

实现光载无线电系统三阶交调抑制的新方案

肖进良 蒲涛 邵鑫鸿 方涛 郑吉林 任珂 苏国瑞

解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

摘要 光载无线电(RoF)系统是近年来光通信研究的一个热点。抑制三阶交调从而增大无杂散动态范围(SFDR)是RoF系统优化的重要内容。为了提高RoF系统的动态范围,提出了一种基于光纤光栅陷波器和可调延迟线(TDL)抑制三阶交调的新方案。在对该方案理论分析的基础上,进行了实验验证。实验结果表明,该方案能有效抑制三阶交调,系统的SFDR提高了10.5 dB,且具有结构简单易实现、器件成本低的优势。

关键词 光通信; 无杂散动态范围; 三阶交调; 光载无线电

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1005002

New Scheme of Three Order Intermodulation Suppression in Radio over Fiber System

Xiao Jinliang Pu Tao Shao Xinhong Fang Tao Zheng Jilin Ren Ke Su Guorui

Institute of Communication Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China

Abstract Radio over fiber (RoF) system is a research hotspot of optical communication in recent years. Suppressing the three order intermodulation and improving spurious-free dynamic range (SFDR) are important optimization objectives in RoF system. In order to improve the dynamic range of RoF system, a new scheme which is based on a fiber Bragg grating notch filter and a tunable delay line (TDL) to realize the three order intermodulation suppression is proposed. After theory analysis to this scheme, an experiment is made to verify it. The experimental results show that it can effectively suppress the three order intermodulation and improve the system's dynamic range by 10.5 dB. In addition, this scheme has the advantages of simple structure and low cost.

Key words optical communications; spurious-free dynamic range; three order intermodulation; radio over fiber

OCIS codes 060.4510; 060.3735; 060.5625

1 引言

无线光载波(RoF)系统融合了光纤通信大带宽低损耗和无线通信方便灵活的优势,能够满足未来大数据移动通信的需求,因此在最近几年受到了密切关注^[1-4]。由于使用的副载波频率较高,因此RoF系统较多地采用外调制来实现射频副载波和数据的加载。由于外调制器的调制特性,使得射频信号电光转换过程中引入了诸如谐波和交调的频率成分。当输入信号功率较大时,在接收端解调出的信号中存在着三阶交调,大大限制了RoF系统的动态范围。

为了抑制三阶交调信号,众多学者展开了相关研究,并提出了各种解决方案。2014年利用双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)实现了三阶交调9 dB抑制,但是需要精确控制3个马赫-曾德尔强度调制器(MZM)中调制信号的相位,对偏置电流要求也较高^[5]。2013年利用偏振调制器(POLM)和Sagnac环相结合的方法使动态范围提高了16 dB^[6]。2014年利用相位调制器和光可调滤波器实现非线性的抑制,使动态范围提高了13 dB^[7]。此外对基于双波长双并联调制和两路输入前置光放大等方法进行了微波光链路的线性优化^[8-9]。

为了简单有效地实现三阶交调抑制,提出了一种基于光栅陷波器和可调延迟线(TDL)的新方案。该方案

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-05-21

基金项目: 国家973计划(2012CB315603)

作者简介: 肖进良(1984—),男,硕士研究生,主要从事微波光子学方面的研究。E-mail: lengyueyu@163.com

导师简介: 蒲涛(1974—),男,博士生导师,教授,主要从事光通信方面的研究。E-mail: nj_putao@163.com(通信联系人)

采用一个MZM加载射频信号,经两条平行支路,通过对平行支路分别进行滤波和延迟控制的方法使三阶交调得到抑制,从而提高系统的无杂散动态范围(SFDR)。

2 方案原理分析

原理框图如图1所示,可调激光器(TLD)输出的光载波进入MZM由双音微波信号进行调制。调制后的光信号通过一个偏振分束器(PBS)后分成上下两条支路,上支路经过一个光纤光栅陷波器滤除光载波。下支路经过一个延迟线和一个偏振控制器(PC)进入光耦合器(OC)与上支路信号合路。PBS的作用是和PC1结合并通过调节PC1改变上下支路的功率关系,可调延迟线用于补偿由于光纤光栅(FBG)引入时延造成的上下两支路的时延差。OC合路后的光信号通过光电探测器(PD)接收转化为电信号经电信号放大器(EA)后进入频谱仪(ESA)中观察。

