

## 利用 DFB 激光器非线性的高线性射频光传输链路

康子建, 谷一英, 朱文武, 范峰, 胡晶晶, 赵明山

(大连理工大学 物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 提出了一种利用分布反馈 DFB(Distributed Feedback laser)激光器的非线性对射频光传输系统动态范围进行优化的方案。实验研究了半导体分布反馈激光器的非线性, 基于实验结果分析了 DFB 激光器的偏置电流与线性性能的关系。在此基础上建立了对马赫曾德外调制(Mach-Zehnder modulator, MZM)射频光传输系统线性优化方案。实验结果表明, 该实验系统有效抑制了系统三阶交调量, 系统的动态范围得到改善, 当输入射频信号中心频率 4 GHz, 双音号间隔 10 kHz 时, 三阶交调失真抑制 23.1 dB, 无杂散动态范围提高 8.68 dB。

**关键词:** 分布反馈激光器; 三阶交调; 微波光纤传输; 无杂散动态范围

**中图分类号:** TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0806004

## Highly linear microwave photonic link based on nonlinearity of DFB laser

Kang Zijian, Gu Yiyang, Zhu Wenwu, Fan Feng, Hu Jingjing, Zhao Mingshan

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** A scheme of dynamic range optimization for Microwave Photonic Link with Distributed Feedback laser (DFB) was proposed. The nonlinearity of the laser was experimentally studied. The relationship between the bias current and the linear performance of the DFB laser was analyzed experimentally. Based on the experimental results, the linear system of Mach-Zehnder modulator(MZM) system was established. The experimental results show that the third order intermodulation of the system is suppressed, when the center frequency of the input frequency signal is 4 GHz and two tone separation is 10 kHz, the three order distortion is suppressed 23.1 dB and the spurious-free dynamic range can be improved by 8.68 dB.

**Key words:** distributed feedback lasers; third order intermodulation; radio-over-fiber; spurious-free dynamic range

收稿日期: 2015-12-20; 修订日期: 2016-01-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT14RC(3)057); 科技部国际合作项目(2014DFG32590);

国家 863 计划(2012AA040406); 辽宁省自然科学基金(2014020002)

作者简介: 康子建(1986-), 男, 博士生, 主要从事微波光子学方面的研究。Email: 980861928@qq.com

导师简介: 赵明山(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事聚合物光子集成于功能器件和微波光子学等领域的研究。

Email: mszhao@dlut.edu.cn

## 0 引言

微波光纤传输技术(Radio-over-Fiber, RoF)<sup>[1]</sup>由于其大带宽、低传输损耗、抗电磁干扰等优势得到了国内外研究人员广泛的关注,尤其在拉远天线、宽带无线局域网、光控相控阵天线等领域得到了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。但当多频率射频信号进入微波光传输系统时,由于调制器调制曲线的非线性效应导致电光调制的过程中会产生交调失真量,其中三阶交调量(Third-order intermodulation, IMD3)与基频信号相邻较近,无法单纯通过滤波器进行滤除,因此会严重影响系统的无杂散动态范围(Spurious-Free Dynamic Range, SFDR)<sup>[5-6]</sup>。

目前,国内外对微波光传输系统动态范围改善的方法主要有以下几种:前馈系统<sup>[7]</sup>、预失真系统<sup>[8]</sup>、数字相干接收<sup>[9]</sup>、调制器级联结构<sup>[10]</sup>、调制器并联结构<sup>[11]</sup>及双平衡调制器结构<sup>[12]</sup>、偏振调制器结构<sup>[13-14]</sup>等。以上方法均可对系统动态范围进行有效的改善,但仍然存在一定的局限。例如前馈系统、预失真系统、数字相干系统分别是在系统发射端或接收端对信号进行处理,从而提高链路动态范围,但由于电子器件速率限制,这些方法带宽有限且电路实现较为复杂;采用调制器级联或并联结构增加了外调制器的数量,提高了系统的复杂度和偏振稳定性;利用偏振调制器的偏振特性可实现系统动态范围的改善,然而对系统偏振态的控制复杂,系统成本明显提高。因此基于简化系统、降低系统成本、提高工程可行性的思路,文中提出一种基于DFB激光器非线性效应对微波光传输系统动态范围改善的方案,能够有效简化系统、降低系统成本、提高工程可行性。在理论分析和实验验证的基础上,对半导体激光器的低偏置区线性度进行了分析,利用激光器低偏置电流区间较强的非线性工作特性,在抑制外调制RoF系统三阶信号的同时保留了基频信号,进而改善了外调制RoF系统的线性度,提高了系统的动态范围。

