

# 星载宽带跨频段微波光子射频通道实现技术研究

蒋 炜<sup>1</sup>, 王 迪<sup>1</sup>, 李小军<sup>1</sup>, 秦伟泽<sup>1</sup>, 龚静文<sup>1</sup>, 肖永川<sup>2</sup>, 谭庆贵<sup>1</sup>

(1. 空间微波技术国家级重点实验室, 陕西西安 710100; 2. 中国电子科技集团公司第四十四研究所, 重庆 400060)

**摘 要:** 目前基于微波技术的射频通道带宽与频率受限、多频率变频能力受限、通用性差, 严重制约了高通量卫星的频谱覆盖范围和大带宽多路变频能力. 针对这一问题, 本文在对微波光子射频通道研究现状对比分析的基础上, 提出基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道实现方法, 开展了相应的仿真分析及实验验证. 测试结果表明: 该射频通道下变频输入频率可覆盖 27 GHz~52 GHz, 输出频率可覆盖 17 GHz~24 GHz; 上变频输入频率可覆盖 25 GHz~27 GHz, 输出频率可覆盖 37 GHz~43 GHz, 且该射频通道工作带宽优于 2 GHz, 带内平坦度优于 3 dB, 变频增益优于 -10 dB, 无杂散动态范围优于 100 dB·Hz<sup>2/3</sup>.

**关键词:** 微波光子; 射频通道; 卫星; 无杂散动态范围; 宽带; 跨频段

**中图分类号:** TN927+.2; TN929.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2022)11-2593-09

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

**DOI:** 10.12263/DZXB.20210727

## Research on Realization Technology of Satellite Broadband Cross-Band Microwave Photonic Radio Frequency Channel

JIANG Wei<sup>1</sup>, WANG Di<sup>1</sup>, LI Xiao-jun<sup>1</sup>, QIN Wei-ze<sup>1</sup>, GONG Jing-wen<sup>1</sup>, XIAO Yong-chuan<sup>2</sup>, TAN Qing-gui<sup>1</sup>

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

2. The 44th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** At present, the RF(Radio Frequency) channel based on microwave technology features limited bandwidth, limited working frequency, limited multi-frequency conversion capability and poor versatility, which seriously prevent the high-throughput satellites from the large spectrum coverage and the multi-channel conversion capability of large bandwidth. To solve this problem, based on the comparative analysis of the research status of microwave photonic RF channel, this paper proposes a broadband cross-band microwave photonic RF channel implementation method based on parallel architecture, and the corresponding simulation analysis and experimental verification are carried out. The test results show that the down conversion input frequency of the RF channel can cover 27 GHz~52 GHz, and the output frequency can cover 17 GHz~24 GHz; the up conversion input frequency can cover 25 GHz~27 GHz, and the output frequency can cover 37 GHz~43 GHz. The bandwidth is larger than 2 GHz, the in-band flatness is lower than 3 dB, the conversion gain is lower than -10 dB, and the spurious free dynamic range (SFDR) is higher than 100 dB·Hz<sup>2/3</sup>.

**Key words:** microwave photonic; radio frequency channel; satellite; spurious free dynamic range; broadband; cross-band

## 1 引言

随着中继卫星系统和宽带卫星系统的发展, 以及国家利益全球化拓展, 军民通信业务需求急剧增加, 高通量卫星(High Throughput Satellites, HTS)应运而生<sup>[1]</sup>, 其最大特点就是在多波束天线中通过频率重复使用提供高速连接和广泛覆盖, 从而在有效降低单位带宽成本的同时, 灵活实现不同区域的不同波束覆盖, 大大提

升卫星载荷的通信容量和灵活通信能力<sup>[2]</sup>. 当前高通量卫星正不断朝着高频段、大带宽、多波束和高容量方向发展. 例如美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)要求未来军用射频接收机瞬时带宽大于 5 GHz, 工作带宽大于 50 GHz; 美国卫讯公司劳拉空间系统公司建造的“卫讯”系列(ViaSat)卫星实现了全 Ka 频段的高通量宽带

通信,通信容量达 300 Gbps,其 2021 年预计发射的 Via-Sat-3 通信容量将达到 1 Tbps<sup>[3-6]</sup>. 美国于 2019 年 6 月提出的休斯 Hughes-95W 卫星拟采用 Ka/Q/V 频段混合的载荷方案,预计单星容量可超过 500 Gbps<sup>[7]</sup>. 高通量卫星载荷的高频段、大带宽、多波束处理需求射频通道需要具有宽频率覆盖范围、宽带、多路微波信号批量变频能力. 然而传统微波技术受电子技术瓶颈限制,其星上射频信号多路变频频率和带宽受限,且对于不同类型的变频,需要相互独立的射频通道实现固定频段的变频,通用性差,无法满足高通量卫星进一步发展的需求. 在卫星载荷中引入基于微波光子的射频通道技术,具有载波频率高、频率覆盖全面、多种频率同时变频、变频线性度好、模块通用化程度高等突出特点,有望在卫星通信领域得以广泛全面的应用.

面向高通量卫星大容量交换转发和 Tbps 通信容量互联网连接的发展需求, Airbus<sup>[8-10]</sup> 和 DAS<sup>[11-13]</sup> 先后提出了工作频率涵盖 Ka/Q/V 频段,包括光本振信号生成馈送、微波光子混频及光交换等功能在内的微波光子载荷方案,可实现大规模路由与多频段微波信号的转发处理,有效降低了卫星载荷的体积、重量和功耗. 其中微波光子射频通道作为关键部件,可实现包括光本振信号生成在内的多路微波信号同时变频,具有重要的研究价值.

