

空天通信网络关键技术综述

安建平¹, 李建国², 于季弘², 叶能¹

(1. 北京理工大学网络空间安全学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081)

摘要: 伴随信息社会向网络化、泛在化、智能化持续发展, 现有地面通信网络已经无法支持日益增长的宽带业务需求、泛在海量的物联接入需求、隐蔽可靠的安全传输需求。未来通信网络要求在全球范围内实现既纵深宽广又细致入微的全方位无线接入, 其进一步演进亟需突破包括网络架构和空口技术等在内的底层技术。相比于地面通信网络, 空天通信网络不受地形的限制, 可实现包括海洋、森林、边远地区等的立体全覆盖, 可在多维度多层次尺度实现全空间范围内的信息交互, 将成为满足海量异构用户泛在连接需求的关键使能技术。本文综述了空天通信网络的关键技术, 首先给出了空天通信网络现有系统及未来智慧社会业务的多元化应用场景, 然后从空-天-地三网、物理-网络-应用三层、有效传输-资源管理-安全防护三域出发, 给出了一种空天通信网络的整体架构。本文随后从组网与接入、物理层以及资源管理与切换等角度出发分别总结了关键技术。最后, 本文指出了未来空天通信网络的技术发展挑战和趋势。

关键词: 空天通信网络; 空天地一体化; 组网接入; 物理层技术

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)02-0470-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210029

Key Technologies of Space-Air-Ground Communication Networks: A Survey

AN Jian-ping¹, LI Jian-guo², YU Ji-hong², YE Neng¹

(1. School of Cyberspace Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: With the information society continuously developing towards networking, ubiquity, and intelligence, the existing terrestrial communication network has been unable to supply the increasing demand for broadband services, ubiquitous access, and concealed and reliable transmission. The future communication network requires the realization of all-round wireless access. Its further evolution urgently needs to break through the underlying technologies including network architecture and air interface technology. Compared with the terrestrial communication networks, integrated space-air-ground communication networks can work independently of terrain, and can achieve full coverage including oceans, forests, remote areas, etc. In addition, the information interaction can also be achieved from multiple dimensions. The integrated space-air-ground communication will be one of the key technologies enabling the ubiquitous connection of enormous heterogeneous users. This paper summarizes the key technologies of aerospace communication networks. Firstly, we introduce the existing space-air-ground communication systems and the diversified application scenarios oriented for the future smart society. Secondly, an overall architecture of the integrated space-air-ground communication networks is presented from the perspectives of space-air-ground physical space, physical-network-application network structure, and effective transmission-resource management-security protection technical route. Subsequently, the key technologies are summarized such as networking and multiple access, physical layer and resource management, etc. Finally, the technical challenges and trends of future aerospace communication networks are pointed out.

Key words: space-air communication networks; space-air-ground; networking and multiple access; physical layer technology

1 引言

现代信息社会发展新形态需要无线通信体系架构和关键技术的嬗变. 伴随不断提升的“4A”(Anytime、Anywhere、Anyone、Anything)通信需求,业务数据呈现爆发增长,业务覆盖要求无缝衔接. 预计到2030年,全球范围内每立方公里的接入设备数量最多可达千万量级. 为此,未来亟需突破时空限制,通过低延时、超可靠的实时通信完成全球范围内100%立体全覆盖,真正实现人与万物泛在互联的信息社会发展愿景^[1-5].

在过去几十年间,传统的基于无线蜂窝组网的地面移动通信网络(Terrestrial Communications Networks)已成为推动经济社会进步的重要基础设施. 但地面移动通信网络存在覆盖范围有限、安全可靠不足、抗损毁能力差等缺点,仅凭借传统的地面蜂窝移动通信无法满足全球范围内海量泛在覆盖、高效安全传输的需求.

与地面移动通信相比,超长距离的空天通信功能易受到不利环境因素的影响,例如因通信链路经过行星大气层和电离层导致信号散射与衰减、因等离子散射导致传输延迟大大增加、上下行链路异构且不对称等问题以及越来越稀缺的空间轨道资源^[6]. 为使空天通信网络利用有限资源实现高速、海量、实时、安全传输,亟待解决下述技术挑战.

(1)缺乏有效精准的传播环境建模. 在空天通信网络中,信道条件会随着时间、地理位置、天气条件、飞行高度等因素波动,且广泛覆盖的卫星和无人机等空间平台的信道具有异质性,它们拥有完全不同的信道模式. 而现有的成熟的卫星信道模型主要是针对郊区、空旷地区提出的,在低轨密集星座服务城市等信道散射环境复杂的场景的模型尚处于论证阶段,还需进一步验证和校准,缺乏经过大量实测验证的传播信道模型.

(2)缺乏高效适配的信道传输技术. 空天通信业务场景如空间探测、无人机遥感、卫星通信等由于采样距离越来越小、采样频率越来越高,将产生大量的通信数据. 而这些数据在大部分场景下都需要以实时的方式传递给最终用户,但是空间平台(如卫星和无人机等)带宽资源稀缺,所以缺乏高效适配的信道传输技术来满足空天通信网络通信的实时传输要求^[7].

(3)缺乏异构融合的组网体系架构. 空天信息通信网络由于覆盖范围广、业务种类多等特点,对终端配置的要求较为严格,从而给空天传输网络的接入设计增加了难度. 另外,空天信息通信网络需要不断整合卫星之间、卫星与地面之间的信息资源,同时需要具备较强的自主管理能力以及快速响应能力以应对突发状况. 因此,亟需异构融合的组网体系架构使得空天通信传

输网络的资源调度具备较强的动态重组的特性^[8].

