

微波光子在高通量通信卫星中的探索及初步应用 (特邀)

李 立^{1,2}, 谭庆贵^{1,2*}

- (1. 空间微波技术国家级重点实验室, 陕西 西安 710100;
2. 中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100)

摘 要: 高通量卫星是新一代宽带通信卫星的重要发展和应用方向,我国高通量卫星在国内与周边国家的市场需求旺盛,发展潜力巨大。文中介绍了高通量卫星的技术特点、国外发展动态和后续发展需求,以及国内高通量卫星最近进展。探索了微波光子在高通量通信卫星中的应用及国外微波光子在高通量通信卫星中的研究进展。研究了一种基于微波光子技术的宽带柔性高通量通信卫星载荷方案,验证了微波光子应用于高通量通信卫星的可行性和有效性。最后给出了基于微波光子技术的高通量通信卫星发展建议。

关键词: 微波光子; 高通量通信卫星; 光交换; 光信道化

中图分类号: TN927 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211050

Exploration and preliminary application of high throughput satellite with microwave photonics (*Invited*)

Li Li^{1,2}, Tan Qinggui^{1,2*}

- (1. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, Xi'an 710100, China;
2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

Abstract: The High Throughput Satellite (HTS) is the major developing and application direction of the new generation wideband communication satellite. The domestic and neighborhood market have a huge demand of HTS. The characteristics and development demands with microwave photonics of HTS were analyzed. The main research developments, especially the new developments of HTS in our country, were introduced. The applications of microwave photonics on HTS and the foreign microwave photonics payloads of HTS were studied. And a new microwave photonics payload scheme was proposed and studied. The effectiveness and feasibility of this microwave photonics payload scheme were tested. In the end, the problems and suggestion of microwave photonics HTS were analyzed.

Key words: microwave photonics; HTS; optical X-connect; optical channelizer

收稿日期:2021-04-14; 修订日期:2021-06-10

作者简介:李立,男,研究员,博士生,主要从事卫星高速数据处理与传输技术和先进卫星通信与遥感载荷的研究工作。

通讯作者:谭庆贵,男,研究员,博士,主要从事微波光子技术和卫星光通信技术方面的研究工作。

0 引言

卫星通信具有灵活方便、传输带宽大、可提供跨越地域的通信覆盖等特点,在航空海事通信、军事通信、应急指挥、互联网接入、政府与企业服务、信息网络安全、空间频轨资源维护等各个方面都具有重要的保障作用。近年来,新的卫星通信系统及卫星通信技术迅速发展,全球卫星通信行业进入了以高通量卫星通信系统、移动通信卫星系统和低轨星座系统为代表的卫星互联网发展阶段。

高通量卫星 (High Throughput Satellite, HTS) 的概念是由美国航天咨询公司北方天空研究所 (NSR) 率先提出,其最主要特点是利用多点波束、频率复用、波束增益等方式,大幅提高卫星传输容量,显著降低单位带宽的成本,在同样频谱资源的条件下,整星通量是传统固定通信卫星的数倍。HTS 卫星概念由“宽带卫星”演化而来,在宽带接入、数据中继、基站回传、航空船载娱乐等方面都得到了广泛应用,开辟了卫星互联网接入的新业务。

大容量、高灵活是高通量卫星系统发展过程中不断追求的目标,更高通信频段的使用 (Ka、Q、V 等)、更大容量的信息交换、更灵活的信息转发是高通量卫星通信系统用以提升系统容量和系统灵活性所采用的技术手段。然而,目前现有的电子学技术越来越难以满足高通量通信卫星发展需求。这需要采用宽带灵活载荷,适应灵活的通信体制、多维度资源调度算法,实现不同热点区域、不同波束覆盖,发挥大容量通信卫星的潜能。微波光子技术集成了微波通信的灵活性和光通信的大容量、大带宽特性,具有低损耗、高速率及电磁兼容能力好等特性。在高通量卫星系统中采用微波光子技术,可实现星载宽带信号光域窄带处理、大规模交换转发和光控波束形成,不仅能够解决当前高通量卫星及应用中存在的问题,满足各方客户需求,还具有宽带、高频、高速、大容量、电磁兼容能力好等诸多优点,有助于推动卫星载荷向宽带化、阵列化、一体化、小型化和通用化发展,具有重要的意义^[1-3]。