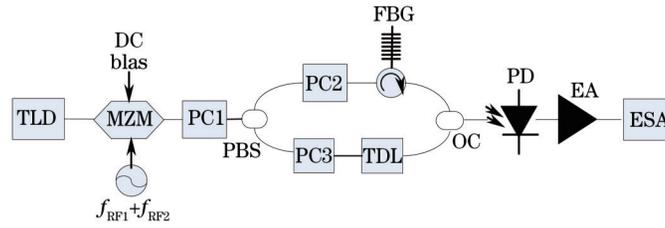


图1 实验原理框图

Fig.1 Experimental principle diagram

可调激光器输出的光信号可表示为 $E_c(t) = E_c \exp(j\omega_c t)$, 2个微波信号分别为 $f_{RF_1} = V_1 \cos \omega_1 t$, $f_{RF_2} = V_2 \cos \omega_2 t$ 。

光载波经MZM调制后,输出的信号可表示为

$$E(t) = \frac{E_c}{\sqrt{2}} \exp(j\omega_c t) \times \left\{ \exp\left[j \frac{\pi(V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t)}{V_\pi} \right] + \exp\left(j \frac{\pi V_{DC}}{V_\pi} \right) \right\} + \frac{E_c}{\sqrt{2}} \exp(j\omega_c t) \times \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} j^{k+l} J_k(m_1) J_l(m_2) \exp[j(k\omega_1 t + l\omega_2 t)] + n \right\} \quad (1)$$

式中 V_{DC} 为MZM的偏置直流(DC)电压, V_π 为MZM的半波电压。 $J_x(m)$ 为第一类贝塞尔函数,且 $m_1 = \frac{\pi V_1 \cos \omega_1 t}{V_\pi}$, $m_2 = \frac{\pi V_2 \cos \omega_2 t}{V_\pi}$, $n = \exp\left(j \frac{\pi V_{DC}}{V_\pi} \right)$ 。

令双音信号的输入功率相等则有 $V_1 = V_2 = V$, 则 $m_1 = m_2 = m$, 且 $E(t) = \frac{E_c}{2} \exp(j\omega_c t) \times \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} j^{k+l} J_k(m) J_l(m) \exp[j(k\omega_1 t + l\omega_2 t)] + n \right\}$, 拍频后,可得到电信号 $I(t)$ 为

$$I(t) = \eta |E(t)|^2 = \eta \frac{E_c^2}{\sqrt{2}} \{ [j2J_1(m)J_0^3(m) + j2nJ_0(m)J_1(m) - jJ_2(m)J_1(m)J_0^2(m) - jJ_0(m)J_1^3(m) + jJ_2(m)J_3(m)J_0^2(m) + jJ_1^3(m)J_2(m)] (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) + j[2J_2(m)J_1(m)J_0^2(m) + n] - J_2(m)J_1(m)J_0^2(m) - J_1^3(m)J_0(m) + jJ_3(m)J_0(m)J_1^2(m) \cdot [\cos(2\omega_1 t \pm \omega_2 t) + \cos(2\omega_2 t \pm \omega_1 t)] \} \quad (2)$$

(2)式即为未加优化方案时系统输出的射频(RF)信号。 η 为PD的转化系数。由于三阶以上的高阶贝塞尔项的数值较小,因此(2)式中只考虑三阶及三阶以下的项。

调节上下两路的分光比,并且通过光纤光栅陷波滤波器抑制上支路的载波成分。则上支路输出的光信号 $E_1(t)$ 为

$$E_1(t) = \frac{E_c}{2} \exp(j\omega_c t) \times \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} j^{k+l} J_k(m_1) J_l(m_2) \exp[j(k\omega_1 t + l\omega_2 t)] + \mu [n + J_0(m_1)J_0(m_2)] \right\} \quad (3)$$

式中 μ 表示载波抑制的系数,若光栅对载波的陷波幅度较大,可令 $\mu \approx 0$ 。下支路的光信号 $E_2(t)$ 为

$$E_2(t) = \frac{E_c}{2} \exp(j\omega_c t) \times \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \alpha \cdot \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} j^{k+l} J_k(m_1) J_l(m_2) \exp[j(k\omega_1 t + l\omega_2 t)] + n \right\}, \quad (4)$$

