

文章编号: 0253-2239(2010)11-3140-08

基于 FP-LD 注入的无本振光载波全光混频技术

吴 波¹ 于晋龙¹ 张祖松¹ 韩丙辰² 罗 俊¹ 郭精忠¹ 张晓媛¹ 王 菊¹ 杨恩泽¹

(¹ 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072; ² 山西大同大学物理与电子科学学院, 山西 大同 037009)

摘要 提出了一种基于低速信号注入法布里-珀罗型激光二极管(FP-LD)的无本振全光混频技术,利用 FP-LD 的一个纵模和外部注入信号光的四波混频作用生成的边带锁定纵模产生光载射频信号。通过改变 FP-LD 的注入光信号强度和偏振态实现副载波频率可变,并根据 FP-LD 注入锁定特性分析实验结果得到的不同边模抑制比。实验中采用 2.7, 2.5, 1.25 Gb/s 非归零(NRZ)码注入 FP-LD 实现副载波频率分别为 16.2, 10.0, 18.2 和 20.0 GHz 的全光混频,测量 16.2 GHz 的副载波得到了 10 kHz 偏移处单边带相位噪声为 -81.2, -87.7 dBc/Hz。

关键词 光通信;全光混频;注入锁定;四波混频;边模抑制比

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3140

A Local Oscillator-Free Frequency Mixing Based on FP-LD Injection

Wu Bo¹ Yu Jinlong¹ Zhang Zusong¹ Han Bingchen² Luo Jun¹

Guo Jingzhong¹ Zhang Xiaoyuan¹ Wang Ju¹ Yang Enze¹

(¹ School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract a novel local oscillator (LO)-free frequency mixing based on FP-LD injection is proposed. The sideband of four wave mixing (FWM) between external injection light and one longitudinal mode of FP-LD generates sideband locking longitudinal mode which then produces the radio-frequency (RF) signal. By adjusting the intensity and polarization of injection signal, different mixing frequency is obtained and the different side-mode suppression ratio is analyzed theoretically. Subcarrier of 16.2, 10.0, 18.2 and 20.0 GHz is obtained from 2.7, 2.5 and 1.25 Gb/s NRZ signal injection into FP-LD respectively, in which the single sideband phase noise of -81.2 and -87.7 dBc/Hz at 10 kHz frequency deviation of 16.2 GHz is measured.

Key words optical communication; all-optical frequency mixing; injection locking; four wave mixing (FWM); side-mode suppression ratio (SMSR)

1 引 言

伴随着以高清电视(HDTV)和 3G 通信的多媒体业务为代表的宽带业务的发展,用户对于带宽需求的增加推动了以光载射频(RoF)为代表的技术发展, RoF 系统是基于简化基站功能的理念所设计,将复杂的数据处理和业务数据汇集集中在光线路终端(OLT),而将基带数据调制的微波/毫米波(副载波)加载到光上利用光纤传送到远程节点后经基站光电转换放大形成蜂窝覆盖^[1]。从目前情况来看,

主要集中在光生微波/毫米波的芯片研制^[2]、低成本的上下变频模块研究^[3]、光纤链路的传输对高频信号恶化的补偿、传输线性度、带宽利用率和整个接入网的网络结构设计。RoF 系统中,基带信号通过在发射端与本振信号混频或者在中心局端将基带信号与高频本振分别调制到光上传输到基站端实现混频。基于调制器的边带控制法、半导体光放大器(SOA)中的载流子浓度的交叉增益调制(XGM)和非线性偏振旋转效应(NPR)以及电吸收调制器

收稿日期: 2009-12-14; 收到修改稿日期: 2010-03-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736035)和国家自然科学基金(60977053)资助课题。

作者简介: 吴 波(1983—),男,博士研究生,主要从事光子微波技术方面的研究。E-mail: wubo314@163.com

导师简介: 于晋龙(1969—),男,博士,教授,主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

(EAM)中的交叉吸收调制(XAM)效应实现的全光混频技术亦有相关报道^[4~7]。

本文提出了一种基于信号注入的法布里-珀罗型激光二极管(FP-LD)实现无本振全光混频技术,与当前 RoF 系统中混频模块中高成本的高频射频、微波本振源相比,此技术具有成本低和结构简单的特点,对现实应用有一定的参考价值。

2 结构设计与原理分析

图 1 是基于无源光网络(PON)提出的一种新型的无本振全光混频系统的概念设计,图中 Central

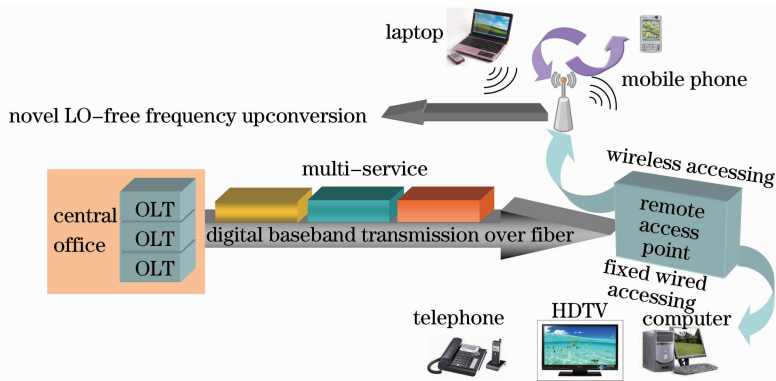


图 1 基于新型 PON 的有线-无线融合接入网概念设计

Fig. 1 Conceptual design of wired-wireless accessing convergence based on novel PON

