅扩大,以及互联网应用的快速增长,卫星网络 IP 化成为必然趋势^[63].自 Hashimoto 等人在 1998 年率先提出基于 IP 的面向无连接的卫星网络路由协议^[64]以来,涌现出了一批面向无连接的路由协议方案,大致可以分为基于位置信息的路由协议、基于业务需求的路由协议、节能路由协议、负载均衡路由协议、切换重路由协议和对标准 IP 路由协议优化几大类.下面我们分别对上述几类路由协议进行介绍,最后给出各类方案分析比较。

3.2.1 基于位置信息的路由协议

按照实现机制,基于位置信息的路由协议可以分为基于空间位置的路由协议、基于卫星覆盖地理范围的路由协议和基于终端地理位置信息的路由协议 3 个子类。

基于空间位置的路由协议.针对多层卫星网络, Akyildiz 等人提出适用于高、中、低轨卫星组成的卫星网络的路由协议 MLSR^[65].MLSR 路由表由某一个掌握全网拓扑的高轨卫星计算.全网拓扑信息由低轨卫星自底向上

传递,待高轨卫星收集完全网拓扑信息后,计算路由自顶向下进行分发。为减少路由表的计算复杂度和传递的数据量,MLSR将低轨卫星按照空间逻辑位置划分为多个组,每个组简化为一个虚拟节点,因此低轨卫星的拓扑对高轨卫星来说是透明的。Yang等人提出了一种基于拓扑发现的路由协议TDS-IRS^[66],主要包括4个部分:部署在地面的控制中心,以及部署在卫星上的路由协议实现模块、拓扑发现模块和拓扑生成模块。地面控制中心是整个路由机制的中枢,负责根据卫星星座的运行规律,基于加权完美匹配(weighted perfect matching)的拓扑发现模型,在拓扑发生变化前计算出新的网络拓扑信息,并将新的拓扑信息发给各卫星的拓扑发现模块。拓扑发现模块收到新的网络拓扑信息后,调用路由协议实现模块计算路由信息,更新路由表。同时,拓扑生成模块被调用,调整卫星上的天线指向,构建相应的物理拓扑。仿真结果显示,TDS-IRS可以在不同情况下将网络吞吐量提升47%–105%。Chen等人针对由MEO和LEO组成的两层卫星网络提出了一个分布式路由协议SGRP(satellite grouping and routing protocol)^[67]。SGRP将控制层与数据层解耦,MEO卫星为控制层,只参与路由表的计算,不参与实际的数据传输。LEO卫星一方面负责拓扑信息收集并告知MEO卫星,另一方面根据MEO卫星分发的路由信息进行数据转发。为提高效率,SGRP将LEO卫星按照MEO卫星的覆盖范围划分为若干个组,每组选取一个MEO卫星作为其管理者。组内的LEO卫星定期收集拓扑信息,并向其MEO管理者汇报,MEO卫星之间互相通告各组的拓扑信息。待MEO卫星掌握了全网的拓扑信息后,即可计算出其负责的所有LEO卫星到达其他LEO卫星的最短延时路径。为应对网络拥塞和故障,LEO卫星发现链路拥塞和卫星发生故障时,会及时通告MEO卫星。MEO卫星据此会重新计算受影响的路由,以此降低拥塞或故障对系统性能的影响。仿真结果显示,在链路拥塞或卫星发生故障情况下,SGRP的性能与最短路径算法性能相当。

针对低轨卫星星座,Ekici等人提出的路由算法DRA(datagram routing algorithm)^[68]使用卫星所在轨道的编号和在该轨道内的索引作为虚拟地址,根据卫星的相对位置信息计算转发的下一跳,无需各节点之间传递任何链路状态信息,极大缓解了卫星网络高动态性对网络资源带来的压力,从根本上解决星上路由表项“爆炸”的问题。Pan等人借助卫星网络拓扑可预测性的特点,提出基于卫星空间位置的路由协议OPSPF^[69]。在正常情况下,OPSPF不需要在全网中交换链路状态信息,每颗卫星定期根据所处的位置信息和卫星网络参数推算出排除极地区的网络拓扑,并在此基础上使用最短路径算法计算路由表项。为了应对故障,OPSPF在邻居之间交换Hello报文确定邻居可达性。若因故障导致邻居不可达,卫星会及时更新本地网络拓扑并重新计算路由,同时在全网洪泛链接状态更新信息。OPSPF屏蔽了因进出极地区域导致的拓扑变化,且无需在网络中频繁交换路由信息,减少因拓扑变化带来的路由计算开销。仿真结果显示,在非常规拓扑变化情况下,相较于OSPF,OPSPF可以将通信开销和路由收敛时间分别降低57%和82%。Zhang等人提出一个基于区域划分的分布式路由协议ASER(area-based satellite routing)^[60]。ASER将网络空间划分为不同的虚拟区域,一旦区域划定,每个卫星节点的位置就确定,ASER基于该虚拟地址计算路由。ASER将路由划分为两类:区域内的路由和区域间的路由,区域内路由的广播信息只会在该区域内传递,区域间的路由信息才会在全网传播。为了减少区域间路由信息的通告,每个区域只选举出一个路由器进行路由通告。试验结果表明,相较于OSPF,ASER通过区域间-区域内层级化的路由方式,将路由收敛时间最多降低50%,同时大大减少带宽和计算开销。

基于卫星覆盖地理范围的路由协议。Hashimoto等人提出^[64]基于卫星当前覆盖地理范围的IP路由协议,尽可能地屏蔽卫星网络的高动态性和地面用户的移动性。路由设备通过虚拟地址判断是通过星间链路路由至下一跳卫星或者直接通过卫星与地面的链路将报文传递给地面网关。待报文发送到与目的端相连的地面网关后,由地面网关完成虚拟地址与实际IP地址的映射。为了方便中间节点的处理,该方案借鉴了ATM技术体制,使用了固定大小的报文。但在实际部署时,海外建站会比较困难,会影响整个网络的覆盖范围。

基于终端地理位置信息的路由协议。文献[70,71]将地球表面范围分为若干个单元(cell),每个单元的覆盖范围小于单个卫星的覆盖范围,只有移动终端移出某个单元、进入另一个单元时才会导致重新计算路由。由于地面移动终端的移动速度远远小于卫星的移动速度,因此终端移出单元的几率远远小于移出卫星覆盖范围的几率,通过使用单元位置进行路由可以大大降低路由切换的次数。不过文献[70]也指出,在极地附近星间链路断开的区域(seam区域),基于地理位置的路由协议性能较低,因为在seam区域会发生通信中断的极端情况。另外,单元大小的

选取对于路由算法的性能也有很重要的影响,但上述方案均未对单元大小选择的规则给出明确的分析.李贺武等人提出的路由协议 LA-ISTN^[72],其核心思想是摒弃传统路由协议采用的邻居之间交换链路状态信息、分布式计算路由的方法,而是将终端的地理位置信息(终端对应的地球表面区块编码信息或者对应的经纬度信息)放入 IPv6 地址中,每颗卫星直接通过目的地址中包含的地理位置信息确定目的端的方位,并通过基于接口方向角比较的转发接口选择算法或者基于星间相对位置的转发接口选择算法计算转发路径.因此,相较 OSPF,该协议稳定性更强,但对网络拥塞和网络故障的反应比较迟钝.

3.2.2 基于业务需求的路由协议

为适应不同流量, Svirgelj 等人提出了依赖于流量类别的路由协议 TCD (traffic class dependent)^[73],其核心思想是针对不同的流量类型,根据不同的衡量标准计算相应的路由表.作者考虑了 3 种类型的流量,分别是对实时性要求高的流量(要求延时最小)、对吞吐量有要求的流量(要求吞吐量最大)和其他无特殊要求的流量(best-effort).TCD 对要求延时最小和 best-effort 的流量使用标准 Dijkstra 最短路径算法计算路由,对吞吐量要求比较高的流量使用 Bellman-Ford 最短路径算法计算路由.仿真结果显示,TCD 在平均报文传输时延和吞吐量等方面均优于传统的不区分流量类别的路由协议,而且还可以显著减少网络中过载的链路数量.

