

基于分布反馈注入锁定的连续可调光子微波 倍频实验研究

韩丙辰^{1,2} 于晋龙^{1*} 王文睿¹ 郭精忠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 提出了一种基于注入锁定分布反馈式(DFB)激光器的双波长差频微波/毫米波信号产生方案。方案利用正弦波光信号通过半导体光放大器(SOA)进行非线性展宽,产生高阶分量,然后注入到两个DFB激光器后进行锁定放大,产生频率连续可调的倍频信号。在实验中,注入的正弦波光信号频率为1.25 GHz,得到20~40 GHz频率范围内1.25 GHz的任意自然数倍的连续可调微波信号,其最高倍频数为32。

关键词 光通信;无线通信;倍频;注入锁定;分布反馈式激光器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1205004

Experimental Study of Continuously Tunable Photonic Microwave Frequency Multiplication Based on Distributed Feedback Injection Locking

Han Bingchen^{1,2} Yu Jinlong^{1*} Wang Wenrui¹ Guo Jingzhong¹ Wang Ju¹ Yang Enze¹

(¹School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract An approach to achieving continuously tunable microwave/millimeter-wave frequency multiplication signal based on injection locked dual-wavelength difference-frequency distributed feedback (DFB) laser is proposed. Wave optical signals are nonlinearly broaden by semiconductor optical amplifier (SOA), and high-order components are generated. The sine wave optical signal is injected into two DFB laser and locked enlarge, then the continuously tunable frequency multiplication is generated. In the experiment, the injected sine wave optical signal frequency is 1.25 GHz, the continuously tunable microwave signal with any natural multiples of 1.25 GHz in the 20~40 GHz frequency range is achieved, and the highest multiplier of 32.

Key words optical communications; wireless communication; frequency multiplication; injection locking; distributed feedback laser

OCIS codes 060.2330; 060.4510; 060.5625

1 引言

随着社会信息化的高速发展,电话网、电视网和互联网的高度融合,交互式网络电视(IPTV)/高清晰度电视(HDTV)和对等(P2P)数据交换等高带宽

数据业务的兴起使得用户对超高速互联网带宽的需求已经不局限于传统的有线连接,而更倾向于采用全无线化解决方案。传统的无线接入方式主要以文本、语音和图片为主,带宽有限,即便目前的3G、长

收稿日期: 2012-07-20; **收到修改稿日期**: 2012-08-21

基金项目: 国家973计划(2010CB327603和2012CB315704),山西省青年科技研究基金(2011021018)和天津市基础研究重点项目(10JCZDJC15600)资助课题。

作者简介: 韩丙辰(1976—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: han_bchen@126.com
(中国光学学会会员号:S042011203M)

* **通信联系人**。E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

期演进(LTE)技术逐步向以视频等为基础的交互式多媒体数据发展,但是其带宽仍然有限,并且随着用户数的增加,基站系统容量有限,使得服务质量随之下降。光载无线(RoF)技术采用将无线射频信号加载到光纤中,通过光纤进行远距离的有线传输及基站无线发射结合起来,不但具备传统光纤通信技术的低损耗、高带宽,还具有无线射频通信的灵活性等特点,成为下一代宽带移动通信系统设计中的关键技术,同时还在未来的卫星通信以及其他短距无线通信领域中有着广阔的应用前景。

光载无线系统依赖于低成本、高质量的微波/毫米波信号源,而高频率的电微波源和电光调制器成本较高,所以从光域将较低频率的信号倍频至更高频率的光载微波/毫米波信号,从而可以在光域加载基带信号用于光载无线信号的传输成为了研究热点^[1~12]。目前光载微波倍频的研究主要有基于载波抑制或者相位延迟的马赫-曾德尔调制器(MZM)的倍频系统^[1~5]、注入双区段半导体激光器^[6]、基于塔尔博特效应的倍频^[7,8]以及两束激光束直接在光电探测器中差频产生微波信号^[9]等。天津大学实验小组在基于半导体激光器注入锁定产生微波信号方面进行了一定的研究工作^[10~13]。本文提出了基于注入锁定半导体激光器的倍频技术,主要是利用频谱展宽的光信号在被注入激光器中选频放大,即只滤出注入信号的特定频率分量,从而实现倍频。研究中完成了 1.25 GHz 正弦信号通过半导体放大器(SOA)展宽频谱注入分布反馈(DFB)激光器产生 16~32 倍任意自然数倍可调的光微波/毫米波生成实验验证。