FP-LD 的外部注入光用 λ_s 表示,与 λ_s 最靠近的一个 FP-LD 纵模表示为 λ_0 ,外部光注入使得 FP-LD 的有源区的自由载流子浓度下降,折射率增大,FP-LD 的所有纵模会出现波长红移现象^[8]。因为以上原因,在传统的基于 FP-LD 的波长注入锁定实验中,注入光波长通常要比 FP-LD 的自由振荡波长略大,保证在光注入使纵模红移后与注入光波长对准,这样外部光进入激光器稳定的增益区并抑制腔内的其他模式实现波长的注入锁定。在文献^[9]中提及,当 λ_s 与 λ_0 非常接近的时候(λ_s 略小于 λ_0),FP-LD 光场呈现不稳定状态,这是因为光注入 FP-LD 之后纵模波长红移导致本已非常接近的两波长间隔增大导致注入光完全处于纵模的注入锁定带宽之外,此时两光场之间呈现四波混频(FWM)作用,FP-LD 的纵模与注入光之间的 FWM 作用早在 1989 年已有报道^[10]。

在高非线性光纤、半导体增益介质中的四波混频现象可以认为是介质中的两个光场的拍频信号调制两个光场,在两个光场产生两个边带,如图 2(a)、(b)所示,图中 FSR 为 FP-LD 的自由光谱区, s_1, s_2, s_3, s_4 为 λ_0 和 λ_s 四波混频产生的频率分量。两束光 λ_s 与 λ_0 是相互独立的光源,所以它们的拍频信号产

office 为中心站,OLT 为光线路终端机,Multi-Service 为多业务服务,Remote access point 为远程接入节点,Fixed wired accessing 为有线接入,Wireless accessing 为无线接入。这种基于 FP-LD 注入锁定的无本振全光混频技术避免了在光纤中传输高频微波/毫米波信号,而在现有的光接入网的基带传输系统上在远端基站(BS)或者光用户单元侧(ONU)端利用一个 FP-LD 激光器实现无本振混频技术,并通过功率和偏振态的变化来实现对混频频率的控制。

生的调制边带会呈现频率上的不稳定性,如图 2(a)所示,在直流光注入的前提下,调制边带 s_2 的不稳定性决定了在 FWM 的整个积累过程中 s_2 不能总是稳定地置于纵模 λ_0 的锁定范围,这在后面的实验中[直流注入得到的不稳定拍频的电谱,如图 11(d)]得到了证明。当注入数据调制的信号光后,两光四波混频的拍频信号同样是数据调制的, s_2 成为有调制带宽的边带信号,大量的数据离散谱能够保证 s_2 在 FWM 的积累过程中置于纵模 λ_0 的锁定范围之内概率增大,从而实现稳定的锁定状态,如图 2(b)所示。由于 s_2 边带由 λ_s 上的数据调制产生,所以由 s_2 锁定的 λ_0 与 λ_s 之间的相干性得以增强。

由于对于不同的注入光功率 FP-LD 的纵模波长红移量不同,所以改变注入光功率可以实现高频副载波的频率可变,而由于 FP-LD 对于 TM 模式的光场呈现强吸收性,只有 TE 模式的光场分量能够决定纵模的红移量,因此改变注入光的偏振态亦可改变高频副载波的频率。在通常的基于 FP-LD 的注入锁定实验中,锁定时的边模抑制比(SMSR)取决于注入锁定参数如频率失谐量和相对光强比 E_{in}/E_{sol} (E_{in} 为注入光场, E_{sol} 为 FP-LD 自由振荡时的光

场)。FWM 作用的转换效率,即能量转移效率是随着两光的频率间隔增大而减小,所以在相同的激光二极管(LD)偏置电流下高频率副载波的产生应该

伴随着低强度 s_2 边带的产生,从而对应注入锁定相对光强比 E_{in}/E_{sol} 中 E_{in} 项变小,从而导致 SMSR 变小,本文实验部分以实验结果予以了证明。

