

全维可定义的天地协同组网架构与切片技术研究

李丹, 朱棣, 申涓

(战略支援部队信息工程大学, 郑州 450002)

摘要: 面对未来网络对全维度空间泛在互联互通的信息服务需求, 现有的卫星互联网基础架构及由此构建的技术体系在异构协同、资源高效、精准按需、稳定可靠等方面仍面临重大挑战。本文首先对我国卫星互联网技术发展需求进行分析研判, 讨论了全球卫星互联网技术的发展现状和趋势; 其次阐述了代表性的天地协同广域通信网络组网架构、全维可定义的网络节点; 最后从网络智能切片、数据解析与转发、资源协调控制机制等方面, 提出天地协同网络中面向业务特性的智能切片关键技术。研究建议: 依托天地协同网络架构, 以网络资源管理控制、网络智慧化、网络结构全维可定义等技术为支撑, 突破业务所需的天地协同网络资源智能切片、全维可定义的数据报文灵活解析与转发、天地协同网络资源全局协调控制等关键技术; 在国家层面加大对天地协同网络的政策支持力度, 为天地协同网络资源全局动态优化技术创新和产业发展提供持续推动力。

关键词: 天地协同网络; 智能网络切片; 全维可定义; 组网架构与机制

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Networking Architecture and Slicing Technology of Space–Ground Cooperative Network Based on Full-Dimension Definability

Li Dan, Zhu Di, Shen Juan

(PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Future networks demand ubiquitous and interconnected information services in a full-dimensional space. However, the infrastructure and the deriving technology system of the existing satellite Internet still face unprecedented challenges in terms of heterogeneous collaboration, resource efficiency, precision on demand, stability, and reliability. In this article, we analyze the development demand for satellite Internet in China and discuss the development status and trend of satellite Internet worldwide. Subsequently, we elaborate on a typical space–ground cooperative networking architecture and full-dimension definable network nodes. Ultimately, we propose the key intelligent-slicing technologies for a space–ground cooperative network in terms of network intelligent slicing, data analysis and forwarding, and the resource coordination and control mechanism. Furthermore, a development route is proposed for the intelligent slicing technology. Breakthroughs should be made on key technologies such as the business-on-demand intelligent slicing, data analysis and forwarding with full-dimension definability, and the global source coordination and control technologies; these breakthroughs should rely on the space–ground cooperative network architecture and supported by

收稿日期: 2021-01-16; **修回日期:** 2021-02-22

通讯作者: 李丹, 战略支援部队信息工程大学副研究员, 研究方向为新型网络体系架构与核心技术; E-mail: pkulidan@foxmail.com

资助项目: 国家重点研发计划“基于全维可定义的天地协同网络资源智能切片技术”(2020YFB1804803); 中国工程院咨询项目“网络强国”(2020-ZD-14)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

technologies such as network resource management and control, network intelligence, and full-dimension definability of the network architecture. This will ultimately provide continuous impetus for the innovation of the global dynamic optimization technology of the space-ground cooperative network resources.

Keywords: space-ground cooperative network; intelligent network slicing; full-dimension definable; networking architecture and mechanism

一、前言

近年来,传统的地面无线通信在用户数量、业务需求方面都呈现爆发增长的态势 [1],出现了以第五代移动通信 (5G)、物联网等为代表的新型网络技术。受限于网络容量和覆盖范围,这些地基网络技术难以满足陆地偏远地区、海洋、航空甚至深空等泛在网络空间的潜在通信服务需求,必须利用新型网络体系结构来适配各种情况下具有不同服务质量 (QoS) 要求的多维综合信息服务和应用需求 [2]。

卫星互联网对天基、地基、空基、海基网络进行复合利用,为全球范围内的广域空间信息服务需求和应用提供高效协同的通信网络基础设施。目前,美国的太空探索技术公司 (SpaceX)、亚马逊公司等在该领域一枝独秀,已经进入实质性的系统建设阶段。鉴于未来超大容量广域通信网络的应用需求极为迫切,我国也开始加强卫星通信技术的发展,在中央和地方政府层面都制定了促进卫星通信产业发展的政策。

