



专题：卫星互联网

通信、网络、计算融合的天地一体化信息网络体系架构研究

虞志刚，冯旭，黄照祥，陆洲

(中国电子科技集团公司电子科学研究院，北京 100041)

摘要：随着人类活动范围从大陆向海洋、太空的不断扩展，世界各国纷纷开始布局全球无缝覆盖、连接无处不在的天地一体化信息网络建设。天地一体化信息网络是天基网络与地面网络的深度融合，不是简单的地面向空间的拓展与叠加。从融合的角度出发，首先梳理了地面互联网、移动通信网、天基信息网络发展现状以及存在的问题与挑战；然后总结分析了天地一体化信息网络体系架构研究现状以及新型网络架构向云化、智能化发展的趋势；最后提出了通信、网络、计算融合的天地一体化信息网络的体系架构，并从物理架构、功能架构、物理与功能架构映射等多个维度进行了阐述，提出了一体化信息通信系统、一体化网络系统、一体化信息系统的3层功能架构模型，以为后续天地一体化信息网络的研究、建设和标准化提供有价值的建议和参考。

关键词：天地一体化信息网络；天基网络；互联网；移动网；网络架构

中图分类号：TP393

文献标志码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022079

Research on the architecture of space-ground integrated information network: integration of communication, networking and computing

YU Zhigang, FENG Xu, HUANG Zhaoxiang, LU Zhou

China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

Abstract: With the continuous expansion of human activities from the terrestrial to the ocean and space, the countries all over the world have advanced the layout of space-ground integrated information network to provide seamless coverage and ubiquitous connection services. Space-ground integrated information network is the deep integration of space network and terrestrial network, not the expansion of terrestrial network to space environment. Starting from the perspective of integration, firstly the development status, existing problems and challenges of the internet, public land mobile network (PLMN), and space networks were sorted out. Secondly, the research status of the space-ground integrated information network architecture and the development trend of the new network architecture such as cloudification and intelligence was summarized. Thirdly, a communication-networking-computing integrated space-ground integrated information network architecture was proposed from different dimensions: physical archi-

收稿日期：2022-03-01；修回日期：2022-04-10

基金项目：国家重点研发计划项目（No. 2020YFB1806001）

Foundation Item: The National Key Research and Development Program (No.2020YFB1806001)



ture, functional architecture (including the integrated communication system, the integrated network system and the integrated information system), physical-functional architecture mapping problem. Finally, the network architecture optimization problem was modeled as a multi-objective optimization problem. It was expected to provide valuable suggestions and references for the research, construction and standardization of space-ground integrated information network.

Key words: space-ground integrated information network, space network, internet, mobile network, network architecture

0 引言

当今世界, 信息网络技术与实体经济深度融合, 数字经济在国民经济的比重不断攀升(以中国为例, 截至 2020 年, 其数字经济规模达到 39.2 万亿元, 占 GDP 比重为 38.6%)^[1], 深刻地改变着人们的生产生活方式, 成为世界各国经济增长的新引擎。与此同时, 随着人类活动范围从陆地、近海、近空向深海洋、深空的不断扩展, 地面互联网、移动通信网络等传统网络已无法满足人们日益增加的泛在连接需求, 天基网络与地面互联网、移动通信网等相互融合、取长补短, 共同构建“覆盖全球无缝、连接无处不在”的天地一体化信息网络, 满足用户无处不在的多样化业务需求, 已成为促进经济社会新发展、保障国家核心安全的必然选择^[2]。

天地一体化信息网络(space-ground integrated information network)将地面网络从近地表向空间延伸、从二维覆盖走向三维泛在^[3], 天地一体化信息网络系统组成示意图如图 1 所示, 是 6G 的关键技术之一, 也是国家战略性通信网络基础设施^[4-5]。近年来, 3GPP、ITU 等标准化组织成立了专门工作组着手天地一体化网络的标准化问题, 美国 SpaceX 公司、中国电科、中国信科、中国星网等国内外企业与研究组织也投入研究建设之中^[6]。

网络体系结构是网络研究的基础, 更是开展网络建设的先决条件。当前, 国内外围绕天地一体化信息网络体系结构的研究主要集中在两个方面: 一是“互联网+卫星”模式, 认为天地一体化信息网络是地面互联网向三维空间的拓展。如美国

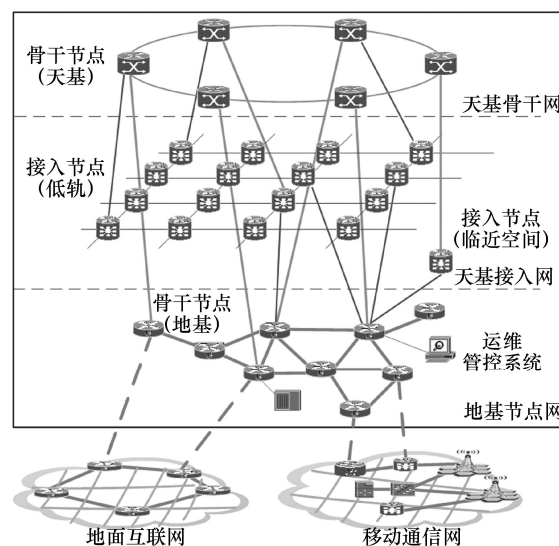


图 1 天地一体化信息网络系统组成示意图^[2]

SpaceX 公司推出的星链(Starlink)低轨星座将卫星作为地面互联网的“天基 Wi-Fi”热点^[5], 技术研究则主要集中在如何解决中低轨卫星高速移动情况下带来的天基网络拓扑动态时变拓扑与路由问题; 二是“移动通信网+卫星”模式, 认为天地一体化网络是地面移动网络向三维空间的延伸。如铱星公司推出的铱星下一代星座将地面基站搬到了卫星作为卫星基站“SatNode B”, 技术研究则主要集中在星地之间(即用户与基站之间)的新型接入/空口协议设计、星载相控阵天线、星载 MIMO 技术以及高可靠激光器等^[4]。

天地一体化信息网络是天基网络与地面网络的深度融合, 不是简单地地面向空间拓展与叠加, 因此本文从融合的角度出发, 对天地网络的体系结构进行对比分析与提炼总结, 并在此基础上, 提出了通信、网络、计算融合的天地一体化信息网络的体系结构和设想, 以期后续天地一体化信息网络的

研究、建设和标准化提供有价值的建议和参考。

1 天地网络体系结构概述

1.1 地面互联网络体系结构

地面互联网一般特指“Internet”，最早源于美国国防部高级研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）建设的阿帕网络（ARPANET），旨在解决不同体系结构网络之间的“互联互通”问题^[7-8]，提出了基于“分组交换+TCP/IP”为核心的体系架构，实现了各类异构网络的网际互联，并与传统电话网、广播电视网的功能融合，并与实体经济深度融合，成为全球最重要的信息基础设施。互联网分层体系结构如图 2 所示，按照网络节点的功能进行细分，体系结构主要包括：接入层、汇聚层和核心层。

（1）接入层

接入层是用户接入网络的“入口”，通过光纤、双绞线、Wi-Fi 以及可见光等传输介质实现用户与网络之间的连接，进而为用户提供服务。

（2）汇聚层

汇聚层是接入层与核心层之间的“中介”，通过对接入流量实施汇聚、清洗、安全和过滤等各种策略，有效减轻核心层的负荷。

（3）核心层

核心层是整个网络系统的“骨干”，也是网络技术水平的集中体现，实现骨干网络之间的优化传输，是所有流量的最终承载者和汇聚者，同时对外还提供外部业务接入服务，所以统筹核心层通常需要采用冗余设计。

1.2 移动通信网络体系架构

移动通信网络的全称是公共陆地移动网络（public land mobile network, PLMN），是为公众提供陆地移动通信业务而建立和经营的网络，经过近半个世纪的发展，从第一代移动通信系统（1G）的“大哥大”时代开始，已经以 10 年一代的节奏持续演进。当前，正处于“信息随心至”的 5G 时代，并逐步向万物互联的 6G 迈进，移动通信信号已基本覆盖了大部分人员密集的陆地、近海和近空区域。与此同时，移动通信网络与互联网相互渗透、彼此融合，催生了移动互联网与数字经济，近 10 年来成为经济社会发展的新引擎^[1]。

自 20 世纪 80 年代 1G 系统部署以来，移动通信网络系统的用户容量、速率、时延以及带宽等性能指标都获得了大幅的提升，然而其核心的功能架构却相对比较稳定，移动通信网体系结构如图 3 所示，具体为 4G（LTE）以及 5G 系统的架

