



专题：新型网络

基于边缘智能协同的天地一体化信息网络研究

周旭, 李泰新, 覃毅芳, 宋俊平

(中国科学院计算机网络信息中心, 北京 100080)

摘要: 随着应用需求的发展, 如何在天地一体化网络的异构组网环境中以及大时空尺度下提供高效的网络服务成为新的挑战。基于对未来天地一体化信息网络需求的分析, 提出一种未来天地一体化网络架构——基于边缘智能协同的天地异构融合标识网络架构, 介绍了架构的 3 种关键技术, 即服务标识建模及分发机制、异构网络资源深度自感知机制和天地异构网络协同融合机制。最后, 介绍了所提架构在高铁通信、民航通信、普惠服务以及特种通信场景中的应用前景。

关键词: 天地一体化网络; 异构; 服务标识; 边缘智能; 协同

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020192

Research on future space-ground integrated information network based on edge-intelligence collaborative

ZHOU Xu, LI Taixin, QIN Yifang, SONG Junping

Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract: With the increase of needs for application, how to provide efficient network services in heterogeneous networking environment and large scale of time and space becomes a new challenge. A future space-ground integrated information network architecture was proposed based on the analysis of future needs, which was called edge-intelligence collaborative-based heterogeneous space-ground integrated identifier network. Three key technologies were introduced: service ID modeling and distribution, resource self-awareness in heterogeneous network, and integration of space-ground heterogeneous network. Finally, the application scenarios in high-speed railway, civil aviation, inclusive services, and military were introduced.

Key words: space-ground integrated network, heterogeneous, service ID, edge-intelligence, collaborative

1 引言

随着经济社会以及科技的发展, 天基信息网络因在大时空尺度下突破地表限制, 具有高速率、

低时延、广覆盖等特点, 在现代通信技术中发挥着越来越重要的作用。天地一体化网络^[1]利用天基信息网络的优点, 在超大时空维度下实现天地异构网络的互联互通。我国正处于从网络大国升

收稿日期: 2020-05-01; 修回日期: 2020-07-02

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFB1800100)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1800100)



级为网络强国的关键时期，天地一体化信息网络是网络强国的重要标志，是信息时代的战略性基础设施，也是国家提出加快“新基建”的核心基础设施。

天地一体化信息网络由天基骨干网、天基接入网、地基节点网组成，与地面互联网和移动通信网互联互通，建成“全球覆盖、随遇接入、按需服务、安全可靠”的天地一体化信息网络体系，是全球互联互通的重大信息基础设施，可支持陆、海、空、天各类用户随遇接入、按需服务的信息网络。随着星上处理和运算能力的加强，各国在太空探索方面活动的深入开展，天地一体化信息网络得到了国内外学术界^[2]和工业界的持续关注，如 SpaceX 的 Starlink 计划、欧盟的 Sat5G 项目、亚马逊的 Kuiper 计划、中国的“鸿雁星座”和“虹云工程”。此外，卫星与 5G 的融合^[3]成为天地一体化的关键议题，3GPP 在 TR38.811 和 TR22.822 两个项目开展星地融合的标准化工作。

随着天地一体化网络逐步发展，高速、高效、海量、泛在等逐步成为未来通信的主流需求，但是，现有的网络架构设计方式仍然无法满足用户数量增多和服务规模扩大的空间网络需求，在异构网络互联、网络资源利用率、负载均衡、可扩展性、移动性、安全性等方面存在局限性。未来天地一体化信息网络架构宏大、技术复杂，面临着网络构建和技术研究等诸多方面的挑战。

本文提出了一种未来天地一体化网络架构：基于边缘智能协同的天地异构融合标识网络架构，本架构通过建立全维服务标识体系，将异构网络中的服务资源进行统一的模型化描述，构建本架构跨网融合、智慧协同的基础能力。在此基础上，研究天地多网系异构网络的资源感知与数学拟合，在异构网络的时空尺度复杂不确定特性基础上，实现网络资源的深度自感知。为了异构网系之间的高效协同应用，研究天地网系之间、异构专网之间以及边缘设备之间的智慧协同融

合，最终实现边缘智能。

2 未来天地一体化网络需求

天地一体化网络具有异构组网、时空尺度跨度大、用户请求高并发、组网情况复杂、通信状况不确定等特点。随着网络应用的发展及用户对网络能力的需求日益提升，促使未来天地一体化网络需要满足以下需求。

