

巨型星座系统的网络运维与资源管控技术

周 笛¹, 盛 敏¹, 郝 琪¹, 李建东¹, 刘建平²

(1.西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071;

2.西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043)

摘 要: 随着星座系统整体规模的不断增大, 其服务能力逐步从传统的移动通信服务向宽带互联服务拓展, 从而对星座系统的运维与资源管控提出了新的要求。首先分析星座规模、资源动态性、资源故障等因素对巨型星座系统面向性能管理的网络运维与资源管控带来的挑战, 从业务预测、资源感知与维护及动态资源切片方面探讨面向巨型星座系统的网络运维与资源管控关键技术, 并提出智能的网络管控架构来实现巨型星座系统的轻量级运维与资源管控, 为天地一体化信息网络的运维及资源管控技术奠定理论基础。

关键词: 巨型星座; 天地一体化信息网络; 高效运维; 资源管控

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200103

Network Operation, Maintenance and Resource Management in Mega Constellation System

ZHOU Di¹, SHENG Min¹, HAO Qi¹, LI Jiandong¹, LIU Jianping²

1.The State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China

2.The State Key Laboratory of Astronautic Dynamic, Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China

Abstract: As the overall scale of the constellation system continues to increase, its service capabilities are gradually expanding from traditional mobile communication services to broadband interconnection services, which puts forward new requirements for the operation, maintenance and resource management in the satellite constellation system. The challenges brought by constellation scale, resource dynamics, and resource failure for the performance management-oriented network operation and maintenance and resource management in mega constellation system (MCS) were first analyzed. The key technologies of network operation, maintenance and resource management for MCS were discussed from the aspects of traffic prediction and resource perception and maintenance and dynamic resource slicing. An intelligent network management and control architecture was proposed to realize lightweight operation and maintenance and resource management for MCS, laying a theoretical foundation for the efficient network operation and maintenance and resource management technology for future space-terrestrial integrated networks.

Key Words: mega constellation, space-integrated-ground information network, efficient operation and maintenance, resource management

1 引言

以卫星星座系统为重要组成部分的天地一体化信息网络, 是支撑我国经济发展及国防信息化建设的重要网络基础设施, 已成为我国“新基建”的重点发展方向。卫星星座系统由多轨道卫星星座将陆基、空基网络连接起来,

从而覆盖全球的一体化网络, 可以实现移动通信服务、大连接的物联网服务以及增强导航服务等需求^[1-3]。

随着全球在轨星座数目的不断增加, 星座规模趋向巨型化发展, 系统的服务能力逐步从传统的移动通信服务向宽带互联服务拓展。其中典型星座代表有SpaceX系

收稿日期: 2020-08-15; **修回日期:** 2020-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U19B2025, No.91638202, No.61725103); 中国博士后科学基金项目 (No.2019TQ0241, No.2020M673344); 中央高校新教师创新基金 (No.XJS200117)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.91638202, No.U19B2025, No.61725103); The China Postdoctoral Science Foundation (No.2019TQ0241, No.2020M673344); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.XJS200117)

统,已发射600余颗卫星,预计将达到4万颗。因此,巨型星座的网络性能管理成为保障网络稳健性以及服务能力的重要因素。巨型星座系统的异构性及小型化等因素使得卫星平台稳定性较差,出现节点或星座故障的概率相比大平台卫星要大,此外,受空间环境影响,易造成不确定性的设备损坏等情况。当前的卫星网络尚不具备健全的自检测功能,当某些卫星出现故障时,不能及时反馈故障信息并进行故障管理,大多数卫星故障分析主要依赖于卫星状态信息回传到测控站,地面进行分析获知卫星健康状态,与此同时,通过测控指令上注方式解决大部分的故障问题,如设备故障的重启动操作等。受限于测控站建设敏感性和卫星测控频段用户密度等,地面测控网无法实现对低轨卫星的全时段观测。因此,亟需通过设计高效的网络运维技术,构建天基测控网辅助地面测控站实现对巨型星座卫星的全时段状态监测,同时设计高效的业务管理机制,实现在网络业务不变、业务需求变化以及网络资源故障时对网络性能的高效管理。

网络的稳健运行最终是为了高效的服务业务需求,具体而言,通过网络运维获取业务的状态信息以及网络状态信息,实现业务管理与网络维护,例如对网络资源状态的监测、网络设备状态的监测等,为进一步业务与资源的匹配提供基础。若网络中某节点或资源突发故障,网络可通过高效的运维技术进行故障响应与处置,进一步通过资源管控手段来重构有效资源解决业务对故障资源的需求,因此,网络运维是资源管控的基础。与此同时,巨型星座网络包含多个异构星座,具有天然的异构特性以及节点高动态,资源属性、能力差异大,资源状态时变、时空尺度大的特点,使其发展面临资源调度协同难、资源使用率低的问题^[4-6]。与此同时,卫星运动导致的通信链路信道质量高动态性、卫星太阳能获取的高动态性^[7-9],以及云层覆盖的动态性使得光学成像卫星的成像过程具有动态性^[10-11]。网络资源状态和环境变化的不确定性将导致资源调度时间尺度和环境变化时间尺度不匹配,导致资源调度响应慢、资源使用效率低。对此亟需一种实时智能的巨型星座系统,设计面向资源状态时变的智能资源调度策略,缓解资源调度策略变化与资源状态变化之间的迟滞,提高资源调度策略的适变能力。

综上所述,为了实现高效的网络性能管理,保障巨型星座系统的稳健性以及对外服务的稳定服务,需要有效的资源调度技术来重构资源及时响应和解决业务对故障资源的需求,同时资源管控的合理运用也是服务多元化动态业务需求和提高巨型星座系统资源利用率的关键因素^[12-13]。