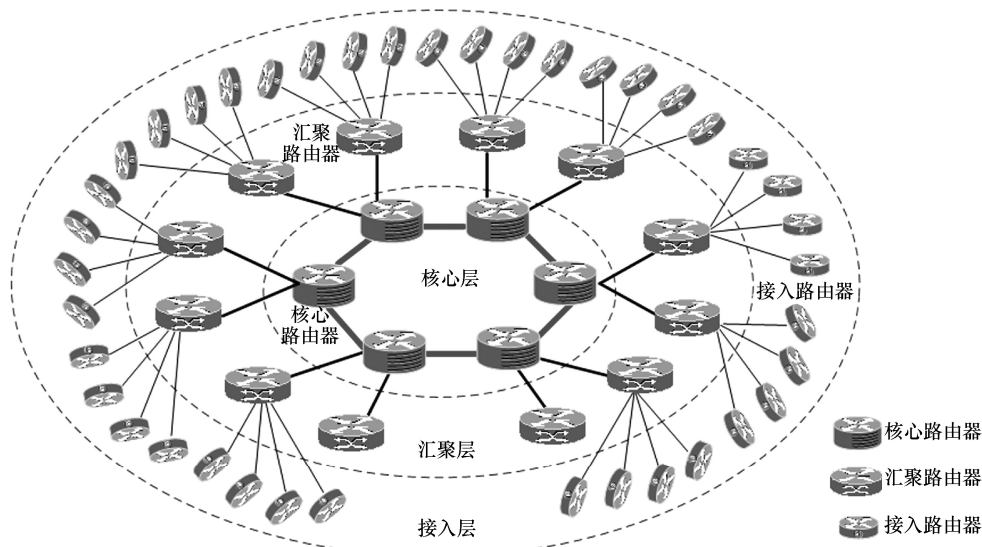


图 2 互联网分层体系结构

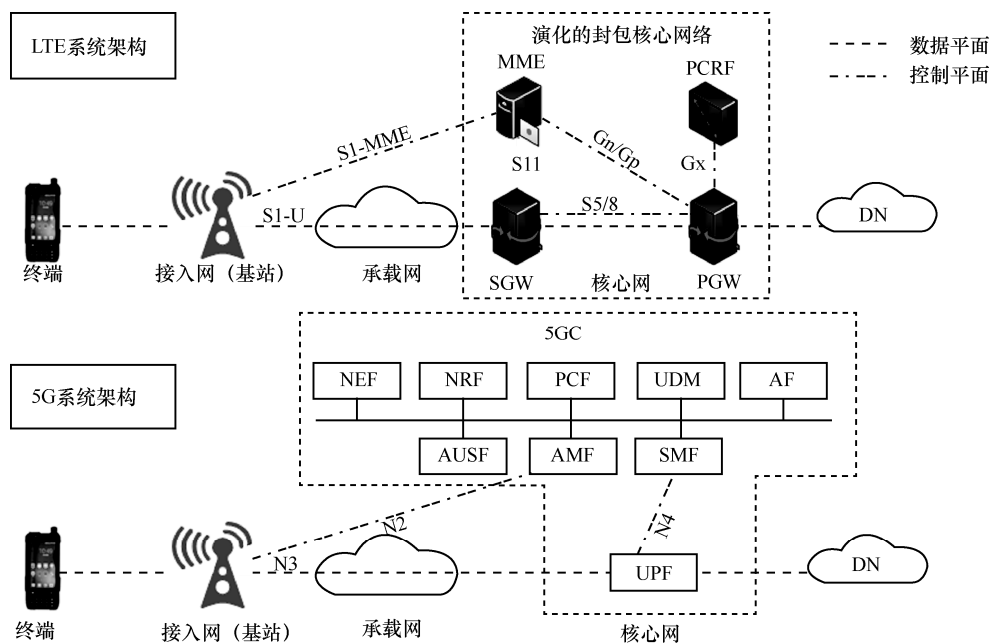


图3 移动通信网体系结构

构，从图3可以发现，功能上主要包括：接入网、承载网和核心网，物理上对应的设备分别是基站、路由器和核心网设备（如4G时代的MME（mobility management entity，移动性管理实体）、PGW（packet data network gateway，分组数据网络网关）等设备，以及5G时代的UPF（user plane function，用户面功能）、AMF（access and mobility management function，接入和移动性管理功能）等功能网元）。

（1）接入网

接入网即RAN（radio access network），可以被比喻为人的“四肢”，负责广域分布的无线覆盖、无线信道的资源管理、无线信号的发送接收以及编码译码等功能，对应的物理实体主要包括手机和基站。其中，手机与基站之间的天线及空中接口体制是移动通信领域研究的热点问题。

（2）承载网

承载网即PTN（packet transport network），可以被比喻为人四通发达的“脉络”，负责连接“四肢”和“大脑”，作为接入网与核心网之间的传输通道，主要负责对各种信息和信令进行按需传送。

（3）核心网

核心网即CN（core network），可以被比喻为人的“大脑”，是整个网络的管理中枢，负责无线资源管理、移动性管理、接纳控制以及会话管理等核心功能。同时，核心网还可以对外提供互联网接口。

1.3 天基信息网络体系架构

与地面互联网或者移动通信网不同，天基信息网络是以天基为核心的网络系统，文献[4-6]中亦称其为空间信息网络、卫星通信网络或卫星互联网等概念。天基信息网络最早可以溯源到1945年10月，英国空军雷达专家阿瑟·克拉克在《无线电世界》杂志上发表文章《地球外的中继站》，首次提出在静止轨道上放置3颗卫星来实现全球通信的设想，开创了天基信息网络的先河。当前，天基信息网络经历模拟/数字通信、窄带星座、高通量卫星和宽带卫星星座等阶段^[4]，正向着全球信息基础设施方向发展。虽然天基信息网络的覆盖范围、通信速率、用户容量、天线技术、传输体制以及卫星规模等均发生了翻天覆地的变化，然而其核心的功能架构仍保持相对稳定。功能上主

要包括：空间段、地面段和用户段，物理上对应的设备分别是卫星、地面站和终端等，天基信息网络体系架构如图 4 所示。

(1) 空间段

空间段是天基信息网络的主体部分，主要由布设在高轨、中轨或低轨的一颗或者多颗卫星节点组成，卫星之间根据星座构型建立星间链路构成一张天基网络。卫星作为天基信息网络中的核心资产，一直面临造价高、功耗受限、空间环境复杂和无法维修等诸多挑战，也是天基信息网络有别于其他网络系统的显著特征。

(2) 地面段

地面段是天基信息网络的地面部分，主要由位于建设在地球表面的机动或固定信关站组成，信关站之间通过铺设或者租赁网络资源形成一张连通的地面网络。

(3) 用户段

用户段是天基信息网络的终端部分，主要由接入天基信息网络的手持、车载、船载、机载、星载卫星终端以及各种应用系统等组成。

1.4 对比分析

天基信息网络架构与互联网、移动通信网络

对比分析如图 5 所示，其中地面的互联网按照功能逻辑将网络划分为：终端、接入路由器、汇聚路由器以及骨干路由器。移动网按照功能逻辑划分为终端、接入网、承载网以及核心网，而天基信息网按照功能+物理的融合标准将网络划分为用户段、空间段以及地面段，其中空间段和地面段更多是从物理空间的逻辑进行划分，与功能部署无关。按照传统卫星通信发展的逻辑，综合考虑天基体积质量受限以及计算存储资源受限等物理条件，空间段负责尽可能简单的功能，如采用透明转发模式，星上仅变频，不进行其他处理；地面段负责较为复杂的功能，比如无线资源调度、用户接入认证等，在这种情况下空间段与地面段的划分既是一种物理空间的划分，也天然对应着一种功能逻辑的划分。

然而，随着宇航级芯片计算能力的大幅提升，以及商用货架器件 (commercial off-the-shelf, COTS) 在空间环境的大规模使用^[9]，星上处理能力得到了大幅提升，部分功能将可以从地面搬移到星上，于是产生了星上处理的新模式，传统按照物理空间进行功能划分的逻辑将不够准确，因此迫切需要开展新型天基网络体系架构的研究。

