

文章编号 1004-924X(2017)04-0827-08

基于强度-相位级联调制的微波光子下变频法

王云新^{1,2}, 李静楠¹, 杜浩峥¹, 王大勇^{1,2*}, 周涛^{3*}, 钟欣³, 杨登才^{1,2}, 贾喻鹏¹

1. 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100124;
2. 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124;
3. 电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

摘要: 为了优化微波光子下变频的无杂散动态范围, 结合带反馈控制的强度调制器和相位调制器, 提出并验证了基于强度和相位级联调制的微波光子下变频方法。通过理论推导和仿真分析了下变频原理以及本振功率对系统性能的影响, 搭建了强度-相位级联调制的微波光子下变频系统, 利用自行研制的直流偏置反馈控制模块确保强度调制器的工作状态稳定, 对系统进行了性能测试。实验结果表明, 增益和无杂散动态范围分别为-6.65 dB和108.62 dB/Hz^{2/3}, 与传统的强度调制器级联下变频链路相比, 增益和无杂散动态范围分别提高了3.56 dB和19.87 dB。基于强度和相位级联调制的下变频方法仅需要单个偏置电压, 且可通过反馈模块实现工作状态的稳定控制, 系统结构简单、性能稳定, 可实现大动态范围的微波光子下变频。

关键词: 微波光子学; 下变频; 增益; 无杂散动态范围

中图分类号: TN928 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20172504.0827

Microwave photonic down-conversion method using intensity-phase cascaded modulation

WANG Yun-xin^{1,2}, LI Jing-nan¹, DU Hao-zheng¹, WANG Da-yong^{1,2*},
ZHOU Tao^{3*}, ZHONG Xin³, YANG Deng-cai^{1,2}, JIA Yu-peng¹

1. College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
 2. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement & Control Technology and Instruments, Beijing 100124, China;
 3. Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China)
- * Corresponding author, E-mail: wdyong@bjut.edu.cn; zhj_zht@163.com

Abstract: In order to optimize the Spurious Free Dynamic Range (SFDR) of microwave photonic frequency down-conversion, a microwave photonic down-conversion method based on intensity and phase cascaded modulation was proposed and verified by using a Mach-Zehnder modulator (MZM) with feedback control module and a phase modulator (PM). The principle of frequency down-conversion and influence of power of local oscillator on system performance were derived theoretically and analyzed in simulation. The MZM-PM cascade microwave photonic down-conversion system was built, in which a

收稿日期: 2016-11-09; 修订日期: 2016-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61372061); 北京市青年拔尖创新人才资助项目(No. CIT&TCD201504020); 日新人才和中央支持地方专项配套项目

self-developed DC bias feedback module was applied to enable the MZM at a stable operating state. Then the performance of system was tested experimentally. The results demonstrate that the gain and SFDR are -6.65 dB and 108.62 dB/Hz^{2/3} respectively, which have been improved 3.56 dB and 19.87 dB respectively compared with the conventional MZM-MZM cascade down-conversion system. In addition, microwave photonic down-conversion method based on intensity and phase cascaded modulation only requires a single DC bias voltage, and the stability of operating state can be controlled by the feedback module. The system can offer microwave photonic frequency down-conversion in high dynamic range with a simple structure and stable performance.

Key words: microwave photonics; frequency down-conversion; gain; spurious-free dynamic range

1 引言

随着无线通信、卫星通信、以及雷达探测等应用对频带需求的日益增加,促使微波通信逐渐向高频段发展。传统的微波通信链路易于构建和辐射,但受限于同轴电缆的传输性能,微波通信具有带宽小、损耗高、受电磁干扰严重、体积庞大等不足。光纤通信能够较好地解决上述问题,因此人们将微波技术与光纤技术结合产生了微波光子技术这一新兴的交叉学科^[1-6]。微波光子链路增加了电/光和光/电转换,将输入的微波信号调制到光频域,并进行信号处理。结合微波无缝覆盖和光纤大带宽、长距离传输的优点,该链路具备传输带宽大、抗干扰能力强、传输损耗低以及体积小等优点。此外,光频率远远高于射频(Radio Frequency, RF)频率,因此微波光子链路具有良好的信号隔离度,避免了信号泄漏,使它在处理宽带微波信号以及信号的远程传输等方面具有显著优势^[7]。

