



专题：天地一体化信息网络

天地一体化信息网络低轨移动及宽带通信星座发展设想

孙晨华, 肖永伟, 赵伟松, 周坡

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要: 随着全球互联网和物联网服务的延伸, 可以实现包括南北两极在内全球无缝覆盖的低轨通信星座又一次进入了发展机遇期。通过分析国外典型星座的特点, 结合我国“科技创新 2030—重大项目”: 天地一体化信息网络重大工程的发展背景, 提出了一种创新的低轨移动及宽带通信星座方案构想, 并给出了发展建议, 希望能够为相关系统研制提供参考。

关键词: 低轨通信星座; 卫星移动通信; 卫星互联网星座

中图分类号: TN91

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017334

Development conception of space-ground integrated information network LEO mobile and broadband internet constellation

SUN Chenhua, XIAO Yongwei, ZHAO Weisong, ZHOU Po

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: With the extension of global internet and IoT (internet of things), LEO (low earth orbit) communication constellation which can achieve seamless coverage of the world including the two poles once again meets the opportunity for development. An innovative scheme of LEO mobile and broadband internet constellation was proposed after analyzing the characteristics of typical foreign constellations and combining with Science and Technology Innovation 2030 Major Project: Space Integrated Ground Network. Development suggestions that can lay the foundation for relevant research and system construction were presented.

Key words: LEO constellation, mobile satellite communication, satellite internet constellation

1 引言

低轨通信星座相对于高轨通信星座而言, 具有更低的传输时延、更好的全球覆盖性(包括南北两极), 可以更好地克服南山效应, 终端有可能更小, 速率有可能更高。因此, 20 世纪 80 年代末, 美国等发达国家就开始发展低轨通信星座。

我国以“天通一号”“中星 16”等为代表的同步轨道移动和宽带卫星通信系统的建设, 为解决个人移动通信、小型终端高速传输等提供了有效手段, 也大大提高了我国远距离通信服务能力。但是随着我国“一带一路”倡议的提出及不断推进, 通信传输保障“走出去”的需求迫切, 利用低轨通信星座实现全球覆盖, 提供移动和宽带各类服务,

收稿日期: 2017-11-05; 修回日期: 2017-12-01

通信作者: 赵伟松, 970468344@qq.com



成为解决通信传输保障“走出去”的重要选择。

2 国内外发展现状

2.1 国外典型系统概况

目前全球无论是已经运营的典型系统还是新的研究发展计划，主要由美国引领其技术和市场发展^[1]，美国具有全产业链的先进技术，具有频率轨位的战略储备，从而奠定了其发展基础。另外，由于美国低轨通信星座系统起步早，不仅切合了当时地面移动不发达情况下的个人移动通信需求，同时充分利用星座覆盖地域不受限制和距离远的特点，提供航空航海等服务。主要的系统如图1所示。

图1中包括 Iridium、ORBCOMM、Globalstar 3 个典型低轨通信星座系统，O3b (other 3 billion, 另外 30 亿) 1 个中轨系统以及 OneWeb、SpaceX、LeoSat 等新的星座计划。Iridium、ORBCOMM、Globalstar 发展之初，地面移动通信落后，低轨通

信星座系统突出对海上、偏远地区以及当前万物互联（物联网）背景下地面移动难以到达地域的覆盖优势。随着需求的不断更新和技术水平的发展，这几个典型系统均由一代向二代转变，呈现出载荷能力更强、功能更综合、应用定位更准确的趋势，但是保持了频率、轨位以及星座构型的持续性，O3b 中轨系统主要为大客户提供互联网接入服务。OneWeb、SpaceX 等主要开展面向个人的宽带互联网业务。

(1) 全球唯一的星间组网、全球无缝覆盖的 Iridium 一代、二代系统

Iridium 是目前世界上唯一支持包括两极在内的全球无缝覆盖服务的系统，采用星间链路组网，不依赖全球布站实现用户间互通。一代系统于 1998 年 5 月建成，二代系统 Iridium NEXT 于 2007 年启动。