为解决集中路由可扩展性和可靠性问题, Papapetrou 等人提出一种待业务发生、有路由需求时再计算路由的协议 LAOR^[74],把主动计算路由变为被动计算路由.为提升性能,LAOR 不仅考虑了传播时延,还考虑了排队时延,以更真实地反映网络拥塞情况.为解决分布式路由算法的可扩展性问题,LAOR 把链路状态信息的交互限定在包含源端和目的端的最小逻辑矩形范围内,通过在该范围内交换路由请求和路由回复报文^[75],确定最短路径.不过当网络中连接数较大时,LAOR 信令的开销会占用较多带宽. Karapantazis 等人在 LAOR 的基础上,增加了对不同流量的支持,提出了基于流量类别的路由协议 MOR^[76].与 TCD 协议类似,MOR 将流量分为对时延敏感的流量、对带宽有要求的流量和 best-effort 流量.对时延敏感的流量和 best-effort 流量,MOR 计算路由时考虑传播时延与排队时延的总和,并采用 Dijkstra 算法计算最短路径.对吞吐量敏感的流量计算路由时,MOR 考虑可用带宽,采用 Bellman-Ford 算法计算最短路径.不过该方案在每颗卫星上为所有通信对分别计算和记录上述 3 类流量的路由,会对星上的计算资源和存储资源带来不小的压力.

针对实时通信(real-time communication, RTC)业务,Lai 等人提出名为 SpaceRTC^[77]的解决方案.为解决卫星网络拓扑高动态性的问题,SpaceRTC 将时间划分为若干个时隙,假设在每个时隙中网络拓扑固定.在每个时隙中,SpaceRTC 汇聚当前用户的业务需求(通信对象、带宽需求等),在给定的网络资源情况(星地链路数量及带宽等)下,给出了路由计算和负载分配算法.模拟结果显示,SpaceRTC 最高可以减少 64.9% 的通信时延.

3.2.3 节能路由协议

Yang 等人提出了一种节能路由协议^[78].Yang 等人首先从星间路由器的能耗、太阳帆板功率和电池充放电的存储功率 3 个方面进行了建模,继而在上述模型的基础上,以降低能耗、延长卫星在轨使用寿命为目标,给出了节能空间路由算法的形式化定义.作者证明了该问题是一个 NP-hard 问题,并给出 GreenSR、GreenSR-A 和 GreenSR-B 这 3 个路由算法求解该问题.为了实现节能目标,GreenSR-B 算法可以最小化全网设备充/放电周期的数量;GreenSR-A 算法将无流量的路由器设置为休眠模式;GreenSR 算法在计算路由时会综合考虑能源利用率、路径长度和链路利用率.上述路由算法由地面网关或某个资源充裕的高轨卫星执行,并将计算结果分发给相关的网络节点.仿真结果显示,GreenSR 算法可以将卫星电池的寿命至少延长 40%.但卫星网络运营商在实际操作时,出于安全和可靠性等因素考虑,可能会限制星上设备的开关机次数、充/放电频率等,因此该协议在实际部署时可能会受到不同程度的限制.

3.2.4 负载均衡路由协议

针对低轨星座的负载均衡问题,Rao 等人提出基于代理的路由协议 ALBR (agent-based load balancing routing)^[79].ALBR 为每颗卫星设置了一个静态代理(stationary agent, SA),SA 定期生成移动代理(mobile agent, MA),MA 会搜寻从源卫星到目的卫星的路径,并收集每条星间链路的代价和排队时延.到达目的卫星后,MA 会沿着相同的路径返回源卫星,并将之前收集到的网络状态信息告知途经的每一颗卫星中的 SA.SA 在收到的网络

状态信息基础上,为每一条星间链路引入与卫星所处纬度相关的代价修改因子(cost modification factor),以最小化端到端延时为目标计算路由,将原本集中在低纬度、高负载区域的流量往高纬度、低负载的区域引导,从而缓解网络拥塞情况,达到全网范围内的负载均衡。虽然通过代理的方式,ALBR可以减少全网路由状态信息的交互,但是卫星网络的高动态性导致该协议的计算开销和存储开销都较大。Song等人提出的路由协议TLR^[80]在一个轨道面内选举出一个卫星作为orbit speaker,只有orbit speaker可以向其他轨道面通告本轨道面的网络状态信息,其他卫星只能在本轨道面内通告网络状态信息。由于卫星网络的拓扑是可预测的,通告的信息只需包含诸如平均排队延时、意外发生的链路断开等不确定的信息,因此各轨道面间通告的信息量比较少。为实现负载均衡,TLR在计算路由时,为每一个目的端保留代表最优路径和次优路径的两条路由表项。当卫星收到一个报文后,结合路由表的查询结果和对应转发端口的拥塞程度(空闲、一般拥塞、严重拥塞)确定报文是采用最优路径还是次优路径转发。如果最优路径和次优路径对应的转发端口均处于拥塞状态、无法发送报文,则将报文存入由各个转发端口中空余的缓存构成的公共等待队列。Mohorcic等人提出的路由协议ALR^[81]在计算路由时综合考虑流量负载和传播延时,同时保留最优路径和次优路径(标准Dijkstra算法在计算路由时仅保留最短路径)。ALR有两种路由选择策略,分别是ALR-S和ALR-A,ALR-S只对产生报文的卫星使用次优路径,其他卫星仍然使用最优路径,ALR-A对来自同一条流的报文在最优路径和次优路径中进行轮询转发。相较于标准Dijkstra算法,ALR-S仅在源端处理作了改动,ALR-A则对所有节点进行了改动。整体来说,ALR会较标准Dijkstra算法减少inter-plane ISL的负载,让网络流量更加均衡。另外,由于ALR-A在最优路径和次优路径中轮询,因此路由表的变化比较小,路由抖动较标准路由算法小。但ALR在计算路由时需使用流量权重因子(traffic weight factor, TWF)和传播延时权重因子(propagation delay weight factor, PDWF),TWF和PDWF数值的选择对性能影响较大,而且轮询操作也会增加星上开销。Taleb等人提出的ELB(explicit load balancing)协议^[82]为每颗卫星的队列设置了两个阈值 α 和 β ($\alpha < \beta$),用于判断队列的拥塞程度。每颗卫星定期检查队列长度,当队列长度超过 α 时,该卫星(以下简称卫星A)会向邻居卫星(以下简称卫星B)发送警告信息。卫星B收到警告信息后,会寻找到达目的端、且不经过卫星A的新路径,并更新路由表。当卫星A发现自己的队列长度超过 β 时,它会向卫星B发送拥塞状态通知。卫星B收到通知后,会将发送给卫星A的部分流量通过之前计算得到的备用路径进行转发,从而达到负载均衡的目的。仿真结果显示,相较于最短路径路由算法,ELB能够使网络内部流量分布更均衡。

针对多层卫星网络,Wu等人提出负载均衡路由算法HCAR^[83]。高轨卫星与地面的控制中心和网关组成控制层,高轨卫星不负责实际的数据传输,仅传递控制信息,实际数据传输全部由低轨卫星完成。为更好地支持用户的移动性,HCAR把用户的身份标识(identifier)和位置标识(locator)隔离开,路由计算完全是根据用户的位置标识。为缓解星上资源的压力,HCAR由地面控制中心定期执行路由计算,并将计算结果通过控制信道推送至各低轨卫星。为解决可扩展性问题,HCAR把卫星网络与地面用户网络隔离,把端与端的路由转化为入口卫星与出口卫星之间的路由,降低星上路由的复杂度。但是HCAR在计算路由时引入了较多的经验值参数,这些参数需要做大量仿真才能确定最优值,在实际应用时可操作性不高,而且HCAR不能很好地适应卫星网络内部及其与地面网络间的连接关系变化愈发频繁的发展趋势。

3.2.5 切换重路由协议

在卫星网络中,有两种类型的切换^[84],一种是卫星切换,发生在终端超出当前卫星覆盖区域的时候,另一种是链路切换,卫星在进入极地区域时星间链路会断开,离开极地区域后会以不同方向角与相邻轨道卫星重新建立星间链路。针对卫星切换重路由问题,Uzunalioglu等人提出了路由协议FHRP(footprint handover rerouting protocol)^[85],FHRP路由计算主要分两个阶段:augmentation阶段和footprint rerouting阶段。Augmentation阶段执行的时机是终端对应的卫星发生了切换后,FHRP寻找切换后的新卫星与切换前路径中有星间链路的某颗卫星,并把原路径中未使用的部分删除。因为该操作只需修改终端路由信息,无需网内交互路由信息,因此augmentation阶段能够以较小的代价实现重路由。如果未找到这样的卫星,则执行标准重路由算法。但是新路由可能不是最优路径,因此当源和终端对应的卫星均发生切换后,在footprint rerouting阶段由终端向对应的卫星发送重路由请求,由终端卫星重新计算最优路径。由于FHRP只有在源和目的终端对应的卫星都发生切换后,才会使用footprint

rerouting 重新计算路由, 因此减少了因卫星切换导致的重路由次数. 基于 FHRP, 针对链路重路由问题, Uzunalioglu 等人提出了概率路由协议 PRP (probabilistic routing protocol)^[84]. PRP 协议的理想目标是不使用在通信结束前会发生链路切换的链路. 由于具体的通信时长是不可准确预知的, 因此借助概率分布函数, 使得计算出的路由在通信保持期间较大概率不使用会发生链路切换的链路, 从而减少因切换导致的重路由次数. 但是, FHRP 和 PRP 均未考虑对网络拥塞和网络故障的处理.