为了充分利用高频段的微波资源,微波光子链路系统需要发展与其频率匹配的微波探测方法。不过,当前商用探测器的带宽和量化噪声水平有限,利用探测器直接检测高频微波信号的方法已经不能满足微波通信的发展需求。因此,微波光子下变频技术被提出,通过对微波信号进行降频处理,降低对探测器的要求,更有益于它与中低频数字信号处理模块兼容,从而降低接收系统的整体成本。最早的微波光子下变频系统采用基于直接调制的下变频链路^[8-9],系统接收到的射频信号对半导体激光器进行直接调制,利用 Q 转换的激光器内部自振荡器为系统提供本振(Local

Oscillator, LO)信号,通过光电探测器的非线性传输特性实现频率转换。这种下变频系统的优势是结构简单、易于构建,但由于其处理带宽受到直调半导体激光器的影响,在接收高频微波信号时,激光器的相对强度噪声和非线性效应会明显增加,从而限制了该方法在高频微波通信中的应用。利用外部电光调制器的微波光子下变频系统能够将电光调制过程从直调激光器中分离出来,这种方法结构灵活、性能良好,可以处理高频微波信号。Kolner 和 Dolfi 将 RF 和 LO 信号注入到同一个马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)中,由探测器获取两个信号产生的混频信号^[10]。Gopalakrishnan 等人提出了 MZM-MZM 级联的微波光子下变频方法^[11-12],将 RF 和 LO 信号分别注入两个 MZM 上,然后通过探测器得到中频信号。该方法需要对两个 MZM 分别进行偏置点控制,难以保证两个偏置点的一致性。Haas 等人设计了基于相位级联调制的微波光子下变频系统^[13-14],由于采用相位调制器(Phase Modulator, PM),该链路具有很好的线性度,但相位调制产生的一阶边带能量较低,导致系统增益不高。Zou 等人采用两个级联的偏振调制器(Polarization Modulator, PolM)实现了宽带和高转换效率的微波光子下变频^[15]。为了提高转换效率,Erwin 等人采用集成的双平行马赫-曾德尔调制器(Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator, DPMZM)进行微波光子下变频^[16]。集成的 DPMZM 通过控制外部电压可以灵活控制调制方式,不足之处在于需要多个直流偏置来控制工作状态,系统稳定性有待提高。

本文结合带反馈控制的强度调制器和相位调制器,提出了基于强度-相位级联调制的微波光子

下变频法。在对下变频原理进行理论推导和仿真分析的基础上,搭建了微波光子下变频链路,链路中 MZM 利用直流偏置反馈控制模块实现偏置点的稳定控制,确保链路具有稳定的工作状态,对增益(Gain, G)和无杂散动态范围(Spurious Free Dynamic Range, SFDR)进行了性能测试,并与传统的 MZM-MZM 级联的下变频系统^[17]进行了性能对比。

2 下变频原理

采用 MZM-PM 级联的微波光子下变频系统的结构如图 1 所示。激光器输出中心频率为 ω_0 的光载波入射到 MZM,频率为 ω_{LO} 的系统本振信

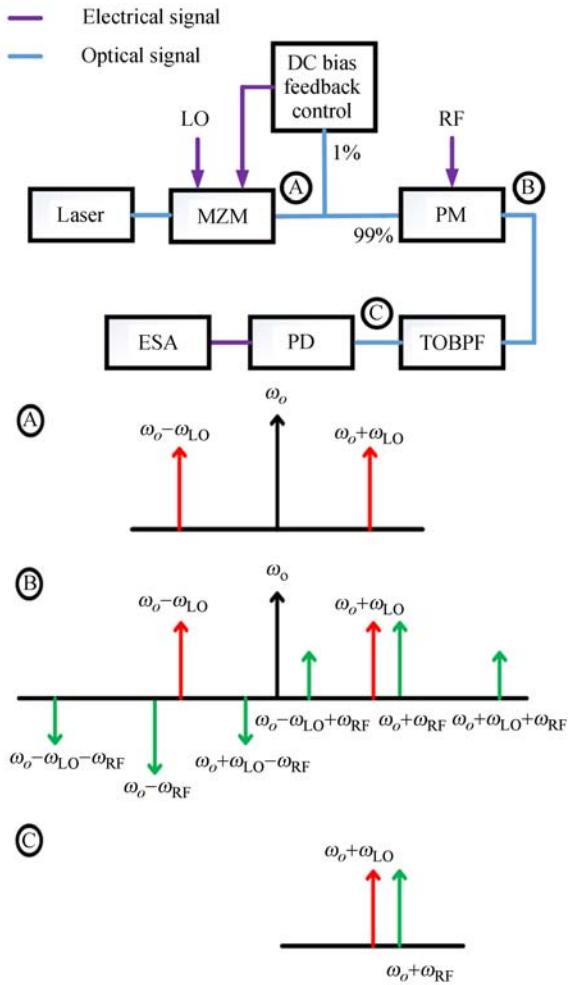


图 1 采用 MZM-PM 波光子下变频系统及其光谱图
Fig. 1 Scheme and spectrum of MZM-PM cascaded frequency down-conversion system