2 巨型星座系统的运维与资源管控面临的挑战

未来面向巨型星座系统的天地一体化信息网络组成如图1所示,其中低轨卫星应用功能众多,且设计较简单,成本也相对较低,发送至太空中的数量预计将达到上万颗,由低轨卫星构成的巨型星座系统将成为协调地面设施和高空卫星的桥梁。但由于低轨卫星数量庞大,如何运维管控复杂的巨型星座网络实现高效的网络性能管理以及巨型星座网络多维资源的按需调配,都是亟需解决的问题。

2.1 面向巨型星座系统的高效网络性能管理

近几年卫星网络星座规模逐步走向巨型化,与此同时,卫星的小型化发展使得成本越来越低,导致卫星平台稳定性普遍不高。因此,节点和星座故障发现及处置、卫星控制需求将急剧增加。如何通过网络运维在业务需求不变、业务需求变化,以及网络出现资源故障时,实现高效的性能管理,保障业务的QoS需求是巨型星座系统实现星座自身稳定运行和星座对外稳定服务的重要问题。

目前,我国实际的卫星系统运维基本都是通过测控系统完成的,采用计算机辅助的人力解决星上故障,基本满足每天处理10次左右的故障。但在巨型星座系统中,假设每日平均故障率为2%,仍需要200次(1万颗卫星的情况下)以上的故障处置来保障系统的正常运行,仅靠人力显然无法支撑巨型星座系统内的多重故障处置,并且无法保证故障处置的时效性。同时当前卫星的自检测能力相对较弱,如果不能快速将卫星状态信息反馈到地面,则不能辅助地面的控制中心快速响应,即精确定位系统错误的原因和做出高速正确的调整控制。此外,通过地面测控感知网络状态或者上注指令解决网络故障的方式,随着星座规模的增加,测控站与卫星的时间窗匹配问题的复杂度呈指数级增长。与此同时,在网络运维过程中,如何在应对多维业务需求的动态变化时保持网络高效的性能管理也是保障网络稳健运行的核心问题,包括如何对业务数据进行监测、动态业务的预测、以及业务的统计特征等。

综上,如何通过采集实时监测的资源状态信息来应对某些故障,以及适配的业务管理方法实现网络高效的性能管理,从而保障网络自身的稳定以及对外服务的稳定性是面向巨型星座系统的网络运维所要面临的重要挑战之一。

2.2 网络多维资源调配与资源状态时变性的梯度适配

面向巨型星座系统的天地一体化信息网络中业务

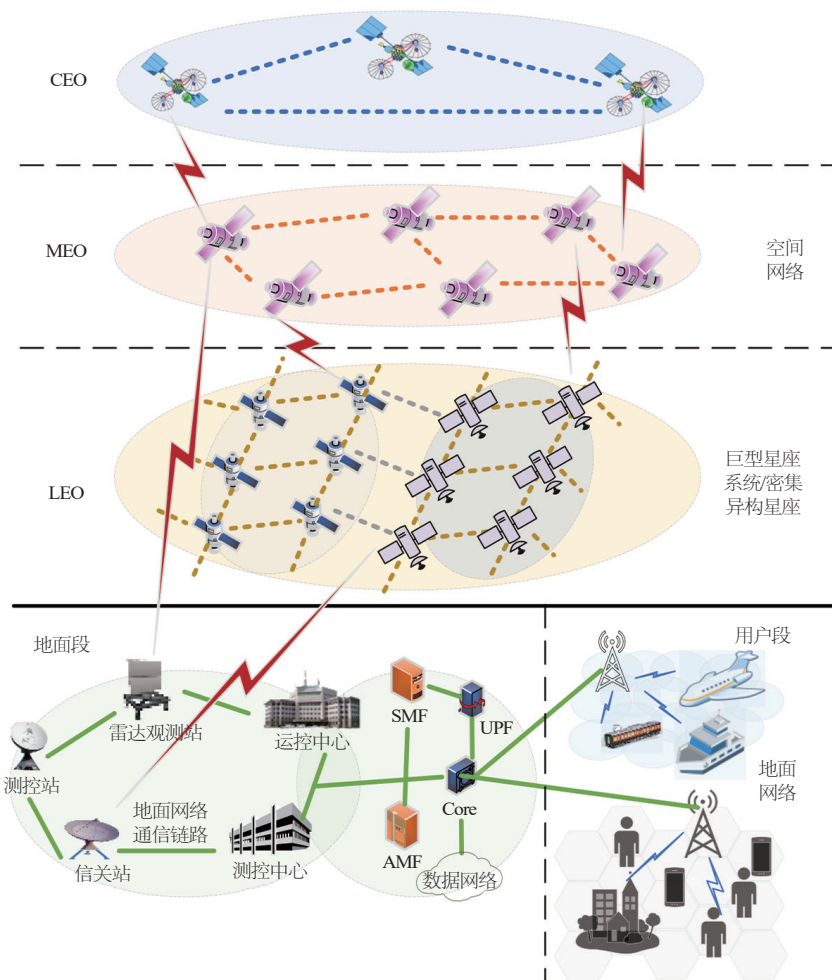


图1 面向巨型星座系统的天地一体化信息网络组成

的执行首先需要网络提供对外的稳定服务以及网络自身的稳定运行，并通过对网络及设备的实时监测和资源重构等手段来解决业务对故障资源的需求。为了服务多元化动态业务和重构资源，往往需要多维度的资源协同调度，然而网络环境复杂多变使得网络多维资源状态呈动态特性，导致资源分配结果滞后于资源状态的变化，即资源调度梯度与资源状态时变性梯度的失配，进一步使得分配结果无法满足系统的实际需求。具体来说，资源调度策略梯度指的是资源调度策略更新的尺度，即变化的尺度，而资源状态时变性梯度指的是资源状态变化的尺度。因此，资源调度策略更新尺度需要和资源状态信息的变化尺度保持一致性。例如当动态业务随机到达时，资源状态信息随巨型星座网络拓扑的更新以及环境的变化而不断变化，假设每10 min更新一次状态信息，则资源调度策略变化尺度为了保持与资源状态一致，需同步更新调度策略进行与资源状态的梯度适配。