2 工作原理

图 1 为基于注入锁定 DFB 激光器的任意整数倍频原理。频率为 ω_s 的正弦信号通过电光调制后的光谱如图 1(a)所示,在正交偏置点下其输出主要为输入信号的线性调制分量,也可以通过改变偏置点使输出信号的高阶分量增强。将调制的光信号注入至 SOA 中,利用其四波混频效应将信号展宽^[14,15],如图 1(b)所示。当 SOA 输出的谱展宽光信号分别注入至两个从激光器中,外部光的不同频率分量分别锁定从激光器。由于外部光信号不同频率分量之间存在相干性,所以两个从激光器被注入锁定后亦存在相干性,当两个被锁定的激光器合成到同一个光路中将实现倍频。图 1(c)为以原始信号波长 λ_0 为中心的高阶边带分别注入至从激光

器产生的倍频信号。

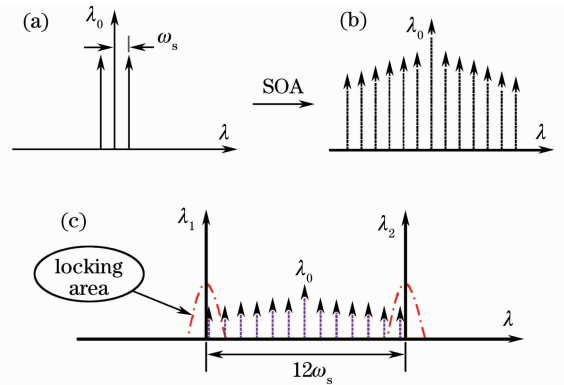


图 1 系统原理图。(a)调制器输出;(b) SOA 展宽光谱;(c)注入锁定

Fig. 1 Principle of frequency multiplication. (a) Output of modulator; (b) output of SOA; (c) the injection locking in slave DFB

并且,注入锁定的带宽和注入强度有关系,由于本方案中注入为信号光,且其边带幅度以中心波长向两侧衰减,故为了得到更高的倍频,需要平衡注入功率与锁定稳定性之间的关系。1) 当注入较弱时,高阶边带分量功率不足以保证从激光器被稳定注入锁定,容易受外界条件影响;2) 当注入较强时,由于外部光信号边带之间频率间隔小,从激光器会受多个边带影响而导致锁定不稳定,而且会引入额外的非线性效应;

此外,由于实验中所用半导体激光器为多量子阱材料,只有注入信号中的横电磁波(TE 模式)起作用,所以注入实验对偏振敏感。在实验中可以通过调整偏振态来改变注入到激光器中的有效功率。

3 系统实验及结果分析

图 2 为基于注入锁定 DFB 激光器的任意数倍频实验框图,ESA 为电谱仪,TIA 为跨阻放大器,

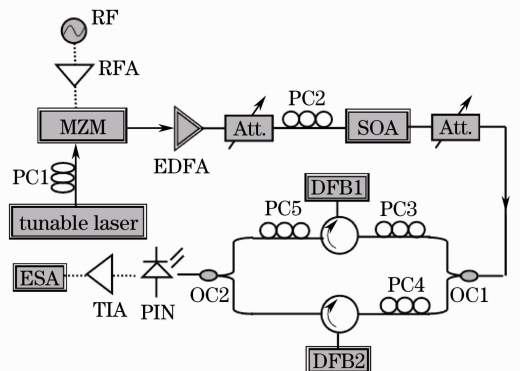


图 2 系统实验框图

Fig. 2 System test block diagram

RFA 为射频放大器。可调激光器产生的连续光经过 PC1 调整偏振态后通过 MZM 加载正弦信号,再经过掺铒光纤放大器(EDFA)和衰减器(Att.)调整功率后注入到 SOA 中进行频谱展宽。SOA 输出的宽谱信号经过功率调整后通过 3 dB 耦合器(OC1)分为两路,再分别调整偏振态后通过环形器注入至 DFB 激光器中。被锁定的 DFB 激光器输出信号通过环形器 3 口再经过 3 dB 耦合器(OC2)合并至一路通过光电探测器(PIN)转换为电信号。