本文针对高通量卫星通信宽带化、通用化、小型化和高线性的微波光子射频通道多路变频需求,对当前微波光子射频通道研究现状进行了对比分析,提出基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道实现方法,并在此基础上进行了详尽的分析与验证,实现了频率涵盖 Ku/Ka/Q/V 多个微波频段的微波信号高性能批量变频.

## 2 微波光子射频通道实现方法

目前微波光子射频通道实现方法主要包括基于多波长光载波的射频通道<sup>[8-16]</sup>以及基于光频梳的射频通道<sup>[17-19]</sup>两大类. 基于多波长光载波的射频通道首先通

过电光调制将接收到的多个微波信号调制到多波长光载波上,所生成的调制光信号经波分复用后合成一路后,在光域与本振信号进行混频,得到的混频信号通过波分解复用输出多路变频电信号. 该方法实现简单,结构稳定,可处理带宽大,通道间串扰抑制能力强,能够与现行通信载荷射频前端兼容.

基于光频梳的射频通道能够提供一系列不同频率的光本振信号,利用频率间隔不同的载波光频梳和本振光频梳拍频,结合光学信道化滤波的方式,实现多路变频信号输出,并且通过改变光频梳的梳齿间隔和中心频率,能够实现频谱反转和相对位置变换等功能. 然而该方法在相干双光频梳生成、高抑制比光频移和信道化滤波上均存在一定的工程实现难度. 综合考虑星载射频通道系统实现的稳定性及实现难度,通常选择基于多波长光载波的射频通道实现方法.

### 2.1 基于串联型架构的宽带微波光子射频通道

当前基于多波长光载波的射频通道在采用多波长光载波的基础上,以射频信号调制与本振信号调制相串联的结构实现,具体如图 1 所示. 阵列激光器输出工作在不同光波长的多路光载波信号,并送至电光调制组件中的相应电光调制器进行调制;电光调制组件由多个并行排列的电光调制器组成,每个电光调制器将不同接收通道的射频信号调制到阵列激光器输出的相应光载波上,得到多路射频调制光信号;该多路射频调制光信号由波分复用器合为一落后,经必要的光放大后在本振调制器上与接收到的电本振信号进行光域混频,所得到的光混频输出信号经光波分解复用器解复用为工作在不同波长的多路光信号,由相应的光电探测器进一步进行光电转换得到变频电信号. 主要包括电光调制组件、光处理组件和光电探测组件三部分. 在采用串联结构的射频通道实现方法中,电光调制组件实现多路射频信号的电光调制及与电本振信号的光域混频等功能,光处理组件实现光波分复用/光波分解复用及光放大,光电探测组件则通过光电转换实现变频信号的输出.

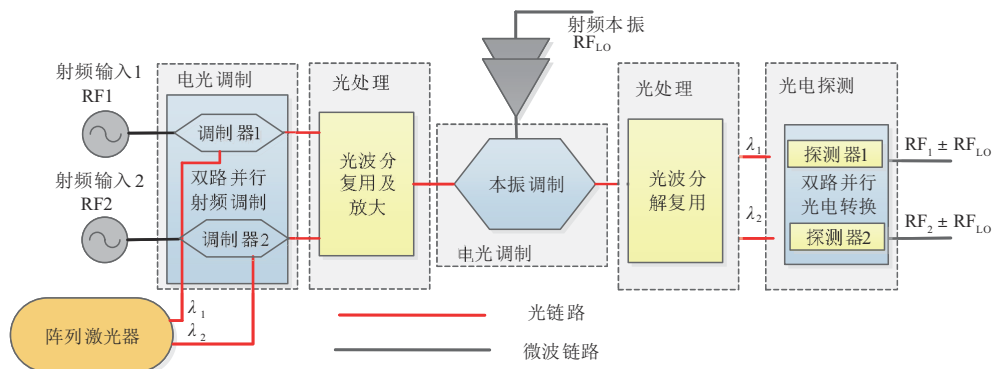
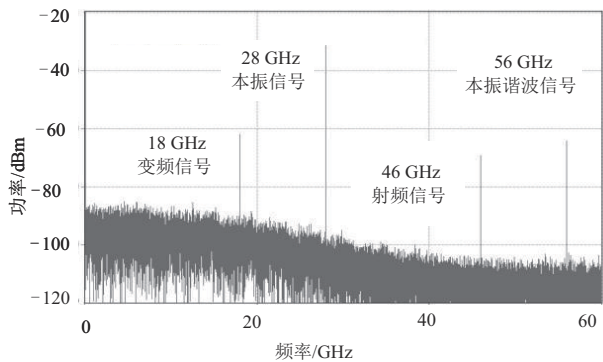


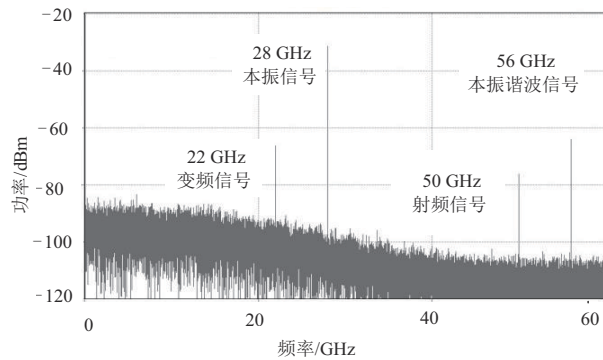
图 1 基于串联型架构的宽带微波光子射频通道原理示意图

根据图 1 所示的原理图,采用 VPI transmission Maker 光学仿真软件建立了串联结构的双路宽带微波光子射频通道的仿真模型. 激光源输出波长为 1550 nm、功率为 10 dBm 的连续波送至并行排列的两个强度调制器,强度调制器的半波电压为 6 V,插入损耗为 5 dB. 两个强度调制器上加载的射频信号频率分别为 46 GHz 和 50 GHz,功率均为 0 dBm;强度调制器输出信号经波分复用合成为一路,随后经噪声系数为 4 dB 的光放大器放大后送至半波电压为 6 V,插入损耗为 5 dB 的本振调制器;本振调制器上加载的电本振信号频率为 28 GHz,本振调制器输出信号经波分解复用器解复用后,送至光电探测器进行光电转换,其中光电探测器的响应度为 0.75 A/W,射频调制器和本振调制器均工作在正交点.