综上，面对不断增长的动态业务需求，如何通过利用时变、异质、离散的天地一体化信息网络动态且有限的资源，设计面向时变资源状态的智能资源调度方法，探索资源调度策略梯度与资源状态梯度的适配机理，从而有效缓解资源调度策略变化与资源状态变化之间的迟滞，提升资源调度策略的适应能力，进而为保障网络中动态业务的服务连续性提供理论基础，是面向巨型星座系统的天地一体化信息网络所面临的重要挑战。

3 面向巨型星座系统的高效运维与资源管控关键技术

巨型星座网络运维的主要工作即通过高效的业务管理、状态监测、网络设备的管理以及网络能力的优化等，实现高效的网络性能管理，从而保障巨型星座系统自身的稳定运行以及对外的稳定服务。为了能够给各类业务提供实时可靠的服务，需要监测网络的实时状态信

息，特别是在网络发生故障时如何快速定位和排除等，都是网络运维中的关键问题。因此需要网络的高效运维来实现对各项网络性能指标的实时在线监测，并对网络承载的各类业务进行实时分析和透视，一旦出现网络性能下降或信息传输异常就进行故障定位^[14]。如图2所示，网络运维的目标是性能管理，主要包括业务管理和网络监控。具体而言，网络运维通过将业务管理中获取的业务时空变化信息和其统计特征，对资源管控中的切片方式进行技术指导，同时通过监测系统内的设备资源状态将实时的资源状态信息传递给资源管控，使得资源管控技术完成资源调度策略与资源状态信息的适配，从而高效地进行资源重构和资源分配等，将故障维护指令、重构策略等按需反馈给运维体系。本文基于网络运维和资源管控的联系，提出了3个方面的关键技术来应对上述巨型星座系统高效运维和资源管控面临的挑战，即基于业务特征挖掘的业务预测技术、网络状态的感知和维护技术以及面向多维业务的动态切片。

3.1 基于业务特征挖掘的业务预测技术

巨型星座系统支持的业务名称类别及业务特征见表1。

由表1可知，由于巨型星座网络融合了多种异构的低轨卫星网络，使得巨型星座网络的体系结构具有快速组网、灵活接入、全球覆盖、生存能力强^[15]等特点，从而扩大了可支持的业务范围，包括卫星物联网业务等密集连接类、应急通信等短时突发类、观测业务等大容量传输类业务。更衍生出了新型的业务及需求，使用户可随时随地无缝接入任何网络服务，包括在邮轮、飞机和高速火车上旅行等场景，即高速移动宽带类业务，以及超

表1 巨型星座系统支持的业务名称类别及业务特征

业务名称	业务类别	业务特征
超远程实时类	超远程医疗协作类 超远程机器控制类	超远程实时通信、高精度需求、高传输速率等
密集连接类	测控业务 物联网业务	信息精准性、载荷数据接收量大等
高速移动宽带类	智慧航空类	峰值速率高、传输时延小等
大容量传输类	观测业务 航空监测业务	传输速率高、传输容量大等
短时突发类	应急通信 入侵监测	应急响应快、响应时延小等

远程实时通信类业务。不同的业务类别具有不同的业务特征，同时这些业务根据自身性质呈现出各自的动态行为以及随机突发性。为了克服巨型卫星星座网络由于多类业务的强突发性而导致的网络拥塞等问题，需要对部分业务进行预测，观察业务生成的流量具有的概率统计特性，从而实现针对这些流量的特性及时响应，为业务动态分配资源，保证用户服务质量，提高网络资源的利用率。

近期SHENG等^[16]提出一种改进的隐马尔可夫模型来预测在软件定义的空间信息网络中业务的端到端流量，通过业务实际服从的泊松分布初始化模型的训练参数并应用一些约束条件来优化预测值。MORALES等^[17]通过虚拟网络拓扑利用数据分析进行重新配置，从而使拓扑结构适应当前流量和预测的流量，并提供稳健性和自适应的流量模型来模拟预测的流量。与此同时，JEREMY等^[18]在流量强度方面进行了研究，通过两种用于对系统中信源的聚合来动态地进行带宽分配，例如卫星链路等，以满足服务质量所需的最小资源量来降低成本。由于卫星网络中的

