

基于微波光子技术的高通量卫星研究进展^①

董洪建¹, 蒋 炜²

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094;

2. 中国空间技术研究院西安分院, 空间微波技术重点实验室, 西安 710000)

摘 要:高通量卫星(High Throughput Satellite, HTS)是新一代宽带通信卫星的统称。一方面可用于远程教育、远程医疗、应急救援等公益事业, 另一方面可以为个人和企业提供宽带多媒体和高速率的 Internet 等商业应用。首先介绍了高通量卫星通信的概念, 对基于微波光子技术的高通量卫星进行需求分析, 接着对国内外高通量卫星的发展现状进行了详细介绍并进行了对比分析。在此基础上, 给出了基于微波光子技术的高通量卫星通信系统组成初步构想, 最后给出了总结和展望。基于微波光子技术高通量卫星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应用中的问题, 满足多用户多业务需求, 还兼具频谱效率高、带宽大、吞吐量高等优点, 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。

关键词:微波光子; 高通量卫星; 有效载荷; 关键技术

中图分类号: V443+.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7135(2021)02-0001-08

D O I: 10.3969/j.issn.1674-7135.2021.02.001

Research progress of high throughput satellite based on microwave photonics

DONG Hongjian¹, JIANG Wei²

(1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave,
China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: The High Throughput Satellite (HTS) is just a general term of the new generation wideband communication satellite. On the one hand, satellite payloads are used for public welfare undertakings such as distance education, telemedicine, emergency relief and so on. On the other hand, it provides business applications such as broadband multimedia and high-speed Internet for individuals and enterprises. This paper introduces the concept of HTS, carries out the demand analysis of HTS based on microwave photonics, and then introduces the development status of HTS at home and abroad in detail. On this basis, the composition and key technologies of the HTS system based on microwave photonics are presented, and the conclusion and prospect are given. High throughput satellite based on microwave photonics can realize narrow-band processing, large-scale switching and repeating, and optically controlled beamforming. It can not only solve the problems in current high throughput satellite applications and meet the needs of multi-user and multi service, but also has the advantages of high spectral efficiency, wide band and high throughput. It is of great significance to promote the development of satellite payload to be broadband, arrayed, miniaturized and generalized.

Key words: microwave photonics; HTS; payload; key technology

① 收稿日期: 2021-02-12; 修回日期: 2021-03-31。

基金项目: 自然科学基金(编号: 61701412); 预研基金项目(编号: 6142411205104)

作者简介: 董洪建(1979—), 高级工程师。研究方向为航天器总体设计等方面。E-Mail: castdonghj@163.com

通讯作者: 蒋炜(1979—), 高级工程师。主要从事微波光子技术方向研究。E-Mail: tsingh504@163.com

0 引言

高通量卫星也称高吞吐量通信卫星(HTS)，“高通量卫星”一词最早由北方天空研究公司(NSR)于2008年提出^[1]，其最大的特点就是容量大，通过多点波束及频率复用，每颗卫星得到了同等轨道频谱的常规卫星数倍或数十倍的可用频率资源，大大降低单位带宽的成本^[2]。

高通量卫星的主要技术特征包括多点波束、频率复用、高波束增益等。在高通量卫星中，为更多地考虑卫星覆盖区域内的用户通信需求，多个点波束通过频率复用完成区域覆盖，每个关口站可管理数个点波束，卫星的总容量可达数十、几百 Gbps 甚至 1 Tbps 以上，进而通过灵活载荷设计、适应灵活的通信体制、多维度资源调度算法设计等手段实现不同热点区域、不同波束覆盖、发挥大容量通信卫星的潜能。自 2004 至今，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，全球在轨卫星总容量首次突破了 1 Tbps，而到 2017 年，这一指标已翻番达到 2 Tbps^[3-4]。北美卫星宽带服务商卫讯(Viasat-1/-2)和休斯(Jupite-1/-2)引领全球高通量卫星发展格局，典型卫星配置近 100 个点波束，单星容量达数百 Gbps，服务成本有望低至 60 万美元/Gbps 量级(Viasat-3)^[5]。