当光放大器噪声系数为 4 dB、放大增益为 10 dB 时,该双路宽带微波光子射频通道输出的下变频信号频谱仿真结果如图 2 所示. 从图中可以看出,下变频输出信号的频率为 18 GHz 和 22 GHz,此外输出信号还包括电本振信号 (28 GHz),电射频输入信号 (46 GHz、50 GHz) 和电本振信号的二次谐波信号 (56 GHz). 该射频通道输出电信号频率成分较多,尤其本振信号泄露较为严重,本振信号的功率电平远大于变频输出信号



(a) 18 GHz 变频信号输出频谱



(b) 22 GHz 变频信号输出频谱

图 2 基于串联架构的双路下变频输出频谱仿真结果

功率电平,因此需要采取有效的措施对本振信号加以抑制,同时改善射频通道损耗.

此外,微波光子射频通道的线性工作能力由无杂散动态范围 (Spurious-Free Dynamic Range, SFDR) 表征, SFDR 指的是三阶交调等于微波光子射频通道系统噪底时对应的输入射频信号功率,与输入射频信号功率等于微波光子射频通道系统噪底时的输入功率比值. 当光放大器噪声系数为 4 dB、放大增益为 25 dB 时,基于多波长光载波的宽带微波光子射频通道系统输出基波和三阶交调失真随输入信号功率变化曲线如图 3 所示. 从图中可以看出,系统对应的无杂散动态范围为  $94 \text{ dB}\cdot\text{Hz}^{2/3}$ ,为更好地提升宽带微波光子射频通道的线性工作范围,需进一步提高该系统的无杂散动态范围.

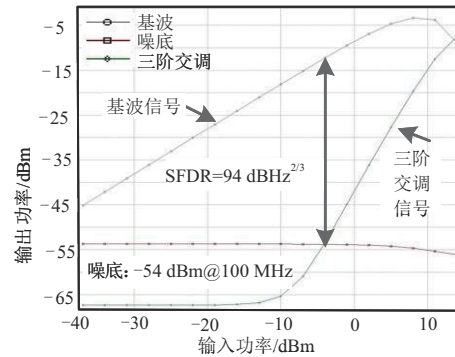


图 3 SFDR 仿真结果

## 2.2 基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道

如前所述,传统基于串联结构的宽带微波光子射频通道存在较为严重的本振泄露问题,同时通道射频损耗和无杂散动态范围较差,难以很好地满足高通量卫星宽频率覆盖范围的宽带高线性批量变频需求. 为此在传统基于串联型架构的宽带微波光子射频通道的基础上,提出了基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道实现方法,以双路变频为例,其原理如图 4 所示. 其中电光调制组件主要实现双通道射频信号电光调制及本振信号的电光调制;光处理组件主要实现光合路、光放大、光滤波及光波分解复用;光电探测组件主要实现高灵敏度微弱光信号的光电转换. 在该实现方法中,多波长激光器阵列输出波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的双路连续光信号,并作为光载波实现对所加载电信号的电光调制;光耦合模块由三个  $1 \times 2$  光开关组成,其主要作用就是将多波长激光器阵列输出的双路连续光信号按特定要求进行耦合,输出功率基本一致、光工作波长分别为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_1 \& \lambda_2$  的三路光载波信号;电光调制组件由两个射频调制器和一个本振调制器组成,其中射频调制器用于将接收到的双通道射频信号调制到

工作波长分别为 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 的光载波上,输出射频调制光信号;本振调制器用于将接收到的本振信号调制到工作波长为 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 的光载波上,输出本振调制光信号;射频调制光信号与本振调制光信号随后由光合路器合为一路光信号,经必要的光放大及光滤波后,所得到的滤波信号经波分解复用器解复用为工作波长分别为 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 的光信号,由相应的光电探测器进一步进行光电转

换得到变频电信号。

为了验证基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道性能,同样采用VPI transmission Maker光学仿真软件,建立了基于图4所示的并联型双路宽带射频通道仿真模型,系统各组件的仿真参数与串联结构的双路宽带微波光子射频通道仿真参数相同.其中射频调制器和本振调制器均工作在最小点。

