

面向天地一体化信息网络的星载交换技术发展现状与趋势

吴昊¹, 王帅², 邓献策², 刘沛龙³, 刘凯³, 晏坚³

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084;

2. 清华大学航天航空学院, 北京 100084;

3. 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084)

摘要: 针对天地一体化信息网络的建设需求, 分别对星载信道化交换技术和分组交换技术的关键问题与研究现状进行分析。其中, 信道化交换的分析包括柔性数字信道化和微波光子变频交换, 分组交换则以软件定义卫星网络为代表进行探讨。然后, 针对空间组网与交换的未来研究方向, 从系统容量、可靠性、管控效能、服务质量的角度, 对星载交换技术的发展趋势与挑战进行展望, 为天地一体化信息网络的长期规划提供参考。

关键词: 星载交换; 信道化交换; 分组交换

中图分类号: TP927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021014

On-Board Switching for Space-Integrated-Ground Information Network: Progress and Trends

WU Hao¹, WANG Shuai², DENG Xiance², LIU Peilong³, LIU Kai³, YAN Jian³

1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3. Beijing National Research Center of Information Science and Technology, Beijing 100084, China

Abstract: Considering the requirements of the space-integrated-ground information network, the technologies of on-board channelized switching and the technologies of on-board packet switching were surveyed. Among, the discussed channelized switching technologies include flexible digital channelized switching and microwave photonic frequency conversion and switching, while the discussed packet switching technologies mainly include software-defined satellite network. Considering the future research directions of space networking and switching, the trends of on-board switching were discussed in terms of system capacity, reliability, efficiency, and quality of service, which provided a reference for the long-term planning of the space-integrated-ground information network.

Keywords: on-board switching, channelized switching, packet switching

1 引言

为了向陆、海、空、天各类用户提供随时随地的高质量信息服务, 下一代空间信息网络将向大容量、全球组网的方向发展。同时, 空间信息网络还将与地面网络无缝融合, 形成具有天地一体信息服务能力的天地一体化信息网络^[1-2]。

卫星是天地一体化信息网络的空间节点, 决定了空间网络的容量和组网能力。早期的通信卫星以对地静止轨道 (Geostationary Orbit, GEO) 卫星为主, 通过单个宽波束和星上透明弯管转发实现广域用户通信, 例如国际卫星组织运营的Intelsat系列卫星。由于可用频率资源有限, 这一阶段的卫星系统容量较小。为了提高频率利

收稿日期: 2021-02-05; **修回日期:** 2021-04-01

通信作者: 晏坚, yanjian_ee@mail.tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 91738202); 上海市市级科技重大专项 (No. 2018SHZDZX04); 北京信息科学与技术国家研究中心资助项目 (No. 20031887521); 中国博士后科学基金第67批面上资助项目 (No. 2020M670333)

Foundation Items: National Natural Science Foundation of China (No. 91738202), Shanghai Municipal Science and Technology Major Project (No. 2018SHZDZX04), BNRist (No. 20031887521), China Postdoctoral Science Foundation (No. 2020M670333)

用率，基于空分频率复用的多波束技术逐渐被应用。在多波束卫星系统中，用户位于多个波束覆盖下，因此卫星系统需具备不同波束间信息交互的能力。为实现波束间信息交互，高通量技术和星载交换技术是两种解决方案。高通量通信卫星系统中的业务主要是星状业务，位于不同波束下的用户都汇聚到信关站统一接入地面网络，如果两个用户彼此通信，则需要通过地面信关站两跳转发。星载交换系统中的业务则主要是网状业务，由卫星直接进行信号处理和交换，所有用户间的通信只有一跳，也就摆脱了对地面站的依赖。在对地非静止轨道（Non-Geostationary Orbit, NGSO）卫星星座中，采用星载交换技术和星间链路可实现不依赖地面网络的全球覆盖天基组网。考虑到我国建立海外信关站所面临的限制，星载交换是我国天地一体化信息网络建设的关键技术。

根据交换对象的不同，星载交换分为信道化交换（属于电路交换）和分组交换两类技术。信道化交换利用频带搬移实现不同波束、不同频段子信道间的交换，典型系统为宽带全球卫星（Wideband Global Satellite, WGS）系统。分组交换在星上进行调制解调等操作，在数字域交换用户业务的分组数据，典型系统为SpaceWay-3系统和铱星系统。

2 信道化交换技术

信道化交换技术适用于频分多址系统，宽频带的信道被划分为多个子信道，用户利用子信道对应的载波承载信息，通过频带搬移完成多个载波之间的交换。信道化交换技术在本质上是一种基于数字域信号处理的电路交换技术。随着信道带宽的不断提升和波束数量的不断增长，信号处理规模呈线性增长，交换规模则随容量呈指数级增长。如何降低星上处理复杂度成为提高系统容量的关键。将微波光子技术与信道化技术相结合，在光域通过微波光子处理完成波束级别粗颗粒交换，在电域利用信道化完成子信道交换，有望实现低复杂度大容量的星载交换，是信道化交换发展的新趋势。下面将对柔性数字信道化技术与微波光子变频交换技术分别进行介绍。

2.1 柔性数字信道化技术

柔性数字信道化技术是一种采用数字信号处理完成的透明转发技术，通过基于载波的细粒度子信道交换，将交换过程与通信体制解耦，能够实现较高的频率及功率资源利用效率。柔性则是指子信道带宽灵活可变，极大地提高了多业务适应能力。柔性数字信道化器原理示意如图1所示，卫星对上行信号进行子带提取、交换、

