

全球低轨卫星星座发展研究

方芳 吴明阁

摘要 低轨卫星星座具有低时延、强信号、全球覆盖、成本优势等特点。介绍了下一代铱星、全球星等在轨运行的几种典型低轨卫星星座,并对一网、星链、以太等新一代低轨卫星互联网星座计划的最新发展情况进行了梳理。在此基础上,针对低轨卫星星座的发展提出了建议,包括天地融合发展、运用多样融资模式、批量制造降低成本、采用星间组网技术、积极储备频谱资源等。

关键词 低轨卫星星座 下一代铱星 一网星链 互联网星座

引言

截至2019年6月,全球在轨卫星数量约为2 123颗,其中约1 398颗运行在低地球轨道(LEO,距离地球表面120~2 000 km)上,占比超过60%^[1]。典型代表包括下一代铱星、全球星、轨道通信、鸽群等,这些星座的功能覆盖通信、导航、遥感、气象,为国防、军事以及商业领域提供服务。近年来,国际上还提出了众多低轨卫星互联网星座部署计划,如OneWeb(一网)公司的一网卫星(882颗)、SpaceX公司的星链(4 425颗+7 518颗)以及Telesat公司的低轨星座(117颗)等,其中很多都已经发射试验星,即将启动实际部署。全球范围内低轨卫星星座的蓬勃发展正将卫星产业推向新高潮。

当前,低轨卫星星座是争取空间战略资源的重要举措。目前,可用于全球卫星移动通信的黄金频段L/S频段被瓜分殆尽;低轨Ku、Ka频段资源也几乎被新兴互联网星座的申报资料填满。卫星通信产业生态处于相对独立状态,面向开放市场推广方式和运营模式尚不成熟,需积极发展低轨星座,从而带动相关产业加速发展。

1 低轨卫星星座的优势

1.1 低时延

一般低轨卫星轨道高度大致在1 000 km,是地球同步轨道卫星(36 000 km)的三十六分之一,是中地球轨道卫星(8 000 km)的八分之一,因此可将时延从大于200 ms降低至几十乃至十几毫秒,能够与地面网络相提并论^[2]。低时延意味着可以有更多类型的应用,特别是物联网等时敏业务,可产生更大的价值空间。

1.2 信号强

地面接收到的卫星信号强度与卫星距地面的距离成反比。低轨卫星的信号强度相对更强,对应的接收终端可以做到更加小型化、轻量化。以低轨导航卫星系统为例,相比中高轨的全球导航卫星系统(GNSS)星座,近距离的低轨卫星有潜力提供更强大的信号,在传统导航卫星系统不可用时作为增强服务的解决方案。美国卫星时间与位置(STL)是世界首个利用低轨卫星星座提供导航服务的系统,可利用已有的66颗铱星低轨通信卫星星座及地面设施实现定位导航授时。2017年3月,该系统成功完成室内星地精确授时测试,授时精度优于100 ns,与GPS系统相当^[3]。

1.3 卫星组网实现全球覆盖

地球同步轨道卫星由于其轨道特性,无法实现全球覆盖,超过南北纬70°无法保证可靠的信号覆盖。低轨卫星的使用就如同将地面基站架设在了1 000 km左右的高空,覆盖范围大大增加,数千颗卫星组成的星座覆盖全球各个角落,使全球无覆盖盲区的运营成为可能。这对于广阔的海洋、偏远地

本文2019-08-08收到,方芳、吴明阁分别系中国电子科技集团公司电子科学研究院高级工程师、工程师

区来说非常有吸引力。

1.4 批量生产降低成本

传统的卫星产业很难像电脑、手机、汽车或者民航客机、坦克、导弹那样,通过大量生产来平摊研发成本;资金规模与客户数量也相对较小,无法产生足够的规模效应。例如,一颗锁眼卫星比一艘尼米兹级核动力航母还要贵,而商业卫星的报价也动辄上亿美元。而低轨卫星由于需求量大,批量生产使得成本大大降低。如一网星座的卫星从空客公司卫星工厂的流水线上生产出来,单颗卫星的成本仅约60万美元左右^[4]。