随着高通量卫星的发展和军民通信业务需求的急剧增加，宽带高通量卫星的大量部署迫在眉睫。为了提高通信速率，宽带高通量卫星的工作频段向 Ku、Ka 甚至 Q/V 波段扩展，调制格式趋向更为高级(16QAM、32QAM、64QAM)，波束数和通道数变得更多。高速大容量及多种通信业务并存的需求，要求卫星通信具备无阻塞的高速宽带数据传输处理能力的同时，还需具备频谱资源共享和抗多用户干扰的能力，进而实现多节点链接，支持陆、海、空、天各类高速宽带用户或用户群接入和互联。这对卫星高频段、高速通信系统的工作频段、工作瞬时带宽和波束处理能力提出了进一步的挑战。传统电信号处理模式越来越受射频信号处理带宽和交换转发规模等瓶颈限制。随着卫星载荷规模的增加，需要抑制电磁干扰，降低卫星载荷的体积、重量和功耗。

微波光子技术集成了无线通信的灵活性和光通信的大容量、大带宽特性，具有低损耗、高速率及抗电磁干扰等特性。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、强抗干扰等诸多优点，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 国外高通量卫星发展现状

1.1 国外高通量卫星载荷应用实例

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)、Spaceway 卫星(太空之路卫星)系统和 Viasat(卫讯卫星)系列。2011 年，美国卫讯公司劳拉空间系统公司建造的“卫讯 1 号”(ViaSat-1)卫星发射成功。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，实现了全 Ka 频段高通量宽带通信，其通信容量达到 140 Gbps。2017 年，ViaSat-2 发射成功，其通信容量为 300 Gbps，如下图 1 所示。2021 年预计发射的 ViaSat-3 通信容量将达到 1 Tbps^[5]。



图 1 ViaSat 卫星发射现场

Fig. 1 Viasat launch site

在高通量卫星中，为保证灵活的路由与交换能力，通常采用数字透明处理(Digital Transparent Processor, DTP)技术实现无需调制解调及译码的细粒度信道交换。国际上 DTP 的发展经历了从移动通信到高通量通信的发展，经历了从军用向民用转移的过程，其技术指标的发展主要体现在处理带宽的不断增加，以及单位处理带宽所需的重量、热耗等星上资源不断减少。

第一代：DTP 以 Thuraya 和 Inmarsat-4^[6-8] 为代表，单通道处理带宽 30 MHz，通道个数 120 个；

第二代：DTP 以 WGS 卫星^[9-11] 为代表，单通道处理带宽 125 MHz，通道数量 20 个；

第三代：DTP 以 Alphasat XL^[12] 为代表，单通道处理带宽 250 MHz，最大处理通道数量 14 个；

第四代:DTP 以 TAS^[13] 产品为代表,单通道处理带宽 500 MHz;

最新第五代产品:单通道处理带宽达到 GHz 量级。

下图为 WGS 卫星载荷的结构示意图^[9],其中 DTP 由 Flexible digital channelizer 实现。上行信号经 X 频段和 Ka 频段接收天线后下变频至中频信号,之后送至 DTP 进行数字路由与交换。DTP 对中频输入信号进行模数转换后,在数字域进行信道化

与交换,DTP 在输出前还要将数字信号经数模转换换成中频模拟信号,传送至相应上变频器。上变频器的输出与各类发射天线相接,经放大后下行传回地面。该卫星可提供 1.2 Gbps ~ 3.6 Gbps 的通信容量,其瞬时转换带宽可达 4.875 GHz。其中 DTP 可实现 Ka 频段(上行频率:30 GHz ~ 31 GHz,下行频率:20.2 GHz ~ 21.2 GHz)以及 X 频段的信道化。