## 1 系统原理与分析

### 1.1 线性化系统原理

线性化系统原理图如图 1 所示,输入信号由射

频功分器分为两路,分别通过 MZM 调制器和半导体激光器进行电光调制,之后通过光耦合器将光信号合路,最后通过光电探测器进行光电转换输出射频信号。其中外调制 RoF 系统激光器波长与直调激光器波长不同。调整系统中直调激光器的偏置电流,可使系统直调和外调链路单独输出的三阶交调量功率相同,通过调整直调链路延时参量,令直调 RoF 链路与外调 RoF 链路输出的三阶交调量在到达光电探测器(Photodetector, PD)时相位相差 180°,从而三阶交调量相消。但当半导体激光器工作在大偏置电流情况下,基频信号也会发生比较严重的相消效应,影响系统动态范围。因此,为了减少直调链路输出基频信号对系统的影响,对半导体激光器低偏置区的线性特性进行实验研究。

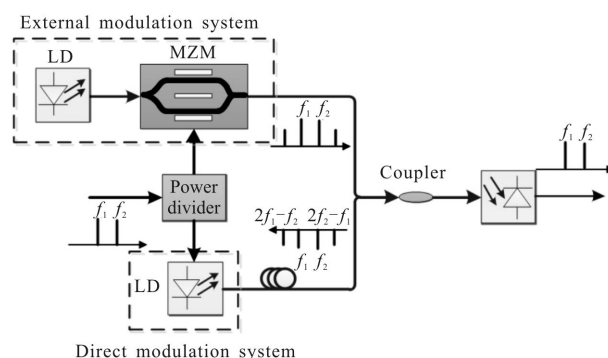


图 1 线性化系统原理框图

Fig.1 Schematic diagram of linearized link

系统中光电探测器采用 U2T-XPDV2120 光电探测器,其响应度为 0.65 A/W;外调激光器采用 Emcore-1782A 半导体激光器,工作波长为 1 550.12 nm,输出光功率为 16 dBm;MZM 调制器采用 Eospace 公司的强度调制器,其半波电压为 3.5 V,插入损耗为 3.2 dB,通过偏置点控制器使调制器工作在正交偏置点位置;直调半导体激光器采用 EM4-EM446 半导体激光器,工作波长为 1 545 nm。

### 1.2 半导体激光器低偏置区线性研究

根据 W. I. WAY 建立的半导体激光器非线性模型<sup>[15]</sup>可知,当激光器随着偏置电流的变小,系统三阶交调比(Carrier to third interference ratio, CIR)逐渐变小,为了得出具体的变化趋势,针对系统中的直调 RoF 链路,对其输出基频信号、三阶交调量与输入信号、偏置电流的关系进行分析。测试射频信号源

(RF generator)采用安捷伦 E8267D,其可通过内部调制输出双音信号;频谱分析仪(Spectrum Analyzer)采用安捷伦 E4440A。输出双音信号频率间隔为 10 kHz,中心频率为 4 GHz,通过频谱仪测量不同激光器偏置电流和输入功率时,链路输出基频信号与三阶交调量功率变化趋势。其中基频信号输出功率如图 2 所示,可知随着半导体激光器偏置电流增大,基频信号输出功率逐渐增大,在输入射频功率达 8 dBm 时接近饱和区。三阶交调量输出功率关系如图 3 所示,可知输入射频功率一定时,随着激光器驱动电流增大,三阶交调量的输出功率并非单调变化,随着偏置电流增大输出三阶交调功率逐渐增大,并在到达最高点后下降,激光器偏置电流为 18.5 mA 时到达最高值点。通过对比分析可知在低偏置电流情况下,直接调制 RoF 链路在输出相同功率三阶交调量时,输出基频信号功率可保持在相对较小的范围内。

