

# 低轨互联卫星发展历程及气象领域合作模式展望

王柏林 李佳

(中国华云气象科技集团公司, 北京 100081)

**摘要:** 低轨互联卫星系统被认为是当今最新、最有前途的卫星移动通信系统, 能在一定程度上满足全球范围内气象数据和产品传输、气象移动通信和天基气象载荷探测的业务需求, 有效支撑全球气象监测、全球预报和全球服务的实施, 有广阔的应用前景。通过研究国内外低轨互联卫星星座发展历程, 对低轨互联星座产业链、存在风险、气象应用需求进行了分析, 提出了通过商业合作方式在气象领域加快应用推广的建议。

**关键词:** 低轨互联卫星, 气象, 合作模式, 展望

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.004

## The Development of Low-Orbit Connected Satellites and the Prospect of Meteorological Cooperation Model

Wang Bailin, Li Jia

(China Huayun Meteorological Technology Group Corporation, Beijing 100081)

**Abstract:** LEO interconnected satellite system is considered to be the latest and most promising satellite communication system, which can meet practical needs of global meteorological data and product transmission, meteorological mobile communication and space-based meteorological load detection to some extent. And with broad application prospects, it supports the implementation of the global monitor, forecast and service. Through the study of the development history of domestic and foreign low orbit interconnected satellite system, we first analyzed the industrial chain, risks and the demands in meteorological application of LEO, and then put forward some suggestions to speed up the application and popularization in the field of meteorology through commercial cooperation.

**Keywords:** LEO, meteorology, cooperation model, prospect

### 0 引言

据国际电信联盟 (ITU) 估计, 至2019年12月, 全球互联网普及率约为58.7%, 世界上仍有超过40%的人口 (约32.2亿人) 未实现互联网连接, 这部分人口主要分布在地广人稀的地区和亚非拉区域大多数第三世界国家。卫星通信凭借着覆盖范围广、灾难容忍性强、灵活度高等独特的优势, 在偏远地区网络覆盖、航海、应急、军用通信、科考勘探等应用领域中具有不可替代的作用<sup>[1-3]</sup>。

相较于传统中高轨通信卫星的高技术、高投入、高风险和较长研发周期等特性, 运行轨道高度为200~2000 km的低轨小卫星系统被认为是目前最新最有前途的卫星移动通信系统。低轨互联卫星系统是指基于卫星通信、通过一定数量的低轨小卫星形成规模组网, 从而辐射全球, 构建能够处理实时信息、向地面和空中终端提供互联网接入等通信服务的新型网络

系统, 主要有以下特点: 一是质量轻、成本低、研制周期短, 低轨互联卫星一般采用部件小型化和轻型化的技术, 研制一般为2年, 可以在短时间形成组网探测能力; 二是覆盖广、时延短、可靠性高, 卫星之间互为备份, 系统健壮可靠, 运行轨道高度较低, 卫星间通过星际链路互通, 传输延时短, 路经损耗小。建设以低轨互联卫星为主要依托的天基宽带互联网, 与地面宽带网络等互联融合, 可进一步满足人们对全球无缝覆盖的宽带网络需求, 是互联网技术未来发展的一个重要设想。

低轨小卫星星座发展由20世纪90年代末起步, 美国提出了天基综合信息网的基本概念, 欧洲也提出了构建“面向全球通信的综合空间基础设施 (ISICOM)”的设想<sup>[4]</sup>, 建立了“铱星”和“全球星”, 主要用于卫星电话中继, 但受限于技术和成本, 商业化运营范围很小。随着卫星制造技术、火箭发射、卫星通信、卫星终端制造等技术的快速进步, 高带宽、低延时的基于低轨道的卫星通信已经成为可能。2015年, 美国Space X公司提出了“星链 (Star

收稿日期: 2019年10月8日; 修回日期: 2020年7月14日  
第一作者: 王柏林 (1979—), Email: wbl3309@126.com

Link) ”计划，第二次开启了世界范围内的低轨通信卫星网络建设浪潮。

自1960年美国发射第一颗气象卫星“泰罗斯”1号，气象卫星遥感技术成为近半个世纪以来全球对地观测发展速度最快、也是最为成熟的技术<sup>[5]</sup>。随着小卫星技术的快速发展，为气象卫星技术体制带来了新的转型发展机遇。美国作为全球商业卫星气象服务市场的领军者，NOAA于2016年出台了《商业航天政策》，允许NOAA 采购商业数据，或在商业卫星上搭载政府气象有效载荷，或在政府卫星上搭载商业气象有效载荷，来弥补政府机构现有能力的不足，从而确保国家天气预测和预警服务能力不断提升<sup>[6]</sup>。中国气象局于2020年也提出了在低轨互联卫星上搭载中小型气象载荷开展气象探测的思路，组网构建研制周期短、响应应用需求快、覆盖全球的“通信+气象探测”一体化天基气象观测网络，对风云系列、高分系列等遥感卫星的能力形成纵向补充，通过高密度组网的星座能够一定程度上满足在全球范围内气象探测数据传输与分发、气象移动通信和天基气象载荷探测的业务需求，对提升我国全球气象观测、全球气象预

报、全球气象服务能力具有重要意义，在气象行业有着广阔的应用前景。

鉴于低轨互联卫星系统在移动通讯的巨大优势以及良好的可拓展性，同时因为卫星星座建设两大核心资源要素：频率和轨道的唯一性，两者的国际分配规则均为“先占先得”的抢占方式，日益增长的需求使得卫星频率、轨道资源争夺白热化，国内外掀起了一股群雄逐鹿的低轨互联卫星发展热潮。