式中 α 为上下支路的相位差。经 OC 合路输出的光信号 $E'(t)$ 为

$$E'(t) = \frac{E_c}{2} \exp(j\omega_c t) \times \left\{ \left(\sqrt{\frac{2}{3}} + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \alpha \right) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} j^{k+l} J_k(m_1) J_l(m_2) \exp[j(k\omega_1 t + l\omega_2 t)] + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \alpha [n + J_0(m_1) J_0(m_2)] \right\}, \quad (5)$$

拍频后得到电信号 $I'(t)$ 为

$$I'(t) = \eta |E'(t)|^2 = \eta \frac{E_c^2}{2} \left\{ \left[\sqrt{\frac{1}{3}} \cos \alpha \left(\sqrt{\frac{2}{3}} + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \alpha \right) \cdot [j2J_1(m)J_0^3(m) + j2nJ_0(m)J_1(m)] + \left(\sqrt{\frac{2}{3}} + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \alpha \right)^2 \cdot [-jJ_2(m)J_1(m)J_0^2(m) - jJ_0(m)J_1^3(m) + jJ_2(m)J_3(m)J_0^2(m) + jJ_1^3(m)J_2(m)] \right] \cdot (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) + j \left[\sqrt{\frac{1}{3}} \cos \alpha \left(\sqrt{\frac{2}{3}} + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \alpha \right) 2J_2(m)J_1(m)[J_0^2(m) + n] + \left(\sqrt{\frac{2}{3}} + \sqrt{\frac{1}{3}} \cos \alpha \right)^2 \cdot [-J_2(m)J_1(m)J_0^2(m) - J_1^3(m)J_0(m) + jJ_3(m)J_0(m)J_1^2(m)] \right] \cdot [\cos(2\omega_1 t \pm \omega_2 t) + \cos(2\omega_2 t \pm \omega_1 t)] \right\} \quad (6)$$

拍频后的电信号中基频和三阶交调的幅度与相位 α 的关系如图 2 所示。

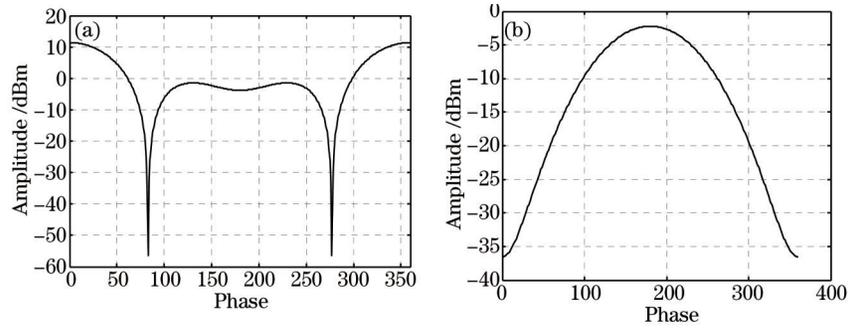


图 2 (a) (6)式中基频幅度与相位 α 的关系曲线;(b) (6)式中三阶交调幅度与相位 α 的关系曲线

Fig.2 (a) Relation curve between the fundamental frequency amplitude and phase α based on Eq. (6);

(b) relation curve between the three order intermodulation frequency amplitude and phase α based on Eq. (6)

由图 2 可以看到 α 在第一象限和第四象限时的基频幅度明显比第二象限和第三象限的大,而三阶交调 (IMD3) 幅度则是明显比第二象限和第三象限的小。

当延迟线补偿了上下两支路造成的时延差时,仿真输出射频功率与调制系数 m 的关系,由于调制系数实际改变的是输入 RF 功率,为了便于对比,仿真输出射频信号功率与输入射频信号功率的关系,如图 3 所示。

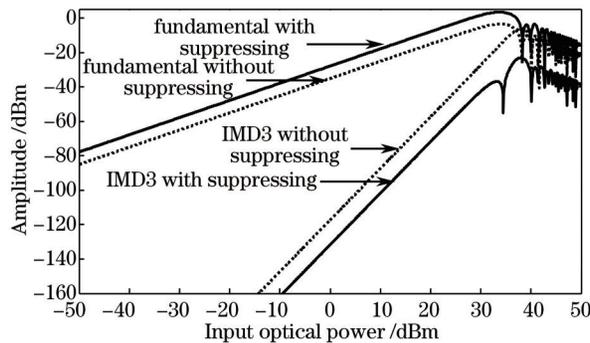


图 3 抑制前后的基频与三阶交调的幅度

Fig.3 Amplitude of fundamental frequency and three order intermodulation before and after suppressing

