

# 新型无本振毫米波光纤无线通信上变频系统

王文睿<sup>1</sup> 于晋龙<sup>1,\*</sup> 吴波<sup>1</sup> 韩丙辰<sup>1,2</sup> 罗俊<sup>1</sup> 郭精忠<sup>1</sup> 李彬<sup>1</sup>

高超<sup>1</sup> 刘佳<sup>1</sup> 颜子恒<sup>1</sup> 杨恩泽<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072)  
(<sup>2</sup>山西大同大学物理与电子科学学院, 山西 大同 037009)

**摘要** 基于低速信号注入法-珀(FP)激光器可实现无微波本振光纤无线通信(RoF)上变频技术,但是得到的微波本振频率受到 FP 激光器中四波混频效率的限制,难以直接实现毫米波载波的 RoF 上变频。在注入锁定 FP 激光器的基础上提出了一种新型的、低成本的在光域直接产生毫米波载波的 RoF 上变频方案。由于注入锁定 FP 激光器过程中的动态载流子特性,上变频得到的载波信号带有正啁啾,故可用负色散介质对载波信号进行脉冲压缩,从而增强高阶谐波分量以完成毫米波载波的本振 RoF 上变频。实验中采用 2 Gb/s 非归零码注入实现了载波为 13.9 GHz,用 2.5 Gb/s 注入实现了载波分别为 13.9 GHz 和 15.4 GHz 的 RoF 上变频,并采用上述方案分别实现 27.8 GHz 和 30.8 GHz 的倍频载波分量的增强。进一步实验验证了用本方案实现载波频率约 60 GHz 可调谐毫米波的本振 RoF 上变频的可行性。

**关键词** 光通信;光纤无线通信;光学上变频;注入锁定;四波混频

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0305005

## Novel Radio over Fiber Frequency Up-Conversion in Millimeter Wave Band

Wang Wenrui<sup>1</sup> Yu Jinlong<sup>1</sup> Wu Bo<sup>1</sup> Han Bingchen<sup>1,2</sup> Luo Jun<sup>1</sup>

Guo Jingzhong<sup>1</sup> Li Bin<sup>1</sup> Gao Chao<sup>1</sup> Liu Jia<sup>1</sup> Yan Ziheng<sup>1</sup> Yang Enze<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Fiber Communication, School of Electronic & Information Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup>School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China

**Abstract** A novel technique to achieve optical frequency up-conversion in millimeter wave (mm) band without any local microwave oscillator is proposed. It is hard to directly get mm band carrier frequency because the efficiency of mode-locking decreases as the carrier frequency increases. Thanks to dynamic charge carrier density responses during the injection locking of Febry-Perot laser diode (FP-LD), the wavelength of the leading part of carrier is red-shifted while that of falling part is blue-shifted. With a suitable negative dispersion device, the carrier pulse is compressed and its 2<sup>nd</sup> harmonic is greatly enhanced. Thus it is feasible to make the radio over fiber(RoF) frequency up-conversion in mm band. Subcarriers of 13.9 GHz are obtained from 2 Gb/s nonreturn-to-zero (NRZ) signal injection while that of both 13.9 GHz and 15.4 GHz are obtained from 2.5 Gb/s NRZ signal injection into FP-LD. And the 2<sup>nd</sup> harmonic at 27.8 GHz and 30.8 GHz are enhanced by more than 20 dB, 25 dB and 23 dB, respectively. The simpleness and tunability of the proposed scheme make it a great candidate for low cost mm band RoF frequency upconversion up to 60 GHz.

**Key words** optical communication; radio over fiber; all-optical frequency up-conversion; injection locking; four wave mixing

**OCIS codes** 060.2330; 140.3520; 230.1150

收稿日期: 2010-09-09; 收到修改稿日期: 2010-10-08

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327603)和国家自然科学基金(60736035,60977053)资助课题。