号通过 MZM 调制到光载波上,会产生多阶边带,但是由于高阶边带的强度较小,且最后会被后续的可调谐光带通滤波器(Tunable Optical Band-pass Filter, TOBPF)滤除,所以在此只考虑频率分别为 $\omega_0 + \omega_{LO}$ 和 $\omega_0 - \omega_{LO}$ 的正负一阶边带。这里利用自行设计的直流偏置反馈控制模块对 MZM 的直流偏置进行反馈控制,使 MZM 工作在正交点^[18]。调制后的信号光进入 PM,并被频率为 ω_{RF} 的射频信号进行调制,在频域中产生 3 对信号边带,频率分别为 $\omega_0 + \omega_{RF}$ 、 $\omega_0 - \omega_{RF}$ 、 $\omega_0 + \omega_{LO} + \omega_{RF}$ 、 $\omega_0 + \omega_{LO} - \omega_{RF}$ 、 $\omega_0 - \omega_{LO} + \omega_{RF}$ 、 $\omega_0 - \omega_{LO} - \omega_{RF}$ 。经过两次调制的信号光通过 TOBPF 滤波,只保留频率为 $\omega_0 + \omega_{RF}$ 和 $\omega_0 + \omega_{LO}$ 的两个边带。这两个边带在光电探测器(Photodetector, PD)中进行差频得到中频(Intermediate Frequency, IF)信号,其频率 $\omega_{IF} = \omega_{RF} - \omega_{LO}$,即完成了 RF 信号的频率下转换。最后,用频谱仪(Electrical Spectrum Analyzer, ESA)观测 PD 输出信号的频谱信息。

设激光器输出的光载波 $E_0(t)$ 为:

$$E_0(t) = \sqrt{P_0} \exp(j\omega_0 t), \quad (1)$$

式中 P_0 为光功率。光载波入射到 MZM 中进行强度调制,调制信号 $v_{LO}(t)$ 为:

$$v_{LO}(t) = V_{LO} \cos(\omega_{LO} t), \quad (2)$$

式中 V_{LO} 和 ω_{LO} 分别为 LO 信号的幅值和频率。设 MZM 的直流偏置电压和调制指数分别为 V_{DC} 和 χ_{LO} ,通过调节直流偏置电压使 MZM 工作在正交点,即 $\pi V_{DC}/V_\pi = \pi/2$,其中 V_π 为 MZM 的半波电压。调制后的信号光可表示为:

$$E_{MZM}(t) = \sqrt{P_0}(t) \cos\left[\frac{\pi V_{DC}}{2V_\pi} + \chi_{LO} \cos(\omega_{LO} t)\right] = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0(t) \{ \cos[\chi_{LO} \cos(\omega_{LO} t)] - \sin[\chi_{LO} \cos(\omega_{LO} t)] \}. \quad (3)$$

然后,信号光进入 PM 并由接收到的 RF 信号 $v_{RF}(t)$ 进行第二次调制,设 $v_{RF}(t)$ 为:

$$v_{RF}(t) = V_{RF} \cos(\omega_{RF} t), \quad (4)$$

式中 V_{RF} 和 ω_{RF} 分别为 RF 信号的幅值和频率。则经过相位调制后的信号光为:

$$E_{PM}(t) = E_{MZM}(t) \expj[\chi_{RF} \cos(\omega_{RF} t)], \quad (5)$$

式中 χ_{RF} 为 PM 的调制指数。根据第一类贝塞尔函数对式(5)进行展开,可得:

$$E_{\text{PM}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_o(t) \left\{ J_0(\chi_{\text{LO}}) + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} J_{2n}(\chi_{\text{LO}}) \cos(2n\omega_{\text{LO}}t) - 2 \sum_{n=1}^{+\infty} J_{2n-1}(\chi_{\text{LO}}) [\cos(2n-1)\omega_{\text{LO}}t] \right\} \times \left\{ \sum_{p=-\infty}^{+\infty} (j)^p J_p(\chi_{\text{RF}}) \exp(j p \omega_{\text{RF}} t) \right\}. \quad (6)$$