1 高通量卫星发展动态

1.1 国外高通量卫星发展动态

全球高通量卫星领域快速发展,在轨比例逐年增

大,系统能力迅速提升,呈现指数型增长趋势。2013 年,全球的在轨卫星的总容量首次突破了 1 Tbps。2018 年,高通量卫星容量供应量达到 1.8 Tbps,预计到 2021 年可用容量达到 3.8 Tbps。多个低轨宽带星座全面投入运营的时间均设在 2022 年前后,因此预计 2022 年的可用供应量将大幅增加,达到 10.8 Tbps。据国际卫星咨询机构“北方天空研究所”报道,预计到 2022 年,全球高通量卫星总需求容量将超过 1 Tbps。国外典型的高通量卫星系统包括 Ka-sat(Ka 频段卫星)、Inmarsat Global Xpress(国际移动卫星)、Yahsat 卫星(亚赛特卫星)和 Viasat(卫讯卫星)系列等^[4-7]。

2010 年 12 月,欧洲通信卫星组织 (Eutelsat, 简称欧卫星) 的通信卫星 Ka-Sat 送入轨道,该星是欧洲的第一颗全 Ka 波段高功率大容量宽带通信卫星。卫星采用了先进的 Ka 波段点波束设计,拥有 82 个窄点波束,频率复用 20 次,系统容量达到 70 Gbps,用于向欧洲、中东及非洲部分地区提供高速宽带、视频和数据应用等服务,用户数量多达 50 万。

2008 年 1 月,美国卫讯公司宣布与劳拉空间系统公司签署协议,建造“卫讯 1 号”(ViaSat-1) 卫星,这是一颗高容量的全 Ka 频段宽带通信卫星。ViaSat-1 卫星采用劳拉公司 1300 型卫星平台以及高容量的 Ka 波段点波束技术,于 2011 年 10 月 19 日发射成功,在轨设计寿命 15 年,升空后为北美、夏威夷地区提供高速的卫星宽带通信服务。ViaSat-1 号卫星高质量、大容量、超高速等性能高效益地服务于美国、加拿大的个人及企业用户。ViaSat-1 号卫星与美国卫讯公司的新一代 SurfBeam 网络系统优化组合后,容量达到 140 Gbps,单个卫星可支持 100 万个以上用户高速宽带接入。

2017 年 6 月 1 日, ViaSat-2 卫星由阿丽亚那 5 型火箭发射升空,总容量为 300 Gbps。ViaSat-2 采用波音公司 BSS-702HP 平台,其容量是 ViaSat-1 卫星的 2.5 倍,覆盖北美、中美和加勒比海地区,覆盖区域是 ViaSat-1 卫星的 7 倍,覆盖从美国东海岸到北美洲之间的航空和海事区域。ViaSat-2 卫星除了提供互联网接入服务,还提供海事和航空移动服务。

2021 年 2 月,卫讯公司推迟了其首颗 Viasat-3 卫星的发射,预计不会早于 2022 年初。ViaSat-3 卫星配置数百个点波束,单星容量预计达到 1 Tbps,计划为

各类用户提供速率超过 100 Mbps 的高速宽带接入服务。ViaSat-3 仍由波音公司制造,是目前卫星平台使用功耗最高的载荷。

1.2 国内高通量卫星发展动态

国内面向高通量卫星发展需求,也开展了高通量卫星关键技术攻关和卫星载荷研制工作。目前成功发射了中星 16、实践二十号和亚太 6D 等高通量卫星。

2017 年 4 月 12 日,我国第一颗全 Ka 频段宽带通信卫星中星 16 成功发射。图 1 为中星 16 号外形图,该卫星共有 26 个用户波束,星上采用透明转发技术,系统总容量大于 20 Gbps。该卫星工作频率较高,波束覆盖范围大。采用多口径、单馈源多波束技术,有效提高馈源的布局空间、机械尺寸和 C/I 性能^[8]。