本文针对全维可定义的天地协同组网架构与切片技术进行研究,分析研判我国卫星互联网技术发展需求,讨论全球卫星互联网技术的发展现状和趋势;描述典型天地协同广域通信网络组网架构和全维可定义的网络节点,从天地协同网络智能切片、全维可定义的数据解析与转发、资源全局协调控制机制等方面,提出天地协同网络中面向业务特性的智能切片关键技术,给出我国天地协同网络智能切片技术的发展建议。

二、我国卫星互联网技术发展需求分析

(一) 广域网络空间带来的泛在通信需求

近年来,地基网络尤其是无线通信需求快速增长,人类生产生活的范围随着科学技术的进步在不断扩大。传统地基网络容量有限,以 5G、物联网

等为代表的新型无线网络技术,虽然为解决万物互联的需求提供了可行解决方案,但由于通信频率不断向太赫兹级靠近、基站信号覆盖范围不断缩小,相应基础设施建设需要的数量和成本也在指数级的增长,且难以完整覆盖海洋、深空、极偏远地表等地理空间。因此,单一的地基网络已经难以满足广域网络需求空间带来的泛在通信需求,迫切需要即时、节约、高效的一体化立体网络,满足社会生产和居民生活对广覆盖、强可靠、高速率的网络需求 [3]。

(二) 经济社会发展带来的多维综合信息服务需求

信息服务对多维综合信息资源的需求逐步提升,国家战略安全、防灾减灾、航空、航天、航海、教育医疗、环境监测、交通管理等领域服务的高效运行都依赖于空、天、地等多维信息的综合应用 [4]。

天地协同的广域通信网络是面向未来的新型网络架构,聚焦基于传统地面蜂窝网络实现移动通信网络广域覆盖存在的投入巨大、难以为继的矛盾问题,以卫星广度覆盖和地面强度覆盖优势互补,摆脱各自独立发展的局限性,以形成“随遇接入、按需服务、安全可靠”的天地协同网络体系 [5]。该体系将“结构可定义”贯穿网络的各个层面,采用软硬件协同处理、资源动态组合等手段,建立从底层到上层全维度、可定义的灵活网络架构,保障网络结构在功能、性能、效能、安全等方面的按需定义,实现基于业务动态聚焦服务的新体制。

从社会、经济、生态视角来看,天地协同网络研究有利于快速形成社会效益及装备优势,发展相关理论与技术以实现重大领域的国际领先地位。该网络面向海洋、航空等广域移动通信场景,支持天地连续协同覆盖和基础设施机动部署,促进信息服务能力按需提供,对推动国家信息化建设、“一带一路”建设具有重要意义;有助于推动我国超 5G 移动通信 (B5G)、第六代移动通信 (6G) 等技术和标准的发展,打造完善的技术协同创新体

系，为网络强国、“互联网+”国家战略的实施提供关键支持。

（三）天地协同网络灵活组网的发展需求

天地协同网络与传统的地面网络、卫星网络相比，具有网络资源随时间和空间不断变化、业务覆盖范围广、业务种类复杂不确定、网络设备多元异构等特点，无法直接应用互联网的成熟网络资源协调和控制技术，难以为业务提供可定制的个性化资源。

天地协同网络中资源与业务负载的供需矛盾，主要体现在两个方面。一是天基节点与地面节点发展不均衡，难以进行统一管理。天地协同网络中包括大量天基、空中、海洋节点，这些节点由于特殊的地理位置，难以对节点基础设施进行频繁的更新换代（而地面节点则能够支持设备功能的快速更新），迫切需要针对传统的天地网络设备与传输协议、匹配规则和处理逻辑紧耦合的情况，统筹协调天地节点，实现设备功能的灵活扩展。二是天地协同网络业务多样但资源受限，难以实现网络架构随需更新。传统的卫星网络主要承担信息传输过程的中继任务，而天地协同网络中业务需求种类多，覆盖范围广，业务的时延、带宽、安全需求均实时变化，迫切需要针对网络资源存在的随需接入、忙闲不均、管理困难等情况，动态划分业务子网，实现精细化的业务响应。