该信号进入 TOBPF 进行滤波,只保留频率为 $\omega_0 + \omega_{\text{LO}}$ 和 $\omega_0 + \omega_{\text{RF}}$ 的两个边带。因此滤波后的信号光为:

$$E(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \alpha E_o(t) \cdot \{ -J_1(\chi_{\text{LO}}) J_0(\chi_{\text{RF}}) \exp(j(\omega_{\text{LO}}t)) + j J_0(\chi_{\text{LO}}) J_1(\chi_{\text{RF}}) \exp(j(\omega_{\text{RF}}t)) \}, \quad (7)$$

式中 α 为滤波器对信号光强度的透过率。经光电探测后,探测器输出的光电流可以表示为:

$$i(t) = \mathcal{R} |E(t)|^2 = \frac{\mathcal{R}}{2} \alpha P_o \{ J_1^2(\chi_{\text{LO}}) J_0^2(\chi_{\text{RF}}) + J_0^2(\chi_{\text{LO}}) J_1^2(\chi_{\text{RF}}) - J_0(\chi_{\text{LO}}) J_1(\chi_{\text{LO}}) J_0(\chi_{\text{RF}}) J_1(\chi_{\text{RF}}) \cdot j [\exp(j(\omega_{\text{LO}}t - \omega_{\text{RF}}t)) - \exp(j(\omega_{\text{RF}}t - \omega_{\text{LO}}t))] \}, \quad (8)$$

式中 \mathcal{R} 为光电探测器的响应度。探测得到的 IF 信号的光电流为:

$$i(t) |_{\omega_{\text{IF}}} = \mathcal{R} \alpha P_o J_0(\chi_{\text{LO}}) J_1(\chi_{\text{LO}}) \cdot J_0(\chi_{\text{RF}}) J_1(\chi_{\text{RF}}) \cos(\omega_{\text{RF}} - \omega_{\text{LO}}) t. \quad (9)$$

可见,该系统通过强度和相位的二次调制,结合 TOBPF 可以实现对接收到的 RF 信号的频率下转换,获得较低频率的 IF 信号。该信号的强度与输入光功率、射频和本振信号强度直接相关。

3 性能参数的仿真与分析

3.1 增益

增益定义为模拟光链路输出射频信号功率与输入射频信号功率之比,增益越高表明系统的转换效率越高。结合式(9)可得 MZM-PM 级联下变频链路的增益为:

$$G = \frac{Z_{\text{out}} \mathcal{R}^2 \alpha^2 P_o^2}{4 P_{\text{RF}}} J_0^2(\chi_{\text{LO}}) J_1^2(\chi_{\text{LO}}) \cdot J_0^2(\chi_{\text{RF}}) J_1^2(\chi_{\text{RF}}), \quad (10)$$

式中 Z_{out} 为系统的输出匹配阻抗。可以看出,增益与 LO 和 RF 调制指数有关,而功率则是调制指数的直观体现。

利用 MATLAB 软件对增益进行仿真计算,仿真条件如下: $Z_{\text{out}} = 50 \Omega$, $\mathcal{R} = 0.9 \text{ A/W}$, $\alpha = 0.25$, $P_o = 11.6 \text{ mW}$,其中系统 LO 信号的功率为 0~16 dBm,接收 RF 信号的功率为 0~13 dBm。增益与接收射频信号功率、本振信号功率的归一化关系如图 2 所示。

由图 2 可见,在系统接收信号功率不变的条件下,增益随着系统本振功率的增加而增加,说明适当提升 LO 信号功率可以改善系统的增益。当 LO 功率为 13.3 dBm 时,增益达到最大值;而当系统 LO 信号的功率不变时,接收到的 RF 信号

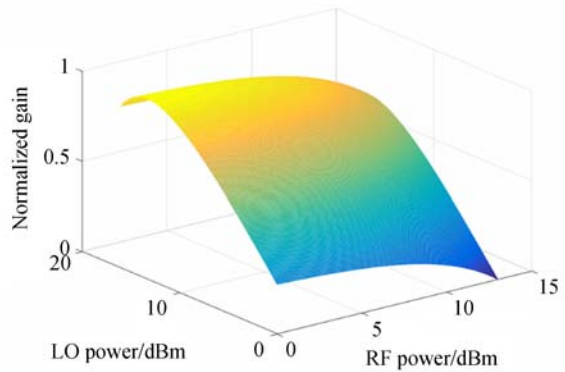


图 2 增益与本振和射频功率的仿真归一化曲线

Fig. 2 Simulation result of relationship between normalized gain and LO/RF powers

