

天地一体化信息网络光电混合交换技术研究

赵尚弘, 彭 聪, 李勇军, 李 海
(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安, 710077)

摘 要: 天地一体化信息网络在组网过程中会面临链路异构、信息多粒度和资源受限等挑战, 通过数据交换设计可以解决这些问题。描述天地一体化信息网络架构, 分析多粒度业务混合交换的现状, 并在此基础上提出光/射频/分组混合交换的设计思想, 主要包括混合交换结构设计、基于四波混频效应的光交换、宽带可配置射频信道化交换、基于软件无线电思想的分组高速交换、激光/射频异构链路光域聚合与疏导以及增强型GMPLS设计。

关键词: 天地一体化信息网络; 链路异构; 多粒度; 资源受限; 混合交换

中图分类号: V556

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021019

Research on Optical/Electric Hybrid Switching Technique for Space-Integrated-Ground Information Network

ZHAO Shanghong, PENG Cong, LI Yongjun, LI Hai
School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China

Abstract: Space-integrated-ground information network will face the challenges of heterogeneous links, multi-granularity of information and limited resources in the process of networking. The problems can be solved by data switching design. The architecture of space-integrated-ground information network was described, and the present situation of multi-granularity service hybrid switching was analyzed. Based on this, the idea of hybrid optical/RF/packet switching was proposed, i.e., hybrid switching structure design, optical switching based on four-wave mixing effect, broadband configurable RF channelized switching, packet high-speed switching based on software radio idea, laser/RF heterogeneous link optical domain aggregation and grooming and enhanced general multi-protocol label switching design.

Keywords: space-integrated-ground information network, heterogeneous link, multi-granularity, limited resource, hybrid switching

1 引言

天地一体化信息网络是以分布在太空域的高轨、中轨和低轨卫星, 平流层的飞艇、热气球以及航空域的有人或无人驾驶的飞行器为平台, 以微波或激光的方式建立链路构成的能够实时接收、处理和传输天地一体化信息的网络系统^[1-2]。早期的空间平台, 以星上系统为例, 处理能力十分有限, 只能进行简单的信号放大以及上下行频率变换, 俗称“透明转发”, 对信号的处理只能在地面站进行, 缺少灵活性和可扩展性。随着空天地用户数量的增多, 信息共享越来越频繁, 能够承载语音、数

字和多媒体的多功能卫星应运而生。在此基础上, 为了提高整个天地一体化信息网络的灵活性和实用性, 可以把部分地面上的信息处理功能转移到空间平台中实现; 然后通过组网, 不仅能够提供实时信息保障, 还能大大节约系统资源^[3]。然而, 空间平台在组网过程中面临链路异构、信息多粒度和资源受限等问题, 需要从网络架构和组网技术出发进行整体设计。

星间以及星地链路技术的逐渐成熟, 使得空间平台的组网成为可能, 以EHF、X、Ka等频段为代表的微波链路已经基本满足现有通信导航、遥感遥测任务的需求,

收稿日期: 2021-04-29; **修回日期:** 2021-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91638101); 国家自然科学基金资助项目 (No.6170010130)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.91638101), The National Natural Science Foundation of China(No. 6170010130)

但受微波频率的限制,在传输与处理速率、通信容量等方面存在的局限性使其难以满足天地一体化信息网络各类业务传输与分发需求,基于激光链路的空间光通信系统具有容量大、体积小、抗干扰能力强等优势,可以作为微波链路的有效补充。因此,可以预料激光与微波链路在未来天地一体化信息系统中长期共存,将两种链路结合,可以充分发挥各自优势,满足天地一体化信息网络各类业务传输与分发的需要。

天地一体化信息网络呈现多粒度性^[4]。第一,业务种类较多,从服务角度来看,业务种类包括中继业务、通信业务和测控业务;从应用角度来看,业务种类包括语音业务、数据业务、图像业务及视频业务;多种业务类型仅靠单一信息传输与分发技术难以支持。第二,信息颗粒度不均衡,大颗粒度骨干信息/接入信息、中粒度汇聚信息、小粒度灵活接入信息,多粒度信息传输与分发困难。第三,大时空尺度下信息分布不均匀,在时间、区域两个维度上,信息呈稀疏分布,难以充分利用网络资源。