切片技术依托网络虚拟化技术，针对差异化的网络业务需求，在一张网络内抽象出多个端到端、互相隔离的虚拟网络，在独立运维的前提下提供不同的功能、性能特性，为不同用户提供定制化的网络服务。这为天地协同网络中资源与业务负载的供需矛盾提供了良好的解决思路：在整个天地协同物理网络内虚拟出多个网络切片，区分业务类型对天地协同网络的不同需求，灵活组织各种网络能力；既满足不同业务的性能需求，也实现网络资源利用的最大化，达到网络与业务的高度适配。

三、全球卫星互联网技术的发展情况

（一）现有的卫星互联网系统

在过去的数十年中，通信网络领域提出了多种空地集成系统并应用于无线通信。例如，GIG是代

表性的空间-天空-地面综合网络；而空间-地面综合网络主要有两种网络架构，一是对地静止轨道卫星（GEO）系统，如转换卫星（TSAT）系统，二是非对地静止轨道（NGEO）系统，如O3b、星链（Starlink）等。

1. GIG

GIG是美国国防部发展的集通信网络、传感器网络、运营网络于一体的全维度通信项目。GIG分为地面层、航空层、临近空间层、卫星层，包含支持无缝覆盖全球通信所需的通信设备和节点[6]。

2. TSAT

TSAT系统是具有军事用途的GEO卫星系统，由美国国家航空航天局（NASA）、美国国防部和情报部门联合建设[7]；由5颗GEO卫星组成，通过激光链路相互通信，形成带宽为10 Gbps的骨干网，与地面网络配合，支持地面终端实时访问无人机和卫星的光学、雷达图像。

3. O3b

O3b卫星系统是由O3b Networks开发并部署的中轨（MEO）星座[8]。O3b表示“另外30亿”，旨在支持非洲、亚洲、南美洲的30亿居民通过卫星网络访问互联网。O3b网络计划由轨道高度约为8000 km、12~20颗MEO卫星组成星座。

4. Starlink

Starlink是美国SpaceX公司正在发展的超低轨星座项目，目前已成功发射入轨约420颗卫星，标志着低成本、高性能的卫星互联网通信系统已进入实质性建设阶段。由于全球地基网络技术发展较为成熟、改造部署相对容易，当前卫星互联网系统之间的差异主要在于天基网络中星座类型、卫星工作频段。表1简要对比了代表性卫星互联网系统的差异，随着技术的成熟、应用需求的发展，卫星互联网从军用为主逐渐过渡到民用、商用阶段。为适应低成本、大规模的部署需求，主要使用MEO、低轨（LEO）星座模式，卫星工作频段也趋同。Starlink是目前技术最为先进和成熟的项目，基于业务均匀分布的前提发展全球均匀的覆盖范围，忽略了全球通信业务分布不均这一现状，导致星座规模巨大、能效比可能不高。

（二）卫星互联网的一般组网架构

卫星互联网主要包括三部分：天基网络、地基

表 1 现有的代表性卫星互联网系统对比

系统名称	星座类型	工作频段	应用范围	应用时间/年
GIG	GEO、MEO、LEO星座	EHF、UHF、X、C、Ku、Ka	军用	2000
TSAT	GEO星座	EHF	军用	2003
O3b	MEO星座	Ka	民用、商用	2007
Starlink	LEO星座	Ku、Ka、V	民用、商用	2019

注：EHF表示极高频；UHF表示特高频；X表示频率在8~12 GHz的无线电波波段；C表示频率在4~8 GHz的无线电波频段；Ku表示比IEEE521-2002 标准下的K波段频率低的波段；Ka表示27~40 GHz的波段；V表示136~174 MHz波段。

网络、移动网络。由于地基网络、移动网络之间的距离相比天基网络几乎可以忽略，也可将移动网络并入地基网络范畴，即卫星互联网成为包括天基网络、地基网络两个维度在内的广域网络。

1. 天基网络

天基网络由卫星、星座及其相应的地面基础设施（如地面站、网络运营控制中心）组成。这些卫星和星座处于不同的轨道，具有不同的特性。根据轨道高度不同，卫星可分为 GEO、MEO、LEO 三类；还可根据卫星网络的信道带宽分为窄带卫星网络、宽带卫星网络两类。