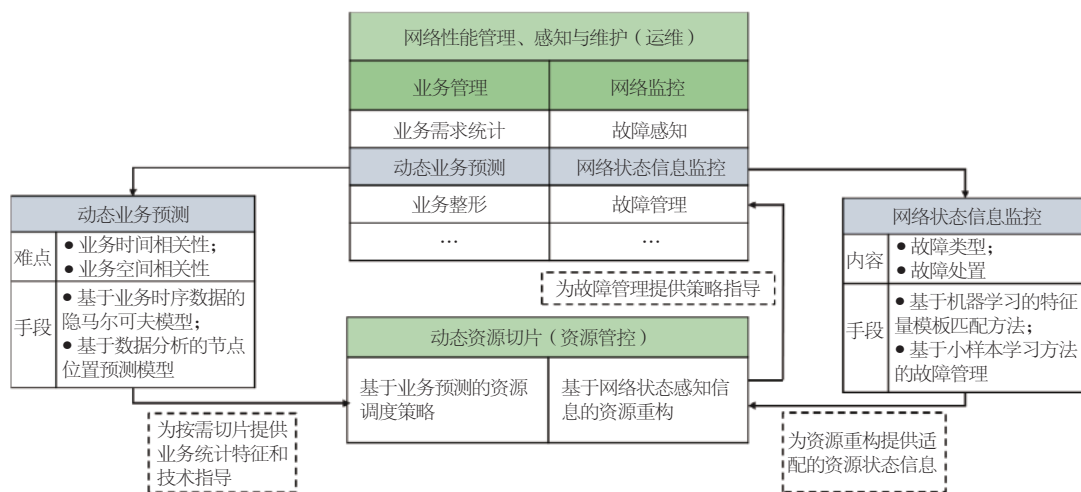


图2 巨型星座系统关键技术结构

业务信息具有相似的特性以及自身的特异性,首先可对其网络中的业务数据进行时间序列分解,分析各个节点业务数据,发现均呈现自相似的特点,而网络节点业务量时间上具有相关性。同时由于网络节点间业务量的频繁交互,节点间的业务量呈现了很高的相关性。即网络情境信息(业务量)具有时间相关性,且相关因子随时间间隔的增加而减小;网络情境信息(业务量)具有空间相关性,且空间相关因子以很大概率随距离的增加而减小。因此可根据节点的业务量对节点进行聚类分析,将相同类型的节点放在一起进行共同特征的提取,包括对节点业务量的历史信息和时间信息的提取等,来对网络中的共同属性进行特征挖掘。

网络中不同的节点均存在自身的特异性。节点这些特异性的存在是影响节点业务量的一个因素,因此必须通过这些特异性的特征对节点的业务量进行分析。巨型卫星星座网络中节点类型比较复杂,地面节点、空中节点、卫星节点可以作为不同节点的一个特异性特征;节点的位置是很重要的因素,由于节点是移动的,对节点下一时刻位置的预测,即从影响网络路由信息带来对节点业务量的影响,故节点的移动性也成为节点的特异性分析。节点控制信息占节点业务量的一部分,可以单独作为一个特征,通过这些特异性的特征来进行专有属性特征挖掘。因此,为了高效的资源分配及资源调度,业务的预测是必不可少的,在基于业务特征挖掘的业务预测技术上,可知时间、空间上具有相关性以及各区域态势具有特异性。通过这两个特性,可对业务进行预测,使得巨型卫星星座网络可以高效、动态地切片并按需分配资源。

3.2 面向大规模星座系统的卫星及网络状态感知与维护技术

当前卫星网络的运维管控是通过地面测控系统完成的,受限于测控站建设敏感性和卫星测控频段用户密度等,地面测控网无法实现对低轨卫星的全时段观测。考虑到信关站馈电链路速率高、全球布站的优势,通过联合测控系统能够保证遥测数据24 h无缝回传,为卫星故障处置提供基本的遥测数据支撑。此外,从提高故障处置速度、降低低轨卫星存储需求和提高异轨星间链路稳定性角度出发,设计高/低搭配的星座结构,能够充分利用高轨卫星大平台、大载荷能力的特点,使其扮演星基数据高速交换核心路由节点,以及卫星常见故障智能分析处置节点的角色。能够对常见的卫星单粒子翻转、功放推饱和等故障,直接由高轨卫星进行故障诊断和处置动作匹配,控制低轨卫星进行快速重启复位;少量不能

诊断的故障,提交地面测控中心进行处置。同时利用低轨卫星信号传播路径短、空分复用特性优良等特点,构建面向普通用户的高速大容量通信链路,实现全方位、快速地感知卫星网络状态。因此通过利用高低轨星座与测控协同的卫星网络状态感知策略可以实现快速、精准地感知卫星网络的运行状态。

图3展示了巨型星座系统性能管理中出现的故障类型,列举了一些常见的故障类型,例如网络故障、网络节点故障以及网络业务故障等,包含控制器故障、存储器溢出、网络路由失效、遥测等^[20-22],其分别对应网络性能管理中的网络状态监测,节点、链路状态监测以及业务管理。具体而言,属于网络故障的网络分割攻击,主要是在传输过程中利用某些节点的资源自私性向网络中不停发包,阻塞传输资源中的一些链路资源;而属于网络节点及链路故障的黑洞攻击,主要是恶意散布欺骗消息来改变传输资源参数,导致资源只出不回,类似一个黑洞^[23]。因此可通过高效的网络运维来进行实时监控,并同步有效的资源分配,实现在遭到恶意攻击时的网络反扑。

当卫星网络出现如上所述的故障时如何进行故障管理是网络运维的关键因素之一。关于基于机器学习的故障管理研究,崔丽华等^[24]设计了深度全连接神经网络模型,验证在故障预测中引入数据增强算法以平衡数据特征分布的有效性。实验结果表明,适当的数据增强可以有效提高深度学习算法对于告警与非告警的二分类预测效果,在增强数据集上可以提升5.5%的预测精准度;同时可以提高多故障场景的多分类预测效果,在增强数据集上可以提升4.69%的预测精准度。但该模型主要进行故障预测,而没有涉及故障处理方法的研究。楼丽琪等^[25]针对节点对监测数据报错较多但重要性不明的问題,提出并实现了基于机器学习的异常数据重要性量化分析算法,能够利用机器学习算法对异常数据重要性进行量化评估,得到异常数据的重要性权重。类似地,该工作同样致力于异常数据的研究而非故障排除的研究。因此,在网络运维的故障管理上,不仅需要预测故障的类型,也需要具备故障处理的能力,即需要融合卫星自身测量、星间观测、星地观测等多种异质观测结果,从卫星信号质量分析、卫星传感信息挖掘、卫星动态多尺度测量、卫星运行空间环境监测等多个维度,构建检测、预测、和学习模型,智能规划卫星异常处置、碰撞应急规避、轨道控制保持等关键动作,并以此为依据自动重构星座资源来保证星座QoS,实现用户无感的“卫星异常自动处置、星座资源自动重构”。

