

利用基带直调信号注入锁定半导体激光器产生全光上变频信号的研究

郭精忠¹ 于晋龙¹ 王文睿¹ 吴波¹ 韩丙辰² 王菊¹ 刘毅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 提出了一种将低速基带信号直调产生的宽谱信号, 注入至用于上变频的分布反馈式半导体激光器(DFB-LD), 利用调制信号光谱中的高阶分量对从激光器进行相位锁定, 从而产生光学上变频信号的方法。对直调信号注入锁定 DFB-LD 产生光学上变频信号的机理进行了理论分析, 完成了 2.5 Gb/s 伪随机码基带信号通过直调并注入从激光器, 分别产生了 30, 35, 40 GHz 副载波频率的全光上变频信号的实验, 并在时域和频域上, 对上变频信号的特征进行了研究。该方案结构简单, 无需高速外调制器及高频本振, 具有集成潜力, 理论上可产生更高载频(如 60 GHz), 对目前的光-无线混合接入提供了一种可行的解决方案。

关键词 光通信; 半导体激光器; 光-无线混合接入; 全光上变频; 注入锁定

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0205003

Optical Frequency Up-Conversion by Injection Locking Semiconductor Laser with Directly Modulated Baseband Signal

Guo Jingzhong¹ Yu Jinlong¹ Wang Wenrui¹ Wu Bo¹ Han Bingchen² Wang Ju¹
Liu Yi¹ 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 scheme of optical frequency up-conversion is proposed by using the high order sideband of the directly modulated low-speed baseband signal for injection locking of a distributed feedback semiconductor laser (DFB-LD). The operational principle of the proposed optical frequency up-conversion scheme is theoretically analyzed. Based on this scheme, optical frequency up-conversion of a 2.5 Gb/s is directly modulated baseband signal to 30, 35 and 40 GHz subcarrier modulation signal respectively. Higher carrier frequency (up to 60 GHz) can also be achieved in potential. The proposed scheme does not need expensive components like high-speed external modulator or high frequency radio frequency (RF) local oscillator, and it has the benefit of simple structure. It provides a viable solution for the optical-wireless hybrid access.

Key words optical communication; semiconductor laser; optical-wireless hybrid access; all-optical frequency-upconversion; injection locking

OCIS codes 060.2330; 140.5960; 060.2630; 140.3518

1 引 言

无线与宽带成为通信和整个信息的发展趋势,

但即便是目前的长期演进(LTE)移动通信的传输速率也只有约 10 Mb/s, 这距离宽带通信差距甚远。

收稿日期: 2011-08-19; 收到修改稿日期: 2011-10-25

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327603、2012CB315704)、国家自然科学基金(60736035)和山西省青年科技研究基金(2011021018)资助课题。

作者简介: 郭精忠(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事高速光通信和光子微波等方面的研究。

E-mail: xiaobao@tju.edu.cn

导师简介: 于晋龙(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光纤通信方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

为提高无线通信系统的容量并实现宽带通信,必然要采用更高频率的上变频技术将基带调制到高频载波上。采用光网络单元(ONU)上变频的方案受到高频器件高成本的制约,而采用光线路终端(OLT)产生高频载波信号的方案则必须解决高频载波信号的远距离传输问题。而“光载无线”(RoF)则结合了光纤和微波/毫米波的特点,解决了高频载波信号的传输问题,能实现大容量、低成本的微波/毫米波的光层传输和超宽带无线接入(不小于1 Gb/s)。RoF系统基于简化基站功能的理念所设计,复杂的数据处理和业务数据集中在 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。

RoF 的一个关键技术是如何低成本地产生稳定的光毫米波信号,目前光毫米波的生成方案主要是利用高频本振信号通过外调产生的高阶非线性效应进行载波抑制^[1]或者光滤波产生相应的毫米波信号^[2]。Weiss 等^[3]使 30 GHz 本振信号通过马赫-曾德尔调制器(MZM)载波抑制调制后先产生 60 GHz 的毫米波信号源再进行二次调制加载 12.5 Gb/s 的基带信号生成了 60 GHz 的毫米波光信号,并实现了无线传输 8.5 m 的实验。2005 年 Piquersa 等^[4]实现了直接光产生载波为 37.5 GHz 的 74.7 Mb/s 正交相键控(QPSK)信号。2010 年佐治亚理工学院^[5]利用相调将 2.5 Gb/s 基带信号通过 30 GHz 本振信号调制后通过光纤光栅(FBG)滤波产生了 60 GHz 的毫米波信号。