图 1 中星 16
Fig.1 China satellite 16

2019 年 12 月 27 日,实践二十号卫星由长征五号遥三运载火箭成功发射,是我国研制的发射重量最重、技术含金量最高的卫星。该卫星上所采用的宽带柔性转发器、三重叠天线、Q/V 频段馈电链路、星地激光通信等关键技术和实验载荷均代表了国内宽带卫星通信技术的领先水平。2020 年 3 月 30 日晚,实践二十号卫星成功开展了激光-微波交链传输试验,激光地面站位于云南丽江,微波上行发送站设置在西安,微波下行接收站设置在北京。开展了同步轨道卫星高速激光通信,完成了星载激光通信载荷工作流程、星地激光链路快速捕获、高精度跟踪、高速相干通信等关键技术在轨飞行验证。

2020 年 7 月 9 日,Ku 频段全球高通量宽带卫星首发星-亚太 6D 成功发射,这是我国目前通信容量最大、波束最多、输出功率最大、设计程度最复杂的民商用通信卫星。图 2 为亚太 6D 卫星外形图,该卫星通信总容量达到 50 Gbps,单波束容量可达 1 Gbps 以

上。使用多波束天线,共有 90 个用户波束,共 8 个地面关口站,可以支持近 100 Mbps 的数据速率。面向亚太区域用户,提供全地域、全天候的卫星宽带通信服务,满足海事通信、航空机载通信、陆地车载通信以及固定卫星宽带互联网接入等多种应用需求。

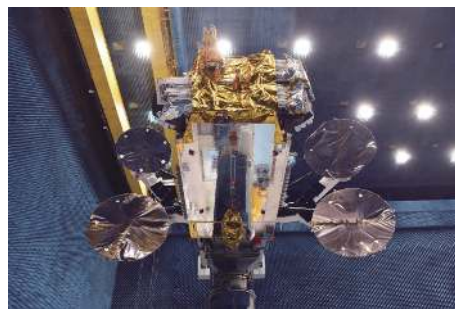


图 2 亚太 6D 卫星
Fig.2 AP-16 satellite

2 微波光子高通量通信卫星发展动态

2.1 国外发展动态

对于微波光子技术在空间高通量通信卫星系统中的应用,国外以欧盟为代表,深入开展了基于微波光子技术的高通量通信卫星载荷的应用探索研究。从 2002 年开始,欧空局开展了基于微波光子技术的星载交叉互联技术研究,实现了星载微波光子变频、本振馈送和交换转发一体化设计。系统完成了基于微波光子技术的新型光-微波转发器的通道性能验证。验证了微波信号光域传输、微波信号光域交换、微波信号光域滤波、微波信号光域变频等功能。该演示系统的输入微波信号频率为 Ka 波段的信号 (28~31 GHz),输出为 C 波段的微波信号 (3~5 GHz)。此外,该系统实现了 26 GHz 范围内可调的本振产生和 32×32 无阻塞光射频交换转发。拉开了微波光子技术在高通量通信卫星中的应用论证与技术验证的序幕^[9-12]。

面向高通量卫星大容量交换转发发展需求,欧盟重要宇航公司 Airbus 开展了一系列基于微波光子的卫星载荷技术研究。提出了基于微波光子技术的高通量通信卫星载荷结构,该微波光子载荷的结构如图 3 所示,包括微波光子阵列变频、微波光子交换转发、微波光子本振馈送等模块,具有宽带宽、大容量、高灵活性、电磁兼容能力好等特点,可实现大规模路

