光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022031505

新型星载超宽带微波光子变频技术

崔 岩*

（西南电子设备研究所，成都 610036）

摘 要： 传统的星载变频通道存在易受电磁干扰、动态范围受限、带宽瓶颈等不足，将微波光子技术引入卫星通信系统中，可克服电域信号变频的局限性，提升星载变频通道的性能。文章提出了一种基于并联马赫-增德尔调制器（MZM）与相干接收的宽带微波光子变频技术，通过采用相干接收方法，能够实现较好的共模噪声抑制，并降低谐波失真的影响，同时结合抑制载波调制方式所带来的优势，有效改善了变频无杂散动态范围等指标。通过实验验证，其杂散抑制比优于 60 dB，无杂散动态范围优于 100 dB·$Hz^{2/3}$，为新型星载微波光子变频方案设计、实际应用提供了必要的理论依据与技术支撑。

关键词： 光学变频；相干接收；无杂散动态范围；杂散抑制

中图分类号： TN929.1 **文章编号：** 1001－5868(2022)05－0974－05

Broadband Microwave Photonic Frequency Conversion Technology for Satellite Payloads

CUI Yan

（Southwest China Research Institute of Electronic Equipment，Chengdu 610036，CHN）

Abstract： The conventional frequency conversion of satellite payloads in electronic domain has the drawbacks such as susceptible to electromagnetic interference，limited spur-free dynamic range（SFDR），as well as narrow band. The introduction of microwave photonic into satellite communication system has shown many interesting advantages，overcoming the limitations of signal frequency conversion in electric domain and improving the performance of the on-board frequency channel. A broadband microwave photonic frequency conversion technology based on parallel Mach-Zehnder modulator（MZM）and balanced coherent heterodyne detection is proposed in this paper. Better common mode noise suppression and reduced harmonic distortions were achieved by using balanced coherent heterodyne detection. While combining the advantages brought about by the suppression of carrier modulation，the SFDR of the frequency conversion system were significantly improved. A spur suppression ratio better than 60 dB and a SFDR better than 100 dB·$Hz^{2/3}$ in microwave photonic frequency conversion system is proposed and experimentally demonstrated. Essential theoretical basis and technical support are provided for the new scheme of microwave photonic frequency conversion of satellite payloads.

Key words： photonic frequency conversion；coherent heterodyne detection；spur-free dynamic range；spur suppression

0 引言

微波光子是融合了光子学与微波优势的新技术，一方面使有限的频谱资源得到了充分利用，突破了电域的调制速度限制；另一方面，它还具有光子技术优点，包括低损耗、高带宽、抗电磁干扰、简单轻便等[1-2]，是业界热点研究方向之一，在通信、信号处

收稿日期：2022－03－15.

* **通信作者：**崔 岩 **E-mail：** 475829902@qq.com

理、测量等领域都具有广泛的应用[3-4]。现代卫星通信正面临着运行环境复杂、带宽受限、接收功率受限、成本昂贵等难题，传统的电学变频技术通常采用两次变频将射频信号转换至中频，结构复杂，难以满足未来更高频率的卫星通信需求[5]。将微波光子技术引入到卫星通信系统中，使在光域内对射频信号进行放大、传输、变频等成为可能，可有效增加通信带宽、提升信息处理能力，降低载荷的体积、重量等[6-8]。同时，采用微波光子变频技术，能够在光域内通过一次变频的方式，实现频率的上、下变换，具有结构简单、轻量化等优点，为解决卫星通信系统的变频瓶颈问题提供了有效的技术途径。

1　星载微波光子变频技术方案

微波光子变频技术在卫星通信中具有较大优势，是新一代军用卫星能否在性能指标、安全性、效率等方面超越传统卫星的关键技术。微波光子技术为多光学本振信号的产生、光学变频等方面提供了良好的解决方案。如何获得低噪声、高增益、低杂散的变频信号，是星载微波光子变频技术的研究热点[6]。星载光学本振信号的产生及多通道同时光学变频方案框图如图 1 所示，包括本振光学产生、光学变频等功能单元，多路可调电本振首先输入至多本振光学产生单元，生成多路灵活可调的光学本振，之后再进行变频，最终实现多个通道的同时上、下光学变频，满足卫星通信系统传输及灵活转发的需求。本文建立了基于 MZM、相位调制器（PM）、相干接收的微波光子上、下变频方案，实现了本振及宽带射频信号的独立调制，并与基于级联 MZM 与直接探测的光学变频方案进行了简要的对比和分析。