图 3 为 MZM 的输出和 SOA 谱展宽输出光信号经过光电转换后的频谱图。SOA 的驱动电流为 220 mA,调制信号为 1.25 GHz 的正弦信号。在频谱图分辨率带宽(RBW)为 300 kHz 的情况下,调制器输出信号最高只包含 4 阶分量(功率比为 33 dB);

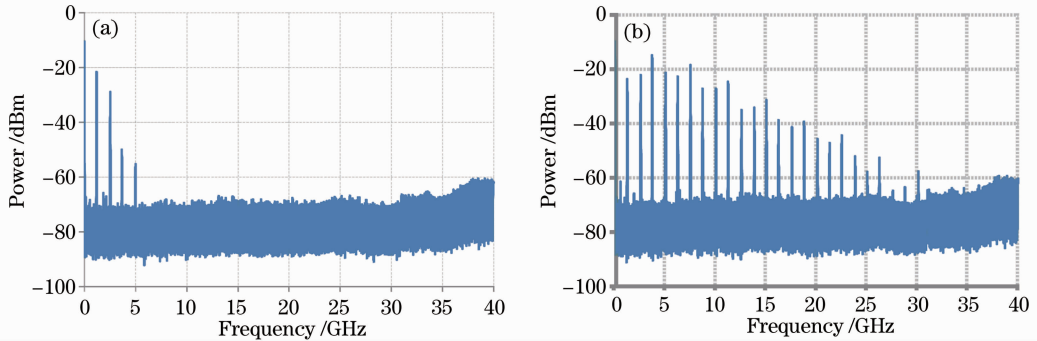


图 3 SOA 输入与输出频谱图。(a) MZM 输出频谱;(b) SOA 输出展宽信号频谱

Fig. 3 Frequency spectra of (a) output of MZM and (b) output of SOA

调整 DFB1 和 DFB2 的波长间隔为 0.2 nm (25 GHz) 左右,通过频谱仪观察图 4 所示拍频信号,SPAN 表示跨度。由于 DFB 激光器线宽约为 10 MHz,故拍频信号的线宽亦为 10 MHz 量级。通过注入外部信号,调整 TLD 波长和衰减器衰减,使注入信号的中心波长位于两个 DFB 激光器波长之间,再微调 DFB 激光器的波长和注入偏振态,使 DFB1 和 DFB2 均锁定,注入至 DFB 中的光功率为 -25 dBm,锁定后的频谱如图 4(b)~(d)所示。从图 4(a)和图 4(b)、(c)对比可以看出,锁定后的 25 GHz 频域信号频谱纯度高,线宽窄。图 4(d)为扫描宽度 40 GHz 的频谱图,测得其边带抑制比为 21.5 dB。图 4(e)为 25 GHz 倍频信号相噪测试曲线,其在 10 kHz 处的相噪为 -97.9 dBc/Hz。为了与原始的 1.25 GHz 信号进行对比,图中亦给出了 1.25 GHz 信号源的相噪曲线。由于倍频信号的噪声功率增加与倍频倍数的平方成正比例关系^[16]。

当 1.25 GHz 倍频至 25 GHz 时,倍频数为 20,故噪声增加 26 dB。从图 4(e)中可以看出,在 0.1~

而在 SOA 的输出信号中则包含了基频的 24 阶分量 (30 GHz),频谱明显展宽。由于光信号在频域展开时存在上下边带,故上述谱展宽光信号理论可锁定的带宽为 60 GHz。在实验中,也是采用以图 1 所示的注入方式,利用光信号的对称上下边带分别注入两个 DFB 激光器进行锁定。DFB1 和 DFB2 采用相同型号的分布反馈式半导体激光器,其偏置电流分别设置为 42 mA 和 45 mA,未注入条件下输出功率均为 4.5 dBm。激光器的输出波长与温度成正比,当增加温度时激光器波长会红移。基于此特点,可以通过调节温度来微调 DFB 激光器的波长,同时实验中为了保证激光器的温度稳定性,采用了基于比例-积分-微分(PID)算法的温度稳定控制,使激光器的温度稳定性高于 0.01 °C。