面向上述挑战,本文综述了空天通信网络的关键技术. 首先从空-天-地三网、物理-网络-应用三层、有效传输-资源管理-安全防护三域出发,给出了一种空天通信网络的整体架构. 然后以网络拓扑构型和路由管理为脉络梳理了空天通信网络的组网与接入技术,同时总结了空天通信中物理层技术发展现状,包括调制多址、波形、编码、高频段传输和多天线技术. 此外,梳理了多域资源管理、跨层切换技术. 最后针对现有系统的不足,本文指出了未来空天通信网络技术的发展趋势.

2 发展历程

2.1 现有系统

在过去的几十年来里,部分空天通信系统已经成功进行了军事或商业化应用,最广为人知的包括全球信息网格(Global Information Grid, GIG)、TSAT(Transformational Satellite Communications System)、Iridium等. 其中GIG是通信网络、传感器网络和运营网络组成的一体化网络,基于此实现无缝全球通信^[9]. TSAT系统是美国国家航空航天局为军事应用而设计的下一代GEO(Geosynchronous Earth Orbit)卫星系统,该系统由5颗GEO卫星组成,使用激光链路相互通信,形成一个10 Gbps主干网,并允许地面终端从无人机和卫星获取实时信息^[10]. 而铱星系统由66颗LEO卫星组成,轨道高度为大约780公里. 旨在为全地球覆盖地区提供移动数据和语音服务^[11]. 与此同时,近几年涌现出多个如“下一代铱星”(Iridium Next)、“一网”(OneWeb)、“星链”(Starlink)等宽带低轨卫星通信星座来提供覆盖全球的高速互联网接入服务.

欧盟在2005年提出了全球通信综合空间基础设施ISICOM(Integrated Space Infrastructure for Global Communication), ISICOM采用卫星、高空平台、无人机等多种节点来构建天地一体网络,其致力于导航系统、全球环境安全系统以及未来互联网的融合^[12]. 在2017年6月,欧洲成立了SaT5G(Satellite and Terrestrial Network for 5G)组织,主要研究卫星与5G的融合问题,并推动相应的国际标准化工作^[13,14].

国内的空天信息网络研究,鸿雁星座系统一期建设由60余颗骨干卫星组成,优先提供全球移动通信业务和重点地区的宽带互联网业务;虹云工程系统由156颗小型卫星组成,采用Ka波段通信,每颗卫星有4 Gbps带宽的吞吐量,旨在向全球用户提供“宽带互联网”服务;我国在雄安新区成立了中国星网集团,来实现通信卫星应用产业化,为国家新型基础设施建设提供基础性条件. 北斗卫星系统则是世界上首个集定位、授时和

报文通信为一体的卫星导航系统。北斗系统还可以灵活的划分使用等级范围,实现定位保障等级的调整、优先权调配和能力集成^[15]。

2.2 应用场景

空天通信网的应用主要包括五个方面,分别为泛在物联、宽带互联、智能海洋、隐蔽安全、社会治理。

泛在物联是指任何时间、任何地点、任何人和物之间的信息连接和交互。主要包括对物品的智能化识别、定位、跟踪监控和管理,保障数据传输的及时性、有效性,保障运输的安全,实现全球范围内全天候万物互联。

宽带互联可以提高道路特征和交通设施的清晰度。在沙漠、山路、乡路等没有普通信号的地方,实现随时随地联网。增强移动终端导航能力,为机载、车载定位终端提供精准可靠的位置服务。同时可以为交通物流、跨境电商、海洋、能源、旅游、农牧业等多个领域提供实时信息,为国家的“一带一路”建设做出贡献。

在智能海洋通信方面,空天信息网络面对海上环境情况复杂、海事业务异构等问题,提出了智能化、协同化和信息化的发展,克服海洋复杂环境对传播的影响,满足海事安全通信、海况通报、导航避障、海事紧急救援、公共通信服务等多种异构业务的低延迟、高可靠、全覆盖的需求^[16,17]。

空天通信网可以保证数据传输的隐蔽性。传统地面网络,基站数目过多,任一基站发生故障或被安装窃听设备,都会导致秘密信息的泄露。而采用空天通信网,加密数据可以通过天基骨干网和天基接入网进行直接传输。而高空飞行器和卫星的数据链路更为安全,更难截获。因此可以构建隐蔽安全的通信链路。

在社会治理方面,当面对重大安全事件,如自然灾害,社恐暴乱等,国家需要对大规模人群或地区进行实时监控。这暴露出在面对重大事件时,采用普通的模式将不再适用。我们必须提升监管效率,加大监管强度。尤其是在面对重点防控地区,更要实现全方位无死角的人员流动监控以及实时周边环境信息的采集。这需要技术的支持,而要对如此海量的数据实现实时监控、流量监管。空天通信网可以凭借三层异构网络实现全方位无死角的地区覆盖,并可以对热点地区进行灵活的资源调配,通过科学手段实现高效的社会治理。

3 系统架构

3.1 系统整体架构

面向未来泛在无线、智联万物的发展需求,构建跨维域、跨业务、跨体制的空天地融合通信网络,达成全

球全方位的覆盖,已然成为未来通信系统的发展方向。面向未来的空天通信网络架构,本文提出一种三网-三层-三域整体架构:从空间层面上可以划分为由宇宙飞船、轨道卫星等构成的天基网络,由飞行器所构成的空基网络和由地面用户所构成的地基网络;从体系结构上可以分为以多址技术、编码技术、多天技术为主的物理层,以组网架构和协议架构为主的网络层,以及面向用户的应用层;从功能结构上可以划分为以降低传输时延、提升谱效率为目标的有效传输域,以跨网跨层资源管理为核心的资源管理域,以及以可靠安全抗干扰为抓手的安全防护域。如图1所示。

