

低轨宽带卫星互联网承载电网业务应用

朱亮¹, 戚少博¹, 杨波¹, 徐冰玉^{2,3}, 李子凡⁴, 张世杰¹

(1. 银河航天(北京)通信技术有限公司, 北京 100192;

2. 中国信息通信研究院, 北京 100191;

3. 国家航天局卫星通信系统创新中心, 北京 100191;

4. 国家电网有限公司信息通信分公司, 北京 100761)

摘要: 低轨宽带卫星互联网具有大带宽、低时延、高弹性等空间网络通信优势, 使得低轨卫星网络在垂直行业的应用拓展成为研究热点。在研究电力行业应用需求的基础上, 针对电网建设、电网运行和应急救援 3 个核心业务, 提出基于低轨宽带卫星互联网的电网业务应用方案, 给出低轨卫星网络的系统组成和 workflows, 以及“动中通”卫星终端的架构设计。基于低轨宽带试验星座系统开展“动中通”卫星终端的传输性能、连续通信和异构卫星网络业务切换测试, 可为电网业务提供远距离、低时延、大容量、高可用的数据传输能力支撑, 为低轨宽带卫星星座纳入新一代电力应急通信系统奠定理论与数据基础。

关键词: 低轨宽带卫星; 卫星互联网; 电力行业; 卫星终端

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023024

Application of the Power Grid Business Carrying on Low Earth Orbit Broadband Satellite Internet

ZHU Liang¹, QI Shaobo¹, YANG Bo¹, XU Bingyu^{2,3}, LI Zifan⁴, ZHANG Shijie¹

1. YinheHangtian (Beijing) Telecommunication Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China

2. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

3. Innovation Center for Satellite Communication System, CNSA, Beijing 100191, China

4. State Grid Information and Telecommunication Branch, Beijing 100761, China

Abstract: LEO (Low-earth-orbit) broadband satellite internet can provide a lot of user with all-time network coverage, broadband access and information transport service, which has the advantage of high capacity, broad band, low delay and high elasticity as space information network. This made the application service in vertical industry based on LEO satellite network become research hotspots. Based on the research and analysis of power grid communication demand, the application solution of power industry based on LEO broadband satellite internet were proposed, focused on three core business of power grid, included the power grid construction, power grid operation, and emergency rescue. Also, the design of system composition, workflow, and satellite terminal architecture were researched. Further, the transmission performance, continuous communication, and service switching of mobile satellite terminal were tested based on LEO broadband satellite network, which could provided low delay and high capacity for remote data transmission. The result was consultant significance for future application development and engineering implementation in power industry.

Keywords: LEO broadband satellite, satellite internet, power industry, satellite terminal

0 引言

卫星互联网是以太空域为承载空间, 以卫星和地面装置为关键节点, 以网络技术、航天技术、通信技术、数

据技术等为支撑的全球、全域、全时新型网络信息基础设施^[1-4]。低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) (以下简称低轨) 宽带卫星互联网与传统地面通信网络相互融合, 取长补短, 共同构建全球无缝覆盖的天地一体化综合通信网,

可有效解决地面网络覆盖盲区,满足用户无处不在的多种业务需求,具有大容量、大带宽、低时延、高弹性等空间信息网络优势^[5-10]。

近年来,低轨卫星互联网成为卫星通信领域发展的热点,国外已开展多个低轨互联网卫星星座建设,并在全球范围内提供商业化服务^[11-13]。其中,美国太空探索技术公司(SpaceX)提出了由4.2万颗低轨宽带通信卫星组成的“星链”网络计划。截至2022年7月,SpaceX已发射了约3000颗低轨宽带“星链”通信卫星,在全球五大洲36个国家开展卫星互联网业务,用户数量超过40万人,平均下行速率超过100 Mbit/s。与此同时,国外的OneWeb、Kuiper等星座计划也在积极筹备和建设中,OneWeb已发射428颗卫星,完成总星座规划的66%^[14-16]。

低轨卫星互联网的不断发展建设,使得卫星互联网垂直行业(电力、交通、海洋、应急等)的应用研究成为关注焦点^[17-19]。近年来,伴随中国特高压电网的快速发展,国家电网公司迫切需要大范围、低成本、全天候的监测手段,以及现场数据大空间远程传送能力^[20-22]。因此,充分发挥低轨卫星网络大带宽、大容量、广覆盖、低时延的空间信息网络优势,构建电网全范围、全时相、全状态感知和高可用、大容量的天地一体化融合电力通信网络,成为卫星互联网在电网业务领域应用拓展的重要方向。

1 电力行业的卫星应用需求

我国电网覆盖区域辽阔,自然地形复杂,全网的信息覆盖和电力安全保障面临严峻挑战。在发生自然灾害等突发事件时,需解决通信网络中断和通信覆盖缺乏的问题;伴随电网数字化业务的迅猛发展,电力业务范围不断扩大,需解决大规模终端设备数据远程接入电网数据中心的实时性问题^[23-24]。

新一代电力卫星通信系统主要服务于电网规划建设(基建施工管理、现场管控等)、电网生产运行(输电线路、变电站等)和电力应急救援(安监应急指挥和电力应急通信)三大场景,急需有效的大范围、低成本、全天候的通信手段,提供远距离、低时延和大容量的数据传输能力支撑。具体场景描述如下。

(1)在电网规划建设方面,基建项目现场存在点多、面广的特点,全公司每年在建施工现场超过2000个,施工人员超50万人。传统施工现场工程质量监控主要受工程管理人员经验的影响,尤其在大量偏远地区施工场地,公网服务不稳定,难以满足现代工程施工现场的实时动态监控要求。