1.0 kHz 区间,实际测试的相噪与理论值相差在 3 dB 以下;但是在大于 1 kHz 的区间,实际测试值要优于理论值。这是因为 1.25 GHz 的相噪测试受测试设备的噪声基底的限制,无法测试到其真实的相噪特性,1.25 GHz 信号源的实际相噪在大于 1 kHz 区间应该是优于实验中的测试值。图 4(f)为与频域相对应的 25 GHz 倍频信号的时域波形,其时间窗口为 200 ps,对应 5 个正弦周期。

为了验证系统方案的可调谐性,下面分别进行了 27 倍频(33.75 GHz)和 32 倍频(40 GHz)的实验。首先将 DFB1 和 DFB2 的波长间隔调整为约 0.26 nm,同时微调注入光信号波长和偏振态,使得 DFB1 和 DFB2 的拍频信号稳定在 33.75 GHz。图 5 为 33.75 GHz 倍频信号的频域测试结果,其中图 5(a)~(c)为不同扫描带宽下的频谱图。图 5(d)所示其 10 kHz 处的相噪测试为 -95 dBc/Hz,较 25 GHz 倍频信号下降了 2.9 dB,与理论值 2.6 dB 基本符合。再调谐 DFB1 和 DFB2 的波长和相应的偏振态,可以得到 40 GHz 倍频信号,如图 6

所示。其 10 kHz 处相噪为 -91.3 dBc/Hz, 与理论值 -93.8 dBc/Hz 相差 2.5 dB。这一方面是由于倍频系数高, SOA 输出信号的非均匀展宽导致在远离中心波长处的光边带分量较弱, 使得注入锁定的稳

定性降低从而影响倍频信号的稳定性; 另一方面如图 6(a) 所示, 频谱仪在频率大于 35 GHz 的范围内本身噪声基底增加, 从而影响了 40 GHz 处的倍频信号相噪测试。