(1) 大尺度高动态环境下资源与服务的发现与定位

在天地一体化信息网络环境下，服务与资源处于高度动态变化中，且空间尺度范围（距离、高度差、速度差）极大。时空的不确定性、服务与资源的动态性，给服务的宣告、资源的发现与定位带来了巨大的挑战。传统的标识方法，如 IP 地址、URL 等，信息维度少，且只有静态的信息，在天地跨网协同时，难以准确描述服务及资源的时空变化特征，难以适应天地一体化信息服务的需求。

(2) 全网海量服务与资源的管理与解析

在天地一体协同的信息网络环境中，网络的通达性及连接能力远远高于地面网络可以接入的服务以及可以利用的网络链路，其类型与数量也将远远多于传统地面互联网。海量的服务与链路资源，需要一套高效的管理机制，才能被用户有效利用。传统互联网的资源管理及服务解析方法，依赖集中式或树状的管理结构，面临规模扩展性上的挑战，而现有分布式管理方案对网络依赖严重，在星地网络高动态性的特点下难以高效开展，需要全新的解决思路。

(3) 异构多网系协同传输

在天地一体化信息网络环境下，高铁、航空、船舶等各类地面专网，可能同时具备卫星、3G/4G/5G、Wi-Fi、以太网等多种网络连接能力，且随着时空的迁移转化，各类网络能力的通达性与传输能力处于动态变化之中。现有集中式网络调度管

理机制,需要收集全局信息,在这种高度复杂、不确定性的异构网络条件下难以有效实施,多网系协同的优势难以发挥,端到端的业务可靠性难以保障。

3 未来天地一体化网络架构

本文提出基于边缘智能协同的天地异构融合标识网络架构。综合考虑天地异构网络的超大时空尺度、用户请求高并发、组网情况复杂、通信状况复杂不确定等特点,本架构有如下设计思想。

- 采用具有全维自描述特性的 SID (service ID, 服务标识) 来统一描述服务资源,奠定全网服务资源统一管理、定位、查询的基础。
- 利用空间网络覆盖广的优势,采用全网 SID 向空间网络集中汇聚并由卫星节点以广播形式向各异构网络同步下发的方法,实现大时空尺度下全网服务信息的同步共享。

- 采用边缘智能的思想,在全网服务资源统一标识化描述的基础上,赋予智能边缘节点智能标识管理、资源深度自感知以及异构网间/边缘设备间智慧协同调度的能力,支撑天基信息网络与各类专网的跨网系智慧协同应用。整个系统可以在各异构网中的大量智能边缘节点上分布式并行独立处理用户请求,极大提升了系统的高并发处理能力。

本文架构应用于未来天地一体化网络的组网示意图如图 1 所示。天地异构网络包括天基信息网络、高铁专网、船舶专网、民航专网、普惠服务专网以及数据中心等异构网络。各种异构专网可以通过卫星网络、3G/4G/5G、Wi-Fi、以太网等异构网络实现互联互通。

服务资源分布于异构网络中的数据中心以及高铁、船舶、民航、普惠服务等专网中,使用 SID 来统一描述,并利用在异构专网中部署的车载、船载、机载、地面的智能边缘节点进行分发和存储。与服务相对应的服务标识通过智能边缘节点