(2)在电网生产运行方面,自然因素或人为因素造成电网基础设施的损坏,将严重影响电网的安全稳定运行。另外,传统人工巡检的方式存在巡检效率低下、人员管控困难、环境恶劣地区人员生命安全存在隐患等问题,亟须大范围、长周期的自动化巡检手段,对巡检人员提供有效、安全的管控措施,提升巡检作业效率。

(3)在电力应急救援方面,当前电力应急通信系统远端站点主要分布在省市公司所在区域,对于偏远地区突发事件支援响应难度较高,无法满足第一时间的应急指挥通信需求。为更好地应对灾害的发生,需要定期对电网易发区域、重点区域进行大范围普查,通过电力卫星通信系统实时掌握电力设备设施损毁情况和覆盖范围,指导应急抢险人员、物资调配;在灾后恢复重建阶段全天候指导供电基础设施重建、现场人员资源协调等工作。

目前,国家电网公司已开始部署高轨卫星设备,如移动车载卫星VSAT系统、卫星电话等,但存在通信速率较低、传输时延较大、用户接入数量有限等问题,仅支持少量应急指挥终端临时通信服务^[25-27]。在处理大型复杂情况时,难以及时准确地与现场应急通信链路相连接,无法实现全方位、无死角的电网区域全覆盖,不能满足现场大量终端设备同时接入需求。此外,国家电网公司目前采用的卫星技术无法实现对电网状态的实时感知,如全域变电站的环境监测、人员及装备的实时定位、应急场景下灾区影像感测等多源、大容量时空观测数据的采集与分析。

由上述分析可知,当前电力通信系统中卫星通信网络全部依靠高轨卫星,受限于卫星数量和高度,导致可接入的终端数、数据交互时延和实际使用传输带宽难以满足新型电力系统发展需求。例如,针对电网规划建设场景下的基建环境实时监测具体任务,海量电网互联采集终端(可达亿级数量)的接入需求是当前电力通信系统实际使用的高轨卫星带宽容量难以支撑的;针对电力应急救援具体任务,高轨卫星的秒级回传时延严重影响电力应急救援、远程指挥调度、无人机时敏控制与遥操作等实时交互应用效果。

因此,基于高低轨融合的电力卫星通信网络发展迫在眉睫。

2 面向电网业务的低轨卫星应用方案

2.1 方案介绍

结合国家电网公司数字化转型和构建新一代卫星通信体系需求,探索先进通信技术与电网业务的综合应用,开展电力终端设备与低轨宽带卫星网络联通方案设计和

测试,重点验证在无地面公网环境下低轨网络搭载电力业务的科学性、可行性和实用性。本节提出了基于低轨宽带卫星网络的电网规划建设、电网生产运行和电力应急救援的卫星应用方案。

图1描述了电网规划建设场景的卫星应用方案。通过低轨卫星网络的连续覆盖,实现在无公网条件下为基建现场施工区域提供稳定的通信服务,满足基建管理系统数据传输需求。基建现场通过部署手持终端、机械监测终端、现场环境监测终端等,例如无人机载平台通信终端可实时采集施工现场人员、机械、设备、环境、车辆的上报信息,实现对关键人员到岗到位、现场车辆管理、施工现场作业环境监测、施工作业安全督察等功能。另外,卫星网络搭载的通信载荷和遥感载荷,可为选址勘测现场提供通信、遥感融合应用服务,满足无公网地区工程勘察设计现场语音、数据业务交互需求;现场勘测情况等态势感知和图像获取,通过卫星一跳或多跳传回至地面中心站,并通过光纤专线接入数据中心。

图2描述了电网生产运行场景的卫星应用方案。通过低轨卫星网络连续覆盖实现无公网区域输电线路监测通信,提供大带宽、海量物联和专网应用服务,满足地质灾害监测、杆塔倾斜监测、风偏舞动监测的物联网传感器,气象监测模块,巡检无人机等不同终端设备的宽/窄带卫星

通信需求。将低轨卫星、无人机和地面传感器等多种监测手段相融合,实现电网“天空地”全范围、全时相、全状态的一体化感知,及时获取各类传感器的监测信息,提高一线巡检人员工作效率,节约运维时间。采用专线方式将落地低轨卫星信关站的数据传输至中心站,并部署低轨卫星综合网管系统,负责对系统内低轨卫星信关站进行统一监控、管理以及调度。

图3描述了电力应急救援场景的卫星应用方案。通过低轨卫星网络的连续覆盖,以及在应急现场部署的车载、无人机载“动中通”卫星终端以及单兵小站等,提供电力内外网接入、灾情遥感监测、灾情评估/预警等能力,快速构建直连应急指挥中心的可靠卫星宽带回传通道,实现“三断”区域应急抢修、重大救援活动通信保障;通过在长航时无人机通信平台上部署专网基站设备,提供现场大规模用户终端的快速接入能力支撑,实现灾难环境下的高效、快速组网和低时延应急通信网络部署,提升灾难应对反应速度。

2.2 低轨卫星网络的系统组成与工作流程

低轨卫星网络系统可划分为空间段、地面段和用户段3部分,由低轨宽带卫星星座、地面信关站、核心网和卫星互联网终端等组成。银河航天于2022年3月5日完成一箭6星发射,6颗低轨宽带通信卫星共轨道面,采用透

