

基于双平行马赫-曾德尔调制器的全光混频器

张晓宇, 邱鑫静, 何瑞英, 巩彩丽, 魏永峰*

(内蒙古大学 电子信息工程学院, 呼和浩特 010021)

摘要: 传统的混频器只具备上变频或下变频的单一功能, 为精简通信系统的收发模块, 提出了一种基于双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)实现上、下变频的全光混频器方案。该方案利用射频信号和本振信号分别驱动DPMZM上下两臂的子MZM, 以实现本振和射频信号单边带调制; 调节主MZM使DPMZM上、下两臂引入 180° 相位差从而使光载波相互抵消, 输出光信号经光电探测器拍频后可得到中频信号或上变频信号。仿真结果表明: 上、下变频信号抑制比皆超过了25dB, 同时, 无杂散动态范围达到89.7dBm。

关键词: 模拟链路; 双平行马赫-曾德尔调制器; 光混频

中图分类号: TN29 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)01-0047-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.01.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



All optical mixer based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator

ZHANG Xiaoyu, QIU Xinjing, HE Ruiying, GONG Caili, WEI Yongfeng*

(Department of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: The traditional mixer only has a single function of frequency up/down conversion. To simplify the communication system, this paper proposes an all optical mixer based on a dual-parallel Mach-Zehnder modulator(DPMZM) which with the function of frequency up/down conversion is presented. In this scheme, a radio frequency signal and a local oscillator signal drive two sub-MZMs of the DPMZM respectively in order to realize the single-sideband modulation. By properly setting the 180° phase difference to offset the optical the optical carrier by adjusting the main MZM. After the photodiode, IF/up signal can be obtained. Verified by simulation, the result shows that the spurious suppression ratio of up/down signal higher than 25dB, meanwhile, the spurious free dynamic range can reach up to 89.7dBm.

Key words: analog system; dual-parallel Mach-Zehnder modulator; optical mixer

0 引言

微波光子学^[1]是融合微波和光子学的新兴交叉学科, 在电子战、卫星通信^[2]和相控阵雷达^[3]等领域具有广阔的应用前景^[4]。与传统电学器件相比, 基于微波光子链路^[5]设计的混频器具有带宽大、重量轻、损耗低、

隔离度高和电磁干扰免疫^[6,7]等优势, 越来越受到学者们的关注。目前已提出许多微波光子下变频器方案, 如将射频信号和本振信号先分别加载到构成平行结构的两个强度调制器上调制, 再经过光电探测器拍频^[8], 这种方法最大的优点是加载到调制器上的两个信号有很高的隔离度, 使信号间产生干扰。文献[9]中, 本振信号和射频信号分别加载到一个双驱马赫-曾德尔调制器(MZM)上实现了下变频功能。也有学者对光电探测器实现下变频进行了研究, 如文献[10]使用单向载流子光电探测器改变其转换模式实现了下变频功能, 这种方案为光电集成技术提供了一种选择。

然而, 上述方案都仅具备下变频功能。事实上, 越来越多的实际应用要求变频器同时具备上、下变频两种功能。因此, 本文提出一种基于双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)实现上、下变频转换的全光混频器。

收稿日期: 2018-08-14。

基金项目: 国家自然科学基金(61561037、61605015、61601414、61461035、61563038)资助; 内蒙古自治区自然科学基金(2017MS0609、2015MS0602)资助。

作者简介: 张晓宇(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事微波光子学和光载无线通信系统的方向的理论研究; 主要负责方案优化分析及仿真平台搭建的任务, 将国外最新相关研究成果制成PPT讲解给课题组成员, 解决组内成员仿真时遇到的问题及通过方案数据分析更好的优化系统。



* 通信作者: 魏永峰(E-mail: weiyongfeng@imu.edu.cn)。

1 系统结构

本文提出一种基于 DPMZM 的无滤波器实现上、下变频的全光混频器方案,其系统框图如图 1 所示。激光器发射一束激光注入 DPMZM 中,射频信号和本振信号分别加载到 DPMZM 的子 MZM1 和子 MZM2 上。子 MZM2 实现上单边带调制,MZM1 的调制方式根据所需功能来决定:若要实现上变频功能,子 MZM1 做下单边带调制;若要实现下变频功能,子 MZM1 做上单边带调制。调节主 MZM 上的直流电压,将 180° 的相位差引入 DPMZM 的上、下臂,使得上、下两臂光载波相互抵消,光电探测器对输出信号做平方律探测后完成相应的频率转换功能。本方案未使用光滤波器,因此,无需考虑因使用滤波器后系统插入损耗增加和系统带宽受滤波器带宽限制等带来的种种后果。