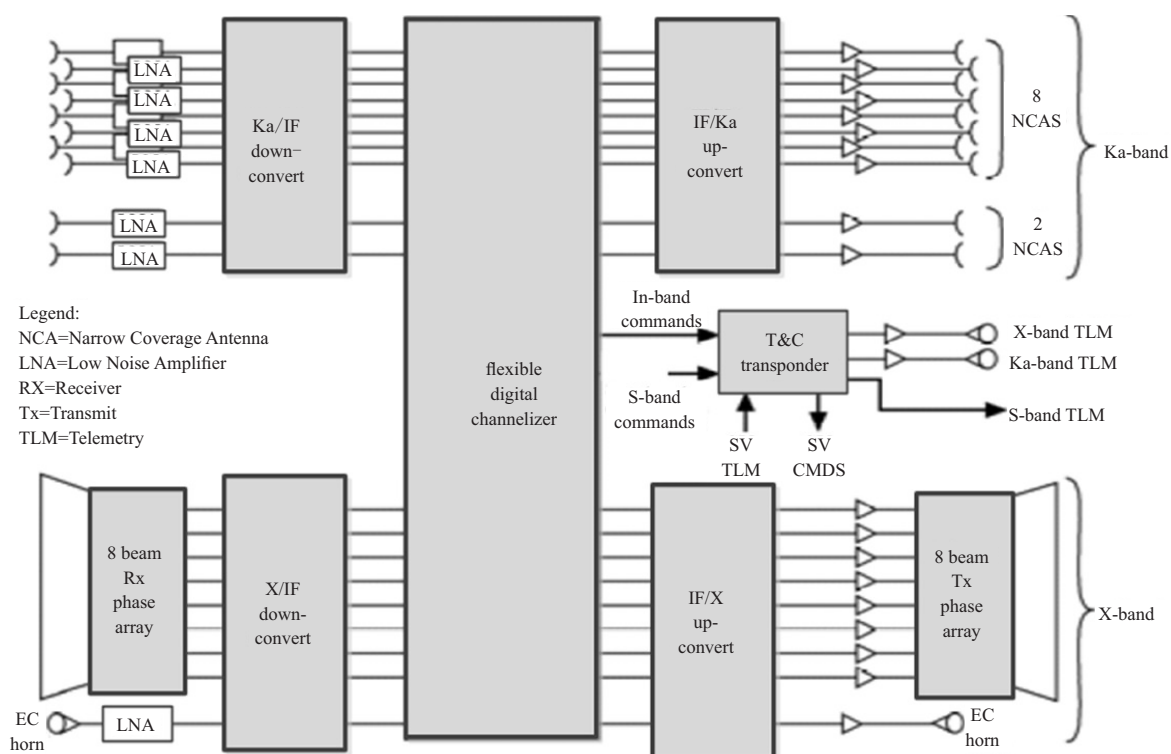


图 2 WGS 卫星载荷结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of WGS satellite payload

1.2 国外微波光子载荷技术发展动态

欧洲、日本和美国等国家和地区开展了大量微波光子技术空间应用方面的研究工作。研究内容主要包括微波信号光域传输、微波信号光域交换、微波信号光域滤波、微波信号光域变频以及空间微波光子通信系统构建及性能分析。

在微波光子交换转发方面,从 2002 年开始,ESA 开展基于微波光子技术的星载交叉互联技术研究,实现了微波光子变频、本振馈送和交换转发一体化设计。2012 年 ESA 所搭建的光-微波交换转发器演示系统主要对项目中的新型光-微波转发器的概

念和通道性能进行验证。该演示系统的输入微波信号频率为 Ka 波段的信号(28 GHz ~ 31 GHz),输出为 C 波段的微波信号(3 GHz ~ 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。

2017 年欧空局成功发射了 Amazonas-5 通信卫星^[14-15],在该卫星上搭载了 Ka 波段微波光子交换转发器实验载荷,实现了微波光子变频、微波光子本振馈送、微波光子转发等功能,大幅度降低了射频前端的系统复杂度,大大提升射频隔离度,有效降低卫星载荷的体积、重量和功耗。