处于天地一体化信息网络中的各种用户终端为了完成各自任务均需要负责信息的收集、处理和传输,其中数据信息交换是极为关键的一步,它直接影响网络的容量、拓扑及可靠性,数据传输的时延、吞吐量和差错率等。为了支持多粒度业务的转发,数据交换需要能同时支持光交换、射频交换和分组交换,其中光交换速率高、容量大,能够突破电磁瓶颈,但不够灵活;射频交换以同步时分复用为基础,能提供恒定的带宽和时延,但是由于数据通道是专用的,因此信道利用率比较低;分组交换以异步时分复用为基础,发送速率灵活可变,信道利用率较高,但是传输过程中的时延和时延抖动无法保证。现有网络中,3种业务大多通过不同的交换平面进行转发,这非常不利于设备资源的共享和网络的融合。

2 天地一体化信息网络架构

天地一体化信息网络由空间中的节点和链路组成。节点主要包括太空域的卫星和航空域的飞机,这些节点的载荷有限,并且具有高动态性,因此在组网过程中会面临资源受限、动态变化以及受空间环境效应影响等挑战。在链路方面,空间节点间的组网采用较多的是微波链路,它具有灵活的接入特性,但由于传输速率有限、频带资源少、抗干扰能力弱、信号处理存在电子瓶颈,已经很难满足通信导航、遥感遥测等业务的传输与分发需求;激光链路具有通信容量大、抗干扰能力强、传输速率高、终端设备体积小等优点,但激光光束窄,需要很精确的瞄准与跟踪(Acquisition Pointing and Tracking,

APT)系统,并且大气信道中吸收、散射及湍流效应,空间平台的抖动特性等严重影响激光链路传输性能。可见要想满足未来天地一体化信息网络各类业务传输与分发的需求,必然要使两种链路充分结合并发挥各自优势。

天地一体化信息网络组网示意如图1所示,天地一体化信息网络由上而下可以细分为同步轨道卫星、中低轨道卫星、近地空间飞行器和地面网络,组网方式可选激光链路或微波链路。同步轨道卫星可以是GEO卫星或分布式星群,它们通过高速激光链路连接,主要负责骨干信息的汇聚、大颗粒度业务的转发、下层卫星或飞行器实时状态的监控以及全网资源的收集与广播等。中低轨道卫星主要包括通信卫星、中继卫星、遥感卫星、高分辨率对地观测系列卫星等,主要承担通信导航、多粒度业务中继以及遥感遥测任务,集数据收集、处理和转发于一身,向上可以减轻同步轨道卫星的负担,向下对近地空间和地面网络节点起到管理作用,对于提升整个天地一体化信息网络的稳健性具有十分重要的意义。近地空间飞行器包括平流层的飞艇和航空域的飞机,主要用于遂行特定作战任务或为相关飞机提供通信保障,相比于卫星平台,飞行器的动态性更强并且具有大时空尺度,网络业务传输与控制需要在大气空域内完成。

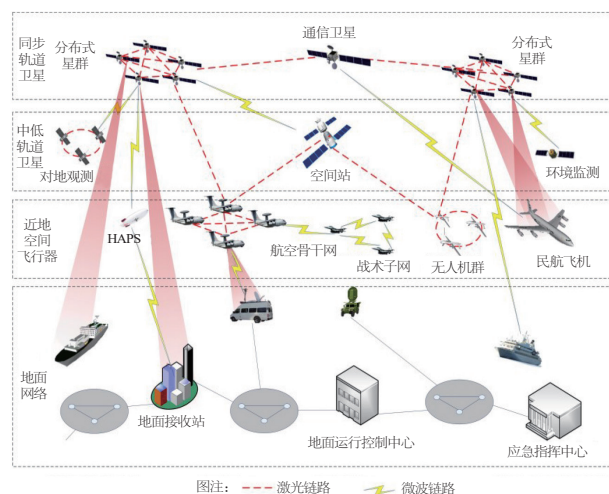


图1 天地一体化信息网络组网示意

3 数据交换技术

考虑到天地一体化信息网络业务的多粒度性,采用单一的处理和转发方式不能满足多粒度业务需求。现有网络中,光/射频/分组3种业务大多通过不同的交换平面进行转发,部分文献研究过光/射频/分组其中两两之间的混合交换。光与分组混合交换的目的是解决IP层路由面临的巨大的扩容与处理压力。参考文献[5]从结构设