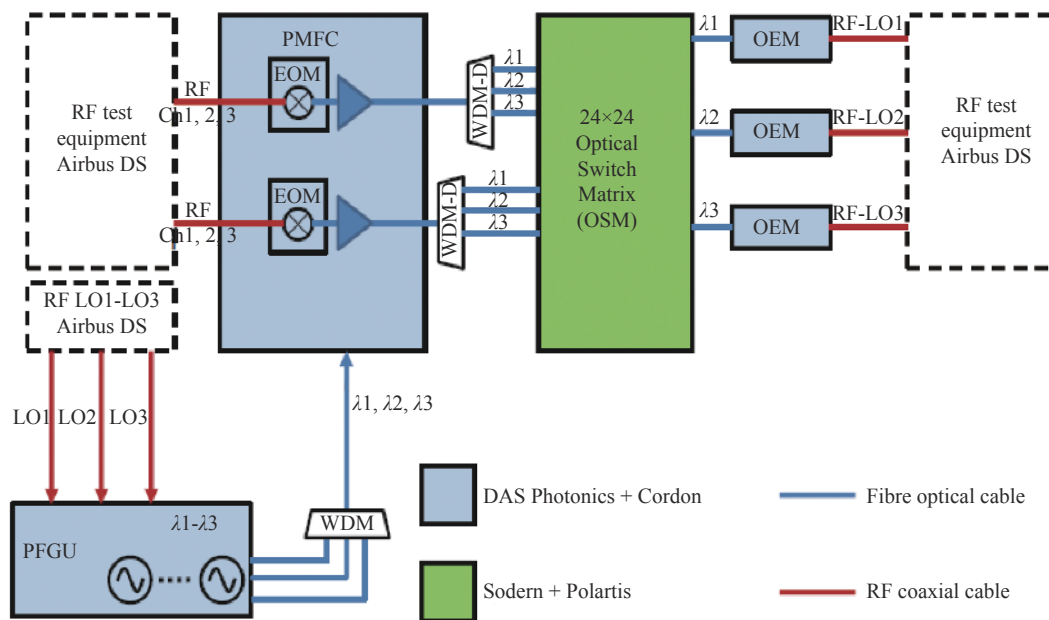


图 3 Airbus 微波光子载荷方案

Fig.3 Microwave photonics payload scheme of Airbus

由及包括 Ku/Ka /Q/V 频段在内的多路信号的转发处理。其热耗与功耗降低 15% 以上,重量降低 25% 以上,采用集成化设计后预计降低 50% 以上。

同时欧盟重要宇航公司 DAS 提出了基于微波光子技术的光有效载荷系统方案^[9]。其工作频段涵盖适于用户需求的 Ka 频段,以及适于馈线链路的 Q/V 频段和光波段。此外,该有效载荷还包括固定频率规划覆盖路由以及可重构频率规划覆盖及路由部分,能够满足不同应用场景的需求。整个载荷涉及光域多本振信号生成馈送、光域多路混频、光路由及光电转换与下变频等。2019 年 6 月 21 日,搭载着微波光子载荷的 EUTELSAT 7C 卫星成功发射,该卫星在轨有效寿命预计为 15 年。其本振信号频率为 9.8~10.2 GHz, Ka 频段输入信号频率为 27.1~31 GHz,输出信号频率为 17.3~21.2 GHz, Q/V 频段输入信号频率为 47.2~52.4 GHz,输出信号频率为 37.4~41.6 GHz。系统增益优于 -12.5 dB,噪声系数优于 41.1 dB,三阶交调抑制比优于 58 dB。

2020 年, Airbus 主导研究了基于微波光子技术的光子辅助相干接收方案,在光域实现了微波光子调制、相干波束形成和相干接收,该方案有助于实现星载多波束和大容量交换转发,对推动下一代高通量卫星通信发展具有重要作用。

2.2 国内发展动态

国内中国科学院、中国电子科技集团、中国航天科技集团和高校等诸多研究院所都已开展了微波光子技术及应用研究。经过近 20 年的发展,在微波光子技术星载应用方面,国内完成了微波光子交换转发、微波光子射频通道、微波光子信道化等微波光子技术攻关、模块研制及地面试验验证等研究工作。“十二五”末国内完成了微波光子透明转发载荷样机研制,实现了 8 路 Ka 频段射频信号光域透明交换转发,完成了星载光-微波转发器的概念和射频通道性能验证。“十三五”期间,国内完成了面向高通量卫星的星载微波光子载荷研制工作,其中典型模块包括微波光子信道化、Q/V 微波光子变频、大规模光交换转发等技术。在星载混合数字柔性转发方面,突破了宽带光子信号处理、带宽可灵活配置的分级数字信道化、小颗粒度信道路由交换等关键技术,有效提高了通信卫星的微波信号交换转发能力。

3 微波光子高通量交换转发

3.1 微波光子技术特点

微波光子在高通量通信卫星中主要实现微波信号的光域交换转发。基于微波光子技术的通信卫星载荷具有以下几个方面的优势:

(1) 工作带宽提高 1 个数量级: 可用工作带宽优于 30 GHz。具有多频段一体化处理能力, 实现射频综合, 单端口工作频段覆盖 0.5~32 GHz, 最大处理带宽 3 GHz, 能够进行任意频段的实时接收处理;

(2) 粗细粒度灵活大规模交换转发: 兼具粗粒度全光透明交换和细粒度柔性转发两种工作模式; 光交换规模达 360 路;

(3) 光子一体化微波信号处理: 不同模式下电光转换、全光上下变频以及光电转换实现功能共用, 通用能力好, 大大节省系统成本;

(4) 重量和体积降低 40% 以上: 采用光子集成技术, 可以有效降低卫星载荷的体积和重量。

3.2 微波光子高通量交换转发器

基于微波光子技术的特点和优势, 构建了微波光子高通量交换转发器样机方案。采用分立器件, 完成

了微波光子高通量交换转发器样机研制及性能测试。如图 4 所示, 该样机主要包括光子信号处理交换单元和数字柔性处理交换单元两部分。光子信号处理交换单元主要由微波/光转换阵列、微波光子信道划分模块、光分路器、光粗粒度交换转发矩阵组成。该微波光子高通量交换转发器分别进行 16 个 2 GHz 波束的全光处理和 16 路的全数字处理。16 个上行波束先进行宽带电光转换, 再进行微波光子信道划分, 形成 64 路 500 MHz 微波光子信号。64 路 500 MHz 微波光子信号一部分直接进行光域大颗粒度信道交链, 另一部分进行数字柔性转发处理与交换。光域交换和数字交换输出 64 路 500 MHz 下行微波光子信号, 这些微波光子信号根据需求进行分组, 形成下行 16 个波束。

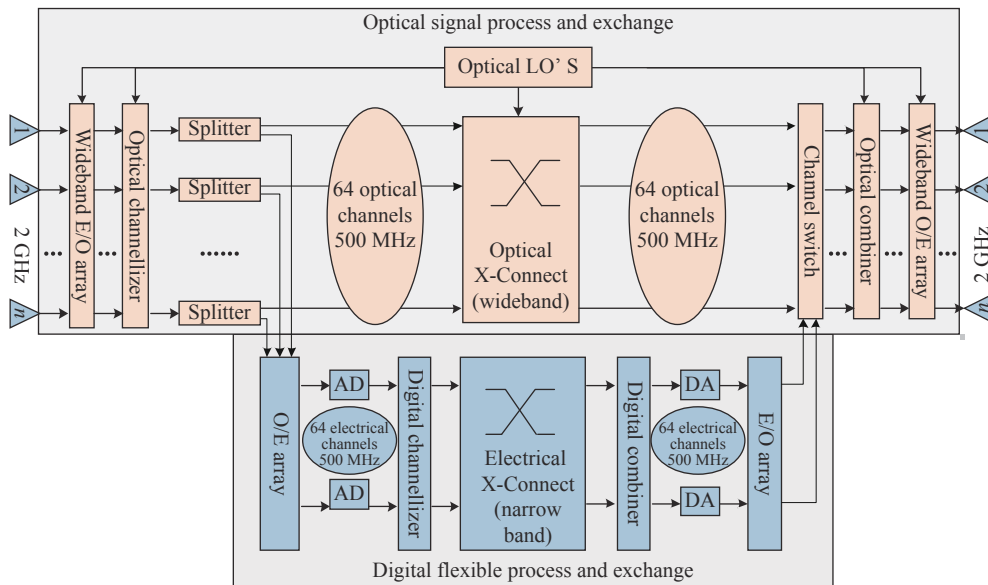


图 4 微波光子交换转发方案

Fig.4 Microwave photonics switching payload scheme

在宽带微波光子信道化方面, 突破了高线性微波/光转换、高镜频抑制变频、高矩形系数滤波等技术, 攻克了跨频段宽带微波信号信道划分及多路窄带中频信号输出技术难题, 实现了宽带高频微波信号的镜像抑制信道化变频, 可将 2 GHz 宽带信号信道划分为 4 路带宽为 500 MHz 的信号, 满足全光透明交换转发和数字柔性转发的具体应用需求。

