

文章编号:1004-9037(2014)06-0910-07

面向卫星有效载荷系统的微波光子信号处理技术

赵明山^{1,2} 韩秀友^{1,2} 谷一英^{1,2} 胡晶晶^{1,2} 武震林^{1,2}

(1. 大连理工大学物理与光电工程学院, 大连, 116024;

2. 教育部卫星导航联合研究中心卫星小型化与先进有效载荷研究分中心, 大连, 116024)

摘要:新一代卫星通信系统将向大容量、高频段、多波束与处理转发方向发展,传统电域微波信号处理与传输的卫星有效载荷系统存在体积大、质量大、易受电磁干扰、速率低、带宽瓶颈等不足,将微波光子技术引入卫星通信系统能克服电域微波信号传输与处理的局限,极大提升卫星通信系统性能,满足未来工业、民用及国防通信应用需求。本文介绍微波光子信号处理技术在卫星载荷系统中的潜在应用及发展趋势。

关键词:微波光子学;卫星有效载荷;信号处理

中图分类号: TN2 **文献标志码:** A

Microwave Photonic Signal Processing for Satellite Payloads

Zhao Mingshan^{1,2}, Han Xiuyou^{1,2}, Gu Yiyi^{1,2}, Hu Jingjing^{1,2}, Wu Zhenlin^{1,2}

(1. School of Physics & Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024, China;

2. Joint Research Centre for Satellite Navigation of Ministry of Education, Satellite Miniaturization and Advanced Payload Research Sub-center, Dalian, 116024, China)

Abstract: Large capacity, high frequency, multiple beams and processing transponder are the trend of new generation satellite communication systems. The conventional signal processing and transmission payloads in electronic domain have drawbacks such as bulky, heavy, susceptible to electromagnetic interference, low bit rate and narrow band. The microwave photonic technology to satellite communication systems will overcome the above limitations, greatly enhance satellite communication system performance and meet the requirement of industrial, civil and defense communication technology in future. The potential applications of microwave photonic signal processing in satellite payloads are presented and the development trend is also overviewed.

Key words: microwave photonics; satellite payload; signal processing

引 言

随着空间信息系统对卫星通信需求的不断增加(如载荷的小体积、轻量化、高抗电磁干扰,传输容量提升,星上高速处理转发等),传统电域微波信号处理与传输技术在卫星有效载荷系统中的局限日益凸显,如微波变频载荷的多级结构复杂、隔离度低,高频微波信号传输载荷的损耗高、质量重,微波交换与处理载荷的电磁干扰等。

微波光子技术采用光子学方法和手段进行微波信号的产生、传输与处理,具有传输损耗低、带宽大、功耗小、抗电磁干扰能力强、质量轻、机械性能灵活等特点^[1-3]。微波光子技术在地面信息系统,如宽带无线接入网、天线拉远系统、光控相控阵天线等得到广泛研究并逐步进入工程应用阶段^[4-5]。微波光子技术引入卫星通信系统^[6-8]将克服传统电域微波信号处理与传输的局限,极大提升卫星载荷系统的性能,满足未来工业、民用及国防通信应用需求。

基金项目:辽宁省博士启动基金(20131016)资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金(DUT14ZD(G)03, DUT13JB01, DUT13RC204)资助项目。

收稿日期:2014-08-20; **修订日期:**2014-10-10

欧盟自2002年基于ARTES计划开展了光子技术在卫星通信系统中的应用研究,并相继在第六框架和第七框架计划中持续支持,重点在卫星激光通信(星间数字、模拟光通信)、微波光子信号处理(微波本振产生与馈送、模数转换、微波光子变频、波束形成网络等)、光传感(温度、应力、角运动等传感)等方面进行研究。2009年欧空局发射的土壤湿度和海洋盐度(Soil moisture and ocean salinity, SMOS)卫星上首次搭载了光纤光学功能器件,包括光纤传感器、空间光纤收发模块等,这些功能模块已达到技术成熟度(Technology readiness level, TRL-5)标准^[6,9]。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在微波光子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。

