

空天地一体化通信网络发展

Development Vision and Challenge of
Air-Space-Ground Integrated Network

愿景与挑战

裴郁杉,张忠皓,王婷婷(中国联通网络技术研究院,北京 100048)

Pei Yushan,Zhang Zhonghao,Wang Tingting(China Unicom Network Technology Research Institute,Beijing 100048,China)

摘要:

从未来6G网络的愿景出发,首先讨论了空天地一体化的网络愿景,提出了一体化的网络架构。在分析了卫星通信和空基通信系统的特点后,给出了未来空天地一体化通信网络的应用场景。然后从网络结构、通信设施与设备及空口技术等3个方面详细阐述了当前一体化网络的发展现状与技术挑战。最后总结了当前地面通信运营商在空天地一体化网络中的尝试,提出非地面网络具有明显的覆盖优势和长距离通信的低时延网络服务优势,可以帮助运营商提供低成本的普遍服务及扩展现有的通信服务,实现收入增长。

关键词:

网络发展愿景;应用前景;网络发展现状;技术挑战

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2020.04.004

文章编号:1007-3043(2020)04-0015-06

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

It starts from the vision of the future 6G network, firstly discusses the network vision of air-space-ground integration and proposes an integrated network architecture. After analyzing the characteristics of satellite communication and space-based communication systems, it presents the application scenarios of future air-space-ground integrated communication networks. In addition, it also elaborates on the development status and technical challenges of the current integrated network from three aspects: network structure, communication facilities and air interface technology. Finally, it concludes the current ground communications operators' attempts in air-space-ground integrated networks, and proposes that non-ground networks have coverage advantages and low-latency network service advantages for long-distance communication, which can help operators provide low-cost universal services and expand existing communication services to achieve revenue growth.

Keywords:

Network development vision; Application prospects; Network development status; Technical challenges

引用格式:裴郁杉,张忠皓,王婷婷.空天地一体化通信网络发展愿景与挑战[J].邮电设计技术,2020(4):15-20.

0 引言

2019年3月,芬兰奥卢大学邀请70位来自各国的顶尖通信专家召开了全球首届6G峰会,共同起草世界上第1份6G白皮书,阐明6G发展的基本方向。2019年11月3日,我国科技部会同发展改革委、教育部、工信部、中科院、自然科学基金委在北京组织召开6G技

术研发工作启动会,成立国家6G技术研发推进工作组和总体专家组,标志着我国6G技术研发工作正式启动^[1]。

全球首份6G白皮书《6G无线智能世界的关键驱动和研究挑战》^[2],初步回答了6G的技术特点和挑战。认为未来6G的愿景是具备泛在、无线、智能等特点,能够提供无缝覆盖的泛在无线连接和情景感知的智能服务与应用。6G将会突破地面网络限制,实现地面、卫星、机载网络和海洋通信网络的无缝覆盖,即空天

收稿日期:2020-02-16

地一体化的通信网络。

1 空天地一体化通信网络愿景

自1898年马可尼第1次发射无线电信号起,空基、天基、地基、海基无线电通信也在持续地演进,但是各通信系统采用不同的技术体制和网络结构、系统间独立封闭,信息交互能力差,发展程度不平衡。天基方面,高轨卫星与低轨星座相互独立,彼此之间无法通信;海上多采用海事卫星、短波/超短波等通信手段;航空方面一开始仅有前舱的制式通信,直到近年来才通过利用高轨卫星,逐步在后舱开展了有限的公众娱乐通信业务。

未来的空天地一体化网络关注的是融合,典型的一体化网络由3个部分组成:由各种轨道卫星构成的天基网络,由飞行器构成的空基网络,以及传统的地基网络,其中地基网络又包括蜂窝无线网络、卫星地面站和移动卫星终端以及地面的数据与处理中心等^[3]。网络的整体结构如图1所示,可以发现该网络具有如下特点。