计入手,提出了一种基于阵列波导光栅路由器(Arrayed Waveguide Grating Router, AWGR)的光电混合数据中心网络架构,该混合架构由AWGR提供大容量光波长路由,由电分组交换机提供突发分组交换,同时满足大象流和老鼠流的需求。参考文献[6]从信令设计入手,提出基于光信令和分组资源预留信令消息的一体化信令格式,并通过一体化信令的输入和输出端口信息分别建立输入和输出可用路径集,综合交换网络可用路径资源,采用负载均衡的方法统一计算可用路径权值,获得最优光电异构路径,从而可有效平衡卫星中的光电交换路径负载。参考文献[7]从业务粒度设计入手,提出了融合光通路数据单元(ODUK)/分组的新型交换机制,通过引入中间粒度单元,在分组与光之间搭起桥梁,提高了光域多粒度业务处理的灵活性,在此基础上又研究了光纤/ODUK/分组混合交换机制,解决了光与分组的适配问题。射频与分组的混合交换是指在一个交换平面同时转发两种类型的业务,并且能够为不同的业务提供不同的QoS保证,为指定业务提供具有带宽和时延保证的逐跳服务。参考文献[8]在Clos交换网络的基础上提出了电路与分组的混合交换网络及调度机制,在混合交换网络中,调度机制为电路业务分配专用通路,同时利用剩余带宽为分组业务提供尽力而为的转发服务。参考文献[9]提出了一种将电路交换和分组交换与虚拟信道相结合的混合路由器,以有效地传输特定应用中的流业务和最佳业务,采用时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)技术和时钟门控方案,充分利用了分组交换路由器的灵活性和吞吐量优势,以及电路交换优越的功率效率性能。参考文献[10]通过对未来卫星通信业务特点的分析,提出一种分组交换和子带交换一体化的星上交换架构,通过在输入端对子带交换业务进行二次封装和在输出端对子带进行重新排序,实现了分组交换和柔性转发在交换层面上的统一,提出了面向最小化交换时延抖动的分组调度算法,满足柔性转发业务对交换时延抖动的要求,解决了传统Cross-Bar交换结构存在的高时延抖动及两种业务并存引起的交换时延抖动恶化问题。参考文献[11]提出了一种基于时分电路交换的中小容量网络星载综合交换技术方案,采用TST(时、空、时)电路交换结构,既支持电路业务,又支持分组业务。

从以上研究可以看出,将不同的交换方式进行混合有利于实现异构资源的管理,从而实现网络的融合,并且目前电路交换机的速率只能达到几兆比特每秒和几十兆比特每秒,与光通信中的高速传输速率形成了严重的失配。为了充分利用光传输的大带宽、高速率特性,同时实现多粒度业务的处理与分发,进行光/射频/分组

的混合交换具有十分重要的现实意义。

3.1 光/射频/分组混合交换结构设计

天地一体化信息网节点主要接入链路和业务有三类:一是骨干业务链路,包括GEO(Geostationary Earth Orbit)-GEO链路、GEO-地面网关站链路等,属于相对静态链路;二是空间节点与用户链路,包括GEO与LEO(Low Earth Orbit)、航空飞行器、临近空间飞行器等业务用户之间链路,主要完成天地一体化信息网络的接入,属于动态灵活接入链路;三是动态与静态兼有的星间链路,用于一些特定场合,如分布式星群内通信、卫星编队飞行等。第一类链路在空间节点只需透明转发;第二类链路在空间节点有业务汇聚、多粒度分发的要求;第三类链路既需快速转发,也需要进行汇聚、分发。可以说在空间节点上存在两种转发需求:一是只需进行透明转发;二是需进行多粒度分发。尤其是小粒度端口业务在转发至大粒度端口业务(如分组至射频、分组至光、射频至光)时,需进行分类、汇聚、分发。