作者简介: 王文睿(1980—),男,博士,讲师,主要从事高速光纤通信系统方面的研究。E-mail: wwr\_blue@163.com

\* 通信联系人。E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

## 1 引言

随着 3D 网络游戏、网络电视 (IPTV)、可视电话、远程医疗、远程教育、视频会议等宽带多媒体业务的出现和普及,高速、大容量的光纤接入网已经成为光通信领域的发展方向。另一方面,由于方便、个人化和无处不在的特性,无线技术已不仅仅应用于移动通信,无线接入也成为信息时代的宠儿,成为全球通信网络发展的另一个重要方向。在欧美、日本等发达国家,多个项目组已经开展了 40 乃至 60 GHz 频段的无线接入技术研究。在这样的背景下,利用光纤无线通信 (RoF) 技术,构建高速宽带的无线-光混合接入网,从而为用户提供高速、宽带、灵活、无处不在的接入,必将成为接入技术未来的发展方向<sup>[1~3]</sup>。

在无线-光混合接入网中,对基带信号进行上变频,从而产生适合于无线发射的微波信号是至关重要的基础功能子系统。但是随着微波频率的提高,在 40 乃至 60 GHz 的毫米波段,在电域实现混频、滤波的成本很高,也成为制约宽带无线-光混合接入技术发展的瓶颈之一。为此,研究人员提出了一系列基于 RoF 技术、在光域直接实现毫米波载波的上变频方案<sup>[4~7]</sup>,包括:基于调制器的边带控制法<sup>[8]</sup>、半导体光放大器 (SOA) 中的载流子浓度的交叉增益调制 (XGM)<sup>[9]</sup> 和非线性偏振旋转效应 (NPR)<sup>[10]</sup> 以及电吸收调制器 (EAM) 中的交叉吸收调制效应 (XAM)<sup>[11]</sup> 等。

之前的研究提出了一种基于注入锁定法-珀 (FP) 激光器的无微波本振 RoF 上变频的方案<sup>[12,13]</sup>。该方案无需微波本振,具有结构简单、实现成本低的优点。但是该方案上变频得到的微波频率受到 FP 激光器中四波混频 (FWM) 效率的制约,在普通的商用 FP 激光器中,难以直接实现载波频率为毫米波段的上变频。本文在上述方案的基础上,利用 FP 激光器载流子动态特性引入的正啁啾,采用负色散介质对 RoF 上变频得到的微波信号进行脉冲压缩,从而有效增强上变频得到微波载波的倍频分量。相应的实验验证了该方案直接实现毫米波 RoF 上变频的可行性。

## 2 工作原理和分析

基于注入锁定 FP 激光器的无本振毫米波 RoF 上变频方案的系统框图如图 1 所示。由基于注入锁定 FP 激光器的 RoF 上变频和脉冲压缩两部分组成。

文献<sup>[12]</sup>介绍了基于注入锁定 FP 激光器的

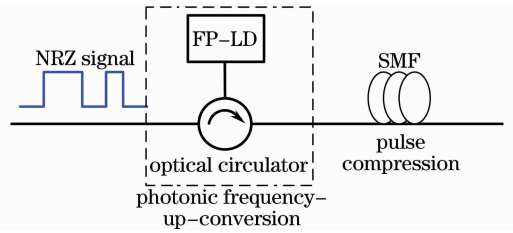


图 1 基于注入锁定 FP 激光器的 RoF 上变频方案的系统框图

Fig. 1 System block of optical frequency upconversion in mm band based on injection locking of FP laser diode

RoF 上变频的原理。当注入数据调制的信号光  $\lambda_s$  后,假设与  $\lambda_s$  最近的一个 FP 激光器纵模表示为  $\lambda_0$ ,通过高阶四波混频效应<sup>[14,15]</sup>,该数据调制将被调制到  $\lambda_0$  上,并注入锁定 FP 激光器的纵模,在  $\lambda_0$  与  $\lambda_s$  之间形成稳定的高频微波频率,从而实现 RoF 上变频。由原理可以看出,基于注入锁定 FP 激光器的方案中,载波的频率主要由  $\lambda_s$  和  $\lambda_0$  的波长间隔决定。若想提高微波载波的频率,需要增加  $\lambda_s$  和  $\lambda_0$  的波长间隔。但是,当两者间隔较大的时候,FP 激光器中的四波混频效率随之降低,纵模上的调制分量也随之变弱,从而导致 FP 激光器进入失锁状态。所以,单纯采用注入锁定 FP 激光器的方案,难以直接实现载波频率为 40 乃至 60 GHz 的毫米波载波的上变频。