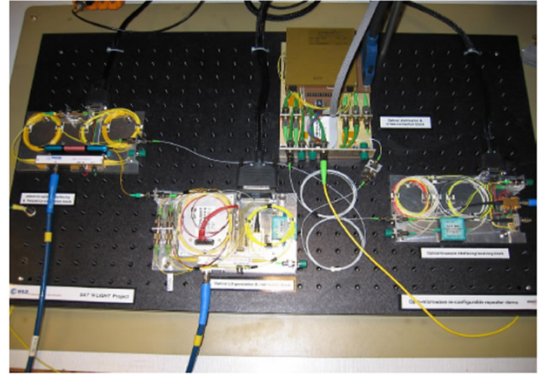
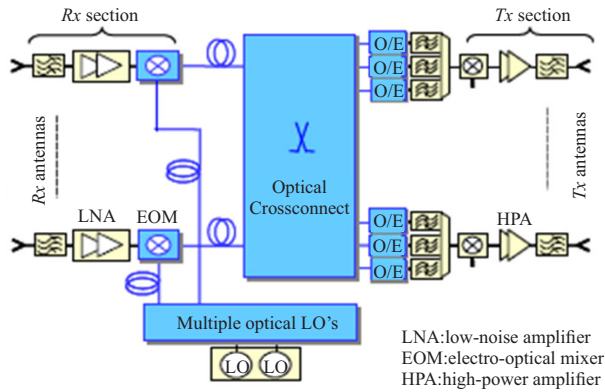


图 3 概念原理演示系统原理及实物

Fig. 3 Principle block diagram and experimental system of concept principle demonstration system



图 4 Amazonas-5 通信卫星发射现场

Fig. 4 Launch site of Amazonas-5 communication satellite

1.3 国外针对高通量卫星的微波光子技术发展动态

微波光子技术作为新兴技术,具有超宽带、易于大规模交换、便于多波束频率复用等优点,特别适合高通量卫星载荷应用,并且能够极大缩减载荷体积重量功耗。面向高通量卫星大容量交换转发的发展需求, Airbus^[6] 开展了一系列基于微波光子的卫星载荷技术研究。所构建的光有效载荷具有宽带宽、大容量、高灵活性、强抗干扰性、可实现大规模路由及包括 Ku、Ka 和 V 波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。

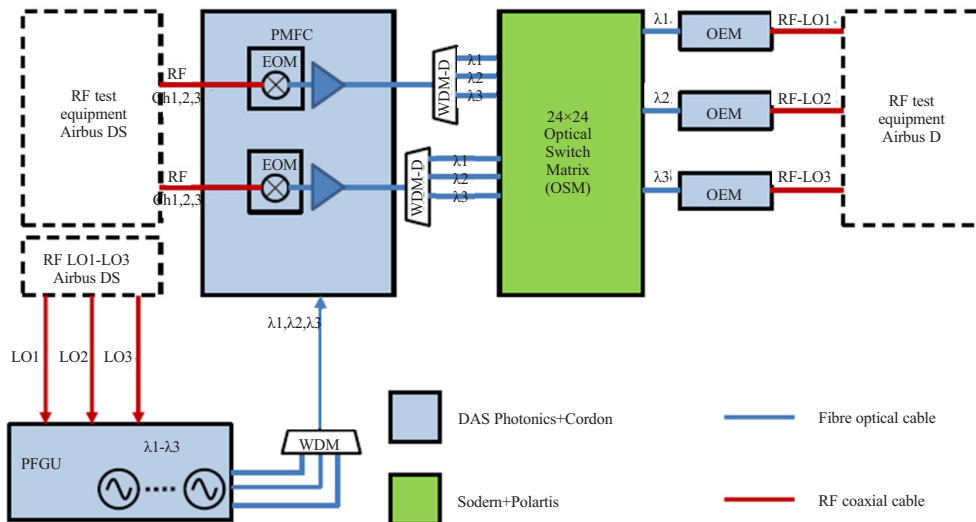


图 5 Airbus 微波光子载荷架构

Fig. 5 Architecture of microwave photonic payload

针对高通量卫星需提供超过 Tbps 通信容量的互联网连接,覆盖整个大陆地区的需求,DAS 提出了基于微波光子技术的光有效载荷系统方案^[7]。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 GHz ~ 10.2 GHz, Ka 频段输入信号频率为 27.1 GHz ~ 31 GHz,输出信号频率为 17.3 GHz ~ 21.2 GHz, Q/V 频段输入信号频率为 47.2 GHz ~ 52.4 GHz,输出信号频率为 37.4 GHz ~ 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。