本文首先给出星载微波光子信号处理系统的基本结构,然后介绍微波光子信号处理技术在卫星载荷系统中的潜在应用,最后给出星载微波光子信号处理技术的发展趋势。

1 星载微波光子信号处理系统基本结构

微波光子信号处理技术是指将微波信号或承载信息的微波副载波信号调制到光载波上,在光域内进行信号的处理或传输,图1给出了星载微波光子信号处理系统的结构框图,主要包括电光转换单元、光域信号处理与传输单元和光电转换单元。

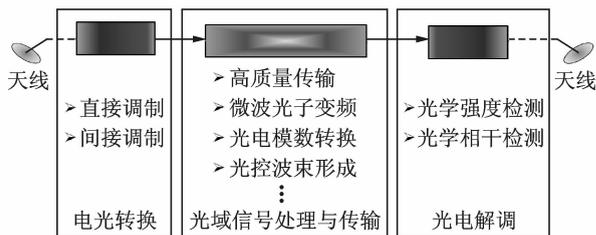


图1 星载微波光子信号处理系统结构

Fig.1 Microwave photonic signal processing for satellite payloads

1.1 电光转换单元

电光转换单元是将微波信号或承载信息的微波副载波信号转换至光域,根据信号处理或传输的应用不同,可采用直接调制或外调制方式。直接调制是将电信号直接加载到激光器的驱动电路,改变激光器的输出光功率,从而实现信号的电光转换功

能,直接调制系统采用的激光光源通常为半导体激光器。由于受到激光器弛豫振荡效应的限制,直接调制的响应频率通常在10 GHz以下。

当微波频率高于10 GHz时,通常采用单独的电光调制器将电信号加载到由激光器发出的光波上,这种调制方式称为间接调制或外调制。外调制系统的激光光源可采用半导体激光器、固体激光器或光纤激光器等,电光调制器主要采用波导电光调制器(如铌酸锂波导调制器、半导体电吸收调制器等)。

1.2 光域信号处理与传输单元

由电光转换单元输出的信号进入光域信号处理与传输单元,该单元在光域内对信号进行传输或处理,主要包括:(1)光载微波高质量传输,如将天线接收的微波信号传输至星上处理单元,微波本振的低损耗、低附加相位噪声多路馈送(此时微波信号来自星上微波本振源或基于光子技术的微波本振源)等;(2)微波光子变频,利用光子变频的大带宽、高隔离优势进行星载微波信号的上、下变频处理,如将天线接收的微波信号一次下变频至星上处理所需的频段;(3)光子模数转换,利用光子技术的低时钟抖动和低相位噪声特性,以及可同时获得高采样速率和高有效比特位的优势,进行模数转换,解决电模数转换的瓶颈问题,满足星上处理转发功能需求;(4)光控波束形成,基于光真时延技术对星载相控阵天线的波束进行赋形,实现大带宽、高灵活波束扫描控制。光域信号处理与传输单元可有效解决传统电域信号处理卫星载荷系统在频率、带宽、电磁兼容,以及在体积、质量和功耗等方面存在的局限,极大提高卫星有效载荷的信息处理能力和传输容量。

1.3 光电转换单元

目前及今后相当长的一段时期内用户最终所需的数据信息仍是电信号,因此需要将光域信号处理与传输单元输出的光信号转换为电信号。光电转换可采用光学强度检测或光学相干检测方式^[10]。光学强度检测是采用光电探测器将入射光信号的强度变化转换为电流或电压的变化,然后经低噪声放大、滤波等恢复出电信号。光学相干检测是将本振光与信号光进行相干耦合,然后由接收机进行探测,根据本振光频率与信号光频率不等或相等,可分为外差检测和零差检测两种方式。