功率的增加对系统增益的影响并不明显,只有当 RF 功率提升到 12 dBm 以上时,增益开始出现明显的下降。这是由于接收信号功率的升高导致调制器的调制指数增大,当调制指数足够大时,贝塞尔函数不能再近似为线性关系,因此使得输出的光电流产生非线性变化,进而降低了增益。

3.2 无杂散动态范围

无杂散动态范围是指当交调功率刚好等于本底噪声功率时,输出信号与交调之间的功率比,它是衡量微波光子链路性能的重要指标。在该下变频系统的输出频谱中,三阶交调(Third Order Intermodulation Distortion, IMD3) 信号是最强的失真信号,其频率与中频信号相近,不易滤除,对中频信号的干扰最大,因此将 IMD3 信号作为评价该系统 SFDR 性能的失真信号。为了计算 IMD3 信号的输出功率,将双音 RF 信号作为系统的输入信号,其频率分别 ω_{RF1} 和 ω_{RF2} ,则信号可表示为:

$$v_{\text{RF}}(t) = V_{\text{RF}} [\cos(\omega_{\text{RF1}} t) + \cos(\omega_{\text{RF2}} t)], \quad (11)$$

式中 V_{RF} 为双音 RF 信号的幅度。根据该系统的下变频原理,可以得出其 IMD3 信号为:

$$i(t)_{IMD3} = R\alpha P_o \{J_0(\chi_{LO})J_1(\chi_{LO})J_0^2(\chi_{RF})J_2(\chi_{RF}) \cdot J_1(\chi_{RF})\} \cdot \cos(2\omega_{RF1} - \omega_{RF2} - \omega_{LO}). \quad (12)$$

可见,输出的光电流也随着 LO 和 RF 调制指数的变化而变化。因此系统的 SFDR 可以表示为:

$$SFDR = P_{IF} |_{P_{IMD3} = P_{NF}} - P_{NF}, \quad (13)$$

式中 P_{NF} 为系统本底噪声的功率。利用 MATLAB 软件对该系统的 SFDR 进行仿真计算,其仿真条件与增益仿真条件一致,得到 LO 信号功率为 0~15 dBm 时 SFDR 的仿真结果,如图 3 所示。从图 3(a)可以得出,在系统 LO 信号功率从 0 dBm 增大至 13 dBm 的过程中,该系统的 SFDR 值也在逐渐增加。这是因为在光电探测过程中,参与拍频的两个信号的强度将共同决定拍频后产生的中频信号的强度。而在下变频系统中,参与

拍频的两个调制边带信号分别由系统本振信号和接收射频信号经电光调制后得到。因此,系统本振信号功率的提升使得参与拍频的本振边带信号的强度也得到提高,进而增大了中频信号的输出功率,使得系统可以在更低的接收功率下得到高出底噪功率的中频信号,进而提高了 SFDR。当 LO 功率为 13 dBm 时, SFDR 值最大为 118.5 dB/Hz^{2/3},如图 3(b)所示。

4 实验与分析

4.1 下变频链路系统

根据图 1 中的系统结构搭建了 MZM-PM 级联的微波光子下变频实验链路,如图 4 所示。在系统中加入了前置和后置两个掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)。其中,前置 EDFA 可以加强该系统对低功率信号的接收能力,后置 EDFA 则用以提高 IF 信号的输出功率。实验中,光源采用分布反馈式(Distributed Feedback, DFB)窄线宽激光器,中心波长为 1 550 nm,线宽为 500 kHz,输出光功率为 11.6 dBm,光源经过前置 EDFA 放大后,入射进强度调制器,通过强度调制器将系统 LO 信号调制到光载波上,该调制器的插入损耗为 7.0 dB,等效阻抗为 50 Ω,半波电压为 5 V。调制后的信号光入射到相位调制器,并由 RF 信号进行第二次调制,其中相位调制器的插入损耗为 4.0 dB,等效阻抗为 50 Ω,半波电压为 7 V。经过两次调制的信号光通过可调谐光带通滤波器进行滤波,再由后置 EDFA 进行二次功率放大。使用 6 GHz 低噪声光电探测器完成对信号光的探测,探测器的响应度为 0.9 A/W,饱和光功率为 5 mW。利用光谱仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)对输出光谱进行分析,使用频谱仪对系统输出的 IF 信号进行观测。