天津大学研究小组^[6,7]在 RoF 系统的研究中,前期已经完成了基于注入法布里-珀罗半导体激光器(FP-LD)的全光混频实验,实现了 2.5 Gb/s 基带外调信号光混频至最高 20 GHz 的副载波信号;并对上述实验进行了改进,通过对光混频信号色散分离,使得混频信号倍频,实现了 2.5 Gb/s 信号光混频至 30 GHz 的实验。

由于上述方案无法直接上变频至 30 GHz 以上频率,并且文献^[7]中涉及偏振滤波,要求系统传输具有稳定的偏振条件,使得在实际系统中无法直接使用。而基于注入锁定的上变频的频率主要取决于注入信号的光谱宽度,本文提出了利用直调激光器产生的宽啁啾谱的特性,注入至从分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)进行锁定,产生上变频信号。在理论分析的基础上,完成了 2.5 Gb/s 信号全光上变频至 30、35 和 40 GHz 的实验。本方案在理论上可以实现更高副载波频率(如 60 GHz)的全光上变

频,对于目前发展的 60 GHz 技术,提供了一种新的思路。并且该方案的结构较之前方案更加简单,节省成本,有利于目前的光-无线接入系统。

2 原 理

注入锁定是指主激光器(MLD) λ_1 注入至从激光器(SLD)激射波长 λ_0 附近时,从激光器自由振荡模式 λ_0 被抑制,输出光波长锁定在 λ_1 ,且输出光的相位与注入光相位同步的过程^[8]。当注入光为信号光时,如图 1 所示,波长为 λ_1 的信号光的谐波分量落入被注入激光器的锁定区域内,通过调整注入功率以及进入 DFB-LD 的偏振态,使得 MLD 的高次谐波边带注入锁定 SLD。由于 MLD 的各谐波分量之间相位关系一致,所以注入以后的 SLD 相位亦与 MLD 一致。假设 MLD 的光角频率为 ω_1 ,基带信号为 $g(t)$,经过调制后的信号为 $E_1(t)$,表达式为

$$E_1 = A \sqrt{g(t)} \exp(j\omega_1 t). \quad (1)$$

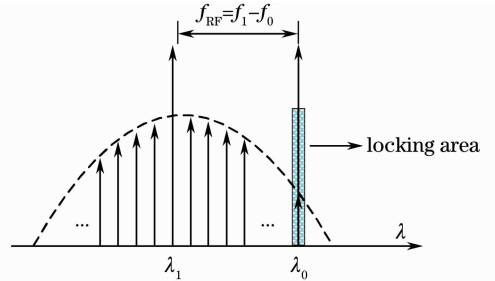


图 1 注入锁定全光上变频原理

Fig. 1 Principle of all-optical frequency-upconversion based on injection locking

MLD 的谐波分量注入锁定 SLD 后被放大的光场分量 $E_{L1}(t)$ 表示为

$$E_{L1}(t) = G_{L1} A_{-1} \exp[j(\omega_1 - \Delta\omega_h)t], \quad (2)$$

式中 $\Delta\omega_h$ 为 MLD 的谐波分量与原始波长的光角频率差, $\omega_1 - \Delta\omega_h$ 是 MLD 注入锁定的光角频率。此时在 MLD 中 $E_1(t)$ 和 $E_{L1}(t)$ 叠加得到的总光场起主要作用,叠加光场表示为

$$E_{Total} = E_1(t) + E_{L1}(t) = A \sqrt{g(t)} \exp(j\omega_1 t) + G_{L1} A_{-1} \exp[j(\omega_1 - \Delta\omega_h)t]. \quad (3)$$