- a) 不同轨道的卫星系统统一规划。
- b) 临近空间和民航飞机等航空器构成空基网络,可以与卫星和地面通信系统通信。

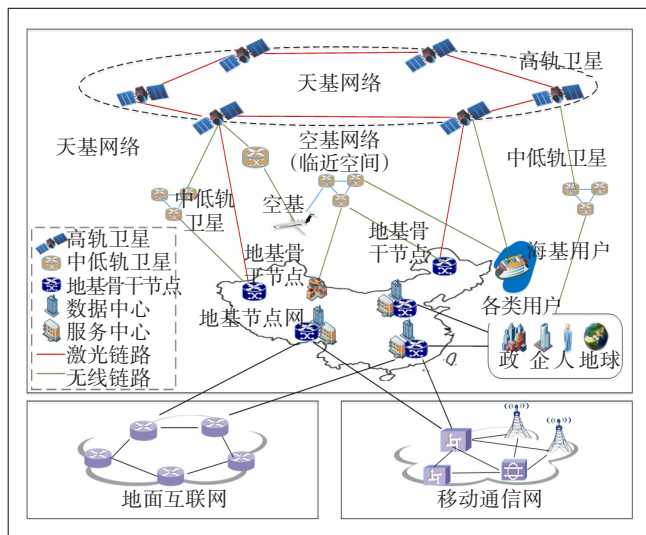


图1 空天地一体化通信网络结构

c) 非地面系统与地面网络深度融合,采用统一的空口技术和核心网架构,并与MEC和网络切片结合,减少高空通信时延。

- d) 多层次覆盖,提供多重业务类型。

2 空天地一体化通信网络的应用前景

空天地一体化通信网络将多元的通信平台设施结合起来,可以提供更加广阔和多样化的无线通信业务。

2.1 卫星通信特点分析

根据轨位、高度不同,卫星通信系统分为高轨同步卫星、中轨卫星和低轨卫星3种。表1是高轨同步卫星、中轨卫星和低轨卫星系统的通信能力与成本的比较。从表1可以看到,轨道越高,单星的覆盖能力越大,单星成本越高,时延越大。而随着轨道高度的下降,单颗卫星的覆盖能力下降,单星成本下降,但是由于需多颗卫星形成星座,因此星座系统的成本急剧上升。图2是OneWeb系统与5G系统的各项指标对比,其中容量成本和覆盖成本采用归一化的比较方法。

从图2可以看出,与5G相比,卫星网络具有以下特点。

- a) 卫星通信的时延较高,端到端时延可能达到几十至百ms级别。
- b) 单用户和单星峰值速率均小于地面5G网络,容量成本远大于5G。
- c) 受限于不同的技术体制和较大的传输链路损耗,卫星系统无法与蜂窝终端直接通信,而卫星终端的成本与能耗也相对较高。
- d) 卫星的覆盖不受地形限制,覆盖成本低。
- e) 卫星具有天然的广播性,可以在很大的地理范围内向大量终端广播数据,节省传输带宽并且各终端之间收到广播信息的时延差很小。

2.2 空基通信系统特点分析

根据通信载体位于空间的高度,空基网络包含临近空间的高空通信平台(HAPS——high Altitude Platform Station)/高空基站(HIBS——HAPS IMT BS)、民航

表1 各卫星系统的通信能力与成本比较表

卫星类型	典型系统代表	轨道高度/km	容量能力	覆盖能力	时延/ms	成本
高轨高通量同步卫星	中星16	3.6万	单星20 Gbit/s	单星三分之一地球	500~800	20亿人民币
中轨卫星星座	O3b	8 062	总容量10 Tbit/s,单用户最大500 Mbit/s	星座覆盖全球	150	65亿美元
低轨卫星星座	One Web	1 200	总容量5.4 Tbit/s,单用户上行400 Mbit/s,下行500 Mbit/s	星座覆盖全球,单星过顶时间几分钟	30	300亿美元

