

基于分布式星群的空间信息网络体系架构与关键技术

System Architecture and Key Technology of Space Information Network Based on Distributed Satellite Clusters

王敬超 / WANG Jingchao
于全 / YU Quan

(中国电子设备系统工程公司研究所,
北京 100141)
(Institute of China Electronic System
Engineering Company, Beijing 100141,
China)

空间信息网络是以空间平台(如地球同步轨道(GEO)、地球非同步轨道(NGEO)、低轨道卫星,高空平台(HAPS,临近空间无人机或飞艇等))为载体,通过一体化组网互联,支持实时采集、传输和处理海量数据,实现体系化信息服务应用的网络基础设施。由于其独特的空间位置优势,与地面网络相比,空间信息网络在对地观测、应急通信、航天测控、航空运输和国家战略利益拓展等方面都有着不可替代的作用,已逐渐成为国家战略利益的高边疆^[1]。

近年来,全球相关机构和组织已投入大量的人力和物力开展空间信息网络相关技术研究及实验验证,包括美国国家航空航天局(NASA)的空间传感网、欧洲的哥白尼计划、美国国家卫生基金会(NSF)的国家生态观测网络以及中国自然科学基金空

收稿时间: 2016-05-12
网络出版时间: 2016-06-24
基金项目: 国家自然科学基金
(61231011)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0009-005

摘要: 提出分布式星群网络的概念,即利用共轨控制、组网协同技术,整合空间邻近且独立分布的卫星资源,在同步轨道上将多颗小卫星整合等效为一颗大卫星,实现服务能力的增强。并提出基于分布式星群的空间信息网络体系架构,通过多星共轨、星间高速互联、分布式自主协同、资源虚拟化等关键技术,可以实现空间系统服务能力增强,多星合成覆盖,在轨智能自愈,为构建未来稳定可靠的空间信息网络提供借鉴。

关键词: 分布式星群; 空间信息网络; 体系架构

Abstract: In this paper, the concept of distributed satellite cluster is proposed, which combines the “small” geostationary orbit (GEO) satellites into a “big” satellite to enhance the capability of service by utilizing in-orbit control and networking cooperation. And the system architecture of space information network based on distributed satellite clusters is proposed. Through the technologies of putting multiple satellites at the same orbit, high speed interconnect between satellites, distributed independent coordination and resource virtualization, the capacity of space system services is also enhanced, combined service through multi-satellites, on-orbit intelligent self-restoring can be achieved. An option of building a reliable space information network in the future is provided.

Keywords: distributed satellite clusters; space information network; system architecture

间信息网络重大研究计划和“十三五”规划中的天地一体化信息网络^[1-4]等。从空间信息网络基础设施、全球建站受限等不同角度,对于中国空间信息网络已经基本形成“骨干网+接入网”的体系架构共识^[15-8],其中骨干网由实现全球保障的高轨卫星组成,接入网则包含了各类低轨卫星及各类空基平台。

针对骨干节点频率轨位匮乏,卫星平台承载能力弱等问题,我们提出了分布式星群网络的概念,即利用共

轨控制、组网协同技术,整合空间邻近且独立分布的卫星资源,在同步轨道上将多颗小卫星整合等效为一颗大卫星,实现服务能力的增强。文章在深入分析分布式星群的应用需求、全球研究现状的基础上,给出基于分布式星群的空间信息网络体系架构,并对其中的关键技术进行梳理,为后续有关技术发展提供借鉴。

1 分布式星群网络应用需求

(1) 构建分布式星群是缓解空间

资源约束的重要手段

地球同步轨道以其独特的空间位置,可以在地面站和卫星之间建立稳定长期的链路,可对同一地区进行连续通信或观测,是通信、气象等卫星的首选轨道位置。自1963年第一颗地球同步轨道卫星发射以来,地球同步轨道卫星的数量不断增加。截至2015年12月,在国际电信联盟登记在案^[9]的同步轨道卫星有490余颗,同步轨道卫星的轨位资源越来越紧张,中国所能使用的轨道位置与美、俄等国家相去甚远。此外,C、Ku等频率资源使用殆尽,在中国上空东经70~130°范围内,使用C频段的卫星就有60余颗,Ku频段70余颗。卫星通信频段向Ka、Q/V、W等高频段逐步扩展,卫星全球频率协调难度日益增加。