重建，可实现任意子信道间单播、组播及广播功能。当前，采用柔性数字信道化技术的典型代表为WGS卫星系统，其采用X波段和Ka波段进行通信，目前已发射10颗，其最新一代卫星单星容量可达11 Gbit/s。

柔性数字信道化技术的关键问题在于如何将输入信号提取成不同带宽的各子信道（称为分析），并将交换后的各子信道重建为输出信号（称为综合）。其算法具有多种实现方式，其中多级法、多相傅里叶变换法、数字下变频法、解析信号法等可以支持的子信道数量较少或要求各子信道带宽相等。基于离散滤波器组（Discrete Filter Bank, DFB）的数字信道化方法能够支持非均匀带宽子信道，但是该方法中滤波器设计与具体的用户子信道分配方案耦合，导致在子信道用户数量较多时，算法产生的存储开销极大，实用价值有限。与之对比，调制滤波器组（Modulated Filter Bank, MFB）则有效克服了上述缺陷。MFB的设计无须像传统DFB一样针对特定子信道划分方案设计滤波器组，而是简化为设计符合要求的低通原型滤波器，通过余弦或复指数调制动态改变其中心频率，以获得用于信号提取及重建的分析及综合滤波器组。其中原型滤波器的通带带宽、阻带及过渡带幅频特性分别决定了最终调制所得的滤波器组的子信道带宽（颗粒大小）、阻带衰减及重构误差性能。此外，MFB还能通过多项分解技术使得高效的多相结构实现，这使得该方案在实际工程应用中具有很大优势。目前，基于MFB的数字信道化算法成为了信道化技术的主流方案。

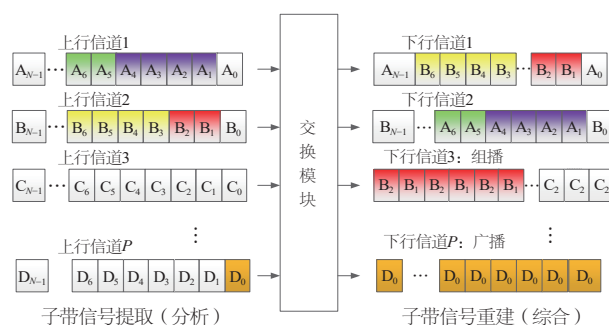


图1 柔性数字信道化器原理示意

目前设计MFB的方法根据其优化过程可分为非线性优化技术及线性搜索技术。早期的设计方法多属于非线性优化技术，如1987年首次提出的基于无损网格的方法^[3]及其改进方法^[4-5]，具有较高阻带衰减性能的二次约束最小二乘优化的方法^[6-7]，以及为改善局部极小值问题而提出的凸松弛优化方法^[8-9]。这些算法所得的滤波器组的阻带衰减及重构性能较好，但优化过程复杂耗时，对初始值敏感，在子信道数较多时难以确保获得满意的优化结

果。随着卫星系统带宽及用户的增加,子信道的划分需要更高的通道数和更细的颗粒度,这使得采用线性搜索技术的原型滤波器设计方法逐渐发展起来。典型算法有基于加权窗函数的原型滤波器设计^[10-12]、基于频率取样法的重构性能优化^[13-14]。这类算法所得滤波器性能相对非线性优化算法稍弱,但其搜索过程易于实现,在子信道数较多的情况下仍能确保较好的优化结果。

除了MFB本身的设计方法之外,另一个技术问题值得关注:采用数字信道化技术后,星载控制器可对提取出的各子信道独立设置功率增益,有利于缓解卫星转发器中高功放的非线性效应。在传统多载波卫星通信系统中,转发器高功放的非线性效应所带来的交调干扰,以及强信号对弱信号的抑制等问题,使得卫星转发器只能采用功率回退,功率利用率及系统容量难以提高。在数字信道化通信卫星中,MARSHALL率先提出可以通过调节各子信道的功率增益,改善高功放的工作状态,达到最佳工作点^[15]。对此,目前研究主要集中在优化各子信道增益分布以提高转发器功率效率^[16-17]、获取最高通信容量^[18]、获取最佳转发收益^[19]等方面,但已有研究均是在离线静态参数下的优化,计算过程耗时。由于链路动态不断变化,未来如何设计适合动态环境下的在线增益调整将是值得关注的方向。

2.2 微波光子变频交换技术

微波光子技术融合了微波技术和光子学,是一种使用光电器件和光电系统传输与处理微波信号的技术。微波光子技术将微波信号调制到光载波上,在光域实现分路合并、放大衰减、滤波等一系列处理,最后经过光电探测变换到微波域,输出微波信号。

与微波技术相比,微波光子技术的优势在于:能够更好地适应高频段、宽频带信号的变频处理;通过与光交换结

合能够有效克服微波开关矩阵的带宽、规模、损耗和干扰等方面的问题,支持宽带射频信号的大规模交换;由于元器件的尺寸与波长成正比,能更好地实现集成化和小型化。

在信道带宽提升和波束数量增长的驱动下,引入微波光子技术有望降低整体复杂度。将微波光子技术与数字信道化技术相结合的星上有效载荷典型结构如图2所示。其利用微波光子变频交换技术以较低复杂度实现波束级的宽带信道交换;利用数字信道化技术实现载波级的窄带信道交换,满足业务的灵活性需求,提高资源利用率。其中,光子信号处理单元主要用于实现宽带信道的分路合并,放大衰减、滤波等信号处理功能,电域信号处理单元主要用于实现窄带信道的分析与综合滤波等处理功能。