为此采用脉冲压缩进一步加强 RoF 上变频得到的微波载波的倍频分量。首先,当 FP 激光器输出微波载波信号时,由于 FP 激光器的动态特性,会在输出信号中引入啁啾。在微波载波的上升沿,随着输出光功率的增加,FP 激光器载流子的消耗增加,载流子浓度降低,FP 激光器等效折射率升高,FP 激光器的输出波长会发生红移。而在微波载波的下降沿,则经历相反的过程,FP 输出波长会发生蓝移。因此,总体而言,FP 激光器输出的微波载波带正啁啾,可以用合适长度的负色散介质[如普通单模光纤 (SMF)]进行脉冲压缩。

进行脉冲压缩之后,从频谱上看,微波载波的高阶频谱分量得到增强。图 2(a)以高斯型脉冲为例,比较了不同半峰全宽的脉冲基频和二次谐波分量的幅度。在脉冲接近半占空比的情况下,功率基本上集中在基频分量上,随着脉冲变窄,基频分量开始变弱而二次谐波分量逐渐增强。当然,当脉冲宽度过窄时,由于高阶谐波分量的增加,二次谐波分量反而会有所下降。图 2(b)则是双曲正割脉冲的情况,可以看出变化的趋势和高斯脉冲的情况基本一致。

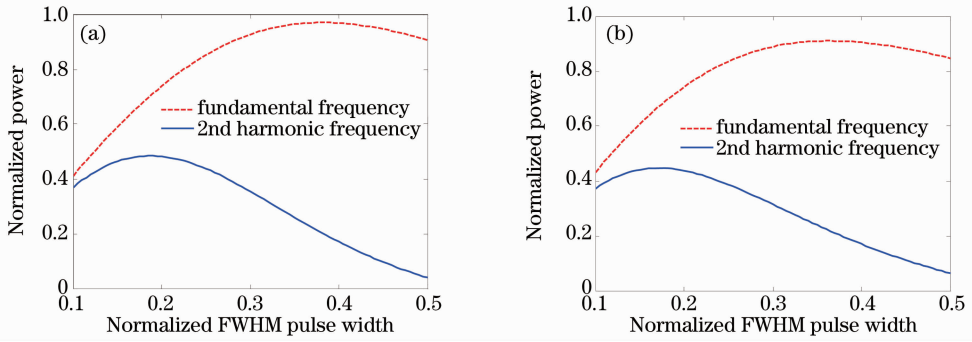


图 2 (a)高斯脉冲,(b)双曲正弦脉冲基频和二次谐波分量与脉冲宽度的关系

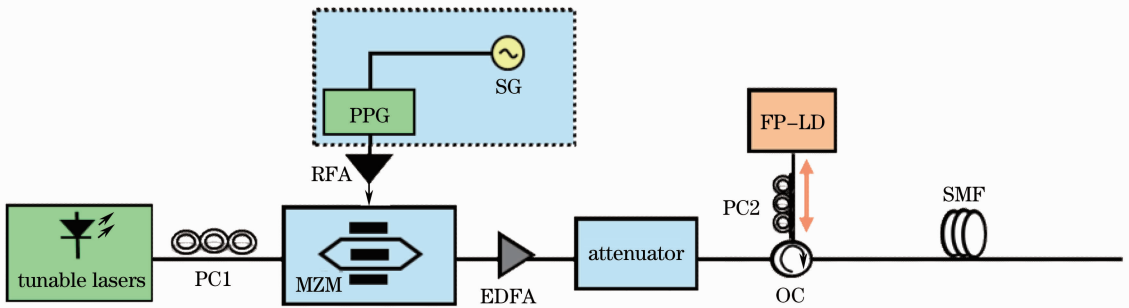
Fig. 2 Amplitude relationship between 2<sup>nd</sup> harmonic and carrier frequency of (a) Gaussian and (b) hyperbolic sine pulses