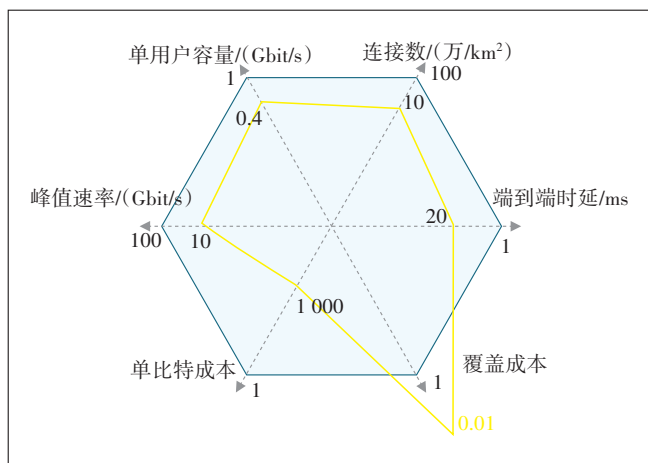


图2 One Web系统与5G系统的各项指标对比

客机和泛在低空无人机等类型,图3为空基通信网络结构示意。其中HAPS高度最高,可达到20~30 km,覆盖范围最广,可以达到50 km的覆盖半径。相比卫星通信系统和地面移动网络,空基网络具有以下特点。

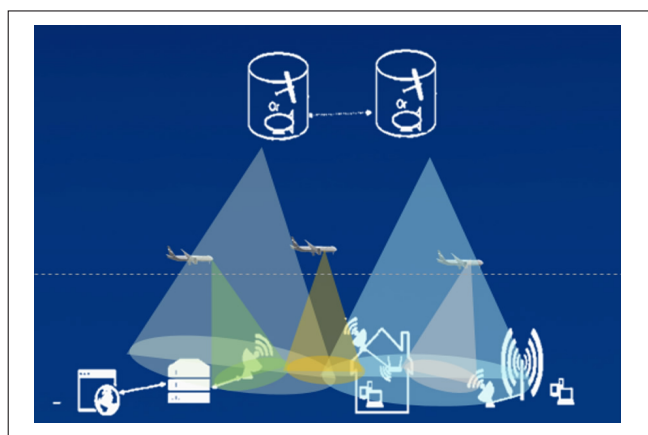


图3 空基网络结构示意图

a) 相比卫星通信网络,空基网络传输链路大大缩短,能够与地面终端直接通信。

b) 与地面蜂窝通信网络相比,空基网络覆盖不受地形限制,覆盖成本小。

c) HAPS/HIBS目前受限于浮空器,通信载荷受限,供电困难,容量成本高。

d) 民航客机的通信载荷大,规律巡航,时间成本可控,但不能提供实时业务。

e) 低空无人机可作为基站或终端。

2.3 空天地一体化通信网络的应用场景

根据上述分析,可以得出如下结论。

a) 覆盖方面:高通量卫星、中低轨卫星星座及HAPS/HIBS等非地面网络具有较低的覆盖成本,且对

地面的覆盖不受地形限制。

b) 容量方面:中、低轨卫星星座具有庞大数量的卫星,而HAPS/HIBS的载荷受限,因此中低轨卫星具有更大的容量能力。

c) 与地面通信方面:卫星通信空一地链路传输损耗大,因此卫星无法与地面移动终端直接通信;卫星终端复杂度高、成本高、能耗大、体积大,无法在广覆盖中有效地实现低能耗、低成本的部署;卫星在大范围内的时延同步性较好,在广覆盖范围内的时延差别很小。HAPS可以搭载IMT基站,且空一地链路传输损耗小,可以与地面IMT终端直接通信;也可以搭载任意的固定微波设备,与地面关口站或CPE通信;因此,空基网络可作为地面网络的有效延伸,快速低成本地实现广覆盖;并且可作为面向卫星的汇聚节点。

因此,借助非地面网络的特点,空天地一体化通信网络可以突破地形限制,为公众和行业提供真正无缝泛在的高速业务体验。

a) 公众服务。

(a) 普遍服务。长期以来,我国政府高度重视农村地区脱贫致富和可持续发展,将电信普遍服务作为打赢脱贫攻坚战、实施乡村振兴战略、建设网络强国的重大举措之一全力推进。自2015年底实施电信普遍服务试点以来,国内三大电信运营商已累计投入400多亿元实施电信普遍服务,支持13万个行政村通光纤和4G建设,其中包含4.3万个贫困村^[4]。但是普遍服务的代价是高成本、低收入,利用非地面网络有助于实现低成本的普遍服务。