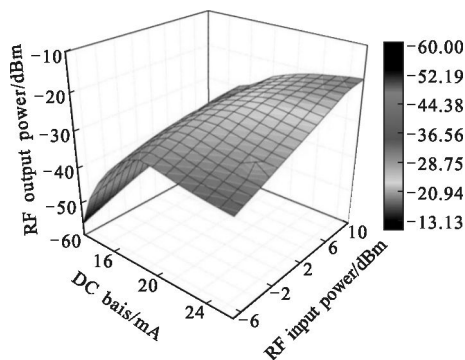


图 2 输出基频信号功率分布图

Fig.2 Output power distribution of the fundamental frequency signal

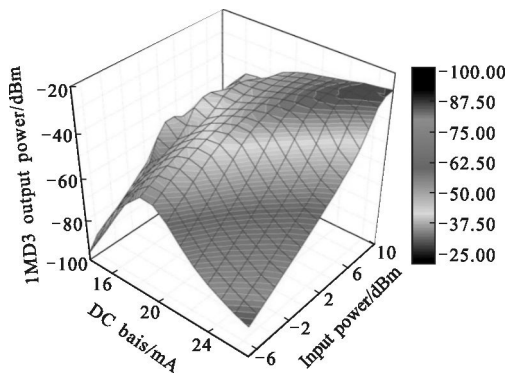


图 3 输出三阶交调功率分布图

Fig.3 Output power distribution of third order intermodulation

根据图 1 的原理结构,比较直调 RoF 系统和外调 RoF 系统输出基频信号和三阶信号关系。当输入相同射频信号功率时,通过调整激光器偏置电流,可

令直调系统和外调系统输出三阶信号功率相同。此时则可得当直调激光器工作在低偏置区时,直调系统和外调系统输出基频功率的关系。实验结果如图 4 所示,当直调半导体激光器工作在低偏置区,直调和外调系统输出等功率三阶交调量时,直调系统输出的基频信号功率远小于外调信号输出的基频信号功率值,相差约 20 dB。当直调信号输入前加 10 dB 增益时,当输出三阶信号相同时,在较小信号输入时基频信号相差约 35 dB。在直调链路前加入 10 dB 增益时,输出基频信号更小,更有利于系统性能的改善。

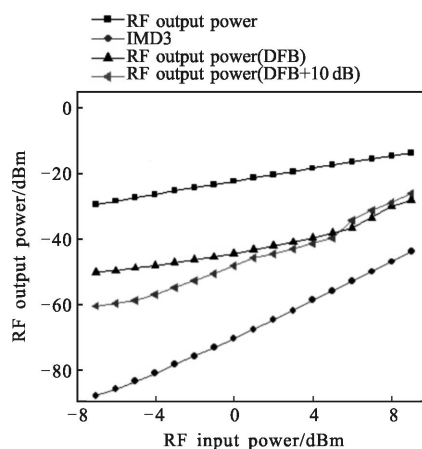


图 4 当三阶交调相同时输出基频信号关系图

Fig.4 Relationship of fundamental frequency signal when third order intermodulation is equal

## 2 链路原理与实验结果

根据以上分析搭建线性化系统,如图 5 所示,直调激光器前加 10 dB 射频增益,直调链路延时通过可调光延时线(Variable Optical Delay Line, VODL)进行调整,光耦合器采用 3 dB 耦合器。当系统输入频率