同时,随着平台技术和测控技术的进步,卫星测定轨和轨位保持精度逐步提升,多星共轨技术从20世纪90年代开始得到广泛应用。以精确共轨技术为基础的分布式星群网络为缓解中国匮乏的空间频率轨位资源提供了新思路。

(2)构建分布式星群是实现空间信息骨干节点的重要基础

目前,中国同步轨道卫星以东方红四号平台为主,其有效载荷承载能力在700 kg左右,提供约8 000 W的功率,而在民用空间基础设施规划中,未来10~20年将发射大量的对地观测等各类卫星。随着信息获取技术的提升,这些卫星所要求的传输带宽也越来越大,单颗东四平台同步轨道卫星已经难以满足空间信息网络骨干节点的吞吐量、处理能力等需求,必须采用有效手段解决骨干节点能力需求与卫星平台承载能力之间的矛盾。分布式星群通过采用多颗卫星等效为一颗大卫星提升服务能力为解决该问题提供了有效的技术途径。

另一方面,空间信息网络骨干节点承载了大量业务的汇聚、处理、交

换任务,其可靠性直接影响整个空间信息网络服务的可用性。采用分布式星群网络构建其核心节点,在单个卫星出现故障时通过重组调度不会影响骨干节点的全部功能,从而可以实现系统在空间复杂环境下的高可靠性。

(3)构建分布式星群是提升空间资源效益的有效途径

随着航天技术的发展,中国卫星种类和功能日臻完善,在通信、导航、广播、气象、地理信息、国防等领域得到了广泛的使用,发挥了巨大作用。与此同时,卫星系统之间自成体系、条块分割的局面也日渐形成,不同用户部门分别建设独立的卫星地面站,卫星系统之间的信息无法及时共享和综合利用,严重制约了空间信息的时效性及空间系统综合效益的提升,空间信息一体融合与在轨高效处理成为未来的发展趋势。

构建基于多星协同的分布式星群网络,实现各类卫星系统之间资源和信息的统一管理、互联互通和综合利用,为天基信息的获取、处理、存储、传输与分发提供统一的基础平台,可极大提高空间信息系统的建设效益,降低建设成本。

2 相关空间系统研究现状

日新月异的电子和信息技术对传统大型航天器提出了更多挑战,长研制周期和长寿命要求使得大型航

天器研制成本高昂、技术固化,处理能力和快速响应能力远落后于地面系统。为降低大型航天器研制和部署风险,美、欧等国家或地区的组织陆续开展了分布式空间信息系统的研究,最为典型的有美国F6计划和天基群组(星簇)等计划。

2.1 F6计划

F6全称为通过信息交换连接的“未来、快速、灵活、分离模块、自由飞行航天器”,是2007年美国国防高级研究计划局(DARPA)启动的演示验证项目^[10-11]。

如图1所示,F6计划的项目构想是围绕任务需求,把一个航天器的任务载荷、能源、通信、导航、计算处理等功能单元优化分解为多个模块,每个分离模块从本质上说仍然是一颗卫星,携带与航天任务相关的不同功能或资源,采用物理分离、星群自由飞行、无线信息交换和无线能量交换方式,功能协同,资源共享,构成一颗虚拟大卫星来完成特定的任务。F6中提出的构想与分布式星群的区别在于分布式星群中的组成卫星是独立全功能的,可以协作实现某一功能也可独立担负某项任务。

2.2 天基群组计划

美国2007年公布的天基群组计划重点用于提升同步轨道卫星的及时响应能力。天基群组中的每个卫



图1 F6项目理念示意

星具有自己特定的任务,各卫星的功能不同,大型单个卫星的功能在多个卫星中进行分解,在天基群组内部具有专门提供服务的卫星以及完成某种特定任务的卫星。图2所示为部署在地球同步轨道上的天基群组,主要包括路由卫星、服务卫星和任务卫星3部分。其中路由卫星为群组提供天地链路等核心服务,在轨服务卫星为任务卫星和系统重构提供支持保障,路由卫星和服务卫星共同组成天基群组的基础设施,保障任务卫星执行指定任务。