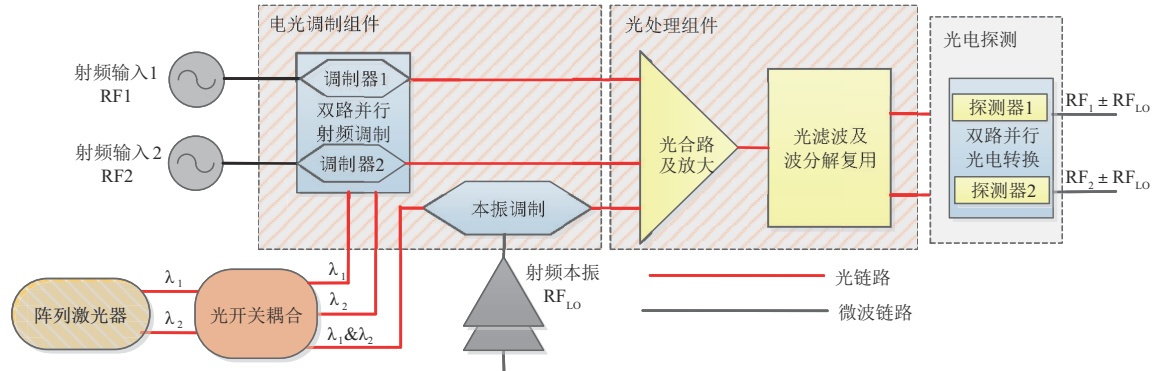


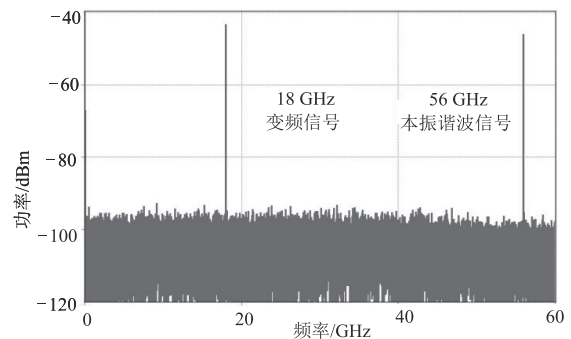
图4 基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道原理示意图

当光放大器噪声系数为4 dB、放大增益为10 dB时,该双路宽带跨频段微波光子射频通道输出信号频谱仿真结果如图5所示.从图中可以看出,射频通道输出信号除包括频率为18 GHz和22 GHz的变频信号外,还包括电本振信号的二次谐波信号(56 GHz),本振信号和射频信号的泄漏情况得到了有效的抑制,因此基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道对电本振信号进行了有效的抑制。

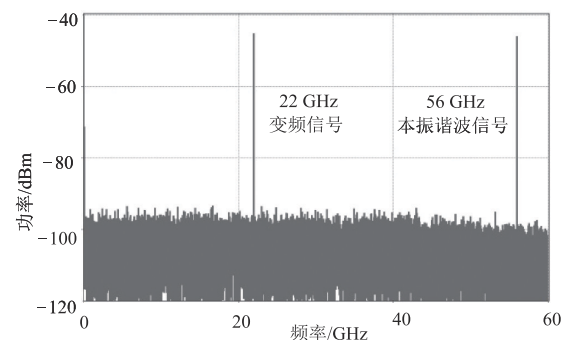
当光放大器噪声系数为4 dB、放大增益为25 dB时,基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道输出基波和三阶交调失真随射频输入信号功率变化的曲线如图6所示.从图中可以看出,系统对应的无杂散动态范围为 $103 \text{ dB}\cdot\text{Hz}^{2/3}$ .相比于传统基于串联型架构的宽带微波光子射频通道而言,该实现方法可使射频通道系统的无杂散动态范围得到有效提升。

基于串联型架构和并联型架构的双路宽带微波光子射频通道仿真结果对比如表1所示。

综上所述,基于串联型架构的宽带微波光子射频通道存在较为严重的本振泄漏问题,同时通道射频损耗和无杂散动态范围较差,难以很好地满足高通量卫星多路变频宽频率覆盖范围的宽带高线性批量变频需求,需采取有效的措施抑制本振信号,改善射频通道损耗,消除无用交调失真信号,提高无杂散动态范围,提升变频线性度.基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道在实现宽带多路微波信号变频的同时,除了能很好地解决本振泄漏问题外,还可以大大提升射频通道系统的无杂散动态范围。



(a) 18 GHz变频信号输出频谱



(b) 22 GHz变频信号输出频谱

图5 基于并联型架构的双路下变频输出频谱仿真结果

### 3 基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道实验结果与分析

为了进一步验证用于高通量卫星的宽带微波光子

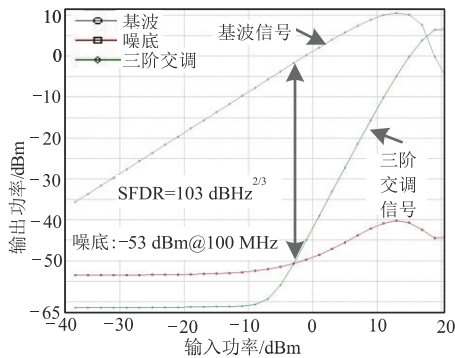


图6 SFDR 仿真结果

表 1 基于串联型架构和并联型架构的双路宽带微波光子射频通道仿真结果对比

	串联型架构	并联型架构
变频输出信号频/GHz	18	18
变频输出信号功/dBm	-61	-42
本振泄露信号功率/dBm	-31	/
射频信号泄露信号频率/GHz	50	/
射频信号泄露信号功率/dBm	-70	/
本振二次谐波信号频率/GHz	56	56
本振二次谐波信号功率/dBm	-76	-46
SFDR/dB·Hz <sup>2/3</sup>	94	103

射频通道系统性能,我们建立了并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道实验系统,如图7所示.表2为实验

