

空间骨干网络体系架构与关键技术研究

梁俊¹, 胡猛^{1*}, 管桦¹, 熊健², 肖楠¹, 刘玉磊¹

(1.空军工程大学信息与导航学院,西安,710077;2.中国电子科技集团有限公司第十研究所,成都,610036)

摘要 空间骨干网络是由天、空、地中大型骨干节点组成的综合性一体化网络,是构建空间信息网络的核心支撑。在介绍了欧美关于空间信息网络研究现状的基础上,分析了空间骨干网络的相关特性和总体需求,提出了整个网络的体系架构和协议框架;该网络可划分为天基、空基和地基骨干网络 3 部分,各层以 IP 技术为基本协议架构,通过星间、星空、星地、空空、空地和地面链路实现互联互通;重点研究了基于多层卫星网络的天基骨干网络以及基于无线 Mesh 的空基骨干网络;最后,探讨了空间骨干网络的组网结构、路由协议、数据传输、异构兼容、网络管理等多项关键技术。对未来空间骨干网络构建具有一定的参考意义。

关键词 空间骨干网络;多层卫星网络;无线 Mesh;体系架构

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.04.010

中图分类号 TP393 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)04-0052-07

Research on Space Backbone Network Architecture and Key Technologies

LIANG Jun¹, HU Meng^{1*}, GUAN Hua¹, XIONG Jian², XIAO Nan¹, LIU Yulei¹

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2.The 10th Research Institute,China Electronics Technology Group Corporation,Chengdu 610036,China)

Abstract: Space backbone network is an integrated network composed by the space-air-ground large-scale backbone nodes, and the core of supporting space information network. On the basis of analyzing the status quo of research on space information network of the Europe and the United States of America, space backbone network architecture and protocol framework are proposed according to the relevant characteristics and overall requirements. The network is composed of space-based network, air-based network, and ground-based network. By so doing, this realizes mutual communication and cooperation through inter-satellite links, satellite-air links, satellite-ground links, air-to-air links, air-ground links and terrestrial communications lines. The space-based backbone network based on multi-layer satellite network and air-based backbone network based on wireless mesh are mainly studied. Finally, the paper explores the key technologies such as network structure, routing protocols, data transmission technique, heterogeneous compatibility, and network management. This research has some contributions for reference at a certain degree to the construction of future space backbone network.

Key words: space backbone network; multilayer satellite network; wireless mesh; architecture

收稿日期:2015-11-18

基金项目:国家自然科学基金(61501496)

作者简介:梁俊(1962—),男,江苏南京人,教授,博士生导师,主要从事空间信息网络与数据链技术研究.E-mail:Liangjunhja@sin.com

通信作者:胡猛(1992—),男,安徽蚌埠人,硕士生,主要从事空天信息网络组网技术.E-mail:humeng1126@sina.com

引用格式:梁俊,胡猛,管桦,等.空间骨干网络体系架构与关键技术研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(4):52-58. LIANG Jun, HU Meng, GUAN Hua, et al. Research on Space Backbone Network Architecture and Key Technologies[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(4): 52-58.

空间信息网络能够实时获取、传输和处理由部署在不同空间位置、执行不同任务的空间平台(如各类卫星、临近空间飞行器、航空器等)及相应的地面设施所产生的海量信息,具有大容量高速数据传输的能力,能够有效实现陆海空天地多维信息系统地连接,是当今全球科技和信息产业发展的热点领域^[1-2]。大型空间骨干节点组成的空间骨干网络是空间信息网络的的核心组成部分。这些骨干节点包括周期性可知的通信卫星节点、动态轨迹可预测的大型空基平台(包括大型航空器、平流层飞艇等临近空间飞行器)及固定的地面通信节点,具有强大的信息传输和处理能力^[3]。

空间骨干网络是典型的混合异构网络,具有平台环境各异、资源有限、协议异构、拓扑动态变化、通信链路波动等特性,现有天空地各异的分散化骨干网络架构无法适应未来空间信息网络的发展趋势。为此,开展空间骨干网络体系架构研究和关键技术分析具有十分重要的意义。

1 空间信息网络的发展现状

国外对于天空地一体化网络的研究始于 21 世纪初。近年来,欧美等发达国家相继提出了各种空间信息网络构想,并进行了实践。如美国国家航空航天局(NASA)的“地球科学事业”(ESE)计划^[4]、“将任务作为 Internet 节点来操作”(OMNI)项目^[5]、“虚拟任务操作中心”(VMOC)项目^[6]以及“太空互联网路由器”(IRIS)计划^[7]和欧洲空间局(ESA)的“航天器操作支持网”(OPSNET)项目^[8]等。其中最具代表性的项目是美军的“指挥与控制星座”(Command and Control ConstellationNet,C2 ConstellationNet)、“通用宽带数据链”(Common Data Link, CDL)体系^[10]及“转型通信体系结构”(Transformational Communication Architecture, TCA)^[11]、NASA 的空间通信与导航计划(Space Communication and Navigation, SCan)^[12]、欧洲的“面向全球通信的综合空间基础设施”(Integrated Space Infrastructure for Global Communications, ISICOM)^[13],这些研究都极大地推动了空间信息网络的发展。