系统故障感知与维护的基本流程如图4所示,采用多

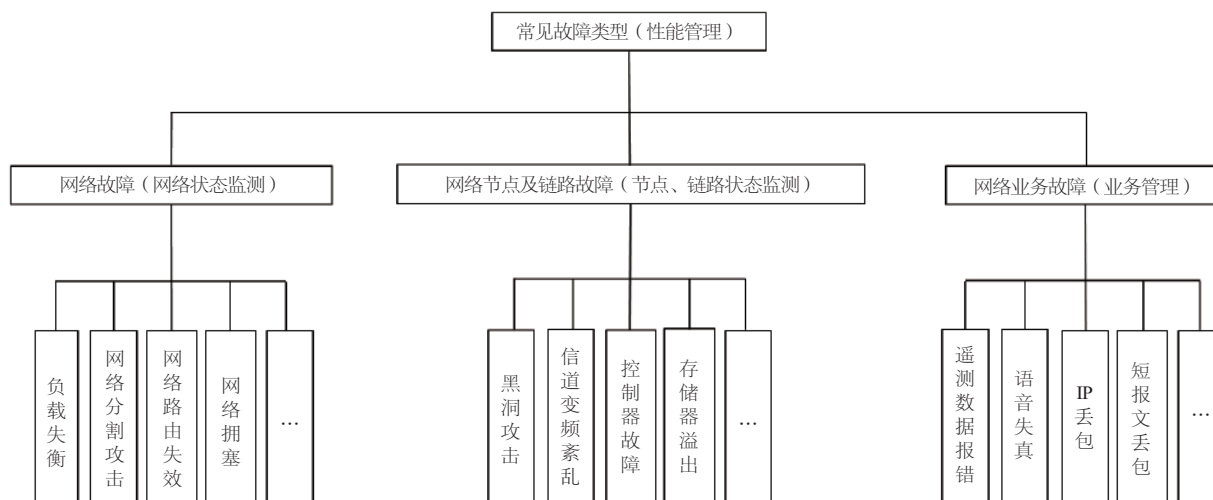


图3 巨型星座网络性能管理中常见的网络故障类型

层神经网络、卷积神经网络、强化学习等手段，描述卫星在轨时长、历次卫星状态采集、历次地面监测的卫星信号质量、空间环境，与卫星操控之间的隐式关系，模型通过不断地学习、决策、反馈修正，逐渐提高卫星故障自动化处置成功率。关键技术为基于先验信息引导的各类人工智能决策技术，这是由于受到驱动模型的数据量小以及模型状态复杂度限制，直接使用标准的多层神经网络、卷积神经网络和强化学习方式，决策准确度往往不高，因此如何基于卫星研制方和卫星运维人员形成的故障现象和处置决策之间的先验经验，引导各类人工智能决策算法尽快提高状态决策精确度，是目前各类智能算法在卫星故障处置中真正发挥作用的关键。

当前应用较为广泛的网络状态感知和维护的方法是通过设计基于机器学习的方法应对网络状态的不确定性。具体而言，由于卫星网络故障的强突发性以及类型的多样性，导致卫星网络的故障管理变得极其烦琐，为了能够高效地维护卫星网络的健康、稳定运行，需要引入基于机器学习的特征量模板匹配方法来实现对故障信息的分类，并针对每种类型的故障设计相应的有效应对故障的解决措施（例如控制功放重启，控制天线波束指向等），将学习模型上注到高轨卫星，进而对故障进行管理。此外，针对故障样本稀少的情况，拟利用小样本学习方法通过少量的样本数据学习得到高效的故障处理模型，从而完成在不同故障样本信息量情况下的网络故障快速、高效管理问题。上述通过特征量模式匹配的故障管理方法主要针对海量故障信息而言，然而有时候故障信息不够充分，无法满足特征量模式匹配方法的要

求。针对少量故障样本数据的情况，小样本学习的方法能够较好地实现对故障样本的训练，达到快速锁定并处理网络故障的目的，相关的结合网络状态感知的基于小样本学习的网络故障管理算法还有待进一步研究。

3.3 面向多维业务需求的动态资源切片技术

天地一体化信息网络中业务类型多样并且需求动态变化，通过单一的网络形态难以保障多种类型业务的差异化需求，因此亟待针对不同的业务需求^[26]，构建满足该业务需求的逻辑网络，即网络资源切片，因此通过采用网络切片技术构建多个网络资源切片以满足不同类型应用场景的需求是一种有效应对网络多业务的机制。为了服务多元化、多需求、多种类的业务，在文献[27]中，SU等提出了LEO通信卫星的系统结构、星座、覆盖模式、干扰协调以及资源管理方法。由于卫星的周期运动，卫星网络间连接的间断性和周期性，星间链路通信资源的有效分配和调度对于卫星网络的工作效率以及卫星的能耗有重大影响。所以，对于由卫星和星间链组成的空间卫星网络，频谱分配、路由选择以及卫星发射能量的控制都是要考虑的关键。LIU等在文献[28]中，综合5G地面网络和卫星网络，利用软件定义网络技术，研究了卫星网关的部署问题，以获取最小的平均时延，并且提出了基于综合模拟退火和分簇的方法来求解。

无疑，使用SDN/NFV技术可以动态地进行网络切片，将网络切出多张虚拟网络，相关服务可以根据流量需求扩展或收缩对网络资源的使用，从而选择每类切片所需的特性，例如低时延、高吞吐量、连接密度、频谱