## 1 国内外低轨通信卫星系统建设进展

低轨通信星座（图1）在物联网、移动互联网的发展带动下，走出了20世纪末、21世纪初的发展低谷，迎来一个崭新的发展高潮。以L、S、VHF等低频段为主的铱星（Iridium）、全球星（Globalstar）、轨道通信（Orbcomm）等传统低轨通信星座已完成升级换代，以中低速业务为主，支持面向手持移动通信和低功耗小型化物联网服务；以Ku、Ka频段甚至更高频段为主的一网公司（OneWeb）、美国太空探索技术公司（SpaceX）等新兴互联网星座计划呈现爆发式增长，卫星数量多，以中高速业务为主，支持互联网接入、网络节点互联以及基站回程等服务<sup>[7-8]</sup>。

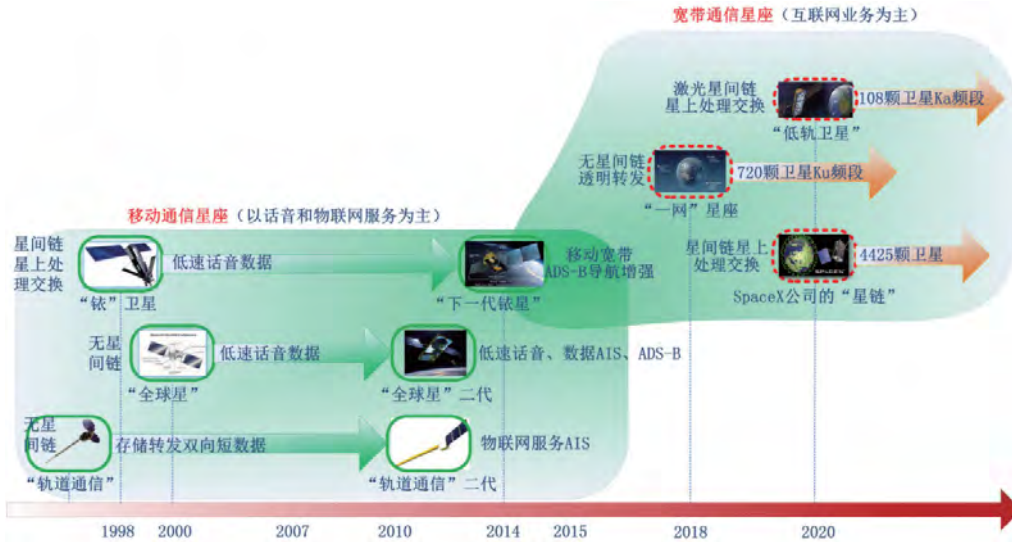


图1 国外低轨通信星座发展过程<sup>[7]</sup>

Fig. 1 International low-orbit communication constellation development<sup>[7]</sup>

### 1.1 全球第一次低轨通信卫星建设热潮

20世纪80年代开始掀起的小卫星技术热潮对星座的发展起了巨大的推动作用，90年代初期，低轨通信星座开始盛行，最多时有十几个卫星通信星座计划。在20世纪末，伴随铱星、全球星等低轨语音通信星座的兴起，业界相继提出了多个中低轨道互联网星座的概念，其中包括微软公司的Teledesic星座、法国阿尔卡特公司的Skybridge星座（表1）。早期的中低轨卫

星通信星座以电话和物联网服务为主。

铱星系统早期运营失败，核心问题是铱星的高成本导致了高价格，使其竞争力较弱。据铱星公司最初估算，需要大约65万个用户能够实现盈亏平衡，但铱星系统运行期间只有2万左右的用户，市场需求的下降以及初期市场估算时过于乐观，导致铱星公司经营难以为继。尽管后期为了挽救市场，铱星电话大幅降价，但为时已晚。到公司破产时，铱星的全球用户只

表1 20世纪末的低轨星座计划  
Table 1 Low-orbit constellation program in the 1990s

星座计划	所属公司	发展历程与现状
低轨窄带 (含语音)星座	铱星通讯 (IRDM.O)	1997—1998年, 美国铱星公司发射了66颗用于手机全球通讯的人造卫星, 2000年3月铱星公司宣布破产。2001年3月新的铱星公司重新开始服务。2010年6月宣布了下一代卫星星座Iridium NEXT的筹措资金、建设和部署计划。2018年营收5.23亿美元, 净利润-0.13亿美元, 市值41亿美元。
	全球星 (GSAT.O)	1991年, 美国Loral和高通公司联合提出的全球数字卫星移动通信系统, 1998年首次发星, 2000年正式使用。2018年营收1.3亿美元, 净利润-0.07亿美元, 市值6.4亿美元。
	ORBCOMM (ORBC.O)	全球第一个双向短数据低轨小卫星通信系统, 在工业物联网领域成果显著, 目前大约60颗低轨卫星在轨运行。2018年营收2.76亿美元, 净利润-0.26亿美元, 市值3.1亿美元。
低轨互联网星座	Teledesic星座	美国微软公司和麦考公司提出的耗资90亿美元、924颗卫星, 瞄准宽带业务。2003年微软和Teledesic终止卫星合同。
	Skybridge星座	法国阿尔卡特公司、美国劳拉公司和日本东芝公司发起的预计总投资35亿美元、80颗卫星, 支持因特网接入及宽带多媒体技术。2014年, OneWeb公司收购了Skybridge旗下的卫星频谱。

有6万左右, 与预想的用户数量相差甚远。

同时, 2000年互联网产业遭遇第一次低谷, 这些通信星座设想全都停留在纸面上, 而没有付诸实施。但在那一轮浪潮中, 业界已经对星座结构、频率分配、接入方式、干扰、信号衰减、资费等问题做了相当详细的研究。因此, 今天的低轨宽带互联网星座可以认为是在这些技术基础上的第二次产业浪潮。