与F6计划面向低轨的无中心分离式结构有所区别,天基群组重点面向同步轨道,且群组以路由卫星为核心,实现空间资源的整合。天基群组的体系结构设计具有以下特点:每颗卫星仅完成一项任务;部署多个路由卫星形成全球网络;轨道机动,星簇重构,从而可以降低单颗卫星系统的复杂程度、发射和研制成本;新技术能够快速在系统中应用;对故障具有较高的冗余度,能够根据任务快速响应,重构系统功能。

2.3 其他相关空间计划

在单个卫星系统中,美军转型卫星通信系统(TSAT)以其先进的技术理念、高昂的研制成本备受关注^[2]。

TSAT计划最大特点是扩展天基交换和传输带宽,希望达到与地面光缆相当的传输能力;借鉴地面IP技术,由直接支持海、陆、空用户向支持天基用户扩展,使得天基传输与分发网络扩展为空间信息系统;利用5颗独立组网、全球覆盖的卫星,TSAT可提供强大的、抗干扰的全球保密通信,作为太空路由器独立运行,对实现空间信息网络起着关键作用。TSAT使用无线激光星间链路在太空建立起高速骨干通信网,星间传输速率达到20 Gbit/s,星地传输速率达到10 Gbit/s,并且支持卫星之间全连通的无线激光拓扑。

2007年3月,波音公司及其合作伙伴首次成功演示了TSAT无线激光通信系统的性能,分别以2.5、10和40 Gbit/s的数据速率完成了通信和捕获、跟踪和瞄准(ATP)性能试验。由于经费等原因,TSAT计划已被暂时搁置,但是其全球化组网、构建空间信息网络的理想并没有消失。

3 基于分布式星群的空间信息网络体系架构构想

3.1 定义组成

基于分布式星群的空间信息网络采用多星共轨组合、超高速空间组

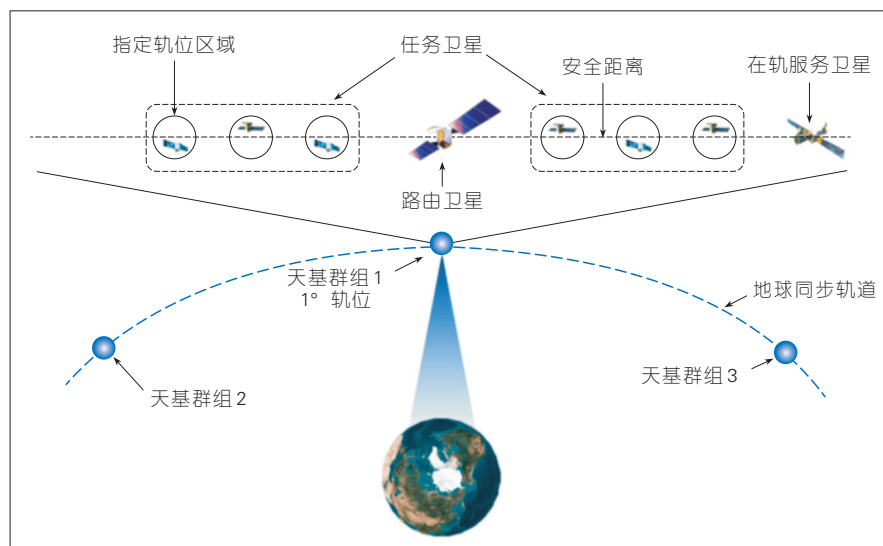
网、分布式协同处理等机制,构建具有多种功能和用途的一体化综合信息网络,可实现空间网络一体化的信息传输、管理与共享,具备自适应、自组织、柔性可重构及抗毁能力。星群节点由各类不同功能的卫星组成,可作为天基骨干网节点与其它平台进行数据交互,实现信息的中继与高速回传。在部分卫星故障时,通过在轨快速自愈和与新入轨卫星快速重构的办法,使得信息处理和网络功能得以快速恢复。以下简称为分布式星群网络。