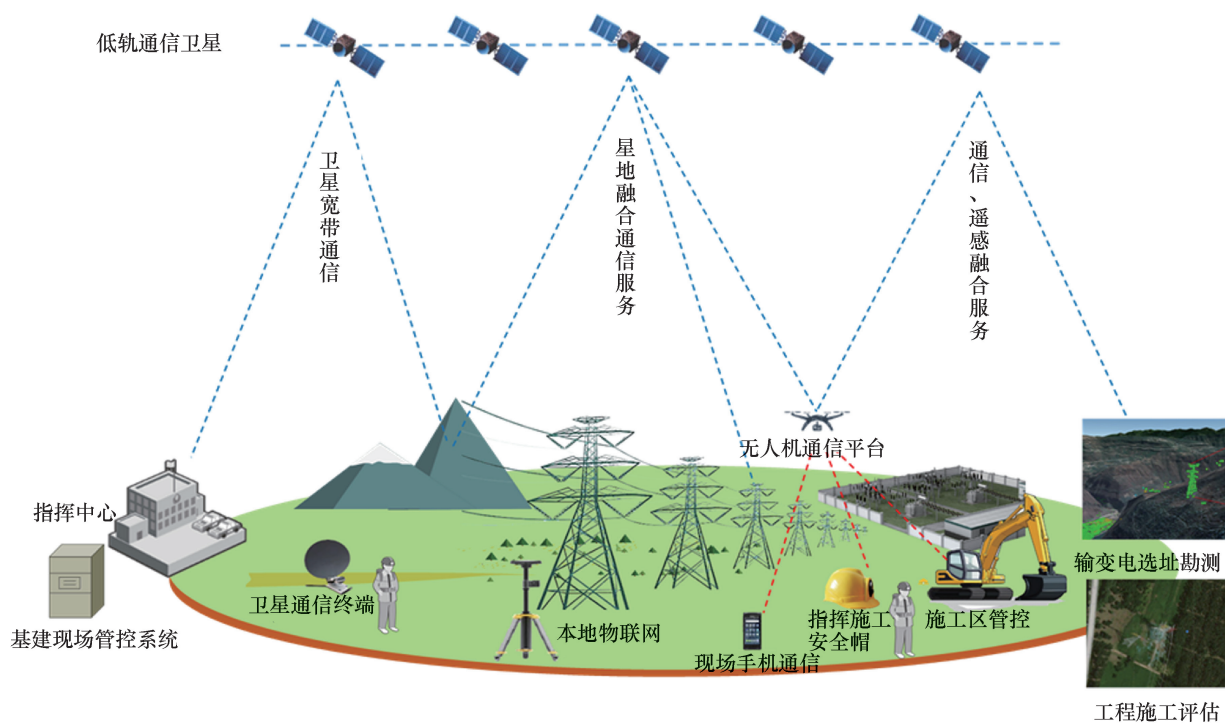


图1 电网规划建设场景的卫星应用方案

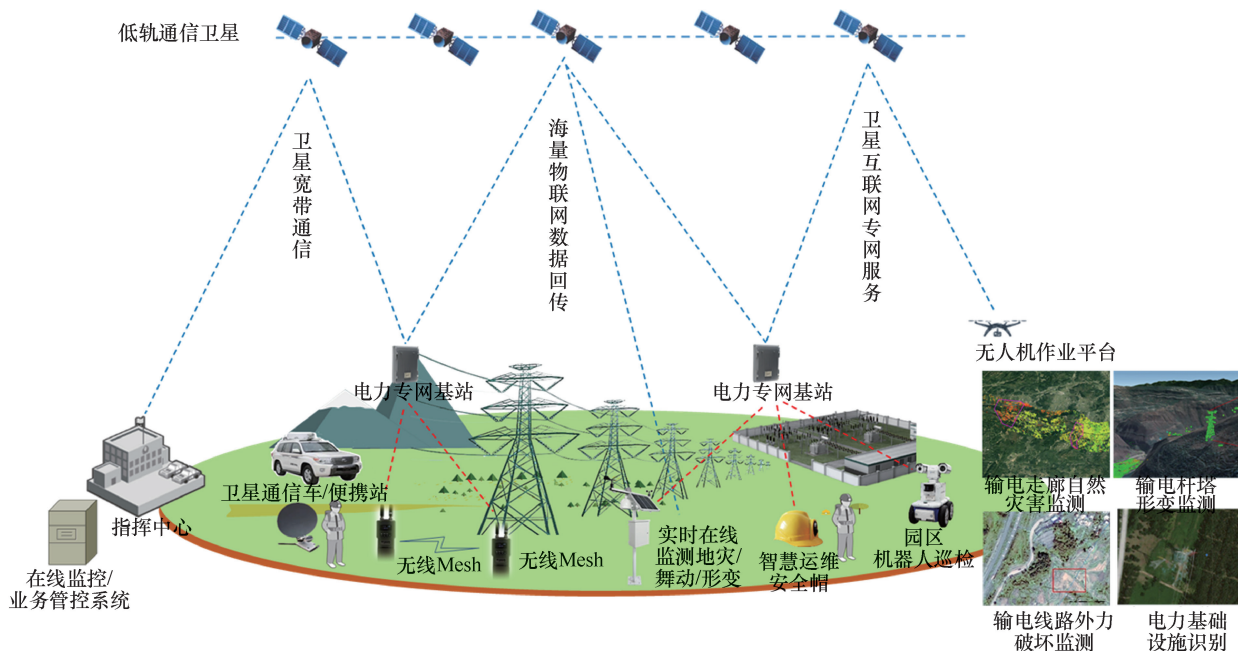


图2 电网生产运行场景的卫星应用方案

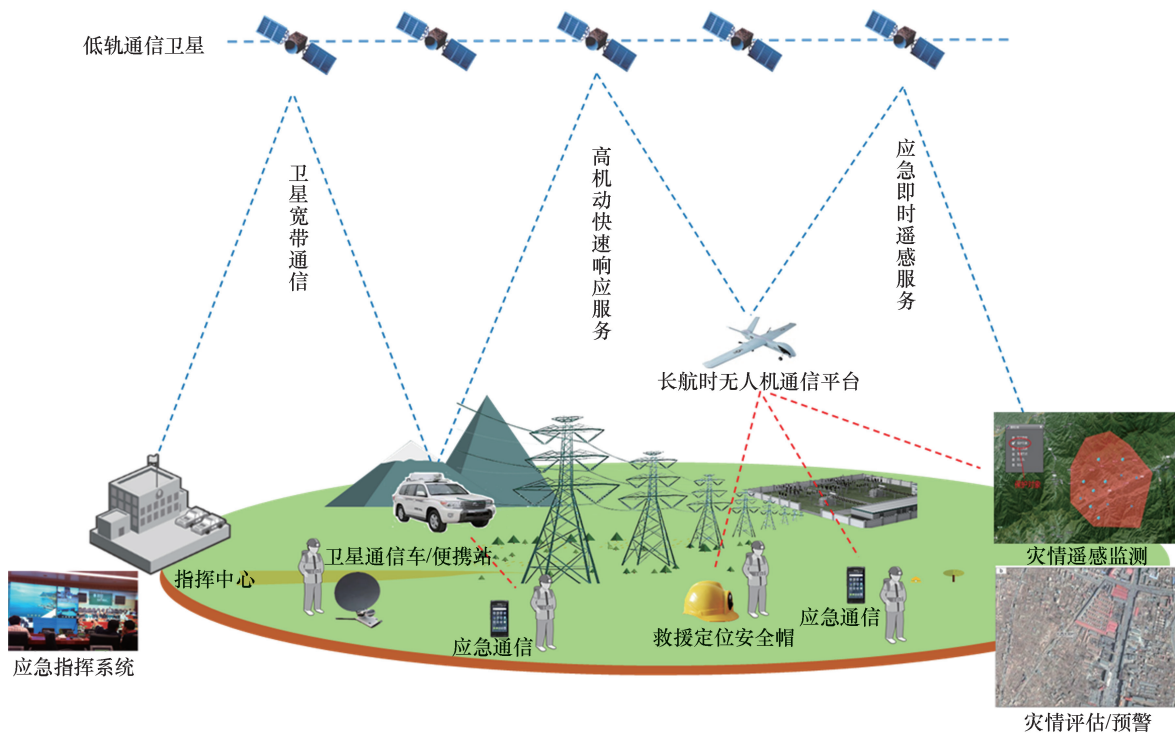


图3 电力应急救援卫星应用方案

明转发体制，卫星轨道高度为 500 km，轨道倾角为 63° ，与信关站、核心网、卫星互联网终端等，构成了国内首个星地融合的低轨宽带 Ka/Q/V 卫星互联网试验星座系统。为了有效支持电网业务的卫星应用落地，需要开展低轨卫星网络的系统建设，针对低轨卫星网络的接入网、承载网、

核心网进行合理的网元功能部署和 workflows 设计，系统组成如图 4 所示。