Iridium 一代、二代星座由分布在 6 个轨道面上的 66 颗卫星组成，轨道高度 780 km，用户链

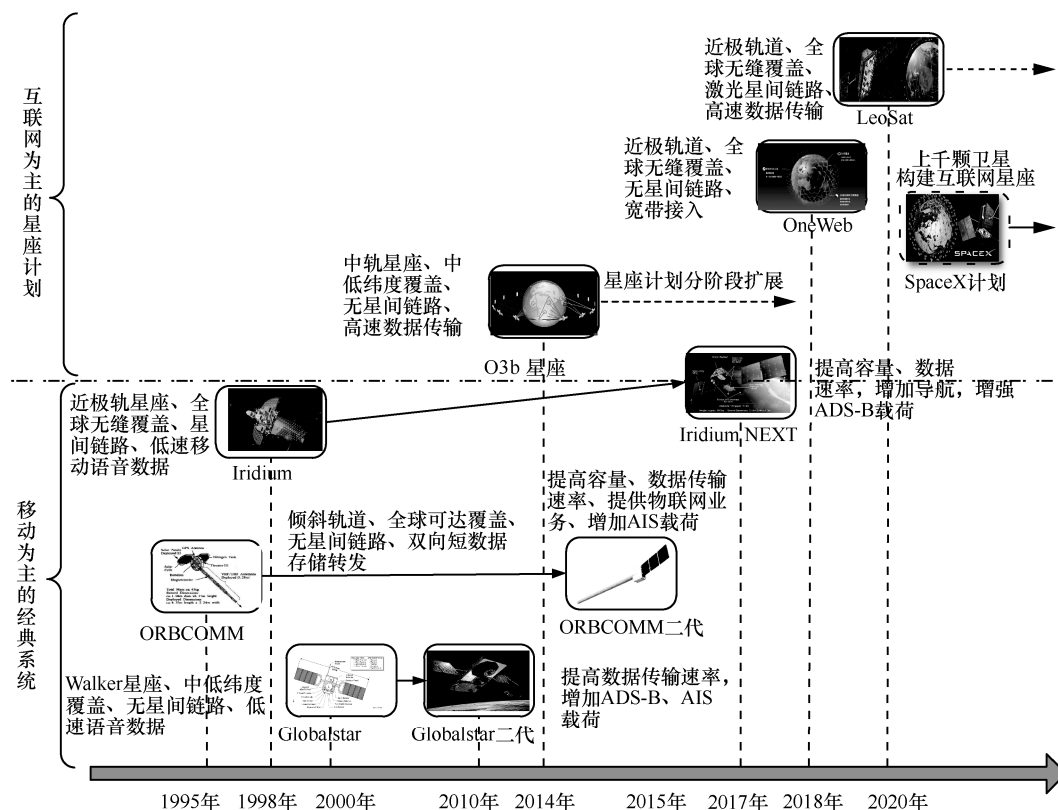


图1 美国引领的全球低轨通信星座发展

路采用 L 频段。Iridium 二代通过对一代卫星的逐步替换,实现更大容量、更高业务速率以及更多功能^[2],L 频段业务高达 1.5 Mbit/s, Ka 频段业务高达 8 Mbit/s。Iridium 二代还具备气候变化监视、多光谱对地成像、空间气象监视、航空监视、导航增强等功能。强大的载荷能力也使得该系统业务定位由最早的个人移动通信,发展到了综合业务。正是由于该系统的诸多特点,使得它在低轨通信星座市场占比最高,2015 年营业收入达到 4 亿美元。

一代和二代 Iridium 系统的主要技术参数见表 1。

(2) 典型无星间链路,依托地面关口站运行的 ORBCOMM 及 Globalstar 一代、二代系统

创建于 1993 年的 ORBCOMM 公司,是一家领先的“机器到机器”和物联网解决方案供应商,公司提供支持基于卫星网(不仅是 ORBCOMM 星座,也可利用 Inmarsat 和 Globalstar 星座)和蜂窝网的服务。1996 年 2 月,依托 ORBCOMM 星座,该公司启动全球首个低轨通信星座服务,提供全球数据通信商业服务。ORBCOMM 低轨通信星座系统包括约 40 颗卫星及 16 个地面站,卫星分布在距地面 740~975 km 的 7 个轨道面上,关口站分布在 13 个国家。用户链路采用 VHF 频段,无星间链路,采用存储转发模式,可以为世界上任何地方提供廉价的跟踪、监视和消息服务。二代

ORBCOMM^[3]与一代相比,卫星质量增加到原来的 4 倍,接入能力增加了 6 倍,见表 2。目前拥有世界上最大的天基 AIS (automatic identification system, 船舶自动识别系统)网络服务,目前每天处理来自大约 15 万艘船只的超过 1 800 万条 AIS 消息。

Globalstar 系统与 ORBCOMM 相类似,无星间链路设计,需要依托关口站实现服务,采用玫瑰星座(高度 1 400 km),48 颗卫星,用户链路采用 L、S 频段^[4],采用弯管透明转发设计,服务区域受限于关口站部署。Globalstar 二代系统提高了系统容量和数据速率,新增互联网接入服务、ADS-B (automatic dependent surveillance-broadcast, 广播式自动相关监视)、AIS 等新业务。

(3) 在轨提供互联网接入服务的中轨 O3b 系统

O3b 系统是目前唯一成功运营的中轨星座宽带卫星通信系统。从其名称可以看出,其建设目标是让亚洲、非洲、大洋洲和美洲地区缺乏上网条件的“另外 30 亿人”能够通过卫星接入互联网。该星座位于 8 062 km 的中轨道,采用多点波束、透明转发模式,用户速率可达百 Mbit/s 量级,如 2.4 m 天线可达 300 Mbit/s 以上。运营上,与地面运营商合作,提供 4G 基站回程、地面电信干线传输、石油和天然气企业离岸平台通信、海上宽带通信等