空间段包括各种类型的航天器,主要有多星共轨的分布式星群,具备星间和星地链路的骨干通信卫星,嫦娥、萤火等深空探测飞行器,对地观测飞行器,以及空间站等。临近空间段包括各类具备卫星链路的飞行器,主要有编队飞行的无人机群、平流层飞艇等升空平台、干线民航客机、大型运输机等。地面段包括各类终端、接入站点和各类与航天活动相关的地面设施,主要有车载、机载、船载、手持等卫星通信或数据采集分发终端,各类卫星固定接收站,卫星测控系统、运控系统,以及其他与航天活动相关的网络或设施。基于分布式星群的空间信息网络组成示意如图3所示。

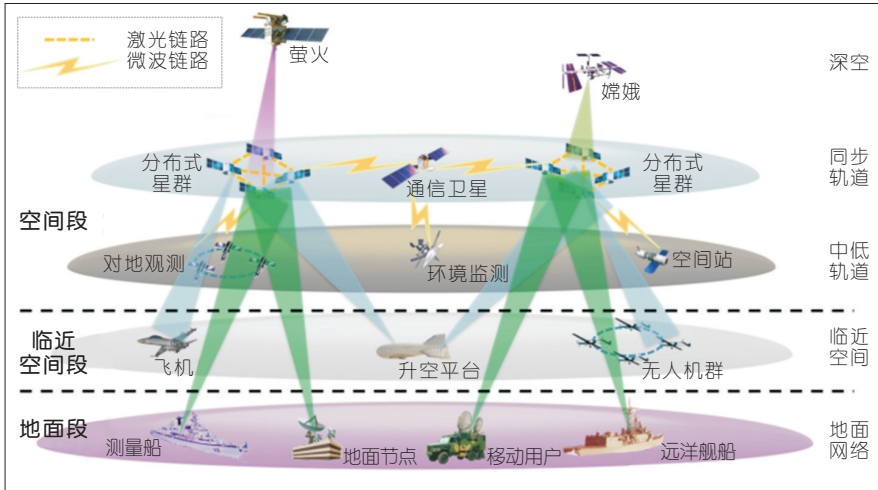
3.2 体系结构

随着地面以数据为核心的新型业务以及分组交换网络的迅猛发展,分层化、可扩展的网络框架得到了广泛应用和成功验证。结合卫星应用特点并借鉴地面网络经验,基于分布式星群的空间信息网络可分为骨干网、接入网与运维网3部分。

分布式星群网络骨干网节点定位于同步轨道,由星群内部路由、交换、信息处理、信息存储、边缘等节点以及独立的单个交换、路由、边缘节点型航天器组成。边缘节点可为接入网中节点或终端提供骨干网接入服务。星群内部骨干节点卫星通过



▲图2 天基群组计划配置示意



▲ 图3 基于分布式星群的空间信息网络组成示意

激光链路互联互通,星群间骨干节点可直接通过激光或微波星间链路通信,实现网状互联,有效载荷采用分布式、可重构设计思想,采用多颗卫星协同工作,共同完成骨干节点卫星的功能,星群内部各个节点功能可以按需重构,全面提升空间信息网的系统能力。

分布式星群网络接入网由接入用户终端和接入信息系统节点组成,接入用户终端指深空探测航天器、对地观测航天器等各类天基平台,大型运输和无人机群等空基平台以及地面宽带用户等接入骨干网的终端;接入信息系统节点指承担相应信息系统接入骨干网的节点,如承担骨干网与地面互联网连接的地面关口站、骨干网与航空个人通信网互联的大型民航客机等。

运维网指包含运控管理系统和地面测控系统等,承担分布式星群网络天基节点正常运行,网络资源管理调度等功能。整个分布式星群网络支持分级式的运控管理,可以由运控管理中心统一管控,也可以由各运控管理子站分别负责个别卫星资源的管控。

分布式星群网络的骨干网、接入网以及运维网通过各种有线和无线链路构成一个有机的整体,为空间信息的融合、共享等方面提供传输网络

基础。

3.3 协议体系

分布式星群网络结构复杂,需要适应深空、临近空间、近地、海面、陆地等多种接入环境,其拓扑、规模、容量、通联关系等均动态可变。稳定高效、扩展性强的网络协议体系是确保分布式星群网络服务质量的关键。