1.1 C2 星座网

美国空军指挥控制星座网(C2 星座网)是美军全球信息栅格(GIG)的重要组成部分,是以 IP 网络为技术基础的 3 层架构网络。核心层主要包含侦察监视和指挥控制平台,通过 JTRS 电台和多种侦察平台通用的宽带数据链(MP-CDL)实现多军兵种互

联互通;中间层和外层的各武器平台可通过 Link-16 等数据链进行连接。C2 星座网中所有节点既可收发信息,也可以作为中继转发信息,并通过卫星实现全球互联。C2 星座网与陆军的陆战网和海军的力量网一起构成美军全球信息栅格三大军种子网,保证了不同军兵种的联合、协同作战能力。

1.2 通用宽带数据链(CDL)体系

美军军事理论演变与国防信息基础设施的发展,导致了军事作战理念的不断变革。其始于 20 世纪 70 年代的 CDL 计划可以有效支撑其军事作战理念演进过程中对于通信的巨大需求。早期 CDL 用于空中 ISR(情报、监视、侦察)平台与其他航空平台及地面站之间进行图像、视频等大容量侦察情报信息的分发^[14-15]。鉴于 CDL 在空基中的成功应用,美军于 21 世纪初进行了“空转天”的尝试,通过“作战响应空间”(ORS)计划逐步实现了 CDL 的天基应用^[16]。实践表明,天基 CDL 可以突破一般数据传输手段的限制,大幅度提高以侦察卫星为代表的天基 ISR 平台作战使用效能。可以预测,天基 CDL 将逐步应用于美军的整个空间感知网络,并可实现天空地 ISR 平台一体化发展。CDL 的应用场景及协议栈见图 1。

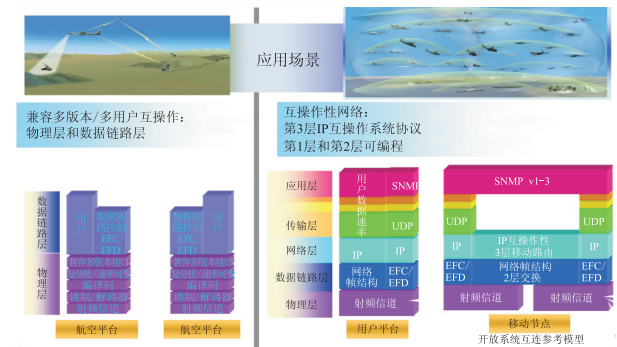


图 1 CDL 体系结构示意图

Fig.1 The schematic diagram of CDL architecture

1.3 转型通信体系结构(TCA)

TCA 本质上是美军 GIG 空间传输层,目的在于构建一个类似于互联网的宽带通信网络体系,结构见图 2。该通信体系确保了美军、情报安全部门与 NASA 之间的通信兼容能力^[17]。

TCA 设计以实现全球信息栅格的通信能力为目标。它由 3 个部分组成:以光纤网为基础的陆基部分;联合战术无线电系统(JTRS)为基础的用户终端部分;以转型通信卫星(TSAT)计划为基础的天基部分。

TCA 投资巨大,集成众多先进技术,涵盖了几乎美国所有的卫星通信项目,实现难度极其巨大,最终在 2009 年,该项目难以推进下去而被搁置。但是

TCA 层次结构设计、空间网络构建、实际应用目标等方面特点鲜明,是我国构建空天地一体化信息网络的重要参照。

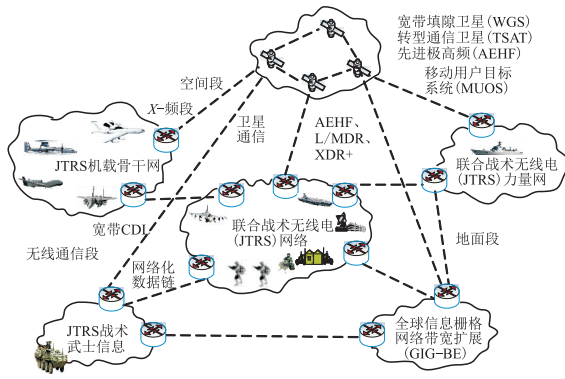


图2 转型通信体系结构示意图

Fig.2 Transformational communication architecture

1.4 空间通信与导航计划(SCaN)

SCaN 是 NASA 构建未来空间通信体系的发展计划。SCaN 计划涵盖 NASA 所有空间通信项目及相关技术的发展趋势,涉及 NASA 一切与空间通信相关的政策,建立并发展包括定位、导航及授时(PNT)等在内的空间通信标准。SCaN 的设计目标是建立一个具有涵盖整个太阳系范围内的空间通信能力的“行星际互联网”,如图 3 所示。