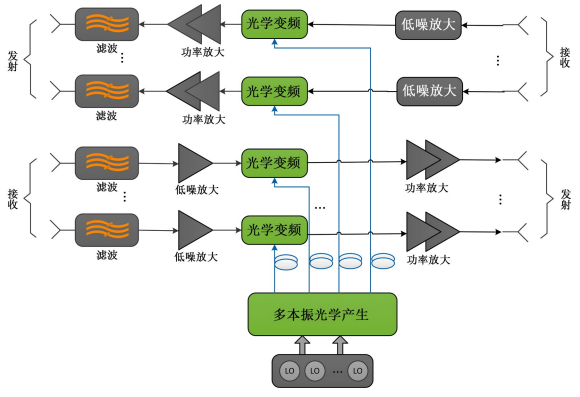


图 1　星载光学本振产生及光学上、下变频原理框图

2　基于级联的微波光子变频技术

图 2 所示为基于级联 MZM 的光学变频原理框图，主要分为三个部分：光学本振产生、光学变频、信号接收。两个级联的 MZM 分别对射频本振和天线接收的射频信号进行强度调制。首先，在光学本振产生部分，光载波输入至第一级 MZM，将本振（LO）信号调制到光载波上，形成频率灵活可调的光学本振信号。第一级产生的光学本振信号，作为光载波输入至第二级 MZM，实现输入射频（RF）信号的电光调制。至此调制全部完成，加载了 RF 信号和 LO 信号的光信号在信号接收端的光电探测器中进行拍频，完成了信号变频，并进一步完成信号的滤波、放大等。

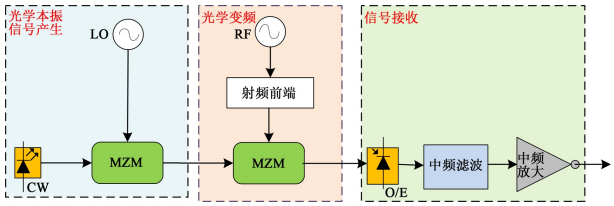


图 2　基于级联马赫-增德尔调制器的光学变频原理框图

调制器为推挽工作状态，为了使变频增益最优，并减少谐波失真的影响，设定两级调制器均工作在正交偏置点，加载本振信号后，第一级调制输出可以表示为

$$E_1(t)=\frac{1}{\sqrt{2}}E_0 e^{j\omega_0 t}\cos\left(\frac{m_1}{2}\sin(\omega_{LO}t+\phi_{LO})\right) \quad (1)$$

式中，场强 $E_0=\sqrt{2P_0}$，P_0 为光功率，ω_0 为光信号角频率，m_1 为本振调制系数，ω_{LO} 和 Φ_{LO} 分别为 LO 的角频率和相位。光学本振产生单元生成的光学本振信号作为第二级电光调制的光载波，注入至第二级 MZM，调制输出的光信号电场可以表示为

$$E_2(t)=E_1(t)\cos\left(\frac{m_2}{2}\sin(\omega_{RF}t+\phi_{RF})\right) \quad (2)$$

式中，m_2 为第二级信号 MZM 的调制系数，ω_{RF} 和 Φ_{RF} 分别为输入 RF 信号的角频率和初始相位。经过第一次本振光调制和第二次射频信号光调制后，光谱如图 3 所示。由图 3 可见非线性成分较为复杂。这是由于第一级调制产生的光学本振、光载波及其他高次边带成分均注入至第二级 MZM，并作为载波再次被调制。经过第二级的电光调制后，又引入了额外的非线性失真，因此级联光调制输出的非线性分量变得非常复杂。这些光分量在光电探测

器中相互拍频，进而导致最终产生的变频信号非线性失真严重。

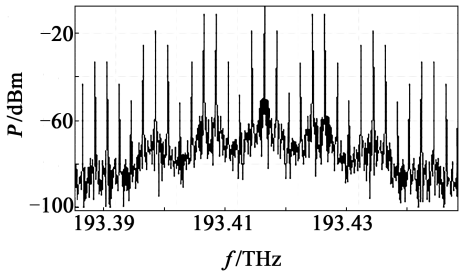


图 3 基于级联调制器变频的调制光谱图

为了提高变频增益，通常需在上述结构中加入掺铒光纤放大器，对光信号进行放大。由于上述方案中，调制器采用的是正交偏置方式，因此输出的调制信号中存在着强载波，经光放大后容易使光电探测器饱和。综合考虑到级联变频系统的非线性特性及易饱和等问题，本文重点研究基于并联 MZM 的相干微波光子变频技术。