3.2.6 对标准路由协议的优化

徐明伟等人基于标准域内 OSPF 协议, 提出适用于天地一体化网络的域内路由协议 OSPF+^[86]. OSPF+在标准 OSPF 协议 7 个状态 (Down, Init, 2-way, Exstart, ExChange, Loading, Full) 的基础上增加一个状态 Leaving, 同时引入拓扑预测: 当发现邻居不可达时, 通过拓扑预测判断邻居是暂时不可达还是长时不可达. 如果暂时不可达, 则维持 Full 状态不变, 不触发路由收敛; 如果长时不可达, 则将邻居状态置为 Leaving, 同时向其他节点发送链路状态通告 (link state advertisement, LSA), 并将 Leaving 状态期间向其他连接正常邻居发送的 LSA 保存到本地. 一旦收到之前不可达的邻居发来的 Hello 报文, OSPF+将该邻居状态修改为 ExChange, 并仅交换在 Leaving 状态期间缓存的 LSA. OSPF+较标准 OSPF 的优势在于: 第一, 当链路恢复后, 直接由 Leaving 状态转至 ExChange 状态, 跳过标准的 Down, Init, 2-way, ExStart 几个状态; 第二, 状态更新后, 仅更新部分 LSA, 而非完整 LSA. 因此, 相较于标准 OSPF 协议, OSPF+可以减少路由收敛时间. 仿真结果显示, OSPF+能在约 1 秒时间内快速完成路由收敛. Yang 等人针对卫星网络拓扑高动态变化环境下可能导致域间路由协议 BGP 更新过于频繁、网络不稳定的情况, 提出了一种新的域间路由协议 DT-TCA (discrete-time topology changes aggregation)^[87]. DT-TCA 的核心思想是通过卫星网络运行规律, 预测未来某一段时间内可能发生的拓扑变化, 将该时间段内的多次路由更新聚合为一次路由更新, 从而减少因网络拓扑变化导致的频繁路由更新, 减少路由抖动. 试验结果表明, DT-TCA 可以将网络不稳定时间降低 41.8%–83%, 路由通告报文数量减少 33%–53%. 但随着卫星网络规模的增大, 星上环境更加复杂, 所需预测的指标增多, 对星上的存储能力和计算能力都提出了更高的要求^[72].

3.3 方案对比

为了更直观地展现上述各类路由协议的差异, 我们从实现方式 (集中式/分布式)、对星上资源的需求、对拥塞反应速度、以及对故障容忍度等多个维度对上述提及的各类路由协议进行了对比, 详情见表 2.

表 2 路由协议的对比

方案分类	方案名称	路由方式	是否需要网内交换路由信息	适用卫星网络拓扑	星上存储要求	星上计算要求	对拥塞反应速度	对故障容忍度	是否考虑与地面网络的融合
面向连接的路由	基于 ATM 技术的 DT-DVTR ^[61]	集中式路由	否	多层卫星网络	高	低	慢	低	否
	基于 ATM 的带权值的路由算法 ^[62]	集中式路由	否	多层卫星网络	高	低	慢	低	否
面向无连接的路由	MLSR ^[65]	集中式路由	是	多层卫星网络	高	高	慢	低	否
	SGRP ^[67]	分布式路由	是	中低轨卫星网络	高	高	快	快	否
	TDS-IRS ^[66]	分布式路由	否	多层卫星网络	高	高	一般	一般	是
	适用于低轨卫星网络的 IP 路由算法 ^[64]	分布式路由	否	仅限低轨卫星网络	高	高	快	高	否
	Henderson 等人提出的基于单元的路由 ^[70]	分布式路由	是	仅限低轨卫星网络	低	高	慢	低	否
	Tsunoda 等人提出的基于单元的路由 ^[71]	分布式路由	是	仅限低轨卫星网络	低	高	慢	低	否
	LA-ISTN ^[72]	分布式路由	否	仅限低轨卫星网络	低	高	慢	一般	是
	ASER ^[60]	分布式路由	是	仅限低轨卫星网络	高	高	慢	高	否
OPSPF ^[69]	分布式路由	是	仅限低轨卫星网络	一般	一般	快	高	否	
DRA ^[68]	分布式路由	否	仅限低轨卫星网络	低	高	慢	高	否	

表2 路由协议的对比(续)

方案分类	方案名称	路由方式	是否需要网内交换路由信息	适用卫星网络拓扑	星上存储要求	星上计算要求	对拥塞反应速度	对故障容忍度	是否考虑与地面网络的融合
基于业务需求的路由	LAOR ^[74]	分布式路由	是	仅限低轨卫星网络	高	高	慢	低	否
	TCD ^[73]	分布式路由	是	没有限制	高	高	一般	一般	否
	SpaceRTC ^[77]	集中式路由	否	仅限低轨卫星网络	低	低	慢	慢	是
	MOR ^[76]	分布式路由	是	仅限低轨卫星网络	高	高	慢	低	否
节能路由	Yang等人提出的路由方案 ^[78]	集中式路由	否	没有限制	高	低	慢	低	否
面向无连接的路由	TLR ^[80]	分布式路由	是	仅限低轨卫星网络	高	高	一般	一般	否
	HCAR ^[83]	集中式路由	否	多层卫星网络	高	低	慢	低	否
	ALR ^[81]	集中式路由	否	低轨卫星网络	高	低	一般	低	否
	ELB ^[82]	分布式路由	是	中低轨卫星网络	一般	高	快	一般	否
	ALBR ^[79]	分布式路由	是	仅限低轨卫星网络	高	高	慢	低	否
切换重路由	FHRP ^[85]	分布式路由	否	仅限低轨卫星网络	高	一般	慢	低	否
	PRP ^[84]	分布式路由	否	仅限低轨卫星网络	高	一般	慢	低	否
对标准路由协议的优化	OSPF+ ^[86]	分布式路由	是	没有限制	高	高	快	高	是
	DT-TCA ^[87]	分布式路由	是	没有限制	高	高	一般	一般	是

总的来说,面向连接的路由协议仅适用于发展初期的卫星网络,无法应用于当前大型的卫星星座,因为随着网络规模的不断扩大,一方面,端到端之间的虚拟路径数量激增,很容易导致网络中所需的虚路径标识符(virtual path identifier, VPI)数量超出ATM协议的上限值,另一方面,卫星网络内部及其与地面网络间的连接关系变化愈发频繁,寻求静态离散场景难度加大^[72],使“快照”技术的假设不再成立。随着星上处理能力的提升,以及网络全IP化的发展趋势,基于IP的路由协议是天地一体化网络的必然选择。新的路由协议需要考虑天基网络与地面网络在传播时延、链路带宽、拓扑稳定性等方面存在的较大差异,统筹考虑流量类型、用户分布、网络资源可用性等方面,实现高效路由,满足用户不同的QoS需求。