## 1.2 国外低轨互联卫星星座建设进展

目前, 国外提出卫星互联网计划的既有波音、O3b、Telesat、ViaSat等老牌企业, 也有OneWeb、SpaceX、Theia等新兴科技公司, 主要以提供互联网服务为主 (表2)。O3b星座系统是目前全球唯一一个成功投入商业运营的中地球轨道 (MEO) 卫星通信系统。

表2 国外主要低轨通信卫星计划  
Table 2 Major international low-orbit communications satellite programs

计划名称	卫星数量	轨道情况	推出计划时间	工作频段	当前进展	卫星质量及造价
Space X	4425	LEO	2015	Ka/Ku	已经发射7次, 每次约60颗, 共约422颗在轨	单星质量约227 kg, 造价约100万美元
	7518	极低轨		V		
OneWeb	720	LEO	2015	Ka/Ku/V	已经发射3次, 依次为6颗、32颗、34颗; 2020年3月申请破产保护	单星质量约150 kg, 造价约100万美元
	1280	MEO				
Iridium NEXT	66+9	LEO	2007	Ka/V	75颗卫星在轨	单星质量约860 kg
Globalstar	48+8	LEO	1998	L/S	2002年申请破产保护, 重组后继续运营	单星质量约450 kg
Orbcomm	64	LEO	1991	VHF	35颗卫星在轨	单星质量约115 kg
O3b	60	MEO	2008	Ka	计划部署20颗卫星, 目前12颗星已投入运营	单星质量约700 kg
Boeing	2956	LEO	2016	Q/V	计划2022年发星	
LeoSat	108	LEO	2015	Ka	2019年11月因缺少投资而被迫停运, 尚未发过星	单星质量约1250 kg

### 1) Iridium NEXT重焕新生

2001年, 铱星公司破产重组后, 在2003年伊拉克战争中的战时通信方面发挥了重要作用, 美军由此成为铱星最重要客户, 并为其支付了3600万美元的包年费用。

2007年, 铱星公司发布了Iridium NEXT计划, Iridium NEXT的单星质量为860 kg, 设计在轨使用寿命为15年。2017—2019年, SpaceX公司将75颗卫星分8次完成部署。从商业逻辑来看, Iridium NEXT将聚焦窄带业务, 拓展宽带业务, 并逐步向宽带业务转变。在已经入轨运行的低轨星座当中, Iridium NEXT无论在规模、轨道高度还是服务模式上, 都最为接近国内企业畅想中的低轨宽带星座, 后续分析均以其为例。

### 2) O3b星座已在运营

O3b公司成立于2007年, 其创始人Greg Wyler也是OneWeb的创始人, 公司旨在为全球偏远地区 (主要是非洲、亚洲和南美等) 30 亿上网困难或上网昂贵的人口提供高带宽、低成本、低延迟的卫星互联网接入服务。O3b星座系统是目前全球唯一成功运营的中轨道宽带星座卫星通信系统。

O3b方案和概念提出后, 得到了SES、Google等大公司的支持, 并于2010年底得到了全额资助。O3b星座服务了50个国家的客户, 惠及了超过1500万最终用户, 为6家石油和天然气超级巨头中的4家提供服务, 为全球五大邮轮公司中的四家提供卓越的连接体验。

### 3) OneWeb星座破产重组

OneWeb公司成立于2012年，得到了谷歌的支持，2014年从破产的SkyBridge公司手中获得国际电信联盟（ITU）正式授权的部分Ku频段资源。OneWeb共获得五轮融资，融资总额超过34亿美元，仅2019年就获得单笔12.5亿美元的投资。OneWeb投资方包含软银、维珍集团、高通、国际通信卫星公司、可口可乐等巨头，至2020年3月已部署74颗卫星，目标用户是个人消费者和小型商业客户，为全球提供低成本高速度的网络覆盖。

受全球新冠疫情影响，市场动荡导致公司融资困难，OneWeb公司于今年3月在美国申请破产，包括亚马逊、Space X、卫星运营商Eutelsat、私募股权公司Cerberus，以及两家中国公司参与竞购，竞购重点关注的是估价10亿美元的无线频谱资源。

### 4) Starlink星座服务在即

2015年1月，Space X公司宣布了Starlink星座计划，Starlink将部署1.2万颗通信卫星，申请的轨道和频率获得了国际通讯联盟（ITU）批准，单星质量为227 kg，整个计划预计需要约100亿美元，2015—2019年已完成了5轮近30亿美元融资，Space X公司的火箭发射业务将提供30亿美元的峰值收入。

至2020年6月，Starlink星座已由猎鹰9号可回收火箭部署482颗，成为目前全球卫星在轨数量最多的商业卫星系统，预计美国部分地区用户最早可能在今年8月尝试到Starlink星座宽带服务。Starlink卫星互联网服务的延迟将为20 ms，目标价格约为每月80美元（约合人民币566元）。

低轨互联网星座需要较大的前期投入，创业公司需要拿到足够的融资以度过创业初期的“死亡谷”阶段，LeoSat计划尚未实施就已经宣告停止运作；OneWeb、Space X已拿到了较多融资，但预计仍然有资金缺口，OneWeb已于今年3月宣布破产重组、Space X于今年2月考虑将分拆Starlink单独IPO；政府和军方的支持也很重要，美军是铱星系统最重要的客户，加拿大Telesat公司已经提前获得了加拿大政府的订单。

## 1.3 国内低轨通信卫星星座建设进展

在全球低轨卫星及天基互联网的发展推动下，中国航天科技集团、中国航天科工集团等国有企业和银河航天、国电高科等民营企业也分别制定了低轨卫星计划，积极参与到该领域的竞争（表3）。同时，为了整合资源，国防科工局正在牵头对我国低轨互联网项目进行统筹协调，促进形成一体化的低轨互联网系统。