在 Q/V 频段微波光子射频通道方面, 结合射频通道宽带化、多波束、通用化应用需求, 从系统应用

的角度创新性提出基于 Q/V 阵列变频架构的微波光子射频通道系统, 研制出基于微波光子的射频通道样机, 实现了频率涵盖 Ku/Ka/Q/V 多个微波频段, 变频带宽优于 2 GHz 的高频宽带微波光子阵列变频。如图 5 所示, 采用光域预失真线性补偿方法, 得到了 116 dB·Hz^{4/5} 的无杂散动态范围 (SFDR), 三阶交调失真抑制明显, 动态范围也得到大大提升。

在微波光子交换转发方面, 开展了星载多尺度微波光子交换转发技术研究。对于粗粒度模拟交换转

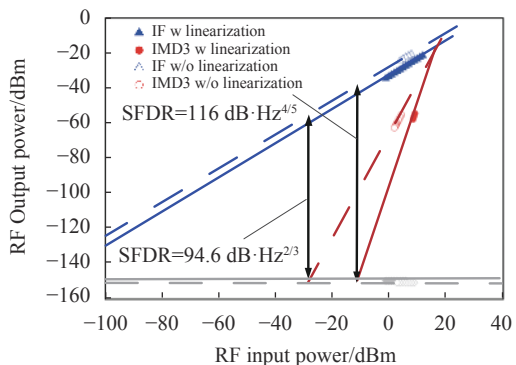


图 5 无杂散动态范围测试结果

Fig.5 Measuring results of SFDR

发需求,完成 64×64 规模的宽带微波信号的交换转发,有效解决了现有微波交换转发矩阵在规模、体积和复杂度等方面的难题。针对窄带数字细粒度柔性交换转发需求,实现了子信道为 2.6 MHz 的微波光子信号柔性交换转发。有效验证了星载多尺度微波光子交换转发技术的有效性和可行性。

大量实验结果表明,基于微波光子技术的卫星通信技术可有效满足高通量卫星大容量、快速响应、带

宽自主规划、按需配置和重构升级的需求,基于微波光子技术的高通量卫星能够支持宽频谱覆盖范围、大带宽的多频宽带微波信号处理,能实现多路微波信号的一次性阵列上/下变频,可在不进行基带解码的情况下,实现粗细粒度相结合的信道划分与交换。

3.3 芯片化微波光子射频通道

基于分立器件的微波光子高通量交换转发器在体积和功耗方面没有充分发挥光子技术的优势。为了更好的满足卫星平台对卫星载荷体积、重量和功耗方面的需求,开展了芯片化微波光子射频通道研究。图 6 给了芯片化微波光子射频通道工作原理图。该芯片主要包括激光器、调制器、放大器、分路器和探测器。该芯片化微波光子射频通道输入一路 2 GHz 带宽的 Ka 频段信号,输出 4 路带宽为 500 MHz 的射频信号。目前完成了该芯片的研制及测试,初步验证了该芯片化微波光子射频通道的有效性和可行性。为后续微波光子载荷芯片化研制奠定了芯片设计、工艺实现和封装测试等方面的基础。