表 1 Iridium 一代到二代系统配置及能力对比

参数项	一代 Iridium 系统	二代 Iridium 系统
轨道类型	近极轨道、倾角 86.4°	
覆盖能力	实时全球无缝覆盖	
天线及波束数量	L 频段相控阵天线 3 副,每副 16 个波束; 2 副可移动 Ka 频段馈电链路天线,每副 1 个波束; 4 副 Ka 频段星间链路天线	L 频段相控阵天线 1 副,48 波束; 2 副可移动 Ka 频段馈电链路天线,每副 1 个波束; 4 副 Ka 频段星间链路天线
星间链路配置	同轨两条,邻轨两条	
使用频段	用户链路 L 频段,馈电链路和星间链路 Ka 频段	
载荷功能配置	以 L 频段移动通信载荷为主	在一代基础上,增加 Ka 宽带、空间气象监视、ADS-B、导航增强等载荷
L 频段用户速率	最高 128 kbit/s	最高 1.5 Mbit/s
Ka 频段的用户速率	不详	最高 8 Mbit/s
卫星重量	约 680 kg	约 800 kg
发射方式	一箭一星	一箭多星(一箭十星)



表 2 ORBCOMM 一代到二代系统发展

参数项	一代 ORBCOMM 系统	二代 ORBCOMM 系统
卫星数量	在轨 24 颗	在轨 16 颗
覆盖	全球可达覆盖	
轨道类型及高度	6 个倾斜圆轨道 4 个倾角 45°（高度 815 km） 1 个倾角 70°（高度 740 km） 1 个倾角 108°（高度 785~875 km）	在一代基础上，新增赤道圆轨道 轨道高度 975 km
星间链路配置	无	
载荷功能配置	以通信传输载荷为主	在一代基础上增加 AIS 载荷
卫星重量	约 45 kg	约 140 kg
业务类型	双向短数据传输	短数据传输、AIS 数据
链路速率	用户链路速率： 2.4 kbit/s（上行）/4.8 kbit/s（下行） 馈电链路速率：57.6 kbit/s	由于星载天线增益和功率配置提升，用户链路速率提升 4 倍以上
发射方式	不详	一箭多星

服务，支持偏远地区高品质互联网接入，如图 2 所示。O3b 一代到二代系统发展见表 3。

（4）先进的互联网星座计划—OneWeb 和 SpaceX 计划

OneWeb 公司提出以低轨卫星群来普及互联

网业务，使小型用户终端能够高速低时延地接入互联网。

OneWeb 将发射 720 颗卫星完成初期构建，轨道高度 1 200 km，18 个轨道面，采用透明转发，基于地面关口站，提供直接面向用户的 Ku 频段互

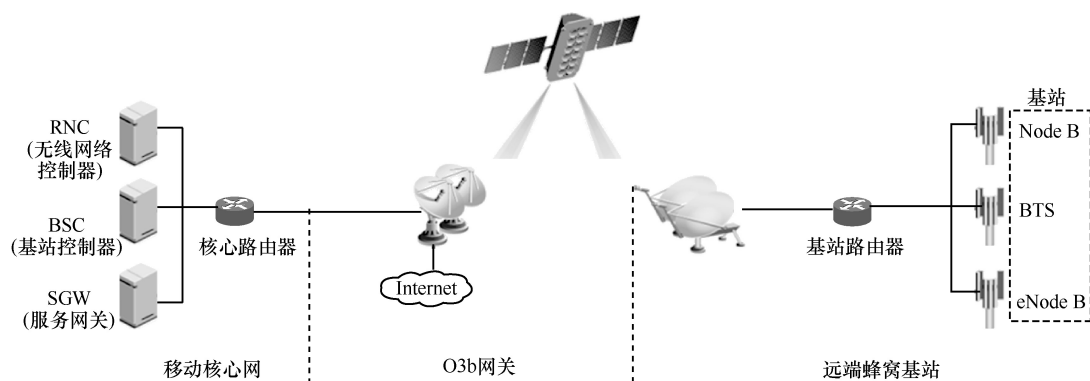


图 2 O3b 基站回程服务

表 3 O3b 一代到二代系统发展

特征参数项	一代系统（在轨）	二代系统（计划） ^[5]
卫星数量及轨道面数	已部署 12 颗	正在建造中
覆盖	南北纬 45°	南北纬 50°
轨道类型及高度	中轨、8 062 km	不详
星间链路配置	无	
波束配置	单星 10 个用户波束，2 个馈电波束，机械可调	系统提供波束大于 3 万个，波束覆盖灵活可调
吞吐量	单星 12 Gbit/s，每波束 1.2 Gbit/s	系统最高可达数十 Tbit/s
卫星重量	700 kg（每颗）	不详

联网接入服务。OneWeb 单星重量不大于 150 kg, 单星容量可达 5 Gbit/s 以上, 可以为 0.36 m 口径天线的终端提供 50 Mbit/s 的互联网接入服务^[6]。

OneWeb 现已获得美国 FCC 授权, 可以在美国提供互联网服务。计划 2018 年开始发射, 2019 年提供服务。后续考虑对星座进行扩展, 增加 1 972 颗卫星。OneWeb 公司采取多种技术和管理措施, 降低成本, 向产业化方向发展, 追求卫星制造标准化、自动化, 可将单星成本控制在 50 万美元, 预计每天可生产 3 颗。采用一箭多星发射节约成本。