由图 4 可知，低轨卫星星座网络系统的实体网元有终端、卫星、信关站、核心网、测控站、网络管理平台。各网元之间的连接关系包括无线连接和有线连接两种方式，

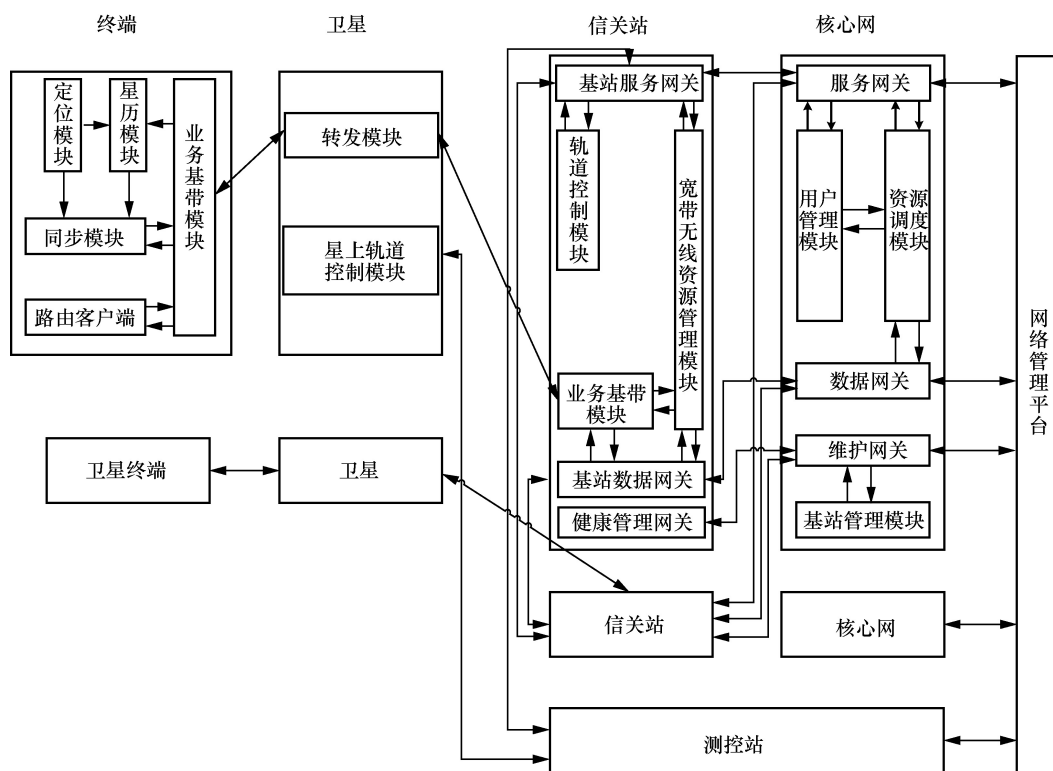


图4 低轨宽带卫星星座网络试验系统组成

其中终端、卫星、信关站之间是无线连接，基站内各模块与核心网内各模块是有线连接。系统各网元的功能模块和工作流程如下。

(1) 在终端侧，定位模块用于定位和授时。星历模块用于寄存和修改卫星的运行信息，与定位模块配合计算终端与卫星的相对位置，输出用于通信的偏移值和补偿系数等。同步模块用于同整个系统进行时钟同步、定时器同步、循环周期同步、星历同步、参数同步等。路由客户端用于终端路由表存储和路由算法承载。业务基带模块用于终端空中接口信息的收发。