图3中,实线为经过优化方案的基频和三阶交调信号经过电放大器后的功率,虚线为未经过优化的基频和三阶交调信号的功率。从图中可看出,对于同样的输入功率,优化后的基频与三阶交调的功率比明显比未优化的高。

使用光通信仿真软件VPI仿真得到了同样的结果,如图4所示。经过优化,基频与三阶交调的差值增加了19 dB。

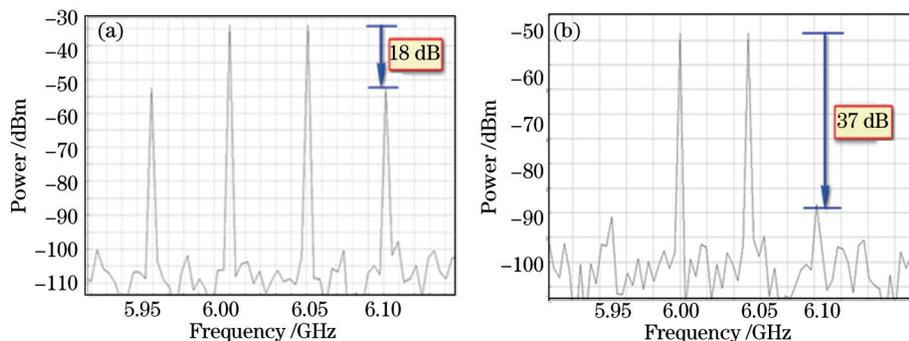


图4 VPI仿真结果。(a) 未加优化方案; (b) 加优化方案

Fig.4 VPI simulation results. (a) Without optimization scheme; (b) with optimization scheme

3 实验结果及讨论

3.1 实验结果

实验原理框图如图1所示,双微波源由矢量信号发生器(Agilent N5182A,输出6.02 GHz频率和6 GHz频率)产生,可调激光器(Agilent 8163B)产生波长为1550.349 nm的光载波进入MZM被双微波信号调制。调制后的信号通过PBS后分成上下两条支路,上支路经过一个由相移光纤光栅构成的陷波器滤除载波,进入耦合器进行合路。下支路经过一个偏振控制器和一个延迟线(General photonics MDL-002)进入耦合器合路。耦合器合路后的光信号通过PD接收转化为电信号经放大后进入频谱仪(AV4033)中观察。

实验中,需要调节PC1找到上下支路最佳的功率比,调节可调延迟线补偿由于光纤光栅引入时延造成的上下两支路的时延差。

图4为频谱仪中观察到的电信号频谱图。从结果看到,当未加三阶交调抑制方案,即只有下支路时,PD中输出的电信号如图5(a)所示,此时基频信号与三阶交调信号的功率差为14.81 dB。当加入上下支路进行三阶交调抑制时,PD拍出的信号如图5(b)所示。此时基频信号与三阶交调信号的功率差为26.83 dB。实验中由于噪声和衰减较大,增益较小,因而基频信号幅度和三阶交调信号幅度的差值较小,但三阶交调被明显抑制了。

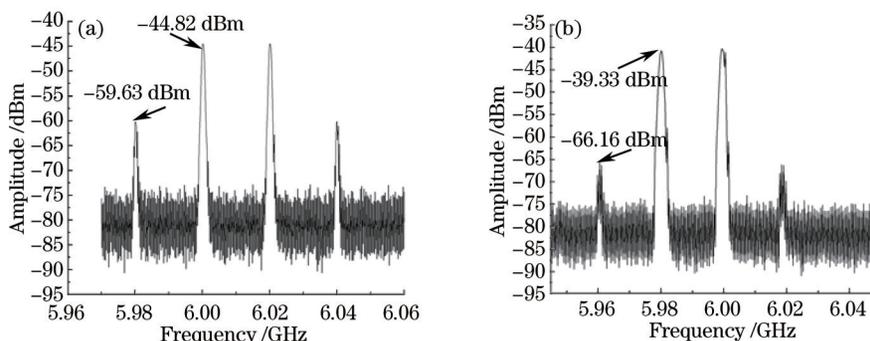


图5 (a) 未抑制三阶交调的频谱图; (b) 经抑制三阶交调的频谱图

Fig.5 (a) Spectral chart without suppressing of three order intermodulation; (b) spectral chart with suppressing of three order intermodulation