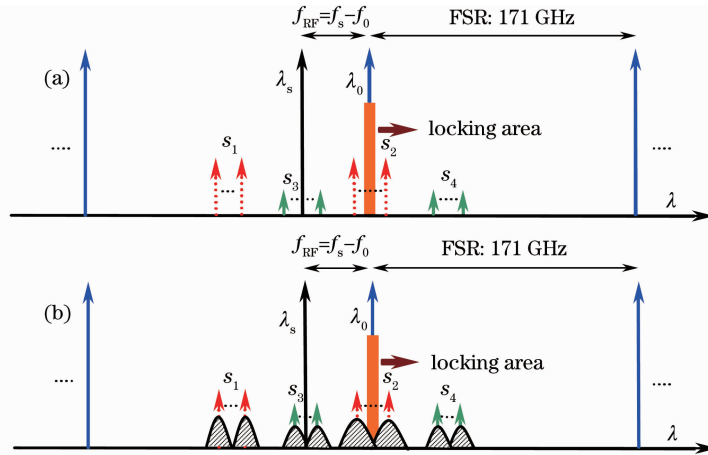


图 2 基于 FP-LD 中四波混频边带锁定纵模的原理图。(a)直流光注入下 LD 的非锁定状态,(b)信号光注入下的锁定状态
Fig. 2 Principle of longitudinal mode locking by FWM in FP-LD. (a) unlocking state of LD under the CW injection, (b) locking state under the signal injection

3 实验结果与分析

图 3 所示为基于 FP-LD 注入的无本振全光混频实验原理图,图中 PC 为偏振控制器,MZM 为马赫-曾德尔强度调制器,VOA 为可变光衰减器,OC 为光环形器,PPG 为伪随机码型发生器,SG 为信号

发生器,ED 为误码测试仪,RFA 为射频放大器,OSA 为光谱分析仪,OSC 为光示波器,实验采用的多量子阱结构 FP-LD,自由光谱区(FSR) $f_{SR} = 171$ GHz,阈值电流约为 10 mA。

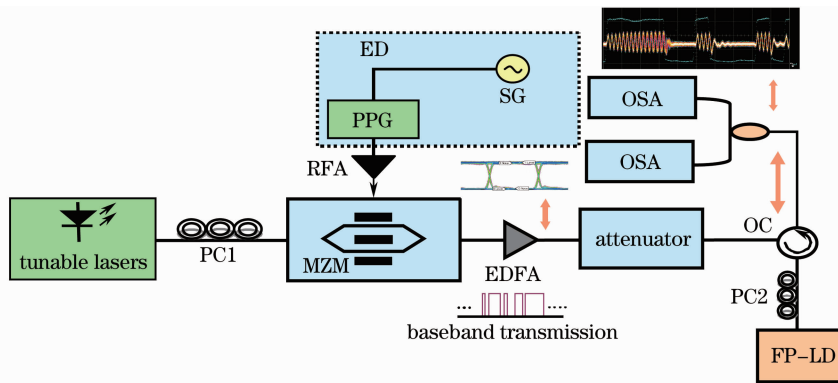


图 3 基于 FP-LD 注入的无本振全光混频系统实验结构图

Fig. 3 Experimental setup of oscillator-free all-optical frequency mixing based on FP-LD injection

可调光源在马赫-曾德尔型的铌酸锂晶体电光强度调制器中被伪随机码型发生器产生的伪随机二进制序列(PRBS)码调制产生非归零(NRZ)码型的信号,PC1 调整直流光的偏振态用以提高调制效率,信号光经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大和可调衰减器的衰减实现注入功率可控,PC2 控制信号光的注入偏振态用以调整注入光在 FP 腔内 TE 模式上的光场分量强度。

在 LD 的偏置电流为 20 mA 时,FP-LD 的自由振荡光谱如图 4(a)所示,图 4(b)所示为 2.5 Gb/s 的 $2^9 - 1$ 阶 PRBS 信号光经过光电探测器后由电谱仪测量得到的频谱图(通过电谱仪的 GPIB 接口由 Labview 采集数据)。此时,注入光波长 λ_s 为 1550.14 nm,最近的 FP 纵模 λ_0 为 1550.09 nm,注入光功率为 2.1 dBm,通过调整偏振态使得两光的 FWM 产生的调制边带锁定纵模 λ_0 。此时 FP-LD 的输出光谱如图 5 所示,得到了 35.18 dB 的 SMSR,实验中的所有光谱图均采用 0.06 nm 分辨率带宽

在 LD 的偏置电流为 20 mA 时,FP-LD 的自由振

(RBW);通过示波器观察到混频信号如图 6 所示。

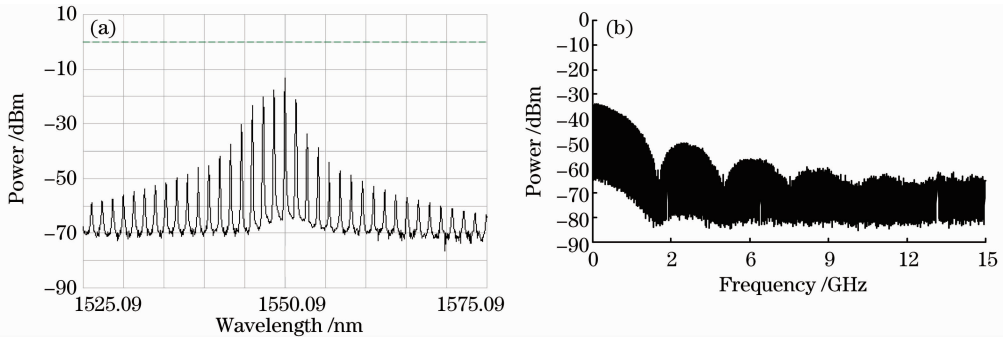


图 4 20 mA 的 LD 偏置电流注入条件下的自由振荡谱(a)和信号光的电域频谱(b)