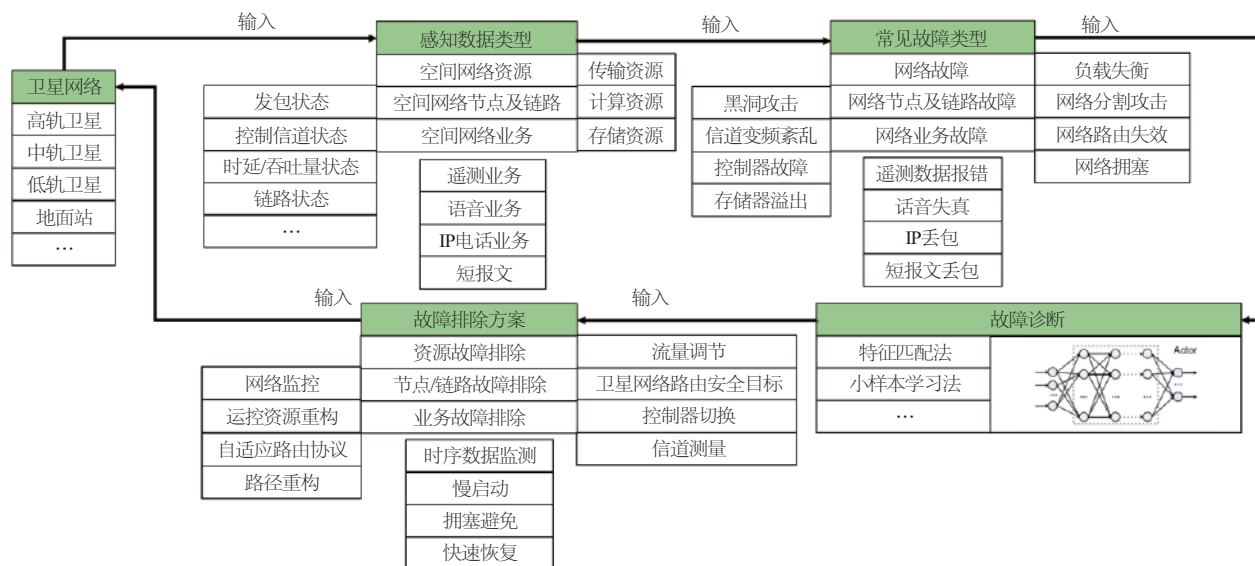


图4 系统故障感知与维护的基本流程

效率、流量容量和网络效率等,有助于提高创建产品和服务方面的效率,带来服务敏捷性和增强的安全性^[29]。因此本节首先从巨型卫星星座网络可支撑的业务类型出发,再根据业务特征进行业务预测,实行按需组网的动态切片。ORDONEZ-LUCENA等在文献[30]中提到了一种网络切片架构来实现业务需求到网络功能以及基础架构需求的映射。然而业务需求是动态变化的,为了使网络切片架构适应业务的时变性,XIAO等在文献[31]中将网络切片框架分为两个阶段,第一阶段是流量预测阶段,第二阶段是带宽配置阶段。由此可知,业务预测是网络灵活分配资源必不可少的因素之一。

通过面向动态服务需求感知,利用网络切片对资源进行重组,根据服务等级协议(SLA)为特定的通信服务类型选定所需要的虚拟机和物理资源,XU等在文献[32]中使用随机网络演算思想将服务等级协议与业务需求以及资源择取相关联,使得网络适应不同的业务对不同网络功能的服务质量要求,但未考虑到巨型星座网络中资源的多样性和时效性。因此在网络切片的动态资源分配方案中,可将频率资源、时间资源和空间资源在网络切片之间动态分配,将网络服务资源按需适配给用户。网络切片的公共调度器实现动态的资源分配,并保证网络切片之间的公平性。虚拟化环境为无线资源调度提供了更大的范围和更高的维度。为了统一描述异构网络下的各种空中接口资源调度策略,有必要将全部空中接口资源在一个高维空间中描述,以空间切片的形式对资源块进行统一定义,进而提出基于动态网络切片的可重构管

控技术,实现巨型卫星星座网络基于网络资源的按需跨区域服务资源适配。

4 智能高效运维与资源管控架构

针对大规模多层密集卫星部署的天地一体化信息网络,本文提出了通过中心—边缘式的智能架构管理降低运维管控复杂度,实现轻量级的运维与资源管控。智能高效运维与资源管控架构如图5所示,主要由业务子系统、虚拟资源子系统和控制子系统构成。其中,业务子系统主要产生网络中多维的业务需求;虚拟资源子系统主要是将物理资源通过资源虚拟化技术形成有利于资源高效管理的资源池;控制子系统主要负责网络的性能管理,具体包括业务管理、网络监测、故障管理、资源管理等,其由中心逻辑控制器和边缘辅助逻辑控制器构成,形成一个中心和边缘结构的管理体系。由于巨型星座系统节点众多,为了能够快速响应业务需求、故障管理和处置以及资源的协同调度,在控制子系统的中心逻辑控制器考虑到业务的动态性、多元性和节点数量的庞大、资源动态变化等特点,会综合全网各类状态信息做出实时决策,判断当前需要的边缘辅助逻辑控制器的数量和功能,使得边缘辅助逻辑控制器可以为中心逻辑控制器卸载部分需要决策的状态信息。

具体而言,中心逻辑控制器是将控制器划分为子逻辑控制单元,包括业务/资源整形逻辑单元、运维测控控制逻辑单元、状态整形逻辑单元等。业务/资源整形逻辑单元负责对业务自身特性的整形,例如业务的统计特

性、峰值速率等，同时持续地获取全网资源属性从而对资源进行整形，确保业务要素和资源属性输入与资源管理智能体的接口匹配。状态整形逻辑单元是对当前业务的状态，比如业务的服务速率、业务的时延等进行业务需求上的形式统一。运维测控控制逻辑单元则是通过监测业务、故障以及卫星（资源、运行）的状态信息，将运维测控数据整形为资源分配决策所需的链路状态、卫星状态和资源状态参考量。资源管理智能体集中，包括无线资源管理和移动性管理等各个决策管理模块。

