

天基信息光网络波长路由关键技术

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

摘 要: 随着空间探索范围的拓展和探索手段的丰富, 天基信息网络承载的用户数量急剧增加、业务类型不断更新, 对其传输容量和服务质量提出了更高要求, 全光化的天基信息网络成为必然的发展趋势。波长路由技术作为光网络的一项关键技术, 对于提高天基信息网络波长利用率, 保证网络服务质量具有十分重要的意义。介绍基于多业务、基于动态特性以及基于软件定义的3种典型天基信息网络光波长路由方法原理, 研究天基信息光网络中智能化波长路由技术、分层化波长路由技术以及多径化波长路由技术, 对天基信息网络中波长路由关键技术进行展望。

关键词: 天基信息网络; 发展现状与趋势; 波长路由技术

中图分类号: V556

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022014

Key Technologies of Wavelength Routing for Space-based Information Network

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

Abstract: With the expansion of space exploration scope and the enrichment of exploration means, the number of users carried by space-based information networks has increased rapidly, and the types of services have been continuously updated. As a key technology of optical network, wavelength routing technology is of great significance to improve wavelength utilization and ensure network service quality. Three typical wavelength routing methods of space-based information networks based on multi-service, dynamic characteristics and software definition were introduced. And the intelligent wavelength routing technology, hierarchical wavelength routing technology and multipath wavelength routing technology in space-based information networks were studied. The key technologies of wavelength routing in space-based Optical information networks were prospected.

Keywords: space-based information network, development status and trend, wavelength routing technology

0 引言

天基信息网络因其在全球通信、遥感遥测等许多应用领域的独特优势而引起了人们的关注, 然而, 接入用户的不断增多和对通信质量要求的不断提升, 给天基信息网络的通信容量和服务质量带来了一定的挑战。传统微波通信技术的天基信息网络遇到了一些瓶颈, 比如有限的频带资源、较差的方向性和有限的通信容量。光通信技术由于其通信质量好、带宽大、功耗低等优点, 有

望成为替代微波的下一个选择。

由于波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 技术的出现, 光网络的通信容量在一定程度上得到了提高。随着弹性光网络 (Elastic Optical Network, EON) 技术的出现, 光网络的通信容量又得到巨大提升。同时受地面光网络技术的启发, 光通信技术已逐渐应用于天基信息网络。在未来的几十年内, 天基信息网络必然是以光通信为主、微波和光并存的网络。波长路

收稿日期: 2021-06-30; **修回日期:** 2021-08-05

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)

由技术是天基信息网络中的一项关键技术,通过恰当的波长路由技术,不仅可以提高天基信息网络的通信容量和可靠性,还可以提供多样化的服务满足更多用户的实际需要。

1 天基信息网络波长路由技术概述

卫星载荷重量有限和星上光学器件费用较高,使得天基信息网络的波长资源受到了限制。此外,空间环境中的各种因素(如温度变化、辐射和多普勒效应等)会引起信号频谱的漂移。为了适应信号波长的漂移,星上滤波器器件要保持一定的信道间距,这在很大程度上限制了天基信息网络中的可用波长数目。此外,卫星之间对准技术的复杂性也加剧了波长资源的短缺。随着卫星数目的不断增多,天基信息网络所需要的波长数目也迅速增加,几乎呈指数增长,这更加剧了天基信息网络波长资源的紧缺。因此分析天基信息网络的波长资源需求以及设计合理的路由策略,可以为天基信息网络的设计及其可行性分析提供理论参考^[1-2]。