2 已部署的典型低轨卫星星座

2.1 下一代铱星(Iridium NEXT)通信星座

下一代铱星(图1)是第二代铱星系统,由星间链路连接的低地球轨道卫星形成一个全球天基网络,提供高质量语音、数据通信,覆盖包括大洋、极地区域在内的整个地表范围。卫星提供L频段1.5 Mbps和Ka频段8 Mbps的高速服务。卫星搭载的载荷除通信载荷外,还有广播式自动相关监视技术(ADS-B)载荷,主要用于飞机飞行监视和追踪飞机位置报告,以及导航增强载荷。2019年1月11日,第8批下一代铱星卫星搭载SpaceX公司火箭成功进入低地球轨道,标志着由75颗卫星构成的新一代星座完成部署^[5]。



图1 下一代铱星卫星

2.2 全球星(Globalstar)通信星座

全球星卫星系统是由美国Globalstar公司运营
飞航导弹 2020年第5期

的低轨道卫星移动通信系统,为全球企业、政府和个人用户提供卫星语音、数据移动服务。空间段48颗卫星分布在8个轨道平面上,可实现全球南北纬70°之间的全覆盖。地面段主要由关口站、卫星运行控制中心(SOCC)、地面运行控制中心(GOCC)和全球星数据网(GDN)组成。每一个关口站同时与3颗卫星通信,并将来自不同卫星数据流的信号进行合成。

2.3 轨道通信(Orbcomm)物联网星座

轨道通信是美国Orbcomm公司开发的全球非实时、低速率数据传输系统,是全球第一个提供M2M物联网服务的商业卫星网络(图2)。目前在轨卫星共40颗,其中第一代轨道通信卫星(OG1)24颗、第二代卫星(OG2)16颗。Orbcomm公司未来还会继续发射卫星,以进一步降低网络时延并增强服务水平。地面段主要由地面网关、控制中心和遍布全球的移动及固定卫星通信单元(SCU)用户终端组成,目前包括16个网关地面站、3个AIS数据接收地面站和3个区域网关控制中心。



图2 轨道通信卫星

2.4 鸽群(Dove)对地观测星座

鸽群是美国Planet公司建造的世界最大的商业对地成像卫星星座,目前已部署195颗3U立方体卫星,卫星图像精度为3 m,可分辨大树、汽车、轮船等,但还不足以识别行人。每天下行传输的图像数据大约为550 GB,最大为777 GB,这些数据都会上传到亚马逊网络服务(AWS)云计算平台上。Planet公司已收购了谷歌的Terra Bella卫星图像公

司,将进一步提高图像分辨率,预计精度可达到 1 m。地面站网络包括 11 个全球地面站,具有故障率低、可为多轨道平面服务、上下行传输时间短等优点。

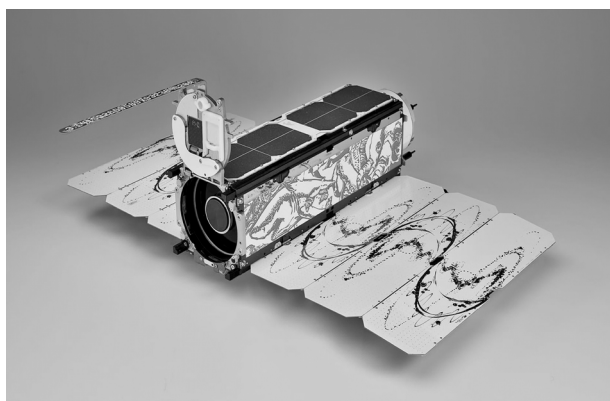


图 3 鸽群卫星

2.5 天基广域监视系统(SB-WASS)对地观测星座

天基广域监视系统是美军为替代第三代低轨电子侦察卫星白云和雪貂而研制的第四代低轨电子侦察卫星系统,是美国现役最先进的海洋监视卫星系统。SB-WASS 分为海军天基广域监视系统(SB-WASS-NAVY)和空军天基广域监视系统(SB-WASS-AF)两个亚型号,都是由 3 颗卫星组成的星座,兼顾了被动电子侦察和主动扫描两种探测模式。1994 年,美军启动了新型 SB-WASS 卫星系统研制,于 2001—2011 年间共发射了 5 组 10 颗卫星,采用双星组网方式工作,集成了海军海洋监视和空军战略防空的侦察需求,具有全天候的全球监视能力。

2.6 哨兵(Sentinel)对地观测星座

哨兵对地观测卫星(图 4)是欧洲哥白尼(Co-pernicus)计划空间部分的专用卫星系列,由欧洲委员会(EC)投资,欧洲航天局(ESA)研制。目前在轨卫星包括哨兵-1A/B、哨兵-2A/B、哨兵-3A/B、5P 等。哨兵-1 是高分辨率 C 波段合成孔径雷达卫星;哨兵-2 是高分辨率多光谱成像卫星,主要用于陆地植被、土壤以及水资源、内河水道和沿海区在内的全球陆地观测;哨兵-3 卫星主要用于全球陆地、海洋和大气环境监测。