从图 2 中可以看出,在高斯脉冲的情况下,占空比约为 0.185 时,脉冲的二阶谐波分量达到最大值。在双曲正弦脉冲的情况下,占空比约为 0.17 时,脉冲的二阶谐波分量达到最大值。最大值均约为 0.5,即在最佳压缩的情况下,原微波信号约有一半功率转换为倍频微波信号。虽然最佳占空比是脉冲形状的函数,但是在脉冲占空比不太小的前提下,脉冲压缩均可以有效提升微波载波的二阶谐波分量的强度。考虑到在无线-光混合接入系统中,信号最终通过窄带的微波天线发射,因此,一阶基频分量将自动被微波天线滤除,而增强的二阶分量则可以通过天线发射出去,从而实现微波载波的倍频。

可调光源(Agilent 8167)产生的连续光在马赫-曾德尔型的 LiNbO<sub>3</sub> 光强度调制器(MZM)中被伪随机码型发生器产生的 2<sup>7</sup>-1 的伪随机序列(PRBS)码调制产生非归零码(NRZ)码型的信号,信号光经过掺饵光纤放大器(EDFA)放大后由可调衰减器控制注入光功率。低速非归零码(NRZ)信号经由光环行器注入 FP 激光器。实验中采用的是商用多量子阱结构 FP 激光器,自由光谱区(FSR)为 171 GHz,阈值电流约为 10 mA。由 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。注入锁定后得到的 RoF 上变频信号则由环形器 3 口输出,经由一定长度的 SMF 进行脉冲压缩,分别由光示波器、光谱仪和电谱仪观测实验结果。

### 3 实验及结果分析

图 3 为毫米波载波的 RoF 上变频实验原理图。



PC: polarization controller; MZM: Mach-Zehnder modulator; OC: optical circulator; SMF: single mode fiber; PPG: pseudo-random pattern generator; SG: signal generator; RFA: radio frequency amplifier; EDFA: Er-doped fiber amplifier

图 3 毫米波载波 RoF 上变频系统实验结构图

Fig. 3 Experimental setup of optical RF up-conversion in mm band

实验中,FP 激光器的偏置电流为 40 mA 时,首先调节注入光波长为 1551.142 nm,注入光功率为 6.2 dBm。通过调整偏振态使得两光的 FWM 产生的调制边带锁定 FP 激光器的相邻纵模  $\lambda_0$ 。此时 FP-LD 的输出光功率为 6 dBm,输出光谱如图 4(a) 所示。此时,FP 上变频的输出功率与注入信号功率

基本一致,转换效率约为 0 dB。实验中的所有光谱图均由光谱仪(横河 AQ8317C)记录,分辨率带宽(RBW)均为 0.01 nm。从图 4(a)可以看出注入锁定后 FP 激光器的边模抑制比(SMSR)为 37 dB。通过示波器 Agilent86100 观察到光载射频上变频信号如图 4(b)~(e)所示。图 4(b)为注入的 NRZ

码,示波器显示部分码字为“0110110101101”。图 4(c)为在 2.5 Gb/s 信号上变频到 15.4 GHz 副载波上的波形图,可以看出原低速率 NRZ 信号的“1”码处均出现了高频的载波,而“0”则仍为直流光。图 4(d)为 15.4 GHz 副载波放大的波形图,此时载波基本为正弦信号。图 5(a)则是 RoF 上变频后信号的电谱图,可以清晰地看出电谱上只存在 15.4 GHz 的载波分量,而高频分量可以忽略不计。

图 4(e)为 10 km SMF 脉冲压缩后,微波载波的信号波形图,可以看出通过 SMF 压缩,脉冲宽度

由原来的半占空比压缩至约 21 ps。由于缺少可调谐色散模块,故实验中并未精确优化色散值。但是从电谱上[如图 5(b)所示]依旧可以看出,经过脉冲压缩后,微波载波的二次谐波分量处,即 30.8 GHz 处的分量,得到明显增强,与脉冲压窄前相比增强约 20 dB。此时,二次谐波与基频分量的功率差约为 10 dB。在实际系统中,可以用合适色散值的啁啾光纤光栅(CFBG)代替长光纤以降低系统的体积,并提升系统的稳定性。