基于以上分析,光/射频/分组混合交换的基本方案由射频信道化交换单元、光交换单元、分组交换单元、一体化转发表、数字信道化分析模块、数字信道合成模块、汇聚模块、分流模块、聚合模块、疏导模块、交换控制单元及协议处理单元等部分组成,如图2所示。

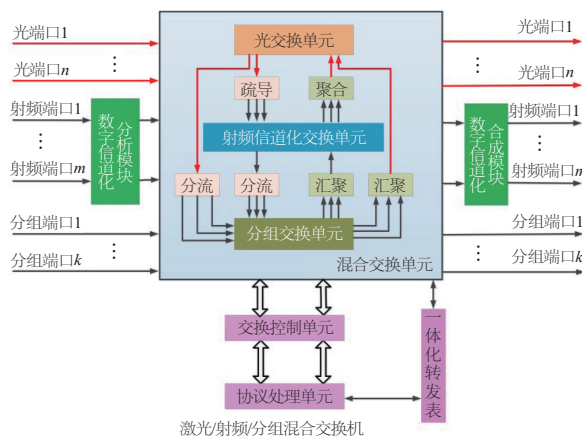


图2 天地一体化信息网络光/射频/分组混合交换基本方案示意

射频信道化交换单元完成射频透明交换及射频信道间交换功能;光交换单元完成光透明交换及光粒度交换功能;分组交换单元完成分组交换功能;一体化转发表完成归一化内部标签、输入端口、输出端口、内部端口、业务标识等映射;标签库及状态信息库完成光层、

射频物理层、二层、三层等归一化内部标签的分配、释放等功能；协议处理单元按照统一架构完成各种协议、信令处理、重构协议；交换控制单元完成混合交换结构内部异构业务的调度。

由于不同颗粒度业务的物理特性、业务种类不同，其交换原理、结构设计各不相同，基于光/射频/分组业务的不同特性，需要进行多粒度业务在数据面的交换方法研究。

针对大颗粒度的光业务，一般速率能达到几百兆比特每秒或几吉比特每秒，需要在光域进行处理，采用基于非线性介质中三阶非线性效应的单泵浦偏振分集结构，以实现信号格式透明、偏振不敏感、波长可动态释放、插入损耗低、配置时延小、端口可扩展、多链路可同步处理的多信号制式兼容全光交换。当大颗粒度业务（如中继业务）与小颗粒度业务（如测控业务）需要在星间激光链路复合传输时，采用波分复用技术与基于波长变换的光交换技术，实现迥异业务的交换。

针对中粒度的射频业务，速率通常为几兆比特每秒和几十兆比特每秒，通过研究多信道的柔性转发，以及合适的子带信号交换结构，以期实现同时对多种带宽、速率的业务信道灵活配置，以及适应不同体制、不同用户和不同业务类型交换的能力。当中颗粒度业务（如中继业务、通信业务）与小颗粒度业务（如测控业务）需要在星间微波链路复合传输时，采用动态射频信道化技术，完成不同业务的交换。

针对小粒度的分组业务，速率为kbit/s量级，采用分组数据报及多级Clos交换网络结构，适用于高速报文交换，可扩展性强。

针对多粒度业务的混合交换，激光与射频间业务的聚合与疏导，采用在光域进行激光与射频协同处理技术完成；激光与分组间业务的汇聚与分流，采用激光调制/解调技术完成；射频与分组间业务的汇聚与分流，采用模拟/数字调制/解调技术完成。

3.2 宽带可配置射频信道化交换设计

宽带可配置信道交换本质上是一种透明转发，一般采用电路交换实现信息转发。但是为了提供对不同业务和终端类型的支持，宽带可配置信道交换需要支持子带信号的组播与交换。交换网络的功能是实现信号在不同波束的不同子信道（最大子信道可占整个波束）间的交换，将接收到的信号按照控制信息的要求交换至目的波束的目的子信道，实现信息的柔性转发。