光场强度表示为

$$I(t) = E_{Total}(t) E_{Total}^*(t) = [E_1(t) + E_{L1}(t)] \times [E_1^*(t) + E_{L1}^*(t)] = A^2 g(t) \exp(j\omega_1 t) + G_{L1}^2 A_{-1}^2 \exp[j(\omega_1 - \omega_h)t] + AA_{-1} G_{L1} \sqrt{g(t)} \times \exp(j\omega_h t) + AA_{-1} G_{L1} \sqrt{g(t)} \exp(-j\omega_h t) =$$

$$A^2 g(t) + G_{L1}^2 A_{-1}^2 + 2AA_{-1}G_{L1} \sqrt{g(t)} \cos \Delta\omega_h t. \quad (4)$$

从(4)式可以看出,MLD 锁定后输出的光信号包括了原始基带信号,MLD 的直流光信号以及光学上变频信号,上变频的频率为 MLD 的中心频率与其谐波频率的差。在实际系统中,上变频信号经过光电转换后需要经过窄带微波功率放大器进行放大后发射,所以上述信号中的直流和基带分量将被抑制,放大部分只有上变频的信号。

DFB 直调由于激光器载流子浓度随调制电流的变化而变化^[9],产生的直调信号不但受到幅度调制,还有相应的频率调制也就是啁啾,从而输出光谱变宽,具有更高阶的频谱分量,相对于外调信号,其注入激光器后可以得到更高的上变频频率。

3 实验结果

3.1 2.5 Gb/s 基带直调信号至 40 GHz 子载波上变频实验

图 2 为基于直调 DFB-LD 注入的全光上变频实验图,MLD 和 SLD 均为分布反馈式半导体激光器,实验中用于直调和注入的激光器阈值电流均为 15 mA。

由码型发生器(PPG)产生的 2.5 Gb/s 曼彻斯特码型伪随机码序列(PRBS)通过放大器后直接调制 MLD,直调光信号通过掺铒光纤放大器(EDFA)

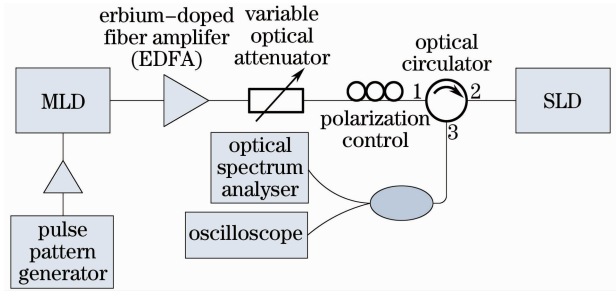


图 2 基于 DFB-LD 注入的全光上变频实验图

Fig. 2 Experimental setup of all-optical

frequency-upconversion based on DFB-LD injection

放大并通过光可调衰减器和偏振控制器调整功率和偏振态后注入光环形器 1 口,环形器 2 口输出接被注入 SLD 进行注入锁定,注入功率为 6 dBm。环形器 3 口接光耦合器用来监测和显示实验结果。

直调 MLD 的直流偏置电流为 70 mA,中心波长为 1553.86 nm,图 3(a)为直调激光器波形图,图 3(b)为直调激光器未调制光谱与直接调制光谱对比图,其中光谱仪为安立 MS9710C,实验中分辨率均设定为 0.05 nm。从图中可以看出,直调后光谱展宽明显,在光谱仪分辨率下测得调制光谱的双峰间隔为 0.32 nm 左右。SLD 的直流偏置电流为 50 mA,输出功率为 3.2 dBm,其光谱如图 4(a)所示。通过微调 MLD 的温度,使得 MLD 的直调光谱长波长侧的峰值位于 SLD 的中心波长附近,用于注入锁定。图 4(b)为注入锁定上变频的光谱图。

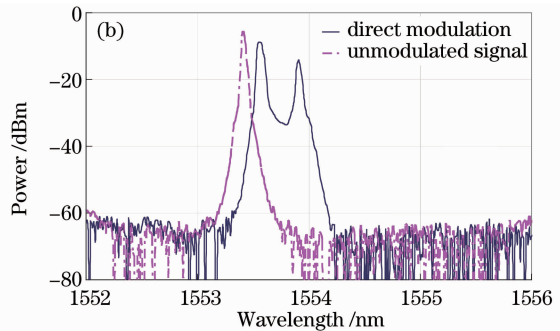
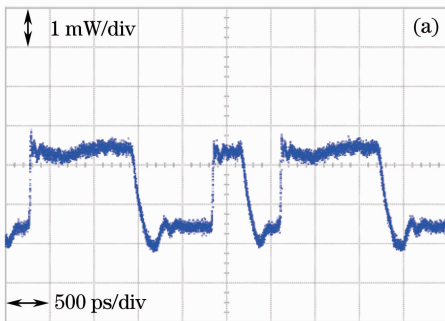