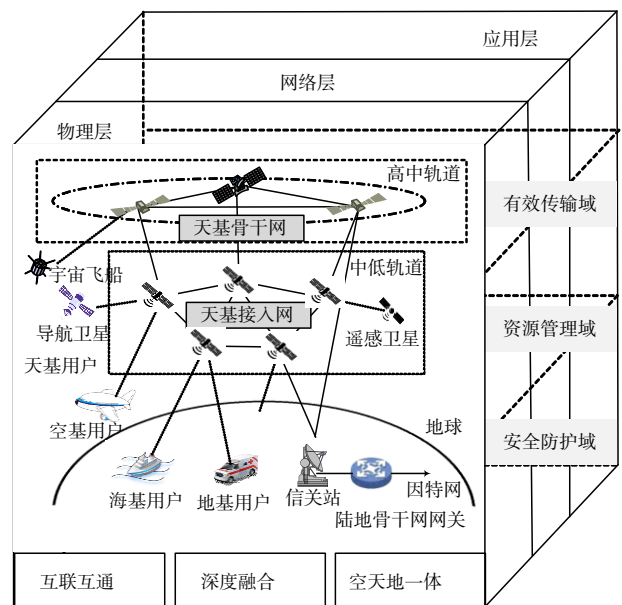


图1 空天信息通信网络架构示意图

3.2 天网-空网-地网

空天地一体化网络从空间上可以划分为天网、空网和地网。这三个部分可以独立运行,也可以互操作,通过在这三个网段之间集成异构网络,可以轻松构建分层宽带无线网络。

天网由卫星和星座及其相应的地面基础设施(例如,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。根据离地面高度,卫星可分为三类:GEO、MEO(Medium Earth Orbit)和LEO(Low Earth Orbit)卫星。此外,还可以根据卫星网络的信道带宽将其分为窄带和宽带。

空网是一种空中移动系统,它使用无人机、飞艇和气球是构成高空和低空平台(HAP(High Altitude Platform)和LAP(Low Altitude Platform)),为主要基础设施进行信息获取、传输和处理。可以提供宽带无线通信以补充地面网络。与地面网络中的基站(Base Station,

BS)相比,空中网络具有易于部署和覆盖范围广的特点,可以在区域范围内提供无线接入。

地面网络主要由地面通信系统组成,例如蜂窝网络、移动自组织网络(Mobile Ad hoc NETwork, MANET)、全球微波接入互操作性(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX)、无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)等等。特别是蜂窝网络已经从第一代(1G)演进到了第五代(5G)无线网络以支持各种服务。在标准化上,第三代合作伙伴计划(The 3rd Generation Partner Project, 3GPP)已经开发了一套针对蜂窝/移动网络的规范。地面网络能够为用户提供高数据速率,但是目前对于农村和偏远地区的网络覆盖范围有限。

3.3 物理层-网络层-应用层

空天地一体化网络从体系结构上可以分为物理层、网络层和应用层。上层利用相邻下层的服

务,建立起与通信对端同一层相同的服务。物理层是无线传输系统的基础结构,是提供数据传输的物理媒体。空天地一体化网络为实现星地融合,简化终端,实现星地频谱部署,需先解决物理层空口融合设计问题。针对大规模MIMO技术在单星条件下增益不明显且精确时频网络在多星协作条件下搭建困难的情况,采用非正交多址方案能够有效地提升系统频谱资源利用率,应对功率受限、信道高动态的特性可以采取鲁棒的低峰均比载波体制,应对海陆高速接入的需求引入多波束实现有限频率资源的高效空间复用和极化复用。

网络层采用空天地一体化的组网原则进行设计和规划,保证系统间路由和数据传输的简单高效。其支持两种网络协议体系,层次型协议体系和非层次型模块化协议体系。主要面向天基环境,实现空天地一体化协同组网,能够支持IP、CCSDS(The Consultative Committee for Space Data Systems)等不同的网络架构,实现空天地不同终端实时接入与不同QoS(Quality of Service)的信息传输。

应用层是体系结构中最高的一层,直接为用户的通信过程提供服务。未来的空天地一体化网络中将存在大量多方协作的场景且多方协作服务与资源共享将朝着去中心化、智能化的方向发展。其未来典型的应用场景主要涵盖互联网应用、物联网应用、车联网应用以及国家战略应用,具体包括基于卫星的泛在网络连接、移动多媒体广播、卫星高清视频,全球范围内全天候万物互联,机载、车载定位终端精准可靠的位置服务以及推动商业航天的发展升级,服务区域安全等。

3.4 有效传输域-资源管理域-安全防护域

空天地一体化网络从功能上可以划分为有效传输域、资源管理域和安全防护域。

有效传输域侧重解决空天地一体化中接入时延、传输信息有效性的问题,以满足未来通信中泛在连接、海量接入、宽带传输和实时传输为核心的目标。有效传输域的技术核心在于设计完善的空口体制和系统组网体制。其中空口设计主要包括了接入信令设计、多址设计、新载波体制设计等,未来将着重发展以智能化为核心的新空口体制。