交换网络的原理如图3所示，对应图2中的射频信道化交换单元以及数字信道化分析与合成模块，主要用于

对射频信号的处理与交换。交换网络由两级构成，每一级都包括4个交换单元。每一个小交换单元都采用 $k \times k$ 的交换结构。经交换网络的交换操作后，输出的信号仍旧为宽带 W Hz的 n 路信号，信道合成将 n 路 W Hz的信号在 n 路 W Hz的波束上发送出去。

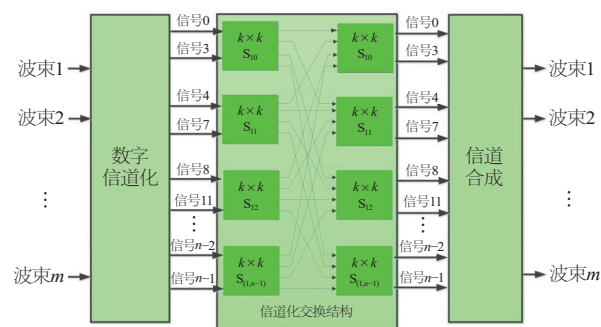


图3 交换网络原理

3.3 基于四波混频效应的光交换设计

考虑到空间飞行器载体环境条件有限，难以对大容量数据实现存储，当地地一体化信息网络中多个数据链路同时到达交换节点请求信道交换，且每一个链路所承载的数据速率及调制格式各不相同，要求交换节点必须能实时同步处理多个业务的交换请求，并保证每一个链路的数据经交换后可继续进行可靠传输。在光交换单元研究中，采取基于四波混频效应的大范围多波长均衡再生的全光交换方法，对应图2中的光交换单元，从介质的三阶非线性效应理论出发，建立基于四波混频效应的全光交换机制理论模型。借助仿真手段，验证基于四波混频效应的全光交换方法的瞬时响应、调制格式严格透明、多链路可同步处理等特点，实现天地一体化信息网络适用性强的信号格式透明、偏振不敏感、波长可动态释放、插入损耗低、配置时延小、端口可扩展、多体制兼容、多链路可同步处理的全光交换。

另外，天地一体化信息网络混合光交换业务服务类型主要包括大粒度的中继业务和通信业务，以及小粒度的测控业务。考虑到星上资源的宝贵性，光交换单元应同时具备支持中继业务、通信业务、测控业务交换的能力。因此在光交换单元执行不同类型业务交换任务时，采取波长复用策略，为小粒度测控业务分配固定波长信道，与大粒度的中继业务和通信业务经复用后共同传输并参与交换。与大粒度的中继、通信业务一样，小粒度的测控业务数据交换也采用光交换单元的电路交换方式，从而保证了传输的高可靠性。

3.4 基于软件无线电思想的高速分组交换

分组交换技术具有可以提高链路利用率、提高通信的灵活性、便于组网等特点,在地面数据通信网络中已经广泛应用。为了使得天地一体化信息网络与地面网络进行无缝连接,天地一体化信息网络中的分组交换主要面向IP技术进行研究。

分组交换单元主要由输入处理模块、交换模块以及输出处理模块组成,如图4所示,对应图2中的分组交换单元,用于分组业务的交换与转发。IP数据报进入输入处理模块经过相应数据匹配,在交换模块中完成高速交换,并通过输出处理模块将数据送出。在进行高速交换时,IP报文通过输入/输出处理模块与一体化转发表及交换控制单元进行交互,根据具体需求需要设计相应的输入、交换和输出模块。由协议处理单元接收经链路路的配置文件,可完成分组交换单元的可重构定义。