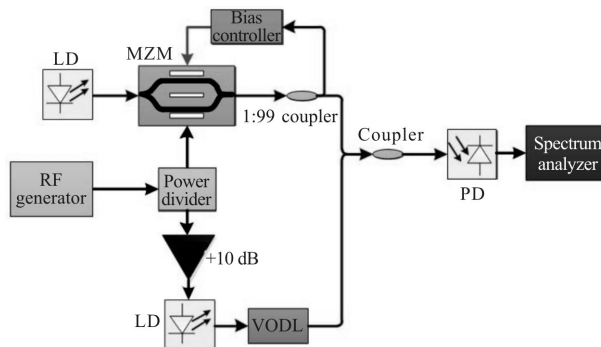


图 5 线性化传输系统结构图

Fig.5 Structure of linearized transmission system

间隔为 10 kHz,中心频率为 4 GHz 的双音信号,观测链路输出的基频信号阶信号和三阶交调功率。当直调激光器未工作,输出基频信号为-23.1 dBm 时,链路 CIR 为 33.79 dB;当直调激光器工作,输出基频信号功率不变,链路 CIR 为 55.05 dB,链路三阶交调量抑制 21.26 dB。

根据以上分析搭建线性化系统,如图 5 所示,直调激光器前加 10 dB 射频增益,直调链路延时通过可调光延时线(Variable Optical Delay Line, VODL)进行调整,光耦合器采用 3 dB 耦合器。当系统输入频率间隔为 10 kHz,中心频率为 4 GHz 的双音信号,观测链路输出的基频信号阶信号和三阶交调功率。当直调激光器未工作,如图 6(a)所示输出基频信号为-23.1 dBm 时,链路 CIR 为 33.79 dB;当直调激光器工作,如图 6(b)所示输出基频信号功率不变,链路 CIR 为 55.05 dB,可知链路三阶交调量抑制 21.26 dB。

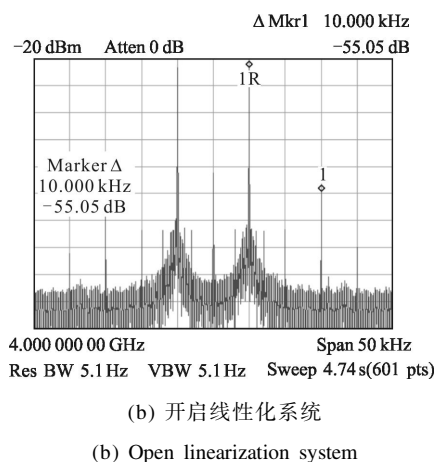
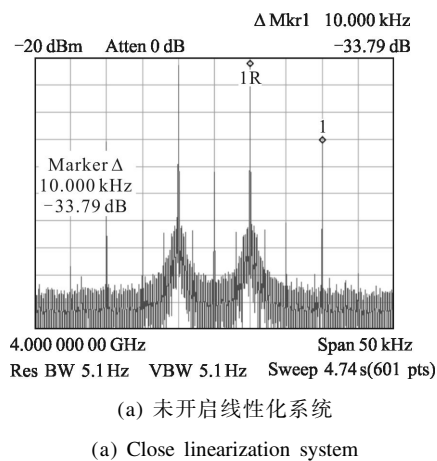


图 6 系统三阶交调抑制对比图

Fig.6 Diagram of suppression comparison of third order intermodulation

当下路直调激光器工作在低偏置范围,此时系统本底噪声为-164 dBm,直调系统输出基频信号功率远小于外调制系统输出的基频信号功率,因此直接调制 RoF 链路的引入基本不影响外调制 RoF 链路基频信号的输出功率。通过线性拟合得到系统动态范围如图 7 所示,在不开启下路直调激光器时,系统 SFDR 为  $93.18 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ ;当开启下路直调激光器时,系统 SFDR 为  $101.86 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ ,改善约为 8.68 dB。