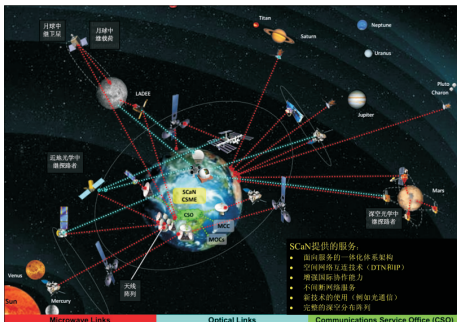


图3 SCaN 综合通信体系架构示意图

Fig.3 SCaN integrated communication architecture

SCaN 主要由地球中继子系统、近地子系统和深空子系统 3 部分组成。3 个子系统通过统一的测控调度、网络管理以及业务服务形成一个有机整体,并可与各个任务操作中心以及相关国际机构和地球站互联互通。SCaN 涉及空间互联网(DTN 和互联网协议)、空间宽带通信(包括光)、定向天线阵列、高性能星上载荷等关键技术。

1.5 面向全球通信的综合空间基础设施(ISICOM)

ISICOM 以一种“物联网”形式把不同类型的网络节点综合在一起,形成天基综合全球通信网,整个系统由地面节点单元和空间节点单元组成。

地面部分是整个系统不可或缺的一部分,包括固定/移动的关口站、卫星管控中心、地面中继节点、分

布式天线系统、各类固定/移动式通信终端等。空间部分包括:①GEO/GSO 卫星星座,是空间层的骨干网络,也可以兼作接入网络;②NGSO 卫星星座,是空间层的接入网络,兼作骨干网;③导航/定位系统,为整个系统提供时空基准;④地对地观测卫星星座,遥感、测控、监视等感知信息的获取;⑤高空平台系列,提供应急通信和接入转发服务;⑥无人机系列,通过空中链路与高空平台互联,实现信息的互传。

2 相关特点及总体需求分析

2.1 空间骨干网络特点

1)覆盖空间广,时空跨度大。突破地面网络所存在的地理环境限制,覆盖范围从地面拓展到海洋、天空乃至外太空。

2)网络异构,拓扑动态变化。空间骨干网络是典型的混合网络结构,涉及到卫星网络、航空机载网络以及地面网络等多种网络形式,对整个网络的兼容性和可拓展性提出了挑战。同时空间骨干节点持续高动态变化、通信链路不连续等特性也是需要解决的重要问题之一。

3)多种技术挑战并存。空间骨干网络应用需求巨大、用户众多,对大容量高速数据传输、不同优先级的服务质量、一体化网络管理、系统安全性等多个方面提出了挑战。

2.2 总体需求分析

1)高速数据传输。空间信息网络中各类传感器实时接收到的海量信息,需要通过空间骨干网络快速准确地传递给数据处理中心。

2)灵活组网,快速重构。针对由于节点高动态性所导致的空间骨干网络拓扑动态变化、通信链路波动等特性,保证网络的数据处理和转发的有效性,要求网络具有较强的重构能力。

3)多种服务质量(QoS)保障。空间骨干网络覆盖范围广,时空跨度大,节点所处环境、组成与功能也不尽相同,导致所承担的业务存在种类、时敏性、可靠性等方面差异巨大,对网络 QoS 提出了不同的优先级需求。

4)网络结构扁平,易拓展。空中骨干网络可提供灵活、可靠的网络连接,互操作性强。考虑到成本与技术实现,整个网络的构建要基于现有的网络基础设施,通过分步改进和创新来满足未来不断增长的应用需求。

3 空间骨干网络体系架构

空间骨干网络的体系架构见图 4。由空间节点

所处层次和特点可以将空间骨干网络划分为 3 层:天基骨干网络、空基骨干网络、地基骨干网络。各层网络在 IP 技术为基本框架和协议基础上,通过星间、星地、星空、空空、空地以及地面有线链路连接起来,统一形成全球覆盖的一体化空间骨干网络体系。

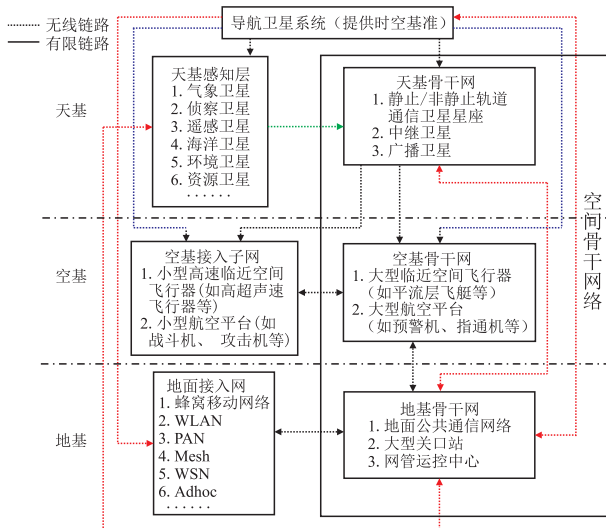


图 4 空间骨干网络体系架构示意图

Fig.4 Space backbone network architecture

从技术发展的趋势和业务需求,未来的天基、空基、地基通信网络将逐步实现一体化。需要一种有效的协议框架来屏蔽各类异构网络之间的差异,为用户提供透明服务。IP 协议标准作为成熟的地面网络基础,也是实现天空地网络融合的最佳选择。基于 IP 的空间骨干网络协议架构见图 5^[3]。