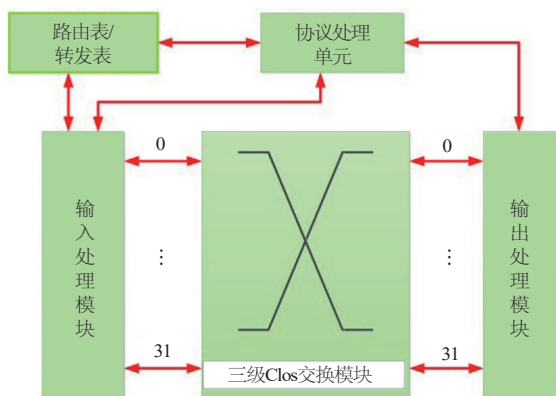


图4 分组交换单元组成框图

3.5 激光/射频异构链路光域聚合与疏导设计

在光交换单元到射频信道化交换单元的业务疏导中,采取基于光学干涉效应的激光/射频异构链路光域疏导方法。从光学干涉效应理论出发,建立基于光学干涉效应的全光选通门理论模型,通过实验验证光域数据疏导的瞬时响应、高消光比、低串扰、零丢包、自动同步等特点;从而采用干涉方法在光域内将高速的串行信号分解成若干路较低速率的并行信号,之后将较低速率信号分别调制到射频载波上,发射至射频信道化交换单元。

图5为光域激光/射频异构链路疏导方法的原理框图,对应图2中的疏导模块,用于高速率光信号向低速率电信号的转换。光分路单元将高速率光信号分成多路,分路后的每路信号经过不同的光时延,其中每一路经过相对上一路存在的时延,当第1路的第1个比特到达时,多个光选通门同时打开,选出相应路信号中同一个周期内不同时隙位置的光信号,即可实现高速率数据到多路

低速率并行数据的降速处理,完成高速率光数据交换单元到射频信道化交换单元的疏导。同理,多路低速率并行数据首先经过码型变换处理单元,然后通过码型转换,在保持一定时延差的情况下通过光合路单元变成一路高速率数据码流。

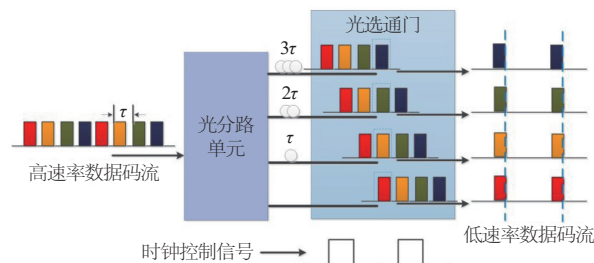


图5 光域激光/射频异构链路疏导方法原理框图

3.6 增强型GMPLS设计

混合交换机制可支持光业务、射频业务及分组业务,各种业务的特点、对资源的需求均不同。要避免资源冲突,提高资源利用率,需要针对混合交换中的不同业务特点,探索虚拟资源和物理资源的分配方法。首先需要区分不同业务,本文引进了通用多协议标签交换(General Multi-Protocol Label Switching, GMPLS)机制^[12-15]。GMPLS将多协议标签交换(Multi-Protocol Label Switching, MPLS)的流量工程技术与光交换技术相结合,将MPLS中标签交换的概念扩展到包括波长路由和交换的光通道,让业务流控制连接,使之不仅支持分组交换,还支持时分交换、波长交换和空分交换。GMPLS的灵活控制已成为研究的热点之一,缘由如下:一是,通过扩展GMPLS路由协议,即可获得网络的拓扑信息和状态信息,并用来配置光交换机;二是,融合GMPLS扩展功能——PCE(路径计算单元)与OpenFlow控制技术,可以共享集中式设备的拓扑信息,因此可重复利用PCE中TED(流量工程数据库)的路径计算和管理方法;三是,OpenFlow控制技术和状态PCE模块可共享唯一的公共动态链接库,进而及时感知网络状态,灵活调整网络路由^[16]。

GMPLS采用的是通用标签,常用于地面网络中,它可以标识光束中的一根光纤,光纤内的一个波带,波带(或光纤)内的一个波长,波长(或光纤)内的一组时隙。但地面网络中成熟的GMPLS机制无法直接应用于天地一体化信息网络,主要原因在于该机制诞生之初主要用于解决面向光层与IP层的统一控制与管理问题,未涉及光层与射频层以及射频层与IP层的统一控制与管理。基于以上分析,考虑到空间信息中还包含射频业务,所以要在原有的标签集中加入射频子带标识,最终形成了

