

基于微波光子的卫星通信载荷架构及关键技术

何元智¹, 尹浩¹, 谭庆贵², 文爱军³, 刘韵¹

(1. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100141; 2. 西安空间无线电技术研究所, 陕西西安 710000;
3. 西安电子科技大学, 陕西西安 710000)

摘要: 未来卫星通信正不断向多频段大带宽传输、多粒度柔性交换转发、宽带灵活空间高速组网的方向发展, 对卫星通信载荷的处理交换能力以及高速传输能力提出了更高的要求。传统的卫星通信系统通常采用微波技术进行信号的星上处理和转发, 在处理速度和传输带宽等方面存在的电子瓶颈, 使之难以在兼顾载荷重量、体积和功耗的前提下, 实现多频段、大带宽、多粒度、多通道的数据传输和高速率、大容量星间数据交互, 因而难以适应未来卫星通信需求。微波光子学融合了微波和光子两大技术, 具有工作频带宽、瞬时带宽大、无电磁干扰、接入灵活、体积小、重量轻等特点, 基于微波光子学的卫星通信载荷能够利用光学手段克服传统微波技术的电子瓶颈, 大幅度提高卫星通信系统的多频段、大带宽通信信号的传输与处理性能, 为卫星通信载荷的设计提供了新的思路。本文针对基于传统微波技术的卫星通信所存在的局限性, 探索未来新型微波光子卫星通信载荷架构, 提出了微波光子通信载荷系统构成和实现方案, 重点阐述了宽带光电/电光阵列转换模块、大瞬时带宽微波光子信道化单元及多尺度微波光子柔性交换模块的模块组成及功能结构; 在此基础上, 进一步研究了宽带低杂散微波光子变频、微波光子密集信道化及光交换矩阵等关键技术, 给出相应的解决方案, 同时为降低系统体积、重量、功耗, 提升系统稳定性, 探索了系统的芯片化、集成化技术的可借鉴性思路; 随后, 针对微波光子载荷的卫星通信载荷在未来卫星通信和空间信息网络中潜在的重要作用, 分析展望了基于微波光子载荷的卫星通信应用设想, 提出了本地数据处理转发、远距离数据传输转发、分布式星群内协作处理三种典型数据传输模式, 支持 Q/V、Ka、Ku 等多频段、多带宽、多通道、多业务的微波信号接收及发送, 以及高速率、大容量、远距离的激光链路数据交互; 最后, 对基于微波光子的卫星通信载荷技术的发展路线和有待解决的重难点问题进行了总结和展望, 为未来多频段一体化卫星通信载荷的设计和应用提供了重要理论参考和关键技术支撑。

关键词: 卫星通信载荷; 微波光子; 信道化; 交换转发

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)12-2945-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211196

Architecture and Key Technologies of Satellite Communication Payload Based on Microwave Photonics

HE Yuan-zhi¹, YIN Hao¹, TAN Qing-gui², WEN Ai-jun³, LIU Yun¹

(1. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China;

2. Xi'an Institute of SPACE Radio Technology, Xi'an, Shaanxi 710000, China;

3. Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: Satellite communication is developing towards the direction of multi-frequency and large bandwidth transmission, multi-granularity flexible switching and forwarding, broadband flexible space high-speed networking, which puts forward higher requirements for the processing and switching capacity, and high-speed transmission capacity of satellite communication payloads. Traditional satellite communication systems usually use microwave technology to process and forward signals on the satellite. There are electronic bottlenecks in processing speed and transmission bandwidth, which makes it difficult to achieve multi-frequency, large bandwidth, multi-granularity, multi-channel data transmission and high-speed, high-capacity inter-satellite data interaction under the premise of taking into account the load weight, volume and power consumption, so as to meet the needs of future satellite communications. Microwave photonics combines microwave and photon technologies, and has the characteristics of wide working frequency band, large instantaneous bandwidth, no electromagnetic interference, flexible access, small size, light weight, etc. Satellite communication payloads based on microwave

photonics can overcome the electronic bottleneck of traditional microwave technology by optical means, and greatly improve the transmission and processing performance of multi-frequency and large bandwidth communication signals of satellite communication systems. It provides a new idea for the design of satellite communication payload. Aiming at the limitations of satellite communication based on traditional microwave technology, this paper explores the new microwave photonic satellite communication payload architecture in the future, proposes the composition and implementation scheme of microwave photonic communication payload system, and focuses on the module composition and functional structure of broadband optical-electro/electro-optical array conversion module, large instantaneous bandwidth microwave photonics channelization unit, and multi-scale microwave photonics flexible switching module. On this basis, the key technologies such as broadband low stray microwave photonics frequency conversion, microwave photonics intensive channelization and optical switching matrix are further studied, and the corresponding solutions are proposed. At the same time, in order to reduce the system volume, weight, power consumption and improve the system stability, the referential ideas of the chip and integration technologies of the system are explored. Then, in view of the potential important role of satellite communication payloads of microwave photonic payloads in future satellite communications and space information networks, this paper analyzes and prospects the application scenarios of satellite communications based on microwave photonics payloads, and proposes three typical data transmission modes, namely local data processing and forwarding, remote data transmission and forwarding, and collaborative processing within distributed satellite clusters, which support Q/V, Ka, Ku and other multi-frequency, multi-bandwidth, multi-channel multi-service microwave signal reception and transmission, and high-speed, high-capacity, long-distance laser link data interaction. Finally, the development route and key problems to be solved of satellite communication payload technology based on microwave photonics are summarized and prospected, which provides important theoretical reference and key technical support for the design and application of future multi-frequency integrated satellite communication payloads.

Key words: satellite communications; microwave photonics; channelization; switching and forwarding

1 引言

卫星通信作为通信系统的重要组成部分,具有覆盖范围广和不受地理条件限制等优势,可以实现大地域通信组网和灵活的全球覆盖,是通信领域不可或缺的重要组成部分。随着信息技术和航天技术的快速发展,未来卫星通信正不断向宽带高速传输、多粒度柔性交换转发、宽带灵活空间组网的方向发展,瞬时处理带宽从 2 Hz 向 5 GHz 发展,模拟子信道带宽为 500 MHz,数字处理带宽为几兆赫兹,阵列规模达到上百路,对星上传输能力以及组网交换能力提出了更高的要求^[1]。传统的卫星通信系统通常采用微波技术进行信号的星上处理和转发,受到微波器件性能的限制,难以在兼顾载荷重量、体积和功耗的前提下,实现多频段、大带宽、多粒度、多通道的数据传输和高速率、大容量星间数据交互。因此,需要开展卫星通信载荷新技术研究,提高载荷星上处理能力和星间通信性能,同时满足现有卫星平台的承载能力要求。

微波光子学融合了微波和光子两大技术,具有工作频带宽、瞬时带宽大、无电磁干扰、接入灵活、体积小、重量轻等特点,基于微波光子学的卫星通信载荷能够利用光学手段克服传统微波技术在处理速度和传输带宽等方面的电子瓶颈,大幅度提高卫星通信系统的高频段、大带宽通信信号的传输与处理性能,为卫星通信载荷的设计提供了新的思路^[1-7]。近年来,国内外研究机构广泛开展了微波光子卫星通信载荷的相关研