2 微波光子信号处理技术在卫星载荷系统中的应用

微波光子信号处理技术作为一种新的信号处理手段在卫星载荷系统中具有广泛的潜在应用,主要包括微波光子信号产生与馈送、微波光子变频、光子模数转换、光控波束形成、微波光交换等。

2.1 微波光子本振信号产生与馈送

星上微波信号处理,需要把信号下变频至中频,中频信息处理后上变频发射出去,这就需要大量的微波本振信号。传统电缆馈送微波本振信号系统的体积笨重、信号衰减大(尤其是高频微波信号)、易受电磁干扰,而光子技术具有高带宽、不受电磁干扰等优点,可以实现微波本振信号的低损耗多路高效馈送。星载微波本振馈送可采用两种方案:一种是微波光子链路将微波本振源产生的本振信号经光纤传输至星上多个载荷终端,经光电探测后恢复出微波信号供终端使用;另外一种微波本振信号由光子技术手段产生,结合微波光子馈送链路将微波本振信号传输至星上多路载荷终端。第二种方案可以实现微波本振信号的光学产生与馈送一体化,进一步提高星载微波本振馈送系统的性能。

星上载荷终端对微波本振信号产生和馈送最为关注的特性是微波信号的相位噪声和功率。作为信号上、下变频处理的本地微波信号,为了保证变频后信号的质量,要求微波本振信号具有低的相位噪声和良好的稳定性(包括噪声稳定和功率稳定)。对于微波本振光子产生系统,要求其输出的微波本振信号具有低的相位噪声值和良好的长期稳定性。对于微波本振光学馈送系统,要求经多路馈送后对微波本振源信号的性能不产生劣化或应满足卫星载荷终端的应用要求,这就需要保证光电转换单元中的激光器具有低的相对强度噪声,电光调制器具有低插损和低半波电压,光学多路传输单元应具有低分路及传输损耗,光电转换单元应具有高响应度、低噪声电流。同时,需要对微波本振光学馈送系统进行整体优化,包括光电器件的优化和匹配电路的优化,以满足多路高效馈送。目前,光纤馈送的低频本振信号远端相位噪声优于 $-165 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ MHz}$ 。

2.2 微波光子变频

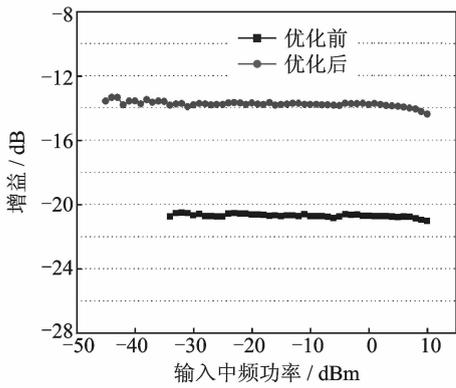
微波变频是卫星通信系统实现转发功能的信号处理重要环节,无论是透明转发还是处理转发,都需要把天线接收的微波信号进行变频处理。传统电域微波变频系统只能实现单一频率微波信号的变频处理,带宽受限;另外,对于高频微波需要多级变频才能转换至目标频段,增加了变频系统的复杂性。随着卫星通信能力的提升(多频段、多波束等),星上转发器的数目不断增加,所需的微波变频系统的数目也急剧增加,使得变频系统的体积和质量在卫星载荷中的比重越来越大,增加了卫星发射和运行成本。

微波光子变频^[11]是利用光子学手段,将微波信号与本振信号在光域内进行混频作用,通过“一次变频-光电探测”即可获得目标频段微波信号,采用光波分复用技术可以实现多目标频段同步变频。如果将微波本振信号光学馈送与微波光子变频系统集成,可以进一步减小卫星载荷的体积、优化系统性能。微波光子变频的主要技术参数包括变频效率(变频增益/损耗)、载噪比劣化度和带外杂散抑制比。