(b) 应急救援。应急救援是非地面通信网络最为常用的场景,目前三大运营商都具有大量的卫星应急通信车。近几年来随着无人机的发展,无人机基站在灾后应急通信中发挥了重要作用^[5]。而在未来的空天地一体化通信网络中,低轨卫星和HAPS/HIBS的覆盖范围更大,并且有望成为不受地面灾害限制的、“一直在线”的网络,从而能够更快地恢复通信。

(c) 大型交通工具上的通信服务。随着移动通信系统应用的全面普及,人们越来越离不开手机这一便捷的通信工具,它具有良好的语音质量、快速接通、随时接入等特点,使得人们时时刻刻都依赖着它。而民航客机和游轮远离地面基站的覆盖范围,目前大都采用卫星通信+Wi-Fi的方式实现通信。但受限于当前高轨卫星的通信能力,这种方式的时延和速率都远不能达到用户的需求。并且存在Wi-Fi安全性较差、不

能无感知接入以及无法接收短信验证码等问题,使得用户无法获得满意的业务体验。基于边缘计算将非地面网络和小基站相结合,可以为民航后舱和游轮旅客提供低时延、多样化的综合通信业务,如视频点播、游戏对战等。

b) 行业服务。

(a) 全球化低时延网络服务。在普通的 eMBB 体验中,用户对低时延没有太大的感觉,但是在金融业和网络游戏对战中,全球化的低时延服务至关重要。现有的高轨卫星通常会有几百 ms 的时延,但在未来的低轨卫星通信系统中,长距离的通信时延有可能甚至会低于地面光纤。伦敦大学学院的 Mark Handley 教授对 starlink 低轨卫星星座的长距离通信时延进行了模拟分析^[6]，“伦敦—纽约”线路采用 starlink 卫星比地面光纤快了 15 ms (51 ms vs 76 ms)，“伦敦—约翰内斯堡(南非)”快了 100 ms (90 ms vs 190 ms)，而这十几、一百 ms 的通信时延领先将会为金融从业者带来丰厚利润。此外,由于卫星和 HAPS 的覆盖范围大,在单设备覆盖范围内的时延差相同,因此非地面网络也适用于对于差分时延敏感的业务。

(b) 光纤不可达地区的生产管控。如海上钻井平台、远洋货船、边缘地区的矿区等光纤不可达的地区,生产企业具有生产管控的需求,运营商可以通过空天地一体化通信网络为生产企业提供整体的网络解决方案。

(c) 运营商境外业务拓展。当前我国很多跨国生产企业在境外都有生产基地,并有管控境外生产基地的需求,将境外生产基地的必要数据回传到国内集团统一管理。地面运营商可以借助空天地一体化通信网络为跨国企业提供低延迟的境外数据通信业务以及集团化的网络解决方案。此外,我国地面运营商“走出去”也成为增加收入的手段,在境外地面移动蜂窝通信业务扩展初期,可以采用非地面网络快速完成广覆盖网络部署和业务发展。

3 空天地一体化通信网络发展现状与技术挑战

3.1 网络结构

空天地一体化网络涉及多个通信系统,包括:

a) 天基通信系统,主要有高轨卫星、中低轨卫星星座。

b) 空基通信系统,有 HAPS/HIBS、民航客机、低空无人机等飞行器通信平台。

c) 非地面网络地面段,主要有卫星地面信关站、卫星终端、HAPS 信关站等。

d) 地面蜂窝移动通信系统,计算与处理节点,如地面网关、数据中心、边缘计算节点等。

与传统的通信网络相比,空天地一体化网络中的部分接入节点具有很强的移动性,如低轨卫星的过顶时间只有几到几十 min,因此需要低时延、高效率、健壮的网络结构和灵活的功能节点部署方案以应对接入节点的频繁切换。同时由于多个通信系统的运营者不同,因此需要设计安全、可靠、高效的网络接口,以实现网络的深度、安全融合。