(2) 在卫星侧，转发模块用于变频和转发地面基站发出的经过调制后的无线信号，以及卫星终端发出的经过调制后的无线信号。星上轨道控制模块用于收发遥测数据和接收测控指令。

(3) 在信关站侧，业务基带模块用于调制信号的收发。宽带无线资源管理模块用于管理和控制无线资源分配给终端，并向核心网发送资源使用报告和请求消息。轨道控制模块用于同步和发送测控信息，并由基带广播下发给终端。基站服务网关用于寄存到终端和到地面基站的路由表信息、终端到卫星的路由表信息以及承载路由算法，用于转发控制面的信令消息。基站数据网关用于寄存到终端

和到地面基站的路由表信息以及承载路由算法，用于转发用户面的应用数据。健康管理网关用于地面基站系统健康数据采集和维护消息的收发。

(4) 在核心网侧，资源调度模块用于规划调度各个基站的资源。用户管理模块用于所有开户用户的信息管理。基站管理模块用于连接到核心网内的所有基站的状态信息的管控。服务网关用于寄存地面基站和核心网之间的路由表信息和承载路由算法，完成控制面信令消息的转发。数据网关用于寄存地面基站和核心网之间的路由表信息和承载路由算法，完成用户面数据的转发。维护网关用于寄存地面基站和核心网之间的路由表信息和承载路由算法，完成基站维护消息的转发。网络管理平台用于管理、操作、维护终端、基站和核心网设备。

2.3 低轨卫星网络的终端架构设计

根据电网业务场景通信需求和平台约束，低轨卫星互联网终端由低剖面 Ka 频段多阵元相控阵天线、低轨通信基带和应用单元等组成，业务类型包括应急通信以及智能巡检 1080p 视频传输及其他数据通信。图 5 给出了低轨卫星网络的小型化平台通信终端架构设计。

由图 5 可知，低轨卫星终端的天线单元采用多阵元相控阵天线技术，实现波束的大范围快速切换，能够根据接

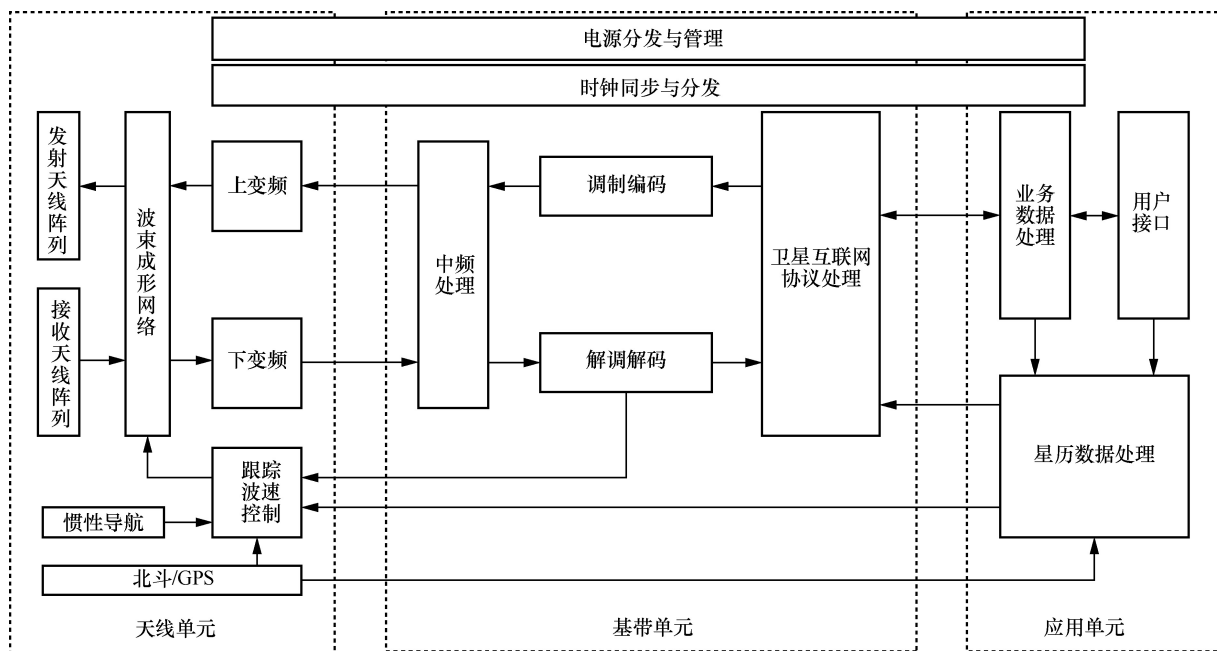


图5 低轨卫星网络的小型化平台通信终端架构设计

收到的天线指向信息，通过波控实现电扫波束的敏捷切换，快速指向过境的低轨通信卫星，建立通信链路，并在程控跟踪过程中，实时接收卫星的射频信号，同时发射功放输出信号。低轨卫星终端的通信基带单元主要完成从卫星前向链路中接收载波信号，下变频到 L 频段，解调信关站发送的数据、音视频、网管命令等信息，以及在系统回传链路中将用户数据调制到 L 频段，经功放、天线将要传送的数据发往信关站。低轨卫星终端的应用单元配置了异构卫星网络（包括高轨卫星网络、低轨卫星网络等）业务决策调度功能模块，可根据业务需求和异构卫星网络的卫星可用时间、波束带宽资源等因素，灵活调配异构卫星网络通信链路，自动进行链路切换和网络链路快速配置，实现通过异构组网卫星任意通道的快速网络接入，确保卫星终端的高可用性和业务连续性。

