

星地融合通信系统：网络架构、使能技术及原型验证

丁睿¹, 房天昊², 王闻今², 刘雨³, 马伟⁴, 万屹⁵

- (1. 中国卫星网络集团有限公司, 北京 100083;
2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096;
3. 鹏城实验室, 广东 深圳 518000;
4. 西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710199;
5. 中国信息通信研究院, 北京 100191)

摘要: 星地融合网络能够为地面用户提供全球无缝接入与服务, 被认为是未来移动通信系统的一个发展趋势, 具有光明的应用前景。而卫星网络中存在的长时延、大频偏、大小半径等区别于地面网络的特性对星地融合网络的发展提出了挑战。对星地融合网络的网络架构和使能关键技术进行分析与讨论, 并介绍一种可用于星地融合网络地面验证的原型系统。

关键词: 星地融合网络; 网络架构; 空中接口; 卫星通信

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023033

Integrated Satellite-Terrestrial Communication Systems: Architectures, Enabling Technologies and Prototype Verification

DING Rui¹, FANG Tianhao², WANG Wenjin², LIU Yu³, MA Wei⁴, WAN Yi⁵

1. China Satellite Network Group Co., Ltd., Beijing 100083, China
2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China
3. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518000, China
4. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710199, China
5. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

Abstract: The integrated satellite-terrestrial communication system is considered one of the development trends of future communication systems for its ability to provide seamless coverage and service. However, the differences between satellite and terrestrial communication networks, e.g., large propagation delays, large Doppler shifts, and large cell radius, pose challenges to fulfilling integrated satellite-terrestrial communication systems. The network architectures and key enabling technologies were discussed and analyzed and a prototype system for the terrestrial verification of integrated satellite-terrestrial communication systems was proposed.

Keywords: integrated satellite-terrestrial communication system, network architecture, air interface, satellite communication

0 引言

当前 5G 的商业部署正在如火如荼地开展,但在沙漠、远洋等人迹罕至的地区,接入网络的用户数量有限,通信网络设施的建设和维护成本较高,难以在这些地区完成地面通信网络的覆盖。此外,在面对地震、洪水等自然灾害时,当前地面通信网络易遭到破坏,导致通信服务中断。

卫星通信系统具有覆盖范围广、受自然灾害影响小的优点,因此可以与地面通信系统相结合,作为地面通信系统的补充,为用户提供随时随地的通信服务。

自 20 世纪 90 年代起,国际上针对卫星通信系统开展了大量的部署计划,包括 Iridium、Globalstar、Orbcomm 等在内的移动通信卫星星座致力于全球泛在连接,通过语音和低速率数据通信满足基本通信连接需求^[1-2]。2014 年

以来,以 OneWeb、Starlink、Leosat、Telesat 等为代表的大规模低轨宽带互联网星座迅速发展,得到了产业界、运营商和用户的广泛关注^[3-6]。然而,上述项目所实现的卫星通信系统均独立于地面通信系统存在,卫星终端与地面终端尚未统一,无法满足消费者随时随地享受通信服务的需求,地面网络与卫星网络的融合被认为是未来网络的发展方向之一^[7]。通过采用星地融合的网络架构,不仅能够将地面前沿的通信技术应用到卫星通信系统中以提升其性能,而且兼容性的空中接口设计可以使卫星通信享受地面的规模化产业链,从而大幅度降低多模卫星终端的设计和制造成本,降低通信资费,为用户提供平价优质的通信服务。

卫星通信系统与地面通信系统的显著差异给二者的融合带来了诸多挑战。卫星通信中存在的动态长时延、动态大多普勒频偏、大小区半径、星上功率受限等不同于地面通信的特点^[8-10],使得面向地面环境设计的通信系统在此类场景中存在适用性问题,因此需要结合卫星通信系统相关特点,研究星地融合的网络架构、信号传输、波形设计等关键技术。参考文献[11]提出了基于软件定义网络(Software Defined Network, SDN)的空地一体化网络架构。参考文献[12]提出了一种星地融合接入网结构,实现了灵活高效的无线接入和数据传输。参考文献[13-15]对长期演进技术(Long Term Evolution, LTE)与卫星通信系统的融合展开了研究。参考文献[16-21]针对 5G 与卫星通信系统融合中的网络架构、数据传输、波形设计以及无线资源分

配等相关问题进行了研究。除此之外,3GPP 的一系列技术报告对 5G 融合非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)中的场景部署、信道模型、接入技术等进行了研究。上述研究并未提供成熟的解决方案,星地融合网络中仍存在许多问题待解决。

