



中国通信学会

CHINA INSTITUTE
OF COMMUNICATIONS

全球卫星通信产业发展 前沿报告

(2019年)

中国通信学会

2019年12月

版权声明

本前沿报告版权属于中国通信学会，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国通信学会”。违反上述声明者，本学会将追究其相关法律责任。

专家组和撰写组名单

顾问(以姓氏笔划为序)：

姚发海 中国卫通集团股份有限公司科技委主任 研究员

陆建华 清华大学信息科学技术学院院长 教授 中国科学院院士

汪春霆 中国电子科学研究院首席科学家 研究员

李广侠 解放军陆军工程大学教授

专家组：

沈永言 中国卫通集团股份有限公司科技委副主任

撰写组(按单位排名)

单位	姓名
中国卫通集团股份有限公司科技委	沈永言
中国卫通集团股份有限公司创新中心	马芳

前 言

卫星通信是以太空中围绕地球运转的人造卫星作为中继节点的无线通信方式，具有覆盖地域广、业务种类多、建设速度快、抗毁能力强等优势。

在信息基础设施三大传输方式中，光纤主要用于骨干传输和固定接入，地面无线通信主要用于移动接入，而卫星通信可以用于骨干传输、远程接入、移动通信、固定通信、电视广播，适用于空天地海等各种环境，在广播和电信公网以及政府、交通、能源、军事、应急等专网中一直在发挥不可或缺的支撑作用。

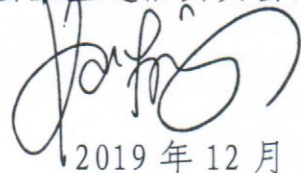
截止 2018 年底，全球在轨通信卫星接近 800 颗，其中将七成以上为商用通信卫星；卫星行业总产值为 2774 亿美元，其中，卫星制造业 195 亿美元，卫星发射服务业 62 亿美元，以视频通信为主的卫星服务业为 1265 亿美元。

近年来，随着互联网、物联网的普及发展，以及机载、船载、空间中继等通信需求的日益增加，卫星通信进入以 HTS（高通量卫星）、NGSO（中低轨）星座等技术系统为平台，以互联网应用为服务对象的卫星互联网发展阶段。卫星互联网与 5G 的融合发展、卫星互联网在 6G 中的作用已经成为通信网络界的关注对象。

卫星通信系统是信息基础设施的重要组成部分，也是航天产业的主体。卫星互联网的产业化发展直接关系到我国“网络强国”、“航天强国”战略的实现。当前，全球卫星通信行业又进入了一个快速发展和变革时期，新技术、新应用、新模式、新企业等不断涌现。在这样一个关键时期，跟踪研究国内外卫星通信产业的发展态势具有重要的现实意义。

中国通信学会卫星通信委员会

主任委员：



2019 年 12 月

目 录

一、研究概述	1
二、全球发展态势	3
2.1 GEO HTS 向大容量、小型化、星座化方向发展	3
2.2 NGSO HTS 开始大规模部署	5
2.3 软件定义技术赋予通信卫星灵活性	6
2.4 EHF、太赫兹、激光带来更大带宽容量	7
2.5 小卫星驱动卫星制造和发射业升级	8
2.6 卫星互联网与 5G 融合取得实质进展	10
2.7 电调控平板天线助推移动应用	11
2.8 通导结合提供卫星综合信息服务	11
2.9 中继通信成为新的卫星通信业务类型	12
2.10 在轨服务延长通信卫星寿命	13
三、我国发展现状	14
3.1 卫星通信综合实力进入国际前列	14
3.2 低轨星座建设得到多方的积极参与	15
3.3 有效载荷技术取得实质性突破	15
3.4 卫星终端天线制造最具市场活力	16
四、技术预见	16
4.1 卫星通信轨道方面	16
4.2 卫星通信业务方面	17
4.3 数字载荷方面	17
4.4 星地融合方面	17
4.5 太赫兹应用方面	17
4.6 频率干扰和空间环境方面	18
4.7 平板天线方面	18
五、工程难题	18
5.1 频率资源获取方面	18
5.2 LEO 星座运行方面	18
5.3 LEO 星座结构方面	18
5.4 LEO 卫星制造方面	19
六、政策建议	19