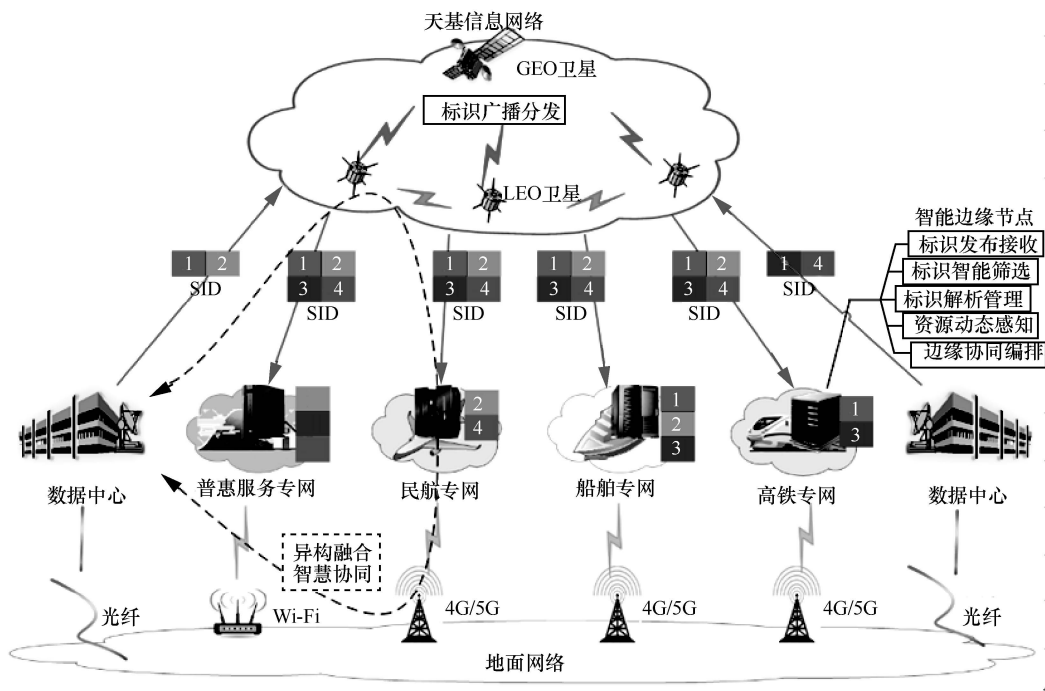


图 1 未来天地一体化网络组网示意图



发送到卫星；卫星节点存储全网的服务标识，并按照一定的分发范围和优先级向智能边缘节点进行广播分发。智能边缘节点通过智能筛选，选择性地存储一部分接收到的服务标识，并经过深度解析与综合聚类，将服务标识进行高效聚合。智能边缘节点对本地服务标识的时空特征以及业务特征进行建模和感知分析，各边缘节点之间协作存储部分服务标识，进而达到服务标识的全局覆盖。

智能边缘节点基于感知的异构网络时空尺度变化趋势，预测网络能力，针对业务需求，对可用网络资源进行分析；基于用户需求和访问特性，智能选择网络资源，并利用 SR（segment routing，分段路由）^[4]等源路由技术进行路径编排；针对特定业务，边缘节点可通过多条路径协同获取服务，提升吞吐以及可靠性。比如民航用户可通过卫星链路和地面链路协同获取数据中心承载的服务。智能边缘节点动态感知网络态势及业务质量并进行边缘之间的协作，由局部最优决策接近全局最优决策。

本架构的逻辑功能示意图如图 2 所示。异构网络中的服务资源对应的服务标识 SID 生成之后，经过打包，发布给卫星节点。智能边缘节点发布/接收 SID，并对 SID 进行智能筛选和解析管理。基于智能边缘节点的边缘智能、资源感知、多路传输、异构协同、路径编排等能力，支持多种典型业务，如点对点实时通信、内容访问、可靠的数据传输、双向交互式业务、一对多集群通信以及多对多集群通信等。

本架构有如下特点：

- 使用全维自描述的服务标识，解决海量服务/资源的动态发现与定位问题；
- 基于卫星广播分发能力，解决了大时空尺度下服务标识的全网同步问题；
- 基于智能筛选及分布式协作机制，解决了标识解析的可扩展性问题；
- 基于边缘分布式智能机制，解决了去中心化的多网智慧协同问题。

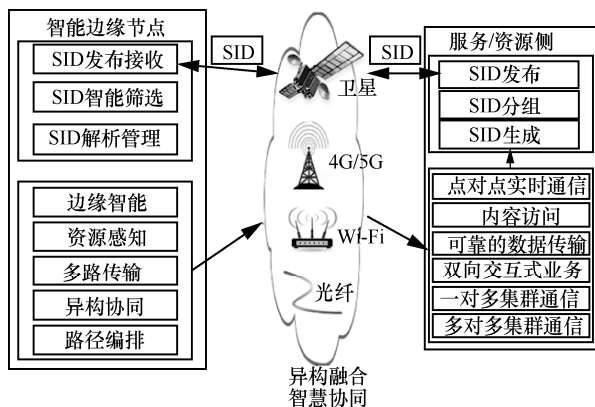


图2 逻辑功能示意图

4 未来天地一体化网络关键技术

本文所提出的基于边缘智能协同的天地异构融合标识网络架构，充分考虑了天地一体化网络的组网特点以及业务需求，提供了大尺度高动态环境下资源与服务的发现与定位能力、全网海量服务与资源的管理与解析能力以及异构多网系融合协同传输能力。关键技术包括服务标识建模及分发机制、异构网络资源深度自感知机制、天地异构网络协同融合机制等。