究。2002年起,欧洲航天局开始了基于微波光子技术的星载交叉互联技术研究,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,完成了微波信号光域传输、光域交换、光域滤波和光域变频等功能的验证^[8-10]。2019年6月21日,搭载着微波光子载荷的EUTELSAT 7C卫星成功发射,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^[11]。Airbus公司提出了基于微波光子技术的高通量通信卫星载荷结构,可实现大规模路由以及Ku、Ka和V频段的多路信号处理转发。2019年,该公司宣称通过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。此外,美国航空航天局、国防部、海军实验室、洛克希德·马丁公司等单位以及国内外学术团体在微波光子关键技术及其在卫星载荷系统中的应用亦开展了深入且卓有成效的研究工作^[12-25]。可见,微波光子技术在空间信息通信领域的应用已成为研究热点和重要发展方向,亟需开展基于微波光子的卫星通信载荷架构设计以及相关关键技术研究验证。

本文第1节针对现有卫星通信需求和存在的瓶颈问题,阐述微波光子卫星通信的优势及应用构想,介绍国内外微波光子星载系统的研究现状,阐明开展基于微波光子的卫星通信载荷架构研究的必要性;第2节系统性介绍卫星通信微波光子载荷的架构体系,重点阐

述宽带光电/电光阵列转换单元、大瞬时带宽微波光子信道化单元及光交换转发单元的模块组成及功能;第3节针对系统重要模块,分析所需的关键技术并提出对应的解决方案,主要包含宽带低杂散微波光子变频技术、微波光子信道化技术及光交换转发技术,同时为降低系统体积、重量、功耗,提升系统稳定性,探索了系统的芯片化、集成化技术的可借鉴性思路;第4节展望了微波光子卫星通信载荷在未来空间信息网络中的应用模式,提出了本地数据处理转发、远距离数据传输转

发、分布式星群群内协作处理三种典型数据传输模式;第5节针对微波光子卫星通信载荷及其应用进行了总结和展望.

2 微波光子通信载荷架构

2.1 卫星通信微波光子载荷方案

基于微波光子的卫星通信载荷架构如图1所示,主要由收发天线单元和光域信号处理交换单元两部分构成.

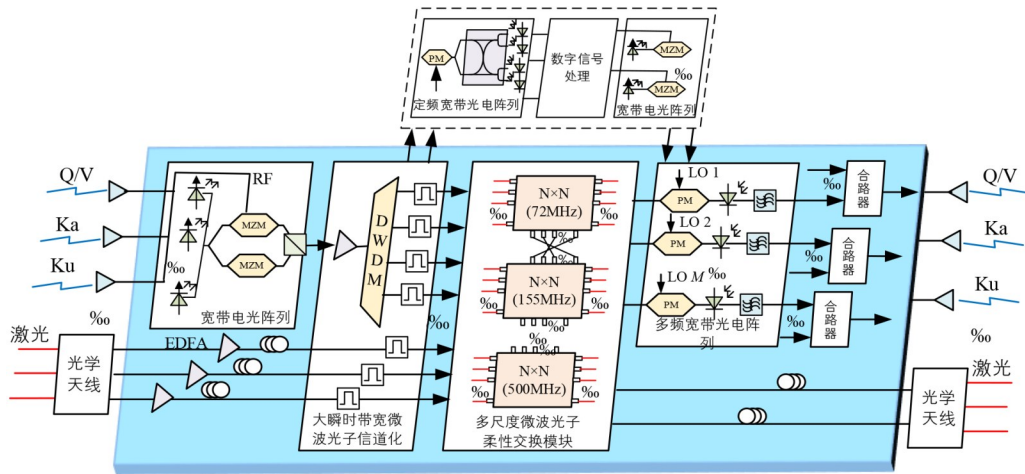


图1 卫星通信微波光子载荷架构示意图

收发天线单元包括多频段微波天线和光学天线阵列两部分.多频段微波天线支持Q/V、Ka和Ku等频段微波信号的接收和发送,光学天线阵列支持多路激光信号的接收和发送.

光域信号处理交换单元由宽带光电/电光阵列、大瞬时带宽微波光子信道化模块、多尺度微波光子柔性交换模块、合路器等组成.多频段微波天线接收到的多路不同频段(Ku、Ka、Q/V)微波信号进入宽带电光阵列,由电光调制器调制到光频梳上,完成多路不同频段微波信号的一体化电光调制,每个光频梳上分别携带各频段的微波信号.大瞬时带宽微波光子信道化模块针对电光调制后一体化光域信号实现可变带宽的信道划分,以及高Q值滤波和线性化功率放大.信道化形成的子信道包括72 MHz、155 MHz、300 MHz、500 MHz和1 GHz等多种带宽,能够适应Ku、Ka、Q/V不同频段不同类型业务的交换粒度需求.其中,Ku波段对应光域信号主要划分为72 MHz、155 MHz子信道,Ka波段可划分为72 MHz、155 MHz、300 MHz子信道,Q/V波段则主要划分为155 MHz、300 MHz、500 MHz和1 GHz子信道,每个光信号均承载有不同带宽的数据信息.多尺度微波光子柔性交换转发模块完成多路不同带宽光信号的可变粒度宽带交换.多频宽带电光阵列模块用于实现光

交换后的多路光信号向多路不同频段微波射频信号的下变频;耦合器工作在电域,分别将多路不同频段的射频微波信号合并,随后输出至多频段微波天线.此外,考虑到卫星通信业务具有不同粒度的星上交换处理需求,当存在粒度小于72 MHz的业务,可以在微波光子载荷中配置有数字信号处理模块,通过定频宽带电光阵列将信道化后的光信号下变频至中频信号,进而在电域进行数据处理,随后利用宽带电光阵列调制到光域,输入光合路器与光域处理的信号共同进行合路及后续处理转发.

来自星地上行链路的多路不同频段微波信号经由宽带电光阵列调制模块调制到光域后,与来自星间链路的多路激光信号共同输入至大瞬时带宽微波光子信道化模块,通过信道划分形成多路光信号,输入至多尺度微波光子柔性交换转发模块进行光交换,完成光交换的多路光信号按需分为光域输出和微波输出两类.光域输出的信号直接传输至光学天线阵列进行星间激光传输;需要微波输出的信号则通过多频宽带电光阵列模块下变频至射频频段,通过多频段微波天线进行星地下行链路传输.

2.2 系统组成及功能

2.2.1 宽带电光/光电转换模块

宽带电光/光电转换一方面要将Q/V、Ka和Ku等多

个频段的微波信号转换到光域,另一方面还要将星上处理后的光域微波信号变回微波信号.当前,微波光子电光转换主要分为串联调制器和并联调制器的两种结构.串联调制器结构采用两个外调制器分别调制射频与本振信号,可灵活地进行分布式部署,尤其适用于需要对光域微波信号进行处理的应用场景.并联调制器结构中,射频与本振信号在同一位置加载,扩展性相对较差,不能灵活地进行分布式部署.本文采用串联调制器结构进行电光/光电转换,以满足星载通信载荷分布式灵活配置、微波光子信号星上处理的应用需求.