图 3 直调激光器波形图与光谱图。(a)直调激光器输出时域波形图;(b)直调激光器调制与未调制输出光谱

Fig. 3 Spectrum and waveform for direct modulated laser. (a) Pattern diagram of direct modulation signal;

(b) spectrum of unmodulated signal compared with modulated signal

从图中可以看出,MLD 的啁啾边带注入至 SLD,当其落入 SLD 的谐振峰附近且满足注入锁定条件时^[8],SLD 对高频谐波分量锁定放大,被放大的谐波分量与注入信号的相位同步,SLD 的输出为注入基带信号的光上变频信号。通过光谱仪测得 SLD 输出信号的光谱如图 5 所示,图 5(a)所示的光谱频率扫描宽度为 40 GHz,分辨率带宽为 300 kHz,

图 5(b)电谱扫描宽度为 6 GHz,分辨率带宽为 100 kHz。从电谱图可以测得上变频中心频率为 40 GHz,同时可以看出 SLD 输出的信号包含了基带信号和上变频信号,如上文所提,在实际系统中为了便于发射,可以使用窄带放大器,将基频信号滤除。此外,对产生的高频副载波进行了相噪测试,如图 5(c)所示,40 GHz 载波在分辨率带宽为 10 kHz

时,其相噪测试结果为 -81 dBc/Hz。

图 6 为上变频的时域波形,从实验结果图中可以看到在波形的上升沿有过冲,在下降沿有拖尾现

象。上升沿的过冲来源于直调激光器的直调过冲,下降沿的拖尾是因为 DFB-LD 中载流子浓度恢复造成的。

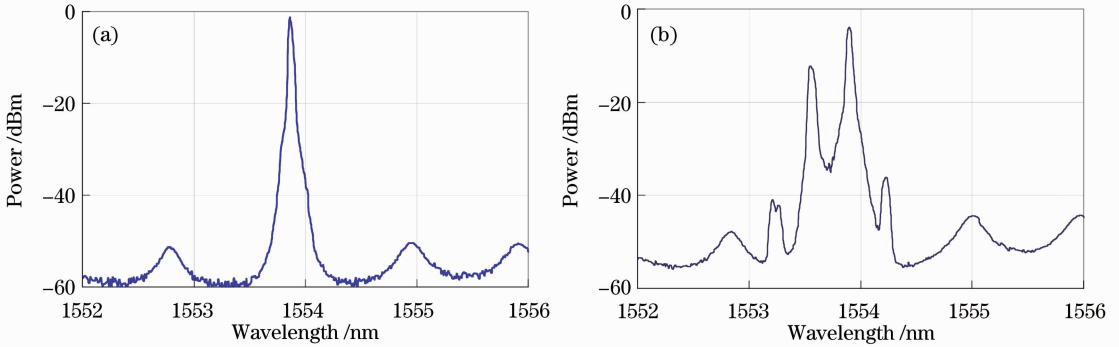


图 4 注入锁定上变频光谱对比图。(a)未注入的 SLD 光谱图;(b)注入锁定后的上变频光谱图

Fig. 4 Optical spectrum of frequency-upconversion. (a) Spectrum of non-injected DFB-LD; (b) spectrum of injected locking DFB-LD