4.1 服务标识建模及分发机制

为实现海量服务/资源的动态发现定位以及服务信息在大时空尺度下的同步下发，本架构提出了全维可定义的服务标识模型以及服务标识智能管理解析技术。

4.1.1 全维可定义服务标识模型

服务标识奠定了天地多网系的融合以及跨网系服务获取的基础，具有动态生成、全维定义、可自描述性。这里，服务标识的设计参考了参考文献[5-6]，服务包括内容资源、应用、通信、网络传输等。服务标识定义为一个多维数组，包括天地异构网络服务获取所需的全维参数，如 LI（location information，位置信息）维度、TI（type information，类型信息）维度、PI（performance information，性能信息）维度、SI（security information，安全信息）维度等。每个维度包含多

种参数,如下所示:

- 位置信息维度: $LI=\{a_{as}^{LI}, a_{li}^{LI}, a_{al}^{LI}, a_{sl}^{LI}, a_{so}^{LI}, \dots\}$;
- 类型信息维度: $TI=\{a_{st}^{TI}, a_{vn}^{TI}, a_{li}^{TI}, \dots\}$;
- 性能信息维度: $PI=\{a_{qu}^{PI}, a_{ba}^{PI}, a_{de}^{PI}, a_{pl}^{PI}, \dots\}$;
- 安全信息维度: $SI=\{a_{cr}^{SI}, a_{co}^{SI}, a_{le}^{SI}, a_{in}^{SI}, \dots\}$ 。

其中,位置信息包括固定位置如AS号(a_{as}^{LI})、经纬度(a_{li}^{LI})等,以及移动位置如飞机、船舶航线(a_{al}^{LI} 、 a_{sl}^{LI})和卫星轨道(a_{so}^{LI})等,用于确定服务所在位置;类型信息包括服务类型(a_{st}^{TI})、版本号(a_{vn}^{TI})、专网限制(a_{li}^{TI})等,其中服务类型指视频服务、应用服务、网络传输服务等,专网限制为是否是异构网间通用或只用于某个专网,类型信息用于用户服务请求的匹配以及划定服务的适用专网范围;性能信息包括质量要求/性能(a_{qu}^{PI})、带宽要求/性能(a_{ba}^{PI})、时延要求/性能(a_{de}^{PI})、分组丢失要求/性能(a_{pl}^{PI})等,当服务类型为内容或应用时,性能信息指性能要求,当服务类型为网络传输、通信服务时,性能信息指提供的网络能力;安全信息包括信誉等级(a_{cr}^{SI})、保密性(a_{co}^{SI})、安全等级(a_{le}^{SI})、完整性(a_{in}^{SI})等。所有的参数都可以按需添加/删减/更新。

则服务标识SID的定义为:

$$SID \triangleq \begin{bmatrix} \{a_{as}^{LI}, a_{li}^{LI}, a_{al}^{LI}, a_{sl}^{LI}, a_{so}^{LI}, \dots\} \\ \{a_{st}^{TI}, a_{vn}^{TI}, a_{li}^{TI}, \dots\} \\ \{a_{qu}^{PI}, a_{ba}^{PI}, a_{de}^{PI}, a_{pl}^{PI}, \dots\} \\ \{a_{cr}^{SI}, a_{co}^{SI}, a_{le}^{SI}, a_{in}^{SI}, \dots\} \\ \dots \end{bmatrix} \quad (1)$$

4.1.2 服务标识分发及智能解析机制

由于天地异构网络具有超大的时空尺度以及通信状况复杂不确定的特点^[7],实现服务标识在不同异构网络之间同步的难度极大。因此利用天

基信息网络中卫星的覆盖范围大的特点,作为天地异构网络的统一信息分发中枢,以广播的形式,周期性、选择性、增量性地向各异构网络分发服务标识,从而实现服务标识在智能边缘节点之间同步,用户的请求可以得到快速、高效、可靠响应,从而提升服务质量。