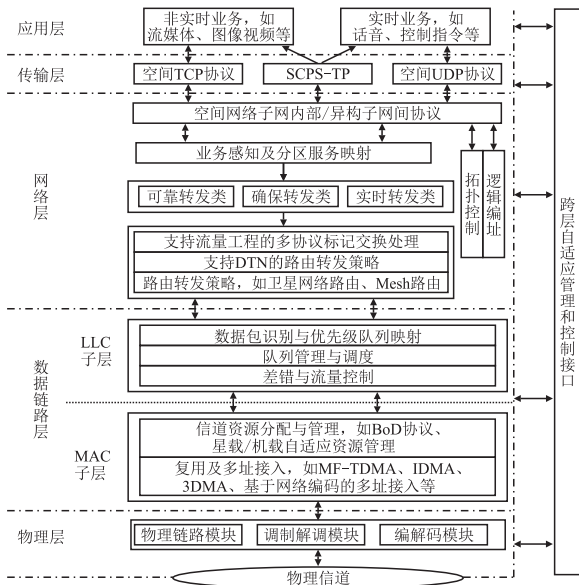


图 5 空间骨干网络协议架构示意图

Fig.5 Space backbone network protocol framework

地面网络的研究已经十分成熟,本文着重介绍天基骨干网络以及空基骨干网络。

3.1 天基骨干网络

天基骨干网络是由静止轨道通信卫星星座(包括中继卫星)、非静止轨道通信卫星星座所组成的一种立体化、交叉式多层卫星网络,通过星间链路完成数据信息在网络中的路由、交换和传输。

3.1.1 天基骨干网络功能与相关特性

3.1.1.1 功能

1)为天基感知层提供服务。天基感知层由各类在轨的天基传感器(气象卫星、侦察卫星、遥感卫星、海洋卫星、环境卫星、资源卫星等)组成,主要提供天气预报、侦察情报、地理测绘、环境监测等服务。通过天基骨干网络可以快速、高效、实时将这些数据、图像、视频和语音信息传送回地面。

2)为空基信息网络提供服务。空基骨干节点可通过天基骨干网络中继通信,进一步增大整个网络的通信范围,提高网络的健壮性和灵活性。

3)为地面通信网络提供服务。地面通信网络发展迅速、规模庞大,但仍有许多人口稀少和自然环境恶劣的地方,由于成本和技术等原因,地面通信网络难以覆盖^[20]。天基骨干网络以其独有的优势,可提供全球覆盖通信与宽带多媒体服务,与地面网络互补融合发展。

4)其他服务。为深空探测活动提供数据中继服务等。

3.1.1.2 相关特性

1)传播时延大。天基骨干网络空间跨度大,由此造成的星地、星空链路的距离远,带来显著的传播时延。这对于一些实时性要求高的业务影响严重。

2)天上资源受限。由于卫星所处环境和技术的约束,星上载荷能力受到限制,由此带来了 2 个主要问题:①频率资源受限,②功率资源受限^[21]。随着承载业务量与业务类型的不断增加,受限的卫星资源与日益增长的业务需求的矛盾日益突出,这逐渐成为制约天基骨干网络乃至整个空间信息网络发展的巨大瓶颈。

3)链路质量差。大范围的空间跨度导致的较大自由空间损耗,同时卫星信号易受到大气吸收、雨衰等影响,卫星星上资源受限。综上因素,天基骨干网络具有通信链路的高误码率特性,整个网络的性能存在瓶颈。

4)网络拓扑时变。天基骨干网络中非静止轨道卫星星座节点运动速度快,导致,网络拓扑动态变化,通信链路不连续,给整个网络的信息传输以及业务服务质量带来了挑战。

3.1.2 天基骨干网络体系架构

天基骨干网络的体系架构可以从网络拓扑结构和协议体系 2 方面进行说明。

3.1.2.1 网络拓扑

天基骨干网络的拓扑结构见图6。天基骨干网络由处在不同轨道高度的多层卫星星座组成,负责接收、处理、传输和转发来自于天基感知层、空中平台信息,是整个空间骨干网络的核心。