一、研究概述

近年来，在互联网和航天技术的推动下，全球卫星通信产业出现了 HTS、NGSO 星座、灵活性载荷、EHF 和激光通信、电调平板天线、中继通信、在轨服务、量子保密通信等新的技术热点，整个行业进入卫星互联网的新阶段。GEO HTS 向大容量和小型化两个方向演进，少数运营商开始布局全球星座，以提高宽带卫星通信的全球服务能力。OneWeb、SpaceX 两家公司在 LEO 星座领域同时启动全球部署，不断扩充卫星容量。O3b 公司进一步扩大 MEO 星座规模和服务能力。ViaSat 公司开始探索 MEO 和 GEO 之间的中继通信和协同发展。基于数字载荷和软件定义技术的灵活性卫星正在成为各大卫星运营商的标配。卫星通信 Q/V 和激光传输已经进入实用阶段，太赫兹在卫星通信和天地一体化信息网络中展现巨大的发展潜力。LEO 星座小卫星的蓬勃发展引发了卫星制造和发射业的行业变革和产业升级。卫星互联网和 5G 融合取得实质性新进展，应用主要集中在内容投递、宽带接入、基站中继、移动平台通信等方面。跨平台、跨网络的电调控平板天线进入快速发展阶段，但其成本还有待进一步突破。卫星通信、卫星导航以及 ADS-B 和 AIS 的综合应用越来越普遍。卫星中继通信成为继固定通信、移动通信和广播之后新的业务类型。卫星通信在轨服务在救援、维修、碎片处理等方面展现出良好的商业前景。

我国卫星通信事业在 HTS、移动通信、直播电视等方面取得了长足进步，建立了相对完整的产业体系，但在制造和服务方面仍有很多提升空间。低轨星座建设得到多方的积极参与，成为我国商业航天领

域的重要推动力量。有效载荷技术取得实质性突破，卫星激光通信和量子保密通信在全球处于领先地位。卫星终端天线制造产业最具市场活力，很多产品成功进入国际市场。

未来，高中低轨卫星都将在天地一体信息网络中发挥各自作用，NGSO 星座的大规模部署将促进卫星制造和发射服务业的升级。卫星互联网业务的开展需要得到 MEC（移动边缘计算）、卫星组播和内容缓存等技术的支持。发展数字载荷和软件定义技术是提高通信卫星效率比，适应市场需求变化的必要条件。软件定义有效载荷的普遍应用也将对卫星互联网的网络安全提出新的挑战。5G 通信中的大规模多输入多输出（MIMO）、非正交多址（NOMA）、新型多载波传输等新空口技术、网络功能虚拟化（NFV）和软件定义网络（SDN）将成为 LEO 星座与 5G 融合、卫星互联网标准化工作的重要内容。卫星通信带宽需求的持续增长必然要求开发 EHF、太赫兹、激光等频率资源。随着 NGSO 星座的大规模部署，频率冲突和干扰等矛盾将日益突显，碰撞风险随之加大，这要求统筹规划星地频率资源、研究高效的频率复用技术，加强人工智能在频率干扰检测、轨道预测、碰撞避免中的应用领域。

在全球大规模发展卫星互联网的大背景下，频率轨道将是我国 NGSO 发展面临的**最大瓶颈**。LEO 卫星时刻处于高速运动状态，其内生的频率干扰、多普勒频移等问题不可避免。LEO 星座建设要面临大规模关口站建设和星座系统复杂度之间的两难选择。LEO 星座的部署和运营需要先进的卫星和地面终端成本控制和全球运营能力来支持。我国卫星通信尚需加强技术、体制和机制创新。

二、全球发展态势

2.1 GEO HTS 向大容量、小型化、星座化方向发展

为满足宽带接入、基站中继、高清/超高清视频等应用带来的带宽增长需求，基于多点波束和频分复用的 HTS（高通量卫星）应运而生。自 2004 年以来，全球超过半数的卫星通信运营商合计部署了 150 多颗 HTS。HTS 包括 GEO（高轨）专用或搭载、MEO（中轨）、LEO（低轨）等形式。目前应用较多的是 GEO HTS，比较代表性的系统如表 1 所示。

表 1 全球代表性的 GEO HTS

	KaSat-1	Viasat-1	Inmarsat-5	Echostar-19	Viasat-2	SES-17	Echostar-24	Viasat-3
运营商	Eutelsat	Viasat	Inmarsat	EchoStar	Viasat	SES	EchoStar	Viasat
发射时间	2010.12	2011.10	2013.12	2016.12	2017.6	~2020	~2021	~2019
制造商	ADS	SS/L	Boeing	SS/L	Boeing	TAS	SS/L	Boeing
容量	70G	140G	30G	220G	300G	80G	500G	1T

数据来源：中国空间技术研究员通信卫星事业部

在这些 GEO HTS 当中，北美 Viasat 公司 Viasat-2 和 Hughes 公司 Jupiter-2 两颗在轨 HTS 的容量分别达到 300Gbps 和 220Gbps，在建的 Viasat-3 和 Jupiter-3 容量将分别达到 1Tbps 和 500Gbps，而传统通信卫星容量只有 1Gbps 左右。Viasat 公司打算 2021 年初发射面向美洲的首颗 Viasat-3，约 6 个月后发射用于覆盖欧洲、中东和非洲的第二颗，面向亚太的第三颗应会在 2022 年底前发射。此外，Eutelsat 的“KONNECT VHTS”的容量也达 500Gbps，它与和 Hughes 公司的 Jupiter-3 都将在 2021 年发射。2019 年 8 月 8 日，Viasat 公司宣布其 Viasat-4 系列已处于初期研制阶段，它广泛利用 Viasat-3 卫星的研发