Fig. 4 Free-running spectra of FP-LD (a) at 20 mA biased and RF spectrum of injection signal (b)

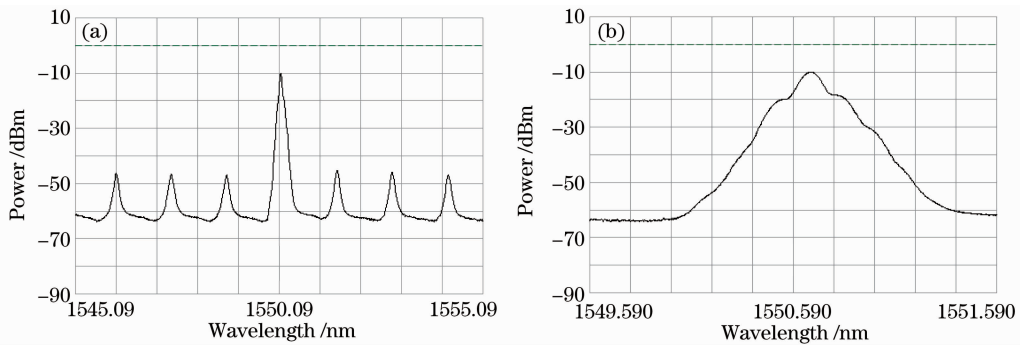


图 5 FP-LD 的输出光谱图。(a) 注定之后腔内的边模抑制谱,(b) 混频信号光谱

Fig. 5 Spectrum of FP-LD output after injecting locking. (a) SMSR of FP-LD after injection locking, (b) spectrum of frequency mixing signal

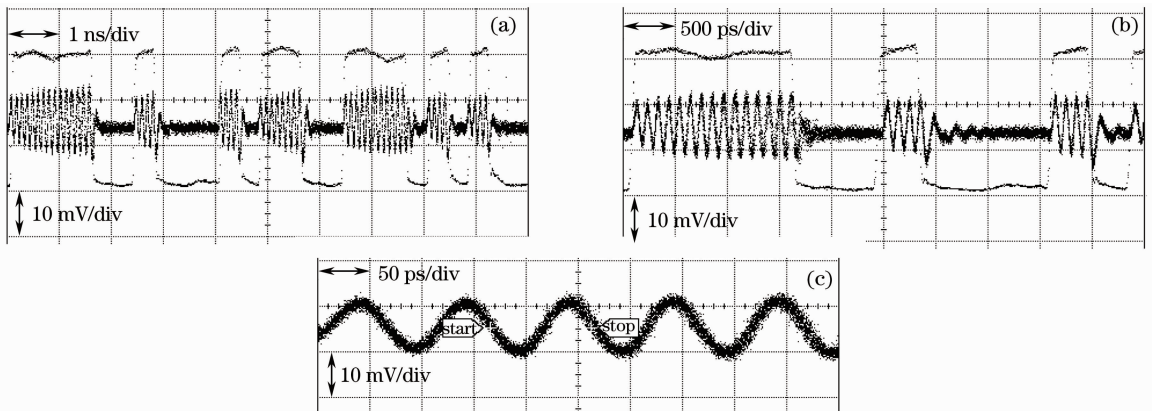


图 6 副载波为 10 GHz 的混频信号和 10 GHz 的副载波。(a)10 ns 和(b)5 ns 时间窗口的混频波形图和(c)10 GHz 副载波

Fig. 6 Frequency mixing signal at 10 GHz subcarrier and 10 GHz subcarrier. Frequency-mixing waveform in (a) 10 ns and (b) 5 ns time window and (c) 10 GHz subcarrier

图 6(a)、(b)所示为在 10 ns 和 5 ns 的时间窗口上看到的 2.5 Gb/s 信号与 10 GHz 副载波混频后的波形图,波形背景为 2.5 Gb/s 波形;图 6(c)为 10 GHz 副载波的波形图。

保持 20 mA 偏置电流不变,将可调光源波长变为 1557. 875 nm 注入 FP-LD,此时注入光功率为 8.3 dBm,得到副载波的频率为 18.2 GHz,如图 7(a)

所示为混频信号;图 7(b)18.2 GHz 副载波波形图。

图 8 所示为 FP-LD 输出端的光谱图,从图中可以看到 SMSR 约为 32.33 dB,而从图 8(b)可以看出四波混频的若干新的频率分量;尽管副载波频率提高,可是注入光功率也有很大增强,所以 SMSR 与 10 GHz 副载波的混频信号的 SMSR 相比只有 3 dB 左右的下降。