资源管理域是指对于空天地多个系统资源的统一调度与管理,以实现网络的全局优化和资源的利用率,其主要涵盖了有限的频谱资源、卫星载荷资源、储存资源、计算资源等稀缺资源的分配。系统运维管控是资源管理域的核心工作之一,当前天基互联网主要采用地面站控制的方式进行卫星网络运维,自主运维能力差,因此搭建智能化预见式运维是未来卫星网络运维的发展趋势。

空天地一体化网络集成了各种军事和民用应用系统,包含了开放的链接,移动的节点,动态的网络拓扑,对于数据安全可靠和实时要求高,因此安全防护域显得尤为重要。安全防护域重点工作主要包含IP协议安全和链路安全等。

4 组网与接入技术

4.1 网络拓扑构型

空天通信中卫星星座一般由位于GEO(地球同步静止轨道)、MEO(赤道面中轨道)、LEO(低轨道)和VLEO(甚低轨道)的多颗通信卫星组成;L、Ku、Ka以及Q/V频段频谱在卫星通信中被广泛采用。其中低轨卫星由于其轨道低、链路损耗小在通信的可达性和实时性角度具有独特的优势^[18]。对于地面网络,能够实现全球无死角覆盖,对于高轨通信卫星,则能够实现极地连接和更小的时延。

以近几年涌现的多个低轨卫星通信星座为例,“下一代铱星”(Iridium Next)总共有81颗卫星,主要工作星运行于高度870 km,倾斜角度86.4°的低轨道,每颗卫星与另4颗相连,从而形成一个动态的网状网络,在卫星间路由流量^[19]。

“一网”(OneWeb)由高度为1 200 km的近极地圆形轨道上的720颗LEO卫星组成,分别分布在18个平面上^[20]。卫星在穿过赤道时,会采用“渐进俯仰”(progressive pitch)的技术来逐渐改变自身的信号发射方向和强度,从而消除对地球同步卫星的干扰,如图2。

“电信卫星”(Telesat)采用双低轨混合系统,由极地轨道和倾斜轨道组成。系统至少由117颗卫星组成,两个轨道分别为1 000 km高度,99.5°的极地轨道以及

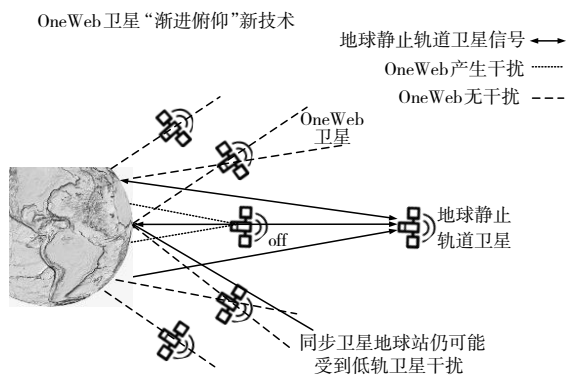


图2 OneWeb“渐进俯仰”技术

1 284 km 高度, 37.4° 的倾斜轨道. 双轨道设计的目的是为了实现在全球范围内的无缝覆盖高速通信服务.

4.2 网络虚拟化

软件定义网络(Software Defined Network, SDN)是一种能够将控制和转发进行分离的技术,将其应用于空天自组网,可以实现资源的灵活自动配置,满足空天网络的应用需求. 不同接入网络与卫星网络的混合将有助于提高带宽以及均衡负载. SDN可以实现对数据流的精确控制,从而在最佳链路上无缝分发数据流. 图3是利用SDN实现混合网络.

网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)则由运营商联盟提出,核心思想是IT虚拟化,将传统的通信设备软件与通信硬件解耦,从而降低成本,提高效率.

将SDN和NFV配合可以在异构环境下对全网设备全局管理,从而更为灵活高效的资源分配,并解决传统卫星网络系统配置管理繁琐的问题.

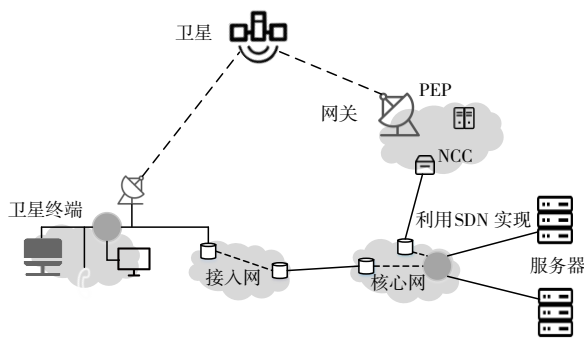


图3 利用SDN实现混合网络

基于信息中心网络体系架构^[21]以内容名字命名,并以该名称进行寻址. 其信息获取采用请求、应答方式,由消费者发送兴趣包申请数据包,进入路由节点的数据包,先缓存到存储器中,然后按照兴趣包进入路径原路返回. 该网络体系架构拥有低延迟、高时效的转发

机制,支持高移动性,容迟容断,多颗粒度网络切片,内生安全等特点,满足网络一体化、功能服务化、应用定制化的空天通信网络需求.

4.3 接入机制

针对空天系统中大量终端的海量链接需求,对于多址接入技术提出了进一步的要求. 现有的正交多址方式如频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)、时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)、空分多址(Space Division Multiple Access, SDMA)、码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)和正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)普遍存在频谱利用率不高,可划分的物理资源块受限的问题.

随机接入协议主要用于减少冲突和解决冲突,从而更高效利用网络资源,保证网络稳定. ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres)协议由于其实现简单,曾在无线通信网络中被广泛使用. 后续又在ALOHA基础上发展为时隙ALOHA、CSMA(Carrier Sense Multiple Access)和扩展ALOHA等协议. 随机接入协议优势主要在于可以在同一时间服务众多的终端用户.