相比地面通信系统,电磁波在卫星通信链路的传输过程中会受到复杂天气条件、终端所处地理环境以及卫星仰角等多种因素的影响,在实际星上载荷与地面终端中,也存在许多非理想因素,造成理论算法部署在实际系统中时可能会出现性能恶化的情况。这些非理想因素的存在导致难以仅通过理论推导和计算机仿真的方式对所设计的通信系统进行评估,需要搭建实际系统对星地融合通信系统的性能进行评估。如果采用外场实验方法对系统进行验证,则存在卫星发射成本较高、受复杂天气影响较大以及仅能在卫星过顶时进行实验等问题,导致实验的费用成本和时间成本过高,验证的效率也较低。因此,需要搭建地面原型系统对所涉及的系统进行原型验证,降低验证成本,提高验证效率。

1 星地融合通信系统网络构架

1.1 融合网络架构

本文所设计的融合网络架构如图 1 所示,采用高低轨星座联合组网架构,可通过卫星地面站实现地面网络与卫星网络的互联融合,兼容 3GPP 所提出的 4 种 NTN 架构。

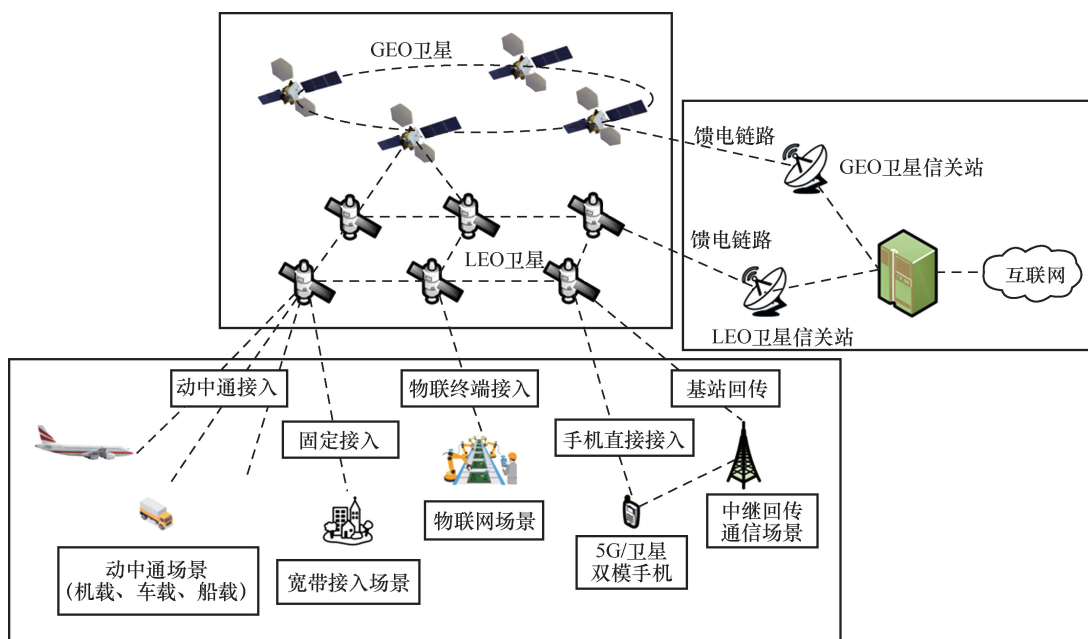


图 1 融合网络架构

在物理架构上,该融合网络由空间段、地面段与应用段组成。空间段包括高轨(GEO)卫星星座和低轨(LEO)卫星星座,低轨卫星星座可实现全球无缝覆盖,高轨卫星星座实现对于地球表面部分区域的增强和固定覆盖,两种空间星座系统均考虑星上处理和透明弯管两种工作方式。根据多星协作方案的不同,星间链路采用激光或太赫兹传输方式。地面段包括各类地面站、核心网等相关地面基础设施,用于实现卫星与地面网络的互联。应用段由各类终端构成,能够在星地融合网络中享受宽窄结合、异构互联、安全可控的泛在业务的承载和接入。

在逻辑功能上,所设计的星地融合网络仍由接入网、承载网与核心网构成,可实现卫星网络与现有地面网络的兼容,以及面向6G空天地海网络建设的平滑演进。天基接入网通过部署S-gNB 5G网元实现卫星基站功能,并能够支持固定覆盖区域接入、凝视覆盖接入和捷变覆盖接入3种星地接入方式。天基承载网通过部署S-ROUTE网元,基于星间链路、馈电链路等异构链路实现天基接入网与地面核心网的联通,有利于多类型业务的承载和回传,进而提高传输效率。星地一体化核心网通过统一卫星核心网与地面核心网,可实现星地网络接入资源的统一调配。

在融合组网模式上,卫星与5G/6G的融合可以采用松耦合的分立组网模式与紧耦合的融合组网模式。在松耦合模式下,卫星与5G/6G网络各自独立,卫星将数据发送到卫星核心网,通过卫星核心网与地面核心网的接口实现数据交互。在没有地面光纤支持的情况或在应急状态下,该融合网络可以通过卫星承载5G/6G基站的数据回传。在紧耦合模式下,卫星网络与地面5G/6G网络采用兼容的空中接口设计,卫星网络与5G/6G网络协同服务、统一管理,终端采用双模设计,用户只需一部终端即可在卫星网络与地面网络间实现无缝切换。