SpaceX 计划构想了 4 000 多颗星的星座, 进一步降低卫星成本, 通过火箭回收技术, 降低发射成本。开创商业互联网卫星新时代。

2.2 国外典型系统发展特点及启示

(1) 特点

早期发展的低轨通信星座系统, 占据了最有利的低频段资源, 继续保持其频段低、波束宽、无缝覆盖所需卫星数量少的优势, 在传统个人移动通信的基础上, 向物联网及多功能方向发展。“移动通信+物联网应用”成为低轨移动通信星座发展的共识。例如 Iridium NEXT 支持 ADS-B 业务, Globalstar 二代系统支持 ADS-B、AIS 业务, ORBCOMM 本身就定位于 M2M (machine to machine, 机器与机器) 业务, 二代还增加了 AIS 等。卫星物联网业务已经成为新的经济增长点, ORBCOMM 在近几年出现了快速的增长, 保持了每年 10% 的收入增速, 特别是 2014—2015 年, 其收入增长了几乎 70%。

新的星座计划主要基于宽带互联网需求, 采用 Ku、Ka 高频段实现高速率, 通过成倍甚至 10 倍以上的卫星数量尽可能实现连续覆盖。由于单星速率高、星间交换需要的容量大、技术复杂、成本高, 因此, 目前大多计划均未考虑配置星间链路, 这样也使得其服务地域范围受到限制。

作为地面来讲, 构建多种星座与地面移动网

融合的综合服务网络, 实现天地互补、不同星座互补, ORBCOMM 公司的天地融合服务网络是最好的案例。

宽带互联网接入服务的普及与推广应用, 促进了低轨互联网星座的发展。随着卫星通信技术和卫星平台能力提升, 为降低系统费效比, “小卫星大容量”成为低轨互联网星座发展的显著特征。例如 OneWeb, 卫星重量约 150 kg, 单星容量可达 5 Gbit/s。

(2) 启示

国外的典型系统发展历程, 给人们很好的启示。

- 要发展星座, 必须先要有频率资源储备。
Iridium、ORBCOMM、Globalstar 等 20 世纪 80 年代开始发展, 占领全球低频段资源先机。根据 ITU 先登先占的原则, 其他同类星座频率申报变得非常困难。对于新的 NGSO 卫星网络频率申报, 基本需要提前 5~10 年的储备或者合作获得。
- 基于星间链的空间组网是突破全球地面布站限制的唯一选择, 也是实现全球无缝服务的唯一选择。Iridium 是唯一真正实现全球无缝服务的低轨通信星座。Globalstar、OneWeb 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。Globalstar 全球部署 24 个关口站, OneWeb 计划部署 55~75 个关口站提供服务, 即使这样也很难提供全球服务能力。我国发展星座可优先考虑基于星间链路和星间组网的方案, 弥补全球部署关口站不方便的不足。
- 成本控制、先进的技术、多渠道融资, 也是星座良好发展的重要保障。低轨通信星座系统由于卫星数量多、系统复杂、维护成本高, 与同步轨道卫星相比投入大, 因此不仅要考虑技术实现, 还必须同期考虑融资和运营。



3 我国低轨通信星座现状

3.1 我国发展低轨通信星座的必要性

低轨通信星座是保障全球无缝通信的最佳途径。随着我国经济和社会的发展,国家经济贸易、科技、文化等领域的利益不断向海外拓展,我国在全球的利益对实时无缝信息保障有很大需求。

GEO (geosynchronous orbit, 地球同步轨道) 卫星由于其轨道特性,无法实现全球覆盖。而且在 GEO 卫星发展上我国已经取得了很大进步,但在低轨通信星座方面,与国外先进水平还有很大差距,因此发展低轨通信星座十分必要。

低轨通信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。因此,我国必须加快发展低轨通信星座,抢占可用频率使用权,为确立太空优势奠定基础。

3.2 国内发展情况

我国低轨移动通信星座发展目前处于单星试验和系统规划阶段,总体上看,与美国等发达国家相比,按照形成能力的时间计算,预计落后 20 年以上。

“十五”期间组织了低轨通信星座论证,安排了相关关键技术攻关;“十一五”期间上海小卫星等单位,发射了多颗存储转发类小卫星,并得到应用;“十二五”期间,清华大学与北京信威通信技术股份有限公司(以下简称信威公司)联合研制的灵巧通信试验卫星成功发射,测试验证了低轨卫星开展语音、数据、图像、互联网等多种业务。目前,中国航天科技集团公司(以下简称航天科技)、信威公司、中国航天科工集团有限公司(以下简称航天科工)、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等单位以及科技部依托中国电子科技集团牵头论证的天地一体化信息网络重大工程等提出多个低轨通信星座系统规划方案。航天科工的“虹云”

工程计划,以天基互联网接入为主要目标,规划发射 156 颗小卫星;航天科工的“行云”工程计划,以物联网服务为主要目标,预计部署 50 余颗低轨小卫星;航天科技的“Universe Link”计划,以互联网接入、物联网服务为目标,预计部署 54+270 余颗卫星。

