

基于微波光子技术的变频系统设计

代丰羽

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 混频技术是微波系统的关键技术之一, 但受制于电子器件的限制, 其关键性能指标难以获得突破。提出了一种新颖的基于双臂电光外调制器实现微波混频的方法。对混频技术、电光调制和光倍频等关键组成部分进行了设计, 最后利用 Matlab 对系统进行仿真, 并搭建简易的实验系统对关键参数进行了验证。

关键词: 光混频; 微波光子; 光倍频; 全光通信

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)11-0021-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.11.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of the frequency-converter system based on the microwave photonics

DAI Fengyu

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Frequency-converter is one of the key technology of the microwave system, however, the key performance indicator of the technology is hard to break through, which is limited by the electron devices. A novel method of microwave mixing based on dual-parallel electro-optic external modulators is proposed in this paper. In this paper, the key components such as mixing technology, electro-optic modulation and optical frequency tupling are designed. Finally, a simple experimental system is built to verify the key parameters, and the system is simulated by using Matlab.

Key words: optical mixer; microwave photonics; optical frequency tupling; all-optical communication

0 引言

通信、雷达、电子对抗、频谱检测和技术侦察等设备, 长期以来均利用电子器件的非线性效应进行微波频率变换。但是, 随着低频频谱资源的日益紧张, 各种新型设备的工作频率只能不断提高(达到 ka 波段毫米波), 如果仍然使用二极管混频器和有源晶体管混频器来实现频率变频, 就会存在技术难度大、信号质量较差和环境适应能力较弱等问题^[1,2]。近年来, 微波光子技术的不断发展, 为微波频率变频提供了另一种选择。电光模拟调制技术的不断成熟, 特别是基于铌酸

锂(LiNbO₃)的马赫-曾德尔调制器(MZM)的出现^[3-5], 使基于微波光子的高质量、强环境适应性和大动态范围的 ka 波段毫米波信号(甚至是 THz 信号)的变频成为了可能。

利用微波光子技术实现微波信号混频的主要方法为两级调制法^[6-9], 但该调制方式成本高、插入损耗大和控制电路相对复杂。本文在计算、仿真和实验的基础上, 提出一种新颖的基于双臂电光外调制的混频技术。

1 混频系统概述

混频系统利用双臂的电光调制器将高频段的微波信号下变频到较低的中频信号或将较低的中频信号上变频到较高频段的微波信号, 并且利用微波光子技术对本振信号进行倍频以降低输入本振信号的频率^[10]。系统主要由双臂的电光外调制、微波光子滤波、偏置电压控制、本振信号倍频、高稳定光源和电光探测等部分组成。上变频和下变频技术在光域处理上完全相同, 仅在光电转换后的信号选取上略有差别, 因

收稿日期: 2019-05-15。

基金项目: 广西技术创新引导专项(合同编号: 桂科 AC16380117)资助。

作者简介: 代丰羽(1975-), 男, 四川仁寿人, 硕士研究生, 高级工程师。主要从事微波光子技术、模拟光通信技术、雷达对抗技术和通信对抗技术等方面的研究工作。承担过多项设备研制和技术研究以及多项省部级的高新技术研究。



此本文仅以下变频为例对混频技术进行介绍。基于微波光子的下变频技术的工作原理框图如图 1 所示。

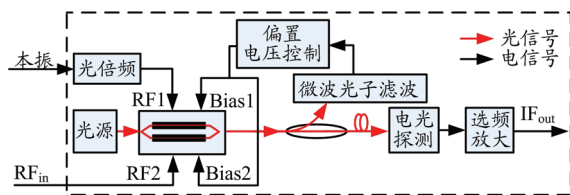


图 1 基于微波光子的下变频技术的工作原理框图

将双臂电光调制器的偏置电压动态地调制到适当范围内,就可以将光载波功率搬移到光的边带功率上,最大限度地抑制光载波,提升变频后的微波信号输出功率。采用该种工作模式将具有如下优势:

①提高输入的光载波功率与本振信号功率积。光载微波信号在近距离传输时,可有效地提升光源功率、本振功率或光源功率与本振功率积。同时,防止由于光链路中各部分设备功率饱和造成的非线性效应而引起的信号失真。