表3 国内主要低轨通信卫星计划  
Table 3 Major China low-orbit communications satellite programs

计划名称	卫星数量	轨道情况	工作频段	当前进展	发起企业
鸿雁星座	300	LEO	Ka/L	2018年12月发射首颗试验星	航天科技集团
虹云工程	156	LEO	Ka	2018年12月发射首颗试验星	航天科工集团
行云工程	80	LEO	L	2020年5月试验1星、2星入轨	航天科工集团
天象星座	60+60	LEO	Ka/L	2019年6月试验1星、2星入轨	中电科集团
银河Galaxy星座	650	LEO	Ka/Q/V	2020年1月首发星入轨	银河航天
天启物联网星座	38	LEO	VHF/UHF	2020年1月已实现6星组网	国电高科
天基物联网	72	LEO	L	2018年12月“瓢虫系列”7星试验入网	九天微星

### 1) 鸿雁星座（低轨窄带+宽带星座）

2016年，中国航天科技公司提出“鸿雁星座全球卫星通信系统”计划，包含一个移动通信星座和一个宽带通信星座，为导航、航空、航海等领域提供综合服务。

2018年11月，航天科技集团、中国电信、中国电子、国新国同4家央企及其相关企业共同发起成立东方红卫星移动通信有限公司，注册资本金20亿元人民币，负责建设与运营全球低轨卫星移动通信与空间互联网系统（前身为“鸿雁星座”），项目首期投资200亿元。

2018年底，鸿雁星座发射首颗试验星，配置L/Ka频段通信载荷、导航增强载荷、航空监视载荷，预计

2022年建成60颗核心骨干卫星组成的鸿雁星座一期并投入运营，主要实现全球移动通信、物联网、导航增强、航空监视等功能；预计2025年完成二期建设，系统由数百颗宽带通信卫星组成，可实现全球任意地点的互联网接入。

### 2) 虹云工程（低轨宽带通信星座）和行云工程（低轨窄带通信星座）

2016年，航天科工集团提出“虹云工程”和“行云工程”。虹云工程计划发射156颗卫星，构建全球覆盖的低轨Ka宽带通信星座系统，满足中国及国际互联网欠发达地区、规模化用户单元同时共享宽带接入互联网的需求。行云工程计划发射80颗星，建立面向物联网应用的低轨窄带卫星服务系统，为用户提供

128字节短报文数据双向传输。

虹云工程技术验证星2018年底发射入轨开始测试。计划2020年，发射4颗业务试验星组建小星座，2022年实现全部156颗卫星组网运行，完成业务星座构建。行云工程首颗技术验证星已于2017年发射，2020年5月发射了两颗试验卫星，2021年计划建成由12颗卫星组成的小规模星座，到2025年建成由80颗卫星组成的全星座系统。

2018年底，行云公司邀请包括气象、海洋、应急管理等行业150家单位成立了天基物联网产业联盟，涵盖商业卫星的科研、制造、运营、服务、应用和金融资本等多类型企业。

### 3) 银河Galaxy星座（低轨宽带通信星座）

银河航天公司成立于2018年，由猎豹移动联合创始人、前总裁徐鸣创立，获得了顺为资本、晨兴资本、IDG资本等投资机构融资支持，2019年企业估值50亿元，成为国内商业航天企业估值最高的创业公司之一。

银河航天提出采用5G标准的“银河Galaxy”低轨宽带卫星星座，卫星重约227 kg，单颗卫星的通信带宽高达10 GB，使用Ka/Q/V频段，该卫星不但能提供不间断的5G信号，还可以提供卫星互联网业务，可提供覆盖全球的天地融合5G通信网络服务。

2020年2月首发星成功，银河航天计划在3年内再发射144颗卫星，使星座带宽总量达到20 TB，打造中国版的“星链”系统。

### 4) 天启物联网星座（低轨窄带通信星座）

国电高科公司成立于2015年，是目前国内唯一取得VHF和UHF频段无线电通信频率使用许可证及相关电信增值业务经营许可的民营公司。天启物联网星座由国电高科部署和运营，2019年4月股权融资1亿元，计划到2021年前部署完成由38颗低轨卫星组成的覆盖全球的物联网数据通信星座，重点以智慧农业、渔业救援、电力、油气运输、海洋运输及生态环境保护等行业应用为切入点。

目前，“天启星座”已完成6星组网，成为国内首个实现数据应用的物联网星座，计划今年底，实现20颗卫星组网运行，对全球覆盖区域内任意地点的时间分辨率缩短到10 min内，地面通信终端功率稳定在0.1~0.5 W，满足80%以上卫星物联网星座用户任务场景应用需求。天启星座通信终端销售价格量产后可以控制在百元级别，资费标准与短信相当。

2019年，由国防科工局、工业和信息化部牵头整合航天科工、航天科技、中国电科等国企提出的低轨通信卫星星座计划，按功能和用途、不同计划分为多

期多批建设，运行轨道高度约为800~2000 km。以宽带互联网接入服务为主、以窄带数据传输为辅，采用天地融合组网的系统架构，为政府、军队、商业用户提供互联网接入、专网接入、导航增强、遥感及数据采集与实时传输服务。

## 2 低轨通信卫星系统建设潜在风险分析

一方面，低轨卫星系统较传统通信卫星具有诸多优势：覆盖范围广，可实现全球无缝通信；信号传输时延小，传输损耗小；卫星体积小、重量轻、制造成本低，可实现一箭多星；研制周期短、发射成本低，可灵活补充等。另一方面，低轨卫星系统的建设目前仍面临着发射能力不足，前期资本投入大，商业应用不明晰，轨道、频率冲突等风险。