增强型GMPLS。增强型GMPLS标签如图6所示，其主要由3部分组成：业务标签、标签长度和业务标识。当业务到达多粒度交换单元入口时，通过查询标签确定业务的类型；然后进一步确定业务的复用方式，通过信号处理单元后，根据业务转发需求进行多粒度业务交换。

增强型GMPLS的设计思路包括：增加射频标识（含射频子带标识），在已有GMPLS的5类标准接口基础上增加射频交换接口，将各层提取出的标签与内部多路径标识结合，实现标签分配/更新、标签栈设计、标签信息库维护等。

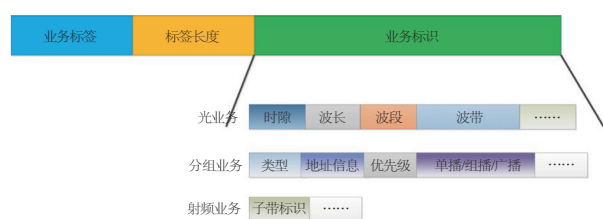


图6 增强型GMPLS标签

基于增强型GMPLS的思路，针对相同源一目的节点、相近QoS要求、相似参数统计特征的业务建立转发等价类库；再汇聚模块分类，汇聚后送入相应交换单元完成业务的转发。

（1）相同源一目的节点：为了节省网络资源，对于源一目的节点相同的业务，在转发之前，采用聚合的方式生成转发等价类，可以避免在转发的过程中进行业务重构，因此业务倾向于汇聚成较大粒度，到达目的节点后再进行业务的解汇聚。

（2）相近QoS需求：不同业务的QoS需求也不同，因此对网络资源的需求也不同，将相近QoS需求的业务汇聚形成转发等价类可以减少不必要的网络操作，对网络资源可以采用复用的方式，因此可以节省网络资源。

（3）相似参数统计特征：对于参数统计特征相似的业务，通过形成转发等价类的方式可以减少信号处理的开销，更容易汇聚和疏导。

4 总结及展望

未来的天地一体化信息网络必然是光与微波链路异构且长期共存的，在组网过程中还面临业务多粒度和资源受限等问题。在有限资源的条件下，通过单一的处理和转发方式显然不能满足空间业务的需求。因此，从数据交换层面出发，进行光/射频/分组混合交换设计对于促进天地一体化实时信息共享以及高效组网具有十分重要意义。下一步的研究可以从以下几个方面进行。

（1）多粒度数据流分发功能划分。天地一体化信息网络是一种大时空尺度下的异质异构动态网络，在该网络中任一单节点既要能完成接入功能（多粒度业务的分类、汇聚功能），又要具有交换功能（多层数据分发功能），即将常规网络边缘节点与核心节点的功能合二为一。

（2）动态分发控制机制的建立。天地一体化信息网络是一种动态网络，体现在：网络拓扑结构呈动态变化；网络业务分布呈动态变化。在网络单节点内完成动态异构链路、动态异质业务的汇聚、分发，需要建立以集中控制为框架的混合交换动态控制方法，以适应网络重构、基于任务驱动等实时动态变化。