将 FP-LD 的偏置电流调整为 40 mA, 改变注入光波长为 1551.16 nm, FP-LD 的自由振荡峰值处的纵模 λ_s 为 1551.20 nm, 注入光上调制了速率为 2.7 Gb/s 的 2^9-1 NRZ 型的 PRBS 码, 光功率调整

为 3.6 dBm, 通过 PC2 控制偏振态来调整腔内 FWM 作用, 模式锁定之后, 得到 16.2 GHz 的副载波调制信号, 如图 9 所示。

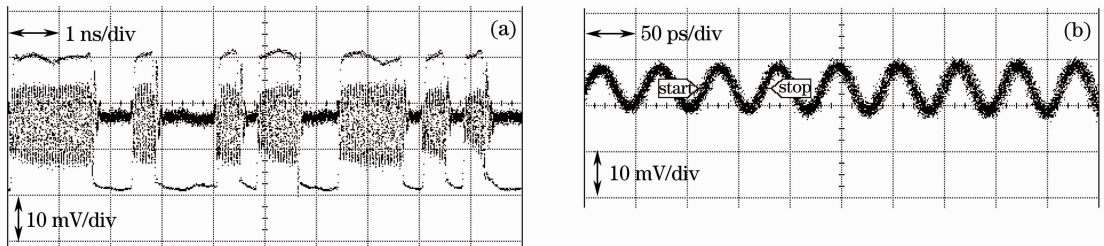


图 7 副载波为 18.2 GHz 的混频信号和 18.2 GHz 的副载波。10 ns 时间窗口的混频波形图(a)和 18.2 GHz 副载波的波形(b)

Fig. 7 Frequency mixing signal at 18.2 GHz subcarrier and 18.2 GHz subcarrier. Frequency-mixing waveform of signal in 10 ns time window (a) and waveform of 18.2 GHz subcarrier (b)

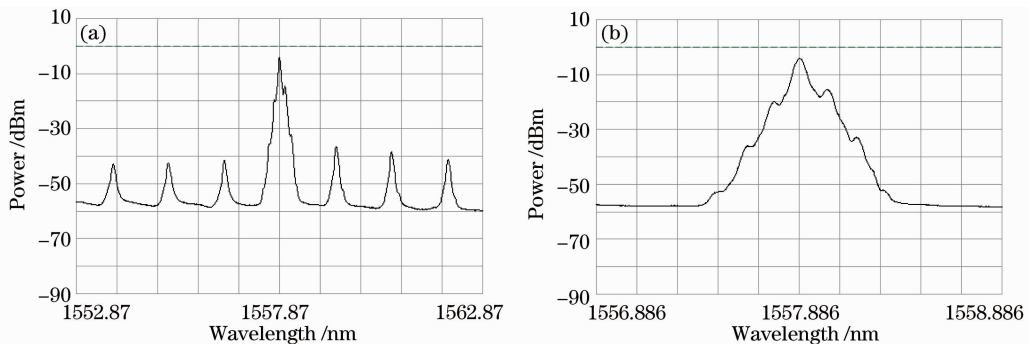


图 8 FP-LD 输出副载波为 18.2 GHz 的混频信号光谱。窗口为(a)10 nm, (b)2 nm 的光谱

Fig. 8 Spectra of frequency mixing signal at 18.2 GHz. spectra of (a) 10 nm, (b) 2 nm span

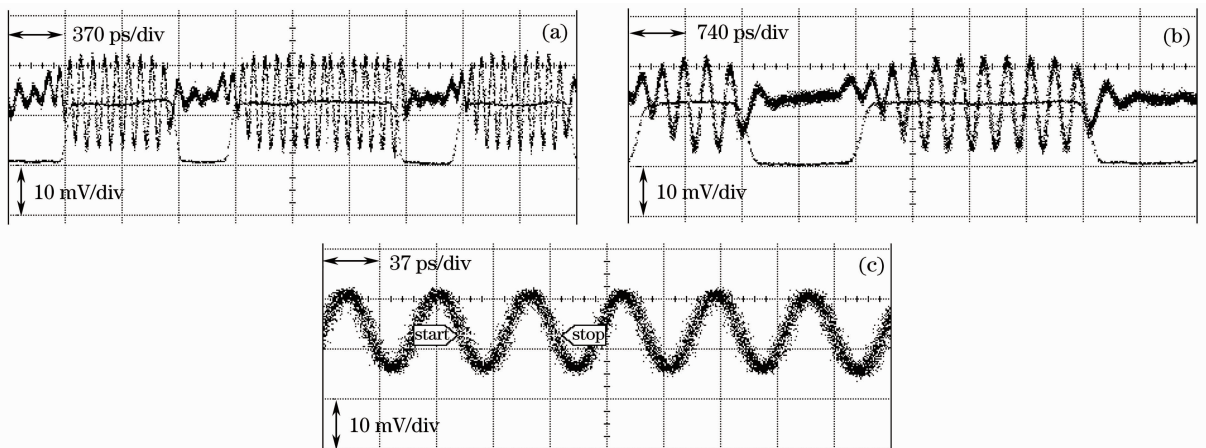


图 9 副载波为 16.2 GHz 的混频信号和 16.2 GHz 的副载波。10 个码元(a)和 5 个码元(b)周期窗口的波形和(c)16.2 GHz 的副载波信号