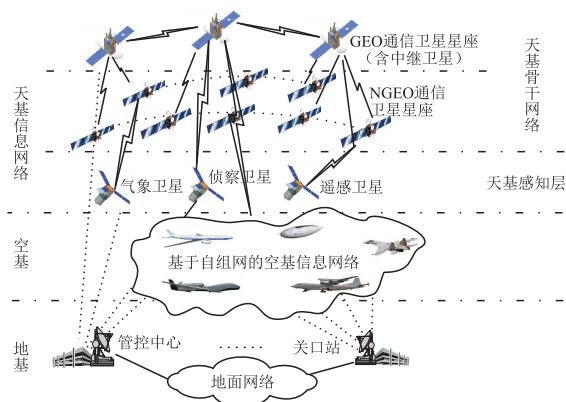


图6 天基骨干网络拓扑结构示意图

Fig.6 Space-based backbone network topological structure

3.1.2.2 协议体系

为实现天基骨干网络与整个空间信息网络间的互联互通与信息交互,统一、兼容、高效的协议体系必不可少。相关的协议体系主要有以下3类:①CCSDS协议体系^[22];②DTN协议体系^[23];③TCP/IP协议体系。但对于天基骨干网络来说,这3种协议体系都存在一定的缺陷。

1)CCSDS协议体系主要针对天基平台的测控任务设计的,其网络层到应用层功能欠缺,难以完成天基节点之间数据的路由交换。虽然后期进行了适应性改进,在CCSDS的基础上规范了一套空间通信协议组(SCPS),但是难以与地面的TCP/IP协议实现兼容。

2)DTN协议体系主要针对具有大时空跨度、通信链路中断频繁、微弱信号等特性的深空探测任务设计的,因此并不适合天基骨干网络。而且该协议体系只是一个框架,还没开发具体协议,并且如何与地面成熟网络兼容也缺乏研究。

3)TCP/IP协议体系在地面通信网络得到广泛应用,相关研究已经十分成熟。但是天基节点所处环境以及拓扑结构与地面差异很大,且节点的载荷能力不足,这些都直接影响到TCP/IP协议在天基骨干网络中的应用。

综上所述,现有的几种相关协议体系并不能很好满足天基骨干网络的实际需求。现在普遍的设计思想是将地面成熟的IP互联网络向天延伸。考虑到不同协议体系的优缺点、天基节点所处环境和链路状况以及现有天基网络建设实际,可以构建一种TCP/IP与CCSDS相结合的协议体系^[24]。该体系

在数据链路层继续保留CCSDS的相关建议;网络层采用改进后的IP协议;传输层以及应用层根据实际业务需求可考虑不同的协议标准。

3.2 空基骨干网络

空基骨干网络是由动态轨迹可预测的大型空中平台(包括大型航空器、平流层飞艇等临近空间飞行器)通过基于无线Mesh的自组网形式构建起来一种灵活、高效的网状型网络。该网络中各个空中平台都具有路由网关功能,可以通过多跳的方式实现数据信息的路由、交换与转发。

3.2.1 功能

1)为自身骨干节点提供服务。空基骨干节点主要包括指挥与控制平台(如预警机、指通机)、ISR平台(如有人/无人侦察机、飞艇)、保障平台(如运输机、空中加油机)和大型作战平台(如轰炸机),这些骨干节点实时产生大量的指挥控制、侦察监视、空勤态势以及战场打击等信息。这些信息可通过空基骨干网络自身或者天基骨干网络中继实时、准确地传递给地面信息中心以及各个空中平台。

2)为空基接入子网提供服务。Ad Hoc自组网形式构建的空基接入子网由战斗机、攻击机等各类小型空中平台组成。由于小型航空器具有运动速度快、机动性能强、自身载荷受限等特性,导致整个接入子网通信链路波动频繁、拓扑结构变化迅速、作战范围和带宽受限。空基接入子网通过接入空基骨干网络,可实现整个战场态势的实时共享,有效地提升了作战半径和作战效能。

3)为地面通信网络提供服务。可通过空基骨干节点拓展地面网络的覆盖范围。例如Project Loon、Project Titan项目计划^[25]。

3.2.2 相关特性

与天基骨干网络类似,空基骨干网络也具有资源受限、通信链路波动、拓扑时变等特性。有所不同的是,由于骨干节点所处位置导致空空及空地通信链路短、传播时延小,适合一些实时性要求高的业务传输。

3.2.3 空基骨干网络体系架构

无线Mesh网络具有如下特点:①无线多跳网络;②支持Ad hoc方式互连,具有自组织、自我管理、自愈能力;③支持多种网络接入;④拓扑结构相对稳定;⑤兼容性强;⑥骨干节点专门化。

由大型空中平台(包括预警机、指通机、大型无人机以及临近空间飞行器等)构成的空基骨干节点相比小型航空平台来说,移动性不强,载荷大,航迹相对固定,适合通过以基于无线Mesh的方式进行组网,实现高带宽、大容量、实时有效的信息分发。

与传统无线 Mesh 网络类似,空基骨干节点可以作为无线 Mesh 网关和路由器节点,与现有蜂窝网络、数据链、无线传感器网络、卫星通信网络等多种异构无线移动网络互连互通,并为空基接入子网提供无线接口,使得小型航空平台接入到天空地一体化网络,从而实现整个网络真正的互联互通。