成果。容量的迅速增长使得大型 GEO HTS 单位 Gbps 制造成本降至到百万美元以下，从而接近地面宽带网络的服务能力。

在一些 GEO HTS 努力向更大容量迈进的同时，一些卫星运营商将目光瞄向针对小国家的、容量在 100Gbps 以下、重量在几百公斤到 2000 公斤之间的小型 GEO HTS，其重量的减少源于可再编程软件定义有效载荷和电推进等技术的应用。

2019 年 6 月 17 日，曾在 SES 供职的 Tom Choi 等几位官员组建了土星（Saturn）卫星公司，专门从事小型 GEO 卫星的建造业务。其客户是那些既想拥有自己的卫星又嫌传统卫星太大的国家，这样的卫星号称“国家星（Nationsat）”。

“国家星”实际包括两类小型 GEO 卫星，即宽波束的 C/Ku 频段卫星和 85Gbps 的 HTS。拥有 48 个 36MHz 转发器的 C/Ku 频段卫星的价格约为 6500 万美元，85Gbps 的 HTS Ka 频段卫星约为 8500 万美元，它们的成本相比较于传统 GEO 卫星降低了 70-80%。在小容量情况下，“国家星”成本同样能够达到每 Gbps 百万美元的水平。

目前，土星卫星公司打算每年建造大概两颗“国家星”，并具备把产能提高到年产 6 颗的能力。除了土星公司，波音、旧金山的阿斯特拉尼斯、香港填空星（GapSat）和瑞典离区（Ovzon）等公司都在建造各自的小型 GEO 卫星。

为了满足海事、航空等领域的全球宽带通信需要，ViaSat、Inmarsat 等卫星运营商都开始建设各自的 GEO HTS 星座系统。Viasat-3 实际是包含三颗卫星的星座系统，其目标市场主要是全球航空机载通信。Inmarsat 的 GX 星座目前由四颗卫星 GX1-4 组成，到 2021 年将发射 GX5、GX6A 和 GX6B，含有动态波束的 GX7、GX8、GX9 将在 2023

年底发射，覆盖北极地区的 GX10A 和 GX10B 将在 2022 年发射。

2.2 NGSO HTS 开始大规模部署

GEO HTS 虽然容量大、结构简单，但是传输延时长、覆盖面有限，无法满足 5G 时代低延时、广覆盖等应用的需要，而 NGSO HTS 星座恰好具有这样的优势。目前，全球新推出的 MEO 和 LEO 星座计划有 20 个左右，其中代表性的有 O3b、OneWeb、SpaceX 的 Starlink、LeoSat、Telesat 等星座系统。

OneWeb LEO 星座初期有 720 颗卫星，总容量达 10Tbps，已获得美国 FCC 运营许可。2018 年，OneWeb 向 FCC 提出增加 1280 颗 MEO 卫星，并在后续修正案中进一步将 MEO 卫星的规模扩展到 2560 颗。2019 年 2 月 28 号，OneWeb 成功发射首批 6 颗卫星，计划 2020 年开始商用。OneWeb LEO 星座采用“天星地网”架构，将卫星作为连通用户终端和关口站的通道，通过全球分布的关口站提供互联网接入服务。

2018 年 3 月，FCC 批准了 SpaceX (Starlink) LEO 星座，该系统有 4425 颗卫星。2019 年 5 月 23 日，SpaceX 发射了首批 60 颗小卫星，计划 2020 年开始服务。2018 年 11 月，FCC 批准了 SpaceX 另外一个有 7518 颗卫星的 LEO 星座计划，两项总共近 1.2 万颗卫星。这些卫星分别位于三个轨道：340 公里上 7500 颗；550 公里上 1600 颗；1150 公里上 2800 颗。2019 年 10 月，SpaceX 向 FCC 申请，要求在 1.2 万颗卫星基础上，再部署 3 万颗卫星。这些卫星将工作于 328—580 公里不等的轨道上。SpaceX LEO 星座采用“天星天网”架构，将卫星作为网络传输节点，通过星间链路建立高速宽带通信网络，只需要有

限的关口站，就可以提供全球性互联网接入服务。

目前，唯一在轨商用的 MEO HTS 是 O3b 系统。该系统初期规模是 20 颗卫星，工作于赤道轨道，目的为南北纬 40 度之间的 30 亿人口提供互联网服务。该系统于 2013 年开始建设，目前在轨 16 颗。2017 年 11 月，O3b 计划新增 30 颗 MEO 卫星，其中，20 颗运行于赤道轨道（O3bN），另外 10 颗运行于倾斜轨道（O3bI），且 30 颗卫星中的 12 颗采用先进的全电进和波束形成技术，以进一步提高服务能力。