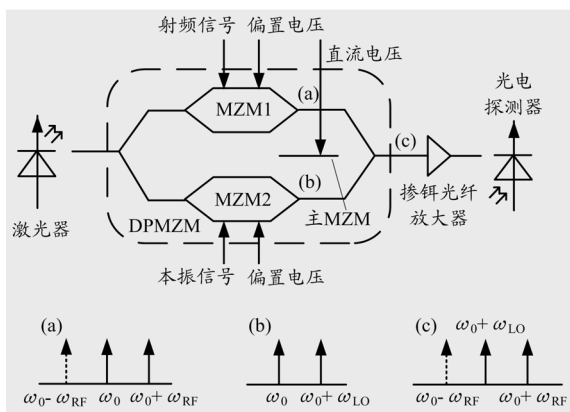


图 1 基于 DPMZM 混频器系统框图及各点的光谱图

2 实现原理

2.1 混频器的下变频原理

本振信号加载到子 MZM2 上做上单边带调制,在小信号调制下,其输出光场可表示为:

$$E_{\text{out}2} = \frac{\sqrt{2}}{4} J_0(m) e^{j\omega_0 t} + \frac{1}{2} J_1(m) e^{j[(\omega_0 + \omega_0)t + \frac{\pi}{2}]} \quad (1)$$

从式(1)可知,光载波和本振信号+1 阶边带被保留了下来。对加载到子 MZM1 的射频信号进行上单边带调制,将主 MZM 设置到最大传输点,上、下两臂光路耦合后的输出光信号可表示为:

$$E_{\text{out}} = \frac{1}{2} \left[J_1(m) e^{j[(\omega_0 + \omega_0)t + \frac{\pi}{2}]} - J_1(m) e^{j[(\omega_{\text{RF}} + \omega_0)t + \frac{\pi}{2}]} \right] \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, $J_x(m)$ 为 X 阶边带的贝塞尔函数; ω_0 、 ω_{LO} 和 ω_{RF} 分别为光载波、本振信号和射频信号的角频率; m 为 MZM 的调制深度, $m = \pi V_x / V_\pi$, V_x 为加载在子 MZM 上的直流偏置电压, V_π 为 MZM 的半波电

压。从式(2)可以看出,主 MZM 设置到最大传输点时,上、下两臂的光载波相互抵消,只保留射频信号和本振信号的+1 阶边带。将此输出光信号送入光电探测器拍频后进行光电转换,转换后光电流由式(3)表示:

$$i_{\text{IF}}(t) \propto \mu^2 E_0^2 J_1^2(m) \cos[(\omega_{\text{RF}} - \omega_{\text{LO}})t] \quad (3)$$

其中, μ 为探测器的响应度, E_0 为输出光信号强度。可见该系统完成了下变频的转换,得到的中频信号频率为 $\omega_{\text{RF}} - \omega_{\text{LO}}$ 。

2.2 混频器的上变频原理

本振信号加载到 MZM2 上实现光单边带调制。对加载到子 MZM1 的射频信号进行下单边带调制,保留射频信号的-1 阶边带,主 MZM 仍设置到最大传输点,上、下两臂光路耦合后有:

$$E_{\text{out}} = \frac{1}{2} \left[J_1(m) e^{j[(\omega_0 + \omega_0)t + \frac{\pi}{2}]} - J_{-1}(m) e^{j[(\omega_{\text{RF}} + \omega_0)t - \frac{\pi}{2}]} \right] \quad (4)$$

从式(4)可知,本振信号的+1 阶边带和射频信号的-1 阶边带被保留下来。将此信号送入到光电探测器后进行光电转换,转换后光电流由式(5)表示:

$$i_{\text{RF}}(t) \propto \mu^2 E_0^2 J_1(m) J_{-1}(m) \cos[(\omega_{\text{RF}} + \omega_{\text{LO}})t] \quad (5)$$