空基骨干网络的架构示意图为图 7。类似于由多层卫星网络构成天基骨干网络,空基骨干网络体系架构可分为接入层和中继层。接入层是由相距距离较近、存在直接互通链路的空基骨干节点组成,可为空基接入子网提供网络接入功能,各成员通过层内路由实现信息的转发。中继层由不同接入层中某几个节点或者一些独立的节点构成,通过这些节点的中继,可实现不同接入层之间的超视距通信。当存在不同空基骨干网络时,中继层成员可以与天基骨干网络互联,实现大空间跨度的覆盖。

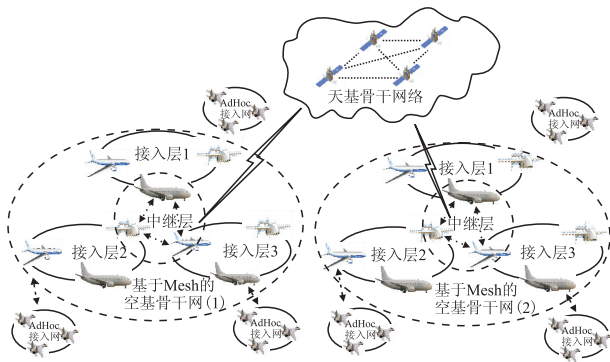


图 7 基于无线 Mesh 的空基骨干网络架构
Fig.7 Air-based backbone network architecture
based on wireless Mesh

4 空间骨干网络关键技术

4.1 基于 SDN 的新型网络架构设计

软件定义网络(Software Defined Networking, SDN)是一种数据控制分离、软件可编程的新型网络体系架构,是未来通信网络的演进方向。针对空间网络节点类型多样、能力差异大、技术体制不一、在轨硬件升级难度大等问题,借鉴 SDN 理念,开展各类节点资源(如天线^[26]、功率、频率、计算、存储等)虚拟化研究,构建屏蔽底层硬件差异全网统一的资源控制管理模型,突破适用于空间网络特征的资源虚拟化映射和动态调度控制等关键技术,完成面向任务可动态重构的空间信息网络架构设计。

4.2 空间高动态网络大容量传输理论与方法

空间骨干网络中网络节点和链路动态变化,导致信息传输容量随动态变化。为实现各类用户高速无缝接入,不同类型的业务信息快速交换,保障多用

户海量数据高速通信,需重点研究时变网络的信息传输理论、网络资源感知与优化配置方法、高动态时变网络资源智能协同方法、海量信息分布式协作传输方法。这涉及到很多值得研究和应用的前沿技术手段,例如空间光通信、三维多址(3DMA)技术、网络编码等^[27]。空间光通信可用频带宽、方向性强、传输码率高、保密性强、天线尺寸小,是进行空间高速传输的绝佳选择。3DMA 技术指的是数据链路波形使用了频率、空间和时分多路传输等三维多址联网方式。网络编码指出网络信息流可以被处理或压缩,从而可以进一步提高网络吞吐量、增加网络可靠性、减少重传次数、提升网络安全等,网络编码在空间信息网中的应用仍处于起步阶段,是一个值得探索的方向。

4.3 遥感、导航、通信多载荷集成与协同应用

空间信息网络的显著特色是卫星平台集成不同类型的有效载荷,网络中各个节点以一种用途为主,兼顾其他功能。例如,在低轨卫星上集成 GNSS 数据接收和处理模块,实现对北斗系统的增强;在遥感卫星上集成通信载荷,构建遥感数据的星间传输网络,其保证遥感大数据的实时传输的同时,还可作为卫星通信网络的有效补充。为此,需要突破多载荷配置与布局协同设计、低轨卫星 CORS 增强、导航网与通信信息网融合、动态导航增强网络架构、多载荷一体化任务规划与调度等关键技术。

4.4 异构兼容技术

空间骨干网络由各类不同骨干节点与网络组成,网络异构不可避免。考虑到未来天、空、地一体化这一大的发展趋势,IP 技术将作为空间信息网络的协议和架构基础。网络的高层协议可采用基于 TCP/IP 框架的协议标准;由于平台异构,物理层和数据链路层协议差异较大,需要一种智能化的转换机制以实现数据格式、通信速率等的兼容。

4.5 面向任务的一体化网络管理技术

针对空间骨干网络在不同时期所承担不同业务类型的实际应用需求,综合考虑骨干节点以及网络特性,一体化网络管理需要对当前网络进行监视、测试、配置、分析、评价和控制,实现资源统一调配,检测网络故障,计算网络负载,维护网络正常运行。针对空间骨干网以及相应的接入网,现有的集中式管控架构无法适应分层拓扑的频繁变化,因此需要研究与多种异构动态网络相适应的基于分布式管控架构的一体化网络管理技术,减少快速变化的网络特性和节点成员关系对网络性能的影响。