• 90 •



图 4 哨兵对地观测卫星

2.7 信使(Gonets)通信星座

俄罗斯从 1991 年起在俄罗斯航天局(RAKA)的领导下开始建设信使低轨卫星通信系统(图 5),主要为政府和商业领域提供服务。信使系统组成部分包括空间段、系统控制中心、地面站和各种用户终端。空间部分由 12 颗卫星组成,已在 2015 年完成组网,可覆盖俄罗斯全境。在用户终端方面,主要有无线电解调器、非定向天线、个人计算机或带显示器的内置式键盘和电源。信使系统传输数据的速率为 1.2~9.6 kbit/s,可传输传真信息,提供电子邮件服务,并可借助 GPS/GLONASS 接收机来传输位置信息。俄罗斯当前正在推进新型信使-M 卫星系统部署,计划于 2019 年秋季发射 3 颗卫星。



图 5 信使通信卫星

2.8 情报收集卫星(IGS)对地观测星座

情报收集卫星(图 6)是日本自主发展的成像侦察卫星系统,由日本内阁卫星情报中心负责运行,

飞航导弹 2020 年第 5 期

采取光学成像和雷达成像协同工作的方式。该系统采用“4+4+2”的10机体制，即光学卫星和雷达卫星各4颗以及2颗数据中继卫星。目前在轨共7颗卫星，包括3颗光学卫星和4颗雷达卫星，光学卫星搭载高性能摄像机适用于日间拍摄，雷达卫星可在夜间和恶劣天气下拍摄，能对地面上所有地点每天都拍摄一次以上^[6]。其中，最新发射的雷达5号和光学6号分辨率更高，进一步提升了IGS的侦察能力。

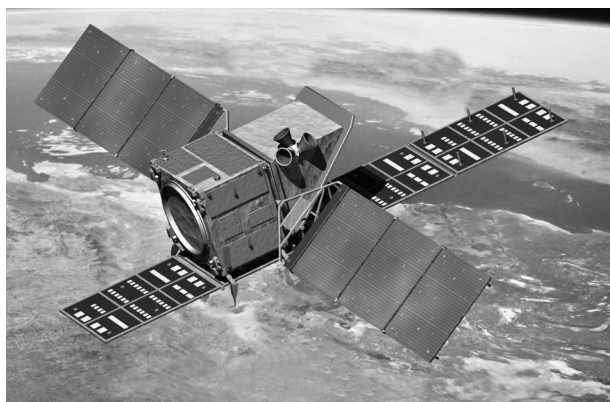


图6 情报收集卫星

3 新一代低轨卫星互联网星座

3.1 一网

一网星座由882颗(648颗在轨,234颗备份)卫星组成,为全球个人消费者提供全球覆盖互联网宽带服务的低轨卫星星座(图7)。2017年6月22

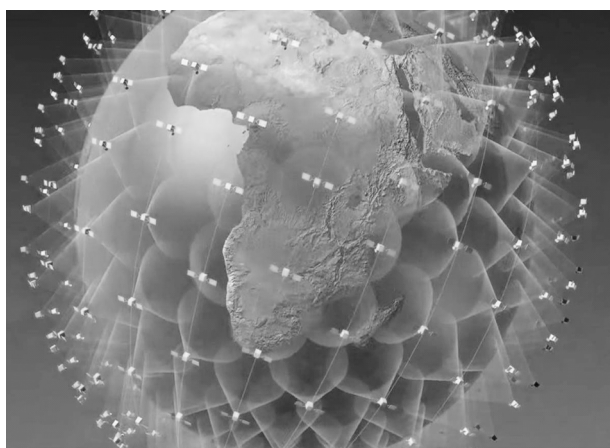


图7 一网星座概念图

日,美国联邦通信委员会(FCC)批准一网星座进入美国市场服务,是美国首个获批的新一代非地球同步轨道(NGSO)星座计划。2019年2月,首批6颗卫星成功升空,并计划在2019年下半年发射更多卫星。