在网络业务上,基于天基接入网、承载网与地面核心网的5G网元与功能部署,以及微波、可见光、太赫兹等不同频段的使用,融合网络能够实现对于宽带业务(通常采用高频段,如Ka频段)、移动业务(通常采用低频段,如L/S频段)和物联网业务(通常采用低频段,如L/S频段)等各类场景的高效服务,并能够支持机载、舰载、车载、物联终端、5G/卫星双模终端等异构终端接入。

1.2 融合网络发展路线

当前阶段,卫星通信系统的网络架构独立于地面通信系统,卫星通信系统通过其核心网与地面通信网络实现数据交互。为逐步实现卫星与地面通信网络的深度融合,应

依据融合技术难度与发展趋势,按照承载网融合、核心网融合、接入网融合的网络融合步骤进行研究^[22-23],3个融合阶段层层递进,最终实现资源共享的星地一体化网络。

(1) 承载网融合

通过承载网融合,卫星承载网可以快速建立5G基站的临时回传链路,从而在郊区等人烟稀少地区或在硬件条件下为5G基站提供降级回传服务,并快速拓展5G网络覆盖范围,如图2所示。在承载网融合架构下,地面基站和终端的形态仍将保持不变,因此承载网融合成为应用范围最广的融合方式。

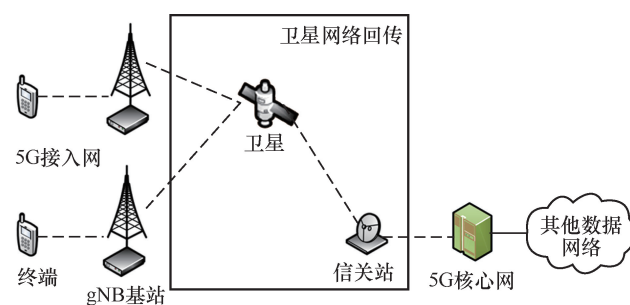


图2 承载网融合后的星地融合网络

(2) 核心网融合

核心网融合是卫星网络与地面网络融合的第二阶段,如图3所示。通过核心网融合,可以实现卫星通信终端与地面移动通信终端的统一编址、统一认证、统一计费、统一管理等功能^[22],星地融合网络可以根据需求选择使用卫星网络或者地面网络提供的服务。在该阶段,卫星网络与地面通信网络的空中接口体制并不兼容,地面5G终端无法实现手机直联卫星,使得网络灵活性较差。

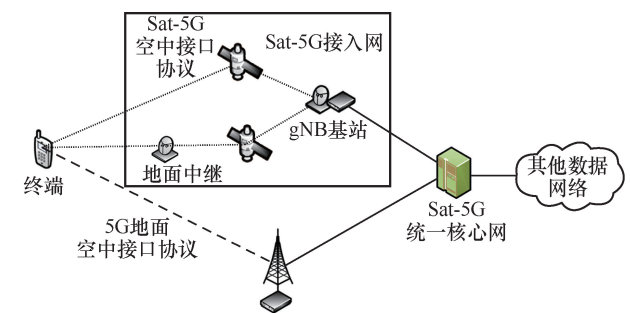


图3 核心网融合后的星地融合网络

(3) 接入网融合

5G与卫星融合的最后一步是接入网融合。在地面空中接口协议的基础上,针对星地无线环境中存在的大时延、大多普勒频偏等不同于地面无线环境的特点对空中接口协议进行相应的适应性修改,即可完成星地网络的接入网融合。此时,卫星网络与地面网络采用相同的架构、传

输和交换技术,卫星网络可大量共享地面网络相关技术成果和资源,地面 5G/6G 终端可根据需要在卫星网络与地面网络中进行无缝切换。随着星上计算能力与存储能力的不断增强,卫星不再局限于中继的作用,转而承担基站的部分或全部功能,进而形成不同的网络架构。

2 星地融合通信系统关键使能技术

卫星网络和地面网络存在多种差异,需要设计相应的使能技术。针对卫星通信系统存在的链路损耗大、传播时延大、频率资源受限、超大小区半径和星上功率受限等特点,需要研究星地融合空中接口体制方案和宽带多用户传输方法。针对激光、微波链路多元业务灵活接入、大容量星上交换需求,需要研究面向空间组网的多粒度微波光电混合信号交换技术;针对不同轨道的卫星网络引起的复合网络结构和高动态时变拓扑,以及受限的星上处理能力,需要利用 SDN/网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV) 技术实现网络资源的动态配置以及灵活路由。

2.1 新空中接口技术

现有的地面通信系统是针对地面无线信道环境设计的,而卫星载荷具有计算和功率等资源受限的特点,星地无线信道存在大链路损耗、大时延、大多普勒频偏等不同于地面网络的特点,使得地面通信系统空中接口不适用于卫星通信系统。为实现星地网络接入网的融合以及高效信号传输,需要在星地融合空中接口体制、星地宽带多用户传输以及基于太赫兹和激光的星间/星地高效传输方面展开研究。具体而言,从以下角度展开研究。