为了弥补 GEO HTS 服务能力的不足，ViaSat 公司于 2016 年提出了一个由 24 颗卫星组成的 MEO HTS 星座计划。该 MEO 星座采用 Ka 和 V 频段，卫星分布于 3 个轨道面，每轨道面 8 颗（再加 1 颗备份星），轨道高度 8200km，轨道面与赤道倾角为 87 度，可为美国本土、夏威夷、阿拉斯加、波多黎各和美国维尔京群岛的用户提供宽带通信服务。

ViaSat 公司 MEO HTS 不仅带有载荷遥感，还可以对 GEO HTS 进行跟踪和通信，以提供额外和备用的传输通道，从而实现两者之间的协同工作。

2018 年 11 月，ViaSat 将从之前的 24 颗 MEO 卫星减少到 20 颗。目前，美国 FCC 尚未批准 ViaSat 公司的申请。此外，Viasat 正在评估“在可用的情况下把 GEO 卫星同低时延的地面基础设施乃至低时延的 LEO 卫星结合起来，以带来一种高低轨(GEO-LEO)混合体验”。

2.3 软件定义技术赋予通信卫星灵活性

传统通信卫星技术状态在发射前两三年就要冻结，在入轨后的十五年服役时间内无法更改，这一固定模式无法适应今天动态变化的信

息网络服务市场环境。而软件定义技术具有可重构的显著优势，基于软件定义技术的灵活性载荷可根据应用需求的变化，对卫星的覆盖、连接、带宽、频率、功率、路由等性能进行动态调整和功能重构，从而降低通信卫星的建设和运营成本，延长在轨卫星的使用寿命。

目前，全球三家固定通信卫星运营商均已向灵活有效载荷做出布局。根据 Euroconsult 公司的统计，全球一半左右的 HTS 带有灵活性载荷，其中覆盖灵活性占 35%，连接、带宽和频率各占 15%，功率占 9%。Intelsat 公司的 EPIC（史诗）HTS 是载荷灵活性的典型案例，它基于数字信道化器，可在不同波束之间建立直接连接，克服了一般 HTS 网络星状结构的双跳缺陷。这一功能也可有效地实现业务后向兼容，确保原有用户不用更换终端设备就能使用新的 HTS 网络。

2019 年 5 月 10 日，号称全球首颗真正意义上的软件定义商用通信卫星——欧洲量子（Eutelsat Quantum）成功完成有效载荷舱与平台的对接。欧洲量子可根据应用需求调整卫星覆盖、频率和功率等载荷特性，这主要通过阵列天线与星载信号处理器实现。

2019 年，已有三个厂家推出了软件定义卫星，分别是空客的“一星”（OneSat）、波音的 702X 系列和泰雷兹的“灵感”（Inspire）。

2.4 EHF、太赫兹、激光带来更大带宽容量

频率是通信的基础和带宽的源头。频段越高，频率资源越丰富，能够提供的带宽越大。经过多年的发展，卫星通信中的 L、S、C、Ku 频段资源已几乎被使用殆尽，Ka 频段正在被广泛应用。与此同时，卫星通信的 C、Ka 频段也要面对 5G 网络的激烈争夺。2018 年底，由 Intelsat、SES、Eutelsat、Telesat 全球四大卫星通信运营商组成的 C

频段联盟同意让出 200MHz 供 5G 网络使用，这要求卫星通信行业必须大力开发 EHF (Q/V/W)、太赫兹、激光等更高频段的频率资源。

近年来，Eutelsat、ViaSat、Inmarsat、OneWeb、O3b、Iridium 等卫星运营商都在进行 EHF 频段的研发。目前，Q、V 频段已经开始进入商用阶段。2016 年 3 月，Eutelsat 率先在 Eutelsat 65 West A 卫星上使用 Q 频段。OneWeb、波音、三星等公司的星座系统都有 V 频段的使用计划。2018 年 6 月 20 日，由芬兰研制的纳卫星首次从太空向地球发送 W 频段信号。EHF 频段主要用于关口站与卫星之间的馈电链路以及星际链路。

太赫兹频率在 0.1-10THz 之间，兼有微波和光波的特性，具有频谱资源丰富、抗干扰能力强等技术优势，其理论传输速度可达 1Tbps，是 5G 的 50 倍，4G 的 1000 倍。2018 年 5 月，Tektronix/IEMN（一个法国研究试验室）在 252-325GHz 频段实现了 100Gbps 无线传输（最近 IEEE 802.15.3d 标准）。日本总务省规划将在 2020 年东京奥运会上采用太赫兹通信系统实现 100Gbit/s 高速无线局域网服务。由于太空中没有水分吸收问题，太赫兹特别适合用于卫星通信。

多年来，美国、欧洲、日本开展了一系列卫星激光通信研究计划，目前开始进入实用阶段。2019 年 2 月，欧洲空客公司与日本 SKY Perfect JSAT 公司签订了 EDRS-D 节点设计准备合作协议，旨在共同开展激光数据中继卫星业务。另外，一些 LEO 星座系统计划通过激光链路，向用户提供点到点的数据传输服务。