服务标识动态分发机制示意图如图3所示。异构网络中的高铁、船舶、飞机、基站部署智能边缘节点,与卫星保持连接,接收广播的服务标识。地面卫星网关以及智能边缘节点将地面数据中心及异构网络中承载服务的SID发送给卫星,并周期性更新。卫星中存储、更新SID,并以一定的周期,按照预定策略以及实时动态策略向智能边缘节点分发SID。分发策略可以为分发范围、分发优先级等,体现SID分发的主动可控。

智能边缘节点与卫星保持稳定连接并周期性接收整个天地异构网络中的服务标识,但不必全部存储:可根据服务标识中的类型信息、性能信息进行智能筛选,比如一部分内容服务是专为高铁用户准备的,则飞机和船舶上的智能边缘节点即使接收到了这些服务的服务标识,也无须存储在本地;也可根据本地用户的历史需求,在本地存储/处理资源不足时,智能筛选出能最大程度满足用户需求的服务标识。

基于服务标识的自描述性,从属性、参数值、语义等不同层面,对服务标识进行深度解析、综合聚类,从而实现服务标识的高效聚合。智能边缘节点在存储服务标识时,聚合粒度可以根据对应服务的请求热度,将冷门的服务标识进行粗粒度聚合,节省空间;将热门的服务标识进行细粒度聚合,体现服务标识的参数细节,提高准确满足服务请求的比例。还可按照服务类型、专网限制等参数对服务标识进行归纳,从而建立树状存储结构,实现服务标识的高效存储的查找。

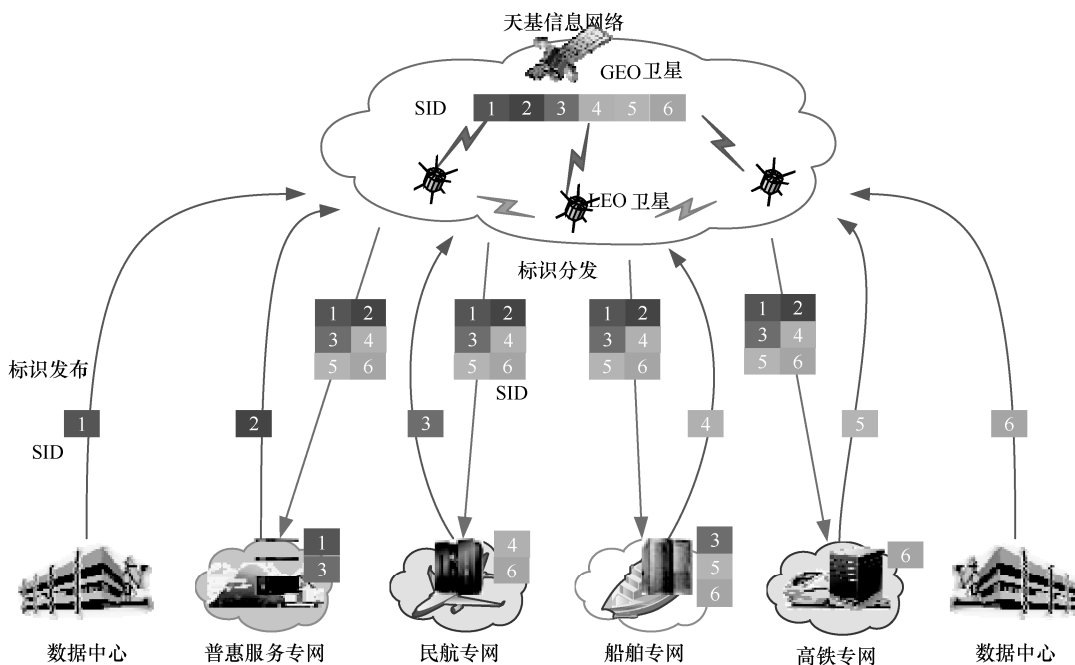


图3 服务标识动态分发机制示意图

4.2 异构网络资源深度自感知机制

本架构包含分布式网络资源自感知机制，借助分布式协同的智能边缘节点，实时感知网络及所承载业务的分布和服务质量，研究思路如图4所示。网络资源深度自感知机制支持分层、模块化结构，支持智能边缘节点的分域调度、指标自定义、结果分布式存储和检索。通过支持有线、3G/4G/5G、Wi-Fi 和卫星等多种接入方式，实现多种异构网络的全网覆盖。