欧洲航天局提出了利用微波光子技术实现卫星转发的相应方案,实现了Ka频段到C波段的变频以及 4×4 微电机系统光交换矩阵转发,并完成了系统级的地面演示^[20]。2014年,VONO等^[21]提出在下一代卫星有效载荷中引入微波光子技术,使用光域的分布式本振网络支持变频处理,并分别基于微波技术和微波光子技术开展了20路Ka频段的下变频处理的仿真实验,结果表明基于微波技术的下变频功耗为80 W,质量为12 kg,而基于微波光子技术的下变频功耗为11 W,质量为5.2 kg。2017年,LV等^[22]提出一种将微波光子技术与数字信道化技术相结合的卫星有效载荷,实现L、S、Ku、Ka频段对应资源的多通道共享。2019年,空中客车公司宣称通过Optima项目推进的微波光子卫星有效载荷技术准备级别已经达到6级,这是原型样机之前的最后一个级别,但是,迄今未见微波光子变频与交换技术在轨验证的报道。

3 分组交换技术

与信道化技术不同,星上分组交换的对象是数字

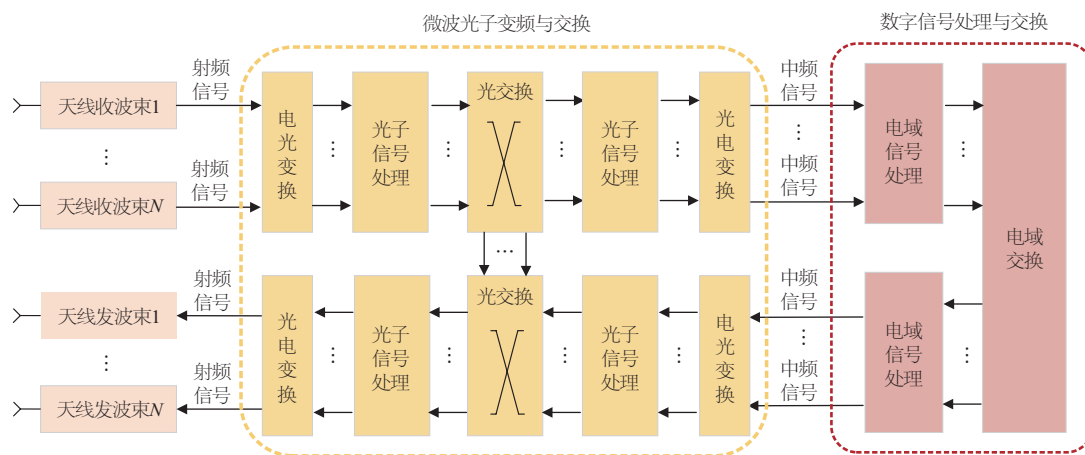


图2 微波光子技术与数字信道化技术相结合的星上有效载荷典型结构

码流（报文），要求卫星支持用户波形信号的调制解调处理。早期的分组交换采用与地面网络相同的协议与相关技术，进行了一系列研究与系统试验，IP交换是其中的典型代表，但由于空间网络存在多种特殊需求，IP无法高效率同时满足所有需求。近年来出现的软件定义网络（Software-Defined Networking, SDN）技术能够适用于多协议场景，同时能够支持服务质量（Quality of Service, QoS）保障等应用需求，具有广阔的发展前景。

3.1 星上IP交换技术

随着地面网络被IP所统一，为便于协议的兼容，早期尝试了在天基采用标准IP。已开展的在轨星上IP交换实验包括美国国防部的CLEO计划和IRIS计划，其中CLEO计划是在低轨卫星开展的，IRIS计划是在同步轨道卫星开展的，二者搭载的是经过加固后的思科路由器。

之后，星上IP交换技术并未获得广泛应用和持续发展，其主要原因在于空间网络对于效率的极致追求。一方面IP协议族在QoS保障方面能力较弱；另一方面，空间网络应用的复杂性带来了协议的多样性，采用多层封装的IP统一承载开销较大，空间网络的QoS路由解决方案更是难以统一。

3.2 软件定义卫星网络技术

相比于星上IP交换技术，软件定义卫星网络技术使得星载交换设备复杂度更低，网络控制更加灵活，网络功能更加丰富，能够以更高的效率满足空间网络的功能需求。软件定义卫星网络将星载设备的控制逻辑与转发功能解耦，将控制逻辑集中于控制平面统一管理，最简单的星载设备只保留转发功能。控制平面可以灵活地配置星载设备的转发操作，以可编程的方式实现各种复杂的网络功能。

软件定义卫星网络从架构上可分为数据平面和控制平面，前者以实现支持多协议的高效数据转发为研究目标，后者在全局视角下对网络实施管理和调度决策，相关技术以保障业务QoS和提高网络效率为研究目标。

3.2.1 数据平面技术

软件定义卫星网络有两大特点：资源受限及协议的多样性。资源受限是卫星网络所面临的基础问题，包括功率和计算资源的受限，这对高速分组交换的效率提出了需求。协议的多样性在于卫星网络所支持业务的多样性：卫星可能同时接收来自地面端的IP业务、其他航天器的基于空间数据系统咨询委员会的报文、特殊用户自定义的网络数据包，这意味着对于一个卫星转发节点，避免IP统一承载、多协议直接转发可以提高效率。