由式(5)可知,该系统完成了上变频的转换,转换后射频信号的频率为 $\omega_{\text{RF}} + \omega_{\text{LO}}$ 。

3 仿真与结果分析

本文利用 VPI transmission Maker 光学仿真软件根据图 1 所示结构搭建了仿真平台。将连续波长激光器的中心频率设置为 193.1THz,射频信号和本振信号分别为 20GHz 和 10GHz。本振信号的相位差设为 90° ,将加载到 MZM2 上的直流电压值上、下两臂相位差设为调制器半波电压的一半,以实现上单边带调制,得到的光谱图如图 2 所示,光谐波抑制比为 17.42dB。

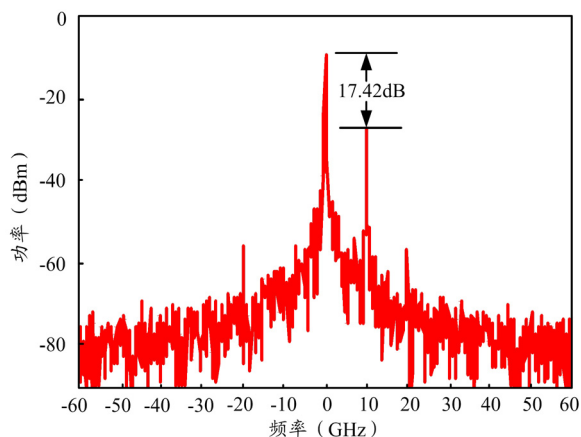
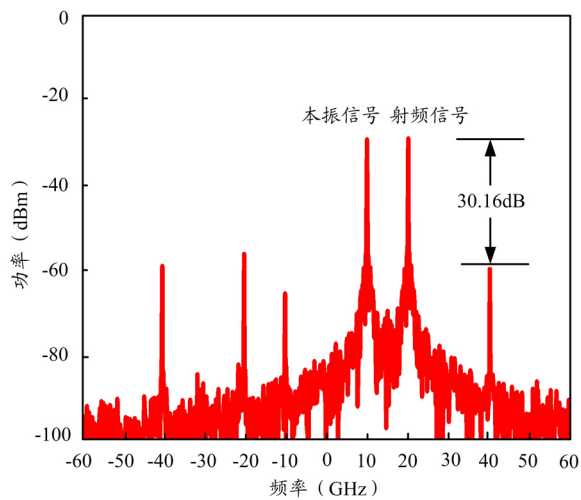


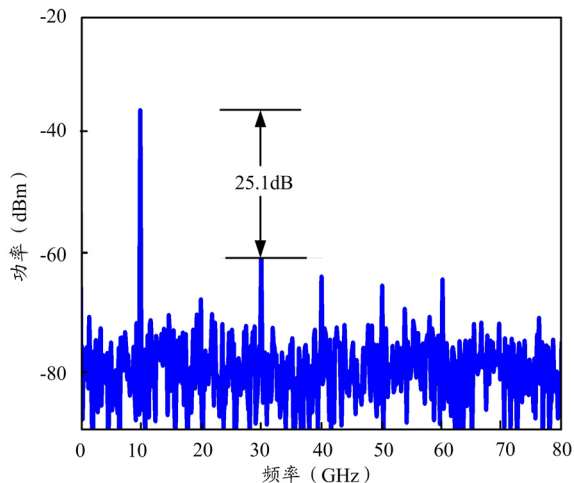
图 2 本振信号单边带调制光谱图

射频信号频率为 20GHz, 本振信号频率固定为 10GHz, 由于引入直流电压会导致子 MZM 的内部折射率发生变化, 子 MZM 内部相位差变为 90° 。光路耦合后经光电探测器拍频实现下变频, 调制器上、下两臂光路耦合光谱图及混频器输出中频信号电谱图如图 3 所示。从图 3(a)可以看出, 载波基本被抵消, 本振信号和射频信号的+1 阶边带被保留下来, 光谐波抑制比可达 30.16dB。图 3(b)中, 输出的中频信号射频杂散抑制比为 25.1dB。

同样地, 射频信号频率定为 20GHz, 本振信号频率固定为 10GHz, 射频信号间的相位差设为 -90° , 直流电压同样设为 2.5V, 上、下两臂引入 90° 相位差实现下单边带调制, 光信号送入光电探测器拍频后实现上变频。调制器上、下两臂光路耦合光谱图及输出射频信