3.2 通信设施与设备

普遍认为当前的地面移动蜂窝通信网络领先于卫星通信技术,因此在未来空天地一体化通信网络的实现中最为关键的是非地面网络等通信设施的发展。

3.2.1 通信设施发展现状

3.2.1.1 卫星

卫星近年来最主要的发展趋势是高通量和低轨卫星星座。

高通量卫星 (HTS——High Traffic Satellite) 是指使用相同带宽的频率资源,而数据吞吐量是传统通信卫星数倍甚至数十倍的通信卫星,其通信容量达数百 Gbit/s 甚至 Tbps 量级^[7]。根据欧洲咨询公司于 2017 年 6 月发布的《高通量卫星:垂直市场分析与预测》^[8],全球 30 家卫星运营商在高通量卫星系统方面的总承诺投资额已达到近 190 亿美元。2017—2025 年预计将有大约 100 次 GEO-HTS 发射,平均每年发射 11 次,并且将至少发射 1 个 LEO-HTS 星座。我国的中星 16 号卫星和发射失败的中星 18 号卫星均是 GEO-HTS,其中中星 16 号卫星总容量为 20 Gbit/s,可为单用户提供 150 Mbit/s 的通信速率,单用户速率已经达到 1 个 Release 8 20 MHz 载波 LTE 基站的吞吐量能力。国际上高通量卫星单星最大可提供超过 4 000 个波束,总容量 300 Gbit/s+ 的能力,未来容量可提升至 1 Tbit/s (Via-Sat-3)^[9]。

10 年来,星座内卫星数量大幅增加。2000 年和 2010 年,铱星和全球星的相继陨落,低轨卫星星座计划被地面蜂窝移动通信打败。但是,近年来小卫星技术获得长足发展,百公斤级及以下的小卫星订单显著增多。新生代批量化入轨的全球互联网小卫星星座 (如 Starlink、OneWeb 等) 规划了上千颗甚至上万颗卫星。表 2 为主要的中低轨卫星星座计划。我国也相继

表2 主要的中低轨卫星星座计划

公司	国家	卫星数量	轨道	频段	服务
SpaceX	美国	7 518	极低轨道	V	全球宽带
SpaceX	美国	4 425	LEO	Ka, Ku	全球宽带
波音	美国	2 956	LEO	V	先进通信,基于互联网的服务
OneWeb	美国	1 280	MEO	Ka, Ku, V	MEO全球宽带
OneWeb	美国	720	LEO	Ka, Ku	第1代LEO全球宽带
OneWeb	美国	720	LEO	Ka, Ku, v	第2代LEO全球宽带
Kepler通信	加拿大	140	LEO	Ku	M2M通信(互联网)
加拿大TeleSat	加拿大	117	LEO	Ka	宽带及窄带通信服务
加拿大TeleSat	加拿大	117	LEO	V	宽带及窄带通信服务
Theia Holdings	美国	112	太阳同步LEO	Ka, V	综合地球观测与通信网络
Spire Global	美国	100	LEO	AIS, ASM, GNSS	海洋监视,气象监视,地球成像
LeoSat MA	美国	80	LEO	Ka	宽带服务
波音	美国	60	LEO	Ka	终端用户地球站极高速连接
O3b	美国	60	MEO	Ka	宽带服务
O3b	美国	24	-	V	宽带服务
ViaSat	美国	24	倾斜圆轨道	Ka, V	宽带服务
Karousel LLC	美国	12	大倾角椭圆轨道	Ka	通信
Audacy通信	美国	3	倾斜圆MEO	K, V	数据中继星座,向卫星运营商提供对NGSO卫星的无缝接入
Space Norway AS	挪威	2	HEO	Ka, Ku	北极地区宽带