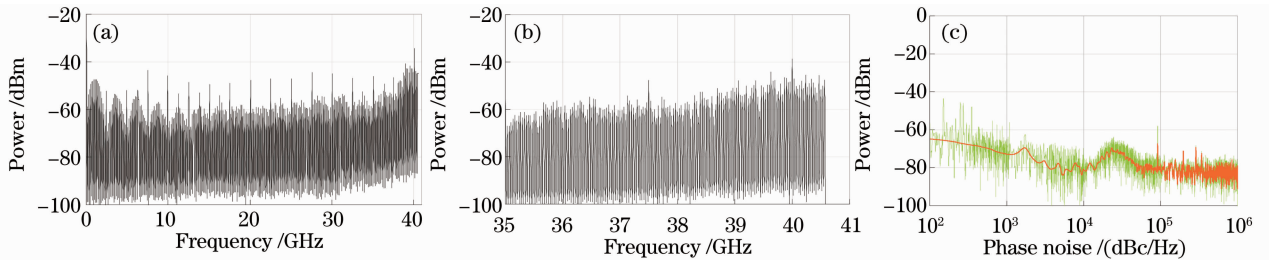


图 5 注入锁定上变频频谱图。(a)扫描宽度为 40 GHz,分辨率为 300 kHz;(b)扫描宽度为 6 GHz,分辨率为 100 kHz;(c) 40 GHz 频点相噪测试

Fig. 5 Frequency spectrum of frequency-upconversion. (a) Span is 40 GHz, resolution bandwidth is 300 kHz; (b) span is 6 GHz, resolution bandwidth is 100 kHz; (c) phase noise at 40 GHz

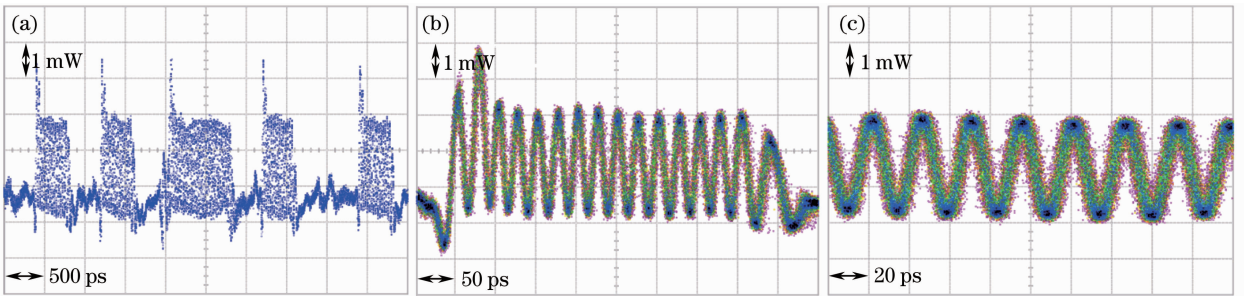


图 6 40 GHz 副载波注入锁定上变频波形图。(a) 12 个码元周期波形;(b) 1 码元周期波形;(c) 40 GHz 副载波信号

Fig. 6 Waveform of frequency-upconversion signal in (a) 12-code cycle; (b) 1-code; (c) 40 GHz subcarrier

3.2 40 GHz 子载波上变频传输实验

由于直调信号具有啁啾,在光纤中传输时受色散影响,长距离传输会使信号产生失真,经过上变频以后的光微波信号亦存在传输问题。如图 7(a)和 (b)所示,经过 10 km 普通单模光纤(SMF)传输后,信号出现起伏;图 7(c)和(d)为光微波信号经过光电转换后的频域特性,40 GHz 副载波相噪测试在 10 kHz 处为 -77 dBc/Hz,出现上述信号失真主要是直调产生的啁啾作用于上变频信号导致的。但是

值得注意的是,由于上变频以后的光微波信号为单边带调制信号,光微波信号传输本身不受微波衰落的影响。

3.3 全光上变频可调谐性实验

本方案对上变频的载波频率调谐性亦进行了实验研究,通过减小直调电信号放大器增益,使得 MLD 直调光谱变窄,同时微调注入波长,产生了载波频率分别为 35 GHz 和 30 GHz 的上变频信号,图 8(a)~(c)和 (d)~(f)所示分别为 35 GHz 和