5 物理层技术

5.1 调制多址技术

由于空天地信息通信系统容量扩张和空天地网络业务增加的需求,使得卫星通信信道的频谱资源越来越稀缺,这就要求信号调制方式具有比较高的频带利用率和资源利用率,而调制和多址技术都是影响空天地通信质量的关键因素^[22-25].

调制在通信系统中的重要性不言而喻,调制是把信号转换成适合在信道中传输的形式的一种过程. 其中,正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)是一种经典且高效的调制方式^[26,27],它具有频带利用率较高、抗噪性能好的优势,有线数字视频广播(Digital Video Broadcasting-Cable, DVB-C)由于信道信噪比较高、误码率较低的特点,就采用了QAM调制,并且QAM在高速数据传输和卫星通信领域的应用也十分广泛.

在空天地一体化通信系统中,卫星通信信道具有非线性特点,这会导致已调波的外包络发生波动,从而进一步导致相位失真和频谱扩展^[28]. APSK(Amplitude Phase Shift Keying)作为一种PSK与QAM相结合的调制方式,有较高的频谱效率^[29],能改善频谱资源紧张的问题,且信号的幅度值较少、包络起伏小,即PAPR(Peak to Average Power Ratio)低,能有效抵抗抗功

率放大器的非线性失真^[30,31]。以 16-APSK 为例,如图 4 所示。

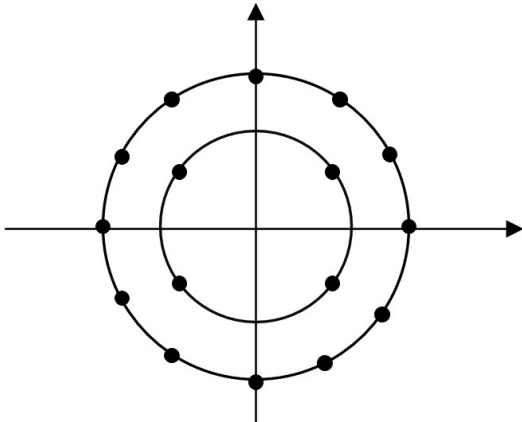


图4 16-APSK 星座图(4+12-APSK)

16-APSK 的星座图由两个同心圆组成,圆上分布了相等间隔的 PSK 星座点。与 PSK 调制相比,APSK 克服了 PSK 相位不连续、有较大带外功率泄露的缺点;与 QAM 相比,APSK 更适合根据不同信道及业务分级传输的场景^[30]。

5.2 波形技术

在极高频(Extra High Frequency, EHF)卫星传输系统中,波形的选择不仅需要考虑到频谱效率,更重要的是抵抗热噪声和相位噪声的鲁棒性^[32]。而传统的基于奈奎斯特脉冲的波形(如根升余弦脉冲波形)由于易受到非线性失真的影响,不能很好地满足此类要求^[32]。

在空天地一体化通信系统中,波形的 PAPR 与频谱效率相比同样重要。典型的低频移动卫星通信存在非线性放大和频率选择性多径衰落的问题,而多载波恒包络(Constant Envelope, CE)波形,如基于 FFT 的 CE-OFDM 和 CE-SCFDMA(Constant Envelope Single-Carrier FDMA)能有效抵抗非线性失真、避免功率补偿的不利影响,可以作为 EHF 宽带移动卫星通信的有效波形方案^[33,34]。但在 W 频段,这类波形极易受到相位噪声的影响,所以建议在相位噪声较小的频段内(如 Q 频段)使用。

到目前为止,从实际可实现程度以及抵抗相位噪声的角度来看,较好的候选波形是跳时超宽带(Time-Hopping UWB, TH-UWB)^[32],既能有效抵抗功率放大器引入的非线性失真,又能在合适的频段内(如 Q 频段)抵抗相位噪声。另外,PSWF-based PSM 波形以及 CE 波形也是未来可研究的方向,需要关注完善相应的信号处理体系结构,将复杂度控制在合理的范围内,保证波形的生成^[32]。

5.3 可靠编码技术

卫星通信距离远、时延长,合理的选用可靠的编码技术,可以有效的降低通信系统的误码率^[35]。国际空间数据系统咨询委员会(CCSDS)推荐的编码有卷积码、RS 码、LDPC 码、Turbo 码等。卷积码主要用于对抗随机噪声引起的误码。RS 码主要用于对抗突发噪声引起的误码。LDPC 码和 Turbo 码编码增益高,但是实现结构复杂,消耗资源多。文献[36]提出了具有循环冗余校验的 RS 码和 LDPC,其中 RS 用作内码来纠突发噪声引起的误码,LDPC 用作外码来纠随机噪声引起的误码。

Polar 码是一种线性分组码,纠错性能强,在理论上被证明可以达到二元对称信道的信道容量。文献[37]在可见光通信中,使用固定比特索引的方法限制编码游程长度来设计极化码。文献[38]给出了一种低复杂度的极化码顺序译码方法。文献[39]在系统复杂度、地板效应、瀑布区域的限制条件下,设计了一种具有迭代译码性能的比特交织极化编码调制系统。

为满足星间链路、星地链路不同业务需求、不同时频资源的条件下,实现信息高效可靠传输。卫星通信链路可采用自适应调制编码技术。在不同的业务类型、不同的信道条件下,使用不同方式、速率的编码调制以保证各类业务信息高效传输。