针对接入环境的特点,分布式星群网络物理层和数据链路层协议可基本上划分为星间和星地两大类。可根据接入信道,细分为无线类和激光类协议。

目前,航天系统高层协议中常用

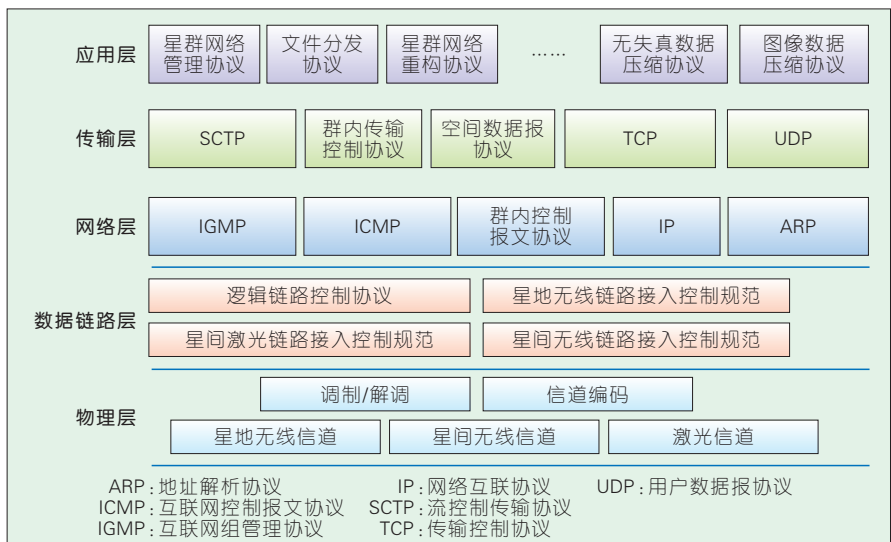
的有基于空间数据系统咨询委员会(CCSDS)和基于IP两类空间通信协议体系。CCSDS类协议专为空间通信设计,充分考虑了空间资源约束和空间环境特性,应用较为成熟,协议效率较高,协议体系较为完善。然而CCSDS类协议开发、测试与维护成本相对IP类协议较高,且无法直接与地面基于IP协议的网络进行互操作,对动态路由支持能力较弱。IP over CCSDS可在CCSDS协议框架下提供IP数据报文传递服务,然而无法克服CCSDS协议自身不足。基于IP类的协议组网灵活性高,与地面现有系统的兼容性好,可以扩展性强,但与CCSDS类协议相比,对星上处理能力要求较高,我们协议效率相对较低。

充分考虑开发成本、协议效率、互操作性及未来网络发展趋势,构建以IP为基础、兼容面向链路应用的分布式星群网络协议模型在满足组网灵活性的基础上可以提供更高的扩展能力,我们建议的协议模型如图4所示。

4 关键技术

4.1 体系结构设计及优化

分布式星群网络是涉及多轨道、多功能、多种应用方向、多类服务对



▲ 图4 分布式星群网络协议模型

象和异构网络互联的复杂系统,存在激光、毫米波、微波等多种传输链路以及全光电路、射频(RF)电路、IP分组等多种交换体制,其拓扑、规模、容量、通联关系等均动态可变,需要适应深空、临近空间、近地、海面、陆地等多种接入环境。如何实现网络结构自组织,网络状态自调节,网络传输自适应,提升星群网络服务能力,需要结合技术发展现状,开展体系结构专题研究和攻关。

4.2 网络协议设计与优化

分布式星群网络由提供不同业务功能的应用服务节点和网络节点构成,星群网络传输链路速率高,时延变化范围大,通断频繁及通联关系动态可变,星群用户接入集中,突发业务量大,需要在综合空间实现、成本与风险等约束条件下,开展与分布式星群网络构型相适应的高速传输、可靠路由、接入控制等协议研究,提升星群网络资源利用率及业务支持能力;充分考虑地面网络发展趋势以及地面通信网络互联互通性,开展面向不同业务的空网协议设计,通过仿真和样机验证等手段,设计出适合中国空间信息网络发展的网络协议体系,满足各类用户体验需求。