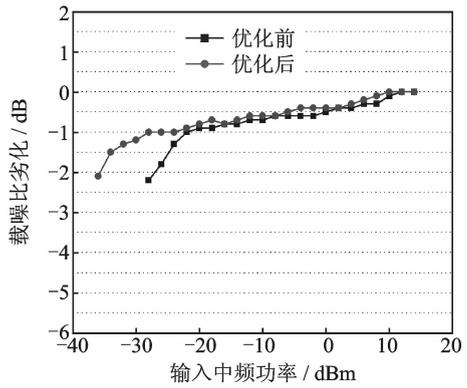
图 2 给出了实验研究的 S 频段(2 GHz)至 Ku 频段(16 GHz)微波光子上变频系统的测试结果。采用优化技术后,变频增益由 -21 dB 增加至 -14 dB ,提高了约 7 dB ;以载噪比劣化小于 1 dB 为参考,调制灵敏度由 -22 dBm 减小至 -28 dBm ,提高了约 6 dB ;带外杂散抑制比由 60.8 dB 增加至 65.7 dB ,提高了约 4.9 dB 。图 2(a)中标记“ Δ ”为 $-1.180\,000 \text{ MHz}$, 60.832 dB ,图 2(b)中标记“ Δ ”为 $-2.166\,667 \text{ MHz}$, 65.737 dB 。

2.3 光子模数转换

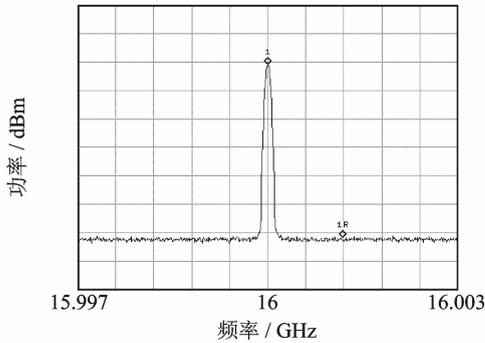
随着卫星通信的高灵活性、高抗干扰能力的需求不断增加,处理转发成为新一代通信卫星发展的主流,以解决透明转发因“功率掠夺”现象而造成的抗干扰能力不足的问题,这就要求卫星载荷对宽带模拟信号进行模数转换然后对数据进行星上处理^[12]。传统电模数转换器(Analog to digital converter, ADC)的速度由于采样时钟抖动、比较器的速度和晶体管阈值失配等因素受到了限制。图 3 给出了 ADC 有效比特位(Effective number of bits, ENOB)与输入模拟信号频率的关系^[13],如图



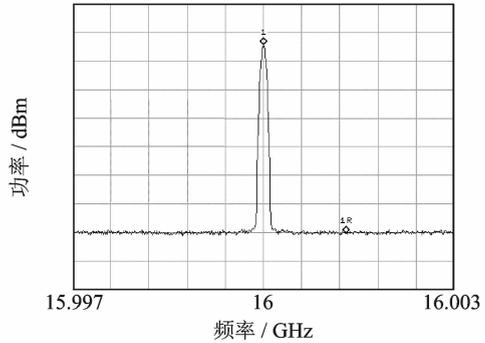
(a) 系统优化前后的变频增益
(a) Mix gain before and after optimization



(b) 系统优化前后的载噪比劣化程度
(b) Degradation of carrier to noise ratio before and after optimization



(c) 系统优化前杂散抑制比
(c) Spurious response rejection before optimization



(d) 系统优化后杂散抑制比
(d) Spurious response rejection after optimization

图 2 S 频段上变频至 Ku 频段的实验结果

Fig. 2 Experiment results of frequency up conversion of S band to Ku band

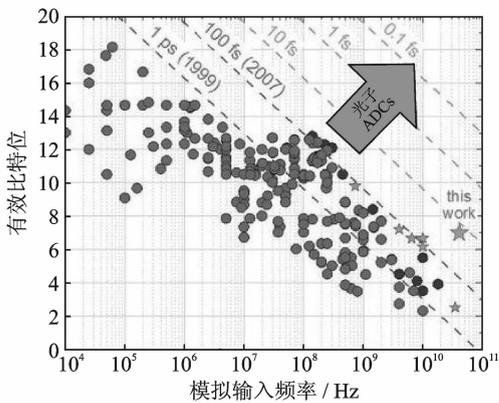


图 3 模数转换器有效比特位与输入模拟信号频率的关系^[13]