高速高效的分组交换研究可大致分为以下两个方面。

（1）针对硬件结构和资源的优化。在传统IP网络中，分组数据包的转发主要通过路由表中IP目的地址的查找匹配完成；而在SDN中，通过对路由表中匹配字段的增加以及转发动作的丰富，将传统的路由表扩展成为流表，从而支持对网络数据包更加丰富的匹配处理。因此该类研究主要集中在流表的设计及使用方法上，如参考文献[23]提出采用存储颗粒灵活分配的RuleMap方案来降低流表的资源和能耗开销。参考文献[24]提出使用超时机制来控制表项回收，提高流表利用率。参考文献[25]则提出将流表的使用和数据包传输路径相结合，在各个节点的流表之间实现负载均衡的效果。这类结构或资源优化策略应用于星载场景时，需特别考虑到空间高辐射问题，辅以必要的三模冗余等加固措施。

（2）高速包分类算法设计。目前普遍采用三态内容寻址存储器（Ternary Content Addressable Memory, TCAM）来实现高速包分类，但TCAM存在成本高昂、功耗极高、存储表项有限等问题^[26]。基于静态随机存取存储器的软件包分类算法成为研究的热点，其主要可分为3类：基于决策树的算法、基于规则集划分的算法以及二者融合的混合算法。基于决策树的算法将规则集构建为决策树的形式进行快速查找，典型算法如EffiCuts^[27]、CutSplit^[28]。这类算法的优点是分类速度快，缺点是决策树内常存在冗余规则，占用内存较大，规则集更新复杂，因此仅适用于规则集规模较小，更新速度不频繁，对分类速度要求较高的场景。基于规则集划分的算法主要是将规则集划分为多个规则子集进行查找，典型算法如SAX-PAC^[29]、TupleMerge^[30]。这类算法的优点是更新速度较快，不存在冗余规则，占用内存较小，而缺点是随着其规则子集数量的增加，分类速度逐渐变慢，因此适用于规则集规模较大，对规则更新速度要求较高的场景。混合算法则是综合利用前两种的方法，先划分规则集为各子集，之后将各划分子集构建为决策树的形式，从而在查找效率与更新效率之间取得性能上的折中。典型研究如参考文献[31]的PartitionSort算法，实现了分类及更新时间均在1 μs以下的优秀性能，但该算法预处理过程较为复杂。这类算法适用于规则集规模适中，对分类速度、更新速度均有一定要求的场景。由于星上资源受限，且不存在宇航级三态内容寻址存储器专用芯片，软件包分类算法将是星载交换的关注热点。总体来说，由于转发原理类似，目前提出的算法绝大多数均可应用于星载交换设备中，但考虑到星载高辐射问题容易造成的查找匹配错误，这类算法在执行查找时应采取一定的容错设计，如三模冗余、定时表项刷新等；针对星载链路高时延的特点，由于链路时延实际上远超流表匹配时延，因此在星载

场景下可适当放松对时延的约束,以换来其他匹配性能的提升。

为满足软件定义卫星网络的协议多样性需求,数据平面需支持协议快速更新及不同协议业务的同时转发。在地面SDN中,传统的OpenFlow技术由于数据平面与网络协议严格绑定,限制了转发设备的更新迭代,逐步被新兴的可编程数据平面技术所取代,典型的有P4 (Programming Protocol-Independent Packet Processors)^[32]及POF (Protocol-Oblivious Forwarding)^[33]。网络运营商可通过P4语言对转发设备核心模块进行编程,并编译下载到底层转发设备中,以完成指定转发功能的部署。POF借鉴经典CPU中的指令集思想,为SDN数据平面定制了一套用于定义分组转发行为的POF通用指令集(Flow Instruction Set, FIS),并通过<指针,偏移量>二元组将包分类过程抽象为特定位置字节的提取与匹配过程,从而实现转发行为与网络协议的解耦。这类技术致力于实现协议无关交换功能,支持数据平面业务协议的快速更新迭代,对于提高服务能力具有重要意义。当前的可编程数据平面技术仍主要面向单协议族多应用协议场景下的分组转发,对于上述星载多协议族混合组网场景的研究工作,目前尚未得到充分探讨,这将是后续软件定义卫星网络值得探究的一大问题。

3.2.2 控制平面技术

软件定义卫星网络在数据平面解决转发规则的高效执行问题。控制平面可以通过OpenFlow、P4 Runtime等控制接口协议对数据平面向下转发指令,配置相关交换设备执行各类决策。为保障业务QoS并提高网络效率,在控制平面需要解决的主要问题包括控制架构设计和控制算法设计。

控制器的层级架构设计,又称控制器放置(Controller Placement)问题,研究网络中控制器的数量、位置以及与交换设备的从属关系^[34]。不同的设计对于业务QoS和网络性能具有直接影响,其评价指标包括时延、可靠性和开销。针对以上3种评价指标可以实施不同的架构优化,具体如下。