3 低轨卫星网络的传输性能测试

在低轨卫星网络的电网业务传输性能测试中，基于银河航天低轨宽带星座网络试验系统，构建了星地融合的通信传输验证平台，开展了“动中通”卫星终端传输性能、连续通信和异构卫星网络业务切换等通信服务质量测试。

本次外场测试主要针对电网建设、线路巡检、应急救援以及计量采集 4 类核心电力应用场景，面向单兵便携终端等业务设备卫星网络接入的具体任务开展低轨宽带网络通道搭载现有电力业务终端性能测试验证，包括高清音

视频（智能布控球、智能安全帽）、实时文字/语音（个人手机、手持终端）以及电网非实时采集（智能融合终端）。测试设备包括智能调度一体机、智能头盔、智能布控球以及智能融合终端等。其中智能调度一体机、智能安全帽和智能布控球对传输的速率、时延和稳定性都有较高要求，尤其是大量视频回传数据需要对终端上行信道分配更高的带宽资源。在信关站部署一台服务器作为模拟主站。电力业务终端通过便携式融合调度一体机、Wi-Fi 路由器等方式接入低轨卫星终端，经低轨宽带网络转发后落地接入地面信关站，最后通过内部局域网/外部互联网接入模拟主站。电力业务终端与低轨宽带卫星系统外场测试设备部署方案如图 6 所示。

（1）传输性能测试

以银河航天低轨宽带卫星试验星座为例，搭建电网业务设备与低轨卫星终端、低轨宽带卫星、信关站主站设备组网通信传输验证平台，分别开展智能调度一体机通信性能、智能布控球音视频传输、智能安全帽音视频传输、前后方会商、智能融合终端传输等传输性能测试。图 7 和图 8 分别给出了外场测试卫星终端与信关站模拟主站之间的通信速率和传输时延测试结果。

由图 7 和图 8 可知，基于低轨卫星的端到端通信速率约 40 Mbit/s，传输时延约 40 ms，验证了后方模拟主站能够发起会议，邀请前方便携式融合调度一体机入会进行高清音视频通话，以及能够看到便携式融合调度一体机推送

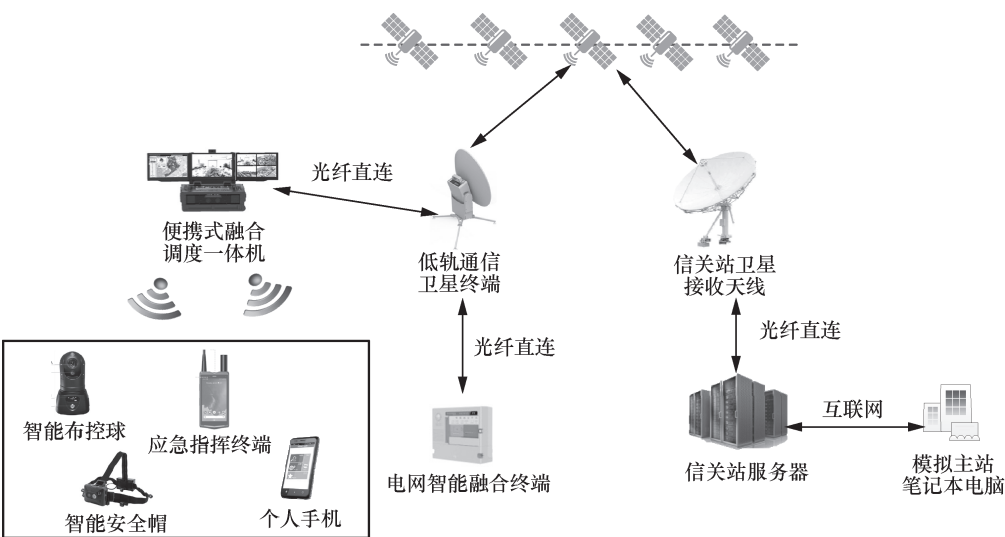


图 6 电力业务终端与低轨宽带卫星系统外场测试设备部署方案



图 7 外场测试卫星终端与信关站模拟主站之间的通信速率测试结果

的应急现场多台个人终端实时并发接入视频（如智能安全帽、单兵便携终端）等业务实现的可行性。

```
来自 192.168.91.200 的回复: 字节=32 时间=38ms TTL=63
来自 192.168.91.200 的回复: 字节=32 时间=37ms TTL=63
来自 192.168.91.200 的回复: 字节=32 时间=41ms TTL=63
来自 192.168.91.200 的回复: 字节=32 时间=33ms TTL=63
来自 192.168.91.200 的回复: 字节=32 时间=43ms TTL=63
来自 192.168.91.200 的回复: 字节=32 时间=46ms TTL=63
来自 192.168.91.200 的回复: 字节=32 时间=34ms TTL=63
来自 192.168.91.200 的回复: 字节=32 时间=40ms TTL=63
来自 192.168.91.200 的回复: 字节=32 时间=44ms TTL=63
来自 192.168.91.200 的回复: 字节=32 时间=40ms TTL=63
来自 192.168.91.200 的回复: 字节=32 时间=34ms TTL=63
```

图8 外场测试卫星终端与信关站模拟
主站之间的传输时延测试结果

实测结果表明，低轨卫星的低时延通信能力能够较好地满足电网业务中远程指挥调度、远程无人机精确控制与遥操作等实时交互的时敏通信要求；低轨卫星的宽带通信能力能够较好地满足电力现场大量终端设备同时接入的宽带传输要求，有效解决目前高轨卫星链路速率低、时延大、用户接入数量不足等问题。

此外，本次传输性能测试主要针对电网业务场景和电网业务终端，通过分析电力业务终端组网接入与业务传输指标要求，可对应为通信带宽、通信速率和传输时延等关键通信指标参数；测试记录数据包括通道带宽、视频传输速率、业务端到端通信时延和数据流速控制等。若其他垂直行业有类似的业务场景，如应急通信或远程音视频回传等需求，可以结合其实际业务应用终端能力和组网规模，参考本测试方案及测试结果完成具体场景任务的设备部署与组网通信能力验证。