一网卫星工作在Ku波段,每个卫星将能够产生6 Gbps的吞吐量;使用“渐进俯仰”(progressive pitch)技术,以避免干扰地球静止轨道上的Ku波段卫星。地面上的用户终端天线采用36 cm × 16 cm的相控阵天线,并将提供50 Mbps的互联网接入速度^[7]。为尽快完成组网,一网将卫星各系统模块化,在生产线上大量使用自动化设备,进行批量化生产。在此模式下,一网计划每周生产16颗卫星,年产量达到648颗卫星,也可降低卫星的生产成本。

3.2 星链(Starlink)

SpaceX公司的卫星互联网项目星链于2018年3月得到美国联邦通信委员会批准进入美国市场运营。该星座计划总计部署约12 000颗卫星,其中包括4 425颗轨道高度1 100~1 300 km的中轨道卫星,7 518颗不超过346 km高度的近地轨道卫星,2018年3月初发射的测试卫星(Tintin A和B)就属于后者。SpaceX预计2025年最终完成12 000颗卫星部署时,可为地球用户提供至少1 Gbps/s的宽带服务,最高可达23 Gbps/s的超高速宽带网络。

2019年5月24日,60颗星链星座试验卫星成功发射,将与2018年2月发射的2颗试验卫星配合,进一步测试星载天线和电推进系统。SpaceX公司计划在2019年安排2~6次卫星的发射,正式开启星座部署工作^[8]。

3.3 电信卫星(Telesat)公司星座

2017年11月3日,美国联邦通讯委员会批准加拿大Telesat公司的117颗低轨卫星星座计划进入美国市场运营,这是继一网星座之后第二个获批的该类方案。2018年1月12日,Telesat的低轨高通量试验卫星LEO Vantage 1搭载印度极地卫星运载火箭(PSLV)发射入轨,预计大规模发射将在2020年开始,整个星座2021年开始运营,将拥有太字节的通信容量。

3.4 以太(Ether)

2018年5月,俄罗斯航天国家集团公司推出以太全球多功能通信卫星系统计划,该系统由288颗轨道高度为870 km的卫星组成,为俄罗斯全境以及全球用户提供移动通信和互联网接入服务,这是俄罗斯提出的首个低轨卫星互联网星座项目。根据规划,该系统将与俄罗斯新一代信使通信卫星系统、射线数据中继卫星系统等连接,计划2025年前完成部署。该计划由于资金和技术问题,进展较慢。

4 低轨卫星星座发展趋势

4.1 天基网络应与地面通信网络合作发展

以早期铱星系统为代表的卫星星座力图替代地面网络重建一个天基网络,由于其系统前期投资过大,错误地定位了市场用户,无法与地面网络相竞争,最终导致破产。近几年发展的全新卫星互联网星座采取了与地面网络合作发展的理念,将电信运营商作为客户,主要着眼于光纤无法覆盖地区,成为地面通信手段的扩展。

4.2 逐渐采用资本合作方式来完成运营和服务

一网公司采用全新的融资模式,首轮融资5亿美元,投资公司包括软银集团、空客、巴帝企业、高通、可口可乐、维京集团等非卫星制造公司;第二轮融资12亿美元,由日本软银集团领投。SpaceX公司的星链卫星互联网星座得到来自谷歌和富达投资公司10亿美元的投资。同时,也将个人消费者作为目标用户,不出售专用卫星终端设备,而继续采用现有智能手机访问网络。

4.3 通过批量制造降低成本

从铱星等系统的失败教训看,星座投入成本越高、研制周期越长,用户负担越大,越有可能错过发展时机。为此,通过采用新技术,增加商用工业级器件比例以降低卫星成本、将卫星系统模块化以缩短卫星制造周期是现代星座批量生产卫星的新趋势。洛马公司在美国科罗拉多州建设3.5亿美元的卫星制造工厂 Gateway Center,采用3D打印、VR设计、智能负载技术,提高制造速度;一网公司2019年7月正式启用全球首个卫星批量制造工厂(图8),开创了利用自动生产、组装流水线进行大



图8 一网公司首个卫星批量制造工厂

规模、低成本卫星生产的全球先例。

4.4 优先选择基于星间链的空间组网,突破全球地面布站限制,实现全球无缝服务

铱星是唯一真正实现全球无缝服务的低轨通信星座。全球星、一网均采用星上透明转发,需要依托关口站实现服务,而且服务区域受限于关口站部署。2019年8月,俄罗斯就表示拒绝一网公司的无线电频率使用申请,认为其对本国互联网活动构成安全威胁,这可能对一网星座的全球组网造成重大阻碍。要发展全球无缝覆盖的低轨卫星星座,可优先考虑基于星间链路和星间组网的方案,以弥补难以在全球部署关口站的不足。