(1) 从时延的角度,控制器与交换设备的传输距离影响信令传输时延,而控制器的处理能力和负载则影响网络决策时延。两者均影响网络对于状态变化的反应速度,进而影响业务等待时间和网络实时效率。此类研究^[34]在地面数据中心、广域网等场景主要通过优化控制路径距离、均衡控制器的负载来最小化时延。现有软件定义卫星网络研究提出多层控制架构,典型的如参考文献[35]提出的两层结构。在多层控制架构中,卫星控制节点处理能力有限,难以保证复杂控制策略的决策时延;并且控制器与节点间距离较远,信令传输时延可达到亚秒量级,难以满足对部分业务的实时管控,因此空间网络同

样具有时延优化需求。

(2) 从可靠性的角度,控制器或控制路径出现错误将造成交换设备不受控,从而降低网络性能。参考文献[34]总结了3种增加网络可靠性的方式:设备配置多条独立控制路径;多控制器主从备份;减少控制路径跳数。卫星设备和链路易受环境(如粒子辐射、电磁辐射、日凌)的影响,需要针对上述空间环境特点进行可靠性设计,并研究星上抗毁控制策略。

(3) 从开销的角度,主要考虑部署开销和能量开销。部署开销指增加控制器或设备带来的建链和同步开销,能量开销指控制平面运行的能耗。地面网络相关研究^[36]通过建立优化模型来最小化部署开销,并通过网络负载灵活关闭部分控制器和控制链路来降低能耗。卫星星座具有周期性的拓扑变化特征,可以通过直接指定控制链路的方式减小部署开销。同时,星上设备可以通过功率调整实现链路的动态能耗优化效果,结合卫星链路特征,将地面能耗开销优化方法应用于空间网络是有待研究的问题。

基于网络全局视图,软件定义卫星网络可以设计相应的控制算法,以中心方式实施路由与业务调度以提升业务QoS和网络效率。现有的中心式路由与业务调度方法多以地面网络为场景:参考文献[37]对利用SDN技术提供网络全局视图,并结合深度学习实现加速的路由方法进行了综述。此类方法原理相似,均以业务流矩阵(即每个业务流的带宽需求)、节点负载或链路负载等观测测量作为模式输入,以业务的完整路径或下一跳节点作为输出,以某个QoS参数指标作为奖励值构建深度学习模型。利用训练好的模型,网络节点可以根据网络当前状态直接求解完整路径或下一跳节点,相比于传统方法路由计算更快;在数据中心网络等内容服务商私有网络中,一些流量工程方法(如参考文献[38]所提方法)集中地对所有业务进行路径规划和带宽资源优化分配,同时对业务源的业务发送过程实施管控,使得业务发送过程和网络的资源分配相匹配以提升网络效率。在空间网络场景中应用上述方法仍面临挑战:首先,基于深度学习的路由方法需要开销大量的计算和存储资源用于训练过程,为卫星节点带来了巨大的计算和存储压力,如何在星上降低大量数据的训练开销有待研究;其次,卫星网络无法直接对业务源的传输过程进行控制,因此现有流量工程方法的效果有限。在空间网络中如何构建业务传输模型并实施业务传输规划还有待研究。

4 发展趋势与未来挑战

4.1 激光微波混合组网,提升系统容量

利用激光链路在通信容量、数据速率和传输距离上

的优势进行骨干传输,同时利用微波链路在应对不理想大气条件、实现广域覆盖等方面的优势进行广域接入是未来的发展趋势。

激光微波混合组网极大地提高了系统容量,也对低复杂度大容量星载交换技术提出了挑战。与现有的电交换相比,光交换在容量、规模、功耗等方面优势明显,有望成为提升交换容量、降低整体复杂度的选择。相应研究包括:CHAN^[39]提出了基于卫星激光微波混合网络架构的波分复用路由交换技术,对空间交换节点功能和应用场景开展了相应的研究;2019年,吴宾^[40]对卫星激光微波混合网络的弹性带宽交换和星上波长交换等关键技术开展了相应的研究,并搭建试验系统验证了资源灵活配置和弹性带宽交换的能力。相比于电交换技术,光交换存在一定的重配置开销,且尚未有成熟的光域存储器,在处理细粒度业务时性能急剧下降。YU等^[41]对数据中心的相关研究开展了相应的综述,在多种光电混合使用的模式中,采用光交换承载高带宽需求和长持续周期的业务流量,采用电交换承载细粒度业务流量。因此,将光交换和电交换结合起来,发展光电混合交换成为一种趋势。

在激光微波混合组网中,可以在模拟域引入光交换,如:针对微波链路,可以通过2.2节所述的微波光子变频技术与光交换技术相结合实现宽带射频信号的交换;针对激光链路,可以通过激光通信技术与光交换技术相结合的方式实现光波长交换。除此之外,在激光微波混合组网中,还可以在数字域中引入光交换,如:使用光交换结构实现数字域数据包的交换。整体来说,结合激光微波混合组网的特点,在交换结构、调度算法等方面开展光电联合设计成为重要的发展方向。

4.2 设计高效容错的交换结构,提升系统可靠性

不同于地面交换机,星载交换机面临着由空间辐射效应影响导致故障发生可能性急剧提高的问题。为提高设备可靠性,星载交换机需额外的冗余备份资源;而且,星载载荷的重量、体积、功耗是严格受限的。增加冗余备份资源会导致星载交换机的重量、体积、功耗进一步增大,也限制了星载交换容量的进一步提升。在星载交换机中,星载交换结构是不同端口数据交换的执行部件,其容量和可靠性直接影响了星载交换的容量和可靠性。因此,发展星载交换结构的高效容错技术,是提高星上资源利用率,保障星载交换机在轨高效运行的关键技术之一。

