

基于混合轨道组网的空间计算互联网络架构

胡建平, 孙 杰, 徐会忠, 李 婷
(中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

摘 要: 针对目前世界各国建设统一的、综合的混合轨道空间信息网络的发展趋势, 以及现有卫星系统依赖地面信息处理带来的低效和时延问题, 提出一种基于混合轨道组网的空间计算互联网络架构, 将现有分离的各类卫星网络统一在一套体系架构中, 通过星间链路和星上处理实现整个空间信息网络的互联互通和高效处理, 使得未来的卫星不仅是信息的通道, 也是信息处理的平台, 提高了空间信息网络的信息处理能力和运行效率, 满足了未来天地间大量节点信息交互及处理的需求。

关键词: 体系架构; 卫星星座; 混合轨道; 骨干传输; 边缘处理

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200203

Spatial Computing Interconnection Network Architecture Based on Hybrid Orbit Networking

HU Jianping, SUN Jie, XU Huizhong, LI Ting
China Southwest Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China

Abstract: In view of the current development trend of building a unified, integrated, and hybrid orbital space information network in various countries around the world, as well as the inefficiency and delay caused by the existing satellite systems relying on ground information processing, a space computing interconnection network architecture based on hybrid orbital networking was proposed, which unified the existing separate satellite networks in a set of architecture, integrated the existing satellite networks through inter satellite links and on-satellite processing to realize the interconnection and efficient processing of the entire space information network. It made the future space network not only a channel for information, but also a platform for information processing, improved the information processing capacity and operating efficiency of the spatial information network, and meet the needs of a large number of node information interaction and processing between the world and the earth in the future.

Keywords: architecture, satellite constellation, hybrid track, backbone transmission, edge processing

1 引言

近年来, 太空优势无论在经济上还是军事上, 越来越上升为各个国家的国家战略。航天系统建设思路开始由传统的各个行业、组织、单位自行发展, 向国家层面统一规划、组织、制定标准方向发展。

美国提出空间通信与导航(SCaN)计划^[1], 并成立专门的“空间通信与导航”办公室, 专门负责统一的空间信息网络建设。

我国加大在相关体系建设方面的论证, 并加快相关标准的制定^[2]。

2 基于高低轨互联星座的空间信息网络架构

2.1 总体架构

总体架构上, 以高低轨卫星混合组网为基本网络架构。高轨卫星间、高低卫星间、低轨卫星间均存在星间链路。不失一般性, 本文设定高轨卫星间存在激光链路, 高低轨卫星间存在Ka频段或激光链路, 低轨同轨卫星间存在激光链路, 异轨卫星间存在Ka频段链路。本文对星地链路不做特别限制, 可采用激光、微波等链路, 如图1所示。

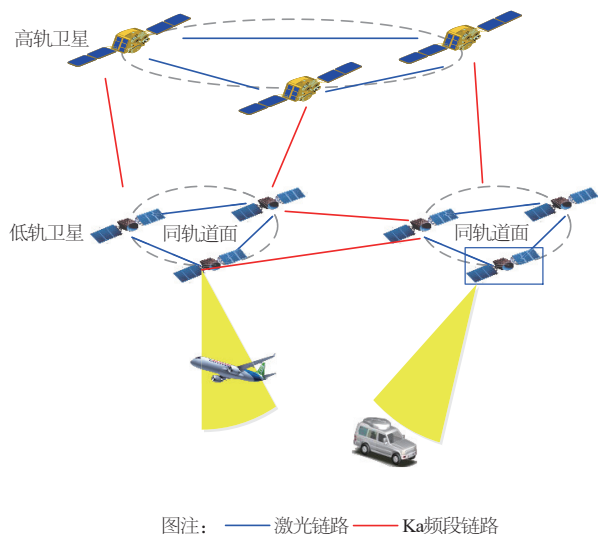


图1 网络总体架构

在节点定义上，规定遵守统一的空间信息网络协议，且将自身的转发、计算、存储能力共享给网络的所有类型卫星均定义为网络节点，比如共享自身存储能力的遥感卫星、共享传输能力的通信卫星等。那些仅需要网络提供传输、处理、存储能力服务的目标为用户，包括但不限于地面通信终端、未共享存储能力的卫星等。