中心逻辑控制器根据资源管理智能体集中收集获取的全网相关信息，通过状态和潜在决策的按需匹配，将初步的粗粒度决策传递给边缘辅控映射器，边缘辅助逻辑控制器中的参数迁移器利用机器学习的方法，如迁移学习，迁移部分中心逻辑控制器智能体所学知识，用以边缘的轻量级在轨决策。同时边缘辅助逻辑控制器中的业务资源切片逻辑单元根据在线决策，通过控制器接口实时地为用户或终端提供业务切片资源，而切片管理切片逻辑单元则通过与中心逻辑控制器的反馈信息，向资

源层的各类异构资源执行动作，实施按需重构。

以移动性管理中的切换为例，对于多元化动态业务，首先发送业务需求等相关信息，同时资源上传同步更新的状态信息，而中心逻辑控制器根据实时采集的业务请求和资源状态信息进行状态整形，并经过移动性管理智能体收集当前各类状态信息，做出切换决策，包括是否切换、切换到哪一颗卫星，该业务需要多少资源（信道、功率、天线等），进而该决策将首先由中心逻辑控制器的状态决策匹配映射器接口发送出去，经由边缘辅控映射器接口映射到管理目标卫星的边缘辅助逻辑控制器。边缘辅助逻辑控制器根据切换决策，通过控制器接口对资源执行动作，为当前业务分配和生成对应的切片（包括业务所需的资源和切换程序交互所需的无线资源等），从而完成切换资源管理。但由于卫星的大规模部署，频繁切换必然会带来大量的管理开销和网络负载，因此使边缘辅助逻辑控制器中的参数迁移器允许迁移中心控制器所学的部分决策知识，对部分切换实行星上决策和处理，从而有效降低开销和中心逻辑控制器的负荷。

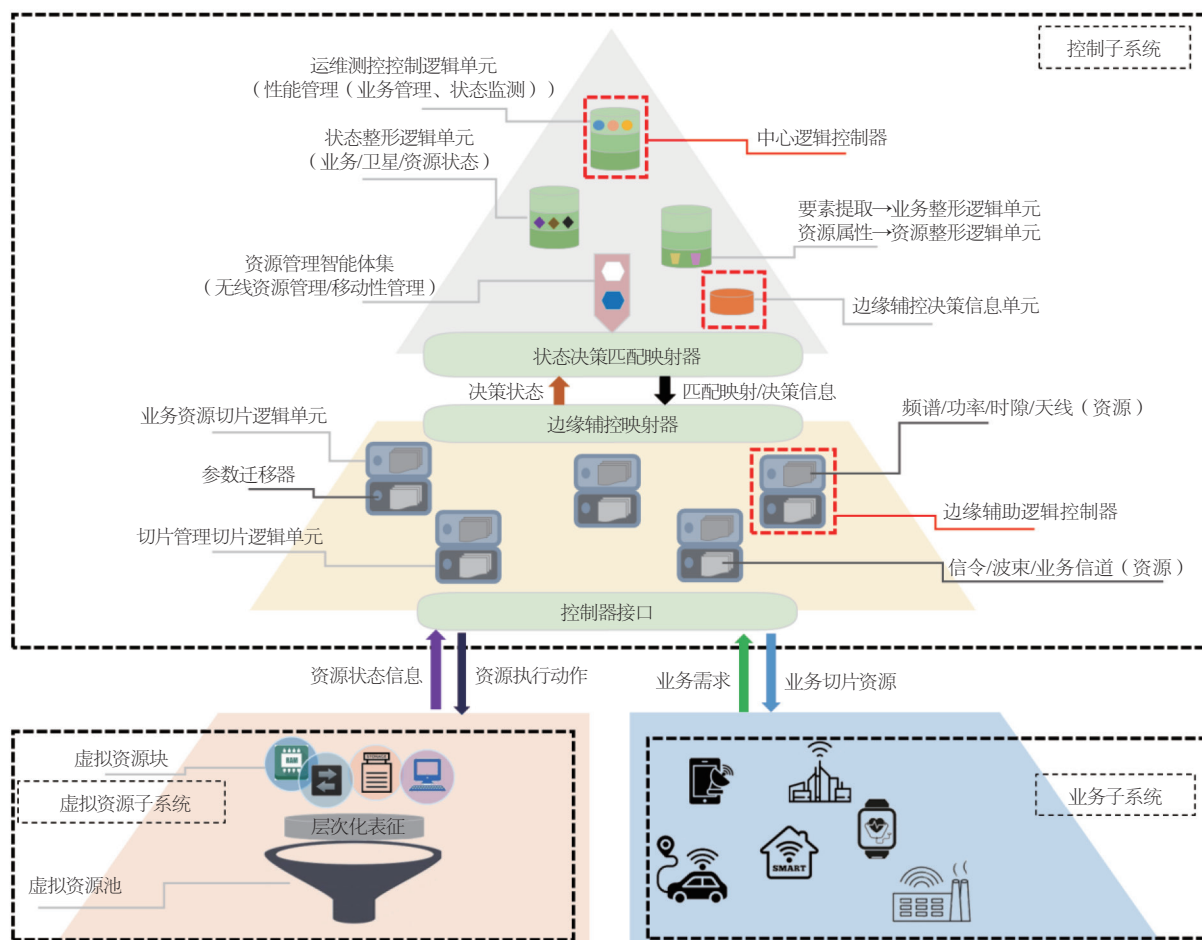


图5 智能高效运维与资源管控架构

5 结束语

巨型星座系统的运维和管控是维护星座系统健康高效运行以及网络性能管理的关键技术。为了满足系统状态监测时效性要求,网络运维技术已从地基为主逐步向天地一体化方式发展。首先,本文分析了网络运维、故障管理、业务多维性、资源时效性等对巨型星座系统网络运维和时效性资源调配的挑战;然后,阐述了巨型星座系统资源管控的关键技术来应对上述挑战,包括基于业务特征的预测技术、卫星及网络状态感知和维护技术以及面向多维业务动态切片技术;最后,提出了面向巨型星座系统的智能高效运维与资源管控架构,揭示资源在多级控制系统中的转移与转换规律,为大规模卫星网络资源调度奠定理论基础。