目前针对交换结构的可靠性提升,已开展了相关研究。在地面网络中,交换机多采用增加备份平面的容错方法,如Juniper的T640路由器。该方法存在资源利用率低的问题。为实现更高效的容错,CARPINELLI等^[42]提

出了一种容错Clos网络,通过在一个Clos平面内增加备份交换单元来实现交换结构的高可靠性。针对星载交换结构,YAN等^[43]基于Clos网络,对故障类型进行建模,并提出了输入输出并行Clos网络和并行互联Clos网络,获得比增加备份平面方法更高的可靠性和更低的实现复杂度。在星载交换结构容错调度算法设计方面,刘凯等^[44]基于Clos网络提出了全分布式容错调度算法,实现了Clos网络和交换单元内部的全分布式调度,降低了容错调度的复杂度。交换容量的不断提升对交换结构容错措施的高效性提出了更高的要求,研究更低复杂度的拓扑结构和调度算法是未来重要的研究方向。

4.3 星载数据平面部署网络功能,提升管控效能

现有天基网络管控功能(如负载均衡、状态监测等)主要由地面运控中心集中实现。然而,天基网络最大秒级传播时延与空间段多跳中继降低了管控的时效性与可靠性。在星载可编程数据平面中部署网络功能,感知本地状态并执行实时管控,是未来星载交换提升管控效能的重要发展方向。

在地面网络中,以P4^[32]为代表的交换程序语言及以Tofino2^[45]、Silicon One、Trident 4为代表的高性能可编程交换芯片为网络功能的部署提供了实现基础,相关技术已开展多项研究。参考文献[46]提出利用可编程数据平面网络探针功能进行交换机硬件主导的多播树实时优化。参考文献[47-48]研究了可编程数据平面实时负载均衡技术。参考文献[49]基于Barefoot PISA架构研究面向交换队列拥塞的流追溯技术,用于动态感知拥塞业务流。可编程数据平面网络实时管控已广泛应用于Facebook^[50]、Amazon、阿里巴巴等公司的数据中心网络,但迄今未见天基应用案例。

天基网络数据平面功能部署仍面临以下挑战:首先,空间大尺度快速变化的传播时延不利于分布式网络功能的收敛与协同,需研究分布式稳健性管控技术;其次,天基空中接口广域开放的特征放大了安全暴露面,需针对数据平面丰富的管控信令接口部署安全防护措施,保障管控可靠性。

4.4 星载交换内嵌存储与计算能力,提高服务质量

信息网络可抽象为通信、计算与存储资源构建的结构化实体,面向业务的服务就是3类资源的按需分配,调整不同资源的网内分布可降低业务获取资源的开销,提升服务质量。星上有限的功率制约了通信能力。在星载交换机中部署计算与存储资源^[51],构建星载存算一体化交换,可在交换过程中执行面向业务的信息处理,降低业务通信开销,提升服务质量。

国内外学者面向存算一体化交换进行了探索与展望^[51-52], 此类研究本质上是一种服务卸载技术, 能够显著降低服务时延^[53-54]。参考文献[55]建立了可编程数据平面按需配置架构, 在键值存储、共识协议以及分布式DNS服务的测试场景下, 网络服务算力在数据中心与交换机间动态迁移, 能效比降低3个数量级。参考文献[56]聚焦于数据中心Map Reduce大数据分析, 通过经典的可编程数据平面RMT架构实现键值的存储与聚合裁剪, 降低网络负载。参考文献[57]将机架级分布式强化学习训练算法卸载至交换机内, 裁剪信息流往返路径, 加快学习算法训练速度。

现阶段相关研究主要聚焦于存算一体化交换的应用。在天基实现存算一体化交换, 需开展星载资源受限条件下的高效线速计算、存储与转发技术研究, 包括融合计算与存储资源的交换流水线架构、可编排计算架构、交换计算指令集等关键技术。此外, 存算一体化交换的天基应用还需针对大尺度、大时延等固有特征进行适应性研究。

5 结束语

作为空间信息网络中的一项新兴技术, 星载交换已成为空间信息网络建设不可或缺的关键技术。结合我国天基网络建设的不要求, 本文对星载交换技术国内外研究现状的分析能够为国家重大工程的管理部门提供最新的技术动态, 为重大工程的技术路线选择和实施步骤规划提供参考。基于文中所述的解决方案, 卫星操作者能够明确采用不同星载交换技术的天基网络能力, 为卫星资源的规划布局提供参考。同时, 星上载荷研制的工业部门能够通过本文了解不同星载交换场景所需的载荷能力, 有助于在我国现有工业基础上选择适合的载荷研制路线。

参考文献:

- [1] 吴曼青, 吴巍, 周彬, 等. 天地一体化信息网络总体架构设想[J]. 卫星与网络, 2016(3): 30-36.
WU M Q, WU W, ZHOU B, et al. The overall architecture vision of Space and Ground Integrated Information Network[J]. Satellite & Network, 2016(3): 30-36.
- [2] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 11-26.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 11-26.
- [3] VAIDYANATHAN P. Theory and design of M-channel maximally decimated quadrature mirror filters with arbitrary M, having the perfect-reconstruction property[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1987, 35(4): 476-492.
- [4] KOILPILLAI R D, VAIDYANATHAN P P. Cosine-modulated FIR filter banks satisfying perfect reconstruction[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(4): 770-783.
- [5] ABU-AL-SAUD W A, STUBER G L. Efficient wideband channelizer for software radio systems using modulated PR filterbanks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(10): 2807-2820.
- [6] NGUYEN T Q. Near-perfect-reconstruction pseudo-QMF banks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(1): 65-76.
- [7] NGUYEN T Q, KOILPILLAI R D. The theory and design of arbitrary-length cosine-modulated filter banks and wavelets, satisfying perfect reconstruction[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(3): 473-483.
- [8] LU W S, SARMAKI T, BREGOVIC R. Design of practically perfect-reconstruction cosine-modulated filter banks: A second-order cone programming approach[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2004, 51(3): 552-563.
- [9] YIN S S, CHAN S C, TSUI K M. On the design of nearly-PR and PR FIR cosine modulated filter banks having approximate cosine-roll off transition band[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2008, 55(6): 571-575.
- [10] JAIN A, SAXENA R, SAXENA S C. An improved and simplified design of cosine-modulated pseudo-QMF filter banks[J]. Digital Signal Processing, 2006, 16(3): 225-232.
- [11] DATAR A, JAIN A, SHARMA P C. Design of Kaiser window based optimized prototype filters for cosine modulated filter banks[J]. Signal Processing, 2010, 90(5): 1742-1749.
- [12] DATAR A, JAIN A, SHARMA P C. Design and performance analysis of adjustable window functions based cosine modulated filter banks[J]. Digital Signal Processing, 2013, 23(1): 412-417.
- [13] CRUZ-ROLDÁN F, SANTAMARÍA I, BRAVO A M. Frequency sampling design of prototype filters for nearly perfect reconstruction cosine-modulated filter banks[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(3): 397-400.
- [14] CRUZ-ROLDÁN F, HENEGHAN C, SAEZ-LANDETE J B, et al. Multi-objective optimisation technique to design digital filters for modulated multi-rate systems[J]. Electronics Letters, 2008, 44(13): 827-828.
- [15] MARSHALL J, HEISLER J. SATCOM loading analysis with heterogeneous gain states[C]//MILCOM 2002. Piscataway: IEEE Press, 2002: 136-141.
- [16] MARSHALL J, JO K Y. Non-homogeneous gain state optimization

- for transponding satellite communications[C]//IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2003, 1: 517-522.
- [17] JO K Y. Optimal loading of satellite systems with subchannel gain-state control[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(2): 795-801.
- [18] LIU C, YAN J, CHEN X, et al. Capacity and loading analysis of digital channelized SATCOM system[C]//7th International Conference on Communications and Networking in China. Piscataway: IEEE Press, 2012: 155-160.
- [19] WANG S, YAN J, KUANG L L. Efficient power allocation for profits maximization in digital channelized SATCOM systems[C]//Proceedings of the International Astronautical Congress (IAC). [S.l.:s.n.], 2019.
- [20] SOTOM M, BENAZET B, KERNEC A L, et al. Microwave photonic technologies for flexible satellite telecom payloads[C]//2009 35th European Conference on Optical Communication. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [21] VONO S, PAOLO G D, PICCINNI M, et al. Towards telecommunication payloads with photonic technologies[C]//2014 International Conference on Space Optics. USA: SPIE, 2017, 10563: 1054-1062.
- [22] LV Q, ZHANG A, HUANG N, et al. Study on photonic and digital hybrid flexible satellite payload[C]//International Topical Meeting on Microwave Photonics. Piscataway: IEEE Press, 2017:1-4.
- [23] WU H, YAN J, LU J H. RuleMap: Protocol independent packet classification for software defined satellite networks[C]//Proceedings of the International Astronautical Congress (IAC). [S.l.:s.n.], 2020.
- [24] LI T, ZHOU H, LUO H, et al. SAT-FLOW: Multi-strategy flow table management for software defined satellite networks[J]. IEEE Access, 2017(5):14952-14965.
- [25] NGUYEN X N, SAUCEZ D, BARAKAT C, et al. OFFICER: A general optimization framework for openFlow rule allocation and endpoint policy enforcement[C]//Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2015.
- [26] HUANG H, GUO S, WU J, et al. Green datapath for TCAM-based software-defined networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(11): 194-201.
- [27] VAMANAN B, VOSKUILEN G, VIJAYKUMAR T N. EffiCuts: Optimizing packet classification for memory and throughput[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 40(4): 207-218.
- [28] LI W, LI X, LI H, et al. Cutsplit: A decision-tree combining cutting and splitting for scalable packet classification[C]//IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 2645-2653.
- [29] KOGAN K, NIKOLENKO S, ROTTENSTREICH O, et al. SAX-PAC (scalable and expressive packet classification)[C]//Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM. New York: ACM Press, 2014: 15-26.
- [30] DALY J, TORNG E. Tuplemerge: Building online packet classifiers by omitting bits[C]//2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-10.
- [31] YINGCHAREONTHAWORNCHAI S, DALY J, LIU A X, et al. A sorted partitioning approach to high-speed and fast-update OpenFlow classification[C]//2016 IEEE 24th International Conference on Network Protocols (ICNP). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-10.
- [32] BOSSHART P, DALY D, GIBB G, et al. P4: Programming protocol-independent packet processors[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 87-95.
- [33] SONG H. Protocol-oblivious forwarding: Unleash the power of SDN through a future-proof forwarding plane[C]//Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking. New York: ACM Press, 2013: 127-132.
- [34] LU J, ZHANG Z, HU T, et al. A survey of controller placement problem in software-defined networking[J]. IEEE Access, 2019(7): 24290-24307.
- [35] XU S, WANG X W, HUANG M. Software-defined next-generation satellite networks: Architecture, challenges, and solutions[J]. IEEE Access, 2018(6): 4027-4041.
- [36] KHORRAMIZADEH M, AHMADI V. Capacity and load-aware software-defined network controller placement in heterogeneous environments[J]. Computer Communications, 2018, 129(SEP):226-247.
- [37] QIAN M, FEI H, QI H. Deep learning for intelligent wireless networks: A comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4):2595-2621.
- [38] WU H, YAN J, LU J H. FlowTrace: Maximizing the service payoff of heterogeneous communications networks[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2020, 7(4):2481-2493.
- [39] CHAN V W S. Optical satellite networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(11):2811-2827.
- [40] 吴宾. 卫星激光微波混合网络中继交换关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- WU B. Research on key technologies of relay and switching for hybrid satellite network of laser and microwave[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [41] YU X S, WANG K, GU H X, et al. The optical interconnection network for cloud computing data centers: States of the art and future