(1) 星地无线通信系统具有路径损耗大、传播时延大、

小区半径大、卫星和终端功率有限、频率资源有限等特点,与地面无线通信系统有明显区别,使得地面通信系统中的下行同步和上行随机接入方法、参考信号设计、波形设计等不能直接应用于星地链路。为此,需要探索利用地面通信系统中的同步和参考信号,在星地无线传播环境下实现同步与接入的方法^[24-25],以及适用于星地链路的低峰均比(Peak to Average Power Ratio, PAPR) 信号波形。

(2) 为实现星地之间的高速数据传输,通常需要在卫星侧配备大规模天线阵列,因此在完成星地无线信道建模的基础上,利用星地无线信道的空间稀疏性,探索空时频用户调度与多用户多波束动态上行下行传输方法^[26-29],实现空间无线资源在海量用户之间的共享,从而提高系统的频谱效率和功率效率。

(3) 针对大型宽带星座和高低轨联合组网场景对星间链路和星地馈电路径传输能力的要求,需要探索星地/星间节点间的太赫兹和激光高效传输方法,通过太赫兹和激光等频段的综合利用,实现高可用性、高数据传输性能的星地馈电路径和高可靠、高性能、轻量化的星间链路。

2.2 光电混合交换技术

星地融合通信系统为满足多元化、多粒度的应用需求,需要综合运用激光星间链路、微波星间链路、激光微波混合交换等技术,解决光路灵活复用、多粒度业务汇聚/解汇聚、光点业务适配等难题。为此,可采用图 4 所示的光电混合一体化交换网络架构。该架构从逻辑上划分为 3 个交换平面和 1 个统一的管理控制平面。光交换平面采用多模式光交换方案,支持光线路交换、光突发交换等不同模式,实现了多粒度大容量星上光交换;电交换平面采用全参数化、可动态组合的通用流匹配阵列结构与多平面一

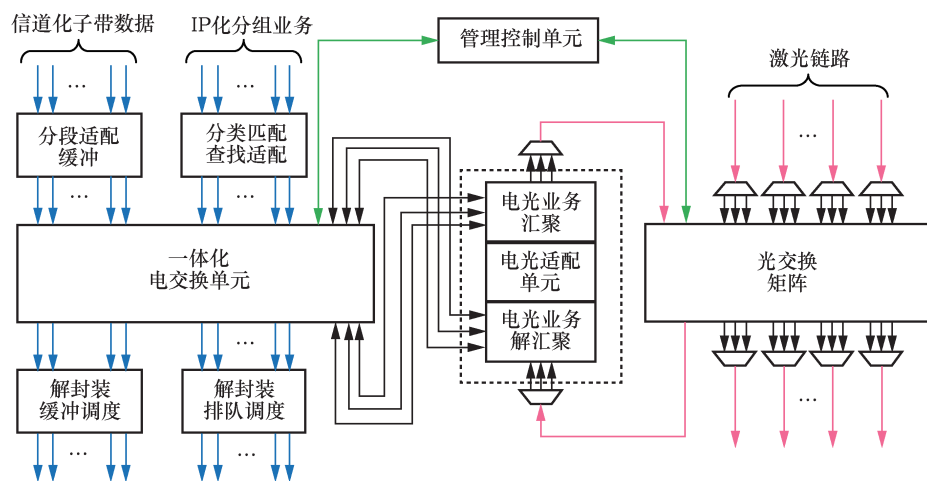


图4 光电混合一体化交换网络架构

体化交换结构设计,能够同时支持分组交换与微波链路信道化子带交换;光电业务适配平面围绕光域和电域间的灵活上下光路需求,采用全同步交换方式,由管理控制单元统一规划光突发交换网络和光电适配网络的时隙计划,实现了光域、电域数据颗粒度的按需调整,显著提高了光电业务汇聚/解汇聚效率,实现了光电交换网络的有机结合;管理控制平面采用开放式、标准化的平台架构,实现对3个交换平面的统一管理控制。

2.3 基于 SDN/NFV 的大时空组网技术

为满足卫星互联网的发展需求,星地组网的底层基础设施应动态部署和配置,以承载大量业务、支持不同类型的应用和服务。然而,由于这些专用硬件来自不同的制造商、采用不同的接口和通信协议,给星地组网的系统重构和互操作带来诸多限制,增加了网络管理的复杂度,提高了系统更新、升级的成本。SDN/NFV 提供了一种解决网络复杂性的方案,增强了业务的可靠性,实现了网络的可扩展性。围绕基于 SDN/NFV 的大时空组网技术开展了如下研究。