本文中,宽带电光/光电转换模块主要包括宽带电光转换模块、定频宽带光电转换模块和多频宽带光电转换模块,分别用于多频段射频微波信号向光信号的调制,以及光信号向中频微波信号和多频段射频微波信号的下变频.多频段电光信号调制时,最重要的是要抑制杂散,实现高线性,通过光电探测器(PhotoDetector, PD)直接探测的手段实现下变频.当光信号向中频信号下变频时,将产生频谱混叠,即发生镜像干扰问题,通常采用基于光子滤波器或正交变频的方式实现下变频镜像抑制.然而,基于光子滤波器的下变频存在中频较高问题,正交变频则严重依赖大带宽电器件的性能,因此,采用基于偏振复用调制器(Polarization Division Multiplexing-Mach-Zehnder Modulator, PDM-MZM)和光90°耦合器(Quadrature Optical Hybrid, QOH)的方式进行镜像抑制^[26].

综上,本文采用的双偏振低杂散可灵活调谐一次变频方案如图2所示.其中,(I)为宽带电光转换方案;(II)为射频镜像抑制下变频方案;(III)为中频上/下变频方案.

激光器和偏振复用调制器(PDM-MZM)连接,射频信号(Radio Frequency, RF)加载在子调制器X-MZM的射频驱动端口,X-MZM工作在最小偏置点,产生抑制载波双边带调制信号,频谱如a点所示.子调制器Y-MZM偏置在最大点,不加载射频信号,输出只有光载波,频谱如b点所示.PDM-MZM输出的偏振复用信号经过相位调制器(Phase Modulator, PM),本振信号(Local Oscillator, LO)加载在PM的射频输入端口,对只包含光载波的一个偏振态光进行调制,另一个偏振态的光信号经过PM不被调制,频谱如c点所示,PM输出的信号为正交偏振复用信号.在向射频进行镜像抑制下变频时,先用光滤波器滤出射频和本振信号的正一阶边带,随后通过偏振控制器(Polarization Controller, PC)调整偏振态对准偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)的主轴,将射频和本振信号分开为2个偏振态,分别输入到光90°耦合器(QOH)的2个输入端,光耦合器的4个输出端(I1/I2, Q1/Q2)分别输入平衡探测器(Balanced PhotoDetector, BPD)进行光电平衡探测消除二阶交调.光电探测后的2路中频信号经过模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)进行采样,然后在数字域进行镜像抑制及IQ幅度和相位不平衡的补偿,提高系统的镜像抑制比,生成的中频信号频谱如e点所示.在向中频进行上/下变频时,偏振复用光经过偏振控制器PC,使其中一个偏振态的主轴与起偏器Pol的主轴夹角为45°,正交偏振的光信号被合为一个偏振态的光,频谱如d点所示.此时信号主要包含光载波、一阶射频边带、一阶本振边带,进入光电探测器(PD)拍频后,即可生成所需的中频或射频信号,频谱如f点所示.

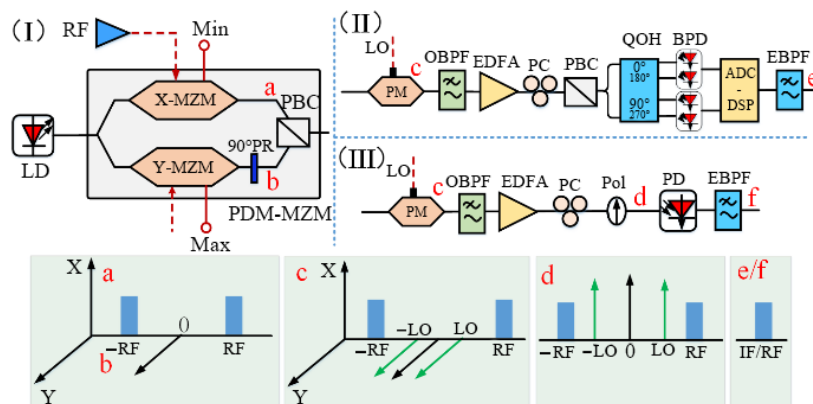


图2 宽带光电/电光转换方案

2.2.2 微波光子信道化单元

信道化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,星载

微波光子信道化单元需具备产生72 MHz、155 MHz、300 MHz、500 MHz和1 GHz等多种带宽子通道的能力,以满足星上多粒度交换需求.微波光子的信道化方案主要包括基于自由空间光学的信道化、基于光滤波器

组的信道化、基于光频梳和周期光滤波器的信道化和基于双光频梳的相干微波光子信道化等。早期的微波光子信道化通常基于自由空间光学原理,利用衍射光栅、色散器、菲涅尔透镜等不同的分光手段,实现微波光子信号的信道化^[27]。基于自由空间光学的信道化方案支持较多信道的信道化,但其接收机体积相对较大,系统损耗相对较高。在基于光滤波器组的微波光子信道化方案中,微波光子信号经过光分路器分为多路,每一路分别利用中心频率不同、带宽相同的光滤波器来实现信道的划分^[28]。该信道化方案易于实现,但其性能严重依赖光滤波器的滤波性能,因此难以实现高隔离度的信道划分。此外,方案所需光滤波器的数量与信道数相等,随着信道数的增大,信道化模块的体积和重量将不断增加。基于光频梳和周期光滤波器的微波光子信道化方案是对基于光滤波器组的微波光子信道化方案的改进,该方案利用光频梳的梳线和周期光滤波器通带频率间隔的差异,使用FP腔周期光滤波器、法布里珀罗标准具、串联耦合非对称双环谐振器滤波器等,分别滤出每条频梳上射频信号光边带中的不同频率成分,并通过波分解复用器最终实现微波光子信道划分^[29,30]。基于光频梳和周期光滤波器的微波光子信道化接收机极大程度地减小了系统的体积与重量,然而由于周期光滤波器性能的限制,该方案信道间的隔离度有限。基于双光频梳的微波光子信道化方案信道隔离程度高,但大间隔、多梳线的光频梳产生技术严重限制了该信道化方案的工作频段与信道个数^[31,32]。

针对基于周期光滤波的信道化接收技术存在的通道间隔度差的问题,及双光梳的方案存在工作频段调谐性差、大间隔多梳线光梳生成困难的问题,本文采用多波长两级复用信道化处理方案,利用多波长提升载波质量,利用两级复用提高通道数,独立本振提高系统调谐性,方案原理图如图3所示。其中,a为射频信号调制到光频梳后的频谱图;b为完成信道化后各光信道的频谱图。以3 GHz宽带微波信号划分为42个72 MHz光域密集子信道的场景为例,微波光子信道化模块利用7个激光器输出等间隔的载波光梳,宽带射频信号经过电光调制器X-MZM对7路载波光梳进行调制,X-MZM工作在最小点,进行射频信号的抑制载波的双边带调制,Y-MZM空载,工作在最大点。采用2个MZM偏压控制板稳定偏压,之后通过光耦合器OC进行6路射频边带复制进入6个波分复用器(Wave Division Multiplex, WDM),每个WDM被划分为7个子通道,每一个通道只包含一个偏振复用的单载波及调制的RF信号,各通道互不重叠。