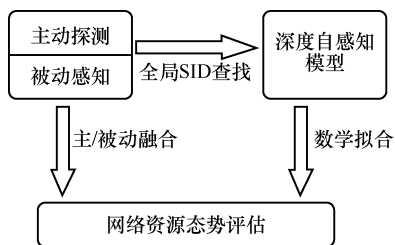


图4 网络资源深度自感知机制研究思路

网络资源感知通常可分为主动测量和被动感知两种方法，本文架构将主动测量和被动感知两种方法相结合，在单一节点上同时支持，按需调用，设计主被动融合的网络资源感知方案。其中，

主动测量是通过主动产生流量，直接测量网络的属性，但是会对被测网络的服务性能产生负面的影响；被动感知完全取决于被测网络中已有的服务流量，它的最大优点是在感知期间不影响被测网络的服务质量，但会引起测量、分析、存储等资源受限的问题；主被动相结合的感知方法，可有效克服单一方法的不足，充分利用两种方法的优势，实现高效地网络资源自感知。

根据服务需求特征建立多态业务空时分布模型；研究基于复杂数据流相关性的自适应滑动窗回归分析业务预测算法，精细估计业务到达率和多态分布特征，设计天地一体化异构网络的不确定性分析方法；建立区分业务的多 KPI 优化模型，实现服务质量智能评估。

在建立服务需求模型的基础上，基于主动流速率测量的骨干拓扑发现算法，避免洪泛拓扑信息收集过程中产生的额外开销；基于软探针的网络负载分布被动感知机制，最大限度降低对网络服务质量的影响；基于精细梯度的主被动结合边缘节点协同最大效用网络更新机制，为每个网络

资源计算出精确的更新时间和对应的转发规则,降低更新过程中的拥塞概率;通过全局服务标识的精确查找,实现服务需求与网络资源的最优匹配;从而构建时空可扩展的网络资源深度自感知模型。选择适当的曲线类型来拟合探测和感知数据,并用拟合的曲线方程分析变量间的关系,再用多项式函数通过最小二乘法求得此拟合函数,从而分析业务与网络之间的变化关系,进一步评估网络资源态势,为网络资源分配与优化决策提供支撑。

4.3 天地异构网络协同融合机制

随着新型业务的不断涌现,在时延、带宽、容量、连接、可靠性等方面提出差异化服务需求。未来天地一体化网络融合卫星网络、空间网络、地面高铁、民航、普惠等异构专用网络,具有时变性、分布式、异构性和群体性等特征。智能边缘节点通过协同和融合各异构网络,充分发挥各自优势,能够有效满足差异性业务的服务需求,降低网络开销。天地异构网络协同融合机制如图 5 所示。首先研究基于深度学习的网络选择方法,支持多样业务的服务需求和动态网络能力映射;在此基础上,提出多网协同的动态源路由机制,适应天地一体化网络频繁变化的网络拓扑以及高可靠多网协同的传输优化方法,满足高可靠性业务需求,从而构建天地异构网络协同融合机制。

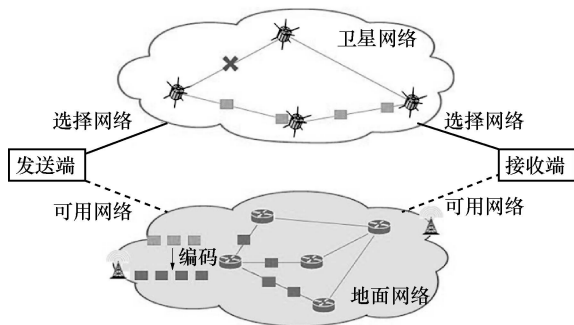


图 5 天地异构网络协同融合机制

(1) 基于深度学习的网络选择方法

天地一体化网络融合多种网络技术,每种网

络特性差异巨大,适用于不同的业务和应用场景。在边缘节点处根据业务的服务需求智能选择网络能够充分利用异构网络的优势,将动态网络能力高效地适配差异化业务服务需求,提高用户体验。研究基于深度学习的网络选择方法。针对业务要求的服务需求,在智能边缘节点处基于服务标识 SID 生成多维度网络能力模型,并利用节点运动周期性预测网络能力的变化,设计基于深度学习的网络选择算法,实现差异化业务的服务需求和动态网络能力的适配。针对跨网络业务的服务需求,设计高效即时的网络协同算法。优化节点切换算法,保证网络在节点运动和拓扑变化环境中不间断地提供服务。