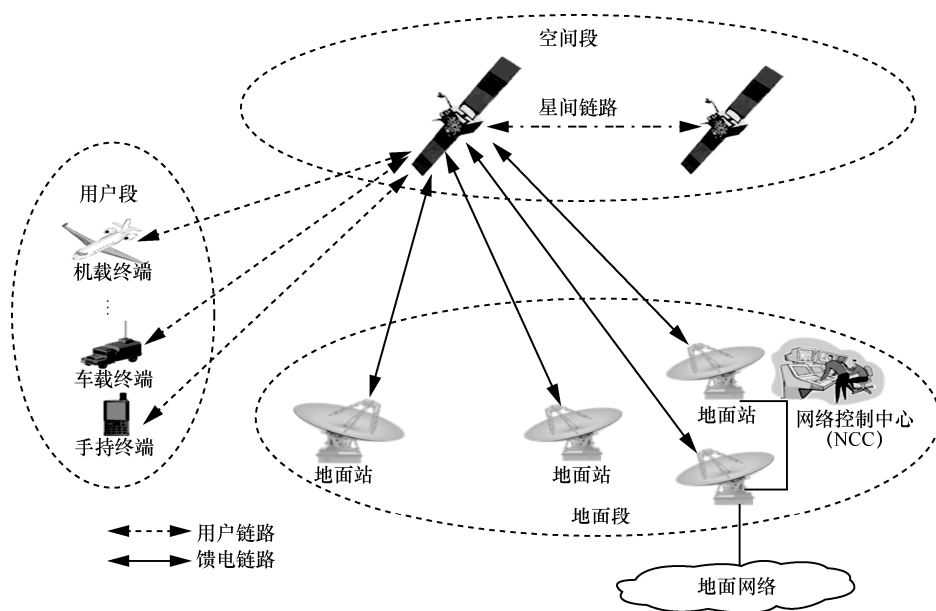


图 4 天基信息网络体系架构

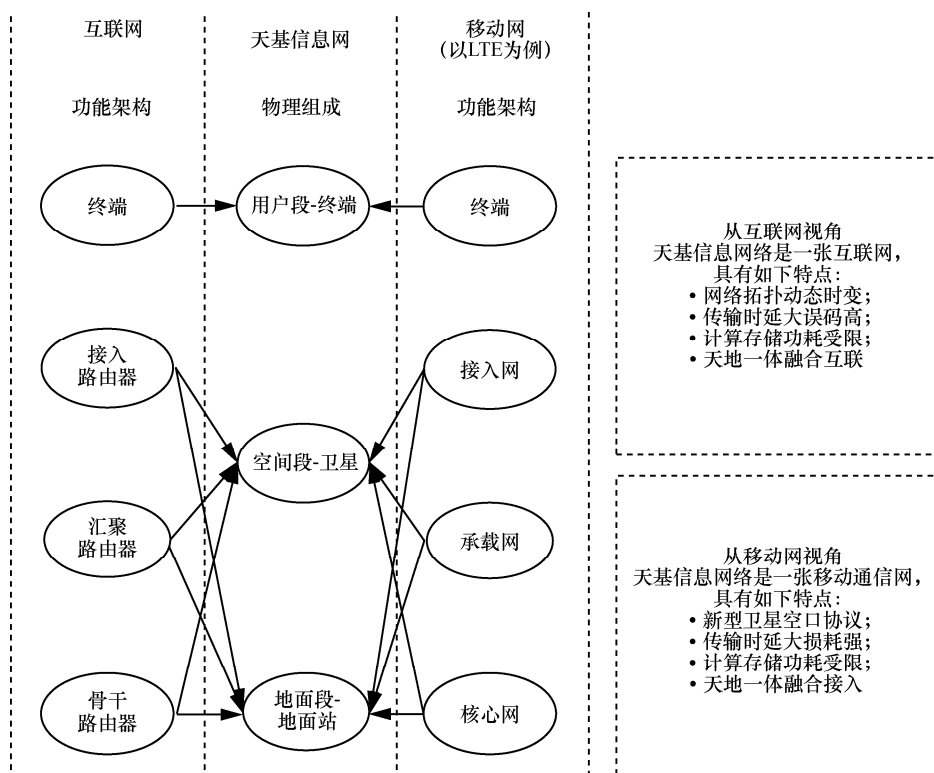


图5 天基信息网络架构与互联网、移动通信网络对比分析

2 天地一体化信息网络体系架构研究现状

面向天地网络融合发展趋势，构建天地一体化信息网络成为未来网络发展的必然方向，天、地通信网络基础设施将融合发展成为全球战略性信息基础设施。学术界与工业界纷纷计划将地面网络技术延伸或拓展至天基，呈现以下两种研究视角。

2.1 “互联网+卫星”研究现状

“互联网+卫星”即“Internet+ satellite”视角，天地一体化信息网络是地面互联网向三维空间的拓展，部署于空间环境的卫星节点相当于一个“天基接入路由器”，兼具无线接入与路由转发功能。卫星之间通过星间链路构成卫星网络，通过星地链路实现与地面信关站互联，最终与地面互联网基础设施一起构建天地一体的互联网。

互联网方向的研究更加关注“互联”方面的问题，即如何在卫星高速移动导致空间网络拓扑动态时变以及星载处理、功耗等资源受限的条件

下，研究和设计高效星间组网和路由问题。国内外学术界与工业界开展了大量的学术研究与技术攻关。

2.1.1 网络拓扑

拓扑结构作为天地一体化信息网络的关键特征之一，国内外学术界开展了大量的研究，但均集中在卫星网络的拓扑结构，包括以下两类研究。

(1) 单层网络拓扑网络对比分析

针对全球覆盖的大规模卫星星座场景，文献[10]探讨了单层低轨卫星星座采用近极轨道时的拓扑结构，卫星之间的互联拓扑任何时刻都可以抽象为一个曼哈顿街区模型，但是需要考虑近极轨的影响；文献[11-12]讨论了单层低轨卫星星座采用倾斜轨道时拓扑构型，卫星之间的连接关系变化将更加频繁，但是仍然有规律可循。铱星星座采用的就是近极轨的单层低轨星座。针对小规模卫星星座场景，文献[13]讨论了小卫星编队场景下，卫星之间采用自组织网络构成的网络拓扑，此时

卫星节点之间根据可视关系自由建链, 没有固定拓扑结构。

(2) 多层网络拓扑

文献[14]探讨了高轨、中轨和低轨等多层卫星混合组网的网络拓扑, 不仅同轨道卫星之间彼此建立星间链, 不同轨道之间仍然建立星间链路, 构成一个三维立体的卫星网络拓扑。除此之外, 文献[15]对多层、单层网络拓扑的网络容量、平均跳步等性能进行了分析评估。

2.1.2 路由算法

在网络设计中, 拓扑结构的决定了天地一体化信息网络容量的理论上限, 而路由算法将会直接决定最高可达的容量水平。自 20 世纪 90 年代铱星系统建设以来, 为了解决中低轨卫星高速运动导致的拓扑时变特性, 国内外研究人员开展了广泛且深入的卫星网络路由算法研究, 但根据计算路由转发表的方式可以分为静态路由和动态路由两类。

(1) 静态路由

文献[16-18]介绍了一种基于快照序列的路由, 即属于静态路由, 该方法根据卫星节点运行的规律性, 将一个星座运行周期划分为一系列快照序列, 每一个快照序列认为卫星网络拓扑是固定的, 提前计算路由转发表, 路由转发表也保持不变, 仅当时间序列变化时才更新路由表。

(2) 动态路由

与静态路由不同。动态路由可以根据节点、链路甚至流量状态动态触发路由表的重新计算, 可以有效应对节点、链路等故障场景, 可以较好地适应电磁环境异常复杂的卫星网络场景。文献[19-20]提出将地面互联网常用的 OSPF (open shortest path first, 开放式最短路径优先)、BGP (border gateway protocol, 边界网关协议) 等协议扩展到卫星网络环境, 提出了“OSPF+”和“BGP+”, 为了解决卫星网络时变的拓扑引起的频繁路由更新和计算, 该算法利用空间网络运动的

可预测性, 巧妙地避免由正常链路切换导致的路由计算。文献[21]介绍了一种反应式路由算法, 不同于上述算法提前计算路由表, 该算法当且仅当有业务需求时, 才通过发送探测包寻找目的节点的地址, 后续数据包将沿着探测包建立的路径进行传输, 且此传输路由仅保持一定时间的有效期, 过期后需要重新发送探测包建立。

除此之外, 文献[22]提出了基于位置的天地一体化信息网络路由寻址机制, 源节点和目的节点之间通过位置对比, 即可获得分组转发的大致方位, 是一种基于计算的路由算法。文献[23-25]提出引入时间敏感网络 (time sensitive network, TSN)、容迟容断网络 (delay tolerant network, DTN) 以及人工智能等各种新技术对路由算法进行优化, 以提供更好的确定性和负载均衡性等性能。

2.2 “移动网+卫星”研究现状

“移动网+卫星”即“xG+satellite”视角, 天地一体化信息网络是移动通信网络向空间的拓展, 卫星节点相当于一个“天基基站”, 与地面移动通信网相关设施共同构成一张天地融合的移动通信网络 (public land & space mobile network, PLSMN)。

移动网络方向的研究更加关注“接入”方面的问题, 即如何在空间大时空尺度、卫星高速移动以及星载处理、功耗等资源受限的新挑战下, 研究和设计高效新型的空中接口以及多波束天线技术, 为此国内外工业界和学术界进行了大量的探索和研究。

2.2.1 空中接口

空中接口是用户无线接入网络的接口协议, 是移动通信领域的关键核心技术之一, 甚至一度成为移动通信技术代际划分的标志 (如 2G 时代的 TDMA、3G 时代的 WCDMA 等)。纵观国内外现状, 面向卫星网络的空中接口研究主要分为以下两条技术路线。

(1) 地面移动通信体制向空间拓展。目前,



国内外有大量将地面成熟的移动通信体制向空间拓展的研究和案例。文献[26]分别介绍了 3G/4G 体制在英国海事卫星通信系统、我国“天通一号”卫星移动通信系统中的应用；文献[27-28]分析了与 LTE 相关的移动性切换技术用户卫星网络的可行性；文献[29-30]分析了地面 5G 体制在低轨卫星的适应性；文献[31-32]提出了星地融合的统一空口体制的设想，以及亟待解决的问题。随着地面 5G 空口体制与低轨卫星的融合，构建天地一体的空口体制已经成为业界共识。

(2) 卫星电视广播体制向通信扩展。除了将地面移动通信体制进行拓展，另外一种思路是将传统的数字视频广播 (digital video broadcast, DVB) 体制向通信体制拓展。目前，欧洲电信标准学会 (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) 提出了相关的机制和标准，文献[33-34]介绍了目前最为先进的高轨宽带通信体制 DVB-S2X (第三代 DVB 电视广播标准) 和 DVB-RCS2，支持从单波束到多波束组网、星状到网状组网方式，这两种体制在国内外的高轨卫星通信系统中得到了广泛应用。然而 DVB 类体制也有着其天然的缺点，如不支持移动性管理等功能，为其推广应用带来一定的影响。

2.2.2 新型天线

天线是现代通信系统中的关键设备，面向卫星覆盖广、看得远，需要支持大量用户的接入，就必须用到多波束天线技术。星载常见的多波束天线主要包括以下 3 类。

(1) 星载反射面天线。文献[35-36]介绍了反射面多波束天线的优点，主要包括重量轻、性能好、结构简优点，可以满足大口径、成百点波束的需求，目前已经在美国休斯公司的太空之路 3 号卫星 (Spaceway-3) 等高轨卫星通信系统中得到了应用，技术成熟度高。

(2) 星载相控阵天线。与反射面天线不同，相控阵天线可以通过相位、幅度的调整来实现灵

活的波束成形、功率调整以及波束扫描，能够更好地适应业务分布不均匀的业务需求。文献[37]介绍了欧洲量子卫星采用的相控阵天线仅提供 8 个收发波束。文献[38]介绍了星载相控阵天线传热路径设计与热流分析。文献[39]设计了一种一体化星载 Ka 相控阵天线收发组件。