### 2.1 巨额资本投入带来财务风险

1998年建成的第一代铱星系统共花费超过50亿美元（破产后以2500万美元出售），2013年建成的全球星系统共花费33亿美元，即使目前卫星建造成本和发射成本较当时有所下降，OneWeb星座融资34亿美元，仍然走向破产保护。

以国内目前的人力资源成本、卫星制造水平和火箭发射技术，研制并部署一个全球实时覆盖、包含60颗卫星的低轨通信卫星系统（宽窄带结合，并拥有舰艇自动识别（AIS）和民用航空自动识别功能（ADS-B）的星座），至少需要投资200亿元<sup>[9]</sup>。只有星座完全部署才能为用户提供最佳体验，对企业造成了较大的资金压力，特别是私有商业公司。同时，低轨道小卫星寿命约5年，卫星的替换给星座后续运营维护带来了更大的挑战。

铱星通讯公司于2000年底以低价获得了原铱星公司完整的低轨星座及地面设施、成熟的用户终端设计和有关专利等资产，目前尚处于负债经营之中。2014—2018年，由于第二代铱星系统部署工作逐步推进，铱星通讯公司总收入从4.09亿美元增长至5.23亿

表4 商业航天项目资金需求估算

Table 4 Estimation of funding requirements for commercial space projects

项目	数量/颗	资金需求/亿美元	提出方
Starlink低轨互联网星座	1.2万	大于100	美国Space X
OneWeb低轨互联网星座	74	70（已融资34亿）	美国一网公司
Iridium NEXT星座	75	50	美国铱星公司
Telesat低轨星座	292	30	加拿大电信卫星公司
O3b星座	42	42（已融资12亿）	O3b公司
Leosat	108	36亿（融资失败）	Leosat公司
鸿雁星座	300	首期200亿人民币	航天科技集团
虹云星座	156	预计100亿人民币	航天科工集团

美元，年均复合增速为 6.37%；净债务从7.33亿美元增长至15.8亿美元，年均复合增速为 21.17%，高于营收增速；公司近年来资本支出保持在4亿美元左右，资产负债率高，近5年在60%左右波动。公司不仅需要在漫长的前期建设阶段投入大量资金，还需要在后续较长时期内持续投入，以维持星座的运转。

根据航天十二院战略规划推进部发布的《2020年世界商业航天发展报告》分析，建成Starlink低轨互联网星座需要100亿美元，建成OneWeb低轨互联网星座资金需求在70亿美元，建成Iridium NEXT星座和Telesat低轨星座的资金需求均在30亿美元以上。

## 2.2 商业应用不明晰带来运营风险

建设初期，商业航天企业对外部融资依赖较大，一旦融资不畅，就将面临资金链断裂的危机。据美国卫星产业协会（SIA）数据显示，2018年，全球太空经济规模达到3600亿美元，卫星服务产业规模达1265亿美元，约占总规模的35%。商业航天公司需要具有自我造血的能力，挖掘科学实验、数据应用、广告营销等多方面用户需求订单，向卫星服务产业下游扩展。

根据铱星通讯2019财年报告，铱星二代星座的替换任务是导致净亏损增加的主要原因。铱星通讯2019年5.60亿美元收入包含了服务收入4.47亿美元、设备销售及工程支持项目收入1.13亿美元。其中，来自最大的单一客户美国政府的收入约1亿美元，占总收入不到20%。截至2019年底，铱星拥有了130万个可计费用户，去年同期为112.1万个，同比增长15.97%。具体来看，铱星的商业业务拥有116.5万个可计费用户，物联网数据用户为80.2万个，占比高达68.84%，未来物联网服务业务有望再进一步提升。

从铱星通讯2019财报可见两个重要趋势：首先，曾经挽救了铱星的政府用户如今在服务收入上只占不足20%的比例，商业用户已经成为铱星的主要收入来源。因此，政府虽然是商业星座的重要用户，但开发商业用户才是决定性的。其次，无论在商业用户还是政府用户中，物联网用户数量已经超过了传统的话音和数据用户，在营业收入中的占比越来越高。

## 2.3 轨道、频率冲突带来的政策风险

低轨通信卫星系统所需在轨卫星数量庞大，参与竞争企业众多，给捉襟见肘的轨道和频率资源分配提出了更大的挑战。世界各国和组织越来越重视卫星频率和卫星轨道的战略意义，基于静止卫星轨道资源“先占先得”的原则，纷纷自行或联合制造卫星，抢占轨道和频率资源。

就目前国际电信联盟（ITU）登记情况（表5）

看，地球同步静止轨道C频段通信卫星已接近饱和，Ku频段通信卫星也很拥挤（图2）。由此造成的卫星之间“撞车”的情况时有发生，全球卫星系统间的频率资源协调成为非常关键的问题。同时，由于低轨卫星星座自身庞大的卫星数量、全球性的覆盖范围，在干扰协调、设备能力上都会遇到与同步轨道卫星相异的挑战，其中最为关键的就是与同步轨道卫星的频率干扰问题。

表5 卫星通信用频带（摘自国际电联）  
Table 5 Common frequency bands for satellite communications (from ITU)

频段	范围	用途
L	1~2 GHz	主要用于卫星移动通信、卫星无线电测定、卫星测控链路等
S	2~4 GHz	主要用于卫星移动通信、卫星无线电测定、卫星测控链路等
C	4~7 GHz	主要用于卫星固定业务通信，已近饱和
X	7~12 GHz	主要用于卫星固定业务通信，通常被政府和军方占用
Ku	12~18 GHz	主要用于卫星固定业务通信，已近饱和
Ka	27~40 GHz	正在被大量投入使用
Q	30~50 GHz	为了满足日益增加的频率轨道资源需求，已经开始逐步进入商业卫星通信领域
V	50~75 GHz	为了满足日益增加的频率轨道资源需求，已经开始逐步进入商业卫星通信领域