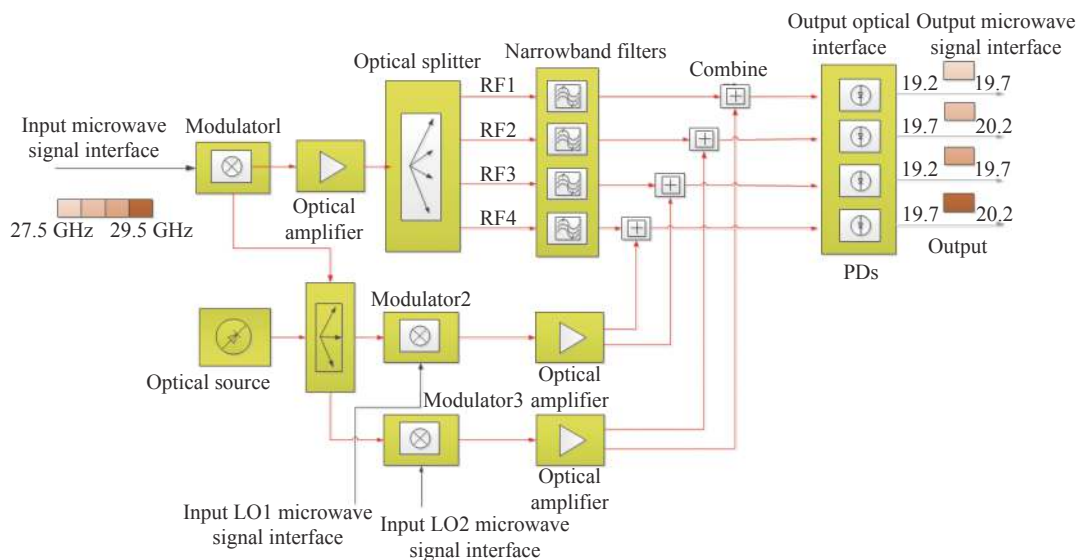


图 6 芯片化微波光子射频通道原理图

Fig.6 RF Channel Principle based on Photonic Chips

4 发展建议

高通量卫星是宽带卫星通信发展的重要方向。微波光子技术具有前沿性、创新性和颠覆性,在大容量通信卫星系统中具有重要应用前景,可以大幅降低

卫星带宽成本、实现卫星载荷的阵列化、小型化、一体化,并具有频谱效率高、超宽带、超高吞吐量的特点。目前基于分立器件完成了样机的研制及测试,并开展了微波光子卫星载荷芯片化、集成化技术探索。为了更好的发挥微波光子技术优势,对于基于微波光

子技术的高通量卫星通信系统,建议后续着重开展以下三个方面的工作:

(1) 面向高频段、大带宽通信卫星载荷发展需求,做好新型通信卫星载荷系统设计,充分发挥微波光子技术的宽带性、灵活性的特性;

(2) 面向微波光子载荷工程化的需求,突破通信卫星微波光子载荷空间环境适应性问题;

(3) 在国内打造微波光子的芯片/集成/封装的生态圈和产业链,共同推动微波光子技术在高通量通信卫星载荷中的应用。

参考文献:

- [1] Pang Lixin, Li Jie, Feng Jianyuan. Development of high throughput satellite: A survey and review [J]. *Radio Communications Technology*, 2020, 46(4): 371-376. (in Chinese)
- [2] Yuan Jinqian, Luo Yidan, Gao Weiwei. Analysis on the development trend of foreign Q/V band communication satellites [J]. *Space International*, 2020, 499(7): 42-46. (in Chinese)
- [3] Yao Jianping. Microwave photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [4] Liu Yue. Development of foreign high throughput satellite systems and technology [J]. *Space International*, 2017, 467(11): 42-47. (in Chinese)
- [5] Li Bo. Research on flexibility of foreign communication satellite system [J]. *Space International*, 2018, 473(5): 23-32. (in Chinese)
- [6] Zhang Hang. The latest development of foreign high-throughput-satellites [J]. *Satellite Communication*, 2017, 6: 53-57. (in Chinese)
- [7] Han HuiPeng. Overview of the development of foreign high-throughput satellites [J]. *Satellite and Internet*, 2018, 8: 34-38. (in Chinese)
- [8] Wang Xu. The successful launch of No. 13 of practice satellite opens the era of chinese high-throughput communication satellite [J]. *Aerospace China*, 2017(5): 13. (in Chinese)
- [9] Anzalchi J, Inigo P, Roy B. Application of photonics in next generation telecommunication satellites payloads[C]//ICSO, 2017, 10563: 1056330.
- [10] Pan Shilong, Zhu Dan, Liu Shifeng, et al. Satellite payloads pay off [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2015, 16(8): 61-73.
- [11] Duarte V C, Prata J G, Ribeiro C F, et al. Modular coherent photonic-aided payload receiver for communications satellites [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-9.
- [12] Piqueras M A, Martí J, Delgado S, et al. A flight demonstration photonic payload for up to Q/V-band implemented in a satellite Ka-band hosted payload aimed at broadband high-throughput satellites[C]//ICSO, 2019, 11180: 111804S.