(3) 新型高效传输技术。为了获取更高的通信带宽，通信采用的频段从 L、S、C，走向 Ku、Ka，并逐渐向太赫兹、激光通信拓展。文献[40]对星载太赫兹高频段大气背景辐射特性进行了研究，目前我国已经完成了 0.34 THz 载频、10 Gbit/s 速率场景下的地面短距离试验，未来太赫兹技术将成为解决空间高速传输与组网问题的重要技术手段之一；文献[41]介绍了星载小型化激光通信终端技术研究现状及发展方向，星间激光通信具有体积小、功耗低、不需要频率协调等优点，也成为国内外卫星星座建设者的首选技术之一，Starlink、BlackJack 等均提出采用激光链路^[9]，目前我国多家科研单位均处于世界同等水平^[4]。

3 新型网络架构发展趋势

3.1 网络架构“融合化”

网络架构云化，进而进行网云融合，已经成为未来网络发展的必然趋势，更是新型信息基础设施的核心内容^[2-4]。国内外运营商纷纷提出云网融合的网络架构，中国联通提出了名为 CUBE-Net 3.0 的数字基础设施型新型网络架构^[42]，中国电信给出的“网是基础，云为核心，网随云动，云网一体”为云网融合设计理念^[43]，网络架构的云化主要受以下两方面因素驱动。

一是应用驱动。以移动通信网、互联网为代表的网络空间与经济社会的深度融合，彻底改变了人们的生活方式，与此同时催生了多样化的应用场景和业务形态。5G 提出了增强型移动宽带、大规模物联网和超可靠低时延通信三大应用场景，分别对带宽、连接数、时延以及可靠性等性

能指标有着近乎极致的要求,迫切需要网络架构能够依据应用场景弹性适变,主动适配应用场景,这是网络架构向“云化”发展的应用需求。

二是技术牵引。随着软件定义技术的迅猛发展,以及以通用服务器为代表的通用计算能力的大幅提升,业界出现了 SDx (software defined x,),即软件定义一切的理念^[44-45],这将接入、承载、核心网等各种网络功能通过软件来实现,运行在通用的服务器上,最终实现网络功能虚拟化 (network function virtualization, NFV) ^[42-43],可以在摆脱专用设备依赖、降低网络运营成本的同时,赋予网络可编程、灵活配置的能力,摆脱传统网络架构封闭的缺点。

网络架构“云化”发展趋势见表 1,通过将网络功能软件化和虚拟化,将网络设备通用化和标准化,可以实现软硬件解耦,使网络功能不再局限于硬件架构和定制设备。结合当前的 5G 发展现状,以核心网功能的软件化最为成熟,5G 核心网功能可以运行在通用 x86 服务器,获得了最大的灵活性^[42]。承载网接踵而至,从专用路由器设备向协议无感知转发设备 (programming protocol-independent packet processors, P4) 发展^[44];接入网难度最大,目前业界也提出了 OpenRAN 的解决方案^[45],总体而言网络架构的全面云化已经势不可挡。

表 1 网络架构“云化”发展趋势

序号	网络功能软件化		网络设备通用化
1	接入	基站功能	运行于 OpenRAN
2	承载	路由功能	运行于 P4
3	核心	核心网网元功能	运行于 x86 服务器

3.2 网络架构“智能化”

网络架构智能化已经成为业界共识,也被认为是未来 6G 网络的关键技术特征之一^[46]。当前,网络架构智能化研究主要包括如下两方面:一是在网络架构云化的基础之上,网络能够根据应用或者业务场景的变化,自动化地调整网络架构,实现架构层面的智能组网;二是智能引入网络管理控制之中,通过收集网络运行的参数,并在此

基础上,通过智能算法给出网络优化的策略,实现运维层面的运行智能。无论是上述哪种方式,抑或后续还会有新的智能化含义,都会极大地优化网络架构,提高网络运行效率,改善用户体验。

4 天地一体化信息网络体系架构设想

4.1 设计原则

纵观地面互联网的发展,其始终要处理好“应用”与“技术”两者之间的平衡,而天地一体化网络架构的设计也应该如此,具体如下。

一是以应用为牵引、以技术为主导。天地一体化网络体系架构的设计,必须以满足日益丰富的天地融合网络应用为根本,但同时要根据天、地环境的差异性,以及空间技术的发展现状,进行针对性的架构优化。

二是区分物理与功能两个逻辑概念。在现有的文献研究中,很容易将物理实体与功能实体混淆,本文给出了如下定义:一种物理设施可以配备多种功能,一种功能也可以部署在多个物理设施之中,两者之间既有联系,又有区别。比如卫星是物理设施,而核心网是功能,核心网功能既可以仅部署在地面站,也可以将部分功能部署在卫星上,以优化系统流程。

4.2 物理架构

从物理空间的逻辑视角出发,天地一体化信息网络可以借鉴传统卫星通信网络/卫星互联网的架构组成,划分为空间段、地面段以及海陆空天各种用户段 3 部分。天地一体化信息网络物理架构如图 6 所示。

(1) 空间段是天地一体化信息网络的空间核心资产,主要由布设在高轨、中轨、低轨和临近空间等轨道面的若干卫星节点或者浮空节点组成,节点之间可以通过激光或微波等链路,按照特定的星座构型互连成一张空间网络。

(2) 地面段是天地一体化信息网络的地面核心资产,主要包括两个部分:一部分由布设在地

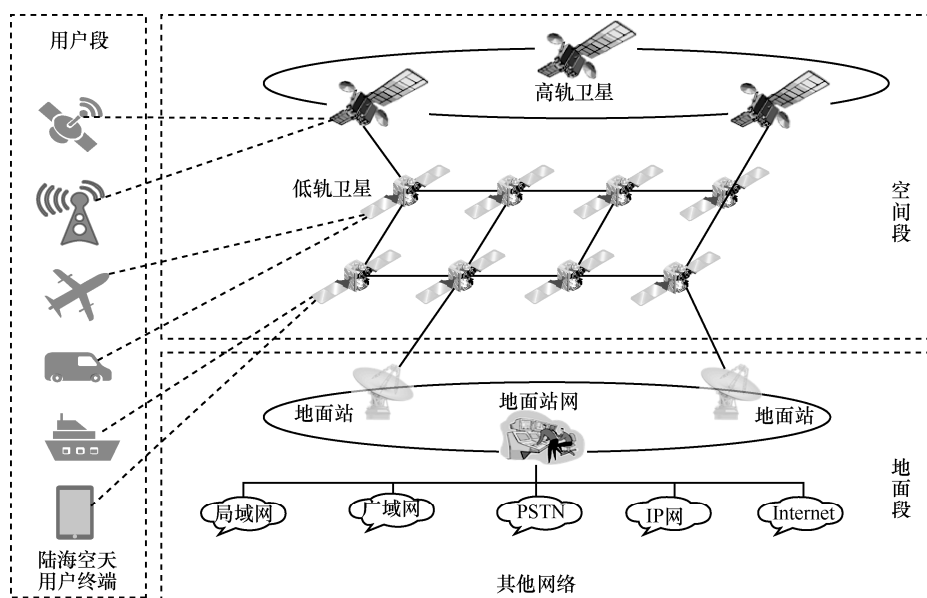


图6 天地一体化信息网络物理架构

球表面的若干固定站、机动站组成，站点之间可以通过铺设或者租赁光纤构建一张地面站网络；另外一部分由地面互联网、移动通信网络等公用网络基础设施以及工业互联网等各类专用网网络设施共同构成地面融合网络基础设施。

(3) 用户段是天地一体化信息网络的用戶部分，主要由星载、机载、船载、车载以及便携式/手持等海陆空天各类卫星用户终端组成。

综上，物理架构主要根据与天地一体化信息网络相关的设施所在的物理空间进行划分，物理空间不指定具体的功能内涵，但可以包括若干功能，下面将从功能角度对天地一体化信息网络的组成进行划分。

4.3 功能架构

天地一体化信息网络功能架构如图7所示。从功能组成的逻辑视角出发，天地一体化信息网络继承了互联网、移动通信网以及传统卫星通信网等特征，并在此基础上，进行创新融合和发展，是一个复杂巨系统的典型实例。参考移动通信网络接入、承载、核心的3层架构以及地面云网融合架构，天地一体化信息网络功能架构可以划分为一体化通信系统、一体化网络系统和一体化应

用系统3部分。其中，一体化网络系统在中间，提供“互联”基座，信息、通信系统均部署或挂在网络系统之上；一体化信息系统在上，在互联基础上，打造“信息”基座；一体化通信系统在下，在互联基础上，打造“接入”基座；3个系统联动，实现用户泛在接入、网络融合互联以及服务随心所致。

4.3.1 一体化通信系统

一体化通信系统是天地一体化信息网络的“四肢”，是负责用户接入相关通信功能的统称，参考地面移动通信网络，主要包括终端（space-ground integrated information network user equipment, sUE）、基站（space-ground integrated information network nodeB, sNodeB）、一体化核心网（space-ground integrated information network core, sCore）。

(1) 终端主要负责用户侧业务的承载以及与sNodeB之间的无线连接。与sNodeB之间协作完成用户广播寻呼以及连接建立、切换和功率控制以及无线资源的管理与控制等功能。天地一体化信息网络中用户终端的类型多样，作为功能实体可以部署在卫星、飞机、船舰、车辆、便携以及手持终端