②保持探测器输入光功率恒定的情况下,增加了输入微波信号(RF_{in})的动态范围,同时,还增加了光电探测器的中频信号(IF_{out})的输出功率,降低了系统的噪声系数,提升了系统效能。

③与常用的两级调制方式(一级调制设备将本振信号加载到光载波上,另一极调制设备将微波信号加载到光载波上,实现光域的混频)相比,减少了一级设备的使用,因此减小了设备体积,提高了系统可靠性。

④增加了光载微波信号的传输距离。在光链路中不进行光信号功率放大时,保持通信链路不饱和失真;探测器在接收灵敏度范围内时,可有效增加光载微波信号的传输距离。

2 电光调制

本文采用双臂的电光调制器作为核心器件,实现基于微波光子的微波信号上下变频。光源产生的光载波信号进入双臂调制器后,首先将光信号分为 2 路进入调制器的 2 个臂;然后,微波信号和微波本振信号分别对 2 个臂的光载波进行调制形成光载微波信号;最后,将 2 路光载微波信号进行叠加后输出。电光调制器的输出光载微波信号 $p(t)$ 表达式如下:

$$p(t) = \frac{1}{2} a_{loss} P_c \left[\cos \left(\frac{\pi V_{DC1}}{V_{\pi 1}} - \frac{\pi V_{LO} \cos(\omega_{LO} t)}{V_{\pi 1}} \right) + \cos \left(\frac{\pi V_{DC2}}{V_{\pi 2}} - \frac{\pi V_{RF} \cos(\omega_{RF} t)}{V_{\pi 2}} \right) \right] \quad (1)$$

其中, a_{loss} 为光链路功率损耗, P_c 为光载波信号, $V_{\pi 1}$ 为

第一条臂的半波电压值, $V_{\pi 2}$ 为第二条臂的半波电压值; V_{DC1} 为第一条臂的静态工作点电压值, V_{DC2} 为第二条臂的静态工作点电压值, V_{LO} 为本振信号的幅度值, V_{RF} 为微波信号的幅度值, ω_{LO} 为本振信号角频率, ω_{RF} 为射频信号角频率。

当 $\left(\frac{\pi V_{RF}}{V_{\pi}} \right)$ 很小时,即小信号调制的情况,由贝塞尔函数的性质可知高阶贝塞尔函数值相对于低阶贝塞尔函数值很小,可以忽略。本文仅为了说明双臂的电光调制器的工作原理,不对高次谐波进行展开。因此,利用贝塞尔函数对式(1)展开后得到:

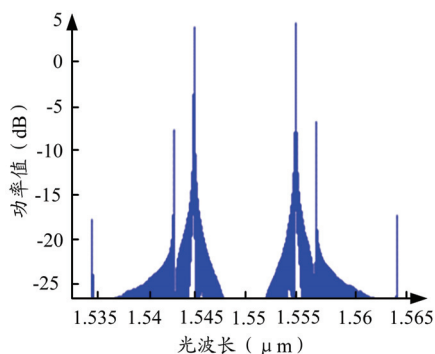
$$p(t) \approx \beta A_0 \{ \alpha_0 \cos(\omega_c t) + \alpha_1 \cos(\omega_c + \omega_{LO}) t + \alpha_2 \cos(\omega_c - \omega_{LO}) t + \alpha_3 \cos(\omega_c + \omega_{RF}) t + \alpha_3 \cos(\omega_c - \omega_{RF}) t \} \quad (2)$$

根据式(2)可知:当光载波 $\cos(\omega_c t)$ 的系数项 α_0 等于 0 时,就实现了抑制光载波的电光调制。利用 Matlab 对双臂电光调制器的调制情况进行了仿真,仿真的光谱图如图 2(a)所示。在保持各输入信号均不变,且两级调制器均工作在最佳偏置电压 ($V_{DC} = \frac{1}{2} V_{\pi}$) 的情况下,两级调制法的仿真光谱图如图 2(b)所示。