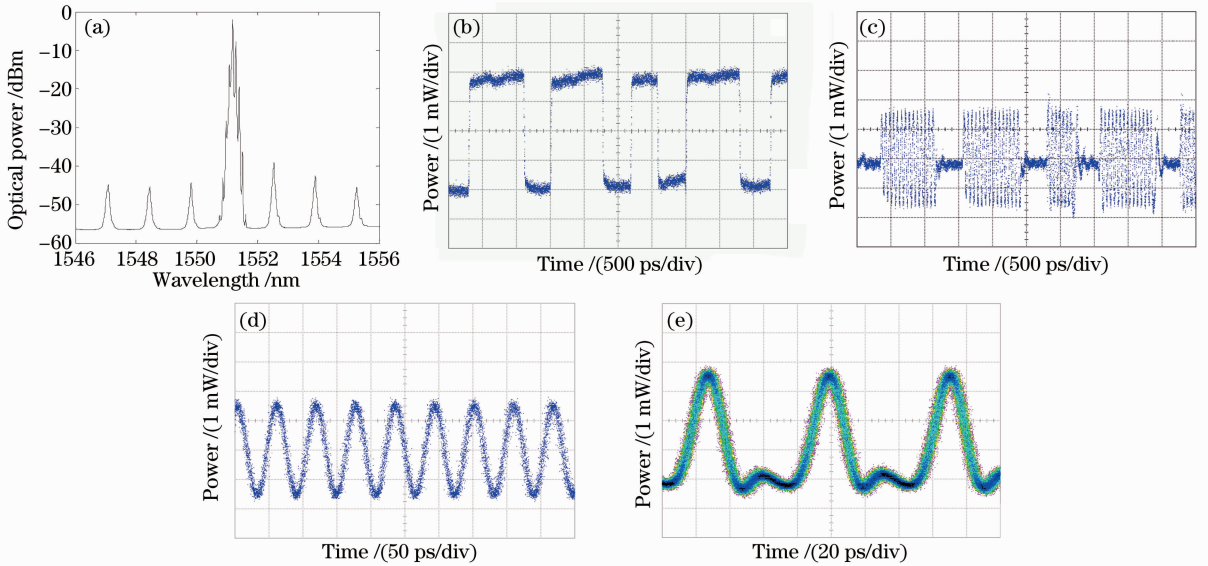


图 4 (a)注入锁定 FP 激光器光谱图,(b)注入 NRZ 信号波形图,(c)FP 激光器输出上变频信号波形图,(d)FP 激光器输出载波波形图,(e)脉冲压窄后载波波形图(眼图模式)

Fig. 4 (a) Optical spectra of output of injection locking of FP laser, waveforms of (b) injecting NRZ signal, (c) up-converted signal, (d) sub-carrier, (e) sub-carrier after pulse compression

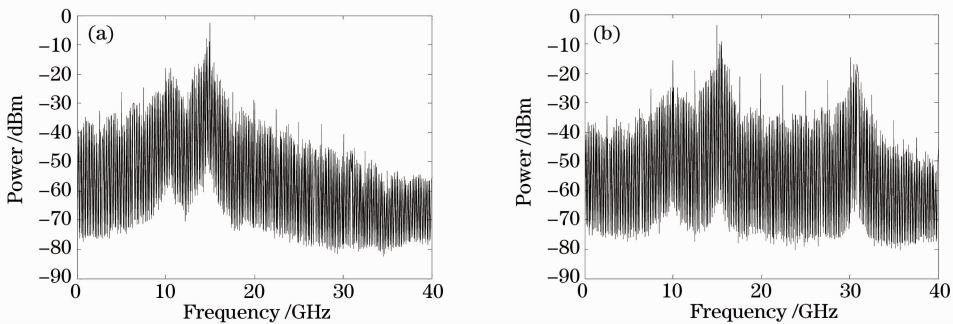


图 5 注入锁定 FP 激光器(a)和 10 km SMF 后(b)电谱图

Fig. 5 Electrical spectra of (a) injection locking of FP laser diode, (b) after pulse compression