2.5 小卫星驱动卫星制造和发射业升级

卫星制造和发射是卫星通信产业的上游，它直接决定着卫星通信

运营服务的成本。LEO 星座小卫星的蓬勃发展引发了卫星制造和发射业的变革。以 SpaceX 为例，从 2019 年 5 月开始，平均每月要部署近 120 颗卫星，才能按照 FCC 的要求在 2027 年底之前完成发射任务。这必然要求对传统的卫星制造和发射进行升级换代，缩短卫星研制和发射周期，以降低研制和发射成本。

在小卫星制造方面，OneWeb 等公司开始使用非航天级别的 COTS（商业现货）组件，利用 3D 打印、模块化设计、即插即用、智能装配、大数据、机器人、增强现实等现有成熟技术，采用与飞机和汽车生产相似的流水线组装方式，来批量生产小卫星，实现每天生产 3-5 颗卫星的目标，并将单颗小卫星的研制成本降到百万美元以下。最新发射的 SpaceX 小卫星采用扁平化设计，以易于量产、装载、发射；采用先进可靠的离子推进器，以进一步降低成本；配备光学追踪器，以主动探测、自动避开太空垃圾；使用到期时，可自行拆解，以实现 100% 环保。

多星发射和一级火箭回收利用可以大幅降低卫星的发射成本，对于需要大规模、多频次发射小卫星的 LEO 星座运营意义更大。2019 年 5 月 24 日，SpaceX 用此前飞过两次的“猎鹰 9 号”5 型旧第一级火箭，成功将 60 颗每个重 227 公斤的小卫星送入轨道。SpaceX 公司表示，5 型火箭被设计成“在无需例行整修的情况下”能反复使用 10 次，若“做适当的例行维护”可用 100 次。除了现役“猎鹰 9 号”超重鹰火箭，SpaceX 已开始研制星舰飞船+超重鹰火箭的下一代卫星发射系统，它能一次性部署数百颗小卫星。

2.6 卫星互联网与 5G 融合取得实质进展

5G 应用的全球化和机载通信等应用的商用化促使 ITU、3GPP、SaT5G 和 CBA（C 波段联盟）等国际标准化组织开始研究卫星互联网与 5G 的融合问题。

ITU 提出了中继到站、小区回传、动中通及混合多播场景的 4 种星地融合应用场景，以及支持这些场景的关键因素，包括多播、智能路由、动态缓存管理及自适应流、延时、一致的服务质量、NFV（网络功能虚拟化）/SDN（软件定义网络）兼容、商业模式灵活性等。

3GPP 定义了卫星互联网与 5G 融合中的连续服务、泛在服务和扩展服务三大类用例，提出了内容投递、基站中继、固定宽带接入、移动平台接入四种应用，研究了卫星网络与地面网络间的切换等问题。

2017 年 6 月，由卫星行业生产厂家、运营商、高校等 16 个单位联合成立了 SaT5G 联盟，该联盟旨在通过一系列的研究、开发和实验等工作，在 30 个月内解决延迟和多普勒频移等问题，为运营商创建一种性价比高、即插即用的卫星通信解决方案。2019 年 6 月 19 日，SaT5G 宣布近期成功进行了一系列卫星 5G 演示，包括：1) 基于卫星和地面网络以及 MEC（移动边缘计算）的分层视频传输；2) 基于卫星组播技术和 MEC 的视频缓存和实况内容分发；3) 基于 MEO 卫星和地面无线混合 5G 网络的下一代机载娱乐和连网方案；4) 基于卫星与地面混合回传网络和 MEC 的本地内容缓存和访问；5) 基于卫星网络的 5G NR（新无线通信）视频演示，其中的关键问题包括卫星链路延迟和多普勒频移；6) 面向农村市场和大型集会事件扩展服务的混合 5G 回传演示。在以上 6 项服务中，面向飞机和农村市场的

5G 服务最具吸引力。

2019 年 5 月，Telesat、英国萨里大学与比利时 Newtec 公司合作进行了 8K 流媒体传输、互联网浏览和视频聊天会话等应用测试，证实了 LEO 卫星可为 5G 回传提供有效的解决方案。此次测试表明，LEO 卫星可以成为扩展 5G 网络覆盖范围的一个重要方式。

2.7 电调控平板天线助推移动应用

机载、船载、车载等平台的卫星移动通信对终端尺寸和功耗、波束切换等要求的不断提高，以及中低轨卫星相对地面的高速运动，决定了以小尺寸、低功耗为特点，能够同时跟踪多颗卫星、波束可以快速指向的电调控平板天线(ESA)成为卫星互联网中的一项关键技术。