(1) 不同的 SDN 控制器部署方案会产生不同的网络性能,需要对控制器的部署方案进行设计。在前文提到的高低轨协同的架构下,根据地面、低轨、高轨3级协作的机制,设计基于 SDN 的星地组网体系架构,提出分簇的 SDN 控制器部署方案,提高了网络的管理能力。针对卫星网络拓扑高速动态变化、业务时空分布不均匀等问题,可以通过 SDN 控制器的部署位置的优化来实现对融合网络资源的高效管理。针对单卫星故障和单星间链路故障两种常见的节点失效场景,以网络状态延迟为衡量标准,利用模拟退火算法求解 SDN 控制器的最佳部署位置;针对地面网络的业务流量差异,在时延约束下,以最小化 SDN 控制链路总能耗为目标求解控制器的最佳部署位置。

(2) 面向 LEO 星座运行速度较快导致的网络拓扑结构周期性频繁变化、用户分布和需求差异导致的网络流量分布不均以及卫星节点存储和计算资源受限等特点,对路由管理方法和负载均衡策略进行研究。围绕路由管理方法,采用动静结合的路由方案,在拓扑变化引起路由快照变化时,只需通过拓扑变化信息来增量修改部分受影响的路由表项,从而减少路由快照数目,在保证星上路由稳定的基础上有效减少星上存储消耗。围绕负载均衡策略,结合卫星网络拓扑特点,对传统的 Dijkstra 算法进行改进,将流量均衡分配到各条可用路径;当链路拥塞后,借鉴背压思路将流量疏导到空余链路^[30]。

(3) 在核心网中,围绕 NFV 云平台可伸缩性、系统

高可靠性以及更低的虚拟层计算损耗等问题的底层技术,针对卫星网络的低时延业务要求,完成虚拟化中断时延系统调优以及增强平台感知技术研究,解决虚拟化后性能损耗的问题,提升虚拟化数据面的转发性能;针对卫星网络业务的可靠性要求,在云平台上通过集群部署、故障状态感知等技术,实现节点高可用、网络高可用、关键进程高可用。

3 星地融合通信原型系统

3.1 星地融合通信原型系统设计

为验证前文所述关键技术在地融合网络中的性能,本文设计并搭建了星地融合网络原型验证系统。该原型系统主要由卫星平台模拟器、星地信道模拟器、相控阵载荷样机、基于 SDN 的卫星网络分级控制器、星载光电混合交换机、核心网云平台、卫星终端模拟器、融合网络基站模拟器、5G 商用基站等设备组成,可对融合网络接入网、承载网与核心网关键技术及相关样机进行测试验证。其中,卫星平台与在轨运行环境模拟器可对卫星轨道、网络拓扑、星地接入关系进行推演,同时对卫星平台测控、姿轨控功能进行模拟。接入网设备主要包含星载相控阵载荷样机、Ka/L 频段终端模拟器、星载基站模拟器、星地无线信道模拟器及 5G 商用基站与终端;天基承载网设备包含基于 SDN 的卫星网络分级控制器与星载光电混合交换机;核心网设备包括融合网络核心网模拟器、商用核心网服务器与 IMS 服务器,同时还包含视频采集设备、视频推流服务器,用于提供视频业务服务。星地融合通信原型系统组成如图 5 所示。该系统支持 3GPP NTN 架构,能够覆盖 5G FR1 与 FR2 频率组。被测原型系统在 L 频段处理无中继接入、Ka 频段处理无中继接入和商用终端接入场景语音通话 3 种场景下均可演示完整端到端视频/语音等业务传输,有效验证接入网、天基承载网与核心网各层关键技术与原理样机的可行性与有效性。

3.2 星地融合通信原型验证

(1) L 频段处理无中继接入场景业务传输

L 频段处理无中继接入场景业务传输旨在演示星地融合网络为用户提供语音、视频等业务服务的能力,如旅行者在沙漠中接入融合网络,通过 VoIP 向应急中心发出求救,其系统验证测试环境如图 6 所示。终端模拟器首先发起入网申请,上行信号经过星地信道模拟器加载卫星信道特性后,通过融合空中接口接入星载基站,天基承载网负责请求消息的路由转发。最终接入请求被转发传输至融合网络核心网,由核心网对用户终端的接入请求进行处理。