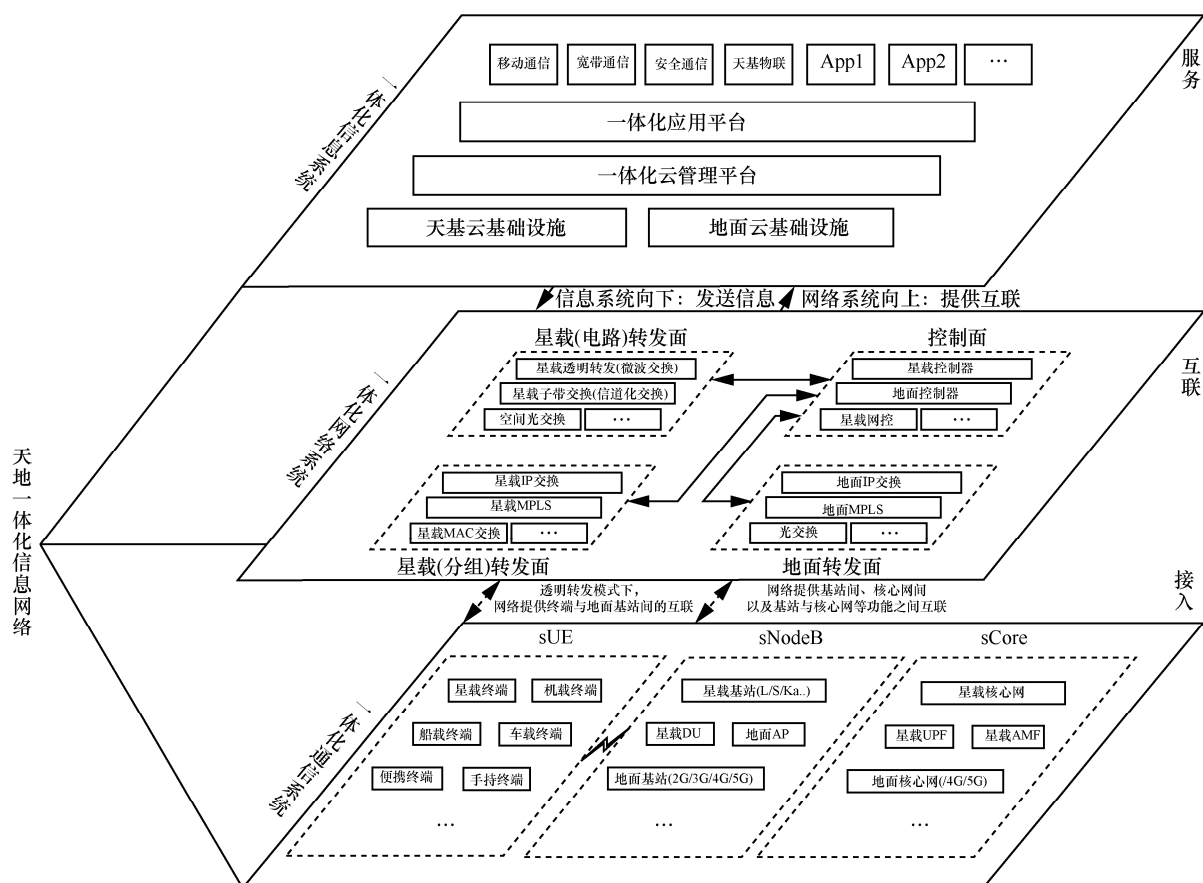


图7 天地一体化信息网络功能架构

等各类平台之上，构成涵盖海陆空天的立体用户空间，是天地一体化信息网络的核心特征之一。

(2) 基站主要负责为用户终端 sUE 提供空中接口；另外 sNodeB 与 sCore 通过一体化网络系统相连，共同完成无线资源分配、调度、管理接入策略等功能。作为功能实体，sNodeB 可以部署在地面段或者空间段。其中，部署在地面的基站，即地面基站，与地面移动通信网络基站相同；部署在卫星上的基站，即星载基站，一方面需要考虑与地面基站类似的功能，即星上全处理场景，此时相当于地面基站上天；另外一方面还需要考虑卫星通信领域特有的接入方式，比如透明转发、信道化交换以及光交换等模式。

(3) 一体化核心网主要负责用户鉴权、移动性管理、业务传输、位置服务以及策略计费等功能，是一体化通信系统的控制“大脑”，通过一体

化网络系统与 sNodeB 进行互连，共同完成与用户相关的管理功能。可以部署在地面段，通过轻量化裁减之后也可以部署在卫星节点。其核心特征包括两个方面：一是核心网功能按需部署，可以根据应用的时延、带宽等典型特征，在天、地网络之间流动部署核心网功能，如 UPF、AMF 等，实现弹性、按需的网络服务。二是核心网功能一体化统筹，如上文的基站部署所述，天地一体化信息网络支持多样化的接入方式，既兼容地面 4G/5G 等接入方式，又兼容传统卫星通信透明转发、信道化交换以及 DVB/S2 等接入方式，还要对未来的 SaT5G (satellite and terrestrial network for 5G, 卫星 5G) 或 SaT6G (satellite and terrestrial network for 6G, 卫星 6G) 等新型接入体制提供开放的环境，导致天地一体化信息网络的核心网功能必须是一体化统筹的、能够支持对各类接入方



式的一体化统管。

综上所述，一体化通信系统是一个涵盖了地面移动通信网、地面互联网以及卫星通信网络等多种接入方式的综合化接入系统，一体化通信系统架构如图 8 所示。一方面支持全轨道（高轨、中轨、低轨以及地面）、全频谱（L、S、Ku、Ka、激光等卫星常用频段以及地面网络常用频段）接入，另外一方面支持天、地异构网络中核心网功能的一体化统筹，实现异构接入体制之间的融合互联互通。

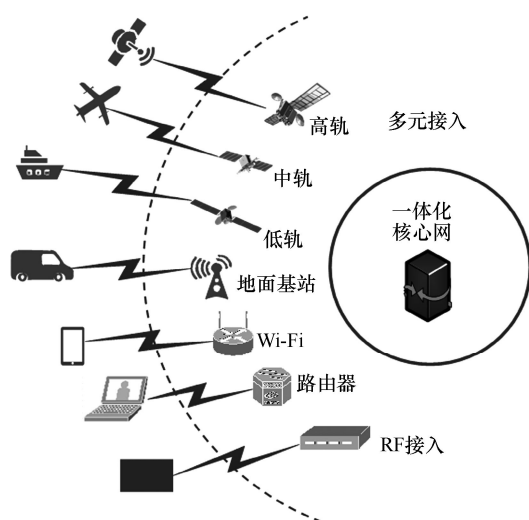


图 8 一体化通信系统架构

4.3.2 一体化网络系统

一体化网络系统是天地一体化信息网络的“脉络”，是负责与网络传输相关的网络功能的统称。参考地面互联网、移动承载网以及卫星通信系统架构，主要包括分组路由器（space-ground integrated information network router, sRouter）、透明转发器（space-ground integrated information network transparent transponders, sTransPonder）、信道化交换器（space-ground integrated information network channelized switcher, sChannelized switcher）、激光交换器（space-ground integrated information network optical switcher, sOptical switcher）或者光电混合交换器（space-ground integrated information network O/E switcher, sO/E switcher）以及一体化网络控制器

（space-ground integrated information network controller, sController）等网络功能。

（1）分组路由设备与其他分组路由设备构建一张天地一体化的分组网络，主要为各类业务应用或控制指令提供分组承载服务。分组路由设备可以部署在卫星上，即星载分路由设备，通过星间链路与其他卫星互联构成空间分组网络；也可以部署在地面上，即地面路由设备，运行模式与地面网络类似；空间与地面分组路由设备可一体化组网，构成一体化分组网络系统。

（2）透明转发设备与传统卫星通信系统中的透明转发器相同，即仅对接收的物理信号按照规则变频再转发，不进行解调等，主要为单星下两个用户或者地面站之间提供传输的通道，通常不直接提供跨星的传输通道。

（3）信道化交换设备（与传统卫星通信系统的信道化交换设备相同，是一种半透明转发技术，借助非均匀滤波器组可支持任意频段、任意带宽间交互及灵活的跨波束交互，与透明转发器一样，主要为单星下两个用户或者地面站之间提供传输的通道，通常不直接提供跨星的传输通道。

（4）激光交换设备主要负责提供光交换的功能，可以部署在空间段或地面段：部署在空间段，即星载激光交换器，是卫星节点以及用户之间实现光交换的核心设备，目前国内外均开展了星地、星间光交换的试验；部署在地面段，即地面网络常见的光交换机，负责根据所处的位置不同可以分为汇聚型和核心交换机。激光交换器与激光交换器之间通过星间/星地/地面光链路可以构成一张一体化光交换网络。

（5）光电混合交换设备主要为支持分组交换、光交换、信道化交换等各类交换体制而研制的混合交换设备，可以部署在空间段或地面段：部署在空间段，即星载光电混合交换器，目前国内部署了相关技术攻关，并取得了显著的进展；部署在地面段，与现有光电混合交换设备类似，在此不做赘述。光

电混合交换器之间通过星间/星地/地面链路可以构成一张混合的交换网络,其中单颗卫星节点之间可以形成信道化交换,星间或星地场景可以构建一体化的分组交换网络或者一体化光交换网络。

(6) 一体化网络控制器是一体化网络系统中分组路由设备、透明转发设备、光电混合交换设备等各类交换路由设备的“控制中枢”,类似于地面 SDN 控制器,负责天、地多网系一体化的路径计算、路径规划与参数配置等功能。一体化网络控制器可以根据实际情况将功能进行拆分,比如根据星载受限资源情况,将部分部署在卫星节点(即星载网络控制器),可以支持地面控制器不可见场景下网络的控制与调度;也可以将部分或全部部署在地面节点(即地面控制器),运行模式与地面网络类似。综上所述,一体化网络系统是一个涵盖了地面互联网、地面移动承载网以及卫星通信系统等多种承载功能的一体化承载网络,一体化网络系统架构如图 9 所示,支持高轨、中轨、低轨以及地面节点之间的融合组网以及分组、激光、信道化等多种组网方式之间的互联融合。