目前，Kymeta、hiSky、SatCube 和 SatPro 等制造商已拥有可用于宽带卫星通信的 ESA。2019 年 1 月 25 日，OneWeb 公司宣称，其自筹资金项目开发了一种厚度不到八分之一英寸、成本仅 15 美元的 ESA 模块，为卫星互联网终端未来 200 到 300 美元的定价打下了基础。该天线可实现 50Mbps 的下行速率，并有望在 2020 年初实现商业化。该产品初期工作于 Ku 频段，可在成本几乎不变的条件下调整到 Ka、V 等频段。

由于 ESA 零件数目很多，降低成本较为困难，OneWeb 目前开发的 ESA 并不适合航空类特殊市场。尽管如此，NSR 公司预测，卫星天线市场 2020 年后开始从 MSA（机械调控天线）向 ESA 转型。到 2026 年，平板天线的年销售量将超过 210 万块。

2.8 通导结合提供卫星综合信息服务

通信与导航具有相同的物理基础和相似的应用场景，很多情况需

要两者结合应用。在通信卫星上搭载卫星导航增强载荷，通过向用户播发星历误差、卫星钟差、电离层延迟等多种修正信息，可以实现导航定位精度和服务能力的有效提高。在 SBAS（星基增强系统）中，基于 LEO 的 SBAS 具有覆盖面广、信号衰耗小、计算收敛速度快、通信与导航信号可以融合设计等优点。Iridium 二代星搭载了美军 iGPS（集成全球定位系统）有效载荷，可将 GPS 定位精度由原来的米级提高到厘米级。

除了一般性的导航定位之外，面向全球空中和海上交通监视和跟踪服务的 ADS-B（广播式自动相关监视）和 AIS（自动识别系统）也是卫星通信与导航结合的重要应用领域。Iridium 和 Globalstar 二代星上都带有 ADS-B、AIS 等载荷。Iridium 二代星携带的 Harris 公司 ADS-B 载荷可单星监视 3000 个目标，处理 1000 个以上目标，目标用户包括空管、搜救和军方等。2019 年 6 月，基于 Iridium 二代星提供 ADS-B 监视服务的 Aireon 成为 EASA（欧洲航空安全局）首次认证的航空导航服务商。从此，Aireon 可以在丹麦、爱尔兰、意大利和英国等区域提供该服务。Orbcomm 二代星中也增加了 AIS 载荷，用于海上资产的跟踪与管理。有了星载 ADS-B 这样的系统，类似马航 MH370、法航 AF447 航班失踪等事故发生的概率就会大大降低。

2.9 中继通信成为新的卫星通信业务类型

卫星数据中继最初主要为遥感卫星、飞船等飞行器提供全天候的数据中继和测控服务。代表性的卫星中继系统有美国的 TDRSS、LCRD 和欧洲的 ARTEMIS、EDRS 等，它们基本上属于专用系统。

2018 年是全球卫星中继通信商业化服务的元年。7 月，Inmarsat

和飞行硬件制造商 Addvalue 与一家 LEO 星座运营商签署了一份合作协议，利用 Inmarsat 的 GEO 卫星和全球网络，对装有 Addvalue 开发的 IDRS（卫星间数据中继系统）的 LEO 星座进行全球天候的卫星测控、任务控制和故障查找等资产运行和管理。10 月，Audacy 公司宣布与用户签署了价值 1 亿美元的商业服务协议，服务范围为地球观测、物联网、宽带星座、运载火箭和深空任务。Audacy 目前拥有三颗 MEO 数据中继卫星。未来，卫星中继通信服务将会从一般性的数据传输扩展到空间资产管理和不同轨道卫星间的路由迂回。

2.10 在轨服务延长通信卫星寿命

卫星通信行业是个重资产、高风险的行业。燃料耗尽、故障和碎片碰撞等因素都可能影响卫星的寿命，直接影响卫星通信运营商的收入。以 GEO 卫星为例，其寿命通常为 15 年，当燃料耗尽时，即便卫星功能完好，也要做离轨操作，如果发生故障或遭遇碎片碰撞，则不得不提前终止服务。2019 年 4 月，服役仅 3 年的造价 4 亿美元的 Intelsat 29e 发生故障并最终解体，直接影响 Intelsat 全年收入近 5000 万美元。值得庆幸的是，经过数十年尝试的基于空间机器人或无人飞船的在轨服务有望改变这个局面。

劳拉公司的在轨服务项目——RSGS 能够在静止轨道上为 20 到 30 颗卫星提供在轨维修服务。劳拉公司的无人飞船与需要维修的卫星对接，为其补充燃料，同时修复或更换必要的组件。空客公司的“太空拖船”可以将报废卫星推到距地面 200 公里左右的轨道，随后卫星会逐渐下降，进入地球大气中燃烧成灰烬。Northrop Grumman 公司旗下的 Space Logistics 将在 2019 年发射一个飞船，对接到 Intelsat 一

枚寿命已经到期的卫星上，为其提供动力。日本 AstroScale 公司正在开发一种交会并捕捉太空碎片与报废卫星的系统，英国萨里航天中心等也在致力于碎片减缓和清除应用。此外，近年来，也出现了很多在轨服务初创公司。