在以上网络架构下，高轨卫星不再作为传输的骨干节点，而将低轨卫星作为传输的骨干节点。这是由高轨卫星的数量和传输时延决定的。一般通信用高轨卫星均在同步轨道，由于轨位限制导致数量少，且由于轨道高度的原因导致传输时延大。相对的，低轨卫星由于轨道高度低、数量多，可以将其作为传输的骨干网络，以达到低时延、高容量的效果。

未来的空间信息网络一定具有较强的星上处理能力，可以完成部分数据处理任务并直接返回给用户，以降低馈电链路传输压力并缩短服务响应时间。高轨卫星一般具有较强的处理能力和良好的覆盖性，应作为数据处理和网络管理的核心，低轨卫星作为数据处理的次级节点。网络管理由地面控制中心和高轨卫星共同完成，路由策略、接入算法、故障处理策略等由地面上注高轨卫星。具体路由查找、路由维护、接入控制、故障数据管理由高轨卫星直接完成。

数据处理泛指任意任务信号处理、信息处理所对应的计算和存储需求。首先，随着基带池、云计算等技术的发展，未来卫星会采用更通用的软硬件，卫星所执行的任务仅仅是对应具体算法的加载，不同卫星的差别

仅在于所搭载传感器不同。那么，任意卫星的计算和存储需求将可以不再仅限于由卫星本身来满足，可以通过星间网络传输到其他卫星上进行处理，然后传回处理结果。例如，遥感卫星可以只负责对地拍照，数据传输至高轨卫星进行1级或2级产品的生成，然后通过星间链路，交由通信卫星直接高速分发给用户。这样既可以提高产品的实时性，又可以利用高轨卫星的覆盖性延长观测时间。其次，卫星功能更加单一，使得卫星的设计制造更加高效，从而带动整个产业高速发展。需要强调的是，这里的计算和存储迁移并不仅限于低轨向高轨迁移，任何采用相同协议和算法共享自身资源的卫星均是迁移的对象，具体迁移对象由算法决定。

2.2 骨干传输网络架构

低轨星座的轨道高度目前主要为500~1 200 km，作为骨干传输，需要具有稳定的网络拓扑，因此星座设计一般为极地轨道。

以上轨道设计，使得异轨间具有相对稳定的拓扑结构，使得整个网络可以采用较高频率的星间链路，从而实现高速传输。因此在本文中，不失一般性，认为同轨道面卫星间采用激光链路，异轨道面卫星间采用Ka频段链路，实现高速骨干传输。骨干传输网络架构如图2所示。

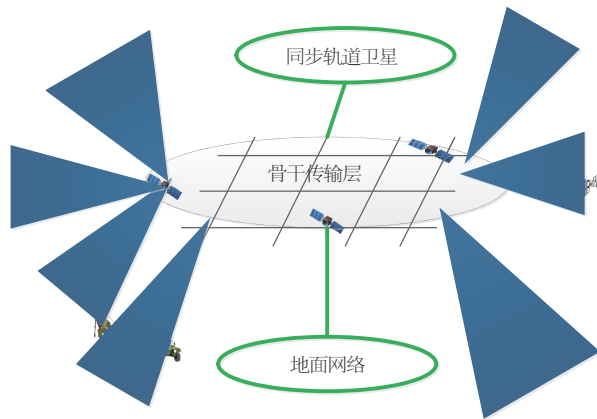


图2 骨干传输网络架构

图2中，以低轨星座作为骨干传输层的网络架构中，以连接各类传感器、作战武器为首要任务，以保障信息的高速、低时延传输应用。因此，作为网络架构当中的每个卫星节点，需要具有骨干传输链路和接入网链路（宽带、窄带）。同时为了保障其他能力，比如指挥控制、导航增强等，需要与地面骨干、同步轨道骨干传输互联。