系统关键器件与主要参数指标.在该实验系统中,双波长光载波经光开关耦合模块后输出并行传输的三路光信号,其中两路光信号将接收到的双通道射频信号调制到光域上,输出射频调制光信号,另外一路光信号将接收到的射频本振信号经本振调制器调制到光域上,输出本振调制光信号,随后经光处理单元实现光合路、滤波及波分解复用后输出多路光信号,最后通过光电探测器实现高灵敏度微弱光信号的光电转换.其中,光滤波器采用带宽 50 GHz、频率间隔 100 GHz 的梳状滤波器,调节双波长激光器的中心频率,使得双波长激光器输出光载波所在的两个通道分别位于梳状滤波器的通带内(C31、C32). 对下变频通道而言,通过梳状滤波器可选择性滤出射频信号与本振信号同侧的边带;对上变频通道而言,经过光梳状滤波器可选择性滤出射频信号与本振信号不同侧的边带.该基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道既可以实现微波信号的批量上变频,也可以实现微波信号的批量下变频,还可以根据用户需求进行不同频率微波信号的上变频和下变频,具有灵活批量变频的能力.其中,双波长光源输出的光载波工作波长分别为 1552.50 nm 和 1551.56 nm,输出光功率均为 16 dBm. 电光调制器的工作带宽为 60 GHz,插入损耗为 6 dB,半波电压为 5 V. 实验测试了射频通道的频率覆盖范围及变频增益、工作带宽及带内平坦度、输入动态范围、无杂散动态范围和调制信号变频能力等.

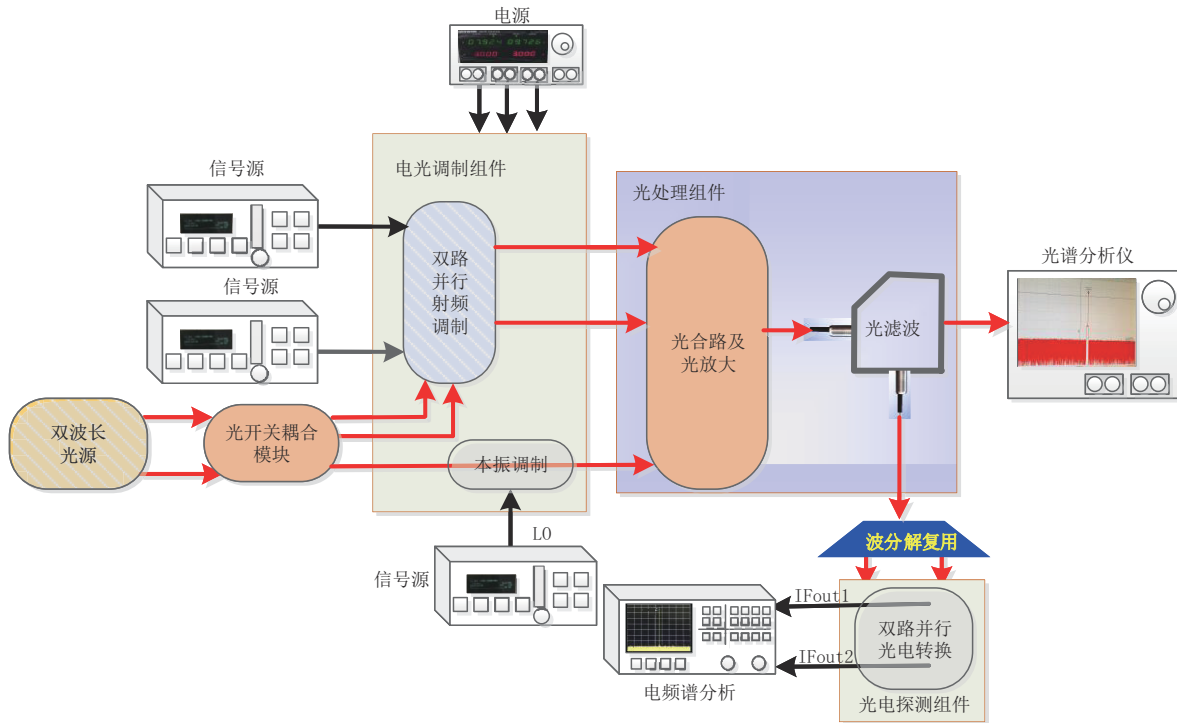


图7 基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道实验框图

表 2 实验系统关键器件与主要参数指标

序号	关键器件		参数指标	
1	双波长光源		工作波长	C31: 1552.50 nm C32: 1551.56 nm
			输出光功率	C31: 16.3 dBm C32: 16.08 dBm
2	光耦合模块		工作波长	1550 nm 波段
			插入损耗	<7 dB
3	电光调制 组件	射频调制 模块	工作波长	1550 nm 波段
			3 dB 带宽	>50 GHz
	本振调制 模块	工作波长	1550 nm 波段	
		3 dB 带宽	>35 GHz	
4	光合 路器	工作波长	1550 nm 波段	
		插入损耗	<7 dB	
	光纤放大器	输入光功率	-27 dBm~-15 dBm	
	光梳状滤波器	通道带宽	50 GHz	
		通道间隔	100 GHz	
波分 解复用器	工作波长	C31 波段 C32 波段		
5	光电探测组件		响应度	0.6 A/W
			3 dB 带宽	50 GHz

### 3.1 频率覆盖范围及变频增益测试

频率覆盖范围表征微波光子射频通道的跨频段工作能力,微波光子射频通道的频率覆盖范围越宽,微波光子射频通道跨频段工作能力越强,阵列变频实现的通用性就越好.变频增益表征了微波光子射频通道的变频效率,变频增益越高,微波光子射频通道变频输出

信号的有效功率就越高,变频损耗也就越小,进而能更好满足射频通道应用需求.表3和表4所示为频率覆盖范围及变频增益的测试结果,其中输入射频信号功率为-30 dBm.从测试结果可以看出,下变频输入频率可覆盖 27 GHz~52 GHz,输出频率可覆盖 17 GHz~24 GHz;上变频输入频率可覆盖 25 GHz~27 GHz,输出频率可覆盖 37 GHz~43 GHz,且上变频和下变频的增益均优于-10 dB.因此该基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道可实现宽频谱覆盖范围的信号变频,其工作频段涵盖 Ku/Ka/Q/V 多个频段,通用性好.