在轨服务已经进行了数十年的尝试。NSR 预测，该市场的长期商业机会将不断增加。到 2028 年，在轨服务整体服务的累计收入将达到 45 亿美元，其中延长服务占 59%，抢救占 11%，离轨占 8%。未来的在轨服务还包括从所有退役卫星等航天器上回收可用部件。

三、我国发展现状

3.1 卫星通信综合实力进入国际前列

从 1968 年至今，经过 50 年的艰苦奋斗，我国已经建立了比较完整的卫星通信技术和应用体系。近五年多来，航天五院完成了 17 颗军民商通信卫星的研制，国内军民卫星保持 100% 自主研制。商业通信卫星整星出口已达 10 颗，并带动国产 VSAT 设备走向国际市场。东五平台的开发使我国具备了研制 100—1000Gbps 超大容量 HTS 的能力。2015 年 9 月 20 日，我国新型运载火箭长征六号成功将 20 颗微小卫星送入太空，展示了“一箭多星”发射通信卫星的潜力。目前，我国由中星、亚太、亚洲、天通系列构成在轨商用通信卫星已达 20 多颗，信号覆盖了全球 75% 以上的国家和地区。2008 年发射的中星 9 号直播电视用户数已达 1.4 亿户。2016 年，“天通一号”卫星的发射拉开我国卫星移动通信的序幕，面向全球覆盖的天通 2、3 号已在建设之中。2017 年，容量为 20Gbps 的中星 16 号 HTS 的发射标志着我国进入宽带卫星通信时代，后续的中星 19、26 和 27 号和亚太 6D HTS

的总容量超过 400Gbps。这些卫星将实现对中国全境和“一带一路”等区域的覆盖。

3.2 低轨星座建设得到多方的积极参与

在军民融合政策和商业航天、天地一体网络大潮的推动下，我国航天、电子、中科院、高校等众多单位都在积极参与低轨星座系统的建设。2014 年，北京信威公司和清华大学在联合研制和发射的灵巧卫星上进行了智能天线、处理与交换、天地组网等技术试验。2018 年，航天科技和航天科工集团分别发射了一颗低轨高通量实验星——鸿雁 1 号和虹云 1 号。鸿雁星座系统属于窄宽带融合系统，具有移动通信、导航增强、ADS-B、AIS 等综合功能。虹云星座是宽带系统，具备通信、导航和遥感一体化服务功能。2018 年 4 月 23 日，电科集团发布了天地一体化信息网络重大专项中的首个成果——“地面信息港”，其中融合了网络、遥感、地理信息、导航定位等功能。除了以上央企，一些民营企业也纷纷提出各自的卫星互联网和物联网星座计划，有的已经开始提供商业服务。

3.3 有效载荷技术取得实质性突破

经过多年的技术攻关和试验验证，我国在灵活载荷、Q/V 频段载荷、激光通信载荷产品功能等方面获得实质性突破，完成了单机研制和整星系统集成验证。有效载荷技术的先进水平集中体现于亚太 6C 卫星，它是我国目前研制的民商用通信卫星中转发器路数最多、切换程度最灵活、有效载荷功率最高、重量最大的通信卫星，有效载荷的单机数量达到 700 余台。Q/V 频段载荷将应用于亚太 6D HTS 和印尼 PSN 项目。2017 年 1 月 23 日，借助中星 16 上搭载的激光通信终端，

哈工大空间光通信中心成功进行了国际首次高轨卫星与地面间双向 5Gbps 高速激光通信试验，标志着我国在空间激光通信领域走在了世界前列。

3.4 卫星终端天线制造最具市场活力

卫星通信终端天线对于整个系统的可用性和业务的竞争力具有决定性的影响。随着天线制造技术的进步、星上发射功率的提升、卫星通信频率的升高，以及车载、机载、船载等移动平台应用需求的增多，卫星通信终端天线也逐步从大型固定抛物面天线向动中通、便携式、平板式等形态发展，总的趋势是低轮廓、低成本、低功耗、小尺寸。由于政策和资金壁垒相对较低，我国卫星通信终端天线制造领域表现出较高的市场活力，在西安、成都、北京等地出现一批有创新能力的从事动中通、静中通、平板、相控阵天线研发和制造的民营企业，有的成功打入国际市场，并具有一定的行业竞争力。

四、技术预见

4.1 卫星通信轨道方面

目前地面网络只覆盖陆地面积的 20%、地球表面的 5%，因此只有发展卫星互联网、建设天地一体化信息网络，才能实现全球无缝覆盖。未来高中低轨卫星都将在天地一体信息网络中发挥各自作用。GEO 卫星系统结构简单、覆盖有效性好，但传输时延长；相反，LEO 星座系统相对复杂，传输时延短，能实现全球覆盖，但是有效性好；MEO 星座特性居于两者之间。卫星互联网，特别是大规模 NGSO 星座的发展将促进卫星制造和发射服务业的升级。