30 GHz副载波信号的时频域图。从图中可以看出，相比较40 GHz副载波信号,35 GHz和30 GHz的信

号质量有所提升,主要是因为倍频系数低,信号源导致的本底信号不稳定性影响小。

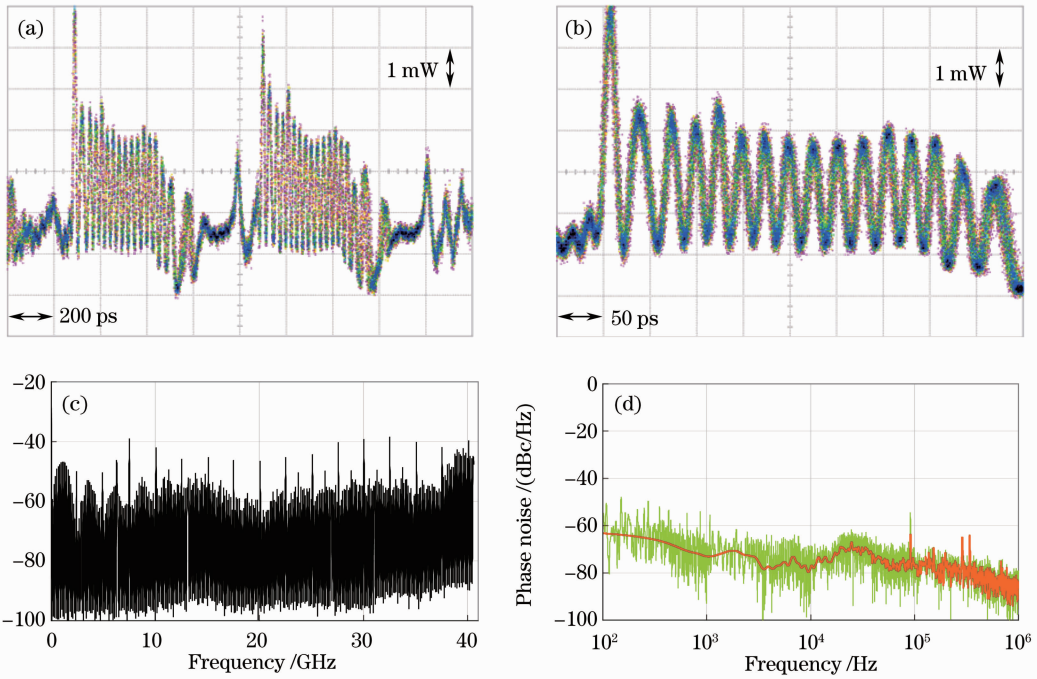


图 7 40 GHz 上变频信号传输 10 km 后的时域与频域图。(a) 4 码字 pattern 波形;(b) 单个码字 pattern 波形; (c) 频率扫描宽度 41 GHz 频谱图;(d) 40 GHz 相噪测试

Fig. 7 Time domain and frequency spectrum of the upconversion signal with 40 GHz subcarrier after 10 km transmission. (a) 4-code pattern waveform; (b) single code waveform; (c) frequency spectrum of millimeter-wave signal with span 41 GHz; (d) phase noise test at 40 GHz