3 星载相干微波光子变频技术

基于相干的微波光子变频原理框图如图 4 所示。光载波首先被一分为二，上路为信号支路，下路为本振支路，分别被 RF 信号和 LO 信号所调制。下方本振支路被可调谐微波频率源所调制，形成本振频率可调谐的光学本振信号；信号支路光载波被天线接收的 RF 信号所调制，MZM 工作在最小偏置点，一方面，提高了调制效率，使信号边带的功率得到一定程度的增强；另一方面，由于光载波被抑制，避免了后续经光学放大后导致探测器饱和。调制输出信号边带进一步经光学放大及滤波。

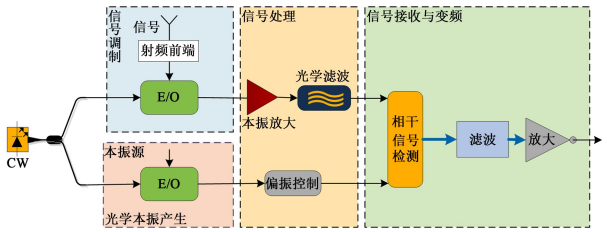


图 4 相干微波光子变频原理框图

上支路电光强度调制器工作在最小偏置点，输出信号可以表示为

$$E(t)=\mathrm{j}\sqrt{2P_{\mathrm{opt}}}\exp(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{o}}t)\sin\left(\frac{m_2}{2}\sin(\omega_{\mathrm{RF}}t+\phi_{\mathrm{RF}})\right) \tag{3}$$

式中，P_{opt} 为信号支路光功率，m_2 为 RF 信号支路调制系数。下路 LO 信号经过相位调制后，输出信号可以表示为

$$E_{\mathrm{LO}}(t)=\sqrt{2P_{\mathrm{LO}}}\exp[\mathrm{j}(\omega_{\mathrm{o}}t+m_{\mathrm{LO}}\sin(\omega_{\mathrm{LO}}t))] \tag{4}$$

式中，P_{LO} 为本振支路光功率，信号光与本振光耦合进入耦合器后，输出信号光场可以表示为

$$E_1=\mathrm{j}\sqrt{P_{\mathrm{opt}}}\exp(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{o}}t)\sin\left(\frac{m_2}{2}\sin(\omega_{\mathrm{RF}}t+\phi_{\mathrm{RF}})\right)+\mathrm{j}\sqrt{P_{\mathrm{LO}}}\exp[\mathrm{j}(\omega_{\mathrm{o}}+m_1\sin(\omega_{\mathrm{o}}t))t]$$

$$E_2=-\sqrt{P_{\mathrm{opt}}}\exp(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{o}}t)\sin\left(\frac{m_2}{2}\sin(\omega_{\mathrm{RF}}t+\phi_{\mathrm{RF}})\right)+\sqrt{P_{\mathrm{LO}}}\exp[\mathrm{j}(\omega_{\mathrm{o}}t+m_1\sin(\omega_{\mathrm{o}}t))] \tag{5}$$

在接收端，信号支路与本振支路进行相干信号检测，经过不同频率成分的差拍，形成变频信号输出。相干光学变频由于还有另外一路本振光存在，所以不要求信号光中含有原载波，因此信号支路可以只传输单个的信号边带，在光域失真被削弱很多，采用并行调制方案，调制输出光谱如图 5 所示。

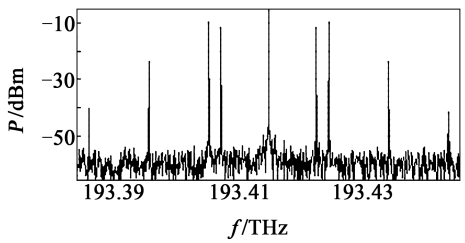


图 5 基于并联调制器变频的调制光谱图

采用该变频方式，避免了强载波被放大进而导致探测器饱和。当然，相干光学变频对光源的性能要求也更高，要求激光器具有窄线宽特性，才能通过相干光学变频获得高质量的变频信号。