4 天地一体化网络传输协议

传输控制协议(transmission control protocol, TCP)在互联网中取得了巨大的成功,然而将TCP应用到天地一体化网络中面临巨大的挑战,原因在于:第一,链路误码率高。受链路传输错误或天气等因素影响,空间网络链路误码率会增加,甚至导致链路不可用。在这种情况下,频繁丢包无法使TCP维持较大的发送窗口,从而导致吞吐量显著下降。第二,链路带宽时延积大。尤其是高轨卫星,端到端往返时延(round-trip time, RTT)有可能超过500 ms, TCP的慢启动机制无法快速抢占带宽。第三,拓扑动态性高。由于卫星围绕地球快速运动,导致网络拓扑变化频繁,进一步对端到端数据可靠传输提出了挑战。根据各传输协议实现方法的不同,我们将现有的研究成果分为3类:(1)基于TCP的传输协议。(2)基于多径传输控制协议(multipath transmission control protocol, MPTCP)的传输协议。(3)基于强化学习的传输协议。

4.1 基于TCP的传输协议

为改善标准TCP协议在RTT较大的卫星网络中传输性能不佳的问题,Caini等人设计了一种优化的TCP传输协议TCP Hybla^[88]。标准的TCP协议在收到一个新的确认(acknowledgement, ACK)报文时,在慢启动和拥塞避免阶段,拥塞窗口将分别增大1和 $1/CWND$,其中 $CWND$ 是拥塞窗口大小。为了补偿大RTT对TCP连接性能的影响,当TCP Hybla收到一个新的ACK报文时,在慢启动和拥塞避免阶段,拥塞窗口的值分别增大 $(2\rho-1)$ 和 $\rho^2/CWND$,其中, ρ 是归一化RTT。基于TCP Hybla, Caini等人提出了一种应用于天地一体化网络的性能增强代理方案PEPsal^[89]。PEPsal在异构网络的边界处(例如与卫星网络直接相连的地面网关)设置具有传输控制功能的性能增强

代理,通过 Linux 内核子系统 netfilter^[90]识别 TCP 连接,将其切分为两个新的连接,一个是只存在于地面网络的连接,另一个是包含卫星网络的连接.其中,作用域为地面网络的连接使用标准 TCP 传输协议,作用域为卫星网络的连接使用 TCP Hybla 作为传输协议,以补偿卫星网络时延较大对传输性能的影响.代理负责两个连接间控制信令及数据的传输,且代理的运行对终端用户是透明的.但是性能增强代理方案破坏了端到端的一致性,与端到端的安全设置也可能存在不兼容的问题,例如不支持端到端使用 IPSec 协议.

4.2 基于 MPTCP 的传输协议

针对 MPTCP 在卫星发生切换时性能下降的问题, Du 等人利用 SDN 技术优化了 MPTCP^[91]. 该方案将控制平面放置在地面的一个控制中心,该控制中心负责 MPTCP 多条子路径的建立以及发生切换时新路径的建立.卫星网络构成了数据面,每颗卫星不计算路由,仅按照地面控制中心上传的路由指令传输数据,因此对星上的计算资源和存储资源要求不高.在稳定状态下,源终端使用其中一个地址建立多条子流与目的终端通信.当终端进入两个卫星覆盖范围的交叉区域时,触发切换的处理过程.终端将使用新的地址与刚进入服务范围的卫星通信,由于此时该卫星上尚未有到目的终端的路由表项,因此该通信请求将被转发给地面控制中心,由控制中心负责计算新的路径并更新相应卫星的路由表项,并将新建的子路径状态标记为备用.当原卫星移出终端的服务范围时,实施主备路径的切换.实验结果表明,优化后的 MPTCP 协议可以实现“软”切换,将网络吞吐量提升大概一倍.

Wang 等人针对高铁场景下的通信需求,提出融合地面移动通信网络与空间卫星网络的通信解决方案^[92].在该方案中,为每一列高铁车厢配置一个小型的移动基站 (femto cell),充当列车访问终端 (train access terminal, TAT) 的角色, TAT 可与高铁线路沿途的固定移动基站和卫星同时连接.本方案通过部署 MPTCP,同时使用 TAT 与固定移动基站和卫星之间的链路加速数据传输.另外,为了解决列车高速行进过程中基站/卫星链路切换导致的丢包问题,本方案引入了编码技术,使用随机线性编码提升数据传输的可靠性.同时将包级别的 ACK 替换为数据块级别的 ACK,减少了反馈信道的通信量.

4.3 基于强化学习的传输协议

Li 等人基于多目标强化学习提出一个根据网络状态动态调整终端发送速率的拥塞控制机制 AUTO^[93]. AUTO 首先将拥塞控制问题形式化为多目标马尔可夫决策过程,在此基础上使用不同网络环境训练多目标加强学习代理.为了提高代理训练的性能, AUTO 提出了一个并行的代理训练架构,在不同网络场景下使用不同的优化策略同步训练多个代理,解决多场景串行训练存在的灾难性遗忘问题 (catastrophic forgetting problem).同时, AUTO 提出环境自适应偏好选择模型,该模型可以根据输入的状态序列自动识别网络环境、选择合适的偏好对代理进行训练.在实际应用时, AUTO 将时间划分为连续的时间序列,在每个时间序列结束时, AUTO 会根据当前的网络状态动态调整发送端的拥塞控制算法.试验结果表明, AUTO 在不同的网络环境中性能均优于 TCP Vegas^[94]、Cubic^[95]、BBR^[96]等拥塞控制算法,并具有较好的公平性.

基于最新的低轨卫星配置有多个频率天线的事实, Chen 等人提出一个联合考虑无线信道资源与频段切换的高效传输方案^[97].该方案将传输问题形式化为两个子问题: (1) 在给定的功率条件下,如何选择合适的信道资源,以最大化用户的发送速率. (2) 在保证最大化用户发送速率的前提下,如何以最小化代价实施频段切换. Chen 等人将第 1 个子问题形式化为一个马尔可夫决策过程 (Markov decision process, MDP),使用基于软演员-批评家 (soft actor-critic) 的深度强化学习算法求解资源选择问题;第 2 个子问题被形式化为一个整数非线性规划问题,使用贪心算法进行求解.为提高方案执行的效率,全局时间被划分为若干个时隙,在每一个时隙中执行资源选择算法,若干个时隙才执行一次频段切换算法.

针对地面站分布、天气等因素导致卫星网络下行链路传输效率低下的现状, Vasisht 等人提出传输解决方案 L2D2^[98]. L2D2 通过引入建设成本低、监管政策允许的只有接收功能的地面站加速卫星网络下行数据的传输,但同时引入两个挑战: (1) 卫星如何选择合适的地面站上传数据? (2) 卫星如何在没有反馈的情况下确定发送速率? 针对第 1 个挑战, L2D2 将卫星与地面站最优匹配问题形式化为数据中心网络的电路调度问题 (NP-hard 问题),并给出一个近似贪婪的启发式算法,支持吞吐量、平均延迟、峰值延迟多目标优化.针对第 2 个挑战, L2D2 根据卫星轨道位置、天气情况等历史数据,使用最大深度为 8 的梯度增强回归树和一个 4 层的基于深度学习的回归模型

作为弱估计器, 然后再把输出作为输入放入线性回归模型中, 得到最终的信号强度估计, 并据此确定发送速率。

4.4 小结

从上述方案可以看出, 一方面, 卫星网络的大时延和拓扑高动态性, 对传统基于 TCP/IP 体制的传输协议提出了不小的挑战, 另一方面, 天地一体化网络为端到端传输提供了多条路径选择, 为多路径传输提供了很好的应用场景。天地一体化网络传输协议需要重点考虑在异构网络环境下, 如何实现高效的协同传输。

5 基于组播的天地一体化网络内容分发

组播技术在天地一体化网络中有天然的技术优势和大量的应用场景。一方面, 卫星网络管理实体单一, 且覆盖面广、覆盖区域灵活, 可以实现组播业务的快速部署。另一方面, 随着近几年移动互联网技术的快速发展, 无线服务逐渐从以连接为中心的通信模式 (如移动电话、网页浏览等) 向以内容为中心的通信模式 (如短视频、在线音乐等) 转变^[99]。在以内容为中心的通信模式中, 为不同用户提供的数据可能是相同的 (例如, 不同用户申请观看同一个短视频), 使用组播技术, 可以比单播大幅提升带宽利用率。按照组播范围, 可以将目前针对天地一体化网络的组播协议划分为两类: 一类是适用于低轨卫星网络的组播协议^[100-102], 另一类是适用于多层卫星网络 (包含低轨、中轨和高轨卫星星座) 的组播协议^[99,103]。