### 3.2 工作带宽及带内平坦度性能测试

工作带宽及带内平坦度表征射频通道的宽带处理能力,高通量卫星可覆盖 Ku、Ka 甚至 Q/V 频段,这就要求相应的射频通道满足不同工作频段的多种业务需求,以适应不同工作带宽的应用需求,即具有宽工作带宽和良好的带内平坦度.工作带宽越大,带内平坦度越好,射频通道对宽带信号的处理能力就越强.表5和表6所示为基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道工作带宽及带内平坦度的测试结果.从测试结果可以看出,下变频输入频率覆盖 27 GHz~52 GHz,输出频率覆盖 17 GHz~24 GHz,信号工作带宽为 2 GHz,带内平坦度优于 2.76 dB;上变频输入频率覆盖 25 GHz~27 GHz,输出频率覆盖 37 GHz~43 GHz,信号工作带宽为 2 GHz,带内平坦度优于 2.43 dB.因此该基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道可实现工作频段涵盖 Ku/Ka/Q/V 多个频段、工作带宽达 2 GHz、工作平坦度优于 2.76 dB 的批量信号变频.

表 3 下变频频率覆盖范围及功率测试

本振信号频率 /GHz	本振信号功率 /dBm	输入射频频率 /GHz	输入射频功率 /dBm	输出射频频率 /GHz	输出射频功率 /dBm	线缆损耗 /dB	变频增益 /dB
10	10	27	-30	17	-48.8	10.5	-8.3
19	10	41	-30	22	-47.8	10.5	-7.3
28	10	52	-30	24	-47.1	10.5	-6.6

表 4 上变频频率覆盖范围及功率测试

本振信号频率 /GHz	本振信号功率 /dBm	输入射频频率 /GHz	输入射频功率 /dBm	输出射频频率 /GHz	输出射频功率 /dBm	线缆损耗 /dB	变频增益 /dB
12	12	25	-30	37	-49.5	17.7	-1.8
14	12	26	-30	40	-51.5	17.7	-3.8
16	12	27	-30	43	-55	17.7	-7.3

### 3.3 输入动态范围性能测试

宽带大容量、多业务信息处理和灵活载荷的配置需求,使得高通量卫星不仅可灵活地工作在任何频段,还能兼容不同功率电平、不同调制格式、不同带宽的多类型信号,这就要求微波光子射频通道在具备宽频谱范围特点

的同时,还具有输入动态范围大的特点,以满足多业务处理对射频输入信号功率电平需求不同的需求.当输入射频信号频率为 52 GHz,输入本振信号频率为 28 GHz 时,所测得的基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道输入动态范围结果如图 8 所示.从测试结果可以看出,

表 5 下变频工作带宽及带内平坦度性能测试

输入射频频率/GHz	输入射频带宽/GHz	输入本振频率/GHz	输出射频频率/GHz	输出射频带宽/GHz	带内平坦度/dB
27~29	2	10	17~19	2	1.7
32~34	2	13	19~21	2	2.02
40~42	2	19	21~23	2	2.46
50~52	2	28	22~24	2	2.76

表 6 上变频工作带宽及带内平坦度性能测试

输入射频频率/GHz	输入射频带宽/GHz	输入本振频率/GHz	输出射频频率/GHz	输出射频带宽/GHz	带内平坦度/dB
25~27	2	12	37~39	2	2.11
25~27	2	14	39~41	2	2.06
25~27	2	16	41~43	2	2.43

输入射频信号功率电平在-90 dBm~-30 dBm变化时,该射频通道输出信号的功率仍能保持良好的线性度,即其输入动态范围为60 dB,可满足不同功能、不同业务的通信及信号处理需求.

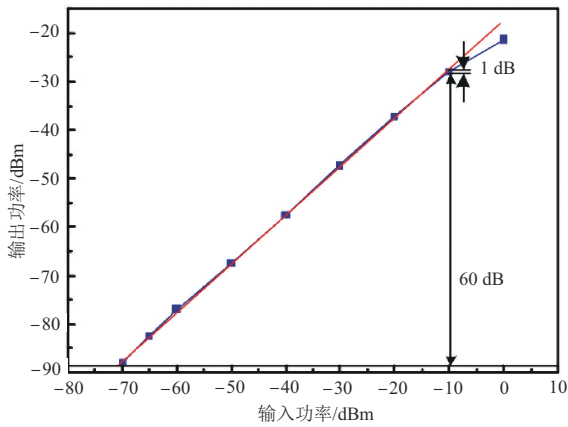
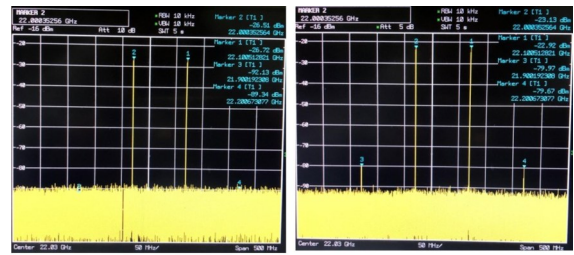