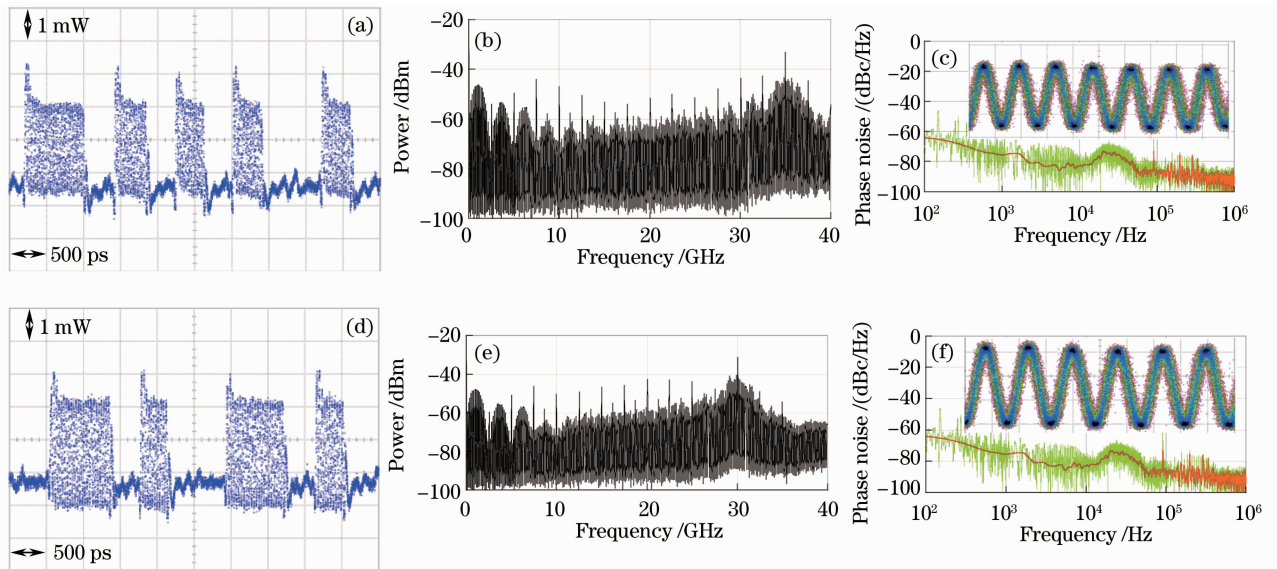


图 8 其他载频毫米波信号时域与频域图。35 GHz 上变频信号的 (a) pattern 波形;(b) 频谱图;(c) 10 kHz 下 -83 dBc/Hz 的相噪测试和 30 GHz 上变频信号的 (d) pattern 波形;(e) 频谱图;(f) 10 kHz 下 -83 dBc/Hz 的相噪测试

Fig. 8 Waveform and frequency spectrum of the upconversion signal with different subcarrier. 35 GHz subcarrier: (a) pattern waveform; (b) frequency spectrum; (c) phase noise of 35 GHz (-83 dBc/Hz@10 kHz) and 30 GHz subcarrier; (d) pattern waveform; (e) frequency spectrum; (f) phase noise of 30 GHz (-82.8 dBc/Hz@10 kHz)

4 结 论

提出了一种基于低速信号直接调制 DFB-LD, 使其输出光谱展宽, 并利用展宽后的高次谐波分量注入锁定另外一个 DFB-LD, 产生光学上变频的技术。分析了光信号高阶边带注入锁定上变频和 DFB-LD 直调谱展宽的原理, 最后完成了 2.5 Gb/s 直调基带光信号注入 DFB-LD, 产生了 30、35 和 40 GHz 副载波调制的全光上变频实验。理论和实验分析表明, 该方案结构简单, 无需高频的电本振和高速电光调制器, 由于实验室缺乏 40 GHz 以及以上的观测及解调设备, 所以没有进行上变频信号的解调以及更高频率上变频的实验, 但是从理论上来说明方案仍具有上变频至 60 GHz 副载波的潜力, 并且具有可集成性, 对于目前光载无线技术的发射部分提供了较高的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Tianliang Wang, Hongwei Chen, Shizhong Xie *et al.*. All-optical up-conversion for 2.5-Gb/s signals in ROF systems based on FWM effect in HNLF[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1037~1039
- 2 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
- 3 M. Weiss, M. Huchard, A. Stohr *et al.*. 60-GHz photonic millimeter-wave link for short- to medium-range wireless transmission up to 12.5 Gb/s[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(15): 2424~2429
- 4 M. A. Piquersa, V. Vidal, J. L. Corral *et al.*. Direct photonic generation of electrical vector modulations at microwave/millimeter-wave frequencies[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(9): 1947~1949
- 5 Hung-Chang Chien, Yu-Ting Hsueh, A. Chowdhury *et al.*. Optical millimeter-wave generation and transmission without carrier suppression for single- and multi-band wireless over fiber applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(16): 2230~2237
- 6 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 注入的无本振光载波全光混频技术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3140~3147
- 7 Wang Wenrui, Yu Jinlong, Wu Bo *et al.*. Novel radio over fiber frequency up-conversion in millimeter wave band[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0305005
王文睿, 于晋龙, 吴波等. 新型无本振毫米波光纤无线通信上变频系统[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0305005
- 8 R. Hui, A. D'Ottavi, A. Mecozzi *et al.*. Injection locking in distributed feedback semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(6): 1688~1695
- 9 J. C. Cartledge, R. C. Srinivasan. Extraction of DFB laser rate equation parameters for system simulation purposes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(5): 852~860

栏目编辑: 谢 婧