基于注入锁定 FP 激光器的 RoF 上变频方案的另外一大优势是对输入信号速率和上变频载波频率均有良好的宽带可调谐性。调节注入光波长为 1551.1624 nm,注入光功率为 3.8 dBm。此时注入锁定 FP 激光器上变频产生了载波频率为 13.9 GHz 的光微波信号[如图 6(a),(d)所示],经 SMF 后压窄的

光微波信号的电谱和波形如图 6(b),(e)所示。此时二次谐波频率为 27.8 GHz,该频率分量强度与脉冲压窄之前相比,增强了约 25 dB。

接下来,进一步验证该系统对输入码率的可调谐性。改变注入信号码率为 2 GHz,注入光波长仍为 1551.1624 nm,注入光功率为 3.7 dBm。此时注入锁



定 FP 激光器上变频产生了载波频率仍为 13.9 GHz 的光微波信号[如图 7(a),(d)所示],经 SMF 后压窄的光微波信号的电谱和波形如图 7(b),(e)所示。此

时二次载波频率为 27.8 GHz,该频率分量强度与脉冲压窄之前相比,增强了约 23 dB。

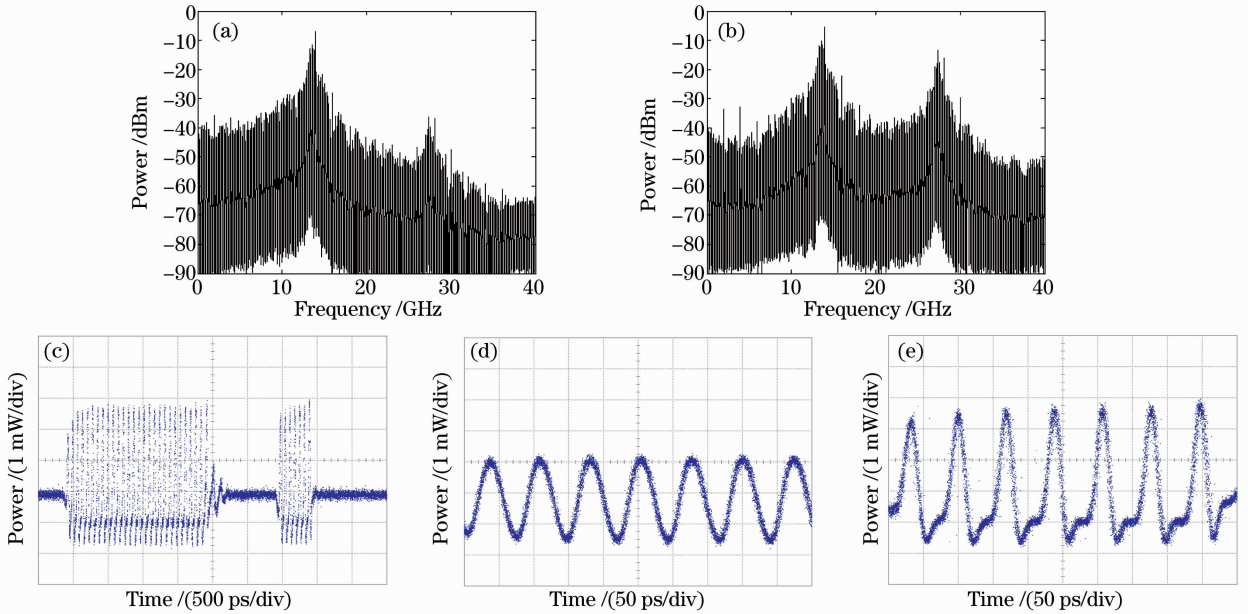


图 6 2.5 Gb/s NRZ 码注入时(a)注入锁定 FP 激光器电谱图,(b)10 km SMF 后上变频信号电谱图,(c)FP 激光器输出上变频信号波形图,(d)注入锁定 FP 激光器载波波形图,(e)10 km SMF 后上变频信号波形图

Fig. 6 Electrical spectra of (a) injection locking of FP laser diode, (b) after pulse compression, waveforms of (c) up-converted signal, (d) subcarrier, (e) subcarrier with pulse compression while 2.5 Gb/s NRZ injection locking