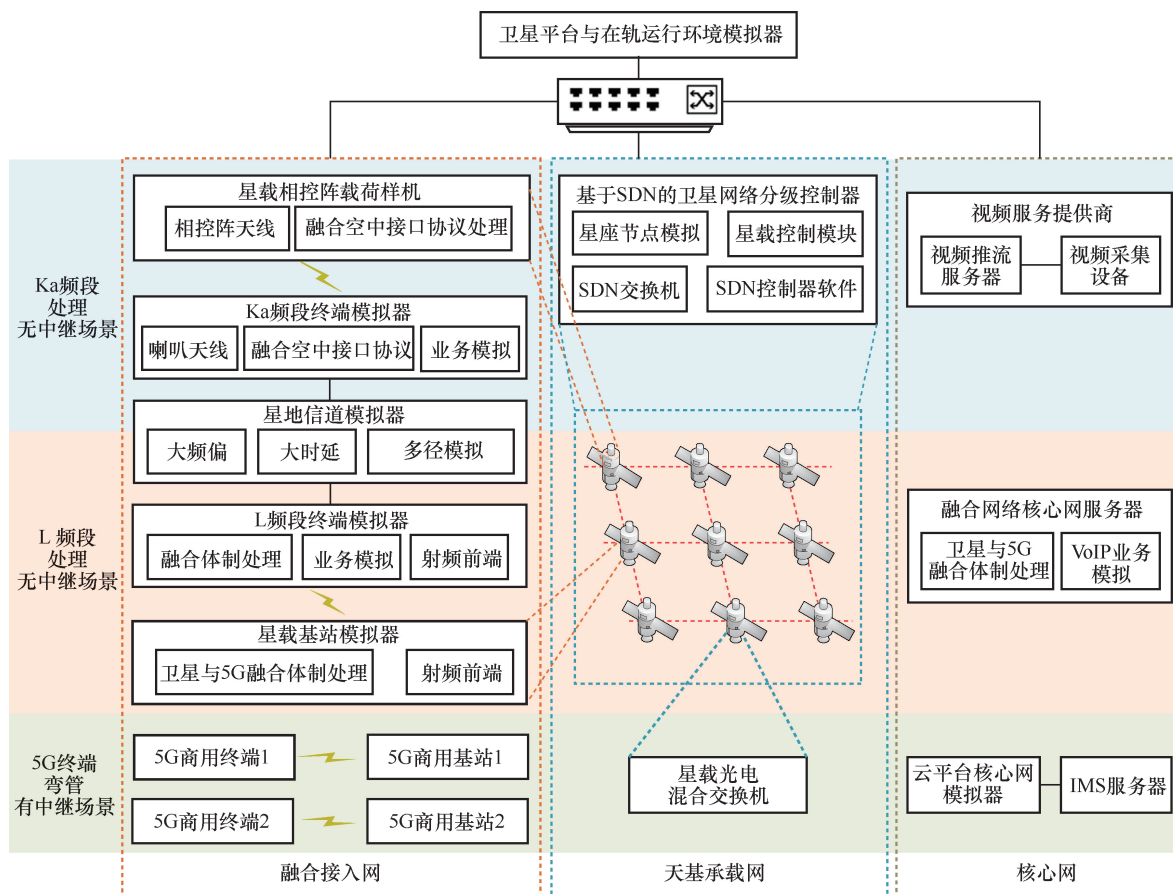


图5 星地融合通信原型系统组成

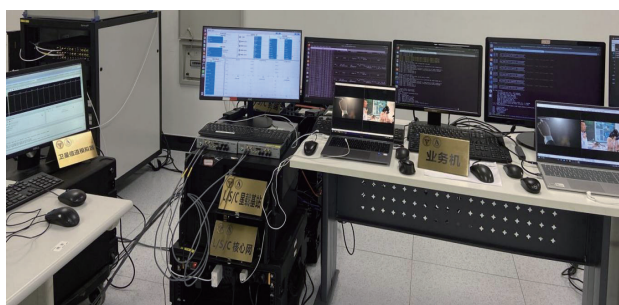


图6 L频段处理无中继接入场景业务传输验证测试环境

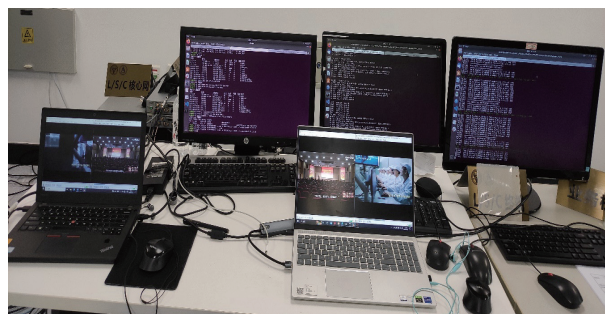


图7 L频段处理无中继接入场景业务传输测试结果

用户成功入网后,可发起语音通话、视频等业务,上行数据信息流向与前述控制信息相同,下行数据信息流向与上行数据信息流向相反。

利用上述原型系统,分别在核心网业务机和终端业务机上开启视频业务,进行视频业务传输,传输测试结果如图7所示,说明所研制的原型系统能够在L频段处理无中继接入场景下完成用户的接入和数据传输,数据传输稳定可靠,基站调度信息日志显示上下行的实时误块率(Block Error Rate, BLER)小于 1×10^{-3} 。

(2) Ka频段处理无中继接入场景业务传输

Ka频段处理无中继接入场景视频业务传输旨在演示星地融合网络为用户提供高速视频传输服务的能力,用户可接入融合网络并进行高清视频点播或直播观看。其系统验证测试环境如图8所示。视频业务数据通过核心网进入天基承载网,由天基承载网负责数据路由转发,当数据流经过星载光电混合交换样机时进行光电混合交换,并被转发至下一跳卫星节点。数据被传输至装备载荷模拟样机的卫星节点后,经由星载相控阵天线通过Ka频段融合空中