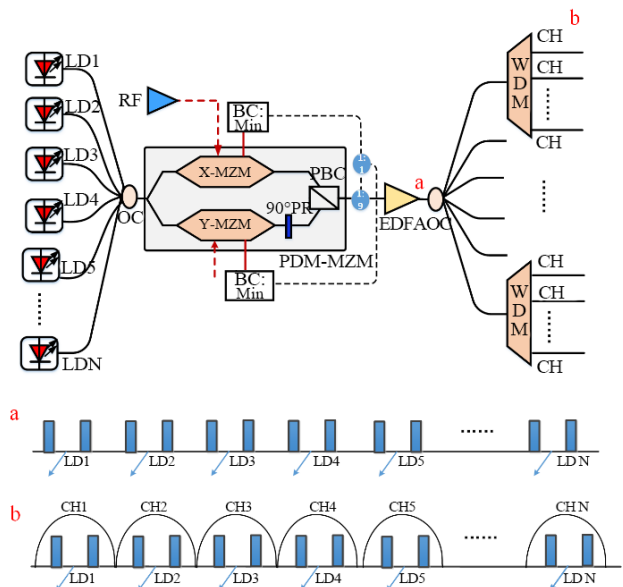


图3 微波光子信道化方案原理图

2.2.3 微波光子交换模块

当前,微波光子光交换主要采用空分和波分等光路交换类型,以及由这些交换组合而成的结合型。其中空分交换矩阵根据开关所使用的技术又分成两类:一类是基于波导技术的波导空分^[33],另一类是使用自由空间光传播技术的自由空分光交换^[34-36]。自由空分光交换实现方式包括微机电技术(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)、硅基液晶技术(Liquid Crystal On Silicon, LCOS)等多种类型光交换矩阵。这些光交换矩阵具有光插损小、交换规模可扩展性强等优势,非常适合应用于微波光子光交换。对于大规模光波导空分光交换矩阵,需要多级光波导级联,存在光损耗和通道串扰等问题。波分光交换矩阵采用光电材料实现波束的选路控制,存在损耗和串扰比较严重、对电漂移较敏感等问题。

本文所述的微波光子交换模块主要利用光交换矩阵技术来实现多路微波光子信号的星上大容量多尺度交换转发,支持包括72 MHz、155 MHz、300 MHz、500 MHz和1 GHz等多种带宽在内的数据信息的高速全光交换。微波信号在调制到光域并完成信道化后输送入光交换转发单元,可以通过光通路由方式被路由到任意一个输出端口或同时发送到所有输出端口,某一个光通道中的光信号还可以通过波长交换方式被交换不同输出端口上去,从而实现多频段、多带宽、多格式的多路微波信号的自由交换,而且这种交换是多尺度、柔性可控的。多尺度微波光子柔性交换模块的组成及连接关系如图4所示。

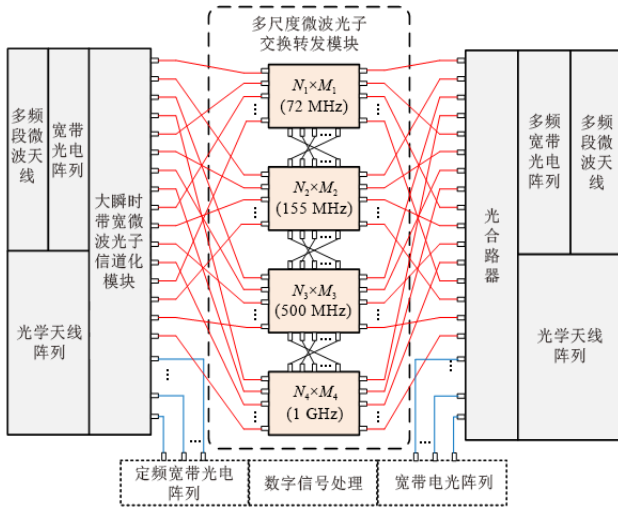


图4 多尺度微波光子柔性交换模块组成及连接关系示意图

3 关键技术及解决方案

3.1 低杂散微波光子变频技术

宽带微波信号电光/光电转换是微波光子通信载荷的首要环节,而微波光子变频技术是实现电光/光电转换的核心.本文采用双偏振低杂散可灵活调谐一次变频技术实现微波光子变频,可实现多频段、大带宽信号的多通道全光变频,基于偏振复用技术,变频杂散少,本振可灵活调谐,只需要一次变频即可实现射频信号的任意变频.

方案中,经过电光转换的信号表示为

$$E_u(t) = \frac{\sqrt{2} E_{in}(t)}{4} \cdot \begin{bmatrix} J_1(m_{RF})e^{j\omega_{RF}t} - J_1(m_{RF})e^{-j\omega_{RF}t} \\ +J_0(m_{LO}) + J_1(m_{LO})e^{j\omega_{LO}t} \\ -J_1(m_{LO})e^{-j\omega_{LO}t} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $E_{in}(t)$ 为光载波; m_{RF} 和 m_{LO} 分别为射频信号和本振信号的调制指数; ω_{RF} 和 ω_{LO} 分别为射频信号和本振信号的角频率.

在下变频过程中,由于方案中采用相位调制器对本振进行调制,而光电探测器为强度检测器件,不会通过拍频得到本振信号,因此本振的隔离度较大、杂散较小.

中频上/下变频方案中,光电探测后得到的微波信号电流为

$$I(t) \propto \eta E_0^2 \{ \cos[(\omega_{RF} - \omega_{LO})t] + \cos[(\omega_{RF} + \omega_{LO})t] \} \quad (2)$$

其中, η 为光电探测器转换效率, E_0 为光载波幅度, t 为时间.可以看出,拍频所得到的信号只有所需的上变频或者下变频信号.

射频镜像抑制下变频方案中, BPD 输出的 IQ 两路光电流分别为

$$I_1(t) \propto \frac{\pi^2 E_0^2 V_{LO} V_{IF}}{2V_\pi^2} \cos(2\pi\omega_{IF}t) \quad (3)$$

$$I_Q(t) \propto \frac{\pi^2 E_0^2 V_{LO} V_{IF}}{2V_\pi^2} \cos\left(2\pi\omega_{IF}t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

其中, V_π 为调制器的半波电压; $\omega_{IF} = \omega_{RF} - \omega_{LO}$ 为中频信号频率; V_{LO} 和 V_{IF} 为中频信号和本振信号电压.最终输出相位正交的中频信号,实现了微波光子 I/Q 下变频.

为了验证本方案的变频性能,分别对变频增益、杂散抑制能力、无杂散动态范围 (Spurious Free Dynamic Range, SFDR) 和镜像抑制率进行仿真测试.

根据图 2 的结构图进行仿真,系统关键参数如下:激光器的输出功率为 15.5 dBm,调制器的插入插损为 6 dB,调制器的消光比为 30 dB,光放大器的噪声系数为 4.5,其工作在自动功率控制 (Automatic Power Control, APC) 模式,输出光功率为 5 dBm,光电探测器的响应度为 0.8 A/W. 设置射频信号频率为 30 GHz,输出功率为 -30 dBm,本振信号频率为 29 GHz,输出功率为 8 dBm. 通过仿真得到射频下变频系统的增益测试结果如图 5 所示,其中输出的中频频率为 1 GHz,功率为 -37.79 dBm,中频信号功率和输入射频信号的功率比值,即变频系统的增益为 -7.79 dB.