4 低轨移动和宽带互联综合星座构想

4.1 天地一体化信息网络重大工程与低轨通信星座

天地一体化信息网络重大工程是国家科技创新 2030 先期启动的 4 个科技重大工程之一,总体架构如图 3 所示,由天基骨干网、天基接入网和地基节点网组成。天基骨干网由 GEO 轨道的若干(6 个)节点联网而成,天基接入网则以低轨节点为主,地基节点网由多个地面互联的地基节点(关口站及信息港)组成。天基骨干网、天基接入网和地基节点网构成天地一体的网络来支撑战略安全通信、移动宽带服务、热点区域增强、联合信息支援、航天信息支援、防灾减灾服务、反恐维稳支持、航空信息服务、海洋信息服务和信息普惠服务等十大典型应用。

低轨接入网主要采用星座部署、空间组网的方式,提供全球无缝覆盖的移动、宽带通信服务,通过搭载载荷支持航空/航海监视、频谱监测、导航增强以及广域物联网服务等。

低轨接入网规模考虑 12 个轨道面,轨道高度 800~1 100 km,重大工程实施考虑部署 120 个节点,后续可扩展到 240 个节点。星座构型采用近极轨道,拓扑相对稳定,南北极在内全球覆盖,组网方式采用星间链路、星间路由,不依赖地面站提供实现全球服务能力。关口站以国内布站为主,可根据国外业务拓展,在境外拓展部署关口站。

首期部署 60 个综合节点,以星上处理模式为主,支持广泛的移动通信、ADS-B、AIS 等功能,兼顾有限的宽带通信能力。后期根据需要增加轨

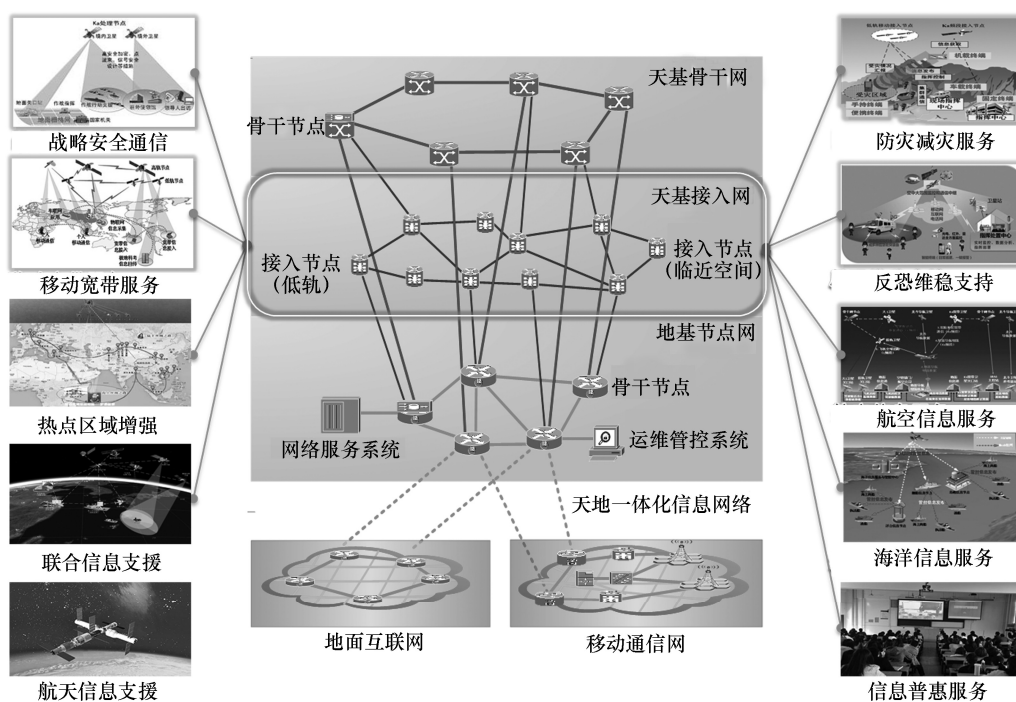


图3 天地一体化信息网络重大工程总体架构

道面和卫星数量,增加60个宽带增强节点,以透明转发为主,兼顾星上处理模式,主要提供按需调配的互联网宽带接入服务。低轨接入网设计主要融合了国外经典的Iridium和新的互联网星座计划的特点及服务能力。

低轨接入网配置同轨道面星间链路和异轨道面星间链路,同轨道面采用激光星间链路,异轨道面采用Ka频段星间链路^[7]。用户链路主要以L、Ka频段为主,L频段面向用户提供移动通信服务和物联网服务,Ka频段为重点用户提供宽带通信和互联网接入服务。低轨接入网网络架构如图4所示。

低轨接入网支持中低速移动业务容量不小于300 Mbit/s,宽带业务中透明转发带宽不小于60 GHz(按照2 bit/(s·Hz)频谱效率计算,通信容量可达120 Gbit/s),星上处理容量不小于10 Gbit/s。对于移动通信手持类终端,上行接入速率不小于64 kbit/s,接收可达1 Mbit/s;对于小型化低功耗物联网终端接入速率可达600 bit/s,接入用户数可达1亿;对于典型的0.5 m口径宽带接入终端,要求上行接入速率不小于2 Mbit/s,接收速率不小于50 Mbit/s。