4.3 可信网络管理技术

分布式星群面临多尺度、多资源、异构性的复杂服务需求,如何获取有效而充分的星群资源,需要解决网络管理体系架构设计,网络资源优化利用和服务资源协调管理的问题,实现网络效能最大化和应用满意度最大化。针对分布式星群网络管理体系架构和服务资源优化问题,可基于面向服务的框架体系(SOA),采用基于企业服务总线(ESB)的服务资源发现、挖掘、注册和管理方法,通过信息传输、格式转换、服务资源接口标准化、资源协同调度等技术方法,实现异构服务的重复高效运用,并采

用复杂事件处理技术(CEP),采用模式匹配、事件序列分解、复杂语义检测、关键序列标定等方法,实现实时事件流分析和资源匹配优化。针对星群网络多维资源优化问题,可面向分布式资源管理,采用凸优化、鲁棒性优化和多目标优化理论,从多尺度下优化网络资源,包括带宽、功率、波束、路由和转发器等资源,最大化网络容量,提高网络的服务效能。

4.4 高速激光组网技术

针对分布式星群群内高速激光传输的特点,需要探索全光交换机制在分布式星群高速激光组网中的应用,构建基于波长路由的分布式全光突发交换机制,并研究分布式路由算法,开展弱光信号条件下全光3R再生和格式透明、偏振不敏感、多链路同步切换全光波长变换相关理论问题的研究,开展数学仿真和原理性验证实验,攻关分布式动态可重构光交换的物理实现关键技术。另外,还需开展传统光学天线理论、微波多波束天线和智能天线理论的交叉学科研究,从理论上研究并解决激光光波单向性与分布式星群网络准全向传输要求间矛盾的问题,运用多种光通信新技术进行综合创新,推动单链路、点对点卫星激光信息传输技术,向动态多链路集群通信体制发展。

4.5 宽带高速接入技术

针对星群网络具有时空跨度、高动态拓扑和开发空间复杂干扰的特征,其高速接入和宽带传输面临链路传输速率与时变信道,动态资源与突发业务需求,网络编码容量与时变拓扑结构之间的动态适配等巨大技术挑战。通过研究空间高动态宽带接入传输中的时变信道大范围速率自适应传输,时变资源接入系统的时滞反馈控制,时变传输矩阵的自适应网络纠错编码等问题,提高空间信息传输的效率和可靠性,空间数据和信息从源到用户的网络通信传输服务的

能力。

4.6 资源虚拟化及虚拟总线技术

为了将多颗小卫星等效为一颗大卫星,实现资源的灵活调度以及与任务的高度匹配,满足分布式星群快速重构应用需求,可围绕空间信息网络节点类型多样,能力差异大,技术体制不一,在轨硬件升级难度大等问题,通过开展各类空间信息网络节点资源(如天线、功率、频率、计算、存储等)虚拟化研究,在网络层与应用层之间增加虚拟管理层,构建屏蔽底层硬件差异全网统一的资源控制管理模型,做到根据不同任务构建虚拟网络,实现资源共享和协同,提高物理网络资源的利用率,实现业务应用灵活、功能可重构,提升网络的服务能力,实现网络可编程,相互隔离,增强网络扩展性和安全性。通过资源虚拟化技术,可将分布式星群骨干节点与任务星群的概念统一。

4.7 仿真验证及评估技术

分布式星群网络组成单元及相互通联关系动态复杂,涉及的关键技术和对象众多,需要依托OPNET、NS2及STK平台,构建完善的仿真系统,建立不同卫星通信体制模型、不同网系的网络模型库,开展链路层、网络层、系统层等不同层面的仿真,对关键算法和系统的整体性能指标、互联互通能力、资源利用率、运行状态等进行能力和运行情况仿真,对网络的互通率、组网形式、网络管理方式等进行验证,为不同任务类型的通信体制的选取、性能指标的设计提供支撑。并针对不同任务类型,合理选取效能评估方法和评价指标,构建面向多任务的系统总体效能评价体系,与网络体系结构设计形成反馈迭代优化。

4.8 其他关键技术

分布式星群网络是一个开放的

➔下转第18页