（3）混合交换的可重构机制的建立。天地一体化信息网络面临可重构以及弹性组网的需求，混合交换的可重构能力是其中的一个关键因素。

参考文献：

- [1] 王敬超, 于全. 基于分布式星群的天地一体化信息网络体系架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4): 9-18.
WANG J C, YU Q. System architecture and key technology of space information network based on distributed satellite clusters[J]. ZTE Technology Journal, 2016, 22(4): 9-18.
- [2] 李德仁, 沈欣, 龚建雅, 等. 论我国天地一体化信息网络的构建[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2015, 40(6): 711-715.
LI D R, SHEN X, GONG J Y, et al. On construction of China's space information network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 711-715.
- [3] HENG L, MEIER L, TANSKANEN P, et al. Autonomous obstacle avoidance and maneuvering on a vision-guided MAV using on-board processing[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2011: 2472-2477.
- [4] 王俊英, 严志博, 李文峰, 等. 基于接入流量分布的天地一体化信息网络激光链路分配方法研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2020, 56(6):120-127.
WANG J Y, YAN Z B, LI W F, et al. A study on laser link allocation method in spatial information network based on access traffic distribution[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2020, 56(6):120-127.
- [5] 蔡岳平, 晏尧, 周丽, 等. 基于AWGR的光电混合数据中心网络架构设计[J]. 计算机科学与探索, 2014, 8(10):1195-1205.
CAI Y P, YAN Y, ZHOU L, et al. AWGR-based network architecture design of photoelectric hybrid data center[J]. Computer Science and Exploration, 2014, 8(10):1195-1205.

- [6] 李静玲, 黎军, 梁薇, 等. 具有光电混合交换能力的星上信令设计与处理方法[J]. 微电子学与计算机, 2018, 35(6):112-116.
- LI J L, LI J, LIANG W, et al. Design and processing methods of satellite signaling with a mixed optical/electric hybrid switching capability[J]. Microelectronics and Computers, 2018, 35(6): 112-116.
- [7] 张海懿, 赵文玉, 汤瑞. 大容量光电交换技术研究[J]. 中兴通讯技术, 2011, 17(6):19-22.
- ZHANG H Y, ZHAO W Y, TANG R. Research on large capacity photoelectric switching technology[J]. ZTE Technology Journal, 2011, 17(6):19-22.
- [8] BRUNINA D, LIU D, BERGMAN K. An energy-efficient optically connected memory module for hybrid packet-and circuit-switched optical networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(2):3700407-3700407.
- [9] CHAO H J, PARK J, ARTAN S, et al. TrueWay: A highly scalable multi-plane multi-stage buffered packet switch[C]// The Workshop on High PERFORMANCE Switching & Routing. Piscataway: IEEE Press, 2008:246-253.
- [10] 杨君刚. 高速多级分组交换网络若干关键技术的研究[D]. 西安电子科技大学, 2008.
- YANG J G. A study on technologies of high-speed multi-level packet switching network[D]. Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2008.
- [11] LIN J, ZHOU W, YU Z, et al. A hybrid router combining circuit switching and packet switching with virtual channels for on-chip networks[C]// IEEE International Conference on Asic. Piscataway: IEEE Press, 2014:1-4.
- [12] MANNIE E, PAPADIMITRIOU D. Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) architecture[J]. British Journal of Visual Impairment, 2004, 35(24):2717-2724.
- [13] BERGER L. Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) signaling functional description[C]//IETF RFC. RFC Editor, 2003.
- [14] MARTINEZ R, PINART C, CUGINI F, et al. Challenges and requirements for introducing impairment-awareness into the management and control planes of ASON/GMPLS WDM networks[J]. Communications Magazine IEEE, 2006, 44(12):76-85.
- [15] SATO K, YAMANAKA N, TAKIGAWA Y, et al. GMPLS-based photonic multilayer router (Hikari router) architecture: an overview of traffic engineering and signaling technology[J]. Communications Magazine IEEE, 2002, 40(3):96-101.
- [16] CASELLAS R, MARTINEZ R, MUÑOZ R, et al. An integrated stateful PCE/OpenFlow controller for the control and management of flexi-grid optical networks[C]//2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Piscataway: IEEE Press. 2013.

[作者简介]



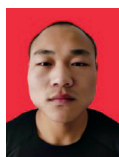
赵尚弘 (1964-), 男, 博士, 空军工程大学信息与导航学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为激光原理、天地一体化信息网络、微波光子、量子密钥分发和光电混合交换。



彭聪 (1995-), 男, 空军工程大学信息与导航学院博士生, 主要研究方向为天地一体化信息网络, 光电混合交换和业务疏导。



李勇军 (1979-), 男, 博士, 空军工程大学信息与导航学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星光网络、星上光信号处理和卫星轨道设计。



李海 (1997-), 男, 空军工程大学信息与导航学院博士生, 主要研究方向为天地一体化信息网络, 资源分配和卫星波长路由。