2.3 数据处理网络架构

受限于国内建站，我国未来大规模星座的数据回传是一个难题。低轨卫星过顶时间短也对数据落地带来了额外的困难。因此，利用日益发展的星上处理能力、卫星互联能力，将多颗低轨卫星构建成一个分布式协同系统，将部分数据处理任务放置于星上处理并直接返回给用户，使得低轨卫星相对传统地面处理形成一个边缘的数据处理网络，将是解决以上难题的重要途径之一。

两种典型的构建卫星边缘处理网络的方法分别是：低轨卫星向高轨卫星迁移任务，低轨卫星之间进行任务迁移。

低轨卫星向高轨卫星迁移任务一般对应单低轨卫星系统，即搭载某种载荷的仅有一颗低轨卫星，目前大多数遥感卫星属于此类。此种场景下，低轨卫星传感器所捕获的图像，可以传输至高轨卫星。一来可以在高轨卫星进行数据处理直接生成初级信息产品；二来相对地面可以获得更长的传输时间从而提高数据的实时性。

低轨卫星之间进行任务迁移一般对应多低轨卫星系统，即搭载某种载荷的有多颗低轨卫星，目前的低轨通信卫星系统大多属于此类。因此可以将同轨卫星作为一个整体对用户进行服务，用户数据通过星间链路由多颗卫星共同处理，用户链路在多颗卫星间依次切换以延长总的服务时间。当单颗卫星为用户服务时，处理能力为单位1，服务时间一般仅为10 min。但整个同轨卫星为用户服务时，处理能力为 n （ n 为同轨卫星数量），服务时间可长达3 h。

3 协议体系分析

3.1 骨干传输协议

对于低轨卫星骨干传输网络的协议，分为接入、传输两部分进行分析。接入协议用在接入链路上，与用户连接，骨干传输网络配置接入点，包括的链路类型有Ka、L等频段。骨干传输协议主要用于骨干链路，用于高速、快速传输用户各类信息，包括的链路类型有Ka频段、激光等。

虽然低轨卫星具有移动性，但是每个节点的运行轨道明确，节点直接的骨干链路也具有确定性，尤其可以将拓扑关系按照时间片段来分析。此时明显具有与地面骨干传输网络相似的特性，因此，可以采用类似MPLS的方式，来进行骨干信息传输与分发。

为了减少传输数据量，用户间，尤其是战术用户间，可以采用专用协议，例如NP协议，实现端到端的业务数据传输。对于地面应用系统与用户间，可以采用IP进行数据传输^[3]。基于低轨骨干传输网络的协议体系如图3所示。