4.6 空间信息网络的安全与可靠性理论

由于空间信息网固有的开放网络通信环境,网

络链路很容易受到宇宙射线、大气层电磁信号或恶意电磁信号的干扰、甚至受到太空武器的攻击,为保障空间信息网络中信息传输的机密性、认证性、完整性和可用性,需要重点研究卫星网络可靠性方法、空间信息网络安全体系、抗毁安全路由协议、空间信息对抗、信息加密、节点动态感知与网络自愈等关键技术问题。

5 结语

空间骨干网络是构建天空地一体化信息网络的核心支撑,是当今信息科学领域的热点。本文从分析国内外空间信息网络的相关工作入手,重点阐述了空间骨干网络特别是天基骨干网络和空基骨干网络的体系架构。天基骨干网络体系结构采用多层卫星网络形式,通过星间、星地链路实现数据信息路由、交换和传输。空基骨干网络采用基于无线 Mesh 的自组网形式构建,骨干节点具有 Mesh 路由和网关功能的,通过空空、星空、空地链路完成整个网络的互联互通。但是为真正实现空间骨干网络的应用还有很长的路要走,需要解决很多关键性的技术。通过关于空间骨干网络体系架构以及相关关键技术的研究与分析,对为未来构建适应我国国情的空间信息网络具有一定的参照意义。

参考文献(References):

- [1] 国家自然科学基金委员会.空间信息网络基础理论与关键技术重大研究计划 2015 年度项目指南[EB/OL].(2015-04-16).
<http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab38/info48285/htm>.
NSFC.2015 Annual Project Guide for the Major Research of Space Information Network Basic Theories and Key Technologies[EB/OL].(2015-04-16).<http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab38/info48285/htm>. (in Chinese)
- [2] 李德仁,沈欣,龚健雅,等.论我国空间信息网络的构建[J].武汉大学学报:信息科学版,2015,40(6): 711-715.
LI Deren, SHEN Xin, GONG Jianya, et al. On Construction of China's Space Information Network [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 711-715. (in Chinese)
- [3] 黄松华,梁维泰.基于 Mesh 和 NEMO 的天空地网络体系架构研究[J].中国电子科学研究院学报, 2015, 10(1): 37-43.
HUANG Songhua, LIANG Weitai. Research on Space-Air-Ground Information Network Architecture Based on Mesh and NEMO [J]. Journal of CAEIT, 2015, 10(1): 37-43.
- [4] 李辉.美国民用综合性地对地观测系统研究[J].中国航天, 2012(4): 26-32.
LI Hui. Research on the United States Civilian Integrated Earth Observing System [J]. Aerospace China, 2012 (4): 26-32.
- [5] 黄薇,吴伟陵.OMNI-实现空间通信系统标准化的新思路[J].电讯技术, 2003, (4): 15-20.
HUANG Wei, WU Weiling. OMNI: A New Approach to Standardize Space Communication System [J]. Telecommunication Engineering, 2003, (4): 15-20. (in Chinese)
- [6] 洪海丽,邱红哲.美军虚拟任务作战中心走向实战[J].装备学院学报, 2015, 26(2): 62-67.
HONG Haili, QIU Hongzhe. U.S. Forces' Virtual Mission Operations Center on the Way to Actual Combat [J]. Journal of Equipment Academy, 2015, 26(2): 62-67. (in Chinese)
- [7] Florio M A, Fisher S J, Shaum M. Internet Routing in Space: Prospects and Challenges of the IRIS JCTD[C].IEEE Military Communication Conference, Orlando, FL, USA, 2007.
- [8] 郭丽红,黄薇,王雄英,等.欧空局 OPSNET 通信网新进展[J].飞行器测控学报, 2013, 32(5): 371-377.
GUO Lihong, HUANG Wei, WANG Xiongying, et al. The Latest Development of OPSNET of ESA [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(5): 371-377. (in Chinese)
- [9] 郝飞.美国空军指挥控制星座网近期发展概况[J].指挥信息系统与技术, 2010, 1(2): 29-33.
HAO Fei. Recent Development of Command and Control ConstellationNet of USAF [J]. Command Information System & Technology, 2010, 1(2): 29-33. (in Chinese)
- [10] 陈剑贇,吴婷婷,赵新昱.外军宽带数据链发展研究[J].国防科技, 2008, 29(1): 80-83.
CHEN Jianbin, WU Tingting, ZHAO Xinyu. A Research on the Development of Foreign Military Broadband Data Link [J]. National Defense Science & Technology, 2008, 29(1): 80-83. (in Chinese)
- [11] 朱贵伟,张照炎.美国转型通信体系研究[J].航天器工程, 2010, 19(6): 102-108.
ZHU Guiwei, ZHANG Zhaoyan. Research on USA Transformational Communication Architecture [J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(6): 102-108. (in Chinese)
- [12] 闵士权.天基综合信息网探讨[J].国际太空, 2013, (8): 47-54.
MIN Shiquan. Preliminary Study for Space-Based Integrated Information Network [J]. Space International, 2013, (8): 47-54. (in Chinese)
- [13] NASA. Space Communication and Navigation (SCaN)[EB/OL].
http://www.nasa.gov/content.scanhomepage/#VOO_5_RAU-0.
- [14] 梁俊,罗永强,黄国策,等.数据链技术与应用[M].北京:蓝天出版社, 2014.
LIANG Jun, LUO Yongqiang, HUANG Guoce, et al. Data Link Technology and Application [M]. Beijing: Blue Sky Press, 2014. (in Chinese)