6 多域资源管理与切换

空天信息通信网络中,彼此融合的异构网络带来了吞吐量的提升以及更为灵活多变的信息传输方案^[40]。然而,有限的能量和频谱资源并不能满足日益增长的通信需求,以及其具有的高异构性、复杂多变性和长短时滞混合变异性等特点,影响了业务可靠高效的端到端传输^[41]。因此设计高效的资源管理方案来对三层异构网络中的通信、计算、存储数据进行灵活管控,实现多域信息存算通融合变得至关重要。同时,在空天通信网中,用户终端将不再限定于某一个层,而可能是立体网络中的任一通信节点。如何设计合理的切换策略以避免不必要的无效切换,保证用户切换的无缝连接以维持较高的通信质量亦是下一阶段的研究重点。

6.1 多域资源联合管理设计

6.1.1 网络设计

通过采用软件定义网络 SDN,将网络的控制平面与数据转发平面进行分离,从而通过集中的控制器中的软件平台去实现可编程化控制底层硬件,实现对网络资源灵活的按需调配。

在文献[42]中作者提出了一种支持无缝连接,高速数据车载服务的空天地一体化网络体系架构。回顾

了空天地网络设计的动机和挑战。而文献[43]提出了采用BalanceFlow分布式控制器以解决负载不均的问题。同时提出一种基于可靠性感知的控制器部署策略和控制流保护技术。

6.1.2 干扰管理与资源共享

在空天信息通信网络中,天基骨干网,天基接入网以及地面网络在传输数据时共享通信,计算,存储资源。如何设计合理的资源分配方案,既保留自身网络的特点,同时兼顾其他网络的传输特性。通过对不同网络中通信,计算,存储资源进行统一分配,将存算一体技术与空天通信网相结合,可以实现数据的高速传输与转发,节省带宽,减少能量损耗。是下一阶段空天网络的研究热点。

由于空天通信网络中各个节点分布广、类型多,高中低轨卫星、高空平台、无人机以及终端之间的干扰管理问题受到众多学者的广泛关注。文献[44]针对数目众多的非静止轨道卫星的轨道特性,提出了全球场景下的非静止轨道卫星的全星座干扰分析方案,并给出了全球范围内的卫星干扰状态及可用比例的概率分布,为非静止轨道星座的干扰情况提供了理论依据。

通信资源管理可大致分为基于资源预留的信道资源管理策略、基于预测模型的信道资源管理策略,以及基于博弈论的信道资源管理策略^[41]。有学者利用卫星移动轨迹的可预测性,结合用户的移动速率和时延等QoS需求,研究了基于信道预测的下行动态资源优化方案。解决了波束间切换的联合资源分配问题^[45,46]。对部署多个高空平台(HAP)的空天通信网络,有学者研究在这些分布在不同的星座中,共享相同的频带并服务于相同的覆盖区域的高空平台的信道资源分配问题^[47]。以及基于OFDMA的高空平台(HAP)中用于多播的无线资源分配方案^[48]。

6.2 空天通信网跨层切换及层间切换

在空天信息通信网络系统中,移动终端的切换问题面临新的挑战。与单层网络的用户切换问题相比,在空天地三层异构网络中用户(User Equipment, UE)的行动轨迹很难预测,尤其是当UE无法在地面网络上中继时。因此需要保证终端可以通过透明的切换连接到卫星网络或者天基网络当中。基于此,有学者提出两种切换过程,即S1和X2切换。当UE在卫星小区之间或在卫星小区与地面eNB之间移动时,发生S1切换(跨层切换),而当UE在地面eNB之间移动时,需要进行X2切换(层间切换)。相对于卫星或地面系统的单个网段,综合网络中的移动性管理更为复杂,因为它必须考虑来自所有集成网段的移动节点。

7 技术发展挑战与趋势

本文综述了空天通信网络关键技术。相比于地面通信网络,空天通信网络不受地形的限制,可实现全维立体全覆盖,将成为满足海量异构用户泛在连接需求的关键使能技术。但空天通信网络独有的网络异构性,业务种类的多样性给跨层系统资源优化设计、子网间的融合、节点的高效安全可靠运行等方面提出了挑战。本文首先给出了一种空天通信网络的整体架构,随后从组网与接入、物理层、资源管理与切换以及网络安全等角度出发分别总结了关键技术,同时给出了空天通信网络赋能未来智慧社会业务的多元化应用场景。

面向未来泛在智慧连接需求,需要有针对性的技术演进,包括以下几个方向。

(1)网络智慧柔性化:空天通信网络需要智能化、柔性化的自主重构技术,通过将柔性网络架构和空天通信网络相结合。从软硬解耦、频谱共享、人工智能优化等关键技术突破,实现动态资源优化分配方案。

(2)通导感算一体化:空天通信网络是遥感、传输、控制等空天领域关键业务的承载载体,需要研究结合人工智能,存算一体,软件定义网络等技术的融合,实现三维融合网络中数据的高速传输与转发。

(3)无线空口智能化:人工智能和深度学习技术已经成为无线通信技术演进的设计新范式。未来空天通信网络需要研究人工智能增强的空中接口技术,通过智能可演进实现环境适配,逼近通信性能极限。

(4)传输安全可信化:出于空天通信网络的特殊架构,其存在一定程度的脆弱性,为了保证信息传输的安全性和可靠性。需要研究基于扩频传输,自适应波束成形,抗干扰阵列天线设计等抗干扰抗截获技术。