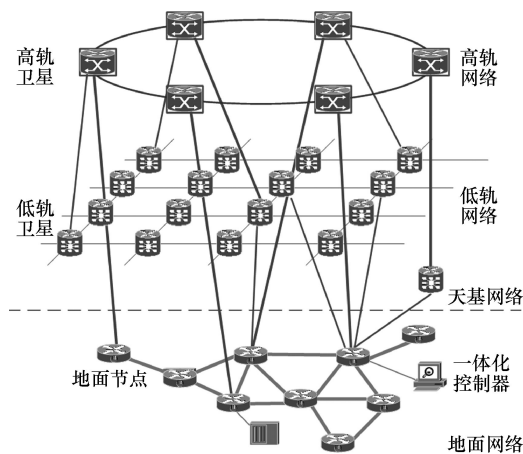


图 9 一体化网络系统架构

4.3.3 一体化信息系统

一体化信息系统是天地一体化信息网络的“血液”,是负责云计算基础设施以及应用系统功能的统称,是一体化云基础设施与一体化应用系统融合的产物。其中,一体化云基础设施

(space-ground integrated information network cloud, sCloud) 参考地面云网融合网络的架构,主要包括天基云基础设施、地面云基础设施,构成整个天地一体化信息网络中的云基础设施,为应用系统提供“算力”基座。一体化应用系统(space-ground integrated information network application, sApp) 参考地面互联网、移动承载网以及卫星通信系统的应用系统架构,主要包括(但不限于):传统应用服务系统,如移动通信网络的 IP 多媒体系统(space-ground integrated information network IP multimedia subsystem, sIMS),地面互联网视频、社交游戏、电子邮件、即时消息等互联网应用等业务系统;新型应用服务系统,如时空信息服务(space-time information service, sTIS)。

- 一体化云基础设施主要面向接入、承载、核心以及信息服务等各类功能提供算力的基础设施,主要由部署在空间段、地面段以及用户段等物理空间的感知、计算、存储、网络的各类异构资源构成,通过一体化网络系统提供的连接,互联融合成为一体化的云基础设施,为各类功能提供“算力”基座。
- 一体化应用系统是在一体化云基础设施基础上,构建各类应用服务系统。其中, sIMS 可以为天地一体化信息网络提供语音服务, sApp 可以提供互联网应用, sCloud 可以提供云服务, sTIS 提供时空信息服务,目前在地面网络场景均有类似的服务模式。作为未来天地一体化信息网络的重要组成部分,应用服务功能可以部署在空间段或地面段:部署在空间段,即星载信息系统,则需要考虑星上功率受限以及星上计算存储等资源受限的客观实际,进行针对性的裁减和优化,以 sCloud 服务为例,部署在卫星上,即天基云服务,一方面可以通过星上实时处理,有效提高服务响应速度、降低数据回传的压力,另一方面却



对星上的计算存储网络等各类资源都提出了新要求；部署在地面段，在此不赘述。

综上所述，一体化信息系统架构如图10所示，一体化云基础设施是一个布设在天、地网络之间的计算资源，通过多星协同、星地协同等方式，构建成的空间分布式协同的云基础设施；一体化应用系统是一个继承地面互联网、地面移动承载网以及卫星通信系统等业务应用功能，并在此基础上创新发展，可以为新业务新应用提供良好生态的一体化应用系统；一体化云基础设施与一体应用系统深度融合，共同构成一体化信息服务系统。该系统也是天地一体化信息网络中“信息”两字的来源。

4.4 物理空间与功能逻辑之间的映射

第4.2~4.3节分别从物理空间、功能逻辑两个维度，对天地一体化信息网络的体系架构进行了阐述和说明。然而，天地一体化信息网络作为一个实体设施，物理空间与功能逻辑本质应该是一致的，于是就涉及物理空间与功能逻辑之间的映射问题。物理空间与功能逻辑之间的关系如图11所示。

物理空间与功能逻辑之间的映射案例如图12所示。图12(a)中卫星节点仅包括sTransPonder等网络传输功能。卫星节点仅配备了透明转发器，此时卫星节点的功能配置与传统的卫星通信卫星类似。图12(b)中卫星节点既具有sNodeB等通信功能，又具有sRouter等网络传输功能。星节点具备基站的完整能力，可以为用户提供接入功能；卫星节点之间通过星间链路采用分组交换体制构建一张空间分组网络，实现星载基站与地面核心网之间的互联互通。

图12(c)中卫星节点的功能在图12(b)的基础上进一步丰富，增加了sCore-sUPF等通信功能。可以支持卫星用户终端之间端到端直接通信，无须绕道地面核心网，可以大幅提升通信效率，节约对星地传输带宽。图12(d)中卫星节点的功能在图12(c)基础上进一步增加了sCloud天基云服务功能。卫星节点上部署了云计算服务功能，可以将算力资源共享，支持各类管理或信息服务系统的按需部署和灵活调度。