图 8 输入动态范围测试

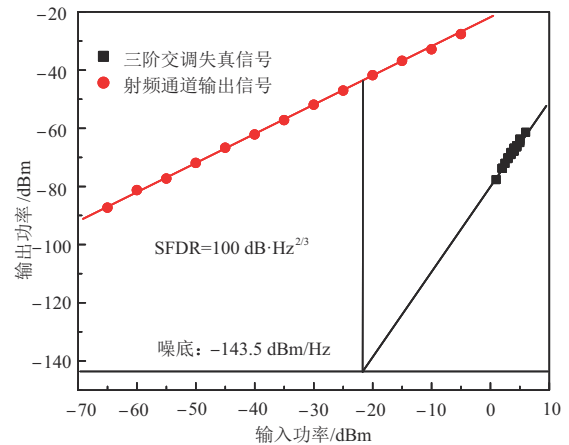
### 3.4 无杂散动态范围性能测试

在微波光子射频通道中,所接收到的微波信号包括Ku/Ka/Q/V等多种频段多种格式的信号,相对光带宽而言,这些微波信号为窄带信号,在微波光子射频通道中将不可避免地互相干扰,引入交调失真信号和谐波信号,其中三阶交调失真作为主要因素,影响微波光子射频通道的线性非失真工作能力,由无杂散动态范围表征.当输入双音射频信号频率为39 GHz和39.1 GHz,输入本振信号频率为28 GHz时,所测得的基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道无杂散动态范围结果如图9所示,其包括热噪声与散弹噪声的噪声功率谱密度为-143.5 dBm/Hz,SFDR为100 dB·Hz<sup>2/3</sup>.

受实验条件的限制,表7给出不同射频输入频率下,该微波光子射频通道不同频率的下变频输出信号SFDR测试结果.从测试结果可以看出该微波光子射频通道的无杂散动态范围优于100 dB·Hz<sup>2/3</sup>.



(a) 不存在三阶交调时输出信号频谱 (b) 存在三阶交调时输出信号频谱



(c) SFDR测试曲线

图 9 下变频通道的SFDR测试结果

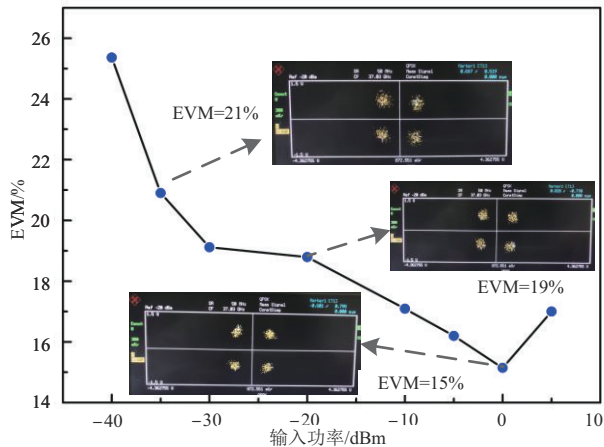
表 7 不同输入频率下射频通道SFDR性能测试

输入射频频率 /GHz	输入本振频率 /GHz	SFDR /(dB·Hz <sup>2/3</sup> )
39&39.1	28	100
39&39.1	17	100.2
39.9&40	17	100.5
27&27.1	10	100.02

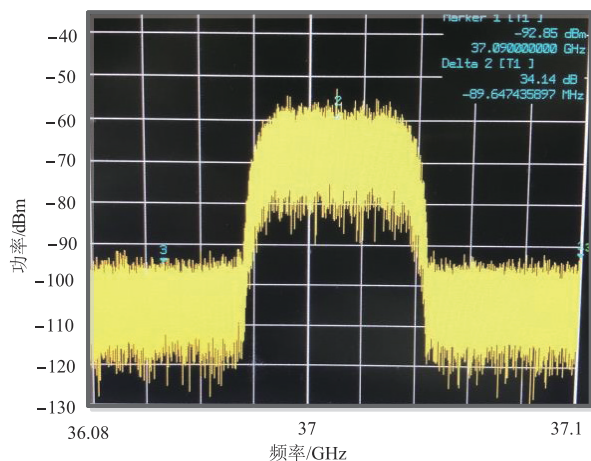
### 3.5 调制信号变频性能测试

为进一步验证基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道对数字调制信号性能的影响,还展开了宽带矢量信号的EVM测试实验.在实验中输入射频信

号的中心频率 12 GHz, 调制格式为 QPSK 调制信号, 符号速率为 50 Msps, 输入电本振信号的频率为 25 GHz, 输出射频信号的中心频率为 37 GHz. 当射频输入信号功率在 -40 dBm~5 dBm 范围内变动时, 所测得的射频通道输出信号的 EVM 曲线及星座如图 10 所示.



(a) EVM 测试曲线



(b) 射频通道输出信号频谱

图 10 50 Msps 符号速率下的射频通道输出信号性能测试

从图 10 中可以看出, 当射频输入信号功率在 -35 dBm~5 dBm 范围内变动时, 射频通道输出信号的 EVM 可保持在 21% 以内, 当射频输入功率高于 -30 dBm 时, 射频通道输出信号的 EVM 保持在 20% 以内. 此外, 随着射频输入信号功率的降低, 信号信噪比也随之降低, 射频通道输出信号的 EVM 值及星座会快速恶化.