天基信息网络中的光波长路由问题是指当有业务请求到达时,在考虑网络连接情况的前提下,依据波长路由算法,为业务选择合适的路由链路,并从当前可用的波长资源中为其分配合适的带宽。根据所支持的业务类型不同,可以把波长路由问题分为静态波长路由问题和动态波长路由问题。静态波长路由问题研究的是请求给定的业务,当有业务请求到来时,对业务进行路由寻址和波长分配,目的是使网络的某项性能达到最优,通常是最少的波长使用或者最少的物理链路。静态波长路由技术复杂度低、实现简单,但是不适用于规模较大的网络和动态变化的网络,因此现有天基信息网络大多采用动态波长路由技术。动态波长路由问题针对的是动态业务的情形,即业务随机到达时,如何对业务进行路由寻址和波长分配,从而使某项性能最优化,通常优化指标是总时延最小或者连接请求的阻塞率最小。动态波长路由技术的优点是实现灵活、可以适应网络的动态变化、满足不同业务的需求,但是动态波长路由技术实现复杂,对网络节点的计算能力要求较高。根据网络节点构成不同,使用光波长转换器可以在一定程度上降低光网络的波长资源需求,但减少量有限,并且会增加网络建设成本和计算复杂度^[3]。

不考虑波长转换器,研究天基信息网络中的光波长路由问题时,主要有以下两个约束条件:一是,波长连续性限制,即一条物理链路同一光路每对节点间使用的波长必须相同;二是,波长互异性限制,即一条物理链路不同光路使用的波长必须不同。波长路由是一个十分

复杂的问题,并且随着网络规模的增大,复杂度呈指数增长趋势。因此,为了处理这个问题,把波长路由问题分成两个子问题,即波长问题和路由问题,并分别进行求解和优化。

当分别求解波长路由问题时,路由选择和波长分配对网络性能的影响不同^[4]。路由选择解决的是网络逻辑拓扑和物理拓扑的映射问题,为业务找到最优的路径,并在此基础上实现波长需求最小化。根据采用算法的不同,路由选择可分为固定路由选择和自适应路由选择。波长分配解决的是通过合理调度波长资源,来降低网络的阻塞率和减小波长的重复使用率。当路由选择为业务选定路径后,通过波长分配算法来进行波长资源的分配。最简单的方法为随机分配波长,但是这种方法会使长距离的链路阻塞率急剧上升。为此,可以通过对波长划分优先级,依据优先级顺序进行波长的分配,达到降低阻塞率的目的。首先对波长进行标号,然后依据标号大小进行查询,采用首次命中原则,将查询到的第一个可用波长分配给到达的业务。在分配时,按照标签大小进行分配,后续业务在进行标签查询时,更容易找到合适的波长。此外,还可以利用最少使用优先原则和最多使用优先原则,即为当前业务分配使用频率最小的波长或使用频率最大的波长。

2 天基信息网络光波长路由技术研究现状

2.1 传统天基信息网络光波长路由技术

传统天基信息网络光波长路由技术主要研究的是与光网络性能密切相关的几个参数及它们之间的关系,如网络连通度、时延、跳数、波长数目、多普勒频移等,通过对这些参数的合理设置可以显著改善卫星光网络的性能。

(1) 网络连通度定义为在单位时间内的卫星节点之间实际建立链路数与所有卫星节点对之间可以形成的链路数的比值。对于有 N 个节点的光网络,如果在时间段 $[m,n]$ 内共建立了 L 条链路,则网络在 $[m,n]$ 时间段内的网络连通度为 $\alpha = 2L / (N \times (N-1) |n-m|)$ 。对于光网络,增大其连通度,则网络在相同时间可以传输的业务越多,即可以增大网络的容量。相关学者进行了这一方面的研究,发现在时延阈值一定的情况下,增大网络连通度可以减少网络波长使用数目。

(2) 由于星间距离的存在,时延在天基信息网络中是不可避免的,这使得传统的TCP传输协议在天基信息网络中不再适用。此外,借助时延容忍网络(Delay Tolerant Network, DTN),通过合理的波长路由技术可以减少卫星节点的总处理排队时延,降低网络的总时延,提升服务质量。