发布了“虹云”“鸿雁”等低轨卫星星座计划^[10]。

3.2.1.2 HAPS/HIBS

HAPS是将无线基站安放在长时间停留在高空的飞行器上来提供电信业务,覆盖范围广,在20 km的高空,覆盖半径最大可达约500 km。为了推动HAPS技术的研究与发展,ITU在1997年便启动了HAPS相关频率的研究与划分工作。在ITU研究中,共有2种HAPS应用场景。

a) HAPS平台通过固定链路与地面网关、家庭网关、CPE等进行通信,从而向各个服务地区提供大容量的宽带业务。

b) HAPS平台通过移动链路与地面的海量移动终端通信,提供移动无线接入。

软银提出采用高空基站(HIBS)实现低成本的普遍服务和物联网服务,软银旗下企业HAPS Mobile将与Alphabet子公司Loon共同开发这个项目。目前HAPS、HIBS的应用主要受限于高空飞行器的成熟度,高空平台设备的供电能力和载荷能力尚不足以在平流层长时间提供通信服务。目前相对成功的项目主要是Google的Project Loon,其最长可在空中漂浮100多天时间。目前该项目已完成在新西兰、巴西、美国加州等地的部署测试。2017年9月,美国联邦通信委员会给Project Loon颁发了一张有效期为2017年10月

6日—2018年4月4日的临时许可证,允许30个谷歌热气球在波多黎各和美属维尔京群岛升空,为这些遭遇飓风破坏的地方提供移动蜂窝网络连接^[11]。

3.2.2 技术挑战

非地面网络的通信设施目前尚未成熟,可以预见未来的通信设备将面临以下挑战。

- a) 需要适应空天地海复杂的通信环境。
- b) 支持多频多模。
- c) 由于受到卫星和浮空器的载荷限制,非地面网络的通信设备需要控制尺寸和能耗等。
- d) 终端侧考虑便携性,也需要控制尺寸。
- e) 广域物联网的终端需要考量待机时间,从而进一步降低成本等。

为了应对以上挑战,空天地一体化通信网络需要共享的产业链,设计模块化、灵活可变的设备结构,以适应不同的应用环境和功能要求,并且需要研发高能效和小型化的设备形态。

3.3 空口技术

空天地一体化网络的核心是原有多种制式网络的融合,其中一种观点是将地面移动技术应用在非地面网络中,此时空口上将会面临以下关键技术的挑战。

- a) 频率共享与干扰消除。相比现有独立的各个

通信网络,未来一体化的通信网络空口链路更为复杂多样,每条链路上都有很大的数据速率需求,而无线电频率资源是有限的^[12]。因此需要考虑智能、高效的频率共享与干扰消除方法。

b) 天线与射频。将地面移动通信技术应用到非地面网络,需要适应高空、太空向地面的覆盖需求;同时与传统卫星相比,高通量卫星与低轨卫星的覆盖方式也发生了变化,采用点波束复用的方式进行覆盖,因此非地面网络接入站点的天线波束赋形与射频技术都需要重新设计。

c) 接入和切换。与地面通信网络相比,卫星网络整体容量较小,单星容量有限,为保证用户体验,卫星通信系统需设计适宜的用户接入和切换策略。这包括为用户选择合适的卫星波束及适宜的卫星信道。同时,由于低轨卫星系统的卫星相对于地面高速移动,每颗卫星服务的时长可能只有数十秒,一次业务中可能包括多次卫星切换。卫星系统切换可分为同一卫星内波束间的切换和不同卫星的波束间的切换,以及跨地面站之间的切换。此外,还可能会涉及空、天、地不同通信系统间的切换。

d) 高时延、高多普勒频移。空一地链路在几十至上千千米量级,远超过地面蜂窝移动通信的站间距,带来了无法避免的高时延;接入节点的快速移动(包括低轨卫星和飞行器),导致多普勒频移会更加严重。因此需要攻克很多空口技术难题从而解决上述问题,如定时提前量调整、下行初始同步、参考信号设计、HARQ、MAC/RLC层流程、功率控制、循环前缀、双工问题、相位跟踪参考信号、峰值平均功率比问题等。