（2）连续通信测试

图9给出了0.45 m“动中通”卫星终端在车速120 km/h下的公路实测结果，包括天线跟踪能力和终端连续通信能力验证。

由图9可知，在实际动态跑车条件下，低轨“动中通”终端根据卫星星历、终端位置、信号测量等信息，通过相控阵天线电扫波束捷变，可完成对接续覆盖低轨卫星的连续稳定跟踪和快速信号锁定，天线跟踪精度较高，信号接收电平误差低于1 dB；在对卫星终端进行连续通信测试中，具备双通道处理能力的低轨“动中通”终端按时间先后顺序，依次与6颗同轨道的低轨宽带卫星建立了稳定的通信链路，链路信噪比SNR高于10 dB，通信质量稳定，卫星终端连续通信时长高于20 min，实现了在低轨卫星接续覆盖过程中的无缝切换，能够较好地满足电力巡线场景任务等大范围机动条件下的宽带、稳定、连续卫星通信需求。

（3）业务切换测试

为了向电网业务提供高可用、高可靠和全时连续的天基信息保障能力，卫星终端的业务决策调度功能模块需实现高轨卫星与低轨卫星网络之间、低轨卫星与低轨卫星网络之间的异构组网和融合通信。表1和表2给出了卫星终端在45 Mbit/s速率配置下的高、低轨卫星网络业务切换场景测试结果。

卫星终端的业务决策调度功能模块通过高精度星历预报进行高低轨卫星链路切换控制，每间隔1 s与异构卫星网络进行网络连通测试。其中低轨链路优先级设置较



图9 0.45 m“动中通”卫星终端在车速120 km/h下的公路实测结果

高,当有低轨卫星覆盖时,卫星终端优先通过低轨卫星网络进行业务传输,卫星终端与低轨信关站侧主站设备之间的网络连通测试时延约 40 ms。当低轨卫星即将过境和出境时,卫星终端的业务决策调度功能模块执行链路切换,因此当没有低轨卫星覆盖时,卫星终端通过高轨卫星网络进行业务传输,卫星终端与高轨信关站侧主站设备之间的网络连通测试时延约为 670 ms。

表 1 高轨卫星网络至低轨卫星网络业务切换场景测试

测试时间	速率配置	网络连通测试时延/ms	切换触发信号
10~11 s	45 Mbit/s	679	1
11~12 s	45 Mbit/s	681	1
12~13 s	45 Mbit/s	688	1
13~14 s	45 Mbit/s	683	1
14~15 s	45 Mbit/s	None	0
15~16 s	45 Mbit/s	44	0
16~17 s	45 Mbit/s	45	0
17~18 s	45 Mbit/s	38	0
18~19 s	45 Mbit/s	34	0

表 2 低轨卫星网络至高轨卫星网络业务切换场景测试

测试时间	速率配置	网络连通测试时延/ms	切换触发信号
1 190~1 191 s	45 Mbit/s	36	0
1 191~1 192 s	45 Mbit/s	39	0
1 192~1 193 s	45 Mbit/s	43	0
1 193~1 194 s	45 Mbit/s	46	0
1 194~1 195 s	45 Mbit/s	None	1
1 195~1 196 s	45 Mbit/s	692	1
1 196~1 197 s	45 Mbit/s	661	1
1 197~1 198 s	45 Mbit/s	678	1
1 198~1 199 s	45 Mbit/s	679	1

由表 1 可知,当测试时间显示为“14~15 s”时,终端根据星历预报进行高轨向低轨的网络切换,此时业务决策调度功能模块立即启动切换触发信号,由“1”变为“0”,并在 14~15 s 内自动完成低轨卫星链路通道参数配置和波束指向切换,卫星终端执行高轨切换至低轨卫星网络连通测试。当测试时间显示为“15~16 s”时,卫星终端与低轨卫星网络连通测试时延为 44 ms,表示终端完成了与低轨卫星网络的连通,并接入了低轨卫星网络,继续进行业务传输。

由表 2 可知,当测试时间显示为“1 194~1 195 s”时,

卫星终端低轨网络连通测试失败,显示“None”,表示当前无低轨卫星网络覆盖,终端根据星历预报进行低轨向高轨的网络切换,此时业务决策调度功能模块立即启动切换触发信号,由“0”变为“1”,并在 1 194~1 195 s 内自动完成高轨卫星链路通道参数配置和波束指向切换,卫星终端执行低轨切换至高轨卫星网络的连通测试。当测试时间显示为“1 195~1 196 s”时,卫星终端与高轨卫星网络连通测试时延为 692 ms,表示终端完成了与高轨卫星网络的连通,并接入了高轨卫星网络,继续进行业务传输。

测试结果表明,卫星终端完成高低轨异构卫星网络业务链路切换时间约为 1 s,该功能也适用于低轨卫星与低轨卫星异构组网下的业务切换场景,确保了卫星终端在多重异构卫星网络覆盖下的高可用性和业务连续性,能够较好地满足电网业务全域、全时应用需求。

参考文献:

- [1] 汪春霆,翟立君,徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 493-504.
WANG C T, ZHAI L J, XU X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 493-504.
- [2] 孙晨华. 天基传输网络和天地一体化信息网络发展现状与问题思考[J]. 无线电工程, 2017, 47(1): 1-6.
SUN C H. Research status and problems for space-based transmission network and space-ground integrated information network[J]. Radio Engineering, 2017, 47(1): 1-6.
- [3] 孙晨华,肖永伟,赵伟松,等. 天地一体化信息网络低轨移动及宽带通信星座发展设想[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 43-52.
SUN C H, XIAO Y W, ZHAO W S, et al. Development conception of space-ground integrated information network LEO mobile and broadband Internet constellation[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(12): 43-52.
- [4] 徐晖,缪德山,康绍莉,等. 面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 2-10.
XU H, MIAO D S, KANG S L, et al. Network architecture and key technologies for the integrated satellite and terrestrial mobile communication system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 2-10.
- [5] XU S, WANG X W, HUANG M. Software-defined next-generation satellite networks: architecture, challenges, and solutions[J]. IEEE