由于 MZM 需要对其加载直流偏置,但是对于不同频率的 LO 信号, MZM 的半波电压也会不同,而且随着工作时间的增加,温度的变化也会导致 MZM 偏置点的漂移^[19]。为了让 MZM 的工作状态稳定,为其配置了直流偏置反馈控制模块,让其稳定工作在正交点。该模块的工作原理如下:首先,直流偏置反馈控制模块在输出一个正交点附件的电压后,会略微提高 MZM 的直流偏置电

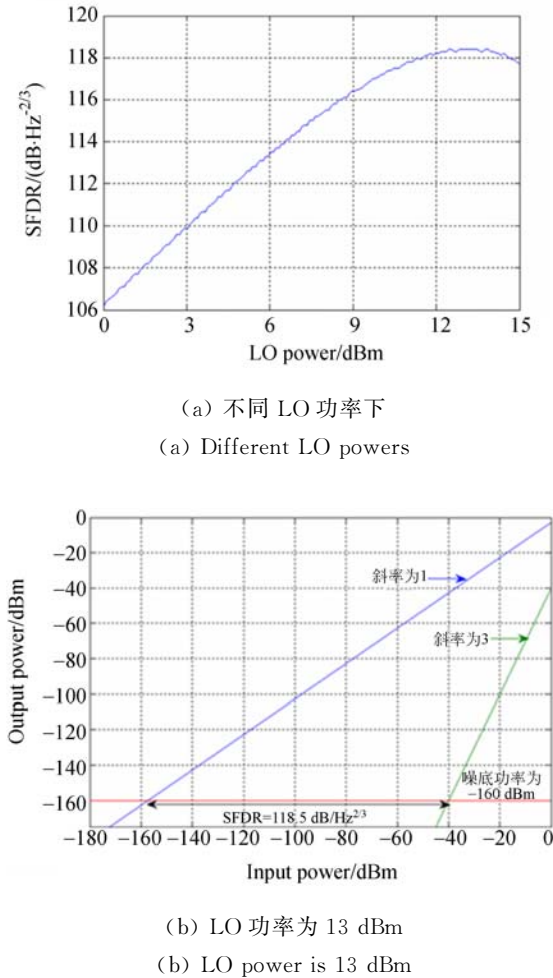


图 3 SFDR 仿真结果
Fig. 3 Simulation results of SFDR

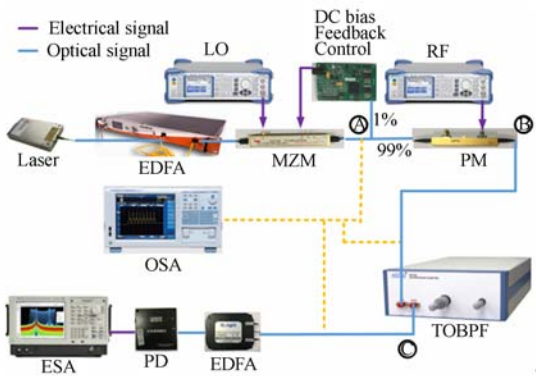


图 4 采用 MZM-PM 级联的微波光子下变频系统
Fig. 4 Experimental setup of MZM-PM cascaded frequency down-conversion system

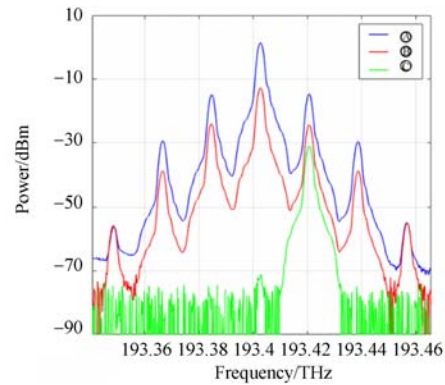


图 5 实验光谱图
Fig. 5 Experimental spectra

压,并记录下电压的增加量作为标准值;之后会根据反馈光电流计算出光电流的变化量,如果光电流的变化量大于标准值,模块会提高输出电压,反之就会降低输出电压。通过不断循环直到光电流的变化量与标准值相等,此时 MZM 已经稳定工作在正交点上,并且该模块只接收到 MZM 输出光功率的 1%,几乎不会影响系统下变频的输出功率。