Fig. 9 Frequency mixing signal at 16.2 GHz subcarrier and 16.2 GHz subcarrier. waveform of in 10-code (a) and 5-code (b) period window and (c) 16.2 GHz subcarrier

FP-LD 输出端的混频信号光谱图如图 10 所示, 此时输出的光 SMSR 只有 15.6 dB. 将输出信号经过光电转换后由电频谱分析仪测试得到混频信号的电谱图如图 11(a)所示, 观测到的副载波频率 16.2 GHz

如图 11(b)所示; 通过单边带相位噪声测量得到 10 kHz 频偏处的相位噪声为 -81.2 dBc/Hz, 而信源 2.7 GHz 的相位噪声为 -103.3 dBc/Hz, 如图 11(c)所示; 此时, 关闭误码仪的 PPG 模块功能, 这样注入

光成为直流光,观测到不稳定的拍频信号在较大频率范围内抖动,如图 11(d)所示。这里充分说明在直流光注入和信号注入对于锁定状态的开关作用。

在误码仪的 PPG 模块上,把 PRBS 信号调制变为可编程模式,选择 10 个自定义码元“1010011000”,保持码元速率 2.7 GHz 不变,此时得到的副载波频率仍然为 16.2 GHz 不变,信号如图 12(a)所示,10 kHz 频偏处的相位噪声为 -87.7 dBc/Hz,如图 12(b)所示。

改变实验条件,注入 1.25 Gb/s 的 $2^9 - 1$ 的 PRBS 信号, λ_s 仍然为 1551.16 nm,偏置电流不变,增大注入功率到 8.6 dBm,调整偏振态后 FWM 作

用产生的边带锁定纵模 λ_0 ,得到副载波为 20 GHz 的混频信号如图 13 所示,可以看到图 13(b)及其上述实验结果图中的 10、18.2 和 16.2 GHz 的混频信号在波形的下降沿出现“拖尾现象”,这是由于 FP-LD 中载流子浓度恢复造成的下降沿变缓。

混频信号的光谱图如图 14 所示,SMSR 为 12.2 dB,与前面 18.2 GHz 副载波得到的 32.33 dB 的 SMSR 相比,虽然在副载波频率和注入功率都相差不大,可是偏置电流较之前增加了 20 mA,就决定了对应注入锁定相对光强比 E_{in}/E_{sol} 中 E_{sol} 项变大,从而导致 SMSR 变小。

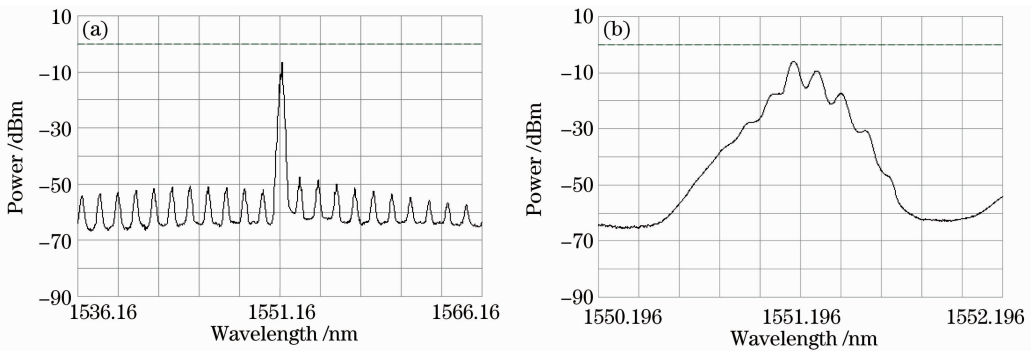


图 10 FP-LD 输出的副载波为 16.2 GHz 的混频信号光谱图。窗口为(a)30 nm,(b)2 nm 的光谱
Fig. 10 Spectra of frequency mixing signal at 16.2 GHz subcarrier. spectra of (a) 30 nm, (b) 2 nm span