针对低轨卫星网络, Ekici 等人基于单播路由算法 DRA^[68]设计了一种组播协议^[100]。该协议由源端发起组播树计算, 使用 DRA 计算源端到所有组成员最优和次优路径。源端在保证组播树分支最小 (即最少的下一跳) 的情况下, 尽可能地计算结果中选择最优路径, 并据此更新本地的路由表信息。不同下一跳将组成员集合划分为若干个子集合, 对每一个子集合, 使用下一跳作为源端, 子集合成员作为组成员, 重复执行上述操作。待所有组成员均执行完上述操作, 组播树建立完毕。为了屏蔽卫星网络的高动态性, 所有路由计算均基于逻辑位置标识。仿真结果表明, 最坏情况下, 组播树的端到端时延仅比 DRA 算法的最短端到端时延增加 5%。Yang 等人提出一种基于直线斯坦纳树 (rectilinear Steiner tree) 的组播协议^[101]。该协议以源节点初始化组播树, 然后依次选择离当前组播树最近的节点加入组播树。待所有组成员都加入组播树后, 算法再以组播树的跳数最小为目标, 基于可重路由区域 (rerouting region) 对组播树进行修剪。仿真结果表明, 该组播协议生成的组播树使用的带宽较最短路径树减少约 40%。Cheng 等人提出一种基于核心群合并的共享树组播协议 CCST (core-cluster combination-based shared tree)^[102]。该协议使用虚拟拓扑屏蔽卫星网络的高动态性, 组播树生成算法主要包括两个步骤: 第 1 个步骤是选择核心节点。CCST 计算出所有组成员的逻辑中心位置, 距离该位置最近的组成员节点即为核心节点; 第 2 个步骤是基于核心节点建立组播树。最初的组播树仅包含核心节点, CCST 计算组播树到其他剩余组成员的最小跳数及最短距离路径, 将路径中的所有节点添加到组播树中。CCST 重复以上操作, 直至所有组成员均纳入组播树。仿真结果表明, CCST 在组播树生成代价、组播树长度等方面均优于文献 [100] 提出的组播协议。

针对由高、中、低轨卫星组成的多层卫星网络, Akyildiz 等人在单播路由协议 MLSR^[65]的基础上提出一种组播协议^[103]。该协议主要分为两个步骤: 第 1 步, 由源端向与它相连的 GEO 卫星发送组播树生成请求, 该请求中包含组播组 ID 和组播组成员信息。GEO 卫星使用通过 MLSR 获取的全局拓扑信息, 在本地计算组播树。但是 MLSR 为了减少路由计算的复杂度, 将 LEO 卫星划分为若干个组, 每个组看作一个虚拟节点, 因此当前生成的组播树中的 LEO 节点实际代表的是若干个 LEO 卫星。第 2 步, GEO 卫星向组播树中的 GEO 和 MEO 节点发送组播树信息, GEO 和 MEO 根据自己覆盖范围内的拓扑情况生成相应的组播树, 并分别在相应的 MEO 和 LEO 卫星节点上更新路由表项。仿真结果表明, 与最短路径树算法相比, 该组播协议生成组播树的代价更小; 与基于核心的组播树算法相比, 该组播协议可以达到更短的端到端时延。Zhu 等人^[99]针对地面移动通信网络信道抖动可能导致系统性能低下的问题, 基于空间卫星网络信道抖动小的事实, 提出了一个融合地面移动通信网络和空间卫星网络的天地协同组播方案。Zhu 等人首先将小规模天地协同组播场景形式化为一个加权最大最小波束赋形设计问题, 并针对该 NP-hard 问题给出了算法, 得出波束赋形向量。然后, 针对大规模通信场景下各组播组卫星信号间干扰较大的情况, 提出一个分时协同组播方案, 该方案包括两个阶段: 地面传输阶段和卫星传输阶段。在地面传输阶段, 尽可能使用地面基站为用户提供服务, 并筛选出瓶颈用户。在卫星传输阶段, 仅对瓶颈用户提供组播服务。通过分时服务,

大大减少卫星信号干扰问题,提升系统性能.

可以看出,一方面,卫星网络覆盖范围广,可支持大规模灵活通信,很适合组播技术的应用.另一方面,卫星网络拓扑的高动态性和组成员的动态变化对组播树的生成与维护都带来了不小的挑战.基于天地一体化网络的组播协议设计需统筹考虑组播树计算和更新复杂度、组播树性能、组成员更新代价等因素.

6 发展趋势与展望

近年来,随着国外发达国家多个卫星星座的快速部署^[3,14,19,20],卫星网络越来越受到工业界和学术界的关注.卫星网络作为地面网络的补充和延伸,有助于加速弥合区域间的数字鸿沟,扩展地面网络的覆盖和服务范围.而且,2020年我国将卫星互联网纳入新基建范畴,2021年中国卫星网络集团有限公司的成立,以及2022“十四五”数字经济发展规划中明确指出要“建设天地一体的数字信息基础设施,加快布局卫星通信网络,推动卫星互联网建设”,这些都预示着国内卫星互联网,以及天地一体化网络的建设势必会加速推进.可以预见,在未来相当长一段时间内,对天地一体化网络的研究将持续成为热点.我们认为,未来需要重点关注的研究方向如下.

第一,超大型卫星星座的管理.因为低轨星座具有传输时延短、发射功率低、容易部署等特点,近几年国内外均将卫星星座的研究和部署重点由传统的高轨星座转向低轨星座.现在正在部署的低轨卫星星座规模规划少则几百颗卫星,多则上千、甚至上万颗卫星(OneWeb计划部署648颗低轨卫星,Starlink首批建设目标是部署约12000颗卫星),同时配置星间链路,系统复杂性因此也大大增加.因此,在网络规模不断扩大、系统复杂性不断增加的背景下,有必要研究对超大型卫星星座实施管理,实现天地一体互联,为全球用户提供按需网络服务.

第二,QoS保证的传输与路由.天地一体化网络是异构网络,地面网络与天基网络在传播时延、链路带宽、拓扑稳定性等方面均存在较大差异.但目前的研究成果大都未考虑天地一体化互联场景.在天地异构互联、业务需求差异化的背景下,提升网络路由可控性,研究高效的异构网络协同传输机制,实现端到端的可靠传输,满足用户不同的QoS需求,将是值得持续关注方向.

第三,智能的资源调度.天地一体化网络目标用户包括移动用户、船只、飞行器等各类用户,为满足各类用户不同的业务需求,需实施灵活的资源调度.如第2节所述,引入SDN和NFV技术可以大幅提升网络的灵活性.基于异构网络的资源和处理能力,结合不同的用户业务需求和流量模式,研究动态网络切片技术、controller放置问题、网络资源智能感知技术和网络资源智能调度算法等内容,提高网络资源的利用率,也是重要的研究课题.

第四,网络安全.卫星网络节点,以及星间/星地链路完全暴露在开放的空间中,较地面网络更易受到窃听、信息篡改等网络攻击,而且目前没有专门针对卫星网络的安全标准,受限于卫星网络带宽及节点处理资源,地面网络的安全标准也不能直接应用于卫星网络,导致卫星网络的安全性较低.若黑客控制卫星,通过篡改信息,可能会对接入卫星网络的地面关键基础设施系统造成破坏.黑客甚至可以通过操控卫星,改变卫星的运行轨道,将其当作武器发起太空攻击(例如撞向其他卫星或空间站)^[104].因此,有必要针对天地一体化网络安全防护架构设计开展研究,确保网络安全可靠.