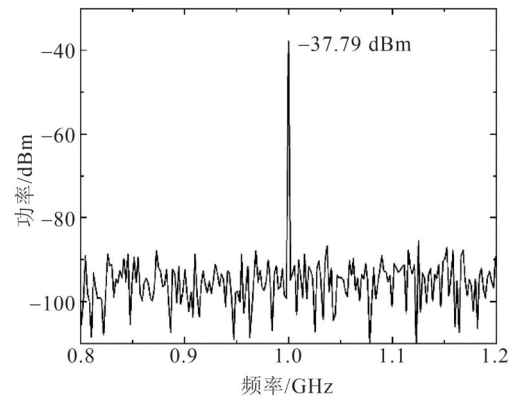


图5 变频增益性能仿真图

进一步仿真测量系统的杂散抑制能力,将杂散抑制能力定义为系统输入双音信号时,输出的中频功率和三阶交调功率的比值,设置双音射频信号频率为 30 GHz 和 30.1 GHz,本振频率为 29 GHz,中频频率为 1 GHz 和 1.1 GHz,三阶项频率为 0.9 GHz 和 1.2 GHz,测得三阶交调抑制比为 52.32 dB,结果如图 6 所示.

变频系统的无杂散动态范围仿真结果如图 7 所示. SFDR 的定义为当系统输入双音信号时,逐渐增大信号的功率,当对应输出的中频信号功率与三阶交调功率均等于噪声功率时的输入功率差值. 设置双音信号频率为 30 GHz 和 30.1 GHz,图 7 中给出了 10 MHz 噪声底下的结果为 58.08 dB,经过计算在 1 Hz 噪声底下的系统 SFDR 为 104.75 dB·Hz^{2/3}.

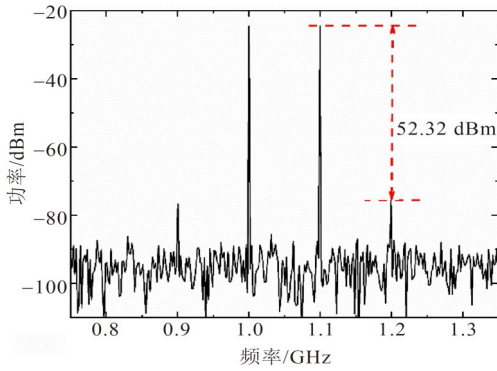


图6 变频杂散抑制性能仿真图

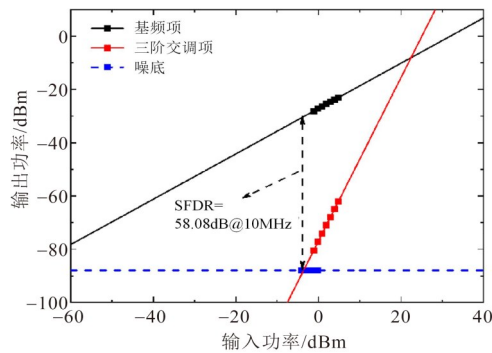


图7 变频SFDR性能仿真图

镜像抑制性能如图8所示,可以看出镜像抑制比达到了51 dB.

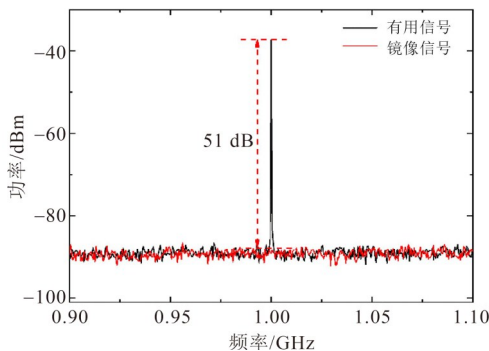


图8 变频镜像抑制性能仿真图

3.2 微波光子密集信道化技术

由于在基于光频梳的信道化方案中,子信道数量完全取决于光频梳的梳齿数量,信道化接收机的稳定性与光频梳的稳定性直接相关,因此,要求用于信道化接收的光频梳具有梳齿数量多、平坦度高、长时间工作稳定性好等特点,对于目前光频梳的生成技术而言仍存在诸多困难.基于多波长两级复用微波光子密集信道化技术,利用多波长提升载波质量及系统工作频段,利用两级复用提高系统工作带宽及通道数,可以实现较小粒度的密集信道划分转发;相比于多级变频实现信道化的结构,本文采用的信道化方案结构简单,调制

器的工作点可以通过偏压板控制,系统稳定性更高,同时,利用可调谐的本振可以通过一次变频实现信道化.

为了验证系统的密集信道化能力,对信道间增益起伏和隔离度指标进行仿真测试.利用基于多波长两级复用微波光子密集信道化技术,将5~6 GHz内1 GHz的信号划分为14个72 MHz的子信道,得到14个子信道上变频后的频率及其对应的功率值,如表1所示.

表1 信道间增益起伏测量结果

频率/GHz	功率/dBm	频率/GHz	功率/dBm
6	-46.71	13	-46.72
7	-46.70	14	-46.70
8	-46.68	15	-46.76
9	-46.78	16	-46.74
10	-46.81	17	-46.76
11	-46.72	18	-46.79
12	-46.72	19	-46.70

可以得到,各信道间的最大幅度不平坦度为-46.68-(-46.81)=0.13 dB.

进一步验证隔离度指标.设置系统中只有第1信道有信号输入,且信号为2.027 GHz单音射频信号,截取前4个通道中频滤波后的输出结果,如图9所示,其中,信道1信号功率-46.63 dBm,其他信道噪声功率约为-90 dBm,信道隔离度为43.37 dB.

3.3 光交换矩阵技术

在多种空分光交换矩阵技术中,MEMS光交换矩阵继承了硅基单片集成技术的小型化、大规模、强扩展能力的优点,可实现灵活可变的大容量光交换.目前,MEMS光交换矩阵可实现64×64规模,开关切换时间达到5 ms,光功率通道插损小于2 dB,抗震能力达到6 g.要想实现更大规模,如128×128和256×256规模,需要多个小规模MEMS光交换矩阵(64×64)级联形成,对光路结构布局、光纤熔接和波束逻辑控制等方面提出了更高的要求.首先要对MEMS光交换矩阵结构和光路布局进行优化设计,优化盘纤工艺,尽量避免多光纤交叉,降低通道光功率插损,提升高交换速率,降低MEMS光交换矩阵的体积和重量.其次,随着光交换规模增加,采用光纤数量成倍增加,这需要对光纤熔接的通道的光插损、接口可靠性等熔接质量进行严格控制,满足MEMS光交换的一致性、光功率损耗、使用寿命等性能需求.随着MEMS光交换规模的增加,光交换转发的逻辑控制更加复杂,需要优化程序逻辑和电源设计,降低硬件复杂度和功耗.最后为了使MEMS光交换矩阵应用于空间环境,需要采用震动隔离等技术方案,提升MEMS光交换矩阵空间环境适应性.