4.2 低轨接入网设计的创新点

低轨接入网设计具有如下创新点:宽窄结合、功能综合,逐步演进、柔性扩展,全球覆盖、无缝服务,空间组网、安全互联,软件定义、灵活重构,智能感知、共谱利用,高低互联、地基融合。

(1) 宽窄结合、功能综合,逐步演进、柔性扩展,全球覆盖、无缝服务,空间组网、安全互联

基于低轨通信星座全球覆盖的特性,提出移动业务、宽带业务、ADS-B、AIS、广域物联、导航增强等多功能综合设计思路。移动业务,支持单节点容量不小于5 Mbit/s,总容量不小于300 Mbit/s;宽带业务单用户可达50 Mbit/s,用户数不小于50个;配置ADS-B载荷,单节点支持不小于3000架飞机航空监视,具备全球实时服务能力;配置AIS载荷,单节点支持每分钟不少于3000艘船舶信息采集能力;面向广域物联,支持小型低功耗物联网终端使用,发射功率不大于地面手机标准;支持导航信号增强、导航信息增强等多种方式的导航增强服务。配置两类卫星节点,各有侧重、协同工作满足移动为主的各类应用和宽带接入应用。

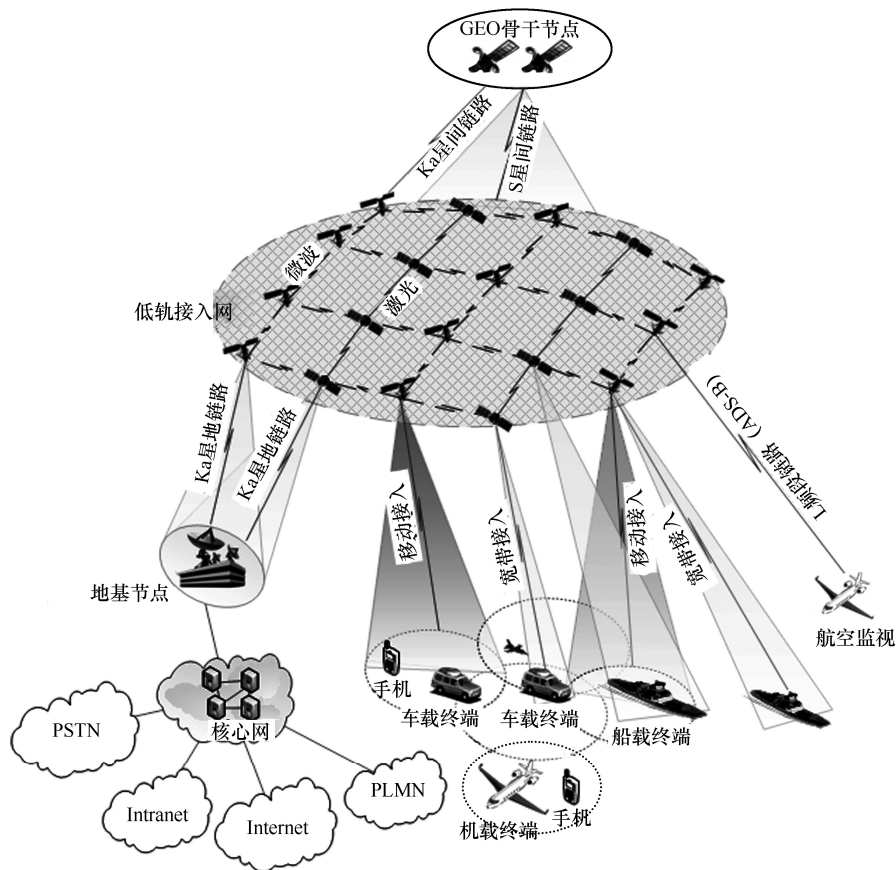


图 4 低轨接入网网络架构

(2) 软件定义、灵活重构, 智能感知、共谱利用, 高低互联、地基融合

软件定义主要包括路由控制、波形、天线波束等方面软件定义,路由控制主要采用 SDN 控制器+数据面转发的思路^[8],波形重构主要对采用的技术体制可以进行软件上注重构,天线波束软件定义是指采用智能化天线技术,可以调整大小、功率、覆盖范围等。智能感知、共谱利用^[9,10]是指基于感知实现与其他系统无干扰/低干扰共存,降低频轨协调难度和应用风险,一是可利用 ITU“落地功率谱小于噪声功率谱 6%”规则,构建扩频低速信令网;二是基于星地联合感知,选择空闲载波传输业务,实现与高轨系统同频段共存。高低互联、地基融合,是指可与高轨骨干节点互联,节点数量较少时,用于提高连续覆盖性和覆盖范