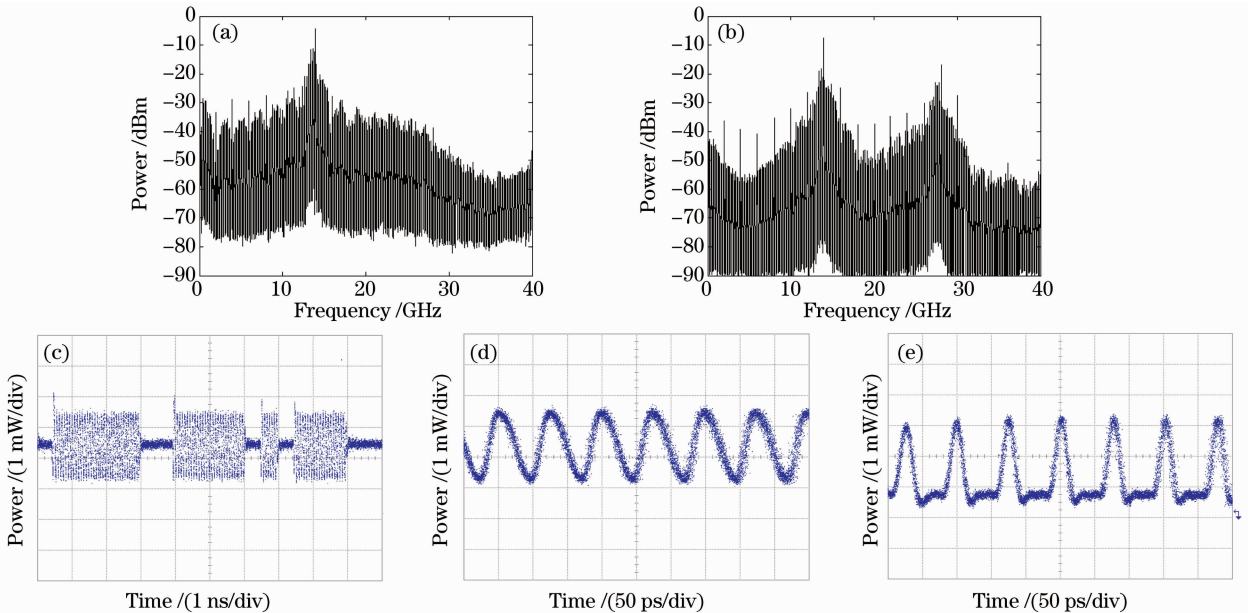


图 7 2 Gb/s NRZ 码注入时(a)注入锁定 FP 激光器电谱图,(b)10 km SMF 后上变频信号电谱图,(c)FP 激光器输出上变频信号波形图,(d)注入锁定 FP 激光器载波波形图,(e)10 km SMF 后上变频信号波形图

Fig. 7 Electrical spectra of (a) injection locking of FP laser diode, (b) after pulse compression, waveform of (c) up-converted signal, (d) subcarrier, (e) subcarrier with pulse compression while 2 Gb/s NRZ injection locking

在上面的实验中,已经证明了基于注入锁定 FP 激光器、脉冲压缩直接在光域产生 RoF 上变频信号的有效性。事实上,加大 FP 偏置电流至 60 mA,注

入功率为 8.3 dBm,注入光波长为 1552.649 nm。可实现载波频率为 29.1 GHz RoF 上变频信号,产生信号的波形和电谱如图 8 所示。

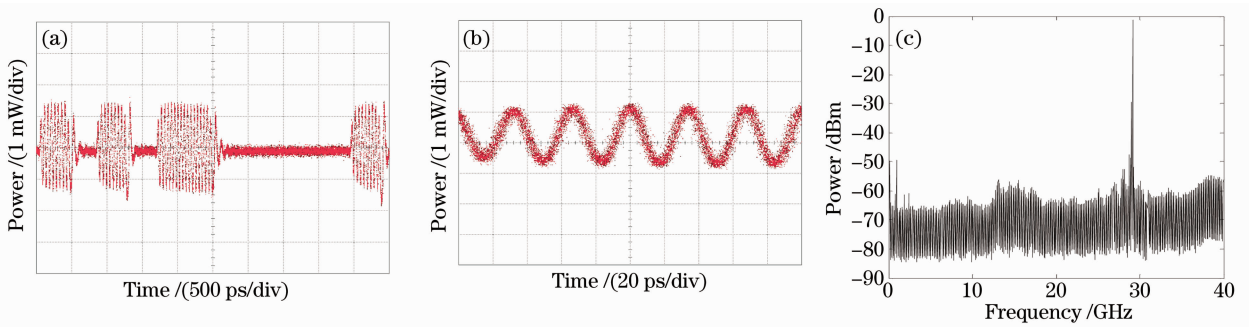


图 8 注入锁定 FP 激光器后的信号波形(a),载波波形(b)和信号电谱图(c)