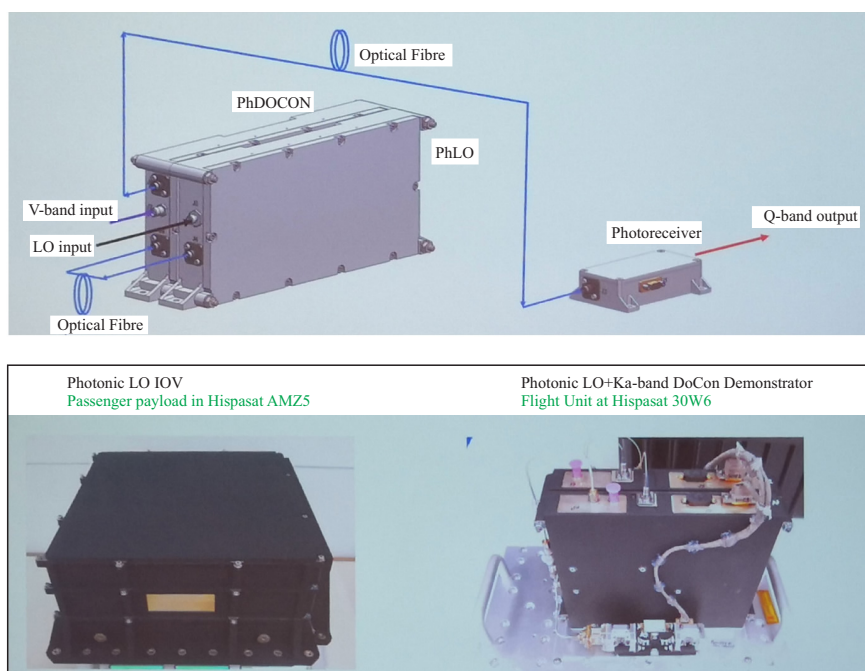


图 6 DAS 微波光子载荷主要部件

Fig. 6 Main components of DAS microwave photonic payload

2 国内高通量卫星技术发展动态

2.1 国内高通量卫星载荷应用实例

2017 年 4 月 12 日,我国首颗高通量通信卫星——中星 16 号^[17],成功由长征-3B 运载火箭发射入轨。卫星的设计寿命 15 年,起飞质量 4 600 kg,定点于 110.5°(E)。

中星 16 号卫星有 26 个用户点波束,用户终端可以方便快速地接入网络,下载和回传速率最高分别达到 150 Mbps 和 12 Mbps。卫星首次搭载了 Ka 频段通信载荷,使卫星通信总容量达 20 Gbps,超过了之前我国研制的所有通信卫星容量的总和,是我国卫星通信进入高通量时代的标志。卫星每波束前向容量 680 Mbps,每波束返向容量 200 Mbps,用户

波束发射频率 29.46 GHz ~ 30 GHz,用户波束接收频率 18.7 GHz ~ 20.2 GHz。

中星 16 号卫星在国内高轨卫星领域首次采用多口径多波束天线、固面反射器高形面精度控制等一系列先进技术,并且首次将空间技术试验和示范应用相结合,提供双向宽带通信示范化运营服务。卫星试验应用系统包括卫星平台试验系统、激光通信试验系统和 Ka 频段宽带通信载荷系统三部分。

2020 年 7 月 9 日 20 时 11 分,亚太 6D 通信卫星在西昌卫星发射中心由长征三号乙运载火箭成功发射。亚太 6D 是我国首个 Ku 频段全球高通量宽带卫星通信系统的首发星,同时也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。