- research[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(10):1924-1945.
- [42] CARPINELLI J D, NASSAR H. Fault-tolerance for switching networks[M]. Switching Networks: Recent Advances. Springer, 2001.
- [43] YAN J, LIU K, CHEN X, et al. An interconnected multi-plane multi-stage fault-tolerant on-board switching fabric[J]. China Communications, 2015,12(2): 74-83.
- [44] 刘凯, 晏坚, 高晓琳, 等. 星载Clos网络的全分布式容错调度算法[J]. 电子与信息学报, 2016(38):1377-1384.
- LIU K, YAN J, GAO X L, et al. Fully distributed fault tolerant scheduling for onboard clos-network switching[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016(38):1377-1384.
- [45] 陈果. 基于P4的可编程数据交换原型系统的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- CHEN G. Design and implementation of a P4-based programmable data switching prototype system[D]. Xi'an: XIDIAN University, 2018.
- [46] LUO S, YU H, LI K, et al. Efficient file dissemination in data center networks with priority-based adaptive multicast[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(6):1161-1175.
- [47] LEE J, MIAO R, KIM C, et al. Stateful layer-4 load balancing in switching ASICs[C]//Sigcomm Posters & Demos. New York: ACM Press, 2017:133-135.
- [48] PIT-CLAUDEL B, DESMOUCEAUX Y, PFISTER P, et al. Stateless load-aware load balancing in P4[C]//1st P4 European Workshop, IEEE International Conference on Network Protocols. Piscataway: IEEE Press, 2018.
- [49] CHEN X Q, LANDAU F S, YARON K, et al. Fine-grained queue measurement in the data plane[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Emerging Networking Experiments And Technologies. New York: ACM Press, 2019:15-29.
- [50] MIAO R, ZENG H, KIM C, et al. SilkRoad: Making stateful layer-4 load balancing fast and cheap using switching ASICs[C]//The Conference of the ACM Special Interest Group. New York: ACM Press, 2017.
- [51] CHEN Q, YU F R, HUANG T, et al. An integrated framework for software defined networking, caching, and computing[J]. IEEE Network, 2017(26):12-21.
- [52] LI J, XUE K, LIU J, et al. An ICN/SDN-based network architecture and efficient content retrieval for future satellite-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2020: 34(1):188-195.
- [53] ZHANG J, HUANG T, WANG S, et al. Future internet: Trends and challenges[J]. Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering, 2019(9):1185-1194.
- [54] NELSON D P J. When should the network be the computer? [C]//17th Workshop on Hot Topics in Operating Systems (HotOS). New York: ACM Press, 2019: 209-215.
- [55] TOKUSASHI Y, DANG H T, PEDONE F, et al. The case for in-network computing on demand[C]//The Fourteenth EuroSys Conference 2019 CD-ROM. New York: ACM Press, 2019:1-16.
- [56] YANG F, WANG Z, MA X, et al. Understanding the performance of in-network computing: A case study[C]//2019 IEEE Intl Conference on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking. Piscataway: IEEE Press, 2019:26-35.
- [57] LI Y J, LIU I J, YUAN Y F, et al. Accelerating distributed reinforcement learning with in-switch computing[C]//Proceedings of the 46th International Symposium on Computer Architecture. New York: ACM Press, 2019:279-291.

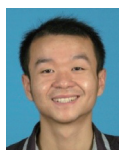
[作者简介]



昊昊（1995-），清华大学电子工程系博士生，主要研究方向为软件定义网络、卫星通信。



王帅（1995-），清华大学航天航空学院博士生，主要研究方向为软件定义卫星网络、SDN数据平面。



邓献策（1993-），清华大学航天航空学院博士生，主要研究方向为星载交换。



刘沛龙（1989-），博士，清华大学北京信息科学与技术国家研究中心博士后，主要研究方向为卫星网络路由与协议无关交换技术、智能网络管控技术。



刘凯（1986-），博士，清华大学北京信息科学与技术国家研究中心助理研究员，主要研究方向为天基信息网络架构及星载交换技术。



晏坚（1975-），博士，清华大学北京信息科学与技术国家研究中心研究员，主要从事空间网络体系结构与协议、星上处理与交换领域的研究工作。