(2) 多网协同的动态源路由机制

卫星、飞机节点的移动导致天地一体化网络的拓扑结构发生变化,链路状态随之改变,路由信息频繁更新。节点依据不断变化的网络拓扑动态地更新路由,随时获得最优的寻路效果。研究多网协同的动态源路由机制,将网络运行时间分片,源节点针对每个时间片服务标识的位置信息生成路由,将所有路由顺序串联起来形成动态路由。设计网络域间协同路由机制,促进域间路由信息交互和融合,实现网络路由的整体优化。

(3) 高可靠多网协同的传输优化方法

天地一体化网络中卫星、飞机等节点分布稀疏、移动性强、能量受限,容易受到无线电干扰,导致间歇性连接,并且链路稳定性差,造成分组丢失,严重影响业务质量。研究高可靠多网协同的传输优化方法,设计基于网络编码技术的多路径传输机制,一方面通过在接收端解码报文恢复丢失的分组,改善网络链路的质量;另一方面利用多路径传输机制,扩大可用带宽,提供高冗余度数据传输,增强传输的可靠性。针对时延敏感/带宽敏感业务场景应用优化传输机制,通过调整数据传输链路组合和网络编码的参数选择,满足稳定时延、高传输效率的要求。



5 应用场景

本文所提出的基于边缘智能协同的天地异构融合标识网络架构,可以实现天基信息网与各类专网的跨网系智慧协同与应用,可以部署于高铁通信应用场景、民航通信应用场景、普惠服务应用场景以及特种通信应用场景中,应用场景示意图如图6所示。

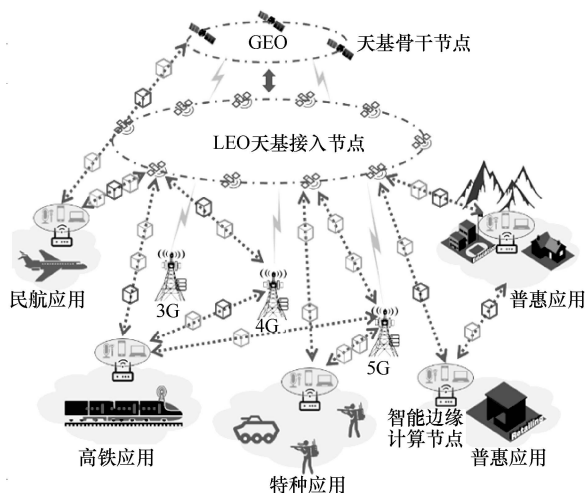


图6 应用场景示意图

(1) 高铁通信应用场景

本文所提的架构可以应用于高铁场景中,满足高铁用户的上网、即时聊天、视频点播等需求。在高铁列车上部署智能边缘计算网关设备,其具有卫星、3G/4G/5G、Wi-Fi 等网络接入能力,实时收集卫星广播的 SID 信息,根据用户的请求以及 SID 信息,基于边缘智能与网络协同技术,进行路由选择和网络资源调度。高铁管理控制中心基于 SID 对高铁列车以及全网资源进行实时监控和管理。在高铁场景中,可实现点对点实时通信、内容访问、高可靠的数据传输、一对多集群通信等业务。

(2) 民航通信应用场景

本文所提的架构可以应用于民航场景,满足民航乘客的娱乐和商务上网需求。客机如果只利用地面基站通信,能够保证业务的低时延,但受

限于基站覆盖范围,在偏远地区容易发生通信中断问题;如果只利用卫星系统通信,虽然各项业务能够稳定进行,但时延较大,同时当传输数据量大时,存在资源不足和网络拥塞问题。因此需要本架构提供的智慧协同传输能力。在民航飞机上部署智能边缘计算网关设备,其具有多种网络接入能力,实时收集卫星广播的 SID 信息,根据用户的请求以及 SID 信息,基于边缘智能与网络协同技术,进行路由选择和网络资源调度。空中交通管制中心基于 SID 信息对民航飞机以及全网资源进行实时监控和管理。在民航应用场景中,可实现点对点实时通信、内容访问、高可靠的数据传输、一对多集群通信等业务。