## 4 结论

高通量卫星随技术发展不断向高频段、大带宽、多波束和高容量方向发展, 作为卫星载荷关键部分的射频通道需要具有宽频率覆盖范围、宽带、多路微波信号

批量变频能力. 本文面向当前基于微波技术的射频通道系统频率受限、带宽受限、多频率变频能力受限及通用性差等问题, 在对微波光子射频通道研究现状对比分析的基础上, 提出了基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道实现方法, 开展了相应的仿真分析及实验验证. 测试结果表明: 下变频输入频率可覆盖 27 GHz~52 GHz, 输出频率可覆盖 17 GHz~24 GHz; 上变频输入频率可覆盖 25 GHz~27 GHz, 输出频率可覆盖 37 GHz~43 GHz, 且该射频通道工作带宽优于 2 GHz, 带内平坦度优于 3 dB, 变频增益优于 -10 dB, 无杂散动态范围优于 100 dB·Hz<sup>2/3</sup>. 该基于并联型架构的宽带跨频段微波光子射频通道的工作频段涵盖 Ku/Ka/Q/V 多个频段, 具有载波频率高、频率覆盖全面、多种频率同时变频、变频线性度好、模块通用化程度高等突出特点, 在高通量卫星、多波束通信系统中具有重要的应用前景.

## 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] 韩慧鹏. 国外高通量卫星发展概述[J]. 卫星与网络, 2018, 2018(8): 34-38.
- [7] 原晋谦. 国外 Q/V 频段通信卫星发展态势分析[J]. 国际太空, 2020, (7): 42-46.
- [8] ANZALCHI J, LINGO P, ROY B. Application of photonics in next generation telecommunication satellites payloads[C]//International Conference on Space Optics 2014. Tenerife: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers(SPIE), 2014: 183-188.
- [9] ANZALCHI J. Photonics in Next Generation Telecom Satellites Payloads[R]. UK: Airbus Defence and Space, 2018.
- [10] DUARTE VANESSA C, et al. Modular coherent photonic-aided payload receiver for communications satellites [J]. Nature Communications, 2019, 10(1984): 1-9.
- [11] PIQUERAS M A. Microwave Photonic Applications for the Next Generation of Telecom Payloads[R]. Spain: DAS Photonics, 2018.
- [12] POLO V, PIQUERAS M A, MATI J. Photonic payloads

for next generation 5G satellite networks[J]. IEEE Future Networks Tech Focus, 2019, 3(3): 1-8.

- [13] PIQUERAS M A. 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 of SPIE vol. 11180.111804S. Chania: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers(SPIE), 2018: 120-124.
- [14] BENAZET B, SOTOM M. Microwave-photonics cross-connect repeater for telecommunication satellites[C]//Millimeter-Wave and Terahertz Photonics. Strasbourg: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers(SPIE), 2006: 619403-1-619403-7.
- [15] GALLO J T, GODSHALL J K. Comparison of series and parallel optical modulators for microwave down-conversion[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(11): 1623-1625.
- [16] CHAN E H W, MINASIAN R. Microwave photonic downconverter with high conversion efficiency[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(23): 3580-3585.
- [17] 崇毓华,杨春,李向华,朱德沼,周正华. 一种中频相同的微波光子信道化接收机[J]. 光电子·激光, 2014, 25(12): 2294-2299.
- [18] 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.
- [19] JIANG W, ZHAO S H, TAN Q G, et al. Wideband photonic microwave channelization and image-reject down-conversion[J]. Optics Communications, 2019, 445(2019): 41-49.

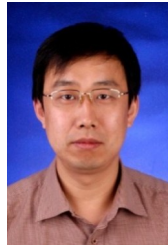
#### 作者简介



蒋 炜 女,1979年11月出生于河北省蠡县. 2020年毕业于空军工程大学并获得工学博士学位. 现为空间微波技术国家级重点实验室高级工程师. 在国内外发表学术论文30余篇. 主要研究方向为微波光子通信系统及射频前端技术.  
E-mail: tsingh504@163.com



王 迪 女,1991年2月出生于陕西省西安市. 2018年毕业于中国科学院大学并获得工学博士学位. 现为空间微波技术国家级重点实验室工程师. 在国内外发表学术论文10余篇. 主要研究方向为微波光子滤波器及雷达技术.  
E-mail: wangd1@cast504.com



李小军 男,1971年4月出生于陕西省延安市. 2004年毕业于西安电子科技大学并获得工学博士学位. 现为空间微波技术国家级重点实验室常务副主任,研究员. 在国内外发表学术论文50余篇. 主要研究方向为卫星通信及高速数传技术.  
E-mail: lixjzhxl@163.com



秦伟泽 男,1975年10月出生于陕西省西安市. 1998年毕业于西北工业大学并获得工学学士学位. 现为空间微波技术国家级重点实验室高级工程师. 在国内外发表学术论文10余篇. 主要研究方向为卫星通信及卫星测控技术.  
E-mail: 807163@qq.com



龚静文 女,1994年9月出生于湖南省常德市. 年毕业于中国空间技术研究院并获得工学硕士学位. 现为空间微波技术国家级重点实验室工程师. 在国内外发表学术论文10余篇. 主要研究方向为微波光子滤波器及变频技术.  
E-mail: 807163@qq.com



肖永川 男,1987年9月出生于重庆市. 2015年毕业于吉林大学并获得工学博士学位. 现为中国电子科技集团公司第四十四研究所高级工程师. 在国内外发表学术论文10余篇. 主要研究方向为微波光传输处理技术及集成微波光子技术.  
E-mail: 807163@qq.com



谭庆贵(通讯作者) 男,1975年9月出生于山东省临沂市. 2007年毕业于电子科技大学并获得工学博士学位. 现为空间微波技术国家级重点实验室研究员. 在国内外发表学术论文40余篇. 主要研究方向为微波光子技术及液晶相控阵天线技术.  
E-mail: uestctqg@163.com