(3) 由于天基信息网络的星座特点, 一个业务可能要经过多次转发才能到达目的节点卫星, 然而转发跳数也不能过多。增大光网络中的跳数阈值可以减少天基信息光网络中的波长使用数目, 但会导致处理的时延增加。因此应在跳数和时延之间寻求一种均衡, 目前天基信息光网络的跳数研究一般限制在4跳以内。

(4) 天基信息网络光波长路由技术不同于地面光网络, 其受到波长连续性和互异性的约束, 即不考虑光波长转换器, 源节点和目的节点之间同一光路使用波长必须相同, 这使得天基信息光网络的波长资源短缺。如何在波长连续性条件约束下, 最小化波长数目使用、增大服务容量是研究的一个重点问题。

(5) 在对天基信息网络进行分析时, 多普勒效应是一个不可忽视的因素, 卫星之间的高相对速度引起的多普勒波长偏移, 会导致串扰功率上升和接收信号功率下降, 这直接导致误码率增加。因此在进行天基信息网络光波长路由分析时, 多普勒效应也是不可忽略的一个因素。

传统天基信息网络光波长路由技术仅考虑了与网络性能关系密切的一些参数, 为早期天基信息光网络的研究奠定了基础, 但是缺少对网络具体业务和网络的动态变化等方面的考虑, 很难应用于实际的天基信息光网络之中。

2.2 基于多业务的天基信息网络光波长路由技术

数据、语音和视频等多样化的业务对通信质量(时延、带宽、丢包率等)有不同的要求, 针对天基信息网络的特点和不同业务对服务质量的要求, 相关学者研究了基于多业务的天基信息光网络波长路由技术^[5-6]。通过对波长数目进行分簇, 设置不同级别的业务对应不同的可用波长数目, 优先级高的业务可以使用更多的波长簇。通过业务优先级与波长簇相对应, 从而降低高优先级业务的阻塞率。以下为多业务优先级设置的一种方法。

(1) 根据业务类型设置优先级: 依据业务的重要程度, 将重要的业务设置为高优先级, 保证重要业务优先被服务。

(2) 根据业务对时延的要求设置优先级: 将对时延敏感的业务设置为较高的优先级, 保证业务不会因为时延而影响接收质量。

(3) 根据用户等级设置业务优先级: 根据用户的业务性质, 对用户进行优先级划分, 优先级高的用户分配更多的波长簇。

例如设LEO卫星光通路之间的可用波长数为5, 即 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5)$ 。A、B、C为优先级依次递减的3种业务, 依据其业务优先级进行波长资源的分配。A类业务采

用的波长: 组 $G_1(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)$; B类业务采用的波长: 组 $G_2(\lambda_2, \lambda_3, \lambda_5)$; C类业务采用的波长: 组 $G_3(\lambda_4, \lambda_5)$ 。

多业务的波长分配主要步骤如下: 网络初始化, 等待业务到达; 划分业务类型, 以上面给出的划分标准判断业务是A类、B类或C类; 依据业务类型, 在组 G_1 、 G_2 或者 G_3 中为其分配可用波长, 如果业务需要的波长数大于1, 则采用首次命中的原则为其分配波长。采用多业务的天基信息光网络波长路由技术可以适应业务的动态变化、提高服务质量, 但是会增加波长路由计算的复杂度, 对网络节点计算能力要求较高。

2.3 基于动态特性研究天基信息网络光波长路由技术

LEO卫星光网络的动态特性是天基信息网络波长路由技术必须考虑的一个方面。在动态卫星光网络中, 每颗卫星都配备光学星间链路终端、波长路由单元、转换单元和存储器。光学星间链路终端由一个光学转发器和一个指向捕获和跟踪系统组成, 任何一对卫星都可以通过光学星间链路终端建立和维护星间链路。传统对LEO卫星光网络动态特性的研究中, 波长要求往往是在每个时隙快照中计算的, 没有讨论跨多个时隙的拓扑变化对波长要求的影响, 这等效使光路建立在静态拓扑中, 忽略了拓扑变化对波长资源分配的影响。最新有学者利用时空演化图来描述动态光学卫星网络, 并提出了一种分析动态LEO卫星光网络波长要求的方法^[7]。