(3) 普惠服务应用场景

本文所提的架构可以应用于普惠服务场景,针对偏远山区、农村的网络基础设施匮乏的现状,通过在山区商城、学校、村庄、制造厂等地点部署智能边缘计算设备,具有多种网络接入能力,可实时收集卫星广播的 SID 信息,根据用户的请求以及 SID 信息,基于边缘智能与网络协同技术,进行路由选择和网络资源调度,也可以通过中继多跳的方式将信息进行远距离传输,打破山区严苛环境的阻碍,实现智慧电商、智慧乡村、智慧文旅等服务。在普惠场景中,可实现点对点实时通信、内容访问、双向交互式业务和一对多集群通信等业务。

(4) 特种通信应用场景

本文所提的架构还可以应用于特种通信场景中,海陆空机动作战单位上均可装配智能边缘计算设备,使其具有多种网络接入能力,可实时收集卫星广播的 SID 信息,根据用户的请求以及 SID 信息,基于边缘智能与网络协同技术,进行路由选择和网络资源调度,也可以通过中继多跳或点对点的方式与友军作战单位进行数据共享,同时各单位会将当前战场状况和自身状态实时反馈到天基卫星,卫星以广播的形式告知所有作战单位

战场和友军状况,同时后方作战指挥中心也可以借此实现战场动态的实时掌控。在特种通信场景中,可实现点对点实时通信、高可靠的数据传输、一对多集群通信、多对多集群通信等业务。

6 结束语

本文提出了一种未来天地一体化网络架构:基于边缘智能协同的天地异构融合标识网络架构,从而满足未来天地一体化网络的大尺度高动态环境下资源与服务的发现与定位、全网海量服务与资源的管理与解析、异构多网系协同传输等需求。

未来天地一体化网络对国计民生有十分重要的意义,将成为未来网络技术以及6G技术的重要组成部分,具有广阔的研究前景,有待于国内外学者的进一步深入探讨。

参考文献:

- [1] 李贺武, 吴茜, 徐格, 等. 天地一体化网络研究进展与趋势[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 95-106.
LI H W, WU X, XU K, et al. The research achievements and trend of the space-ground integrated network[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 95-106.
- [2] LI T X, ZHOU H C, LUO H B, et al. SERvICE: a software defined framework for integrated space-terrestrial satellite communication[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(3): 703-716.
- [3] GIAMBENE G, KOTA S, PILLAI P, et al. Satellite-5G integration: a network perspective[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 25-31.
- [4] IETF Segment routing architecture: RFC8402[S]. 2018.
- [5] 统一内容标签格式规范: GB/T 35304-2017[S]. 2017.
Unified content label format specification: GB/T 35304-2017[S]. 2017.
- [6] 张宏科, 罗洪斌. 智慧协同网络体系基础研究[J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1249-1254.

ZHANG H K, LUO H B. Fundamental research on theories of smart and cooperative networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1249-1254.

- [7] 李永亮, 李许安, 全杰, 等. 面向全球能源互联网的天空地协同卫星通信网络架构[J]. 电信科学, 2018, 34(12): 53-64.
LI Y L, LI X A, TONG J, et al. Sky-ground collaborative satellite communication network architecture for global energy internet[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(12): 53-64.

[作者简介]



周旭(1976-), 男, 博士, 中国科学院计算机网络信息中心研究员, 主要研究方向为未来网络架构、天地一体化网络、边缘计算。



李泰新(1990-), 男, 博士, 中国科学院计算机网络信息中心特别研究助理, 主要研究方向为未来网络架构、天地一体化网络、路由协议、SDN、MEC。



覃毅芳(1984-), 男, 博士, 中国科学院计算机网络信息中心高级工程师, 主要研究方向为边缘计算、传输协议、SDN。



宋俊平(1984-), 女, 博士, 中国科学院计算机网络信息中心助理研究员, 主要研究方向为边缘计算、天地一体化网络。