经相干信号探测后，通过贝塞尔函数展开，可以得到变频信号探测光电流为

$$I(t)\propto\mathscr{R}\sqrt{P_{\mathrm{LO}}P_{\mathrm{opt}}}\cos(\Delta\omega t)J_{\mathrm{o}}(m_1)J_1(m_1)\cdot J_{\mathrm{o}}\left(\frac{m_2}{2}\right)J_1\left(\frac{m_2}{2}\right) \tag{6}$$

式中，$\mathscr{R}$ 为探测器响应度，$\Delta\omega$ 为经光学变频后信号角频率。

相干微波光子变频输出的探测光电流随变频分量 $J_{\mathrm{o}}(m_1)J_1(m_1)J_{\mathrm{o}}(m_2/2)J_1(m_2/2)$ 变化，m_1 为本振信号调制器的调制系数。存在最优本振调制系数 m_1，使变频分量的光电流达到最大，如图 6 所示。

由上述仿真结果可知，当 $m_2=1.1$ 时，经拍频得到的变频信号功率达到最大，此时的 m_2 为理论

最优的本振调制系数，在其他条件相同的情况下，在该条件下系统的信噪比最优。可以通过配置最优的本振信号功率，进而对变频增益进行改善。

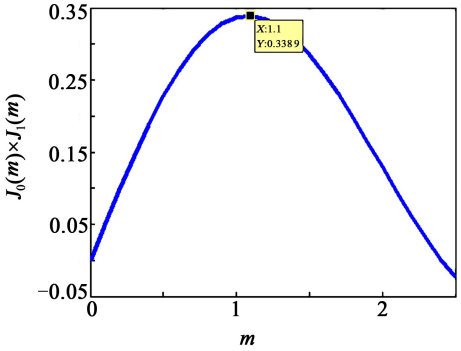
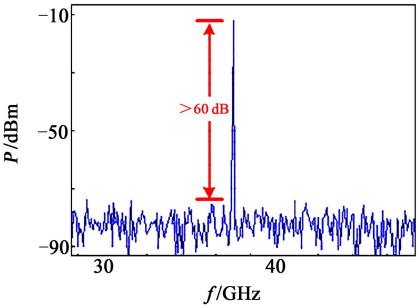


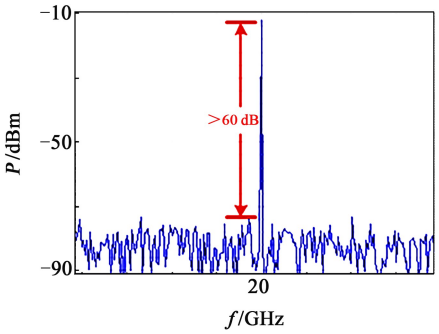
图 6　变频分量随调制系数变化趋势图

4　相干变频系统性能分析

本文通过仿真及实验验证的方式，对相干光学变频技术开展验证。连续波激光器输出功率为 20 dBm 的激光，经分束器一分为二，上臂的马赫-增德尔调制器工作在最小偏置点，输入的射频信号功率为－10 dBm。下臂采用 PM 调制方式，无需使用偏置电路，降低了系统复杂度。根据上面的理论分析及调制器的性能参数，将微波本振功率设置为最佳功率 12.5 dBm，信号支路经光学放大、滤波后与本振信号进行光耦合及相干光电检测。基于以上方案，分别验证了系统的上、下变频特性。当输入信号频率为 25 GHz、本振信号频率为 12 GHz 时，上变频输出探测频率位于 37 GHz，如图 7(a)所示；对于下变频功能验证，当外部输入信号频率为 50 GHz、本振信号选取为 30 GHz 时，下变频输出探测频谱位于 20 GHz，如图 7(b)所示，可见杂散抑制比均优于 60 dB。在测试中，仅对重点关注的频点进行了变频测试，实际上该方案具有宽带特性，仅受到光电器件的带宽限制，目前商用的光电器件基本已达到 60 GHz，因此本方案能够满足高工作带宽下的上、下变频的需求。