References:

- [1] ITU Statistics. 2022. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx>
- [2] SpaceX. 2022. <https://www.spacex.com/>
- [3] StarLink. 2022. <https://www.starlink.com/>
- [4] Lu Y, Zhao YJ, Sun FC, Li HB, Ni GQ, Wang DJ. Routing techniques on satellite networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(5): 1085–1100 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4581.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004581]
- [5] SaT5G Project. 2022. <https://www.sat5g-project.eu/>
- [6] 3GPP. 2022. <https://www.3gpp.org>
- [7] CCSA TC12: Aerospace communications. <http://www.ccsa.org.cn/english/tc>
- [8] Li HW, Wu Q, Xu K, Wu JP, Yang ZY, Jiang Z, Zhu L. Progress and tendency of space and earth integrated network. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 95–106 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.14.011]

- [9] Liang H, Chen FC, Ji XS, Lv P, Gao YZ. Development status and applied research on mimic technologies for space-ground integration information network. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2019, 49(7): 799–818 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.1360/N112019-00002](https://doi.org/10.1360/N112019-00002)]
- [10] Wu W. Survey on the development of space-integrated-ground information network. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2020, 1(1): 1–16 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.11959/j.issn.2096-8930.20200101](https://doi.org/10.11959/j.issn.2096-8930.20200101)]
- [11] Open Networking Foundation. 2022. <https://opennetworking.org/>
- [12] Mijumbi R, Serrat J, Gorricho JL, Bouten N, De Turck F, Boutaba R. Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(1): 236–262. [doi: [10.1109/COMST.2015.2477041](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2477041)]
- [13] Inmarsat. 2022. <https://www.inmarsat.com/>
- [14] O3b MEO. 2022. <https://www.ses.com/our-coverage/o3b-meo>
- [15] O3b mPOWER. 2022. <https://www.ses.com/our-coverage/o3b-mpower>
- [16] 702X: The more cost-effective software defined satellite. 2022. <https://www.boeing.com/space/boeing-satellite-family/702X/>
- [17] O3b mPOWER factsheet. 2022. https://www.ses.com/sites/default/files/2022-02/SES_O3b_mPOWER_Factsheet_EN.pdf
- [18] O3b mPOWER launch schedule. 2022. <https://www.ses.com/our-coverage/launches>
- [19] Iridium. 2022. <https://www.iridium.com/>
- [20] OneWeb. 2022. <https://oneweb.net/>
- [21] Press Release. OneWeb Confirms Successful Launch of 34 Satellites, Delivering Ongoing Momentum at the Start of 2022. 2022. <https://oneweb.net/resources/oneweb-confirms-successful-launch-34-satellites-delivering-ongoing-momentum-start-2022>
- [22] SpaceX Starlink internet: Costs, collision risks and how it works. 2022. <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>
- [23] List of Starlink launches. 2022. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Starlink_launches
- [24] Starlink achieved 200 Mbps While Traveling at 100 km/h. 2022. <https://techwafer.com/starlink-achieved-200mbps-while-traveling-at-100km-h/>
- [25] GalaxySpace News. 2022 (in Chinese). <http://www.yinhe.ht/yhNews>
- [26] Overview of space communications protocols. 2014. <https://public.ccsds.org/Pubs/130x0g3.pdf>
- [27] Yang GN, Li WF, Zhang XG. Network protocol system and transmission performance of integrated space and terrestrial information network. *ZTE Technology Journal*, 2016, 22(4): 39–45 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.3969/j.issn.1009-6868.2016.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6868.2016.04.008)]
- [28] Space data link protocols—Summary of concept and rationale. 2015. <https://public.ccsds.org/Pubs/130x2g3.pdf>
- [29] Space packet protocol. 2020. <https://public.ccsds.org/Pubs/133x0b2e1.pdf>
- [30] Space communications protocol specification (SCPS)—Transport protocol (SCPS-TP). 2006. <https://public.ccsds.org/Pubs/714x0b2.pdf>
- [31] CCSDS file delivery protocol (CFDP). 2020. <https://public.ccsds.org/Pubs/727x0b5.pdf>
- [32] Lossless data compression. 2020. <https://public.ccsds.org/Pubs/121x0b3.pdf>
- [33] Image data compression. 2017. <https://public.ccsds.org/Pubs/122x0b2.pdf>
- [34] Rationale, scenarios, and requirements for DTN in space. 2010. <https://public.ccsds.org/Pubs/734x0g1e1.pdf>
- [35] Delay/disruption tolerant networking (dtm). 2022. <https://datatracker.ietf.org/wg/dtn/documents/>
- [36] IP over CCSDS space links. 2012. <https://public.ccsds.org/Pubs/702x1b1c1.pdf>
- [37] 3GPP Release 17. 2022. <https://www.3gpp.org/release-17>
- [38] Zhao XW, Zhang Y, Qin P, Wang XQ, Geng SY, Song JY, Liu Y, Li SF. Key technologies and development trends for a space-air-ground integrated wireless optical communication network. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(1): 1–17 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.12263/DZXB.20210690](https://doi.org/10.12263/DZXB.20210690)]
- [39] Pulliam J, Zambre Y, Karmarkar A, Mehta V, Touch J, Haines J, Everett M. TSAT network architecture. In: *Proc. of the 2008 IEEE Military Communications Conf. San Diego: IEEE*, 2008. 1–7. [doi: [10.1109/MILCOM.2008.4753508](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2008.4753508)]
- [40] Liu JJ, Shi YP, Fadlullah ZM, Kato N. Space-air-ground integrated network: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2714–2741. [doi: [10.1109/COMST.2018.2841996](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2841996)]
- [41] European Union absolute project. 2022. <https://www.airbornecomms.com/absolute-project>
- [42] Google's loon project. 2020. <https://x.company/projects/loon/>
- [43] Facebook Aquila. 2022. https://en.m.wikipedia.org/wiki/Facebook_Aquila
- [44] Bao JZ, Zhao BK, Yu WR, Feng ZQ, Wu CQ, Gong ZH. OpenSAN: A software-defined satellite network architecture. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014, 44(4): 347–348. [doi: [10.1145/2740070.2631454](https://doi.org/10.1145/2740070.2631454)]
- [45] Tang Z, Zhao BK, Yu WR, Feng ZQ, Wu CQ. Software defined satellite networks: Benefits and challenges. In: *Proc. of the 2014 IEEE*