4.2 卫星通信业务方面

在未来天地一体化信息网络中，卫星互联网将主要在视频广播、内容投递、基站中继、宽带接入、移动平台接入等领域发挥独特作用，其背后的支撑技术有 MEC（移动边缘计算）、卫星组播和内容缓存等技术。为了满足航空、海事等领域综合信息服务的需要，卫星通信将与卫星导航增强、卫星遥感、AIS、ADS-B 等技术高度融合。

4.3 数字载荷方面

发展基于数字载荷的软件定义技术不仅能够提高通信卫星效费比、适应市场需求变化，更是实现卫星通信运营持续发展、打通大波束和多点波束卫星网络边界的必然要求。灵活波束覆盖等功能正在成为 HTS 的标配。同时，软件定义有效载荷的普遍应用也将对卫星互联网的网络安全提出新的挑战。

4.4 星地融合方面

为实现卫星互联网用户终端的一体化、小型化，5G 通信中的大规模多输入多输出（MIMO）、非正交多址（NOMA）、新型多载波传输等新空口技术、网络功能虚拟化（NFV）和软件定义网络（SDN）将成为 LEO 星座与 5G 融合、卫星互联网标准化工作的重要内容。

4.5 太赫兹应用方面

卫星通信带宽需求的持续增长将需要开发 EHF、太赫兹、激光等频率资源。太赫兹不仅可以用于高速传输，还可以用于检测、成像，将在未来 6G 通信和天地一体化信息网络中发挥关键作用。

4.6 频率干扰和空间环境方面

随着 NGSO 星座的大规模部署，频率冲突和干扰等矛盾日益突显，这要求统筹规划星地频率资源，研究更为高效的频率复用技术。不仅如此，NGSO 星座的大规模部署还会增大碰撞风险、增加太空垃圾，这需要加强人工智能在频率干扰检测、轨道预测、碰撞避免等领域中的应用，提高卫星通信行业的管理和服务能力。

4.7 平板天线方面

为降低卫星互联网用户的应用门槛，跨频段、跨网络、低成本、低功耗、小尺寸的电调控平板天线将是大势所趋，而且这一技术也将广泛应用于未来的 6G 通信网络之中。

五、工程难题

5.1 频率资源获取方面

频率轨道是卫星通信发展不可或缺、不可再生的战略资源，在全球大规模发展卫星互联网的大背景下，频率轨道将成为我国 NGSO 发展面临的**最大瓶颈**。这要求我国相关部门加强 ITU 规则研究、频率协调和双边合作，积极应用频谱感知等先进技术。

5.2 LEO 星座运行方面

LEO 卫星时刻处于高速运动状态，其内生的频率干扰、多普勒频移等问题不可避免，在 LEO 星座建设过程中，用户接入与资源管理、传输体制设计、移动性管理方面的挑战不容忽视。

5.3 LEO 星座结构方面

LEO 星座分无星际链路的“天星地网”和有星际链路的“天星

天网”两大类型。“天星地网”系统相对简单，但需要面临在全球各地部署大量关口站的地缘挑战。“天星天网”则只需要建设有限的关口站，但要面临星际链路、路由算法等技术挑战。

5.4 LEO 卫星制造方面

LEO 星座卫星的频繁发射将要求卫星制造业采用与飞机和汽车生产类似的流水线组装方式来批量生产卫星。面向全球开展商业服务将要求我国卫星通信行业具有先进的卫星和地面终端成本控制和全球运营能力。

六、 政策建议

六十年来，尤其是近年来，我国卫星通信事业在 HTS、移动通信、直播电视等方面取得了长足进步，建立了相对完整的产业体系，但是与美国等发达国家相比，我国卫星通信技术和服务方面仍有很多提升空间。卫星移动和宽带通信的产业化刚刚开始，卫星直播电视的巨大商业价值尚未释放出来，LEO 星座建设还处于规划论证阶段，在功率、射频、基带等技术以及产业化方面仍有很大提升空间，尚需加强体制和机制创新。

为加快卫星通信技术进步和产业化进程，我国需要加强天地一体化信息网络的整体规划、高中低卫星融合发展和频轨资源的综合利用，提高卫星载荷灵活性和卫星互联网的智能化水平，加大相控阵、超材料等平板天线的技术研究和应用力度，重视大规模 NGSO 星座运营服务时代的空间碎片处理和软件定义技术时代的卫星通信网络安全研究，推广卫星通信在“宽带中国”计划、普遍服务和机载通信中的应用，开展商业化的高清、超高清和区域卫星直播电视服务，深化卫

星通信行业的军民融合和体制机制改革。

中国通信学会

地址：北京市海淀区万寿路 27 号院 8 号楼

邮政编码：100840

联系电话：010-68209072、68209071

传真：010-68209074

网址：<https://www.china-cic.cn/>