参考文献

- [1] XU G, SONG Z. Effects of solar scintillation on deep space communications: Challenges and prediction techniques[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 10-16.
- [2] YU Q, MENG W, YANG M, et al. Virtual multi-beamforming for distributed satellite clusters in space information networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(1): 95-101.
- [3] WANG Y, et al. Multi-resource coordinate scheduling for earth observation in space information networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36

- (2): 268-279.
- [4] 张玲玲. 简述空天信息传输网络的特点、现状及发展趋势[J]. 山东工业技术, 2016, (4): 140.
ZHANG Ling-ling. Briefly describe the characteristics, status quo and development trend of aerospace information transmission network[J]. Shandong Industrial Technology, 2016, (4): 140. (in Chinese)
- [5] ZHANG X, ZHU L, LI T, et al. Multiple-user transmission in space information networks: Architecture and key techniques[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 17-23.
- [6] NAGPAL L, SAMDANI K. Project loon: Innovating the connectivity worldwide[C]//2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology(RTEICT). Sri Venkatesh-wara Coll Engn, Bangalore, India: IEEE, 2017: 1778-1784.
- [7] LU H, GUI Y, JIANG X, et al. Compressed robust transmission for remote sensing services in space information networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 46-54.
- [8] Naser Hossein Motlagh, et al. Low-altitude unmanned aerial vehicles-based Internet of things services: Comprehensive survey and future perspectives[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(6): 899-922.
- [9] HUBENKO V P, RAINES R A, MILLS R F, et al. Improving the global information grid's performance through satellite communications layer enhancements[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(11): 66-72.
- [10] HAMDANI M, BOUDRIGA N, OBAIDAT M S. 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.
- [11] MAINE K, DEVIEUX C, SWAN P. Overview of IRIDIUM satellite network[C]//Proceedings of WESCON'95. San Francisco, CA, USA: IEEE, 1995: 483.
- [12] 吴建军, 程宇新, 梁庆林, 等. 面向未来全球化网络的欧洲 ISICOM 卫星通信概念系统[J]. 卫星应用, 2010, (5): 59-64.
WU Jian-jun, CHENG Yu-xin, LIANG Qing-lin, et al. European ISICOM satellite communication concept system for future global network[J]. Satellite Applications, 2010, (5): 59-64. (in Chinese)
- [13] 翟立君, 潘沐铭, 汪春霆. 卫星 5G 技术的发展和展望[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 1-9.
ZHAI Li-jun, PAN Shu-ming, WANG Chun-ting. Development and prospect of satellite 5G technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 1-9. (in Chinese)
- [14] ETSI TS 122 261-2018, 5G. Service requirements for next generation new services and markets(V15.6.0; 3GPP TS 22.261 version 15.6.0 Release 15)[S]. 2020-12.
- [15] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.
YANG Yuan-xi. Progress, contribution and challenges of compass/Beidou satellite navigation system[J]. Acta Geodaetica Et cartographica Sinica, 2010, 39(1): 1-6. (in Chinese)
- [16] 冯伟, 唐睿, 葛宁. 星地协同智能海洋通信网络发展展望[J]. 电信科学, 2020, 36(10): 5-15.
FENG Wei, TANG Rui, GE Ning. Perspectives on coordinated satellite-terrestrial intelligent maritime communication network[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(10): 5-15. (in Chinese)
- [17] LI Y, WANG S, JIN C, et al. A survey of underwater magnetic induction communications: Fundamental issues, recent advances, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2466-2487.
- [18] 许幼成, 陈涤非, 孙强. 低轨宽带通信卫星应用浅析[J]. 数字通信世界, 2020, (2): 29-30.
XU You-cheng, CHEN Di-fei, SUN Qiang. Analysis on the application of low-orbit broadband communication satellites[J]. Digital Communication World, 2020, (2): 29-30. (in Chinese)
- [19] 刘悦. “下一代铱星”系统首批 10 颗卫星成功发射[J]. 国际太空, 2017, (4): 52-54.
LIU Yue. The first 10 satellites of iridium next launched successfully[J]. Space International, 2017, (4): 52-54. (in Chinese)
- [20] 林莉, 左鹏, 张更新. 美国 OneWeb 系统发展现状与分析[J]. 数字通信世界, 2018, (9): 18, 22-23.
LIN Li, ZUO Peng, ZHANG Geng-xin. Development situation and analysis of OneWeb system[J]. Digital Communication World, 2018, (9): 18, 22-23. (in Chinese)
- [21] 孙明欣. 以信息为中心网络的缓存策略的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
SUN Ming-xin. Design and Implementation of Cache Startegy Based on Information Centric Networking[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)