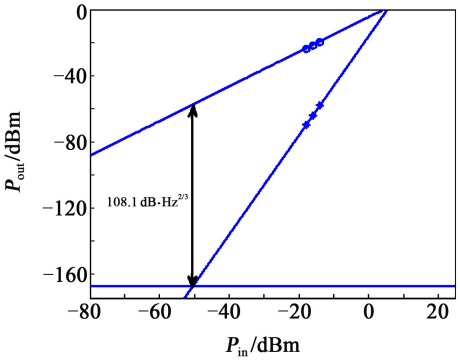
(a)　相干上变频



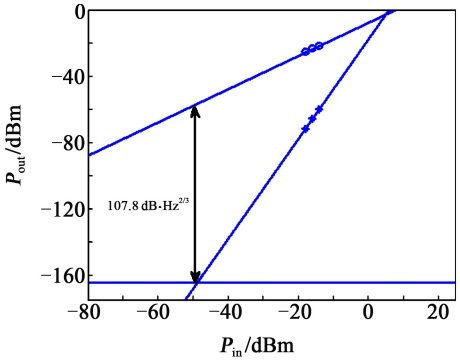
(b)　相干下变频

图 7　探测输出频谱图

本文提出的变频技术，采用了微波光子相干接收，能够实现共模噪声的抑制，噪声特性得到改善[9-10]。同时，利用光学本振，改善了微波光子变频通道的增益。因此，变频系统的无杂散动态范围随之有效提升。采用双音测试法对变频通道的无杂散动态范围进行了测试，上变频至 37 GHz、下变频至 20 GHz 后，无杂散动态范围分别如图 8(a)、(b)所示。由测试结果可知，无杂散动态范围优于 100 dB·$Hz^{2/3}$。



(a)　相干上变频



(b)　相干下变频

图 8　变频无杂散动态范围

5　结论

本文提出了一种基于并联马赫-增德尔调制器

及相干接收的宽带微波光子变频技术，通过理论及仿真对相干变频方案进行了详细分析，并对本振调制系数的选择进行了分析与最优化选择。同时，分别针对上变频、下变频性能进行了验证，变频后信号杂散抑制比超过 60 dB，无杂散动态范围超过 100 dB·$Hz^{2/3}$。研究成果为新型卫星通信及变频转发系统提供了全新的解决思路，满足未来星载宽带变频系统的需求。

参考文献：

[1] LI Ming，Zhu Ninghua. Recent advances in microwave photonics[J]. Front. Optoelectron.，2016，9(2)：160-185.

[2] Seeds A J，Williams K J. Microwave photonics [J]. J. Lightwave Technol.，2006，24(12)：4628-4641.

[3] Chen L R. Silicon photonics for microwave photonics applications[J]. J. of Lightwave Technol.，2017，35(4)：824-835.

[4] Lezekiel S，Burla M，Klamkin J，et al. RF engineering meets optoelectronics[J]. IEEE Microwave Magazine，2015，16(8)：28-45.

[5] 梁 栋，谭庆贵，蒋 炜. 星载微波光子铌酸锂调制器变频技术研究[J]. 空间电子技术，2016，13(1)：24-28.
Liang Dong，Tan Qinggui，Jiang Wei. Research microwave photonics on $LiNbO_3$ modulator frequency conversion technology for satellite payloads [J]. Space Electronic Technol.，2016，13(1)：24-28.

[6] 李 轩，赵尚弘，张 薇，等. 基于光载波抑制调制的星间微波光子下变频研究[J]. 光电子·激光，2013，24(7)：1322-1327.
Li Xuan，Zhao Shanghong，Zhang Wei，et al. Research on inter-satellite microwave photonic frequency down conversion based on optical carrier suppression modulation [J]. J. of Optoelectronics·Laser，2013，24(7)：1322-1327.

[7] Benazet B，Sotom M，Maignan M，et al. Microwave photonics cross-connect repeater for telecommunication satellites [J]. Proc. of SPIE，2006，6194：1-7.

[8] 刘冬利，兰 慧，侯建强. 舰载雷达变频方式及变频使用策略研究[J]. 兵器装备工程学报，2021，42(4)：123-127.
Liu Dongli，Lan Hui，Hou Jianqiang. Research on frequency conversion strategy and mode of shipborne radar [J]. J. of Ordance Equipment Engineering，2021，42(4)：123-127.

[9] Mast A，Middleton C，Meredith S，et al. Extending frequency and bandwidth through the use of agile，high dynamic range photonic converters[C]// IEEE Aerospace Conference，2012：1-5.

[10] Beadle E R. Dyson T. Software-based reconfigurable computing platform for multi-mission payloads in spaceborne and near-space vehicles[C]// ERSA Conf. Keynote Address，2012.

作者简介：

崔 岩(1987—)，女，辽宁省人，博士，高级工程师，主要从事微波光子信号处理、传输等相关研究。