卫星光网络是时变网络, 时变拓扑的连通性由时间连通性和空间连通性决定。图1给出了一个卫星光网络时空图, $G(V, E)$ 表示具有 $N=5$ 颗卫星的分布式卫星网络的空间连通性, 其中 V 和 E 分别表示卫星和星间链路的集合。 $G(V, E)$ 实际上由一系列快照组成 $\{G(t) | t=0, 1, \dots, T, T \in N^+\}$, 节点之间的边表示在当前快照中卫星节点是连接的。

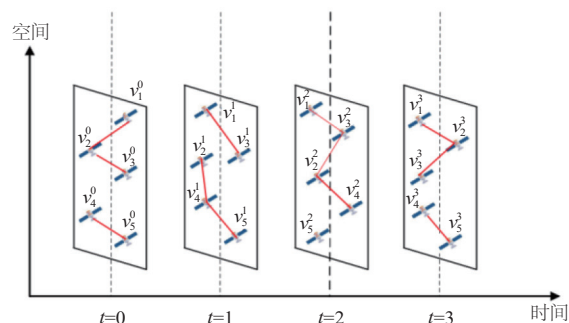


图1 卫星网络时空图

由于间歇性的链路连接, 网络中的卫星应该在适当的时间存储和转发数据。每个快照中的卫星节点可能并

WDM技术在光链路中建立多波长通道,并采用优化的波长路由技术^[11]。

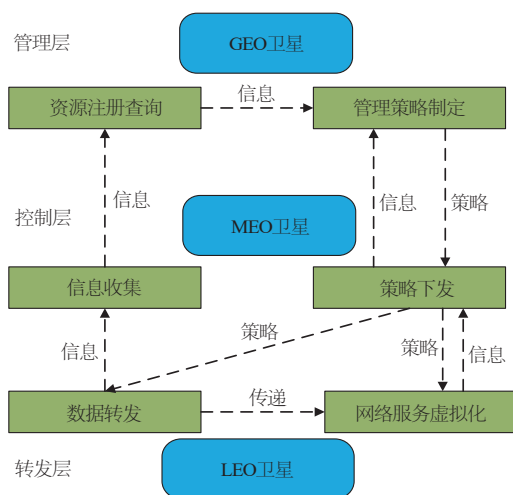


图4 基于SDN的卫星光网络逻辑架构

采用基于SDN的天基信息光网络逻辑架构,一方面可以解决LEO卫星高动态变化的问题,通过GEO卫星进行控制,减小了LEO卫星节点的运算负担,充分利用各层卫星的资源,增大网络的容量和灵活性;另一方面采用此架构有利于未来天基信息网络与地面网络的异构融合,适应更大业务量对整个天基信息网络的要求^[12-13]。通过SDN思想解决两个异构网络融合的问题,实现天地信息网络一体化。引入SDN架构也会带来一定问题,比如网络开放性增大、易受攻击;多控制器部署协作较为复杂等。

3 发展展望

随着接入用户的不断增多和对服务质量要求的提升,同时受地面5G网络相关技术的启发,未来天基信息光网络的发展方向主要有智能化、分层化和多业务化。网络发展趋势的改变必然使天基信息光网络波长路由技术与之相适应。

3.1 智能化天基信息网络光波长路由技术

随着人工智能技术在地面网络中的深入发展,未来人工智能技术必将应用于天基信息网络,基于人工智能的天基信息网络光波长路由技术成为了可能。波长路由智能化的初始阶段是自动化,即首先实现天基信息网络光波长路由运维的自动化^[14]。在自动化的基础上对环境状态进行感知,通过强化学习不断做出最优化决策,最终达到认知用户意图,智能化地进行决策的目的。通