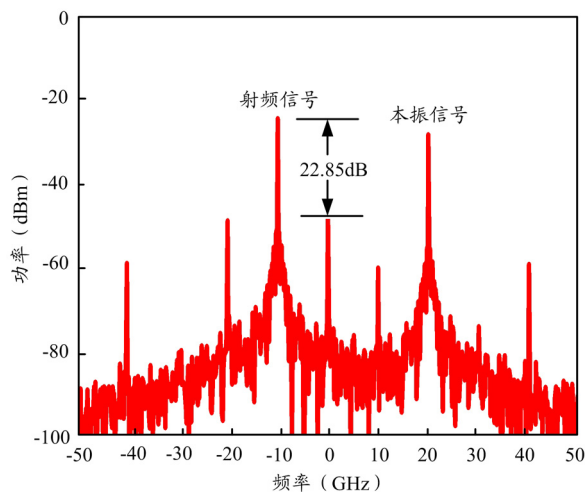
(a) DZPMZM 输出的光谱图



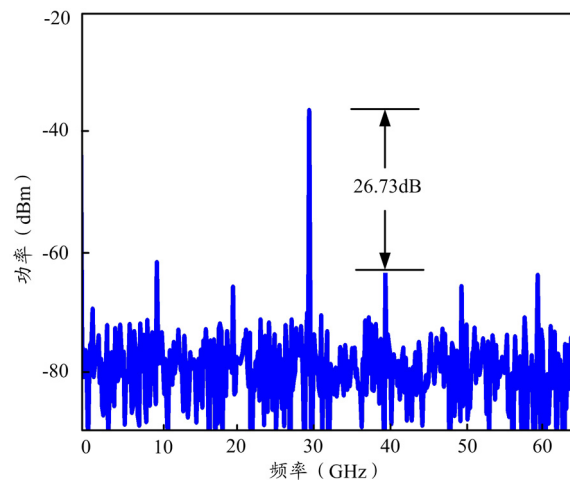
(b) 混频器输出中频信号电谱图

图 3 DZPMZM 输出的光谱图及混频器输出中频信号电谱图

号电谱图如图 4 所示。从图 4(a)可以看出, 载波基本被抵消, 本振信号和射频信号的+1 阶边带和-1 阶被保留下来, 光谐波抑制比为 22.85dB。图 4(b)中, 输出的射频信号的射频杂散抑制比为 26.73dB。



(a) DPMZM 上、下两臂光路耦合光谱图

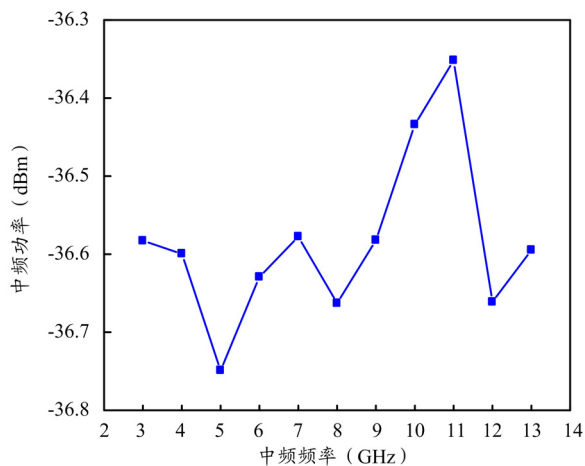


(b) 混频器输出射频信号电谱图

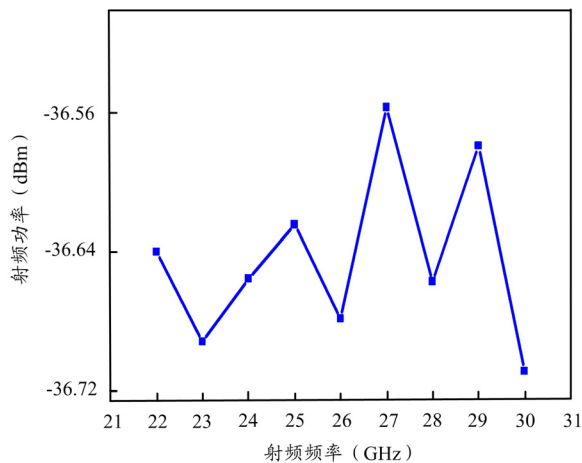
图 4 DPMZM 上、下两臂光路耦合光谱图及混频器输出射频信号电谱图

本文将本振信号频率固定在 10GHz, 当射频信号在 12~23GHz 范围内变化时, 输出中频信号为 2~13GHz, 功率响应如图 5(a)所示, 转换后的中频信号功率波动小于 0.33dB。同样, 将本振信号频率固定在 10GHz, 当射频信号在 12~20GHz 范围内变化时, 输出上变频信号为 22~30GHz, 功率响应如图 5(b)所示, 转换后射频信号功率波动小于 0.27dB。因此, 该混频器有稳定输出信号的能力。