(下转第 69 页)

- Modeling and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [17] 丁世飞,齐丙娟,谭红艳.支持向量机理论与算法研究综述[J].电子科技大学学报,2011,40(1):2-10.
DING Shifei, QI Bingjuan, TAN Hongyan. An Overview on Theory and Algorithm of Support Vector Machines[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011,40(1):2-10. (in Chinese)
- [18] CRISTIANINI N, SHAWE-TAYLOR J. 支持向量机导论[M].李国正,王猛,曾华军,译.北京:电子工业出版社,2004.
CRISTIANINI N, SHAWE-TAYLOR J. An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-Based Learning methods[M]. LI Guozheng, WANG Meng, ZENG Huajun (上接第58页)
- Translated, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese)
- [19] 黄勇,郑春颖,宋忠虎.多类支持向量机算法综述[J].计算技术与自动化,2005,24(4):61-63.
HUANG Yong, ZHENG Chunying, SONG Zhonghu. Multi-class Support Vector Machines Algorithm Summarization[J]. Computing Technology and Automation, 2005, 24(4): 61-63. (in Chinese)
- [20] HAMIDA N B, KAMINSKA B. Multiple Fault Analog Circuit Testing by Sensitivity Analysis [J]. Journal of Electronic Testing, 1993, 4(4): 331-343.
- (编辑:徐楠楠)
-
- [15] 梁俊,袁小刚,杨芳,等.通用数据链传输信道分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2005,6(2):58-61.
LIANG Jun, YUAN Xiaogang, YANG Fang, et al. Transmission Channel Analysis of Common Data Link [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2005, 6(2): 58-61. (in Chinese)
- [16] 李高峰,王余涛.美军天基通用数据链发展研究[J].国际太空,2013(11):47-58.
LI Gaofeng, WANG Yutao. Research on the Development of U.S. Forces' Space-Based Common Data Link [J]. Space International, 2013(11): 47-58. (in Chinese)
- [17] 丁雪丽.美国转型通信体系结构(TCA)的发展[J].计算机与网络,2005(9):49-51.
DING Xueli. The Development of USA Transformational Communications Architecture (TCA) [J]. China Computer & Network, 2005(9): 49-51. (in Chinese)
- [18] 闵士权.我国天基综合信息网构想[J].航天器工程,2013,22(5):1-14.
MIN Shiquan. An Idea of China's Space-based Integrated Information Network [J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(5): 1-14. (in Chinese)
- [19] Space Communication and Navigation Office/NASA. Space Communication and Navigation (SCaN) Network Architecture Definition Document Volume 1 [R]. NASA Headquarters, Washington DC, 2011.
- [20] 郭庆,王振永,顾学迈.卫星通信系统[M].北京:电子工业出版社,2010.
GUO Qing, WANG Zhenyong, GU Xuemai. Satellite Communication System [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)
- [21] 肖楠,梁俊,刘玉磊,等.一种支持时延约束的卫星认知网络功率控制算法[J].工程科学学报,2015,37(8):1098-1104.
XIAO Nan, LIANG Jun, LIU Yulei, et al. Power Allocation Algorithm Supporting Delay Constraints for Satellite Cognitive Radio Networks [J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(8): 1098-1104. (in Chinese)
- [22] 雷光雄,王赛宇.基于CCSDS建议的纠错码技术研究[J].计算机与网络,2015(2):63-66.
LEI Guangxiong, WANG Saiyu. Research on Error Correcting Code Technologies Based on CCSDS Recommendations [J]. Compute & Network, 2015(2): 63-66. (in Chinese)
- [23] Fall K. A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets [C]//Proc of the ACM SIGCOMM 2003. New York: ACM, 2003: 27-34.
- [24] 陈宇,孟新,张磊.空间信息网络协议体系分析[J].计算机技术与发展,2012,22(6):1-5.
CHEN Yu, MENG Xin, ZHANG Lei. Analysis of Protocol of Space Information Network [J]. Computer Technology and Development, 2012, 22(6): 1-5. (in Chinese)
- [25] Wikipedia. Project Loon [EB/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Project_Loon.
- [26] 梁俊,牛红波,李栓红,等.通信系统与测量[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008.
LIANG Jun, NIU Hongbo, LI Shuanhong, et al. Communication System and Measurement [M]. Xian: Xidian University Press, 2008. (in Chinese)
- [27] 常青,李显旭,何善宝.我国空间信息网发展探讨[J].遥测遥控,2015,36(1):1-10.
CHANG Qing, LI Xianxu, HE Shanbao. Confer on the Evolution of Earth-Space Integrated Information Network of China [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(1): 1-10. (in Chinese)
- (编辑:徐楠楠)