4.2 性能测试

实验中,系统 LO 信号的频率为 18.0 GHz, RF 信号的频率为 18.1 GHz, LO 信号和 RF 信号的功率均为 13 dBm。通过光谱分析仪测量链路中相应节点的光谱图,结果如图 5 所示。由图可见,通过 MZM 和 PM 调制器可将 LO 振和 RF 信号调制到光波上,通过可调谐光带通滤波器后只保留 LO 和 RF 的一阶边带,后续进行光电探测即可获得中频信号。值得注意的是,由于 RF 和 LO 的频率十分接近,受光谱仪分辨率的限制,图 5 中无法清晰分辨 LO 和 RF 的一阶边带。

对该系统在不同 LO 信号功率下的增益进行测量,并将实验测量结果与仿真结果进行对比验证,结果如图 6 所示。可以看出随着 LO 功率的增加,实验测量的增益也随之提高。为了将实验数据与仿真结果进行对比,这里对仿真和实验测量得到的增益进行了归一化处理,可见测量数据与仿真结果具有相同的变化趋势。当系统 LO 功率为 13 dBm 时,增益为 -6.65 dB。值得说明的是,实验中用于产生 LO 信号的微波信号源的最大输出功率为 13 dBm,因此无法对更高 LO 信号功率下的增益进行实验测量。

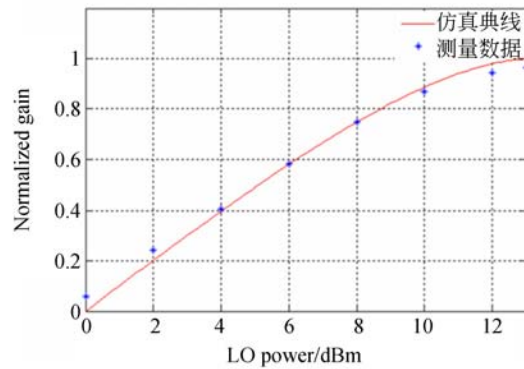


图 6 不同 LO 功率下的归一化增益
Fig. 6 Normalized gain for different LO powers

为了测试实验系统的无杂散动态范围,需要向系统输入双音 RF 信号。两个 RF 信号的频率分别为 18.100 GHz 和 18.097 GHz,系统 LO 信号的频率为 18.0 GHz。当 LO 功率为 13 dBm 时,可以得到 SFDR 为 $108.62 \text{ dB/Hz}^{2/3}$,如图 7 所示。实验数据与仿真结果之间相差 9.88 dB,这是由于实验结果受到各器件的插入损耗、光纤

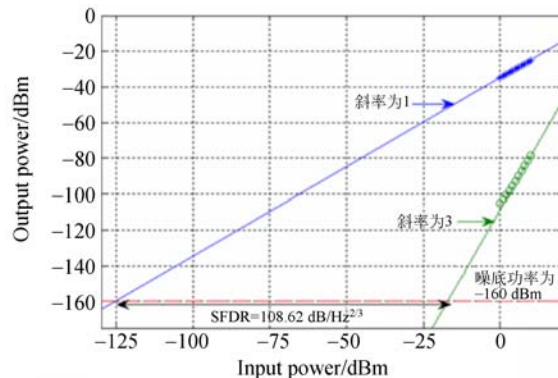


图 7 SFDR 测量结果
Fig. 7 Measurement result of SFDR

及射频线缆的衰减等影响,所以与理论值相比 SFDR 略有下降。

4.3 对比实验

为了验证 MZM-PM 级联的微波光子下变频系统的有效性,搭建了传统的 MZM-MZM 级联的微波光子下变频系统,并对系统性能进行了测试。传统系统使用的激光器、光电探测器、信号源和频谱仪等仪器及其设置均与前述实验相同,不同的是将系统中的 PM 换为 MZM,其插入损耗为 4.0 dB,等效阻抗为 50 Ω ,半波电压为 5.0 V,工作状态同样设定在正交点。测量条件与之前实验的测量条件相同。实验结果表明,该系统在 LO 功率为 13 dBm 时的增益为 -10.21 dB, SFDR 为 88.75 dB/Hz^{2/3}。

对比两种微波光子下变频系统的性能测量结果可知,MZM-PM 级联的下变频系统在增益和 SFDR 两方面均优于传统的 MZM-MZM 级联的下变频系统,增益提高了 3.56 dB,SFDR 提高了 19.87 dB/Hz^{2/3}。因此,MZM-PM 级联的下变频系统具有更高的 IF 输出功率,而且在不出信号