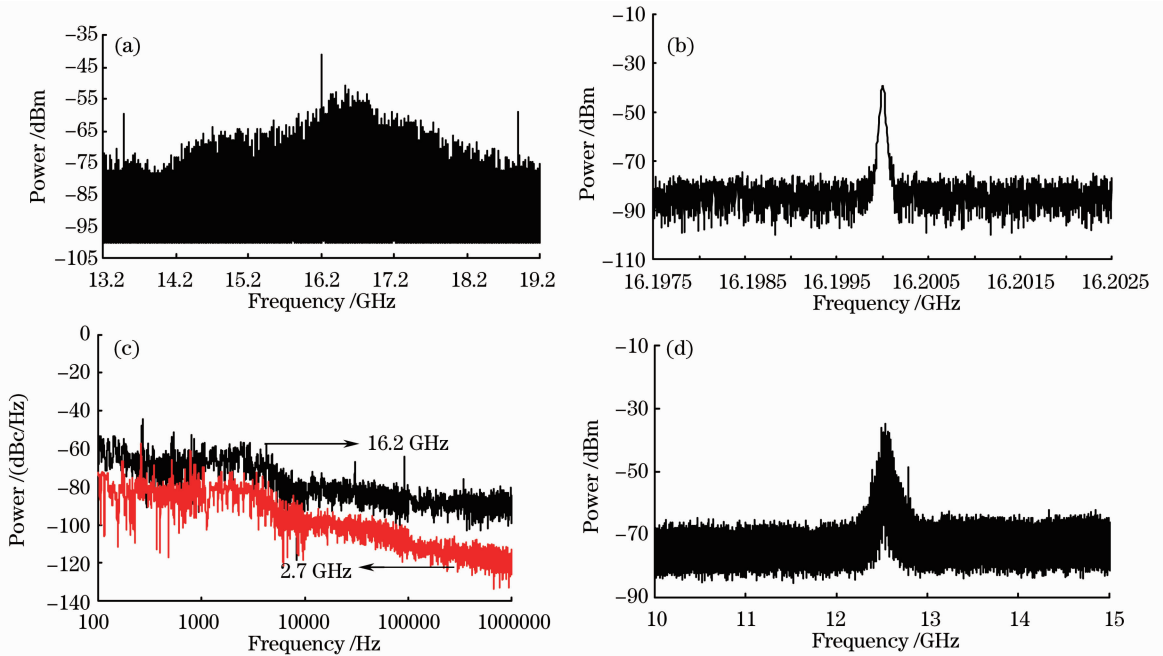


图 11 混频信号及其副载波频谱。(a)副载波调制信号(窗口:6 GHz),(b)16.2 GHz 副载波 (窗口:5 MHz),
(c)信号源和副载波相位噪声(-81.2 dBc/Hz @10 kHz),(d)数据关闭后的不稳定拍频信号(窗口:5 GHz)
Fig. 11 RF spectrum of frequency mixing signal and subcarrier. (a) subcarrier modulation signal (span: 6 GHz), (b)
16.2 GHz subcarrier (span: 5 MHz), (c) phase noise of signal source and subcarrier(-81.2 dBc/Hz @ 10 kHz),
(d) unstable beating signal when data modulation is switched off (span: 5 GHz)

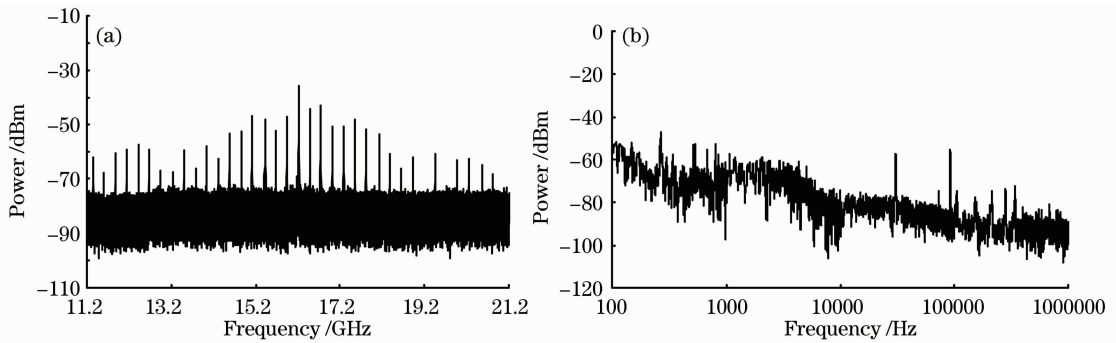


图 12 2.7 Gb/s 码元速率下自定义编码数据电谱和 16.2 GHz 副载波相位噪声。(a)副载波调制数据, (b)16.2 GHz 副载波的相位噪声

Fig. 12 RF spectra of self-defined data at 2.7 Gb/s on 16.2 GHz and phase noise of 16.2 GHz subcarrier.