- Computers, Communications and IT Applications Conf. Beijing: IEEE, 2014. 127–132. [doi: 10.1109/ComComAp.2014.7017183]
- [46] Feng J, Jiang L, Shen Y, Ma WJ, Yin M. A scheme for software defined ORS satellite networking. In: Proc. of the 4th IEEE Int'l Conf. on Big Data and Cloud Computing. Sydney: IEEE, 2014. 716–721. [doi: 10.1109/BDCloud.2014.19]
- [47] Shi YP, Cao YR, Liu JJ, Kato N. A cross-domain SDN architecture for multi-layered space-terrestrial integrated networks. IEEE Network, 2019, 33(1): 29–35. [doi: 10.1109/MNET.2018.1800191]
- [48] Tang FL. Dynamically adaptive cooperation transmission among satellite-ground integrated networks. In: Proc. of the 2020 IEEE Conf. on Computer Communications. Toronto: IEEE, 2020. 1559–1568. [doi: 10.1109/INFOCOM41043.2020.9155485]
- [49] Papa A, De Cola T, Vizarrata P, He M, Machuca CM, Kellerer W. Dynamic SDN controller placement in a LEO constellation satellite network. In: Proc. of the 2018 IEEE Global Communications Conf. Abu Dhabi: IEEE, 2018. 206–212. [doi: 10.1109/GLOCOM.2018.8647843]
- [50] Li HZ, Wang CF, Wang WZ, Zhang J. Research on distributed mobile management of satellite network based on software define network. Journal on Communications, 2017, 38(S1): 143–150 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2017247]
- [51] Ferrús R, Koumaras H, Sallent O, Agapiou G, Rasheed T, Kourtis MA, Boustie C, Gélard P, Ahmed T. SDN/NFV-enabled satellite communications networks: Opportunities, scenarios and challenges. Physical Communication, 2016, 18: 95–112. [doi: 10.1016/j.phycom.2015.10.007]
- [52] Ahmed T, Dubois E, Dupé JB, Ferrús R, Gélard P, Kuhn N. Software-defined satellite cloud RAN. Int'l Journal of Satellite Communications and Networking, 2018, 36(1): 108–133. [doi: 10.1002/sat.1206]
- [53] Sheng M, Wang Y, Li JD, Liu RZ, Zhou D, He LJ. Toward a flexible and reconfigurable broadband satellite network: Resource management architecture and strategies. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(4): 127–133. [doi: 10.1109/MWC.2017.1600173]
- [54] Ferrús R, Koumaras H, Sallent O, Rasheed T, Duros E, Riggio R, Kuhn N, Gelard P, Ahmed T. On the virtualization and dynamic orchestration of satellite communication services. In: Proc. of the 84th IEEE Vehicular Technology Conf. Montreal: IEEE, 2016. 1–5. [doi: 10.1109/VTCFall.2016.7881129]
- [55] Feng BH, Zhou HC, Zhang HK, Li GW, Li HF, Yu S, Chao HC. HetNet: A flexible architecture for heterogeneous satellite-terrestrial networks. IEEE Network, 2017, 31(6): 86–92. [doi: 10.1109/MNET.2017.1600330]
- [56] Li TX, Zhou HC, Luo HB, Yu S. SERVICE: A software defined framework for integrated space-terrestrial satellite communication. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2018, 17(3): 703–716. [doi: 10.1109/TMC.2017.2732343]
- [57] Ferrús R, Sallent O, Ahmed T, Fedrizzi R. Towards SDN/NFV-enabled satellite ground segment systems: End-to-end traffic engineering use case. In: Proc. of the 2017 IEEE Int'l Conf. on Communications Workshops. Paris: IEEE, 2017. 888–893. [doi: 10.1109/ICCW.2017.7962771]
- [58] Bertaux L, Medjah S, Berthou P, Abdellatif S, Hakiri A, Gelard P, Planchou F, Bruyere M. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 54–60. [doi: 10.1109/MCOM.2015.7060482]
- [59] The “Tian Xiang” satellite has lifted off! The test satellite of the space-ground integrated network has been successfully launched. 2019 (in Chinese). https://www.sohu.com/a/319349520_772793
- [60] Zhang X, Yang Y, Xu MW, Luo J. ASER: Scalable distributed routing protocol for LEO satellite networks. In: Proc. of the 46th IEEE Conf. on Local Computer Networks. Edmonton: IEEE, 2021. 65–72. [doi: 10.1109/LCN52139.2021.9524989]
- [61] Werner M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(8): 1636–1648. [doi: 10.1109/49.634801]
- [62] Werner M, Delucchi C, Vogel HJ, Maral G, De Ridder JJ. ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with intersatellite links. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(1): 69–82. [doi: 10.1109/49.553679]
- [63] Wood L, Clerget A, Andrikopoulos I, Pavlou G, Dabbous W. IP routing issues in satellite constellation networks. Int'l Journal of Satellite Communications, 2001, 19(1): 69–92. [doi: 10.1002/sat.655]
- [64] Hashimoto Y, Sarikaya B. Design of IP-based routing in a LEO satellite network. In: Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Satellite-based Information Services. New York: ACM, 1998. 81–88.
- [65] Akyildiz IF, Ekici E, Bender MD. MLRSR: A novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2002, 10(3): 411–424. [doi: 10.1109/TNET.2002.1012371]
- [66] Yang ZY, Li HW, Wu Q, Wu JP. Topology discovery sub-layer for integrated terrestrial-satellite network routing schemes. China Communications, 2018, 15(6): 42–57. [doi: 10.1109/CC.2018.8398503]
- [67] Chen C, Ekici E. A routing protocol for hierarchical LEO/MEO satellite IP networks. Wireless Networks, 2005, 11(4): 507–521. [doi:

- 10.1007/s11276-005-1772-1]
- [68] Ekici E, Akyildiz IF, Bender MD. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2001, 9(2): 137–147. [doi: [10.1109/90.917071](https://doi.org/10.1109/90.917071)]
- [69] Pan T, Huang T, Li XC, Chen YJ, Xue WH, Liu YJ. OPSPF: Orbit prediction shortest path first routing for resilient LEO satellite networks. In: *Proc. of the 2019 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*. Shanghai: IEEE, 2019. 1–6. [doi: [10.1109/ICC.2019.8761611](https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761611)]
- [70] Henderson TR, Katz RH. On distributed, geographic-based packet routing for LEO satellite networks. In: *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. Conf. Record*. San Francisco: IEEE, 2000. 1119–1123. [10.1109/GLOCOM.2000.891311]
- [71] Tsunoda H, Ohta K, Kato N, Nemoto Y. Supporting IP/LEO satellite networks by handover-independent IP mobility management. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(2): 300–307. [doi: [10.1109/JSAC.2003.819977](https://doi.org/10.1109/JSAC.2003.819977)]
- [72] Li HW, Liu LX, Liu J, Wu Q. Location based routing addressing mechanism of integrated satellite and terrestrial network. *Journal on Communications*, 2020, 41(8): 120–129 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020135](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020135)]
- [73] Svigelj A, Mohorcic M, Kandus G, Kos A, Pustisek M, Bester J. Routing in ISL networks considering empirical IP traffic. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(2): 261–272. [doi: [10.1109/JSAC.2003.819974](https://doi.org/10.1109/JSAC.2003.819974)]
- [74] Papapetrou E, Karapantazis S, Pavlidou FN. Distributed on-demand routing for LEO satellite systems. *Computer Networks*, 2007, 51(15): 4356–4376. [doi: [10.1016/j.comnet.2007.05.008](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2007.05.008)]
- [75] Royer EM, Toh CK. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(2): 46–55. [doi: [10.1109/98.760423](https://doi.org/10.1109/98.760423)]
- [76] Karapantazis S, Papapetrou E, Pavlidou FN. Multiservice on-demand routing in LEO satellite networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2009, 8(1): 107–112. [doi: [10.1109/TWC.2009.080334](https://doi.org/10.1109/TWC.2009.080334)]
- [77] Lai ZQ, Liu WS, Wu Q, Li HW, Xu JX, Wu JP. SpaceRTC: Unleashing the low-latency potential of mega-constellations for real-time communications. In: *Proc. of the 2022 IEEE Conf. on Computer Communications*. London: IEEE, 2022. 1339–1348. [doi: [10.1109/INFCOM48880.2022.9796887](https://doi.org/10.1109/INFCOM48880.2022.9796887)]
- [78] Yang Y, Xu MW, Wang D, Wang Y. Towards energy-efficient routing in satellite networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(12): 3869–3886. [doi: [10.1109/JSAC.2016.2611860](https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2611860)]
- [79] Rao Y, Wang RC. Agent-based load balancing routing for LEO satellite networks. *Computer Networks*, 2010, 54(17): 3187–3195. [doi: [10.1016/j.comnet.2010.06.019](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.06.019)]
- [80] Song GH, Chao MY, Yang BW, Zheng Y. TLR: A traffic-light-based intelligent routing strategy for NGE0 satellite IP networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2014, 13(6): 3380–3393. [doi: [10.1109/TWC.2014.041014.130040](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.041014.130040)]
- [81] Mohorčič M, Werner M, Švigelj A, Kandus G. Alternate link routing for traffic engineering in packet-oriented ISL networks. *Int'l Journal of Satellite Communications*, 2001, 19(5): 463–480. [doi: [10.1002/sat.712](https://doi.org/10.1002/sat.712)]
- [82] Taleb T, Mashimo D, Jamalipour A, Kato N, Nemoto Y. Explicit load balancing technique for NGE0 satellite IP networks with on-board processing capabilities. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2009, 17(1): 281–293. [doi: [10.1109/TNET.2008.918084](https://doi.org/10.1109/TNET.2008.918084)]
- [83] Wu ZF, Hu GY, Jin FL, Song YJ, Fu YJ, Ni GQ. A novel routing design in the IP-based GEO/LEO hybrid satellite networks. *Int'l Journal of Satellite Communications and Networking*, 2017, 35(3): 179–199. [doi: [10.1002/sat.1174](https://doi.org/10.1002/sat.1174)]
- [84] Uzunalioglu H, Akyildiz IF, Bender MD. A routing algorithm for connection-oriented low earth orbit (LEO) satellite networks with dynamic connectivity. *Wireless Networks*, 2000, 6(3): 181–190. [doi: [10.1023/A:1019133429805](https://doi.org/10.1023/A:1019133429805)]
- [85] Uzunalioglu H, Akyildiz IF, Yesha Y, Yen W. Footprint handover rerouting protocol for low earth orbit satellite networks. *Wireless Networks*, 1999, 5(5): 327–337. [doi: [10.1023/A:1019127801155](https://doi.org/10.1023/A:1019127801155)]
- [86] Xu MW, Xia AQ, Yang Y, Wang YL, Sang M. Intra-domain routing protocol OSPF+ for integrated terrestrial and space networks. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2017, 57(1): 12–17 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.21.003](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.21.003)]
- [87] Yang ZY, Li HW, Wu Q, Wu JP. Analyzing and optimizing BGP stability in future space-based internet. In: *Proc. of the 36th IEEE Int'l Performance Computing and Communications Conf.* San Diego: IEEE, 2017. 1–8. [doi: [10.1109/PCCC.2017.8280463](https://doi.org/10.1109/PCCC.2017.8280463)]
- [88] Caini C, Firrincieli R. TCP Hybla: A TCP enhancement for heterogeneous networks. *Int'l Journal of Satellite Communications and Networking*, 2004, 22(5): 547–566. [doi: [10.1002/sat.799](https://doi.org/10.1002/sat.799)]
- [89] Caini C, Firrincieli R, Lacamera D. PEPsal: A performance enhancing proxy designed for TCP satellite connections. In: *Proc. of the 63rd IEEE Vehicular Technology Conf.* Melbourne: IEEE, 2006. 2607–2611. [doi: [10.1109/VETECS.2006.1683339](https://doi.org/10.1109/VETECS.2006.1683339)]
- [90] netfilter. 2021. <https://www.netfilter.org/>
- [91] Du PY, Nazari S, Mena J, Fan RL, Gerla M, Gupta R. Multipath TCP in SDN-enabled LEO satellite networks. In: *Proc. of the 2016*