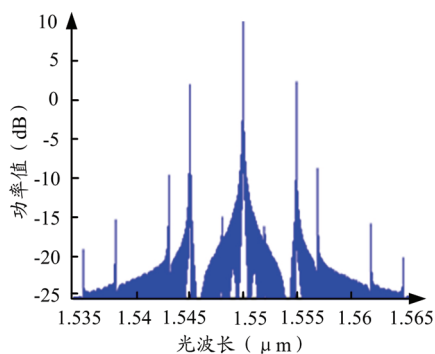
从图 2 可以看出,基于双臂电光调制(2 个偏置点的差值 $\delta V_{DC} = \frac{1}{2} V_{\pi}$) 的混频技术的光谱中仅含有微波

信号、本振信号和本振的 3 次谐波信号、光载波信号、本振的 2 次谐波和交调信号等无用信号均得到了很好的抑制。而两级调制法的光谱中不但含有微波信号、本振信号和本振的 3 次谐波信号,而且还含有光载波信号、本振信号与微波信号的和频信号以及本振信号与微波信号的差频信号等干扰信号。

基于双臂的电光调制技术比



(a) 基于双臂电光调制器的抑制光载波变频



(b) 基于两级电光调制的光子变频

图 2 2 种技术的下变频信号光谱图

两级调制法的噪声基底低 5 dB、光谱的峰值功率低 5 dB、信号功率高 3 dB。如果光电探测器的输入光功率均刚好满足不失真的要求,利用 Matlab 仿真可知:相比两级调制法,经转换后基于双臂电光调制技术的微波信号的输入动态范围(仅考虑基底噪声影响)大 23 dB,微波信号接收灵敏度高 13 dB,输出中频信号功率大 32 dB。

综上所述,相比两级调制法,本文提出的基于双臂电光调制器技术实现下变频的方式具有混频输出信号功率大、接收微波动态范围宽、接收灵敏度高和杂波少等优势。

3 光倍频

考虑到基于微波光子的混频技术的工作频率均较高(一般为 Ka 波段毫米波),直接提供如此高的本振信号比较困难,本文利用微波光子技术将倍频后的本振信号作为系统的本振信号(如图 1 所示)。

同样利用具有优越性能的双臂电光调制器作为光倍频的核心器件进行光倍频,这种倍频技术与混频技术的差异是该调制器双臂的输入信号均为需要倍频的本振信号。基于双臂电光调制器的光倍频工作原理框图如图 3 所示。

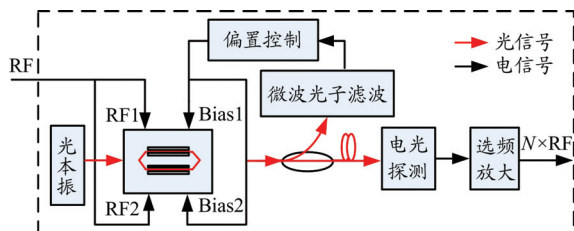


图 3 基于双臂电光调制器的光倍频工作原理框图

电光探测器是将光功率信号转换为电流强度的设备,电光探测器的输出功率信号 P_d 为:

$$P_d = i_d^2 R_{load} = r_d^2 P_{od}^2 R_{load} = \eta_D^2 r_D^2 P_{od}^2 R_{load} \quad (3)$$

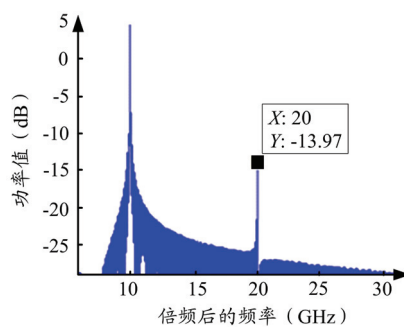
其中, i_d 为经光电转换后的电流, R_{load} 为电光探测器的输出阻抗, P_{od} 为光功率, r_d 为探测器的实际电光转换率, r_D 为理想情况(光功率全部转换成的电流)的电光转换率, η_D 为光功率转换为电流的效率。