Fig. 3 Relationship between ENOB of ADCs and the analog input signal frequency^[13]

中圆点所示,电 ADC 随着频率的增加,有效位数减小,即电 ADC 带宽的增加是以牺牲转换精度为代价的。

采用光子学技术进行模数转换,具有低时钟抖

动和低噪声特性,在实现高采样速率的同时可以保证高的有效比特位^[13]。可以采用时间拉伸技术、相位编码技术、光时分复用技术和光波分复用技术等进行光学模数转换^[14]。采用光学时间拉伸方法来实现高速模数转换,经过波长-时间转换、波长域处理、波长-时间映射 3 个步骤,转换后的慢速电信号可用常规模数转换器进行变换,基于该方法的采样速率可达 10 TS/s^[14]。

2.4 光控波束形成

高频段、区域多波束是未来卫星通信技术发展的主流^[15],相控阵天线是实现该功能的关键技术。然而,传统相控阵天线采用电相移器来实现波束的扫描,存在体积大、质量大、传输损耗高、易受干扰等不足,尤为重要是由于受孔径效应与渡越时间的限制,无法实现大宽带波束控制,阻碍了其在星上实现高频段多波束扫描的应用。光控波束形成技术采用光纤或集成光波导结构的光延时网络,可使光载微波信号获得真时延(True time delay,

TTD),突破了孔径效应与渡越时间的限制,可以获得大的瞬时带宽和宽扫描角,同时具有体积小、质量轻、传输损耗低、抗电磁干扰能力强等优点^[16]。图 4 给出了基于光纤色散棱镜延时线的二

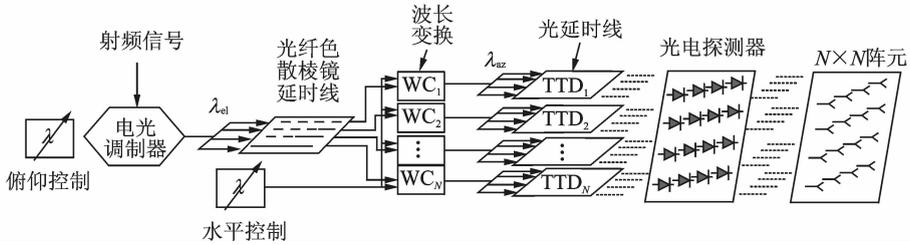
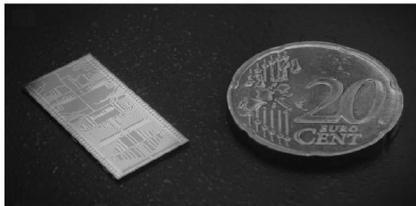


图 4 二维光控相控阵天线系统框图^[17]

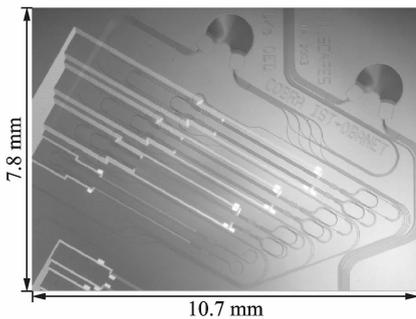
Fig. 4 Schematic of two-dimension optically controlled phased array antennas^[17]

采用集成波导光延时线可以进一步减小光控波束形成系统的体积,降低功耗,在星载应用中极具优势。基于波导微环、阵列波导光栅、光开关切换波导长度、螺旋波导等结构的集成波导光延时线研究近年来有相关报道^[18-22]。图 5 分别给出了基于 Si_3N_4 和 InP 材料的集成波导光延时线芯片,集成波导光延时网络在进行延时控制的同时,可以实现滤波、幅度调谐等功能。