4 总结

业界对于未来6G定义的讨论才刚刚开始,但是6G网络将突破地面限制向空、天、地、海多维扩展已基本成为共识。非地面网络具有明显的覆盖优势和长距离通信的低时延网络服务优势,可以帮助运营商提供低成本的普遍服务及扩展现有的通信服务,实现收入增长;但另一方面空天地一体化通信网络尚有待攻克的关键技术和硬件通信设施部署等问题。

目前除软银已经正式投资OneWeb外,沃达丰、BT、乐天等公司也在考虑地面网络与低轨卫星的结合^[13-15];此外,软银也在积极开展HIBS项目的研发。可以看到在面向6G的研究中,传统地面运营商已经开始积极思考如何充分借助非地面网络的优势、规避其

时延高、容量成本高的缺点,结合自身强大的地面网络和计算能力,为用户提供真正无缝的高速率低时延通信服务。

参考文献:

- [1] 高艺宁. 我国正式启动6G技术研发工作[EB/OL]. [2019-12-02]. http://tech.cnr.cn/techgd/20191107/t20191107_524848397.shtm.
- [2] JUNTTI M, KANTOLA R, KYÖSTI P, et al. Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence[EB/OL]. [2019-12-02]. <https://www.researchgate.net/publication>.
- [3] 吴曼青,吴巍,周彬,等. 天地一体化信息网络总体架构设想[J]. 卫星与网络,2016(3):30-36.
- [4] 乐思. 三年累计投入超400亿元:三大运营商电信普遍服务成效显著[EB/OL]. [2019-12-02]. <http://www.c114.com>.
- [5] 宋新刚,王伟,宋雷. 打造空天地一体化综合指挥系统通用平台[J]. 卫星与网络,2014(5):32-37.
- [6] DeepTech. 被低估的Starlink:将可能改变金融交易游戏规则[EB/OL]. [2019-12-02]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/48845820>.
- [7] 韩慧鹏. 国外高通量卫星发展概述[J]. 卫星与网络,2018,185(8):36-40.
- [8] 林晓亦. 国外高通量卫星发展近况[EB/OL]. [2019-12-02]. <http://www.spaceflightfans.cn/35182.html>.
- [9] 中国联通. B5G通信关键技术与发展愿景[EB/OL]. [2019-12-02]. <http://www.doc88.com/p-9019970387228.html>.
- [10] 廖祥. 低轨卫星通信系统发展综述[EB/OL]. [2019-12-02]. <https://spacefan.github.io/2019/02/12/LEOComm/>.
- [11] Mark. 谷歌获准在波多黎各实施Project Loon计划[EB/OL]. [2019-12-02]. <http://www.cbfau.com/cbf-201556907.html>.
- [12] 田伟,王健,韩朝晖. 我国卫星移动通信系统用频形势分析[J]. 卫星与网络,2014(11):62-66.
- [13] REALWIRE. Newtec Equipment Enables World's First 5G Backhaul LEO Satellite Demonstration[EB/OL]. [2019-12-02]. <http://reprototype.com/newtec-equipment-enables-worlds-first-5g-backhaul-leo-satellite-demonstration/>.
- [14] Sat5g. Partners list[EB/OL]. [2019-12-02]. <https://www.sat5g-project.eu/partners/>.
- [15] Hispasat highlights the role of the satellite in mobile communications and the 5G environment at MWC19 Barcelon[EB/OL]. [2019-12-02]. <https://www.hispasat.com/en/press-room/press-releases/archivo-2019/357/hispasat-highlights-the-role-of-the-satellite-in-mobile-communications-and-the-5g-environment-at-mwc19-barcelona>.

作者简介:

裴郁杉,毕业于北京邮电大学,高级工程师,博士,主要研究方向为空天地一体化通信网络与关键技术、频率与干扰共存;张忠皓,北京邮电大学兼职教授,教授级高级工程师,博士,主要从事无线新技术相关课题研究、标准制定、设备验证和新业务研究工作;王婷婷,毕业于北京邮电大学,助理工程师,硕士,主要从事频率与天地一体化研究工作。