围,数量较多时,可提供天基控制面备份;地基融合方面,主要是指与地面 4G/5G 融合实现业务服务无感互补,低轨地基节点、管控均与高轨地基节点统一设计;应用终端方面,高轨、低轨、地面移动等模式综合设计。基于扩谱和频谱感知的频谱资源利用示意如图 5 所示。

5 低轨通信星座涉及的关键技术

5.1 技术体系

天基接入网低轨通信星座技术体系包括总体设计、天地一体技术体制设计、空间平台及载荷设计、应用系统设计、运维管控设计、星地一体化测控设计等多个方面,如图6所示。

总体设计主要包括体系结构设计、星座轨道部署与仿真、频率设计与协调、业务模型设计等。

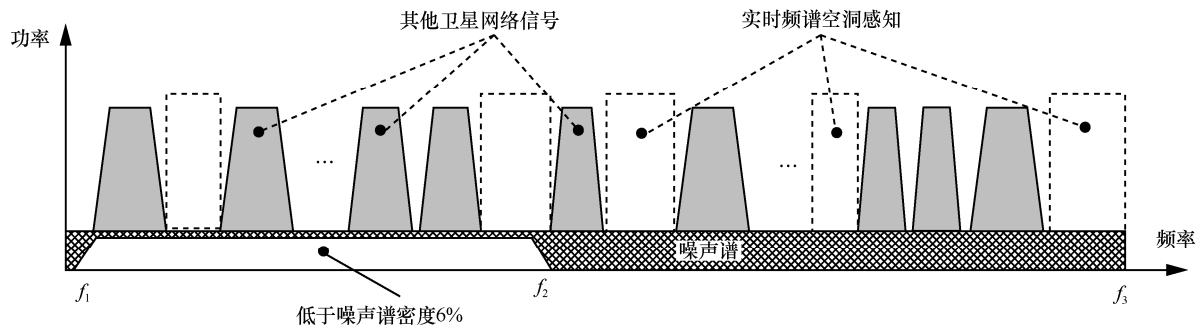


图5 基于扩谱和频谱感知的频谱资源利用示意

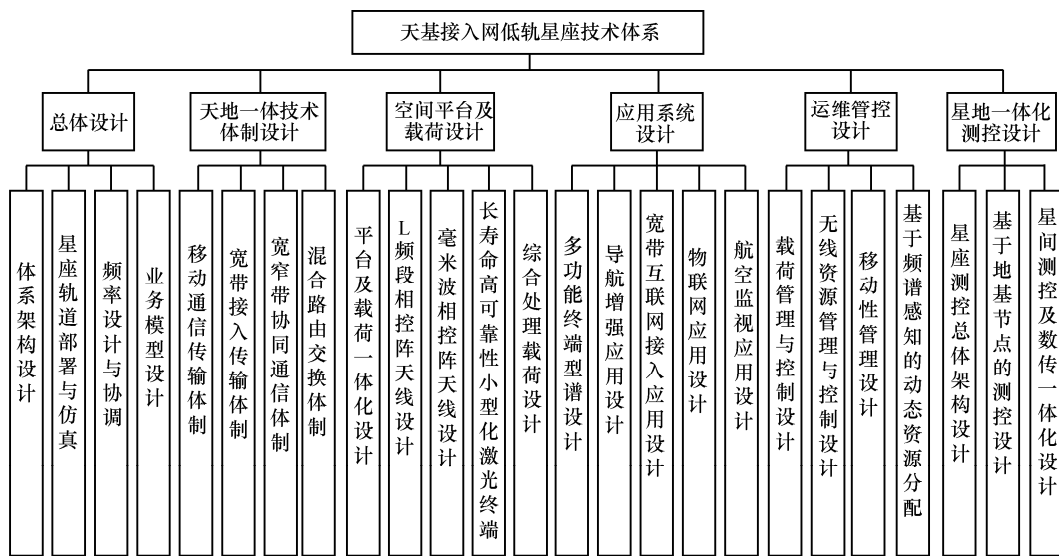


图6 天基接入网低轨通信星座技术体系框

天地一体技术体制设计主要包括对移动通信传输体制^[11,12]、宽带接入传输体制、宽窄带协同通信体制、混合路由交换体制^[13]等体制的设计。空间平台及载荷设计主要包括平台及载荷一体化设计、L 频段相控阵天线设计、毫米波相控阵天线设计、长寿命高可靠性小型化激光终端设计和综合处理载荷设计等。应用系统设计主要包括多功能终端型谱设计、导航增强应用设计、宽带互联网接入应用设计、物联网应用设计和航空监视应用设计等。运维管控设计主要包括载荷管理与控制设计、无线资源管理与控制设计、移动性管理设计、基于频谱感知的动态资源分配等。星地一体化测控设计主要包括星座测控总体架构设计、基于地基节点的测控设计和星间测控及数传一体

化设计等。

5.2 关键技术

(1) 宽窄带协同通信技术

使用 Ka 点波束实现全球无缝覆盖,基于本文所提方案,其技术实现难度过高,可以采用宽窄带协同通信技术来为用户提供按需接入的高速数据业务。用户可以通过全球连续覆盖的 L 频段信号接入网络,并在需要时申请 Ka 宽带波束,做到根据用户的实际需求,采用动态点波束的方式提供高速数据服务,对全球特定地区和热点用户提供动态宽带接入服务。