- [22] YE N, HAN H, ZHAO L, et al. Uplink nonorthogonal multiple access technologies toward 5G: A survey[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018: 1-26.
- [23] YE N, LI X, YU H, et al. Rate-adaptive multiple access for uplink grant-free transmission[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018: 1-21.
- [24] AN J, YANG K, WU J, et al. Achieving sustainable ultradense heterogeneous networks for 5G[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(12): 84-90.
- [25] Hanxiao YU, Zesong FEI, Congzhe CAO, et al. Analysis of irregular repetition spatially-coupled slotted ALOHA [J]. *Sci China Inf Sci*, 2019, 62(8): 18-30.
- [26] 郭铭铭, 夏文娟, 窦建华. 基于QAM载波恢复算法的研究[J]. *现代电子技术*, 2014, (16): 21-23.
GUO Ming-ming, XIA Wen-juan, Dou Jian-hua. Research on QAM-based carrier recovery method[J]. *Modern Electronics Technique*, 2014, (16): 21-23. (in Chinese)
- [27] 彭钧, 郭见兵, 陈东进. 一种高阶QAM联合载波恢复算法的研究[J]. *光通信研究*, 2011, (3): 20-22, 43.
PENG Jun, GUO Jian-bing, CHEN Dong-jin. Research on a union carrier recovery algorithm for high-order QAM [J]. *Study on Optical Communications*, 2011, (3): 20-22, 43. (in Chinese)
- [28] 谢秋杨. 面向卫星通信高阶调制解调16-APSK算法实现研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
XIE Qiu-yang. Realization Research on High Order Modulation and Demodulation Algorithm of 16-APSK for Satellite Communication[D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese)
- [29] 梅凡. 卫星数传系统中16APSK调制解调技术研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2016.
Mei Fan. The Research of Modulation and Demodulation of 16APSK in Satellite Data Transmission System[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [30] 宫晓妍, 刘建伟, 杨友福. 基于卫星信道的APSK调制研究[J]. *遥测遥控*, 2009, (6): 12-16.
GONG Xiao-yan, LIU Jian-wei, YANG You-fu. Analysis of APSK modulation based on satellite channel[J]. *Journal of Telemetry, Tracking, and Command*, 2009, (6): 12-16. (in Chinese)
- [31] European Telecommunications Standards Institute. Digital video broadcasting(dvb); second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications(DVB-S2X):ETSI Standard EN 302 307-2 V1.1.1[S/OL]. [2020-12]. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302307/01_01_01_20/en_302307v010101c.pdf?msckid=52cd74f4a81c11ec84fe9ebd30fda0dd
- [32] SANCTIS M, CIANCA E, ROSSI T, et al. Waveform design solutions for EHF broadband satellite communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(3): 18-23.
- [33] THOMPSON Steve C, AHMED Ahsen U, PROKIS John G, et al. Constant envelope OFDM[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2008, 56(8): 1300-1312.
- [34] MULINDE R, RAHMAN T F, SACCHI C. Constant-envelope SC-FDMA for nonlinear satellite channels[C]// *GLOBECOM 2013*. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2013: 2939-2944.
- [35] 袁伟杰, 李双洋, 种若汐, 等. 面向6G物联网的分布式译码技术[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(1): 21-27.
YUAN Wei-jie, LI Shuang-yang, ZHONG Ruo-xi, et al. A distributed decoding algorithm for 6G Internet-of-things networks[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2021, 43(1): 21-27. (in Chinese)
- [36] WANG B, CHEN P, FANG Y, et al. The design of vertical RS-CRC and LDPC code for ship-based satellite communications on-the-move[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 44977-44986.
- [37] WANG H, KIM S. Design of polar codes for run-length limited codes in visible light communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 31(1): 27-30.
- [38] TROFIMIUK G, IAKUBA N, RETS S, et al. Fast block sequential decoding of polar codes[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 10988-10999.
- [39] FAYYAZ U U. Symbol mapping design for bit-interleaved polar-coded modulation with iterative decoding[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 23(1): 32-35.
- [40] LIU J, SHI Y, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [41] 陈娅婷. 空天地一体化网络无线资源管理与传输协议优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
CHEN Ya-ting. Research on Wireless Resource Management and Transmission Protocol Optimization for Space-Air-Ground Integrated Network[D]. Beijing: Beijing Jiao-

tong University, 2019. (in Chinese)

- [42] 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.
- [43] 胡延楠. 软件定义网络关键技术及相关问题的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
HU Yan-nan. Research on Key Technologies and Related Problems in Software-defined Networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015. (in Chinese)
- [44] 靳瑾, 李娅强, 张晨, 等. 全球动态场景下非静止轨道通信星座干扰发生概率和系统可用性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, (9): 833-840.
JIN Jin, LI Ya-qiang, ZHANG Chen, et al. Occurrence probability of co-frequency interference and system availability of non-geostationary satellite system in global dynamic scene[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2018, (9): 833-840. (in Chinese)
- [45] 李伊陶. 基于 LEO-MSS 的多层扩展网络场景下的资源分配和切换优化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
LI Yi-tao. Resource Allocation and Handover Optimization Based on Extensible Multi-layer LEO-MSS[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [46] GRACE D, CHEN G, WHITE G P, et al. Improving the system capacity of mm-wave broadband services using multiple high altitude platforms[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2003: 169-173.
- [47] IBRAHIM A, ALFA A S. Using Lagrangian relaxation for radio resource allocation in high altitude platforms[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(10): 5823-5835.

作者简介



安建平 男, 1965 年出生于山西省原平市. 现为北京理工大学网络空间安全学院教授、博士生导师. 主要研究方向为空天信息网络与安全、空间信号处理.
E-mail: an@bit.edu.cn



李建国 男, 1993 年出生于黑龙江省佳木斯市. 现为北京理工大学信息与电子学院博士. 主要研究方向: 太赫兹高速通信.
E-mail: jianguoli@bit.edu.cn



于季弘 (通讯作者) 男, 1987 年出生于河北秦皇岛. 现为北京理工大学信息与电子学院教授、博士生导师. 主要研究方向: 空天通信、无源物联网.
E-mail: jihong.yu@bit.edu.cn



叶能 男, 1993 年出生于浙江省绍兴市. 现为北京理工大学网络空间安全学院预聘助理教授. 主要研究方向: 空天泛在通信技术、智能通信信号处理技术.
E-mail: ianye@bit.edu.cn