## 3 低轨互联星座产业链分析

低轨互联星座产业链包括卫星及地面系统制造、运载火箭制造、用户站制造、卫星运营及电信运营等环节，其中上游为卫星及运载火箭制造、地面系统制造、用户站制造，卫星运营为中游，电信运营等卫星应用为下游。根据2019年美国卫星产业协会（SIA）发布的卫星产业年度报告，卫星制造和发射服务约占卫星产业收入的10%，卫星地面系统制造、用户站制造约占卫星产业收入的45%，卫星运营服务约占卫星产业收入的45%。

参照Space X或OneWeb建造时序，低轨互联星座首先研制和部署卫星，因此卫星制造产业链和运载火箭产业链将率先受益；地面系统与卫星同步建设紧随其后，包括信关站、测控站等。卫星星座和地面站建设完成系统可以提供服务后，用户站制造将开始放量。最后是卫星运营商的客户规模逐渐扩大，达到盈亏平衡点后开始盈利。

借鉴风云系列气象卫星和北斗气象试验示范应用的成功经验，气象部门可以发挥气象行业优势，积极参与低轨互联卫星产业链的用户站制造和卫星运营、卫星应用工作。

### 3.1 用户站

用户终端设备主要包括卫星电视终端、卫星无线



图2 全球主要非静止轨道宽带通信星座轨道分布示意图 (截止到2020年1月17日)

Fig. 2 Map of the orbital distribution of the world's major non-geostationary orbit broadband communications constellations (until 17 January 2020)

电终端、卫星宽带终端、卫星移动通信终端等组件和产品。随着低轨互联网星座投入运营，用户站规模将开始放量，潜在市场巨大。

以OneWeb为例<sup>[10]</sup>，所有终端均为热点覆盖形态，将卫星调制解调、地面LTE/3G、Wi-Fi集成为一体，为用户站周边一定区域的个人提供互联网服务。用户终端的大小将控制在30 cm×65 cm，天线大小预计36 cm×16 cm，预计终端和现行笔记本大小类似，可方便地移动端需求，价格定位在200~300美元。

假设我国低轨互联网星座用户站单价为1000元，按2025年4000万用户估计，用户站销售收入可达到400亿元。相对于卫星、火箭等制造业，用户站整机门槛相对较低，预计未来竞争者较多。国内从事用户站整机研制的企事业单位较多，气象部门具有风云系列卫星、北斗卫星等用户站研制和行业应用的成功经验，通过与国内用户站研发单位合作参与低轨互联卫星建设，负责气象、水文、海洋、环保等相关行业的用户站研发与建设。

### 3.2 卫星运营

卫星运营服务(图3)分为空间段运营服务和地面段运营服务两部分，空间段运营主要是通过卫星转发租赁业务，地面段运营主要包括支持用户访问卫星转发器并实现用户间通信的地面设施。预计2025年，我国卫星移动通信用户将达到300万，用户对于宽带接入、机载通信、远程教育、新闻采集、企业联网等应用的需求越来越旺盛。

卫星运营公司的主要资产为天上的卫星星座和信关站、测控站等地面设施，按200亿投资额，考虑卫星5年折旧、地面设施10年折旧，则每年固定资产折

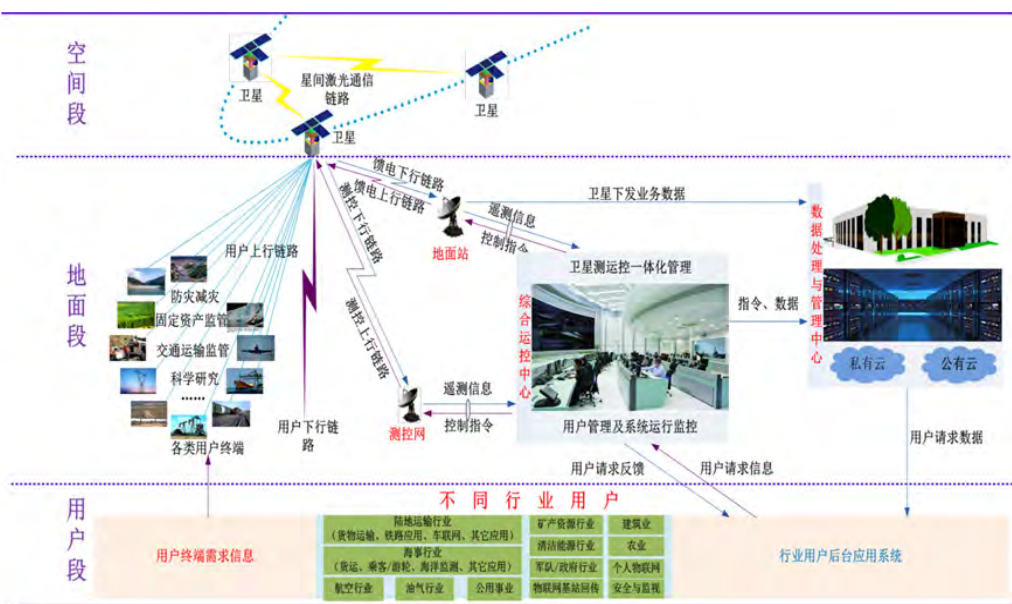


图3 低轨互联卫星运营服务示意图

Fig. 3 Map of low-orbit connected satellite operation services

旧费用达到40亿元。由于卫星运营企业固定成本占比较高，其收入规模一旦突破盈亏平衡点，其利润弹性将非常大。鉴于低轨互联卫星系统在气象行业的巨大应用潜力，气象部门与国内卫星运营企业加强“基础复用”，整合风云气象卫星、低轨互联卫星的地面通讯基础设施，推动地基天线、关口站、通讯终端的共享共用；推进“通信专用”，基于低轨互联卫星通信能力，建立气象部门的专用资源通信系统，加快推进其在气象行业的深层次应用。