参考文献:

- [1] MAURO D S, CIANCA, ERNESTINA, et al. Satellite communications supporting internet of remote things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(1):113-23.
- [2] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 28-41.
- [3] SAAD W, BENNIS M, CHEN M. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 134-142.
- [4] GIAMBENE G, KOTA S, PILLAI P. Satellite-5G integration: A network perspective[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 25-31.
- [5] ZHAO B, LIU P, WANG X, et al. Toward efficient authentication for space-air-ground integrated Internet of things[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(7): 1-14.
- [6] GIAMBENE G, LUONG D K, COLA T D, et al. Analysis of a packet-level block coding approach for terrestrial-satellite mobile systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 8117-8132.
- [7] YANG Y, XU M, WANG D, et al. Towards energy-efficient routing in satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 3869-3886.
- [8] SHENG M, WANG Y, LI J D, et al. Toward a flexible and reconfigurable broadband satellite network: Resource management architecture and strategies[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(4): 127-133.
- [9] SHI Y, LIU J, FADLULLAH Z M, KATO N. Cross-layer data delivery in satellite-aerial-terrestrial communication[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(3): 138-143.
- [10] QIU J, GRACE D, DING G, et al. Air-ground heterogeneous networks for 5G and beyond via integrating high and low altitude platforms[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(6): 140-148.
- [11] LI T, ZHOU H, LUO H, et al. Service: A software defined framework for integrated space-terrestrial satellite communication[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(3): 703-716.
- [12] LIU J, SHI Y, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2714 - 2741.
- [13] ZHANG N, ZHANG S, YANG P, et al. Software defined space-air-ground integrated vehicular networks: Challenges and solutions[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(7): 101-109.
- [14] LI H, ZUO Y Z, ZHANG Z P, et al. Design and development for an effective network operation and maintenance management system[J]. Technology Study, 2020(04): 20-22.
- [15] 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):119-125.
- [15] SHEN J, GAO W B, ZHANG G X. Developing background, service characteristics and challenges of LEO IoT[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(5):119-125.
- [16] SHENG Q, JANG D D, LIU W H. A prediction approach to end-to-end traffic in space information networks[C]// 2019 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII), Orlando, FL, USA, 2019:115-119.
- [17] MORALES F, RUIZ M, GIFRE L, et al. Virtual network topology adaptability based on data analytics for traffic prediction[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(1): A35-A45.
- [18] EYNDE J V D, BLONDIA C. Measurement-based dynamic resource allocation on traffic aggregates [C]//2019 IEEE International Conference on Communication. Networks and Satellite (Comnetsat), Makassar, Indonesia, 2019: 52-59.
- [19] DEL P 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(6):123-135.
- [20] 王红运. 基于SDN控制器的故障恢复与负载均衡策略研究[D]. 合肥:安徽大学, 2020.
- [20] WANG H Y. Research on fault recovery and load balancing strategy based SDN controller[D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [21] 韩江雪. 空间网络抗毁路由与流量控制关键技术研究开发与

- [D]. 北京:北京邮电大学, 2016.
- HAN J X. The Research and development of resilient routing and traffic engineering technology in space network[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [22] LIU Y, YIN C H, HU D, et al. Communication satellite fault detection based on recurrent neural network[J]. COMPUTER SCIENCE, 2020, 47(2): 227-232.
- [23] WANG G Y, LV Z D, WANG X. Research on security routing of satellite network[J]. Network and Communication, 2020(5): 83.
- [24] 崔丽华. 基于深度学习的光网络故障预测技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019: 1-72.
- CUI L H. Research on fault prediction technology of optical networks based on deep learning[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [25] 楼丽琪. 基于机器学习的光网络告警智能分析技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019.
- LOU L Q. Research on intelligent analysis technology of optical network alarm based on machine learning[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [26] DANDACHI G, DE DOMENICO A, HOANG D T, et al. An artificial intelligence framework for slice deployment and orchestration in 5G networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(2): 858-871.
- [27] SU Y T, LIU Y Q, ZHOU Y Q et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 55-61.
- [28] LIU J J, SHI Y P, ZHAO L, et al. Joint placement of controllers and gateways in SDN-enabled 5G-satellite integrated network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 221-232.
- [29] CAO S Z, WEI J Y, HAN H, et al. Space edge cloud enabling network slicing for 5G satellite network [C]// 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), Tangier, Morocco, 2019:787-792.
- [30] ORDONEZ-LUCENA J, ADAMUZ-HINOJOSA, OSCAR, et al. The creation phase in network slicing: From a service order to an operative network slice[C]//2018 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Ljubljana, Slovenia, 2018:1-36.
- [31] XIAO S, CHEN W. Dynamic allocation of 5G transport network slice bandwidth based on LSTM traffic prediction [C]//2018 IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), Beijing, China, 2018:735-739.
- [32] XU Q, WANG J, WU K. Learning-based dynamic resource provisioning for network slicing with ensured end-to-end performance bound[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2020, 7(1): 28-41.

[作者简介]



周笛 (1991-), 女, 博士, 西安电子科技大学讲师, 主要研究方向为空间信息网络任务规划及资源管理、卫星互联网资源管控技术等。



盛敏 (1975-), 女, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为B5G/6G移动通信网络、异构网络融合以及空间信息网络等。



郝琪 (1996-), 女, 学士, 西安电子科技大学通信工程学院博士生, 主要研究方向为异构融合网络资源调度及组网技术等。



李建东 (1962-), 男, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为空间信息网络、智能无线网络、大规模自组织网等。



刘建平 (1975-), 男, 博士, 西安卫星测控中心正高级工程师, 主要研究方向为航天器飞行任务规划与调度。