将式(1)按贝塞尔函数展开后(仅展开二次谐波项)代入式(3)可得到电光探测器的输出功率信号的贝塞尔表达式。该表达式中就包含了射频信号的二次、四次倍频信号。

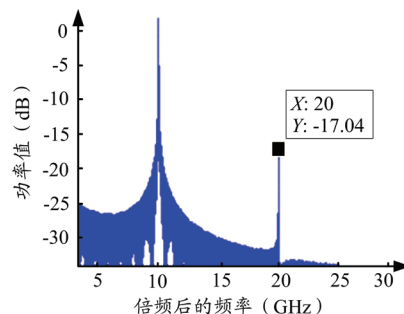
双臂电光调制器工作在最佳偏置电压点($V_{DC} = \frac{1}{2} V_\pi$)时,输出的倍频信号仅包含 2 倍频和 4 倍频信

号,1 倍频和 3 倍频信号完全被抑制。双臂电光调制器的输入信号的相位差会对输入信号的强度产生较大影响,且对 4 倍频信号的影响大于对 2 倍频信号的影响。本文利用 Matlab 对这种工作模式的光电倍频方式进行了仿真,在探测器的输入光功率不饱和(光功率小于 5 dBm)的情况下,输入的射频信号为 5 GHz,2 倍频和 4 倍频后的信号分别为 10 GHz 和 20 GHz。输入到双臂电光调制器的 2 路射频信号相位差为 0 时的仿真情况如图 4(a)所示。输入到双臂调制器的 2 路射频信号相位差为 $\pm\pi/2$ 时的仿真情况如图 4(b)所示。

从图 4 可以看出,2 倍频信号的输出功率大于 0 dBm,4 倍频信号的输出功率大于 -20 dBm,并且 1 倍频、3 倍频和它的混频信号完全被抑制。当 2 路输入射频信号的相位差控制在一定的范围内时,倍频后的信号完全可以被接收。



(a) 射频信号相位差为 0 时的频谱图



(b) 射频信号相位差为 $\pm\pi/2$ 时的频谱图

图 4 基于双臂调制器的光倍频信号频谱图

4 实验系统

本文利用激光器 (Xeston Technologies:XQF938-100-01)、双臂电光调制器 (Photline:MXIQ-LN-40)、Ku 波段低噪声放大器 (川美:CMLA12181822)、光电探测器 (EM4:EM169-03) 和本振选频器 (川美:CMBP11130901) 等主要器件,搭建了将 Ku 频段 (13.75~14.5 GHz) 下变频到 L 频段 (950~1700 MHz) 的光域下变频系统。实验系统的工作原理图如图 5 所示。

本实验系统的核心器件,即双臂电光调制器的 S21 参数如图 6 所示。该系统的实验过程如下:首先,输入 100 MHz 微波信号,经电光倍频放大后获得 -15.4 dBm 的 12.8 GHz 微波信号,再进行功率放大和选频,获得 18 dBm 本振信号;然后,该本振信号和 Ku