窄带卫星网络指 MEO / LEO 卫星系统，如 Iridium、Globalstar，主要为全球用户提供语音和低速率数据服务。宽带卫星网络可以使用很宽的频带传输大量数据，高速数据传输速率达 10 Gbps。

作为下一代卫星网络的实用架构，多层卫星网络 (MLSN) 集成多个卫星网络，具有分层结构 [9]。MLSN 由数种类型的链路构成，如卫星间链路、层间链路 (ILL)。

2. 地基网络

地基网络主要由地面通信系统组成，如蜂窝网络、移动自组织网络 (MANET) [10]、全球微波接入互通性 (WiMAX) [11]、无线局域网 (WLAN) 等。蜂窝网络已经演进到了第四代 (4G) 或高级长期演进 (LTE-A)，正在向 5G 无线网络演进，以更广泛地支持各种服务类型。地基网络可为用户提供较高的数据速率，但在农村和偏远地区的网络覆盖范围有限。

3. 广域移动网络

广域移动网络有别于 5G 等地面移动通信网络，而是一种空中或水面移动系统；使用飞机、舰船作为载体进行信息获取、传输和处理。无人机、飞艇、气球是构成高空平台 (HAP)、低空平台 (LAP) 的主要基础设施 [12]，远洋海船、军用舰艇则是构

成海基平台 (SSP) 的主要基础设施，提供移动宽带无线通信以补充地基网络服务能力 [13]。与地基网络中的基站 (BS) 相比，移动网络具有成本低、易于部署、覆盖范围大等特点，可在区域范围内提供无线接入服务。

卫星网络可以为地球提供全球覆盖范围，但传播延迟长。地基网络具有最低的传输延迟，但相关基础设施容易遭受自然灾害或人为破坏。广域移动网络在延迟、覆盖范围方面具有优势，但在部署时须充分考虑容量限度、链路稳定性 [14]。

(三) 卫星互联网的关键性能要求

与传统的地面通信相比，卫星互联网受天上资源限制的影响很大，存在频谱受限、带宽受限、无线链路不可靠等问题。为了提供良好的网络性能，网络运营商必须建立具有高带宽、高可靠性、高吞吐量的广域通信网络。

1. 带宽分配

为了获得特定的网络性能，如一定的丢包率、时延、能耗，需要对目标网络进行合理的带宽分配。在卫星互联网中，带宽是具有多种用途的稀缺资源，增加带宽会消耗更多的功率；在执行带宽分配策略时，应该在功率、信息传输性能之间进行权衡。高频重用的多波束卫星系统不仅受到聚集干扰的限制，而且由于用户分布不均、内容要求不同，导致固定带宽分配效率低下，难以满足海量用户的差异化使用需求。

2. 可靠性

卫星互联网中的卫星、飞机、航船等节点一直在移动，网络拓扑也在动态变化 [15]，导致源与目的地之间很少或根本不存在完整的端到端路径，且端到端传输延迟远大于地面网络；当要求网络可靠性最大化时，不能同时优化所有网络性能指标，必须牺牲等待时间或数据速率。因此，成功设置端到

端的传输路径并确保可靠的消息传递是极大的技术挑战。

3. 吞吐量

卫星互联网中存在非常多的无线通信场景，具有严格的延迟约束、高数据吞吐量内容交付的需求，分析和改善信息传输速率、节省带宽以提高网络吞吐量是突出的挑战。

（四）我国卫星互联网技术研究进展

卫星互联网建设对我国高质量发展具有重大意义。除了我国的国际战略、民生战略对全球范围覆盖的信息服务提出需求之外，当前卫星数量快速增加，造成轨位拥挤、空间通信频谱极度稀缺，我国亟需快速发展卫星互联网体系，在激烈的空间资源争夺过程中保持应有地位。

2019年9月，我国5G网络率先进入全面商用阶段，标志着我国地基通信网络，特别是无线通信网络研究与应用走在了国际前列。在天基网络建设方面，我国2016年成功发射了“天通一号”卫星移动通信系统01星，部署在GED轨道，可同时为个人、车辆、航空器、海船等百万量级移动用户提供数据、语音、短消息等服务；2018年成功将“鸿雁”全球卫星星座通信系统的首颗试验星送入预定的非静止轨道，预计2025年系统全面部署300余颗卫星，可为用户提供全时全域的双向数据通信业务和综合信息服务。