4.5 积极储备频率资源

铱星、轨道通信、全球星等星座自20世纪80年代开始发展,占领全球低频段资源先机。近两年,一网、SpaceX、Telesat等公司提出新的低轨卫星星座计划,相继通过美国联邦通信委员会的服务审核,频率轨位资源的争夺愈发激烈。根据国际电信联盟(ITU)先登先占的原则,其它同类星座频率申报将越来越困难。对于新的低轨卫星网络频率,基本需要提前5~10年储备或者通过合作获得^[9]。

5 结束语

低轨卫星星座因其具有的优势而受到世界各国高度关注,近年来在小卫星制造、低成本快速发射等技术发展的推动下,更是异常火热,传统大型卫星运营商及初创企业都纷纷加入该行业,相关资源的争夺十分激烈。然而, (下转第95页)

实威胁以及未来战争需要,升级改造现役导弹,采用新技术、高科技、大智能等方法对老旧导弹进行升级换代,如升级推进系统、回收再入体,提高导弹武器装备的科技化水平。此外,还可以翻新更换导弹主要部件以达到延寿目的,保持导弹武器装备的整体战斗力。

4.2 加强通用化、系列化研究

俄军导弹武器系统注重发射平台的兼容性,可以从多种发射平台发射,并且具有亚声速、超声速、高精度、远程、高隐身和核常兼备等作战能力。未来建议开展导弹武器系统多用途发展研究,加强导弹武器系统的通用化、系列化研究,一种导弹型号可以换装多种类型的作战载荷,

提高导弹武器系统的兼容性。

4.3 着力提高导弹突防和战场防抗能力

随着各国导弹武器技术水平的提高和反导体系的建立,信息化条件下,导弹攻防更加激烈,针对导弹突防应充分结合弹头隐身、诱饵欺骗、机动规避等先进技术,提高导弹武器系统的整体突防概率。依托机动指挥系统完善“信息综合-指挥控制-实施发射”信息闭环,提升导弹武器系统的战场防抗能力。

5 结束语

弹道导弹是世界各国实施战略威慑的核心力量,是维护国家安全的重要支撑。弹道导弹的发展应紧贴未来体系作战特点,综

合利用先进的科学技术,增强弹道导弹机动性、可靠性、突防能力和战场防抗能力,努力提升弹道导弹的战斗力和形成有力的战略威慑、有效应对未来体系作战提供坚强的支撑。

参考文献

- [1] 王涛. 外军战略导弹装备发展及启示. 飞航导弹, 2017(11)
- [2] 吕琳琳. 2030年前外军弹道导弹动力技术展望. 科技研究, 2015(9)
- [3] 罗超. 外军常规导弹作战运用特点及启示. 长缨, 2017(4)
- [4] 周伟. 2030年前外军导弹武器发展特点分析. 外军导弹装备发展动态, 2014(4)

(上接第92页)

从商业运营的角度来看,目前还没有看到特别明朗的运营模式和盈利机制,从技术角度来看也还存在一些不确定性^[10]。目前国内也在积极开展低轨卫星星座相关研究和部署,应充分吸收国外相关领域的经验教训,避免盲目跟随,同时根据国情总体谋划,为赢得未来发展优势奠定基础。

参考文献

- [1] Union of concerned scientists satellite database. <https://www.uc-susa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database>, 2019-07-10
- [2] 张明. 低轨道卫星系统的发展及面临的挑战. 中国无线电, 2019(3)
- [3] 魏艳艳. 世界军事电子年度发展报告(2017)——定位导航授时领域. 北京: 电子工业出版社, 2017
- [4] 李博, 刘忠义. “一网”系统发展情况分析与启示. 国际太空, 2018(4)
- [5] “猎鹰”9 一箭十星升空 结束下一代铱星组网发射工作. 卫星与网络, 2019(7)
- [6] 胡磊, 孙迪, 李嘉玮, 等. 日本情报搜集卫星发展情况与特点分析. 飞航导弹, 2019(7)
- [7] 李倬, 周一鸣. 美国 OneWeb 空间互联网星座的发展分析. 卫星应用, 2018(10)
- [8] 美国 SpaceX 公司开始星链卫星互联网星座部署. 航天器工程, 2019(3)
- [9] 李辉. 宽带通信卫星频率资源的新战场. 卫星应用, 2016(9)
- [10] 周兵, 刘红军. 国外新兴商业低轨卫星通信星座发展述评. 电讯技术, 2018(9)