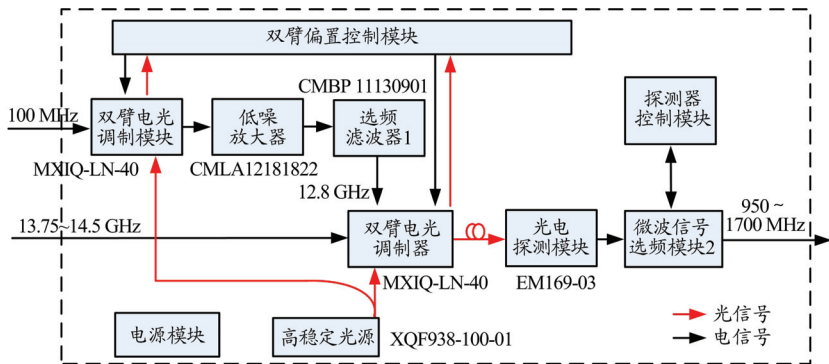


图5 实验系统的工作原理图

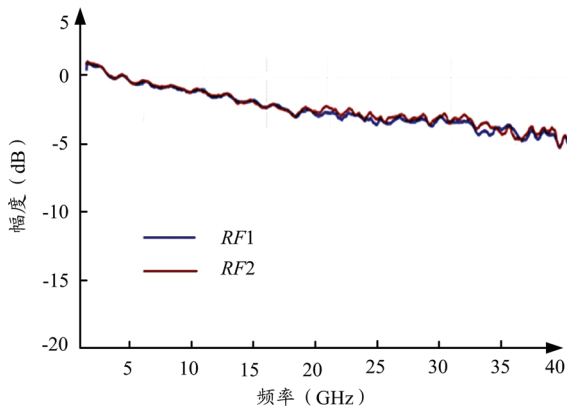


图6 双臂电光调制器的S21参数

频段的待变频信号(13.75~14.5 GHz)在电光外调制器进行混频,并形成具有本振信号、待变频信号、和频信号和差频信号等频率分量的光载混频信号;随后,光载混频信号经光电探测模块差拍,获得本振信号、待变频信号、和频信号和差频信号等微波频率分量;最后,经主路的微波信号选频,获得L频段(950~1700 MHz)的下变频信号。

该实验系统实现的主要指标如下:瞬时动态范围为75 dBc,射频-本振隔离度为98 dBc,带内平坦度为0.9 dB(p.t.p.),40 MHz平坦度为0.35 dB(p.t.p.),相位噪声为-50 dBc/Hz@10 Hz。该实验系统的主要指标达到或优于国际同类微波变频设备(Novella SatComs的DB700系列产品)水平。

5 结束语

本文利用微波光子技术针对微波信号频率变化的总体设计、电光调制和光子倍频进行了理论分析和设计,并搭建了试验系统。与国外同类型设备进行了指标对比检测,主要指标达到或优于国际同类微波变频设备水平。根据理论模型分析可知:选用低插入损耗的双臂电光调制器还可提升变频的动态范围,优化光子倍频的控制电路也可提升变频后的中频信号的相位噪声。

参考文献:

- [1] 张晓宇,邱鑫静,何瑞英,等.基于双平衡马赫-曾德尔调制器的全光混频器[J].光通信技术,2019,43(1):47-50.
- [2] CHEN Antao, MURPHY E J. Broadband optical modulators: Science, Technology, and Applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2012, 329-382.
- [3] LONGTAO X, SHILEI J, YIFEI L. Frequency down-conversion using photodiode sampling [J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron, 2016, 50(12): 271-274.
- [4] BRWIN H W C, ROBERT A M. Microwave photonic downconverter with high conversion efficiency [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(23): 3580-3585.
- [5] 纪文珺,刘开贤,陈新桥.基于马赫-曾德尔调制器的16倍频光毫米波的产生研究[J].光通信技术,2019,43(1):51-53.
- [6] STAVROS I. Microwave photonics: devices and applications [M]. Wiltshire: IEEE Press, 2009: 191-233.
- [7] TANG Z, ZHANG F, ZHU D X, et al. A photonic frequency downconverter based on single dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. IEEE Topical Meeting Microw. Photon., 2013, 42(12): 150-153.
- [8] YIN X, WEN A, CHEN Y, et al. Studies in an optical millimeter-wave generation scheme via two parallel dual-parallel Mach-Zehnder modulators [J]. Journal of Modern Optics, 2011, 58(8): 665-673.
- [9] LARROD M G, KOONEN A M J, OLMOS J J V. Bidirectional Radio Over Fiber Link Employing Optical Frequency Multiplication [J]. IEEE Photon. Techn. Lett., 2006, 18(1): 241-243.
- [10] CHEN Bin, ZHENG Shilie, CHI Hao, et al. An Optical Millimeter-Wave Generation Technique Based on Phase Modulation and Brillouin-Assisted Notch-Filtering[J]. IEEE Photon. Techn. Lett., 2008, 20(24): 2057-2059.

《光通信技术》加入 OSID 公告

《光通信技术》期刊自2018年9月3日起加入国家新闻出版署出版融合发展(武汉)重点实验室提出的OSID(Open Science Identity)开放科学计划。通过在期刊每篇文章上添加OSID开放科学(资源服务)标识码,可以使论文成果更加立体化展现,增强论文质量,促进传播与交流;使作者获得直接拓展学术人脉的渠道,并为作者与研究同领域课题的学者交流互动提供途径。

《光通信技术》编辑部