(a) Si_3N_4 波导光延时线^[18]

(a) Si_3N_4 waveguide based OTTDL^[18]



(b) InP 波导光延时线^[19]

(b) InP waveguide based OTTDL^[19]

图 5 基于集成波导的光延时线芯片

Fig. 5 Optical true time delay line (OTTDL) chip based on integrated waveguide

2.5 星载光交换技术

(1) 空间适用光电子器件研究。光电子器件

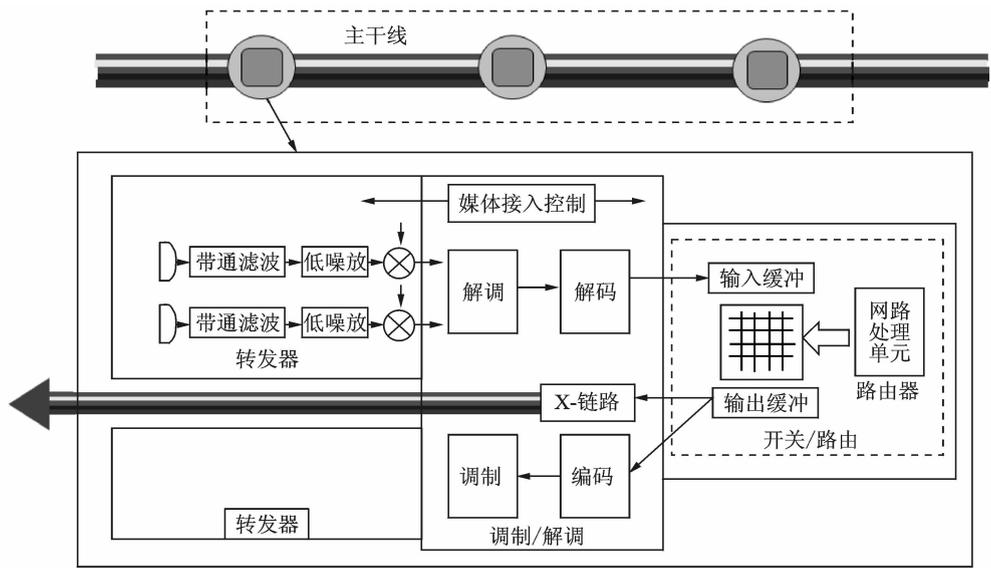
维光控相控阵天线系统框图^[17],第一级延时线系统通过光波长 λ_{ei} 调谐实现俯仰方向波束的扫描,采用波长变换技术在第二级延时线系统中通过光波长 λ_{ez} 调谐实现水平方向波束的扫描。

新一代卫星通信系统将向高频段、处理转发和空间组网方向发展^[23-24]。图 6 给出了卫星通信系统中网络节点所需的各种处理功能,如转发、调制/解调、交换与路由等。现有星上电交换系统在实现高频段处理转发过程中存在频率和带宽的限制,同时卫星空间组网系统要求处于网络节点的卫星载荷能够实现星间通信链路的灵活交换与路由,这对星上电交换系统提出了极大挑战。星载光交换技术将天线接收的微波信号或数字基带信号调制到光载波上,在光域内实现高速信号的信道交换与路由,结合波分复用技术,可以进一步实现不同波束内信道与信道之间的交换,克服电处理与交换系统存在的频率与带宽限制,为提高处理转发卫星有效载荷性能以及未来空间卫星网络的建立提供可靠保障。

3 结 论

微波光子信号处理技术在卫星通信系统中已显示出其独特的技术优势和广阔的市场前景,其应用将极大提升卫星通信系统的性能。未来卫星通信系统在充分发挥微波技术优势的基础上,有效载荷将大量采用光子技术,进行高速数据处理与传输,卫星光通信从点对点模式,向中继转发和以星上光交换与路由为特点的空间卫星组网发展,进一步形成天基信息网。