随着天基、地基网络技术研究的日益成熟，我国在“十三五”规划中将“天地一体化信息网络”纳入科技创新—2030重大项目。天地一体化信息网络以天基网为骨干，以地面互联网为基础，融合全球范围的信息网络，实现万物互联互通。2020年我国在“新基建”中明确将低轨卫星互联网纳入实施规划，将构建提供全球无缝覆盖、高度安全可信、高机动随遇接入、区域大容量传输等服务的能力[4]。

四、天地协同广域通信网络总体架构

随着“一带一路”倡议等国家规划的实施，我国对外开放程度越来越高，未来对超大容量广域通信网络的应用需求极为迫切。现有地面蜂窝架构以规模换能力，投入巨大且难以为继，亟需从体系设

计的全局出发，寻找未来天地协同网络发展的切入点。对于广域通信网络中的陆地业务，全球90%的人口集中于10%的陆地，业务分布具有均匀性、集中性；对于海域业务，海洋面积占地球地表面积约为71%，地理范围广大而业务分布极其稀疏。可以认为，对于地面业务的高密度区域，均匀覆盖可实现较高效率；对于卫星广域服务范围，非均匀覆盖的效率更高。

（一）全维可定义的天地协同组网架构

典型的天地协同组网架构如图1所示，以MEO卫星作为网络的中心节点，构建广域信息主干网；地面通信基站面向各种地面终端用户接入需求，提供全球地面接入能力，通过网络卫星的接入能力与天基核心骨干网的交换路由能力，实现地面用户与全球任何其他地点的信息传输与交互；进一步借助MEO星座的天基互联能力，将多种LEO星座应用系统在空间实现互联，实现天基应用的系统协同、按需组网、按需覆盖，最终完成全球信息高速传输与交互。该架构支持我国未来通信网络架构的创新突破，牵引5G演进路径、6G基础网络规划，革命性提升网络服务的能力与效率[16]。

天地协同网络以结构决定功能、结构决定性能、结构决定效能、结构决定安全为理论依据，打破传统网络刚性架构（见图2）；将“结构可定义”贯穿网络的各个层面，采用软硬件协同处理、资源动态组合等方式，实现从底层到上层的全维度灵活可定义，支持网络结构功能、性能、效能、安全等需求定义。

全维可定义天地协同网络体系架构具有开放可扩展、可增量部署、异构融合等能力，支持网络按需重构以及新业务的快速响应。其中的网络层通过按需切片方式实现多样化业务的融合承载，有效解决天基/地基节点统一管理、节点资源受限等问题，驱动资源与业务精确适配等核心机制的建立。

（二）天地协同网络智能切片应用场景

在天地协同网络智能切片的应用场景中（见图3），以移动接入端、卫星通信基站、卫星、网关等节点组成的天地协同网络为网络拓扑，由运控中心对网络进行全局管理和调度。当用户发出数据传输、远程控制等服务请求时，运控中心根据业务类

型分别生成时延敏感业务切片、带宽敏感业务切片，结合典型的天地协同组网架构对网络资源进行多域控制，为各类业务分配所需资源；在每个节点上部署可编程转发平台，对其按需定义转发规则，完成针对不同业务的服务请求响应。

五、面向业务特性的天地协同网络智能切片技术

针对天地协同网络的资源强变时空尺度特性、多样化业务的复杂不确定特性，天地协同网络智能切片技术旨在克服天基与地面网络硬件设施的差异化转发平面带来的一体化切片管理困难，满

足多样化的时变网络业务与天基节点受限的网络资源配置需求，针对业务切片的按需更新提出更高要求，为超大容量广域覆盖网络应用提供高可靠、高质量服务。

(一) 业务随需的天地协同网络资源智能切片技术

针对差异化的广域信息网络应用需求，动态构建设计及不同业务特征的差异化网络切片，精确匹配不同业务数据的资源需求，实现多业务融合应用。该技术的实现可分为以下两个关键方面。