接口发送至终端模拟器，在星地信道模拟器完成星地无线信道特性加载后，由终端模拟器进行业务解析与展示。

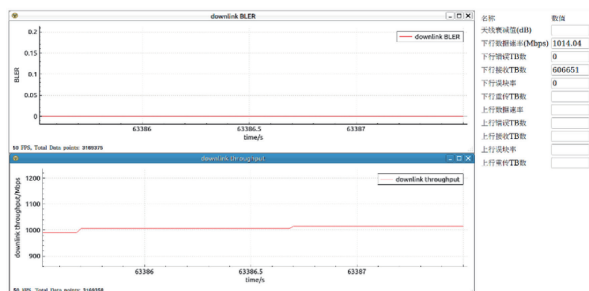


图8 Ka频段处理无中继接入场景业务传输验证测试环境

利用上述原型系统，在发送端业务机使用VLC软件，将视频业务推流至相控阵载荷样机，并在接收端业务机使用VLC软件播放视频业务流，结果如图9(a)所示。在发送端进行灌包，在接收端进行解包以测量单用户最大接入能力，结果如图9(b)所示。从图9中可以看出，接收端业务机视频播放清晰流畅，Ka频段单用户最大接入能力超过1 Gbit/s，且误块率能够稳定在 1×10^{-3} 以内，说明所研制的原型系统能够实现高清视频业务与高速数据传输。



(a) 视频传输结果



(b) 单用户最大接入能力测试结果

图9 Ka频段处理无中继接入场景业务传输验证测试结果

(3) 商用终端接入场景语音通话

商用终端接入场景语音通话采用3GPP NTN中的透明弯管架构，旨在验证融合网络具有支持5G商用终端接入的能力。本场景接入侧采用两套5G商用终端与商用基

站，测试环境如图10所示。商用终端与基站可位于全球任何地点，基站通过地面信关站等节点接入天基承载网。天基承载网基于SDN半物理网络仿真构建。融合网络核心网设备部署于我国境内，通过地面信关站等节点与天基承载网相联。商用终端与商用基站通过5G标准空中接口通信，商用基站通过天基承载网将控制平面与用户平面信息发送至核心网，使得我国境内外的5G用户均可通过融合网络实现自由通话。



图10 商用终端接入场景语音通话测试环境

将两部商用终端分别靠近两个基站，关闭终端的飞行模式使其自动接入与之距离最近的基站。此时，通过两部终端相互拨号，完成电话接通并进行语音通话，两部商用终端的接入信息与通话信息在图11中给出。其中终端屏幕左上角能够显示5G信号和HD角标，说明终端已接入5G基站，并能够通过拨号进行通话，通话语音清晰流畅。上述结果说明所研制的原型系统能够完成5G商用终端的接入与语音通话功能。