当然,微波光子信号处理技术在卫星载荷系统中的实际工程应用尚有较多工作需进行深入研究。是构成卫星通信系统光子有效载荷的核心,其性能直接影响卫星有效载荷在轨运行的成败^[25]。目前卫星光有效载荷所用光电子器件大多是从普通商

图6 新一代卫星通信网络系统中节点卫星的处理功能^[24]Fig. 6 Processing architecture of satellite node in new generation of satellite communication network^[24]

用器件中筛选而来,因此需要从空间环境(高能粒子辐射、高低温骤变等)对光电子器件性能影响的机理出发,结合抗辐射加固措施,研制空间适用的高性能光电子器件。

(2) 光子集成技术研究。卫星有效载荷的质量大小是决定其发射难度和成本的重要因素,载荷系统的集成度与可靠性是保证卫星在轨寿命的关键。光子集成是采用平面光波导技术将分立光电子器件(如激光器、调制器、光域信息处理单元、光探测器等)集成到同一芯片上,进而实现系统的低成本、高性能、小体积、低功耗与高稳定^[26];同时基于光子集成技术可以获得常规分立光学器件无法实现的新功能,是未来高性能卫星载荷系统发展的必然趋势^[27]。

(3) 光子技术空间应用标准的制定。光子技术在卫星通信系统中显示出独特优势,典型系统已获得工程应用。为了进一步推进光子技术在卫星通信系统及天基信息网中的应用,光子技术空间应用标准的制定迫在眉睫^[28]。主要包括光有源、光无源器件的性能指标、测试标准,光子有效载荷系统的测试标准等。

微波光子信号处理技术在卫星通信系统中已初露锋芒,相信随着广大科技工作者的不断努力,其在未来卫星载荷系统中将发挥重大的作用。

参考文献:

[1] Yao J. 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] Gradon O. Technology focus: Microwave photonics [J]. Nature Photonics, 2011, 5(12): 724-736.
- [5] 田慧平,徐坤,纪越峰. 动态可重构的智能光载无线接入技术[J]. 中兴通信技术, 2012, 18(5): 1-6. Tian Huiping, Xu Kun, Ji Yuefeng. Dynamic reconfigurable intelligent radio-over-fiber access techniques [J]. ZTE Technology Journal, 2012, 18(5): 1-6.
- [6] Karafolas N, Armengol J M P, Mckenzie I. Introducing photonics in spacecraft engineering: ESA's strategic approach [C] // IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT: IEEE, 2009: 1-15.
- [7] Sotom M, Benazet B, Kerne A L, et al. Microwave photonic technologies for flexible satellite telecom payloads [C] // ECOC. Vienna, Austria: [s. n.], 2009: 1-4.
- [8] 赵尚弘,李勇军,朱子行,等. 星上微波光子技术应用研究进展[J]. 空间电子技术, 2012, 4:14-27. Zhao Shanghong, Li Yongjun, Zhu Zihang, et al. Research progress of microwave photonics technologies for on-board application [J]. Space Electronic Technology, 2012, 4:14-27.
- [9] Kerne A L, Sotom M, Bénazet B, et al. Space evaluation of optical modulators for microwave photonic on-board applications [C] // International Conference