失真的前提下所允许接收到的信号功率更大,具有更好的下变频性能。

5 结 论

为了优化微波光子下变频的无杂散动态范围,本文提出了强度和相位级联调制的微波光子下变频方法。通过对下变频原理的理论推导,得到了增益和 SFDR 的表达式,并仿真分析了本振信号功率对系统性能的影响。构建了 MZM-PM 级联的微波光子下变频系统,对增益和无杂散动态范围进行了测试,并与传统的 MZM-MZM 级联的下变频系统性能进行了对比。实验结果表明,MZM-PM 级联的下变频系统具有更加优良的下变频性能,增益提高了 3.56 dB,SFDR 提高了 19.87 dB/Hz^{2/3}。采用强度和相位级联调制的下变频方法仅需要单个电压偏置,并且通过偏置反馈模块可实现 MZM 工作状态的稳定控制,系统结构简单、性能稳定,是实现大动态范围的微波光子下变频的有效途径。

参考文献:

- [1] COX C H III. *Analog Optical Links: Theory and Practice* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [2] SEEDS A J. Microwave photonics[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2002, 50(3): 877-887.
- [3] YAO J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [4] SEEDS A J, WILLIAMS K J. Microwave photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4628-4641.
- [5] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [6] COX C H III, ACKERMAN E I. Microwave photonics: Past, present and future[C]. *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, IEEE, 2008: 9-11.
- [7] MINASIAN R A. Photonic signal processing of microwave signals[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2006, 54(2): 832-846.
- [8] ROULSTON D J. Low-noise photoparametric up-converter[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1968, 3(4): 431-440.
- [9] MACDONALD R I, SWEKLA B E. Frequency domain optical reflectometer using a GaAs optoelectronic mixer[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(31): 4578-4582.
- [10] KOLNER B H, DOLFI D W. Intermodulation distortion and compression in an integrated electro-optic modulator[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(17): 3676-3680.
- [11] GOPALAKRISHNAN G K, MOELLER R P, HOWERTON M M, et al.. A low-loss downconverting analog fiber-optic link [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1995, 43(9): 2318-2323.
- [12] GOPALAKRISHNAN G K, BURNS W K, BULMER C H. Microwave-optical mixing in LiNbO₃ modulators [J]. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 1993, 41(12): 2383-2391.
- [13] HAAS B M, URICK V J, MCKINNEY J D, et al.. Dual-wavelength linearization of optically phase-modulated analog microwave signals [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(15):

- 2748-2753.
- [14] HAAS B M, MURPHY T E. Linearized down-converting microwave photonic link using dual-wavelength phase modulation and optical filtering [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(1):1-12.
- [15] LI P X, PAN W, ZOU X H, *et al.*. High-efficiency photonic microwave downconversion with full-frequency-range coverage[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015,7(4): 5500907.
- [16] CHAN E H W, MINASIAN R A. Microwave photonic downconverter with high conversion efficiency[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(23): 3580-3585.
- [17] HOWERTON M M, MOELLER R P, GOPALAKRISHNAN G K, *et al.*. Low-biased fiber-optic link for microwave downconversion[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(12): 1692-1694.
- [18] URICK V J, DIEHL J F, DRAA M N, *et al.*. Wide-band analog photonic links: some performance limits and considerations for multi-octave implementations [J]. *SPIE*, 2012, 8259:825904.
- [19] 贾喻鹏, 王大勇, 钟欣, 等. 基于光谱分析的强度调制器半波电压测量[J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(12): 1867-1871.
- JIA Y P, WANG D Y, ZHONG X, *et al.*. Measurement method for the half-wave voltage of intensity modulator based on spectrometer method[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015,41(12): 1867-1871. (in Chinese)

作者简介:



李静楠(1993—),男,四川南充人,硕士研究生,2015年于北京工业大学获得学士学位,主要从事微波光子学技术方面的研究。E-mail: lijingnan@emails.bjut.edu.cn

通讯作者:



王大勇(1968—),男,安徽芜湖人,博士,教授,1989年于武汉华中理工大学获得学士学位,1994年于中国科学院西安光机所获得博士学位,主要从事光学信息处理和光通信方面的研究。E-mail: wdyong@bjut.edu.com

导师简介:



王云新(1981—),女,河北沧州人,博士,副教授,2006年和2009年于天津大学分别获得硕士和博士学位,主要从事微波光子学与光学信息处理方面的研究。E-mail: yxwang@bjut.edu.cn



周涛(1978—),男,陕西汉中,人,博士,研究员,1998年于长春光学精密机械学院(现长春理工大学)获得学士学位,2003年于浙江大学获得博士学位,主要从事基于微波光子学、高速信息处理等新概念、新原理、新技术的研究。E-mail: zhj_zht@163.com