Fig. 8 Waveform of (a) up-converted signal, (b) subcarrier, and (c) electrical spectrum of up-converted signal

实际实验中由于示波器和电谱仪的带宽限制(最高频率均为 40 GHz),无法观测该信号的倍频分量。但是有理由相信,该光微波信号同样可以通过色散介质脉冲压缩得到二阶载波频率处,即 58.2 GHz 处增强的毫米波载波的光微波信号。

## 4 结 论

提出了一种新型产生毫米波载波的 RoF 上变频方案,对该方案的原理进行了分析,并进行了实验验证和测试。采用注入 FP 激光器实现了无微波本振的可调谐 RoF 上变频,用色散介质实现载波的脉冲压缩,增强了载波的二次谐波分量强度,从而使得直接实现毫米波载波的 RoF 上变频成为可能。实验中通过 2.5 Gb/s NRZ 码注入锁定 FP 激光器完成了载波频率为 27.8 GHz 和 30.8 GHz 的 RoF 上变频,通过 2 Gb/s NRZ 码注入完成了载波频率为 27.8 GHz 的 RoF 上变频,证明了方案对于输入信号码率和输出载波频率的可调谐性。进一步实验表明了实现约 60 GHz RoF 上变频的可能性。为毫米波载波的高速光-无线混合接入网络中微波上变频提供了一种低成本的解决方案。

## 参 考 文 献

- 1 C. Lim, A. Nirmalathas, M. Bakaul *et al.*. Fiber-wireless networks and subsystem technologies [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(4): 390~405
- 2 S. Dixit, Hybrid optical-wireless networks[C]. Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC 2007. 1~3
- 3 P. Chowdhury, B. Mukherjee, S. Sarkar. Hybrid wireless-optical broadband access network (woban): prototype development and research challenges[J]. *Network, IEEE*, 2009, **23**(3): 41~48
- 4 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 481~488  
方祖捷,叶青,刘峰等.毫米波副载波光通信技术研究

- 进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 481~488
- 5 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
- 6 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
- 7 Ye Qing, Liu Feng, Qu Ronghui *et al.*. Fiber-communication project of millimeter-wave subcarrier based on fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1464~1468  
叶青,刘峰,瞿荣辉等.一种基于光纤光栅的毫米波副载波光通信方案[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1464~1468
- 8 G. H. Nguyen, B. Cabon, Y. Guennec. 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
- 9 S. Fu, W. Zhong, P. Shum *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
- 10 Y. Seo, C. Choi, W. 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
- 11 S. P. Chul, Y. Guo, Y. Yoe. Fiber-optic 60-GHz wireless downlink using cross-absorption modulation in an EAM [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(8): 557~559
- 12 B. Wu, J. Yu, Z. Zhang *et al.*. A novel and tunable frequency-upconversion based on FP-LD injection of one low bit-rate signal without any RF local oscillator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(14): 1027~1029
- 13 Wu Bo, Yu Jinlong, Zhang Zusong *et al.*. A local oscillator-free frequency mixing based on FP-LD injection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3140~3147  
吴波,于晋龙,张祖松等.基于FP-LD注入混频的无本振光载波技术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3140~3147
- 14 D. Labukhin, C. A. Stolz, N. Zakhleniuk. Modified Fabry-Perot and rate equation methods for the nonlinear dynamics of an optically injected semiconductor laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **45**(7): 863~871
- 15 Shengkwang Hwang, Jiaming Liu, J. K. White. Characteristics of period-one oscillations in semiconductor lasers subject to optical injection [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, **10**(5): 974~981