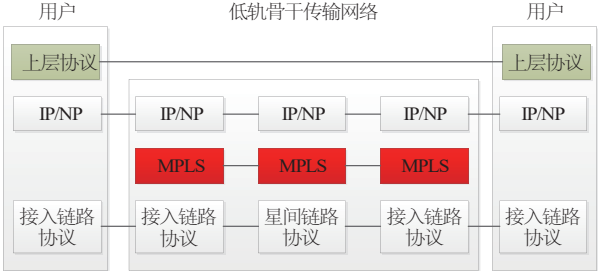


图3 基于低轨骨干传输网络的协议体系

3.2 计算迁移协议

计算迁移协议相对传输协议属于上层协议，一般位于平台和应用之间，通过中间件实现，如图4所示。

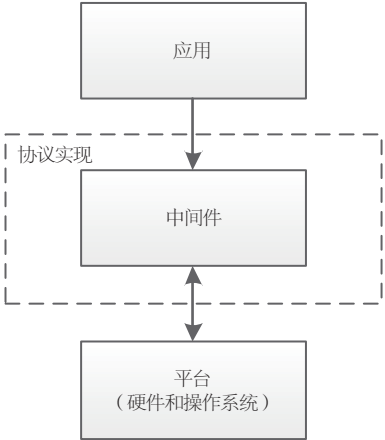


图4 计算迁移协议实现方式

计算迁移协议一般包含：业务感知协议、节点负载感知协议、任务迁移决策协议、数据和任务迁移协议、迁移机制运行管理协议，如图5所示。

（1）业务感知协议负责为各网络节点获取业务的状态信息。

（2）节点负载感知协议负责为各网络节点获取其他节点的负载信息。

（3）任务迁移决策协议负责传输迁移决策信息，使得各个节点做出的迁移决策一致。

（4）数据和任务迁移协议在数据任务迁移中规范数据传输格式和语法，保障数据在迁移过程中的可靠性和高效性。

（5）迁移机制运行管理协议实现对迁移过程的管理和检测功能，检测和控制每个节点的协议运行情况，为灾备处理提供解决方案。

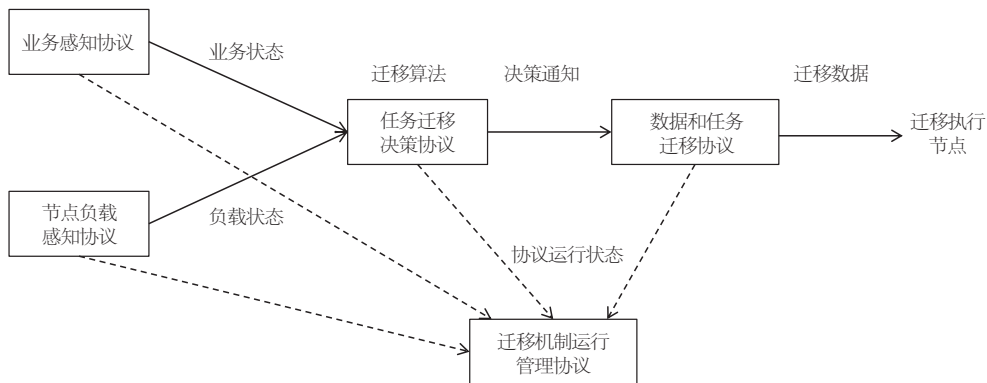


图5 计算迁移协议间关系

4 关键技术分析

4.1 星座设计

要将低轨卫星组成骨干传输网络，则低轨卫星星座的构型一定要相对稳定，频繁的星座拓扑结构改变只会带来频繁的数据传输中断和复杂的星间路由管理，最终导致传输效率低下，从而无法实现骨干传输的作用。因此，此类低轨卫星星座一般设计为极地轨道或近极地轨道。相邻轨道卫星间拓扑变化仅在极地附近进行改变，在其他区域相对固定，而极地附近的传输需求较小。Starlink星座轨道设计如图6所示。

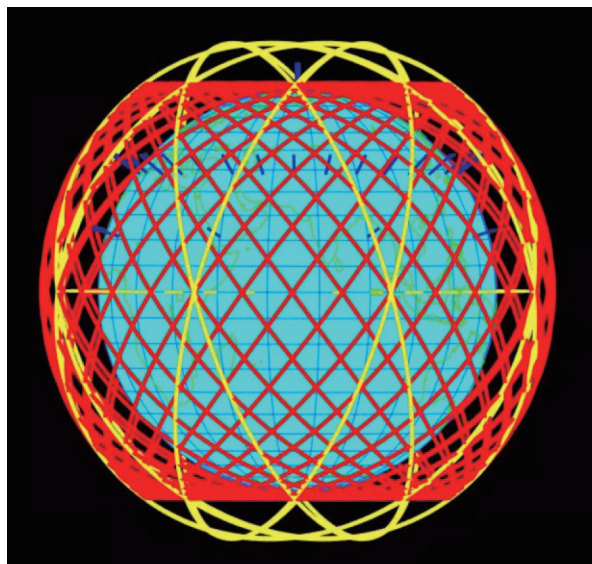


图6 Starlink星座轨道设计

4.2 路由技术

相对地面网络，高低轨混合组网卫星星座的拓扑变化更快更复杂。主要影响因素见表1。

表1 卫星网络路由主要影响因素

项目	主要影响因素
星座特点	低轨星座反向缝
	低轨卫星运行近极点时，星间链路互相干扰
	低轨卫星运行过极点后，异轨间连接对象改变
	高轨对低轨卫星的可见性
气象天文因素	低轨对地面站的可见性
	日凌、月凌对高轨下行链路造成影响
用户特点	雨、雪、云、雾等气象对Ka频段、激光馈电路径造成干扰
	用户分布严重不均，仅局部用户多，大部分情况下用户少