(a) subcarrier modulation data, (b) phase noise of 16.2 GHz subcarrier

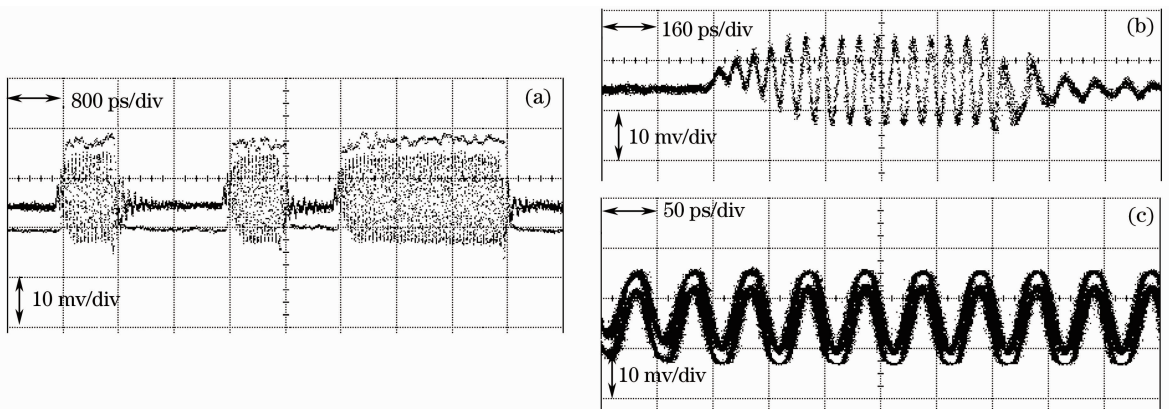


图 13 副载波为 20 GHz 的混频信号和 20 GHz 的副载波。10 个码元(a)和 2 个码元(b)周期窗口的波形和(c)20 GHz 的副载波信号

Fig. 13 Frequency mixing signal at 20 GHz subcarrier and 20 GHz subcarrier. waveform in 10-code (a) and 2-code (b) period window and (c) 20 GHz subcarrier

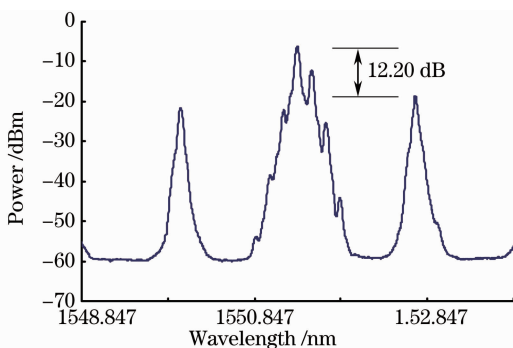


图 14 副载波为 20 GHz 的混频信号光谱图

Fig. 14 Spectra of frequency mixing signal at 20 GHz subcarrier

4 结 论

提出了一种基于低速信号注入 FP-LD 通过 LD 腔内的 FWM 作用锁定 FP 纵模的无本振光载波的全光混频技术,分析了 FWM 锁定纵模产生稳定的副载波的基本原理和 FP-LD 在不同实验条件下的

SMSR,并通过实验完成了 2.5 Gb/s 与 10 GHz、2.5 Gb/s 与 18.2 GHz、2.7 Gb/s 与 16.2 GHz 和 1.25 Gb/s 与 20 GHz 的全光混频。

参 考 文 献

- 1 M. Weiss, M. Huchard *et al.*. 60-GHz photonic millimeter-wave link for short-to medium-rang wireless transmission up to 12.5 Gb/s [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26** (15): 2424~2429
- 2 Hu Liliang, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. A novel scheme for optical millimeter-wave generation based on double-sideband modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 238~242
- 胡黎亮, 陈 林, 余建军等. 一种改进的双边带调制产生光毫米波的方案[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 238~242
- 3 Zhang Dapeng, Yu Chongxiu, Xin Xiangjun *et al.*. Design of up-conversion system based on millimeter sub-carrier ROF technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 31~35
- 张大鹏, 余重秀, 忻向军等. 光载毫米波上变频系统的设计与研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 31~35
- 4 G. H. Nguyen, B. Cabon, Y. L. Cuenec. Generation of 60-GHz MB-OFDM signal-over-fiber by up-conversion using cascaded external modulators[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(11): 1496~1502

- 5 S. Fu, W. D. Zhong, P. Shun *et al.*. Simultaneous multichannel photonic up-conversion based on nonlinear polarization rotation of an SOA for radio-over-fiber systems[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(9): 563~565
- 6 Y. -K. Seo, C. -S. Choi, W. -Y. Choi. All-optical signal up-conversion for radio-on-fiber applications using cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(10): 1448~1450
- 7 S. P. Chul, Y. Guo, Y. K. Yeo. Fiber-optic 60-GHz wireless downlink using cross-absorption modulation in an EAM[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(8): 557~559
- 8 D. Labukhin, C. A. Stolz, N. Azakhleniuk *et al.*. Modified Fabry-Perot and rate equation methods for the nonlinear dynamics of an optically injected semiconductor laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2009, **45**(7): 863~871
- 9 F. Mogensen, H. Olesen, G. Jacobsen. Locking conditions and stability properties for a semiconductor laser with external light injection [J]. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1985, **21**(7): 784~793
- 10 R. Nietzke, P. Panknin, W. Elsasser *et al.*. Four-wave mixing in GaAs/AlGaAs semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(6): 1399~1406