#### 4 低轨互联卫星气象应用需求分析

由于低轨互联卫星具有研制周期短、成本低、延时短的特点，同时数量众多，全球覆盖，为构建低延时通信天地一体化气象感知网络提供了很好的解决方案，如果再能搭载一些中小型气象载荷开展气象探测，就能具备全球组网观测能力，对提升我国全球气象观测、全球气象预报、全球气象服务能力具有重要意义，在气象行业有着广阔的应用前景。

##### 4.1 提升气象观测数据收集能力

低轨互联卫星系统具有全球覆盖、低延迟、低成本、不受地形限制等通信优势，卫星星座通过星间激光链路传输数据，不需要大量地基基站便可实现地面观测设备的联网，弥补当前主要通信手段的不足，可实现全球范围内气象观测数据的实时传输，解决偏远地区台站通讯信号不稳定、成本高以及海外站受基础设施限制无法实现实时数据回传等问题，能显著提升我国西部地区、海上等偏远地区以及海外的气象观测数据传输能力。

##### 4.2 支撑探空观测技术体制改革

低轨互联卫星系统可以在探空仪与数据中心之间起到数据中继传输的作用，实现探空仪和数据中心之间的通信和数据实时传输服务。探空仪采集数据后通过集成在探空仪上的卫星通信模组和卫星天线实时传送至低轨互联卫星星座，再由低轨互联卫星星座传至数据中心，可替代现有探空站地面数据接收系统，探空站将只需具备放球功能，从而大大简化探空系统，实现探空业务的无人值守。

重点需要解决探空仪在升空过程中与低轨互联卫星间的通信天线设计问题，保持通信天线姿态稳定，才能确保数据传输成功率。

##### 4.3 扩大全球气象服务覆盖范围

由于全球覆盖的通信优势，低轨互联卫星系统可以实现全球气象预警信息实时短报文通信服务，对各区域的应用终端进行预警信息推送服务。结合我局突

发事件预警信息发布系统，可以把气象预警信息及时的传送到近海和远洋船舶、偏远地区、驻外使馆和企业人员以及广大海外用户，拓宽预警信息覆盖面。同时基于双向短报文的特点，船舶上的终端用户也能在极端气象环境下，向沿岸或附近海域的船舶、救援中心发送求救信息，有机地将海洋气象服务和海洋救援服务结合起来，更好地为用户服务。

#### 4.4 拓展天基气象组网观测能力

低轨卫星星座组网卫星数量多，研制周期短，能够为气象载荷提供大量搭载平台，针对最新技术发展和应用需求迅速形成规模化的天基组网观测能力，与现有风云气象卫星星座观测能力形成互补。综合考虑低轨互联卫星平台的大小、功耗、稳定性指标等，难以搭载具有较强功能的对地观测仪器，目前仅具备搭载百千克以内的太赫兹冰云探测载荷、掩星探测载荷、GNSS-R探测载荷等中小型气象载荷（图4）<sup>[11-13]</sup>。尤其是掩星探测载荷，在多星组网观测的情况下，相比于传统气象卫星，捕捉掩星事件的概率大大增加，从而为数值预报提供更为丰富的垂直大气信息，是目前最具应用前景的可由低轨卫星搭载的气象类载荷。

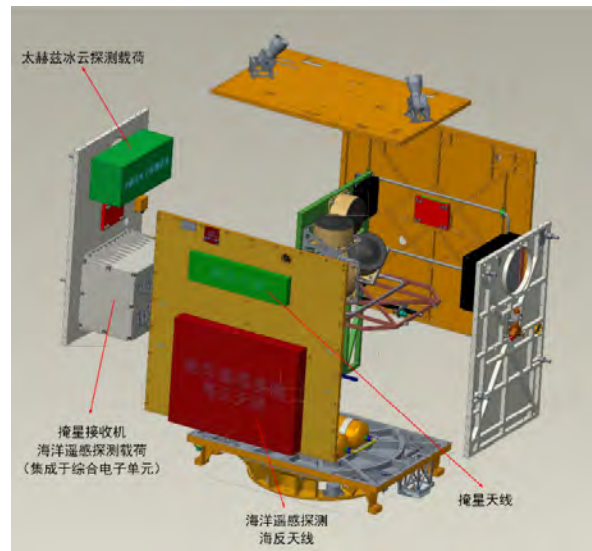


图4 低轨卫星气象载荷示意图

Fig. 4 Meteorological payloads by low-orbit satellites

相较于以通信服务为主的低轨互联卫星，搭载气象探测载荷的小卫星需要具备更高的姿控精度、热控系统和卫星轨道精度，探测仪器性能的一致性和数据定标也至关重要。

## 5 气象领域应用展望

综上所述，全球第二次低轨通信卫星建设热潮正在滚滚而来，美欧等国既有已建立的O3b星座、铱星二代等中低轨道卫星通信系统，又有OneWeb、Space

X等正在建立的低轨互联卫星星座，我国在低轨互联卫星星座方面，虽然项目规划与商用建设能力都与全球领先水平基本齐平，但我国通信卫星数量占比、卫星通信市场占比都低于全球平均水平，通信卫星规划数量远低于美国，“鸿雁星座”“虹云工程”“天象星座”“银河Galaxy”等超过1000颗的中国低轨通信卫星星座建设目标，相较于美国Space X公司Starlink星座已获批的1.2万颗卫星，仍然存在巨大差距。