因此，未来高低轨卫星混合组网条件下的路由一定不能采用地面提前上注的方式完成，一方面发生路由故障时不能实际修复；另一方面随着卫星数量的增多上注数据量将在数十吉字节以上。

一种合理的路由管理方式是：

- (1) 由高轨卫星对低轨卫星的路由进行管理；
- (2) 高速率的路由传输一般情况下优先选择低轨卫星星间路由而非高低轨卫星星间路由；
- (3) 由于每颗低轨卫星都存在两条以上星间链路，因此在每颗低轨卫星上直接存储至少一条备份路由；
- (4) 当发生路由故障时，低轨卫星直接启动备份路由，保证网络连通性，然后告知高轨卫星路由故障，由高轨卫星对路由进行优化；
- (5) 地面仅向高轨卫星上注路由策略和算法，仅对路由故障进行监视。

4.3 计算迁移技术

计算迁移技术主要包含统一的计算迁移协议和接口。虽然现在许多卫星项目已经提出软件定义卫星技

术,甚至已经发射试验卫星,但要求所有卫星采用相同的软硬件系统是不可能的^[4]。这一点应借鉴地面互联网思路,各个计算机的软硬件系统不一样,但都通过TCP/IP实现互联。

目前虽然已经有一些基于大数据处理的分布式计算引擎,如spark、flink、storm等^[5]。这些引擎能够实现在上千台计算机上对海量数据进行分布式计算。首先,卫星网络需要的并非如此“重量级”的软件系统,即使卫星上处理能力不受限,能源消耗却不能无限增长。其次,这些计算引擎同样需要各个卫星采用相同的软件环境,并不能真正实现所有异构卫星平台计算能力的共享。

因此,对这一方面的研究工作仍任重而道远,且需要形成行业标准,才有可能真正实现卫星资源的共享,也才能实现真正意义上统一的天基信息网络。

5 结束语

本文对高低轨混合组网天基信息网络进行了展望,对基本的组成、网络架构、协议体系、关键技术进行了分析。提出了高轨卫星以管理为主、低轨卫星以传输为主的未来天基信息网络基本架构,并对未来星上信息分布式处理的基本模式进行了设想。

相比地面信息网络,目前的天基信息网络还处于起步阶段,未来发展潜力无限,必将迎来一个蓬勃发展的时期。

参考文献：

- [1] 颜洁,彭玉婷. NASA空间通信与导航网络现状及未来发展[J]. 国际太空, 2018(7):25-31.
YAN J, PENG Y T. Current status and future development of NASA space communications and navigation (SCaN) network. Space International, 2018(7):25-31.
- [2] 胡建平,徐会忠,李婷,等. 网络化综合化的天地一体化信息系统探讨[J], 飞行器测控学报, 2017, 36(4): 241-252.
HU J P, XU H Z, LI T, et al. Networked and integrated space-ground information system. Journal of Spacecraft TT&C

Technology, 2017, 36(4): 241-252.

- [3] 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.
- [4] 齐星,孙景云. 软件定义低轨小卫星网络的发展与挑战[C]//第十六届卫星通信学术年会论文集. 北京: [出版社不详], 2020:89-93.
QI X, SUN J Y. Advances and challenges for software-defined LEO small satellite networks[C]//The 16th Annual Satellite Communication Conference. [S.l.:s.n.], 2020:89-93.
- [5] 许利杰. 大数据处理框架Apache Spark设计与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
XU L J. Design and implementation of big data processing framework Apache Spark[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.

【作者简介】



胡建平 (1963—), 男, 中国西南电子技术研究所研究员级高级工程师, 主要从事飞行器测控通信系统以及卫星通信系统的研究及设备研制工作。



孙杰 (1982—), 男, 博士, 中国西南电子技术研究所高级工程师, 主要从事飞行器测控与通信技术、卫星组网技术研究。



徐会忠 (1966—), 男, 中国西南电子技术研究所研究员级高级工程师, 主要从事飞行器测控与通信系统总体技术、卫星通信技术研究工作。



李婷 (1986—), 女, 博士, 中国西南电子技术研究所高级工程师, 主要从事飞行器测控与通信技术、卫星组网技术研究。