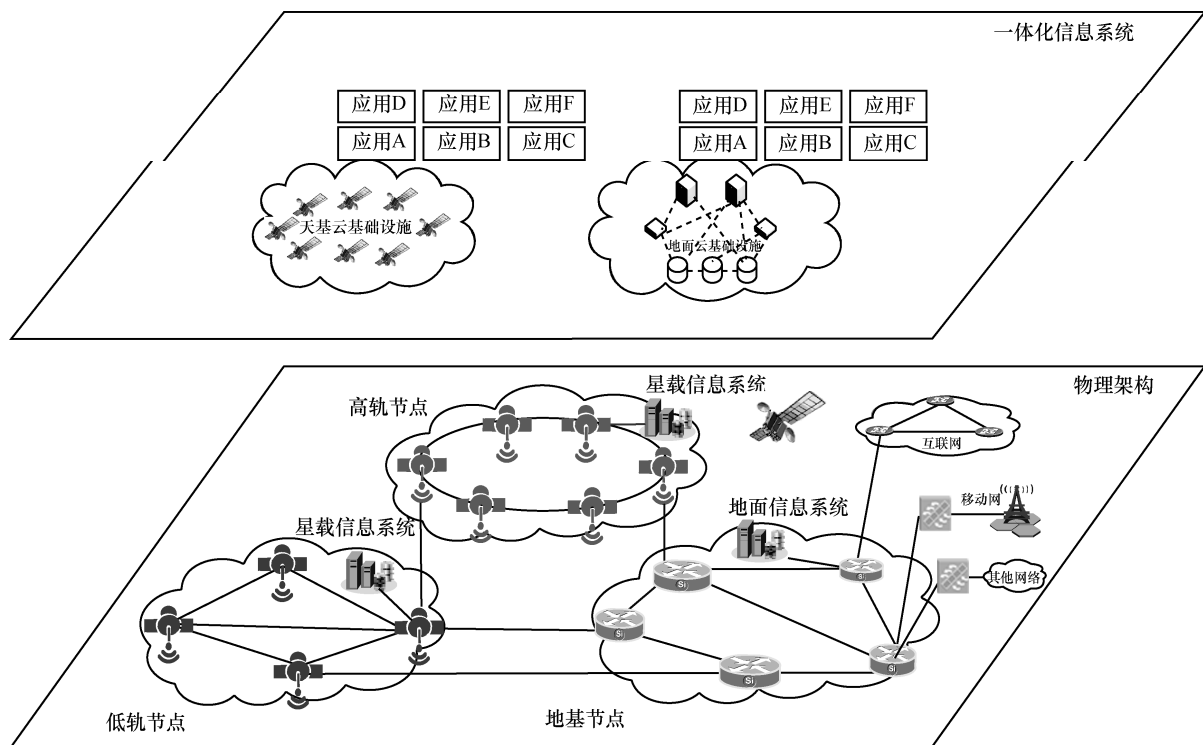


图10 一体化信息系统架构

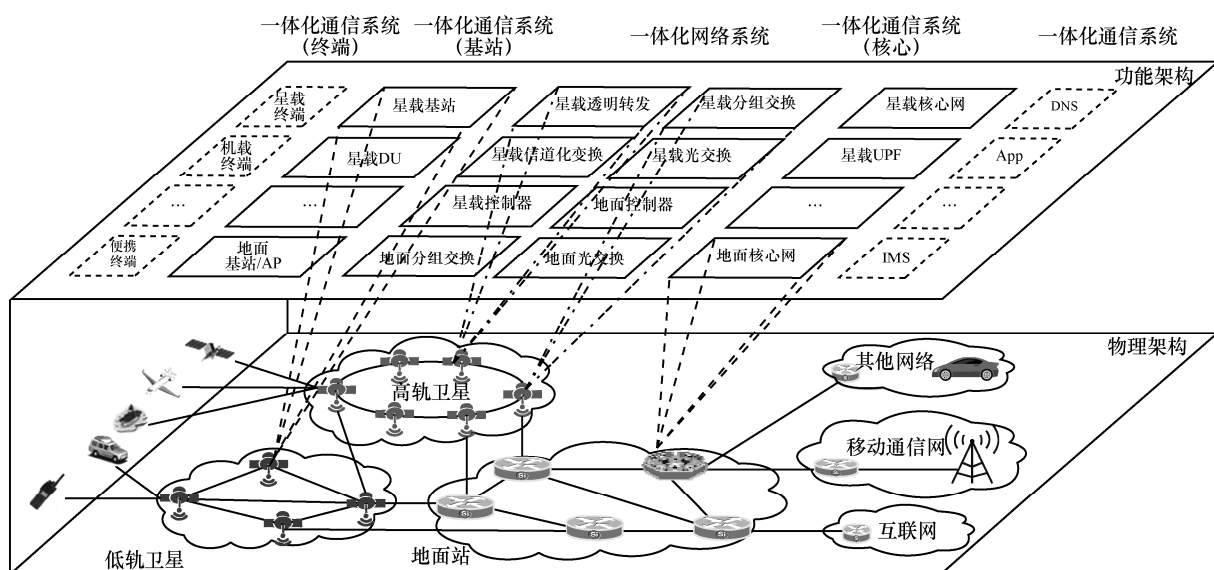


图 11 物理空间与功能逻辑之间的关系

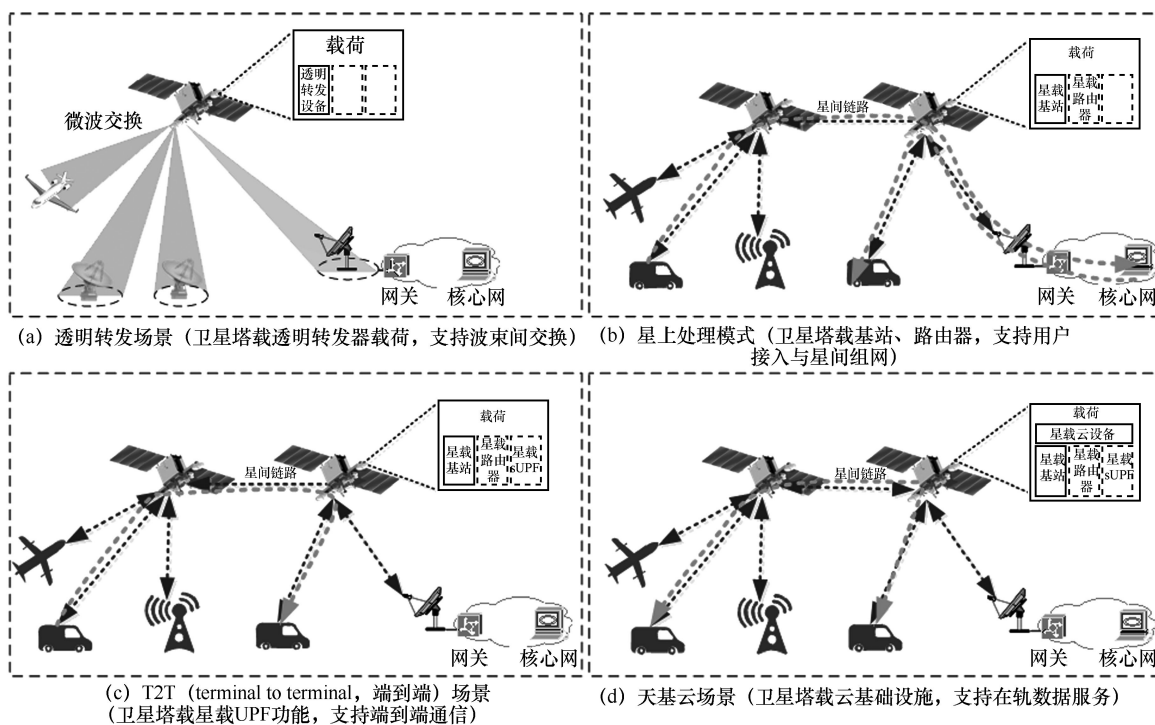


图 12 物理空间与功能逻辑之间的映射案例

5 网络架构优化

综上所述,天地一体化信息网络中物理空间与功能逻辑之间的映射问题本质上是网络优化问题,任何一种映射关系代表一种架构设计,需要综合考虑如下两个方面的因素。

一是物理空间的约束问题。以资源极度受限的卫星节点为例,无论是计算、存储、网络等资源,还是功率、体积、质量等资源都是严格受限的,因此部署功能逻辑时必须考虑客观限制条件,可以规约为计算机学科里的“背包”问题,网络架构优化示意图如图 13 所示。

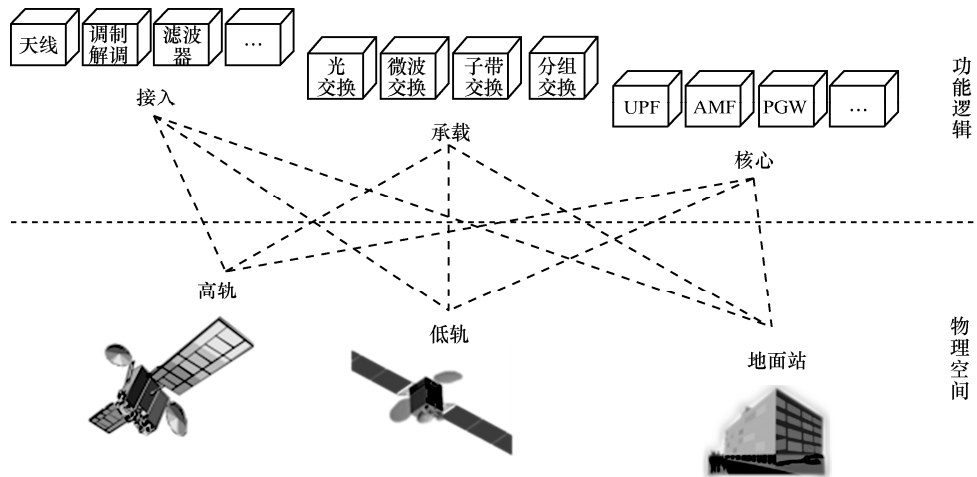


图 13 网络架构优化示意图

二是网络的应用需求问题。仍然以卫星节点为例，卫星采用什么样的接入体制，决定了需要采用什么样功能的基站；卫星之间采用什么样的体制进行组网，决定了星上是否采用分组交换、光交换；卫星上是否部署核心网功能，决定了业务流量是否需要绕道地面进行端到端通信。

诸如此类问题，本质是网络架构的优化设计问题，需要面向具体的应用需求，在特定卫星重量、功耗、体积等约束条件的限制下，以特定的网络系统性能指标（如时延、带宽、丢包、容量、功耗和成本等）为优化目标，进行优化求解和针对性的设计——如何将合适的网络功能部署在恰当的物理空间，通常可以归结为多目标优化问题，如式（1）所示。另外，需要指出的是，只有面向特定应用、面向特定优化目标（时延、带宽等）的最优化网络架构，通常难以存在普遍的最优化架构。

$$\begin{aligned} \min F(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} g_i(x) \leq T_i \\ i=1, 2, \dots, m \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中， g_i 表示第 i 个约束条件（比如重量、体积、功耗等）， T_i 表示第 i 个约束条件的门限值， x 表示某种特定的网络功能部署方案， $f_n(x)$ 表示优化的第 n 个目标（如成本最低、性能最优、重量最小等）， $F(x)$

是经过多个优化目标综合处理之后的目标函数。

3 种网络功能在物理空间部署示意图如图 14 所示，给出了面向 3 种不同应用场景的网络功能部署实例。

（1）宽带通信应用场景：低轨卫星部署 sNodeB 功能，地面节点部署完整 sCore 功能，满足高速数据传输和低时延的需求。

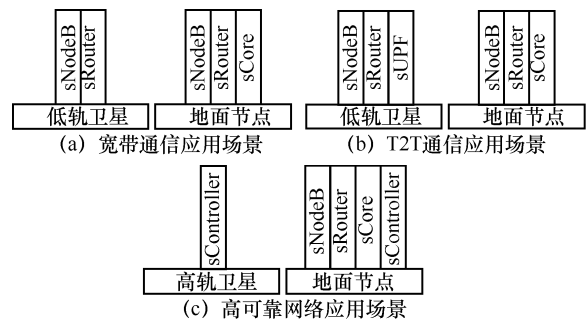


图 14 3 种网络功能在物理空间部署示意图

（2）T2T 通信应用场景：低轨卫星部署 sNodeB 以及 sUPF 功能，地面节点部署完整 sCore 功能，数据面不落地，能够减少星地回传数据，还可以避免安全性的风险。

（3）高可靠网络应用场景：在高轨卫星部署轻量化、裁减版网络控制器功能，地面节点部署完整版网络控制器功能；地面控制器遭到干扰或者失效的情况下，卫星可以作为地面备份，提高网络运行的可靠性。

6 结束语

天地一体化信息网络已经成为促进经济社会新发展、满足用户无处不在的多样化业务需求的必然选择。本文梳理分析了地面互联网、移动通信网、天基信息网络发展现状以及存在的问题与挑战；从互联网视角和移动网视角系统总结了天地一体化信息网络体系架构研究现状以及新型网络架构向融合化、智能化发展趋势；提出了包括一体化通信系统、一体化网络系统、一体化信息系统3层的通信网络、计算、融合的天地一体化信息网络体系架构设想，并从物理架构、功能架构、物理与功能架构映射等多个维度进行了阐述，以为后续研究提供有价值的建议和参考。

参考文献:

- [1] China Internet Network Information Center. The 48th statistical report on China's internet development[R]. 2021.
- [2] 吴曼青. 关于天地一体化信息网络发展的考虑[C]//天地一体化信息网络高峰论坛论文集. [北京:出版社不详], 2013: 72-79.
WU M Q. Consideration on the development of integrated information network of space integration ground network[C]//Proceedings of the Space Integration Ground network. [Beijing:s.n.], 2013: 72-79.
- [3] 虞志刚, 冯旭, 赵晶, 等. 空间网络安全路由协议研究现状与发展趋势[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(6): 625-630, 657.
YU Z G, FENG X, ZHAO J, et al. Research status and development trends of secure routing protocol for space information network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(6): 625-630, 657.
- [4] 汪春霆, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 493-504.
WANG C T, ZHAI L J, XU X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 493-504.
- [5] 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.
- [6] 彭木根, 张世杰, 许宏涛, 等. 低轨卫星通信遥感融合: 架构、技术与试验[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 13-24.
PENG M G, ZHANG S J, XU H T, et al. Communication and remote sensing integrated LEO satellites: architecture, technologies and experiment[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 13-24.
- [7] PAN T, YU N B, JIA C H, et al. Sailfish: accelerating cloud-scale multi-tenant multi-service gateways with programmable switches[C]//Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM 2021 Conference. New York: ACM Press, 2021: 194-206.
- [8] 郑秀丽, 蒋胜, 王闯, 等. 对网络技术跨代发展的思考: 网络5.0[J]. 信息通信技术, 2017, 61(6): 37-44.
ZHENG X L, JIANG S, WANG C, et al. A potential direction of next generation data communication network—network 5.0[J]. Information and Communications Technologies, 2017, 61(6): 37-44.
- [9] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔. 6G中的卫星通信高效天基计算技术[J]. 移动通信, 2021, 45(4): 50-53, 78.
WU X W, JIAO Z F, LING X. High-efficiency space-based computing for satellite communications in 6G[J]. Mobile Communications, 2021, 45(4): 50-53, 78.
- [10] 郭丽荣. 低轨道卫星星座的拓扑结构设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
GUO L R. Topology design of LEO satellite constellation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [11] 闫大伟. 空间信息网络结构优化设计与拓扑控制方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
YAN D W. Research on structural optimization design and topology control method of spatial information network[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [12] LIU W, TAO Y, LIU L. Load-balancing routing algorithm based on segment routing for traffic return in LEO satellite networks[J]. IEEE Access, 2019(7): 112044-112053.
- [13] LIU G P, ZHANG S J. A survey on formation control of small satellites[J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(3): 440-457.
- [14] JIANG M, LIU Y, XU W. An optimized layered routing algorithm for GEO/LEO hybrid satellite networks[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1153-1158.
- [15] WANG P F, DI B Y, SONG L Y. Multi-layer LEO satellite constellation design for seamless global coverage[C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [16] 朱立东, 张勇, 贾高一. 卫星互联网路由技术现状及展望[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 33-42.



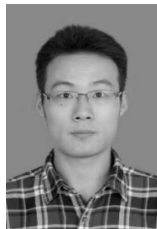
- ZHU L D, ZHANG Y, JIA G Y. Current status and future prospects of routing technologies for satellite Internet[J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(8): 33-42.
- [17] 曹素芝, 孙雪, 王厚鹏, 等. 星地融合网络智能路由技术综述[J]. *天地一体化信息网络*, 2021, 2(2): 11-19.
- CAO S Z, SUN X, WANG H P, et al. Review of intelligent routing technology in integrated satellite-ground network[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2021, 2(2): 11-19.
- [18] DONG C Y, XU X, LIU A J, et al. Load balancing routing algorithm based on extended link states in LEO constellation network[J]. *China Communications*, 2022, 19(2): 247-260.
- [19] 徐明伟, 夏安青, 杨芾, 等. 天地一体化网络域内路由协议 OSPF+[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(1): 12-17.
- XU M W, XIA A Q, YANG Y, et al. Intra-domain routing protocol OSPF+for integrated terrestrial and space networks[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2017, 57(1): 12-17.
- [20] 杨增印, 吴茜, 李贺武, 等. 天地一体化信息网络域间路由协议 NTD-BGP[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2019, 59(7): 512-522.
- YANG Z Y, WU Q, LI H W, et al. NTD-BGP: an inter-domain routing protocol for integrated terrestrial satellite networks[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2019, 59(7): 512-522.
- [21] QI X G, MA J L, WU D, et al. A survey of routing techniques for satellite networks[J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2016, 1(4): 66-85.
- [22] LI H W, LIU L X, LIU J, et al. Location based routing addressing mechanism of integrated satellite and terrestrial network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(8): 120-129.
- [23] 李红艳, 张焘, 张靖乾, 等. 基于时变图的天地一体化网络时间确定性路由算法与协议[J]. *通信学报*, 2020, 41(10): 116-129.
- LI H Y, ZHANG T, ZHANG J Q, et al. Time deterministic routing algorithm and protocol based on time-varying graph over the space-ground integrated network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(10): 116-129.
- [24] XU X, DONG C Y, LIU A J. Research on the adaptation of the load balancing routing to the flow dynamics in LEO constellation networks[C]//*Proceedings of 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 102-106.
- [25] SEKI M, OGURA K, YAMASAKI Y, et al. Performance comparison of geographic DTN routing algorithms[C]//*Proceedings of 2015 IEEE 39th Annual Computer Software and Applications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 617-620.
- [26] MULLINS D R, EL AMIN M, POSKETT P. Inmarsat 3 communications system requirements[C]//*Proceedings of IEE Colloquium on INMARSAT-3*. IET1991: 2/1-2/6.
- [27] MORSE D C, GRIEP K, DEININGER R, et al. Next generation FANS over Inmarsat broadband global area network (BGAN)[C]//*Proceedings of 23rd Digital Avionics Systems Conference (IEEE Cat. No.04CH37576)*. Piscataway: IEEE Press, 2004: 11.B.4-111.
- [28] WU Y, HU G Y, JIN F L, et al. A satellite handover strategy based on the potential game in LEO satellite networks[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 133641-133652.
- [29] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 218-228.
- [30] DARWISH T, KURT G K, YANIKOMEROGLU H, et al. LEO satellites in 5G and beyond networks: a review from a standardization perspective[J]. *IEEE Access*, 2022(10): 35040-35060.
- [31] LIN X Q, ROMMER S, EULER S, et al. 5G from space: an overview of 3GPP non-terrestrial networks[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2021, 5(4): 147-153.
- [32] 3GPP. Technical specification group radio access network study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks[R]. 2019.
- [33] ETSI. DVB document A83-2, digital video broadcasting (DVB); 2nd generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications [R]. 2020.
- [34] 孙晨华, 章劲松, 赵伟松, 等. 高低轨宽带卫星通信系统特点对比分析[J]. *无线电通信技术*, 2020, 46(5): 505-510.
- SUN C H, ZHANG J S, ZHAO W S, et al. Comparative analysis of GEO and LEO broadband satellite communication system[J]. *Radio Communications Technology*, 2020, 46(5): 505-510.
- [35] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. *China Communications*, 2020, 17(12): 156-171.
- [36] 冯少栋, 冯琦, 沈俊. 美国 Spaceway-3 系统概述[J]. *数字通信世界*, 2009(12): 82-85.
- FENG S D, FENG Q, SHEN J. A summary of American Spaceway-3 system[J]. *Digital Communication World*, 2009(12): 82-85.
- [37] YOU D W, TAKAHASHI Y, TAKEDA S, et al. A Ka-band 16-element deployable active phased array transmitter for satellite communication[C]//*Proceedings of 2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 799-802.

- [38] TIAN B, LI Y, CAI M, et al. Design of ka-band active phased-array antenna for GEO communication satellite payloads[C]//Proceedings of International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium. [S.l.:s.n.], 2017:1-2.
- [39] YOU D, AWAJI D, SHIRANE A, et al. A flexible element antenna for Ka-band active phased array SATCOM transceiver[C]//Proceedings of IEEE Asia-Pacific Microwave Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 991-993.
- [40] HWU S U, DESILVA K B, JIH C T. Terahertz (THz) wireless systems for space applications[C]//Proceedings of 2013 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings. Piscataway: IEEE Press, 2013: 171-175.
- [41] LI R, LIN B J, LIU Y C, et al. A survey on laser space network: terminals, links, and architectures[J]. IEEE Access, 2022(10): 34815-34834.
- [42] 中国联通. 中国联通 CUBE-Net 3.0 网络创新体系白皮书[R]. 2021.
China Unicom. China Unicom CUBE-Net 3.0: network innovation system white paper[R]. 2021.
- [43] 中国电信. 中国电信云网融合 2030 技术白皮书[R]. 2020.
China Telecom. China Telecom cloud-network convergence 2030 technology white paper [R]. 2020.
- [44] BOSSHART P, DALY D, GIBB G, et al. P4: programming protocol-independent packet processors[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 87-95.
- [45] YANG M, LI Y, JIN D, et al. OpenRAN: a software-defined ran architecture via virtualization [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013,43(4): 549-550.
- [46] IMT-2030 (6G)工作推进组. 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021.
IMT-2030 (6G) Working Group. 6G network architecture vision & key technology vision white paper[R]. 2021.

[作者简介]



虞志刚（1989- ），男，博士，中国电子科技集团公司电子科学研究院高级工程师，主要研究方向为天地一体化信息网络、空间智能计算。



冯旭（1987- ），男，博士，中国电子科技集团公司电子科学研究院高级工程师，主要研究方向为天地一体化信息网络、卫星宽带通信和空间智能计算。



黄照祥（1975- ），男，博士，中国电子科技集团公司电子科学研究院研究员，主要研究方向为天地一体化信息网络、网络体系架构。



陆洲（1972- ），男，中国电子科技集团公司电子科学研究院研究员，主要研究方向为天地一体化信息网络、卫星宽带通信以及空间智能计算。