将实验结果进行拟合可得到图5所示的系统的动态范围。图6中虚线为只有下支路即未经过三阶交调抑制时的动态范围图,SFDR为 $72.5 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ 。图6中实线为加入上下两路进行三阶交调抑制时的动态范围图,其SFDR为 $83 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ 。相比优化前SFDR提高了10.5 dB。

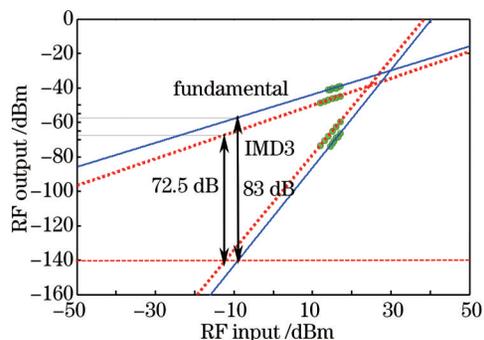


图6 虚线为未加抑制时的SFDR;实线为加抑制方案时的SFDR

Fig.6 Dotted lines express SFDR without suppressing of three order intermodulation. The solid lines express SFDR with suppressing of three order intermodulation

3.2 讨论

该方案中,动态范围虽然得到有效提高,但是动态范围值较小。其影响因素主要是MZM的偏置电压以及延迟线改变的时延量。该系统中使用MZM进行调制,MZM的半波电压越小,线性区越短,SFDR就越小。延迟线改变的时延量能完全补偿上下两条支路的时延差时,性能较好;若不能有效补偿,则性能受影响。

4 结论

提出一种抑制三阶交调信号较为简单实用的方案,该方案仅使用一个MZM结合相移FBG(PS-FBG)和延迟线通过两条支路的方法较好地抑制了三阶交调。该方案已通过实验验证,实验结果显示该方案在载噪比较小的情况下将SFDR提高10.5 dB,较好地改善了系统的性能。

参考文献

- 1 Cheng G, Guo B, Liu S, *et al.*. Novel wavelength division multiplex-ratio over fiber-passive optical network architecture for multiple access points based on multitone generation and triple sextupling frequency[J]. *Opt Eng*, 2014, 53(1): 016108.
- 2 Dalir H, Matsutani A, Ahmed M, *et al.*. High frequency modulation of transverse-coupled-cavity VCSELs for radio over fiber applications[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2014, 26(3): 281-284.
- 3 Joseph A, Prince S. Performance analysis and optimization of radio over fiber link[C]. *IEEE 2014 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, 2014: 1599-1604.
- 4 Oliveira R S, Frances C R L, Costa J, *et al.*. Analysis of the cost-effective digital radio over fiber system in the NG-PON2 context [C]. *IEEE 2014 16th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks)*, 2014: 1-6.
- 5 Li J, Yu S, Gu W. A broadband linearization in microwave photonics link based on integrated parallel Mach-Zehnder modulator[C]. *Frontiers in Optics*, 2014: JW3A. 23.
- 6 Li W, Yao J. Dynamic range improvement of a microwave photonic link based on bi-directional use of a polarization modulator in a Sagnac loop[J]. *Opt Express*, 2013, 21(13): 15692-15697.
- 7 Li P, Yan L S, Zhou T, *et al.*. Improved linearity in down-converted analog photonic link by polarization manipulation[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(9): 2641-2644.
- 8 Li Xianghua, Yang Chun, Chong Yuhua, *et al.*. High dynamic range microwave photonic link based on dual-wavelength dual-parallel modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0105003.
李向华, 杨春, 崇毓华, 等. 基于双波长双并联调制的大动态范围微波光子链路[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0105003.
- 9 Zhu Zihang, Zhao Shanghong, Zhao Hui, *et al.*. Optimization of optically preamplified inter-satellite microwave photonics links with two radio-frequency signals input[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0106003.
朱子行, 赵尚弘, 赵辉, 等. 两路输入前置光放大星间微波光子链路优化[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0106003.

栏目编辑: 王晓琰