- Access, 2018, 6: 4027-4041.
- [6] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821[S]. 2019.
- [7] 3GPP. Study on using Satellite Access in 5G: TR 22.822[S]. 2018.
- [8] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non terrestrial networks: TR 22.811[S]. 2018.
- [9] MARAL G, BOUSQUET M, SUN Z L. Satellite communications Systems[M]. Chichester: Wiley, 2020.
- [10] ZHU X M, JIANG C X. Integrated satellite-terrestrial networks toward 6G: architectures, applications, and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(1): 437-461.
- [11] DEL PORTILLO I, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.
- [12] 刘韵洁, 黄韬, 张晨, 等. 未来网络的发展趋势与机遇[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(1): 1-5.
- LIU Y J, HUANG T, ZHANG C, et al. Challenges and opportunities of future network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(1): 1-5.
- [13] 王韵涵. 2021 年国外通信卫星发展综述[J]. 国际太空, 2022(2): 42-47.
- WANG Y H. Summary of the development of foreign communication satellites in 2021[J]. Space International, 2022(2): 42-47.
- [14] 刘旭光, 钱志升, 周继航, 等. “星链”卫星系统及国内卫星互联网星座发展思考[J]. 通信技术, 2022, 55(2): 197-204.
- LIU X G, QIAN Z S, ZHOU J H, et al. Thinking on the development of “starlink” satellite system and domestic satellite Internet constellation[J]. Communications Technology, 2022, 55(2): 197-204.
- [15] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, CONTI M, et al. Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2624-2639.
- [16] 肖永伟, 孙晨华, 赵伟松. 低轨通信星座发展的思考[J]. 国际太空, 2018(11): 24-32.
- XIAO Y W, SUN C H, ZHAO W S. Discussion on the problem of LEO communication constellation system design[J]. Space International, 2018(11): 24-32.
- [17] 中国信息通信研究院, GSMA. 中国 5G 垂直行业应用案例[R]. 2020.
- China Academy of Information and Communications Technology, GSMA. Application cases of 5G vertical industries in China[R]. 2020.
- [18] 沈俊, 高卫斌, 张更新. 低轨卫星物联网的发展背景、业务特点和技术挑战[J]. 电信科学, 2019, 35(5): 113-119.
- SHEN J, GAO W B, ZHANG G X. Developing background, service characteristics and challenges of LEO IoT[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(5): 113-119.
- [19] 纪明星. 天通一号卫星移动通信系统市场及应用分析[J]. 卫星与网络, 2018(4): 42-43.
- JI M X. Market and application analysis of Tiantong-1 satellite mobile communication system[J]. Satellite & Network, 2018(4): 42-43.
- [20] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
- LI M J. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [21] 中国南方电网有限责任公司. 南方电网公司发布白皮书数字电网推动构建新型电力系统 [EB]. (2021-04-27)[2022-03-15].
- China Southern Power Grid. China Southern Power Grid releases white paper on digital power grid promoting the construction of new power system with new energy as the main body[EB]. (2021-04-27) [2022-03-15].
- [22] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望: 试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11.
- ZHOU X X, CHEN S Y, LU Z X. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11.
- [23] 王晓辉, 刘鹏, 季知祥, 等. 能源互联网共享运营平台关键技术及应用[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(1): 46-53.
- WANG X H, LIU P, JI Z X, et al. Key technology and application of sharing operation platform for energy Internet[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(1): 46-53.
- [24] 冯超坤. 电力系统应急通信技术的应用研究[J]. 现代工业经济和信信息化, 2020, 10(12): 107-108.
- FENG C K. Research on application of emergency communication technology in power system[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2020, 10(12): 107-108.
- [25] 陈宇航, 梁文娟, 曾瑛. 电力应急通信系统中快速建链技术研究[J]. 通信技术, 2020, 53(11): 2713-2721.
- CHEN Y H, LIANG W J, ZENG Y. Fast link building technology

in power emergency communication system[J]. Communications Technology, 2020, 53(11): 2713-2721.

- [26] 孙晨华, 章劲松, 赵伟松, 等. 高低轨宽带卫星通信系统特点对比分析[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 505-510.

SUN C H, ZHANG J S, ZHAO W S, et al. Comparative analysis of GEO and LEO broadband satellite communication system[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 505-510.

- [27] 史俊潇, 吴慧. 基于异构组网的电力应急通信保障研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(7): 46-51.

SHI J X, WU H. Research on power emergency communication support based on heterogeneous network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(7): 46-51.

[作者简介]



朱亮 (1982—), 男, 博士, 银河航天(北京)通信技术有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信、卫星专网应用。



戚少博 (1983—), 男, 硕士, 银河航天(北京)通信技术有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信、移动通信。



杨波 (1986—), 男, 硕士, 银河航天(北京)通信技术有限公司工程师, 主要研究方向为卫星互联网、低轨相控阵终端。



徐冰玉 (1992—), 女, 博士, 中国信息通信研究院高级工程师, 主要研究方向为移动通信、卫星通信。



李子凡 (1990—), 男, 博士, 国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信、无线/有线通信、网络管理、卫星通信。



张世杰 (1979—), 男, 博士, 教授, 银河航天(北京)通信技术有限公司首席科学家, 主要研究方向为卫星总体设计、低轨卫星互联网等。