- IEEE Military Communications Conf. Baltimore: IEEE, 2016. 354–359. [doi: [10.1109/MILCOM.2016.7795352](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2016.7795352)]
- [92] Wang XM, Liy H, Yao WB, Lany T, Wu Q. Content delivery for high-speed railway via integrated terrestrial-satellite networks. In: Proc. of the 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Seoul: IEEE, 2020. 1–6. [doi: [10.1109/WCNC45663.2020.9120643](https://doi.org/10.1109/WCNC45663.2020.9120643)]
- [93] Li X, Tang FL, Liu JC, Yang LT, Fu LY, Chen L. AUTO: Adaptive congestion control based on multi-objective reinforcement learning for the satellite-ground integrated network. In: Proc. of the 2021 USENIX Annual Technical Conf. USENIX Association, 2021. 611–624.
- [94] Brakmo LS, O'Malley SW, Peterson LL. TCP Vegas: New techniques for congestion detection and avoidance. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1994, 24(4): 24–35. [doi: [10.1145/190809.190317](https://doi.org/10.1145/190809.190317)]
- [95] Ha S, Rhee I, Xu LS. CUBIC: A new TCP-friendly high-speed TCP variant. Operating Systems Review, 2008, 42(5): 64–74.
- [96] Cardwell N, Cheng YC, Gunn CS, Yeganeh SH, Jacobson V. BBR: Congestion-based congestion control: Measuring bottleneck bandwidth and round-trip propagation time. Queue, 2016, 14(5): 20–53. [doi: [10.1145/3012426.3022184](https://doi.org/10.1145/3012426.3022184)]
- [97] Chen TJ, Liu J, Ye Q, Tang QQ, Zhang WT, Huang T, Liu YJ. Efficient uplink transmission in ultra-dense LEO satellite networks with multiband antennas. IEEE Communications Letters, 2022, 26(6): 1373–1377. [doi: [10.1109/LCOMM.2022.3160839](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3160839)]
- [98] Vasisht D, Shenoy J, Chandra R. L2D2: Low latency distributed downlink for LEO satellites. In: Proc. of the 2021 ACM SIGCOMM Conf. ACM, 2021. 151–164. [doi: [10.1145/3452296.3472932](https://doi.org/10.1145/3452296.3472932)]
- [99] Zhu XM, Jiang CX, Yin LG, Kuang LL, Ge N, Lu JH. Cooperative multigroup multicast transmission in integrated terrestrial-satellite networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5): 981–992. [doi: [10.1109/JSAC.2018.2832780](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2832780)]
- [100] Ekici E, Akyildiz IF, Bender MD. A multicast routing algorithm for LEO satellite IP networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2002, 10(2): 183–192. [doi: [10.1109/90.993300](https://doi.org/10.1109/90.993300)]
- [101] Yang DN, Liao WJ. On multicast routing using rectilinear Steiner trees for LEO satellite networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. Dallas: IEEE, 2004. 2712–2716. [doi: [10.1109/GLOCOM.2004.1378848](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2004.1378848)]
- [102] Cheng LZ, Zhang J, Liu K. Core-based shared tree multicast routing algorithms for LEO satellite IP networks. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(4): 353–361. [doi: [10.1016/S1000-9361\(07\)60055-7](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(07)60055-7)]
- [103] Akyildiz IF, Ekici E, Yue GF. A distributed multicast routing scheme for multi-layered satellite IP networks. Wireless Networks, 2003, 9(5): 535–544. [doi: [10.1023/A:1024648402306](https://doi.org/10.1023/A:1024648402306)]
- [104] Hackers could shut down satellites or turn them into weapons. 2020. <https://www.nextgov.com/ideas/2020/02/hackers-could-shut-down-satellites-or-turn-them-weapons/163098/>

附中文参考文献:

- [4] 卢勇, 赵有健, 孙富春, 李洪波, 倪国旗, 王殿军. 卫星网络路由技术. 软件学报, 2014, 25(5): 1085–1100. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4581.htm> [doi: [10.13328/j.cnki.jos.004581](https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.004581)]
- [8] 李贺武, 吴茜, 徐格, 吴建平, 杨增印, 江卓, 朱亮. 天地一体化网络研究进展与趋势. 科技导报, 2016, 34(14): 95–106. [doi: [10.3981/j.issn.1000-7857.2016.14.011](https://doi.org/10.3981/j.issn.1000-7857.2016.14.011)]
- [9] 梁浩, 陈福才, 季新生, 吕平, 高彦钊. 天地一体化信息网络发展与拟态技术应用构想. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(7): 799–818. [doi: [10.1360/N112019-00002](https://doi.org/10.1360/N112019-00002)]
- [10] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1–16. [doi: [10.11959/j.issn.2096-8930.20200101](https://doi.org/10.11959/j.issn.2096-8930.20200101)]
- [25] 银河航天新闻中心. 2022. <http://www.yinhe.ht/yhNews>
- [27] 杨冠男, 李文峰, 张兴敢. 天地一体化信息网络协议体系与传输性能简析. 中兴通讯技术, 2016, 22(4): 39–45. [doi: [10.3969/j.issn.1009-6868.2016.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6868.2016.04.008)]
- [38] 赵雄文, 张钰, 秦鹏, 王晓晴, 耿绥燕, 宋俊元, 刘瑶, 李思峰. 空天地一体化无线光通信网络关键技术及其发展趋势. 电子学报, 2022, 50(1): 1–17. [doi: [10.12263/DZXB.20210690](https://doi.org/10.12263/DZXB.20210690)]
- [50] 李恒智, 王春锋, 王为众, 张杰. 基于SDN的卫星网络分布式移动管理研究. 通信学报, 2017, 38(S1): 143–150. [doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2017247](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2017247)]
- [59] “天象”升空! 天地一体化信息网络试验卫星成功发射. 2019. https://www.sohu.com/a/319349520_772793
- [72] 李贺武, 刘李鑫, 刘君, 吴茜. 基于位置的天地一体化网络路由寻址机制研究. 通信学报, 2020, 41(8): 120–129. [doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020135](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020135)]
- [86] 徐明伟, 夏安青, 杨莞, 王宇亮, 桑猛. 天地一体化网络域内路由协议OSPF+. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(1): 12–17. [doi: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.21.003](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.21.003)]



蒋长林(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究领域为天地一体化网络体系结构, 天地一体化网络传输方案.



赵达毅(1973—), 男, 高级工程师, 主要研究领域为天地一体化网络路由方案.



李清(1985—), 男, 博士, 副研究员, CCF 专业会员, 主要研究领域为下一代互联网体系结构, 天地一体化网络, 边缘计算, 智能协同计算.



江勇(1975—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要研究领域为下一代互联网体系结构, 天地一体化网络.



王羽(1972—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究领域为天地一体化网络体系结构, 网络仿真及验证技术.



徐明伟(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要研究领域为互联网体系结构, 大规模路由, 网络空间安全.



赵丹(1989—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究领域为天地一体化网络传输方案, 网络异常检测.

www.jos.org.cn