过实现智能化的天基信息网络光波长路由技术,网络运维人员只需要进行简单的维护和故障排除,复杂的计算部分由网络自身通过机器学习自助实现^[15]。在这种情况下,网络具备一定的自组织功能,通过不断的改进达到路由的最优化和波长资源的充分利用。

实现智能化的天基信息网络光波长路由技术,依赖于网络虚拟化、网络切片、边缘计算等技术的发展。这些技术在地面网络已经逐渐成熟,如何将其改进以适应天基信息网络是将来要解决的一个问题。此外具有超强计算能力的处理器在天基信息网络中的应用也是其未来发展的一个关键技术。

3.2 分层化天基信息网络光波长路由技术

受SDN技术控制与分离思想和网络功能虚拟化(Network Functional Virtual, NFV)思想的启发,将SDN以及NFV应用于天基信息光网络,实现整个网络的融合发展是今后的一个趋势^[16-17]。GEO卫星位于骨干节点,作为整个天基信息网络的控制中心,掌握天基信息光网络全局的网络状态信息,依靠自身强大的计算能力,可以制定出全局最优化的波长路由策略。此外采用SDN和NFV技术进行天基信息网络分层化,也可以实现天基信息网络与地面网络的异构融合。

引入SDN和NFV技术,设计分层化天基信息光网络波长路由也需要解决一些问题。例如,天基网络各层之间的互联互通,加剧了天基信息光网络波长路由技术的复杂度。另外,解决“大时延带宽积”条件下的端到端可靠信息传送控制问题,以提升网络资源利用率及业务支持能力,这也是天基信息光网络波长路由技术要解决的一个问题。此外,分层化天基信息光网络波长路由还需要可靠的安全防护技术,一方面保证某些卫星节点出故障或者被摧毁时,网络的阻塞率不至于急剧上升和网络的基本功能得以维持;另一方面引入SDN和NFV增大了天基信息网络的开放性,使网络更加容易受到攻击。

3.3 多径化天基信息网络光波长路由技术

随着未来业务量的爆炸式增长和接入服务类型的不断增多,传统的天基信息光网络单路径路由容量遇到了一定的瓶颈,网络中存在较多剩余波长不能单独承载业务而无法利用的现象。基于网络编码的多路径协作路由在业务传输过程中同时沿多条路径协同传输数据包,充分利用网络中的波长资源,可以显著提高网络吞吐量、降低端到端时延、实现网络的负载均衡,这是未来天基信息光网络的一个发展方向^[18]。

已有学者开展多径路由应用于天基信息光网络研

究,并取得了一定成果^[19],但还存在以下两个问题需要解决:一是天基信息光网络较大的转发时延使得多径路由效率较低、不能充分利用网络资源进行数据转发,可以通过对现有的停等式ARQ协议进行改进来解决这一问题;二是多径路由算法应用于多层、动态的天基信息光网络可能会产生失序、信令开销大、网络复杂性增大的问题。这些问题可以通过对传统的网络编码进行改进来解决。

4 结束语

为了适应国家战略发展的长远目标,当前我国天地一体化信息网络建设进程不断加快。在天地一体化信息网络建设和发展过程中,天基信息网络是其中的重要组成部分,而高效的波长路由技术对于天基信息网络的互联互通、提升资源利用效率十分重要。

参考文献:

- [1] 刁文澜, 安建平, 张宇, 等. 天地一体化信息网络中多寻址协同与切换技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 42-47.
DIAO W L, AN J P, ZHANG Y, et al. Multiple addressing coordination and switching technology in space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 42-47.
- [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): 1-16.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [3] 郑印. 具有QoS保证的抗毁动态RWA算法设计与仿真[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
ZHENG Y. Design and simulation of dynamic RWA algorithm with QoS and link protection mechanism[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [4] 刘阳. 卫星动态光网络的时延及路由特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
LIU Y. Research on the delay and routing characteristic of dynamic optical satellite network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [5] 刘庆利, 姚俊飞, 刘治国. 基于多业务的卫星光网络波长路由算法研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(8): 1780-1787, 1794.
LIU Q L, YAO J F, LIU Z G. Research on wavelength routing algorithm based on multi-service in satellite optical networks[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(8): 1780-1787, 1794.
- [6] 徐建勇, 沈建华, 何晔, 等. 一种支持区分业务的智能光网络RWA方法[J]. 光通信研究, 2013(3): 14-17.
XU J Y, SHEN J H, HE Y, et al. A differentiated service-supporting RWA approach in intelligent optical networks[J]. Study on Optical Communications, 2013(3): 14-17.
- [7] LIU X F, YANG L, CHEN Q, et al. An analytic method of wavelength requirements in dynamic optical satellite networks[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(11): 2569-2573.
- [8] 苑喆, 张军, 柳重堪. LEO/MEO双层卫星网的分层动态路由算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(7): 788-792.
YUAN Z, ZHANG J, LIU C K. Dynamic routing algorithm for LEO/MEO double-layered satellite networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(7): 788-792.
- [9] 石晓东, 李勇军, 赵尚弘, 等. 软件定义卫星光网络蚁群优化波长路由技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 211-218.
SHI X D, LI Y J, ZHAO S H, et al. Ant colony optimization routing and wavelength technology for software-defined satellite optical networks[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 211-218.
- [10] LI T X, ZHOU H C, LUO H B, et al. SERVICE: a software defined framework for integrated space-terrestrial satellite communication[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(3): 703-716.
- [11] BERTAUX L, MEDJIAH S, BERTHOUP, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 54-60.
- [12] SHI X D, LI Y J, ZHAO S H, et al. Multi-QoS adaptive routing algorithm based on SDN for satellite network[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 768: 052035.
- [13] WEN G L, ZHANG Q, WANG H T, et al. An ant colony algorithm based on cross-layer design for routing and wavelength assignment in optical satellite networks[J]. China Communications, 2017, 14(8): 63-75.
- [14] ZHOU R, HE L W, TANG C C, et al. SDN path enhancement algorithm based on multi-objective constraint genetic algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2019, 7: 17-22.
- [15] 肖扬, 吴家威, 李鉴学, 等. 一种基于深度强化学习的动态路由算法[J]. 信息通信技术与政策, 2020(9): 48-54.
XIAO Y, WU J W, LI J X, et al. A dynamic routing algorithm based on deep reinforcement learning[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2020(9): 48-54.
- [16] 吴艳. 基于流量分类的智能SDN路由优化技术研究[D]. 杭州:

浙江工商大学, 2019.

WU Y. Research on intelligent SDN routing optimization technology based on traffic classification[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019.

- [17] 李艺, 唐宏, 马枢清. 软件定义网络中基于分段路由的多路径调度算法[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(5): 1514-1519.

LI Y, TANG H, MA S Q. Multi-path scheduling algorithm based on segment routing in SDN[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(5): 1514-1519.

- [18] 尤启迪, 王小云, 金星虎, 等. 面向信息快速回传的卫星网络多路径路由算法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(8): 747-752.

YOU Q D, WANG X Y, JIN X H, et al. Multipath routing algorithm of information fast returned satellite network[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(8): 747-752.

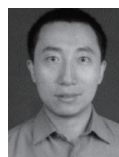
- [19] 孙伟超, 梁俊, 肖楠, 等. 具有高效确认机制的双层卫星网络多径路由协议[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(4): 1183-1187.

SUN W C, LIANG J, XIAO N, et al. Multipath routing protocol for two-layered satellite networks with efficient acknowledgement mechanism[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(4): 1183-1187.

[作者简介]



李信 (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。



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。



彭聪 (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、光电混合交换和业务疏导。



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。