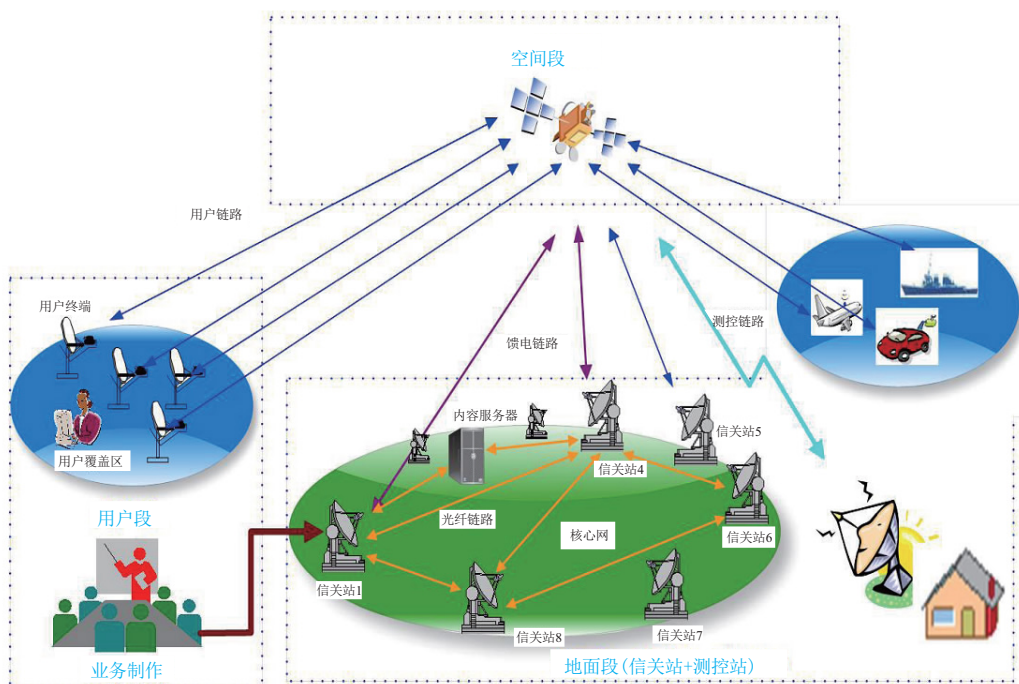


图 7 中星 16 号运行原理图

Fig. 7 Operation schematic diagram of Zhongxing 16

该卫星主要面向亚太区域用户提供优质、高效、经济的全地域、全天候的卫星宽带通信服务,用以满足海事通信、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,通信总容量达到 50 Gbps,单波束容量可达 1 Gbps 以上;采用 90 个用户波束,实现可视范围下全球覆盖。



图 8 亚太 6D 卫星发射现场

Fig. 8 Asia Pacific 6D satellite launch site

2.2 国内微波光子技术发展动态

在国内,清华大学、北京邮电大学、北京大学、浙江大学、华中科技大学、南京航空航天大学、电子科

技大学、北京半导体研究所、中电集团 34 所、中电集团 44 所、中电集团 38 所、中电集团 29 所等重点从事微波光子技术研究。

其中,高校主要关注微波光子新技术、新方法等方面的理论研究、实现原理及性能指标验证,对工程化考虑较少。研究所以产品为导向,在微波光子技术发展过程中考虑了工程应用需求。以微波系统和光系统的融合、微波信号的光处理及微波信号光传输星上应用的概念验证为基本出发点,中国航天科技集团有限公司五院西安分院从“十一五”就开展星载微波光子技术研究,在微波光子技术的卫星通信系统应用、基于微波光子技术的关键模块研制及微波光子的通信系统地面演示验证方面积累了丰富的经验。“十三五”期间,中国航天科技集团有限公司五院西安分院紧密围绕宽带通信卫星、高通量通信卫星及航天器有效载荷技术的发展,瞄准国防科技和武器装备发展需求,在微波光子相干雷达、微波光子射频通道、星载混合数字柔性转发和宽带微波光子信道化等方面取得了多项技术创新,部分研究成果达到国际先进或国际领先水平。在微波光子相