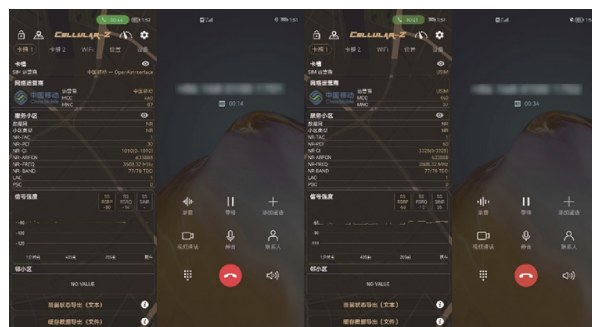


图11 两部商用终端的接入信息与通话信息

4 结束语

未来，本文介绍的星地融合网络将推动卫星通信与地面信息产业融合发展，为我国重大工程建设和6G发展奠定重要基础。

参考文献：

- [1] FOSSA C E, RAINES R A, GUNSCH G H, et al. An overview of

- the IRIDIUM (R) low Earth orbit (LEO) satellite system[C]//Proceedings of the IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference. NAECON 1998. Piscataway: IEEE Press, 2002: 152-159.
- [2] CHINI P, GIAMBENE G, KOTA S. A survey on mobile satellite systems[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2010, 28(1): 29-57.
- [3] XIA S Y, JIANG Q J, ZOU C, et al. Beam coverage comparison of LEO satellite systems based on user diversification[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 181656-181667.
- [4] MCDOWELL J C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, 892(2): L36.
- [5] 宋奕辰, 徐小涛, 宋文婷. 国内外卫星移动通信系统发展现状综述[J]. *电信快报*, 2019(8): 37-41.
- SONG Y C, XU X T, SONG W T. Overview of development status of satellite mobile communication system at home and abroad[J]. *Telecommunications Information*, 2019(8): 37-41.
- [6] 庞江成, 徐小涛, 李超. 卫星移动通信系统发展现状分析[J]. *数字通信世界*, 2020(1): 144-147.
- PANG J C, XU X T, LI C. Analysis on the development status of satellite mobile communication system[J]. *Digital Communication World*, 2020(1): 144-147.
- [7] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, ARAPOGLOU P D. Satellite communications in the 5G Era[M]. *Institution of Engineering and Technology*, 2018.
- [8] EVANS B, WERNER M, LUTZ E, et al. Integration of satellite and terrestrial systems in future multimedia communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2005, 12(5): 72-80.
- [9] CHOI J P, JOO C. Challenges for efficient and seamless space-terrestrial heterogeneous networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(5): 156-162.
- [10] EVANS B, ONIRETI O, SPATHOPOULOS T, et al. The role of satellites in 5G[C]//Proceedings of 2015 23rd European Signal Processing Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 2756-2760.
- [11] ZHANG N, ZHANG S, YANG P, et al. Software defined space-air-ground integrated vehicular networks: challenges and solutions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(7): 101-109.
- [12] DI B Y, ZHANG H L, SONG L Y, et al. Ultra-dense LEO: integrating terrestrial-satellite networks into 5G and beyond for data offloading[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(1): 47-62.
- [13] BASTIA F, BERSANI C, CANDREVA E A, et al. LTE adaptation for mobile broadband satellite networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009: 7.
- [14] CASONI M, GRAZIA C A, KLAPEZ M, et al. Integration of satellite and LTE for disaster recovery[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(3): 47-53.
- [15] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, CAUS M, et al. Satellite-enabled LTE systems in LEO constellations[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 876-881.
- [16] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, CONTI M, et al. Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(3): 2624-2639.
- [17] GIAMBENE G, KOTA S, PILLAI P. Satellite-5G integration: a network perspective[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(5): 25-31.
- [18] KODHELI O, GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A. Integration of satellites in 5G through LEO constellations[C]//Proceedings of GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [19] LIU J J, SHI Y P, ZHAO L, et al. Joint placement of controllers and gateways in SDN-enabled 5G-satellite integrated network[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(2): 221-232.
- [20] JOU B T, VIDAL O, CAHILL J, et al. Architecture options for satellite integration into 5G networks[C]//Proceedings of 2018 European Conference on Networks and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 398-399.
- [21] BOERO L, BRUSCHI R, DAVOLI F, et al. Satellite networking integration in the 5G eco system: research trends and open challenges[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(5): 9-15.
- [22] 郑重, 缪中宇, 郑寒雨, 等. 卫星通信与地面 5G 融合发展路线探讨[J]. *航天器工程*, 2021, 30(5): 115-124.
- ZHENG Z, MIAO Z Y, ZHENG H Y, et al. Discussion of integrated development roadmap for satellite communications and ground 5G[J]. *Spacecraft Engineering*, 2021, 30(5): 115-124.
- [23] DING R, CHEN T T, LIU L, et al. 5G integrated satellite communication systems: architectures, air interface, and standardization[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Wireless

Communications and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2020: 702-707.

- [24] WANG W J, CHEN T T, DING R, et al. Location-based timing advance estimation for 5G integrated LEO satellite communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6): 6002-6017.
- [25] CHEN T T, WANG W J, DING R, et al. Precoding design for joint synchronization and positioning in 5G integrated satellite communications[C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [26] WU S Y, SUN G L, WANG Y F, et al. Low-complexity user scheduling for LEO satellite communications[J]. IET Communications, 2023, 17(12): 1368-1383.
- [27] GAO L N, MA J X, YOU L, et al. Robust energy-efficient multigroup multicast beamforming for multi-beam satellite communications[C]//Proceedings of ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [28] WANG W J, GAO L N, DING R, et al. Resource efficiency optimization for robust beamforming in multi-beam satellite communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(7): 6958-6968.
- [29] JIANG B, YAN Y C, YOU L, et al. Robust secure transmission for satellite communications[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(2): 1598-1612.
- [30] LIU J, LUO R Z, HUANG T, et al. A load balancing routing strategy for LEO satellite network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 155136-155144.

[作者简介]



丁睿 (1979—), 男, 中国卫星网络集团有限公司研究员, 主要研究方向为卫星互联网、卫星通信等。



房天昊 (1998—), 男, 东南大学移动通信国家重点实验室博士生, 主要研究方向为卫星移动通信。



王闻今 (1980—), 男, 东南大学移动通信国家重点实验室教授, 博士生导师, 主要研究方向为大规模 MIMO 无线通信和卫星移动通信。



刘雨 (1978—), 女, 北京邮电大学人工智能学院副教授, 博士生导师, 鹏城实验室网络与通信研究中心副教授, 主要研究方向为卫星互联网、图像处理、分布式源编码等。



马伟 (1979—), 男, 西安空间无线电技术研究所研究员, 网络与信息处理技术研究室副主任, 主要研究方向为天基网络管控与路由交换技术。



万屹 (1971—), 男, 中国信息通信研究院研究员, 中国信息通信研究院无线与移动领域主席, 技术与标准研究所副所长, 主要研究方向为无线移动通信。