- on Space Optics. Rhodes, Greece; IEEE, 2010; 1-4.
- [10] Johansson L A, Estrella S, Thomas J, et al. Integrated indium phosphide coherent optical receivers and transmitters[C]// Proc International Conference on Space Optical Systems and Applications (IC-SOS). Ajaccio, Corsica, France:[s. n.], 2012; 1-7.
- [11] Cabon B. Microwave photonics mixing[J]. Computer Science & Engineering and Electrical Engineering, 2010, 17(2): 149-162.
- [12] Pantoja S, Piqueras M A, Villalba P, et al. High performance photonic ADC for space applications [C]// International Conference on Space Optics. Rhodes, Greece: IEEE, 2010; 1-6.
- [13] Khilo A, Spector S J, Grein M E, et al. Photonic ADC: Overcoming the bottleneck of electronic jitter [J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4454-4469.
- [14] George C V. Photonic analog-to-digital converters [J]. Optics Express, 2007, 15(5): 1955-1982.
- [15] 李海林, 周建江, 谭静, 等. 基于 MOPSO 算法的卫星共形阵列天线多波束形成[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(3): 415-420.
- Li Hailin, Zhou Jianjiang, Tan Jing, et al. Multi-beam forming of satellite conformal array antenna based on multi-objective particle swarm optimization [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(3): 415-420.
- [16] 张明友. 光控相控阵雷达[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- Zhang Mingyou. Optically controlled phased array radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [17] Jiang Y Q, Zhong S, Howley B, et al. Delay-time-enhanced photonic crystal fiber array for wireless communications using two-dimensional X-band phased-array antennas [J]. Optical Engineering, 2005, 44(12): 1-8.
- [18] Zhuang L, Roeloffzen C G H, Meijerink A, et al. Novel ring resonator-based integrated photonic beam-former for broadband phased array receive antennas—Part II: Experimental prototype[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(1): 19-31.
- [19] Soares F M, Karouta F, Smalbrugge E, et al. An optical InP chip for controlling the beam direction of a phased array antenna[C]// Proc IEEE/LEOS Benelux Annual Symposium 2003. Enschede, Netherlands; IEEE, 2003; 93-96.
- [20] Little B, Chu S, Chen W, et al. Compact optical programmable delay lines with fast thermo-optic switching and output power balancing[C]// Avionics Fiber-Optics and Photonics, 2006 IEEE Conference. Annapolis, MD; IEEE, 2006; 68-69.
- [21] Lee H, Chen T, Li J, et al. Ultra-low-loss optical delay line on a silicon chip[J]. Nature Communications, 2012, 13(867): 1-7.
- [22] Morton P A, Khurgin J B, Mizrahi Z, et al. High SFDR "super-ring" microresonator based true-time-delay (TTD)[C]// 2014 Avionics Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP). Hyatt Regency Atlanta, Atlanta, Georgia, USA:[s. n.], 2014; 1-4.
- [23] Verma S, Wiswell E. Next generation broadband satellite communication systems[C]// 20th AIAA International Communication Satellite Systems Conference and Exhibit. Montreal, Quebec, Canada: AIAA, 2002; 1-7.
- [24] Chan V W S. Optical satellite networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21 (11): 2811-2817.
- [25] Kim Q, Wrigley C J, Cunningham T J, et al. Space qualification of photonic devices[C]// Proceedings of SPIE. [S. l.]; SPIE, 2002; 15-21.
- [26] Marpaung D A I, Roeloffzen C G H, Heideman R G, et al. Integrated microwave photonics [J]. Laser Photonics Review, 2013, 7(4): 506-538.
- [27] Capmany J, Li G, Lim C, et al. Microwave photonics: Current challenges towards widespread application[J]. Optics Express, 2013, 21 (18): 22862-22867.
- [28] Bensoussan A, Vanzi M. Optoelectronic devices product assurance guideline for space application [C]// International Conference on Space Optics. Rhodes, Greece:[s. n.], 2010; 1-6.

作者简介:赵明山(1960-),男,教授,博士生导师,研究方向:信息光子技术,E-mail: mszhao@dlut.edu.cn;韩秀友(1977-),男,副教授,博士生导师,研究方向:光子集成技术;谷一英(1982-),男,讲师,硕士生导师,研究方向:微波光子技术;胡晶晶(1985-),女,讲师,硕士生导师,研究方向:微波光子技术;武震林(1983-),男,讲师,硕士生导师,研究方向:光子集成技术。