干雷达方面,提出光学高阶倍频和光域去斜方法,解决了传统雷达带宽受限的难题,研制出首台双 DDS 高分辨率微波光子相干雷达样机,提高了雷达系统的探测能力,主要指标达国际先进水平。在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/K/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批量变频。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,有效提高星载系统的微波信号传输交换能力。在宽带微波光子信道化方面,突破高线性微波/光转换、高镜频抑制制度变频^[18-19]、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 3 GHz 宽带信号信道划分为 6 路带宽为 500 MHz 的信号^[18],满足全光透明交换转发和数字柔性转发的具体应用需求。

2.3 微波光子技术在高通量卫星中应用情况国内外分析对比

从国内外研究现状来看,高通量卫星已成为卫星通信的发展方向,它的典型应用以宽带接入、基站中继、移动通信为代表。目前,在卫星宽带接入市场中欧美国家卫星运营商仍占主导地位。我国目前在轨运营的 Ka 频段宽带卫星通信系统仅在政府部门等专用领域有小规模的使用,在目前国际形势和国内需求的综合推动下,我国商业卫星运营公司也启动了宽带通信卫星系统的研制建设工作,国内不少民营企业也已开始向国际电联申报 Ka 频段宽带通信卫星系统的建设和运营工作。从总体上看,当前和今后一段时期内是我国卫星通信产业实现跨越发展的机遇期。国外以解决现有高通量卫星灵活载荷需求、大容量多业务处理需求和宽带接入需求为契机,开展了相关的微波光子技术研究,并完成了地面试验验证和部分星载应用。国内目前还没有微波光子技术在高通量卫星中的应用实例。

此外,国外以 Airbus 为代表,依托完备的多基底材料微波光子芯片及封装平台^[20],在微波光子芯

片现有研究基础上,率先开展了针对高通量卫星的波束形成单元、阵列变频及光放大等部件的集成芯片设计研制。国内针对微波光子单元器件,开展了部分硅基微波光子波导等简单芯片研制,国内外在光子芯片研制及集成方面存在很大的差距。

3 基于微波光子技术的高通量卫星系统构架设想

为了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需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。根据微波光子载荷技术发展水平,结合国外 Airbus、DAS 等高通量卫星中微波光子技术的应用情况,基于微波光子技术的高通量卫星系统主要包括多波束形成、阵列变频、大容量一体化交换转发及宽带信号处理几部分,这几部分相互协作,具备以下功能:

- 实现基于光子技术的大带宽、高通量灵活通信;
- 光域实现微波信号相位控制和宽带光控相控阵波束成形;
- 实现多波束用户粗粒度和细粒度一体化灵活交换;
- 实现微波光子大容量交换转发;
- 实现包括微波光子信道化和光学模数转换在内的宽带信号处理;
- 实现多路微波信号的阵列化传输、变频及馈送。

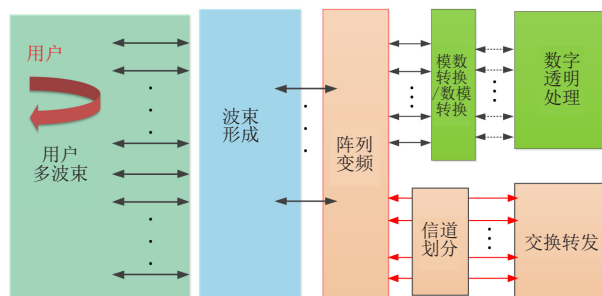


图 9 基于微波光子技术的高通量卫星通信系统架构设想图

Fig. 9 HTS communication system architecture based on microwave photonic technology

主要工作原理为:接收天线阵列接收到的射频信号由电光转换阵列调制到光域并变频,在光域完成光学信道划分,随后多路光学子信道经微波光子

变频后进行分发,一部分进行光学大颗粒度交换,一部分进行窄带数字信道化及电路交换。所涉及的关键技术主要包括光控相控阵天线(主要实现光控波束形成)、调制与本振生成、阵列变频、光交换、光子信道划分及光电转换等方面。