基于虚拟网络映射的网络资源切片生成技术，通过虚拟网络和物理网络的加权匹配，进行网络资源切片的快速生成。首先基于邻接矩阵特征向量分

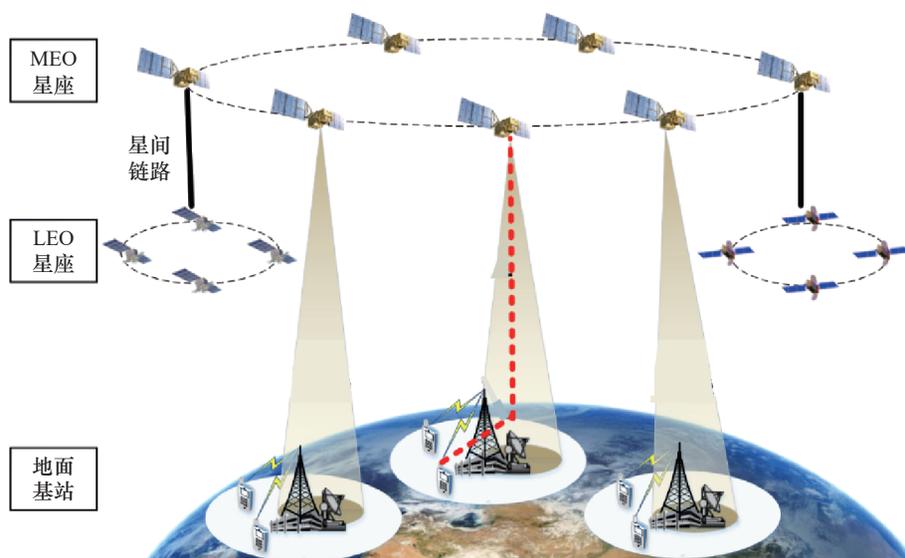


图 1 天地协同移动通信体系架构

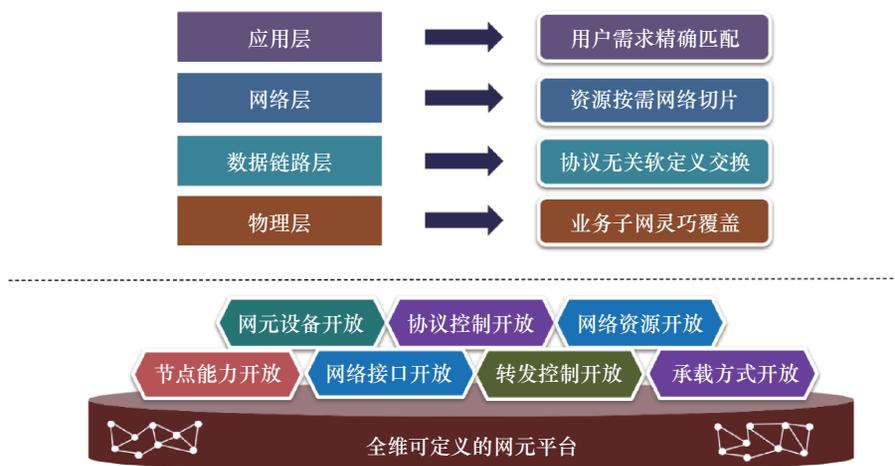


图 2 全维可定义的网络节点

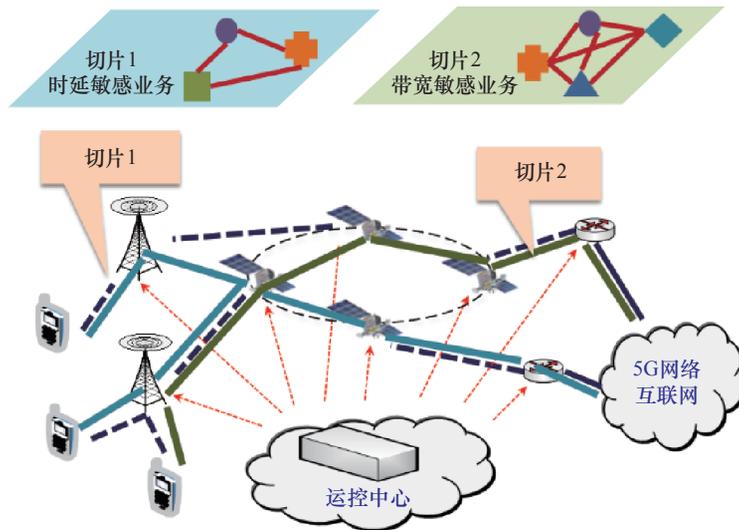


图3 天地协同网络智能切片应用场景

解原理，进行网络加权图的快速匹配，降低网络资源切片的计算复杂度；随后通过邻接矩阵元素替换机制，降低网络资源切片的最小带宽需求；最后通过基于爬山算法的虚拟网络映射优化方法，进一步优化负载和带宽的均衡度。

基于弹性功能编排的网络资源切片调度机制，通过基于流量演化感知的网络功能在线弹性编排策略，实现网络资源切片随业务需求的自适应调整：一是借助在线学习算法感知网络流量变化，分析业务需求的时变规律，以支持网络资源切片需求的实时更新；二是通过在线弹性编排算法，实现网络功能迁移与流量路径调整，以支持虚拟资源与业务负载精确匹配，降低网络资源切片的调度开销。

(二) 基于全维可定义的报文灵活解析与转发技术

针对典型的天地协同组网架构的广域灵活性、区域全覆盖特性，构建大规模网络资源与动态业务需求之间的全维感知、自主决策、实时适配机制，对网络中流量业务实施快速感知和迁移调度。该技术的实现可分为以下两个关键方面。

全维可定义的报文解析器，用于根据用户的配置来识别数据包的类型域，同时按照类型域提取相应匹配域。具体而言，使用可配置的包头解析器、细粒度可组合的元处理单元，实现全可编程的数据包处理流水线硬件设计及优化机制，有效提升数据包处理速率，支持底层硬件更新升级，大幅提高转发平面灵活性和自适应性。