随着低轨互联卫星系统应用领域的不断成熟，以及火箭发射能力逐步提升、成本不断下降，我国低轨互联卫星市场空间有望进入发展快车道。2020年4月，国家发改委发文将“以5G、物联网、工业互联网、卫星互联网为代表的通信网络基础设施”建设定义为“新基建”，在国家科技政策的引导下、在项目建设经费的支持下，低轨互联卫星未来将会带来继“北斗”导航之后相关产业链的再一次黄金发展机遇，也将持续成为国家政策支持的重点产业领域。

国内气象部门可将“全球气象”发展思路和气象业务现代化建设中的实际需求，融入到国内低轨互联卫星星座发展计划之中，借鉴铱星公司、OneWeb公司、Space X公司的商业运营成功经验与失败教训，尽可能规避潜在商业风险，展望低轨互联卫星气象应用发展模式：1) 积极参与国家低轨互联卫星发展顶层设计，气象部门与国防科工局共同将低轨互联卫星气象行业应用的相关内容纳入到后续空间基础设施规划中；2) 申请设立低轨互联气象应用专项，联合企业、高校、科研院所，利用多种合作模式开展低轨互联卫星在气象行业中的建设、应用和推广，研制气象类搭载载荷，研发数据处理及应用平台，复制“北斗专项”和“高分专项”在气象行业应用的成功案例；3) 通过商业合作，推动“气象+”低轨互联卫星应用推广：据测算，国内建设一个60颗低轨互联卫星的星座预计需要200亿元，因此以气象部门现有资金或是单独申请立项来发展低轨互联卫星，均不是现实可行方案，并且频率和轨道资源、后期商业运营经费都是难以完成的任务。

发挥中国气象局国有资本运营平台的作用，特别是利用好一批具有气象卫星运营服务经验、卫星用户站开发应用能力的局属企业，选择与国内优质商业航天企业（如航天科技、航天科工、中国电科、东方红卫星移动通信）开展商业合作，重点关注低轨互联卫星产业链中的运营服务以及卫星通信芯片、地面终端等领域。

采用资源互换的商业合作模式，既提出气象行业

应用需求，又拿出风云气象卫星的已有资源，整合双方地面通讯基础设施，推动地基天线、关口站、通讯终端的共享共用，共同推出低轨互联卫星气象数据处理及应用平台，积极向产业下游拓展服务。

采用加盟合作、股权转让的商业合作模式，推动局属企业与商业航天企业资本合作，形成利益共同体，推进“通信专用”，基于低轨互联卫星通信能力，研发气象专用卫星通信芯片，研制专属低轨卫星通信用户站，建立可涵盖气象、水文、海洋、环保监测数据传输的专用资源通信系统，并负责相关系统的运营服务。

虽然低轨卫星星座发展火热，但铱星公司、OneWeb公司也都曾因资金链断裂而破产重组，国内90%初创企业难以渡过创业初期的“死亡谷”阶段，共享单车也有前车之鉴。如果进一步规避可能的商业风险，建议采用政府购买服务的方式，购买低轨互联卫星相关运行数据，由星地通讯信号变化反演大气观测数据<sup>[14]</sup>。例如2016年9月，美国NOAA将GPS无线电掩星数据服务合同给了本国的卫星气象数据服务公司Spire公司和GeoOptics公司，并评估商业卫星数据是否可以满足气象预报的需求。国内也可以租用低轨卫星搭载中小型气象探测载荷，拓展地基气象组网观测能力；租用低轨互联卫星信道用于气象监测数据传输，提升气象观测数据全球收集能力，开展全球气象预警信息实时短报文通信服务，扩大全球气象服务覆盖范围。

#### 参考文献

- [1] 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): 56-57.
- [2] 姜燕丽, 刘晓娟, 张雪梅, 等. 低轨卫星互联网发展问题研究. 数字通信世界, 2018(8): 21-22.
- [3] 高瓴园, 王妮炜, 陆洲. 卫星互联网星座发展研究与方案构想. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(8): 875-881.
- [4] 刘悦, 廖春发. 国外新兴卫星互联网星座的发展. 科技导报, 2016, 34(7): 139-148.
- [5] 卢乃锰, 谷松岩. 气象卫星发展回顾与展望. 遥感学报, 2016, 20(5): 832-841.
- [6] 宋晶晶. 美国商业卫星气象服务发展初探. 卫星应用, 2017(1): 66-70.
- [7] 肖永伟, 孙晨华, 赵伟松. 低轨通信星座发展的思考. 国际太空, 2018(11): 24-32.
- [8] 王晓海. 基于小卫星星座的移动互联网系统及应用发展. 卫星与网络, 2017(6): 58-63.
- [9] 梁艳, 郭朝晖. 低轨宽带星座是一场有进无退的冒险. 卫星与网络, 2018(8): 20-25.
- [10] 李小龙, 邓恒. “一网”星座的发展与启示. 国际太空, 2017(12): 9-14.
- [11] 龚燃. 美国气旋全球导航卫星系统与应用. 国际太空, 2020(1): 61-64.
- [12] 何善宝. 浅谈商业气象星座的发展. 国际太空, 2019(11): 69-74.
- [13] 刘豪. 国外商业卫星搭载有效载荷发展研究. 国际太空, 2014(1): 24-30.
- [14] 谢丰奕. 亚洲九号通信卫星也将探测天气. 卫星电视与宽带多媒体, 2014(2): 38-39.