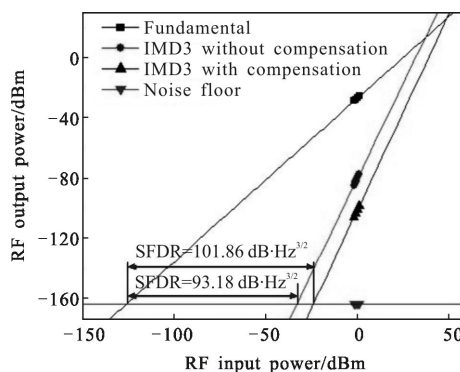


图 7 系统 SFDR 测试结果

Fig.7 System SFDR test result

### 3 结论

文中分析了商用 DFB 激光器低偏置区域系统非线性特性,通过对三阶交调信号与输出基频信号关系的研究,验证了输出相同三阶交调信号时,直调系统可输出更小的基频信号,进而利用激光器非线性实现外调制 RoF 系统的动态范围改善。该系统通过单一的直调半导体激光器实现了对外调制 RoF 链路三阶交调量的抑制,简化了系统结构,三阶交调信号抑制量可达 21.26 dB,系统 SFDR 改善约为 8.68 dB。

### 参考文献:

- [1] Yu Jiaoyan, Li Shangyuan, Zheng Xiaoping, et al. Highly linear transmission and EVM improvement of vector modulation signals for radio-over-fiber applications [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(10): 26-28.
- [2] Yao J. A tutorial on microwave photonics [J]. *IEEE Photonics Society Newsletter*, 2012, 26(2): 4-12.
- [3] Capmany Jose, Novak Dalma. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [4] Zhang Jianming, Lou Shuqin, Zeng Lulu, et al. A scheme of full duplex radio over fiber link model [J]. *Infrared &*

- Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1598–1604. (in Chinese)  
 张建明, 姜淑琴, 曾璐璐, 等. 全双工光载无线通信链路模型研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1598–1604.
- [5] Masella B, Hraimel Bouchaib, Zhang Xiupu. Enhanced spurious-free dynamic range using mixed polarization in optical single sideband mach-zehnder modulator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(15): 3034–3041.
- [6] Zhu Zihang, Zhao Shanghong, Zhang Hui, et al. Optimization of signal-noise distortion ratio for intersatellite microwave photonics link under dual-tone modulation [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2013, 42(2): 482–488. (in Chinese)  
 朱子行, 赵尚弘, 张辉, 等. 双音调制星间微波光子链路信号噪声失真比优化[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 482–488.
- [7] O' Connor S R, Thomas R C, Novak Dalma. Wideband adaptive feedforward photonic link[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(15): 2810–2816.
- [8] Urick V J, Rogge M S, Knap P F, et al. Wide-band predistortion linearization for externally modulated long-haul analog fiber-optic links [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(4): 1458–1463.
- [9] Lv Q, Xu K, Dai Y T, et al. I/Q intensity-demodulation analog photonic link based on polarization modulator[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(23): 4602–4.
- [10] Betts G E, O'Donnell F J. Microwave analog optical links using suboctave linearized modulators [J]. *Photonics Technology Letters*, 1996, 8(9): 1273–1275.
- [11] Korotky S K, De Ridder R M. Dual parallel modulation schemes for low-distortion analog optical transmission [J]. *Selected Areas in Communications*, 1990, 8(7): 1377–1381.
- [12] Wang Tao, Chang Qingjiang, Su Yikai, et al. Generation of linearized optical single sideband signal for broadband radio over fiber systems [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(4): 339–343.
- [13] Li W, Wang L X, Zhu N H. Highly linear microwave photonic link using a polarization modulator in a sagnac loop [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26 (1): 89–92.
- [14] Way W I. Large signal nonlinear distortion prediction for a single-mode laser diode under microwave intensity modulation[J]. *Lightwave Technology*, 1987, 5(3): 305–315.
- [15] Chen X, Li W, Yao J. Microwave photonic link with improved dynamic range using a polarization modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(14): 1373–1376.