LCOS光交换矩阵由CMOS硅基电路背板和液晶光学元件组成的混合光电芯片构成,利用液晶材料的电

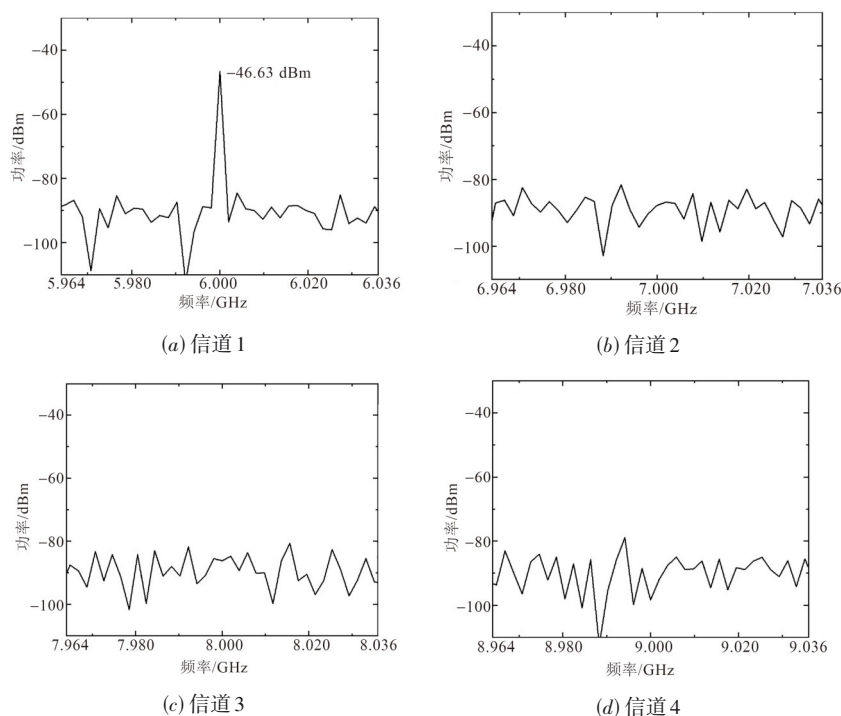


图9 密集信道化隔离度仿真结果

光效应构建液晶阵列对光束进行偏转控制. LCOS器件具备可编程特性,通道速率、通道间隔灵活可调,支持各通道中光信号的独立动态调节,因此具有良好的通带调谐灵活性与兼容性. LCOS光交换矩阵实现方式主要有两种:一种是采用液晶相位控制阵列形成微透镜对波束进行偏转控制,另一种是采用液晶阵列形成液晶光栅对波束进行控制. 两种方式都需要对液晶阵列加电控制以实现波束的偏转,由于存在阵列电极加工精度、电压控制精度、电光响应精度等因素的影响,LCOS光交换矩阵还存在通道串扰和功率损耗等技术难题. 此外,液晶响应时间、衍射效率和瞬时相位稳定性等也是需要考虑的技术问题.

3.4 芯片化、集成化技术

光子集成芯片可以把各种功能器件集成到同一片上,在单片上实现更大带宽、更多功能,如激光器、高阶信号调制、全光波长转换、光开关阵列、光控波束形成网络等功能,极大降低系统复杂度、体积、能耗及成本,同时集成化、小型化的微波光子器件更能满足大规模阵列化应用需求,这对微波光子卫星通信的发展具有重要意义. 第一,由于光子集成芯片往往具有极小几何尺寸的波导等结构,可以将光场限制在很小的范围内,从而增强光与物质的相互作用;第二,受益于该极小尺寸波导结构,光子集成芯片中的非线性过程受到的外界干扰将降低,增加了非线性过程的稳定性;第三,特殊机构如微环谐振腔的实现则可以进一步增强光与物

质的相互作用从而降低非线性效应的功率阈值;第四,利用光电混合集成技术可以实现光器件与电器件的混合集成,充分发挥光器件和电器件各自优势,从而实现更丰富、更复杂的功能.

目前磷化铟(InP)是最为常见的微波光子集成材料,其能使各种有源、无源组件实现单片集成,包括激光器、调制器、光放大器和光电探测器等;然而由于其光波导具有相对较高的损耗(1.5~3 dB/cm),因此在系统级别的集成中,往往采用异质集成的方式. 氮化硅(Si_3N_4)材料具有超低的传播损耗(0.01~0.2 dB/cm)以及相对紧凑的集成特性(弯曲半径50~150 μm). 同时双光子吸收和自由载流子吸收的缺失使它成为微谐振器频率梳的选择材料. 但是这种无源材料无法完成激光器、调制器和探测器等有源器件的设计制造. 因此将 Si_3N_4 和InP异质集成的方式,是目前微波光子系统级集成的重要方向之一.

另一种微波光子系统级集成方式则是基于硅基光子学的集成技术. 绝缘体上的硅波导表现出宽范围的损耗(0.1~3 dB/cm)和最小弯曲半径(5~10 μm),具体取决于硅层的厚度(“薄”约为220 nm,“厚”约为3 μm)和波导的几何形状(条或肋). 可以看出,硅集成的尺寸将远小于 Si_3N_4 与InP的异质集成方案. 同时硅光子可与微电子CMOS制造工艺兼容,使电子-光子共集成成为可能. 另外,硅有很强的三阶光学非线性,在超快信号处理方面具有潜在的应用价值,但同时也有可能遭受

高非线性的损失. 严格来讲,对于光源、光调制器和光电探测器而言,硅属于不良材料,但是通过掺杂技术,已经实现了高速调制器和光电探测器,这也为基于硅光子的系统级集成提供了必要的技术支撑.

3.5 微波光子技术空间环境适应性

激光通信、光纤陀螺和光总线已在卫星中大量工程应用,其中包括微波光子系统中激光器、探测器、调制器和光纤等基础光学器件,这些光学器件的空间环境适应性已得到很好的验证. 随着光电集成技术的发展,集成化微波光子模块可能包括多种材料芯片和多种类型的波导连接器,这要综合考虑空间环境适应性需求,从模块设计、芯片研制和集成封装等各个研制环节考虑微波光子技术空间环境适应性问题.

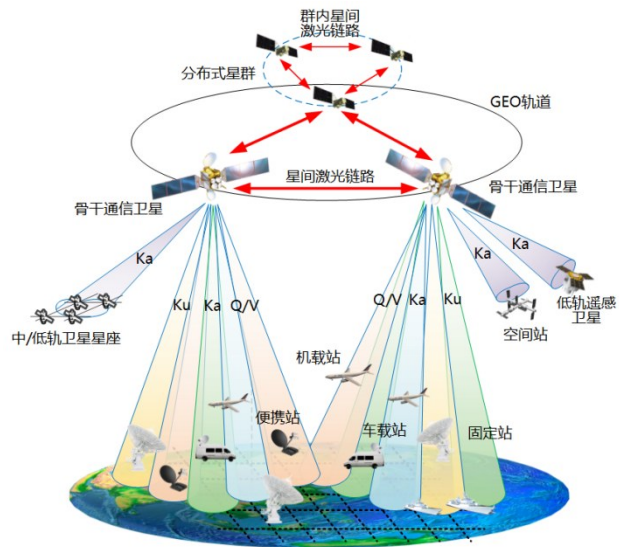
4 应用设想

基于微波光子载荷的卫星通信载荷具有支持带宽大、处理转发能力强、体积小、重量轻等优势,能够在未来卫星通信和空间信息网络中发挥重要作用. 图 10 所示为基于微波光子载荷的卫星通信应用设想,其中图 10(a)为微波光子卫星通信载荷的应用场景,图 10(b)为各载荷的连接关系. 可以看出,位于 GEO 轨道的骨干通信卫星和分布式星群卫星搭载微波光子卫星通信载荷,上下行提供 Q/V、Ka、Ku 等多频段、多带宽微波通信链路,支持包括固定站、便携站、机载站、车载站、中低轨卫星星座、地球空间站、气象遥感卫星等用户各类业务的多频段、多通道微波信号接收及发送,星间及分布式星群内部采用星间激光链路实现高速率、大容量、远距离的星间数据交互.