(2) 低轨通信星座移动性管理技术

与高轨系统不同,低轨通信星座相对地面用户在高速运动,地面终端会不断在波束、卫星间



进行切换。与此相关的用户信道资源管理、数据链路管理、用户锚点管理等移动性管理问题变得非常复杂。实现可用、可靠和安全的用户移动性管理是系统的关键。

(3) 基于频谱感知的动态资源分配技术

利用频谱感知技术,可对特定的频段频谱进行扫描,寻找授权用户没有使用的以及通过空分复用可以共用的频率,动态分配给低轨通信星座使用,解决目前固定分配频谱普遍存在的频率资源十分紧张、国际竞争激烈、协调难度非常大的问题。

6 结束语

低轨通信星座的发展建设要加强对关键技术的攻关,利用创新思维,突破掌握核心技术,始终坚持军民融合的发展思路,吸取国外经验教训,充分考虑与未来地面移动通信网络的融合共处,打造具有国际竞争力的优质产业链,最后低轨通信星座的发展离不开国家政策扶持和机关统筹协调配合。

总之,建立一个全球覆盖、多功能综合、可平滑演进的低轨通信星座是提升我国卫星通信能力,满足国家利益全球扩展需求的重要举措。

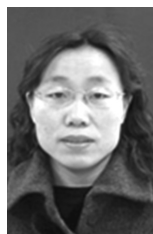
参考文献:

- [1] 刘洁,潘坚,曹世博.低轨互联网星座业务发展趋势分析[J].中国航天,2015(7):17-21.
LIU J, PAN J, CAO S B. Analysis of the development trend of Leo internet constellation[J]. Space System and Technology, 2015(7):17-21.
- [2] Iridium. Iridium NEXT is taking flight[EB/OL]. (2017-01-01)[2017-11-01]. <https://www.iridium.com/network/iridiumnext>.
- [3] ORBCOMM. ORBCOMM OG2 next-generation satellite constellation[EB/OL]. (2016-03-01)[2017-11-01]. <https://www.rbcomm.com/en/networks/satellite/orbcomm-og2>.
- [4] CROQ F, VOURCH E, REYNAUD M, et al. The GLOBALSTAR 2 antenna sub-system[C]//2009 European Conference on Antennas and Propagation, March 23-27, 2009, Berlin, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2009:598-602.
- [5] SES. O3B MPOWER[EB/OL]. (2017-01-01)[2017-11-01]. <https://www.ses.com/networks/o3b-mpower>.
- [6] PULTAROVA T. News: space tycoons go head to head over mega satellite network[J]. Engineering & Technology, 2015(10).
- [7] 胡东伟,宋春晓.低轨卫星移动通信系统的星间链设计[J].

无线电通信技术,2017(5): 11-15.

- HU D W, SONG C X. Design of the inter-satellite link of low earth orbit mobile satellite communication systems[J]. Radio Communications Technology, 2017(5): 11-15.
- [8] 王歆平,王茜,刘恩慧,等.基于SDN的按需智能路由系统研究与验证[J].电信科学,2014,30(4): 8-14.
WANG X P, WANG Q, LIU E H, et al. Research and verification on SDN-based on-demand smart routing system[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(4): 8-14.
 - [9] 曾昱祺,杨夏青.GEO与NGEO卫星频谱共存干扰抑制技术(一)[J].数字通信世界,2016(7): 24-25.
ZENG Y Q, YANG X Q. Coexistence and interference mitigation between NGEO and GEO(I)[J]. Digital Communication World, 2016(7): 24-25.
 - [10] 冯岩,孙浩,许颖,等.动态频谱共享研究现状及展望[J].电信科学,2016,32(2):112-119.
FENG Y, SUN H, XU Y, et al. Review and prospect on the research of dynamic spectrum sharing[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(2):112-119.
 - [11] WU Z, HU G, SEYEDI Y, et al. A simple real-time handover management in the mobile satellite communication networks[C]//2015 Network Operations and Management Symposium, Aug 19-21, 2015, Busan, Korea. New Jersey: IEEE Press, 2015:175-179.
 - [12] MUSUMPUKA R, WALINGO T M, SMITH J M. Performance analysis of correlated handover service in LEO mobile satellite systems[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(11): 2213-2216.
 - [13] 晏坚.低轨卫星星座网络IP路由技术研究[D].北京:清华大学,2010.
YAN J. Research on the IP routing in LEO satellite constellation networks[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.

[作者简介]



孙晨华(1964—),女,中国电子科技集团公司第五十四研究所研究员、所级副总工程师,主要研究方向为卫星通信。

肖永伟(1976—),男,中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师、总设计师,主要研究方向为卫星通信。

赵伟松(1990—),男,中国电子科技集团公司第五十四研究所助理工程师、总设计师助理,主要研究方向为卫星通信。

周坡(1978—),男,中国电子科技集团公司第五十四研究所工程师、主任设计师,主要研究方向为卫星通信。