4 总结与展望

高通量卫星已成为宽带卫星通信的发展方向,在基于微波技术的高通量卫星系统方面,国外已完成了 300 Gbps 通信容量的星载验证,正在开展 1 Tbps 通信容量的星上应用研究。国内目前高通量卫星通信容量为 50 Gbps。在基于微波光子技术的高通量卫星系统方面,国外以 Airbus、DAS 为代表开展了相关研究工作,在光域实现波束形成、阵列变频及粗粒度的大规模交换路由等功能,大大降低载荷的重量功耗,提高载荷通信容量,同时预先开展相关的集成化设计研制工作。国内目前还没有相关针对性的系统研究。随着微波光子器件、微波光子关键技术与微波光子系统技术的飞速发展和宽带高通量卫星通信系统应用的深入研究,以星载应用需求为牵引开展微波光子高通量卫星系统的研制具有重要意义,该技术可望实现阵列化、小型化、一体化的卫星载荷,同时具备频谱效率高、宽带大、吞吐量高等诸多优点。

参考文献:

- [1] 刘悦. 国外高通量卫星系统与技术发展[J]. 国际太空, 2017(11): 42-47.
- [2] 王丽君. 高通量卫星通信系统设计因素分析[J]. 卫星应用, 2016(5): 412-417.
- [3] 沈永言. 全球高通量卫星发展概况及应用前景[J]. 国际太空, 2015(4): 19-23.
- [4] 李博. 国外通信卫星系统灵活性发展研究[J]. 国际太空, 2018(5): 23-32.
- [5] 张航. 国外高吞吐量卫星最新进展[J]. 卫星应用, 2017(6): 53-57.
- [6] 哈萨克国际通信社. 西班牙“亚马逊 5”通讯卫星从拜科努尔成功发射[EB/OL]. (2017-09-12) [2021-03-27]. https://www.inform.kz/cn/5_a3063878.
- [7] 俄罗斯卫星通信社. “质子-M”运载火箭把西班牙的亚马逊-5 号通信卫星送入静止轨道[EB/OL]. (2017-09-12) [2021-03-27]. <http://sputniknews.cn/economics/201709121023577186>.
- [8] 谢智东. 卫星通信系列讲座之三 Thuraya 和 ACeS 系统(上)[J]. 数字通信世界, 2007(5): 86-88.
- [9] 谢智东. 卫星通信系列讲座之三 Thuraya 和 ACeS 系统(下)[J]. 数字通信世界, 2007(6): 88-89.
- [10] 郭春启. 第四代 Inmarsat 系统的应用及新一代卫星通信系统简介[J]. 电视技术, 2014, 38(10): 101-104.
- [11] KUMAR R. Wideband Gapfiller Satellite (WGS) System [C]//2005 IEEE Aerospace Conference (IEEEAC), 2005: 1-8.
- [12] 李创业. 美军宽带全球系统及其关键技术[J]. 航天电子对抗, 2009, 25(6): 14-17.
- [13] 林飞. 美国“宽带全球卫星通信系统”[J]. 中国航天, 2013(12): 14-17.
- [14] WU W. Survey on the Development of Space-Integrated-Ground Information Network [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 25(6): 1-16.
- [15] 韩慧鹏. 国外高通量卫星发展概述[J]. 卫星与网络, 2018(8): 34-38.
- [16] 李小军. 面向卫星载荷的大瞬时带宽微波光子信道化接收变频技术研究进展[J]. 空间电子技术, 2020, 17(3): 81-87.
- [17] ANZALCHL J. Photonics in Next Generation Telecom Satellites Payload[C]. MWP 2018.
- [18] PIQUERAS M. 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]//ICOS, 2018.
- [19] 古月. 实践十三号/中星 16 号卫星[J]. 卫星应用, 2017(4): 55-58.
- [20] 蒋伟. 一种低相噪高线性度宽带微波光子直接下变频方法[J]. 真空电子技术, 2019(4): 27-32.
- [21] 王杨婧. 集成微波光子技术的现状及其宇航应用浅析[J]. 空间电子技术, 2020, 17(4): 52-59.