灵活可编程的数据包处理方法，通过软硬件结合处理协议无关数据包，灵活支持标准协议、私有协议、自定义协议，支持用户直接描述网络协议和数据包处理等行为；无需关心底层硬件的细节就可以完成对数据包处理方式的编程描述，实现对转发平面可编程元件的实时配置，依据网络运行态势的自动感知实现网络功能的动态加载。

(三) 天地协同网络资源全局协调控制技术

针对天地协同网络在网络控制层面体现出的可定义转发需求，打破网络设备对业务和功能部署的限制，实现对数据报文解析-匹配-执行处理流程的全维度定义，增强网络资源对业务的适应性和扩展性。该技术的实现可分为以下两个关键方面。

面向智能分域管理的网络多域自适应规划算法，作为改进的无监督近邻聚类算法，用于网络控制能力和网络规模的自适应拟合；设计思路是依据吸引度和归属感对网络节点进行聚类操作，以网络 QoS 保障和可靠运行为目标，输出相应的多域规划方案，实现网络分域和网络控制能力的智能适配。

面向天地协同的多域网络资源匹配机制，依据流量智能调度和资源弹性控制，对有限的控制资源进行整合重组，有利于建立标识空间匹配映射和统一管理机制；基于用户和服务需求，智能选择并协同调度空间网络资源，通过控制功能的协同匹配对网络流量业务进行快速感知和迁移调度，实现

具有细粒度感知资源动态变化的多域网络协同管理和控制。

六、对策建议

(一) 构建全维可定义的天地协同网络总体架构

建议在推动卫星互联网增量式部署、演进式发展的基础上,对卫星互联网架构和技术体系进行基础性变革,促进技术研发由外挂式向内生性转变,构建全维可定义的天地协同网络。

构建天地协同网络的总体架构,关键在于建立全维可定义的网络核心运行逻辑:以结构决定功能、结构决定性能、结构决定效能、结构决定安全为理论依据,通过软硬件协同处理、资源动态组合等方式,根据业务需求对天地协同网络中的网络覆盖、服务和异构资源进行统一管理和灵活调度;将“结构可定义”贯穿网络的物理层、链路层、网络层、应用层,实现网络结构在功能、性能、效能、安全等方面的按需定义,使天地协同网络体系架构具备开放可扩展、可增量部署、异构融合等能力,支持网络按需重构并快速响应新业务。