无杂散动态范围是衡量下变频器的一个重要指标之一, 反应了下变频器对不同输入信号的处理能力。本文将频率分别为 20GHz 和 21GHz 的双音信号接到



(a) 中频信号功率变化



(b) 射频信号功率变化

图5 不同输入信号下输出功率响应

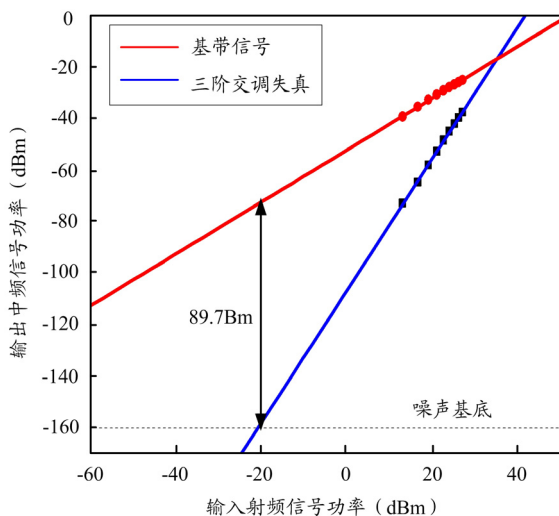


图6 下变频器无杂散动态范围

DPMZM 的一个射频接口处,本振信号频率固定,三阶交调项为影响无杂散动态范围的主要因素。测试得到下变频器无杂散动态范围如图 6 所示,该下变频器的无杂散动态范围为 89.7dBm。

4 结束语

本文提出了一种基于 DPMZM 实现上、下变频的全光混频器。相比于传统的电混频器,基于 DPMZM 的 MZM 全光混频器结构简单、成本低且免疫电磁干扰。由于该混频器具备上、下变频两种功能,故简化了通信系统中发送端及接收端的系统结构。仿真结果表明:DPMZM 在完成上、下变频转换的同时,射频杂散抑制比分别为 26.73dB 和 25.1dB,能够很好实现所需的变频转换。同时,我们引入了不同频率输入信号来测试输出信号功率的变化,输出的中频信号功率波动小于 0.33dB,输出的射频信号功率波动小于 0.27dB,且无杂散动态范围可达 89.7dBm。因此,该系统拥有足够的稳定性,其接收端的下变频器性能表现良好。

参考文献:

- [1] ALTAQUI A, CHAN E H, AND MINASIAN R A. Microwave photonic mixer with high spurious-free dynamic range [J]. Appl. Opt., 2014, 53(17): 3687-3695.
- [2] MIYAMOTO R Y, ITOH T. Retrodirective arrays for wireless communications[J]. IEEE Microw. Mag., 2002, 3(1): 71-79.
- [3] BIL R, HOLPP W. Modern phased array radar systems [J]. 2016 IEEE Int. Symp. Phased Array Syst. Technol., 2016, 5(8):1-7.
- [4] YAO J P. Microwave photonics[J]. J. Lightwave Technol., 2009, 32(7): 314-335.
- [5] FUSTER J M, MARTI J. Optimization of the dynamic range in optically amplified harmonic downconverting fiber-optic link[J]. IEEE Photon., 1999, 11(7): 877-879.
- [6] BERCELI T, HERCZFELD P. Microwave photonics-a historical perspective[J]. IEEE. Trans. Microw. Theory Tech., 2010, 58(11): 1-9.
- [7] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nat. Photonics, 2009, 32(7): 314-335.
- [8] ERWIN H W C, ROBERT A M. Microwave Photonic Downconverter With High Conversion Efficiency [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(23): 3580-3585.
- [9] TANG Z, ZHANG F, ZHU D X, et al. A photonic frequency downconverter based on a single dual-drive Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Topical Meeting Microw. Photon., 2013, 42(12): 150-153.
- [10] LONGTAO X, SHILEI J, YIFEI L. Frequency down-conversion using photodiode sampling [J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 2016, 50(12): 271-274.