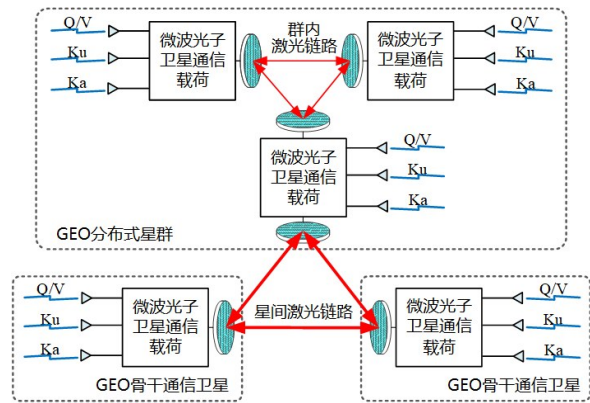
基于微波光子载荷的卫星通信应用场景按照业务信息走向划分,主要包括本地数据处理转发、远距离数据传输转发、分布式星群群内协作处理三种数据传输模式.

本地数据处理转发模式中,通信卫星仅需在本地对用户节点的业务信息进行交换即可通过下行链路完成数据转发,信息传输流程为“用户(微波)—卫星(微波)—用户”,即骨干通信卫星或分布式星群利用多频段微波天线接收来自各类用户节点的上行业务信息,通过星上多尺度微波光子交换转换为目标频段的微波信号,进而经由下行微波链路转发到相应的用户节点. 上述过程中,微波光子技术的使用有效克服了传统微波系统在处理速度和传输带宽等方面的电子瓶颈,大幅度提高卫星通信系统高频段、大带宽通信能力. 此外,随着星地激光通信技术的成熟,微波光子载荷能够直接兼容与用户之间的激光通信,适应未来星地大容量数据的传输需求.

远距离数据传输转发模式中,用户节点的业务信



(a) 应用场景



(b) 连接关系

图 10 卫星通信微波光子载荷应用设想示意图

息需要经过多颗通信卫星的中继以完成数据转发,信息传输流程为“用户(微波)—卫星(激光)—卫星(微波)—用户”,即骨干通信卫星或分布式星群接收到的上行业务信息在完成星上多尺度微波光子交换后被按需调制到光域,进而通过星间激光链路传输到目的通信卫星,目的通信卫星搭载的微波光子载荷对来自光学天线阵列的数据信息进行交换,将需要下行传输的业务信息下变频至微波频段,随后经由下行微波链路转发到相应的用户节点. 上述过程中,微波光子技术的使用能够实现星上按需多尺度灵活交换,并进一步支持星间激光通信和空间组网,有效提高骨干通信卫星的高速星间组网和数据传输能力.

分布式星群群内协作处理模式中,分布式星群卫星节点分别搭载有不同功能模块,共同实现星群的数据处理,信息传输流程为“用户/卫星(微波/激光)—星群卫星(激光)—星群卫星(微波/激光)—用户/卫星”,

当星群接收到来自用户节点的上行业务信息或来自其他通信卫星的中继信息后,星群卫星利用群内激光链路进行控制信息和数据信息在星群内部的交互,从而实现业务信息的群内协作处理,并根据信息的后续流向通过微波天线或光学天线阵列完成数据传输.上述过程中,微波光子载荷体积小、重量轻的优势能够充分适应分布式星群小卫星节点承载能力较弱的特点,从而提高分布式星群卫星的数据处理能力,此外,来自不同类型用户节点的多频段微波信号能够直接利用微波光子技术转换到光域,通过群内激光网络进行分布式信息处理,兼顾了星群内部信息的光域交互需求.

5 结论与展望

未来的卫星通信载荷将朝着多频段融合、多波束、大有效带宽、灵活重构方向发展.微波光子结合了传统微波和光子学技术特点,能够利用光子技术大带宽、低损耗、宽带处理能力强、抗电磁干扰等优势,实现微波信号高质量的接收、信道化变频、交换转发等.将微波光子技术应用于卫星有效载荷,能够有望构建一个多频段一体化的射频前端,实现单端口、工作频段可在轨设置的通用一体化系统,解决现频段调谐和带宽局限难题.除此之外,微波光子技术还具有体积小、重量轻、能耗小、抗电磁干扰的优势,可简化卫星系统并提高转发性能.虽然微波光子技术有诸多优势,但是基于分立器件的微波光子模块与传统芯片化射微波模块相比在体积、重量和功耗方面没有优势,对于星载应用必须走芯片化、集成化和阵列化发展路线;由于卫星接收微波信号功率低,与地面系统相比,更需要优化微波光子链路的插损、噪声系数和动态范围;对于温度、辐照等空间特殊环境,需要解决集成化微波光子模块的温度稳定性和抗辐照加固等难题.近二十年来,微波光子技术从理论到实验,从单一技术到系统融合,在基础理论的推动以及需求的牵引下逐渐成熟,基于微波光子技术的卫星通信有效载荷解决方案逐渐明朗.多通道低杂散变频、高密度信道化、柔性交换转发等关键技术逐渐走向成熟,能够为先进微波光子卫星通信有效载荷提供技术支撑.随着光电子集成技术的发展,基于Si、Si₃N₄和InP的微波光子集成系统成为可能,因此未来基于微波光子的卫星通信载荷能够进一步降低系统尺寸、功耗、重量,并提高系统稳定性,从而为其星上搭载应用铺平道路.在新一代卫星通信系统中,微波光子技术将被广泛应用于多频段、大带宽星上数据处理与宽带传输,并支持星间激光通信由点对点传输向空间激光组网方向不断发展,相信微波光子技术将在新一代卫星载荷系统中发挥重要作用.