(二) 深化天地协同网络智能切片技术研究

网络层通过按需切片的方式来实现多样化业务的融合承载,有效解决天基、地基节点的统一管理与节点资源受限问题,使天地协同网络实现资源与业务的精确适配并建立核心机制。

天地协同网络智能切片技术的发展路线应为:依托天地协同网络架构,以网络资源管理控制、网络智慧化、网络结构全维可定义等技术为支撑,突破业务随需的天地协同网络资源智能切片、全维可定义的数据报文灵活解析与转发、天地协同网络资源全局协调控制等关键技术;从网络资源优化层面综合解决天地协同网络面临的关键科学问题和技术,为天地协同网络资源的全局动态优化和技术创新突破提供持续动力。

(三) 从国家层面对天地协同网络给予政策支持

卫星通信网络有望成为我国高新技术领域增长最快的行业之一,建议在理论研究和应用示范两个方面给予政策倾斜,促进天地协同网络技术与产业

的高质量发展。

在理论研究方面,建议国家重点研发计划、国家自然科学基金等渠道合理增设天地协同网络相关项目,着力发展相关基础理论与工程技术以实现在该领域的国际领先地位;在应用示范方面,面向海洋、航空等广域移动通信场景开展应用示范专项布局,显著提升海洋产业等国民经济的信息化应用水平,促进我国卫星网络系统、终端设备的产业化进程,提高卫星通信网络的应用水平和价值创造能力。

参考文献

- [1] Ohlen P, Skubic B, Ghebretensae A, et al. Data plane and control architectures for 5G transport networks [C]. Valencia: 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC), 2015.
- [2] Ren J, Zhang N, Gao Y, et al. Guest editorial: Service-oriented Space-Air-Ground integrated networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(6): 10-11.
- [3] 黄韬, 刘江, 汪硕, 等. 未来网络技术与发展趋势综述 [J]. 通信学报, 2021, 42(1): 130-150.
Huang T, Liu J, Wang S, et al. Survey of the future network technology and trend [J]. Journal on Communications, 2021, 42(1): 130-150.
- [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.
Shen X M, Cheng N, Zhou H B, et al. Space-Air-Ground integrated networks: Review and prospect [J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [5] Jiang C, Zhu X. Reinforcement learning based capacity management in multi-layer satellite networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(7): 4685-4699.
- [6] Hubenko V, Raines R, Mills R, et al. Improving the global information grid's performance through satellite communications layer enhancements [J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(11): 66-72.
- [7] Hamdi M, Boudriga N, Obaidat M. Bandwidth-effective design of a satellite-based hybrid wireless sensor network for mobile target detection and tracking [J]. IEEE Systems Journal, 2008, 2(1): 74-82.
- [8] Blumenthal S. Medium earth orbit Ka band satellite communications system [C]. San Diego: MILCOM 2013—2013 IEEE Military Communications Conference, 2013.
- [9] Nishiyama H, Tada Y, Kato N, et al. Toward optimized traffic distribution for efficient network capacity utilization in two-layered satellite networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 1303-1313.
- [10] Conti M, Giordano S. Mobile ad hoc networking: Milestones, challenges, and new research directions [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(1): 85-96.
- [11] Aalamifar F, Lampe L, Bavarian S, et al. WiMAX technology in smart distribution networks: Architecture, modeling, and

- applications [C]. Chicago: 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, 2014.
- [12] Ye J, Dang S, Shihada B, et al. Space-Air-Ground integrated networks: Outage performance analysis [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(12): 7897–7912.
- [13] Chandrasekharan S, Gomez K, Al-Hourani A, et al. Designing and implementing future aerial communication networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 26–34.
- [14] Liu J, Shi Y, Fadlullah Z, et al. Space–Air–Ground integrated network: A survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2714–2741.
- [15] Kato N, Fadlullah Z, Tang F, et al. Optimizing Space–Air–Ground integrated networks by artificial intelligence [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(4): 140–147.
- [16] Du J, Jiang C, Wang J, et al. Machine learning for 6G wireless networks: Carrying forward enhanced bandwidth, massive access, and ultrareliable/low-latency service [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2020, 15(4): 122–134.