参考文献

- [1] YAO J P. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [2] CAPMANY J, MORA J, GASULLA I, et al. Microwave photonic signal processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 571-586.
- [3] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
- [4] 谭庆贵, 蒋炜, 梁栋. 微波光子技术及应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019.
TAN Q G, JIANG W, LIANG D. Microwave Photon Technology and its Application[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2019. (in Chinese)
- [5] 吴昊, 王帅, 邓献策, 等. 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[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(2): 2-10.
WU H, WANG S, DENG X C, et al. Development status and trend of satellite-borne switching technology oriented to space-earth integrated information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(2): 2-10. (in Chinese)
- [6] 董洪建, 蒋炜. 基于微波光子技术的高通量卫星研究进展[J]. 空间电子技术, 2021, 18(2): 1-8.
DONG H J, JIANG W. Research progress of high-throughput satellite based on microwave photon technology[J]. Space Electronic Technology, 2021, 18(2): 1-8. (in Chinese)
- [7] 李小军, 蒋炜, 和新阳, 等. 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.
LI X J, JIANG W, HE X Y, et al. Research progress of large instantaneous bandwidth microwave photon channelized receiving frequency conversion technology for satellite load[J]. Space Electronic Technology, 2020, 17(3): 81-87. (in Chinese)
- [8] PAN S L, ZHU D, LIU S F, et al. Satellite payloads pay off [J]. IEEE Microwave Magazine, 2015, 16(8): 61-73.
- [9] 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): 1984.
- [10] SOTOM M, BENAZET B, LE KERNEC A, et al. Microwave photonic technologies for flexible satellite telecom payloads[C]//2009 35th European Conference on Optical Communication. Vienna: IEEE, 2009: 1-4.
- [11] 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]//Proceedings Volume 11180, International Conference on Space Optics—ICSO 2018. Chania: SPIE, 2019: 1796-1804.
- [12] BUXTON B, VAHLIDIECK R. Noise and intermodulation distortion reduction in an optical feedforward transmitter[C]//1994 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(Cat. No. 94CH3389-4). San Diego: IEEE, 1994: 1105-1108.
- [13] ISMAIL T, LIU C P, MITCHELL J E, et al. High-dynamic-range wireless-over-fiber link using feedforward linearization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(11): 3274-3282.
- [14] CHEN S C, DENG L, YE Y, et al. Experimental investigation on improved predistortion circuit for directly modulated radio over fiber system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1-9.
- [15] ROSELLI L, BORGIONI V, ZEPPARELLI F, et al. Predistortion circuit design for II and III order simultaneous linearization in multiservice telecommunications apparatuses[C]//2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(Cat. No. 02CH37278). Seattle: IEEE, 2002: 1711-1714.
- [16] TERVO N, KHAN B, KURSU O, et al. Digital predistortion of millimeter-wave phased array transmitter with over-the-air calibrated simplified conductive feedback architecture [C]//2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium(IMS). Los Angeles: IEEE, 2020: 543-546.
- [17] ZHU R, ZHANG X P, SHEN D Y, et al. Ultra broadband predistortion circuit for radio-over-fiber transmission systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(22): 5137-5145.
- [18] CUI Y, DAI Y T, YIN F F, et al. Enhanced spurious-free dynamic range in intensity-modulated analog photonic link using digital postprocessing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(2): 1-8.
- [19] LAM D, FARD A M, BUCKLEY B, et al. Digital broadband linearization of optical links[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 446-448.
- [20] LIU X, LIANG X D, DAI Y T, et al. Suppression of nonlinear distortions in intensity modulated analog photonic link employing digital signal post-processing[C]//2016 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics. Long Beach: IEEE, 2016: 129-132.
- [21] JIANG W, TAN Q G, QIN W Z, et al. A linearization analog photonic link with high third-order intermodulation distortion suppression based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1-8.
- [22] SABIDO D J M, TABARA M, FONG T K, et al. Improving the dynamic range of a coherent AM analog optical link using a cascaded linearized modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, 7(7): 813-815.
- [23] DAI J, XU K, DUAN R M, et al. Optical linearization for intensity-modulated analog links employing equivalent incoherent combination technique[C]//2011 International Topical Meeting on Microwave Photonics Jointly Held with the 2011 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference. Singapore: IEEE, 2011: 230-233.
- [24] ZHU D, CHEN J, PAN S L. Linearized phase-modulated analog photonic link with the dispersion-induced power fading effect suppressed based on optical carrier band processing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10397-10404.
- [25] GAO Y S, WEN A J, CHEN Y, et al. Linearization of an intensity-modulated analog photonic link using an FBG and a dispersive fiber[J]. *Optics Communications*, 2015, 338: 1-6.
- [26] ZHANG W, WEN A J, GAO Y S, et al. Microwave photonic frequency conversion with high conversion efficiency and elimination of dispersion-induced power fading[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 1-9.
- [27] WANG W S, DAVIS R L, JUNG T J, et al. Characterization of a coherent optical RF channelizer based on a diffraction grating[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, 49(10): 1996-2001.
- [28] HUNTER D B, EDVELL L G, ENGLUND M A. Wideband microwave photonic channelised receiver[C]//2005 International Topical Meeting on Microwave Photonics. Seoul: IEEE, 2005: 249-252.
- [29] XIE X J, DAI Y T, JI Y, et al. Broadband photonic radio-frequency channelization based on a 39-GHz optical frequency comb[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(8): 661-663.
- [30] VOLKENING F A. Photonic channelized RF receiver employing dense wavelength division multiplexing: US7245833[P]. 2007-07-17.
- [31] DAI Y T, XU K, XIE X J, et al. Broadband photonic radio frequency(RF) channelization based on coherent optical frequency combs and polarization I/Q demodulation [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(3): 621-628.
- [32] TANG Z Z, ZHU D, PAN S L. Coherent optical RF channelizer with large instantaneous bandwidth and large In-

- band interference suppression[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4219-4226.
- [33] DOERR C R, STULZ L W, LEVY D S, et al. Silica-waveguide 1/spl times/9 wavelength-selective cross connect[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Anaheim: IEEE, 2002: FA3.
- [34] MAROM D M, NEILSON D T, GREYWALL D S, et al. Wavelength-selective 1/spl times/K switches using free-space optics and MEMS micromirrors: Theory, design, and implementation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(4): 1620-1630.
- [35] LAZAREV G, CHEN P J, STRAUSS J, et al. Beyond the display: Phase-only liquid crystal on Silicon devices and their applications in photonics[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 16206-16249.
- [36] KELLY J. Application of liquid crystal technology to telecommunication devices[C]//2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim: IEEE, 2007: 1-7.

作者简介



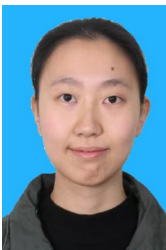
何元智 女,1974年出生,四川自贡人. 研究员,军事科学院首席专家、博士生导师. 获国家和省部级科技进步奖多项,获何梁何利科技创新奖、中国青年科技奖特别奖和中国青年女科学家奖. 当前研究方向为卫星通信、微波光子、空间信息网络等.

E-mail: he_yuanzhi@126.com



尹浩 男,1959年出生,江苏南京人. 中国科学院院士、军事科学院研究员、博士生导师,通信网络领域专家;中国电子学会常务理事,工业和信息化部通信科学技术委员会常委等. 主要从事通信网络技术研究,在复杂环境通信网络理论方法研究、体系结构设计和技术应用等方面取得了多项创新性成果,主持完成20多项国家和国防重大科研项目,获国家科技进步奖、省部级科技进步奖多项.

E-mail: yinhao@cashq.ac.cn



刘韵 女,1990年出生,陕西西安人. 军事科学院助理工程师,主要从事卫星通信系统、空间信息网络等方面的研究工作.