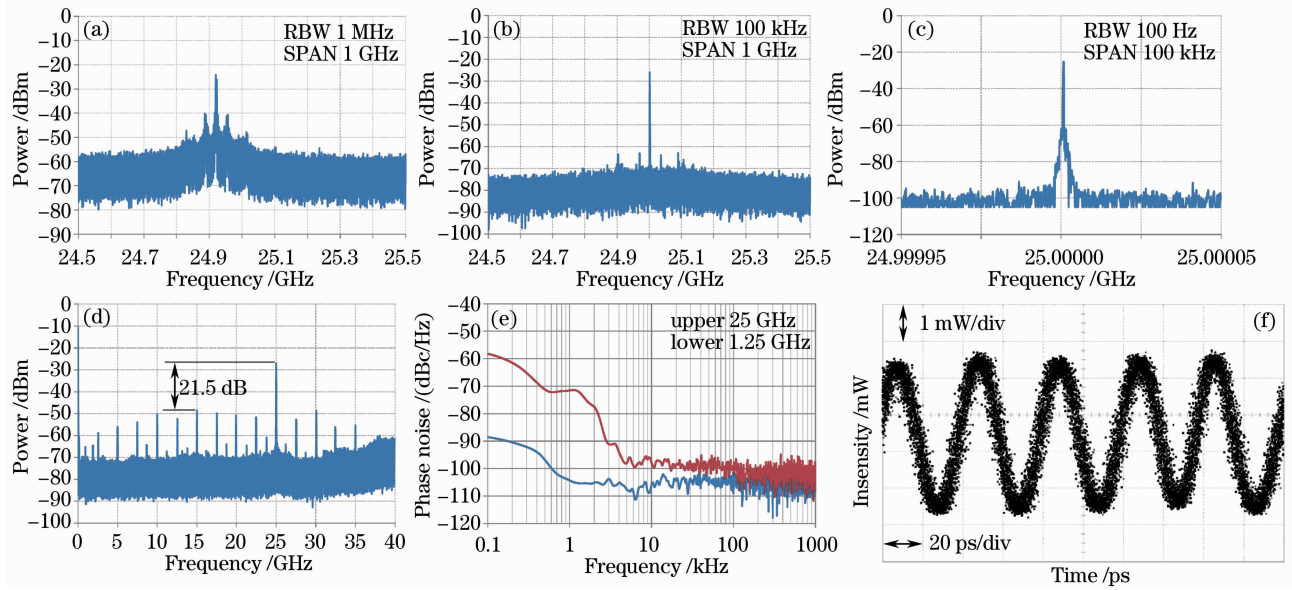


图 4 25 GHz 倍频信号。(a) 未注入锁定的拍频; (b) SPAN 为 1 GHz 的锁定的拍频; (c) SPAN 为 100 kHz 的 25 GHz 频谱; (d) SPAN 为 40 GHz 的频谱; (e) 25 GHz 相噪测试; (f) 25 GHz 时域波形
Fig. 4 25 GHz signal. (a) Beat frequency spectrum without injection; (b) injection locked frequency spectrum with SPAN is 1 GHz; (c) SPAN is 100 kHz; (d) SPAN is 40 GHz; (e) 25 GHz phase noise; (f) 25 GHz waveform

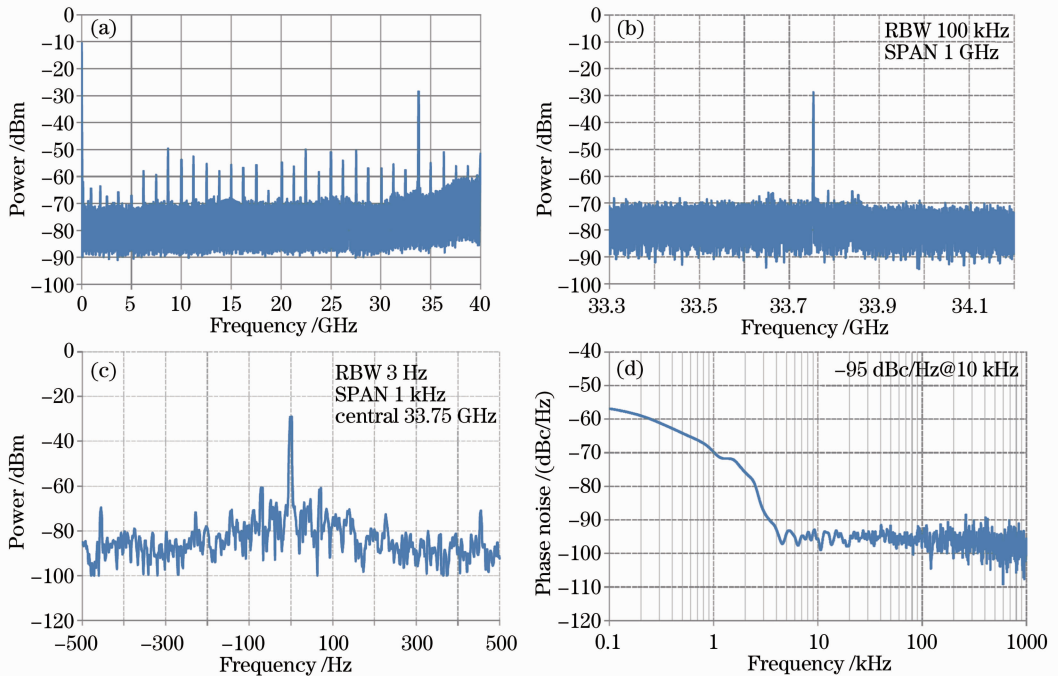


图 5 33.75 GHz 倍频信号频域测试。(a) SPAN 为 40 GHz 的频谱; (b) SPAN 的 1 GHz 频谱; (c) SPAN 为 1 kHz 的频谱; (d) 相噪
Fig. 5 Test of 33.75 GHz signal. (a) SPAN is 40 GHz; (b) SPAN is 1 GHz; (c) SPAN is 1 kHz; (d) phase noise

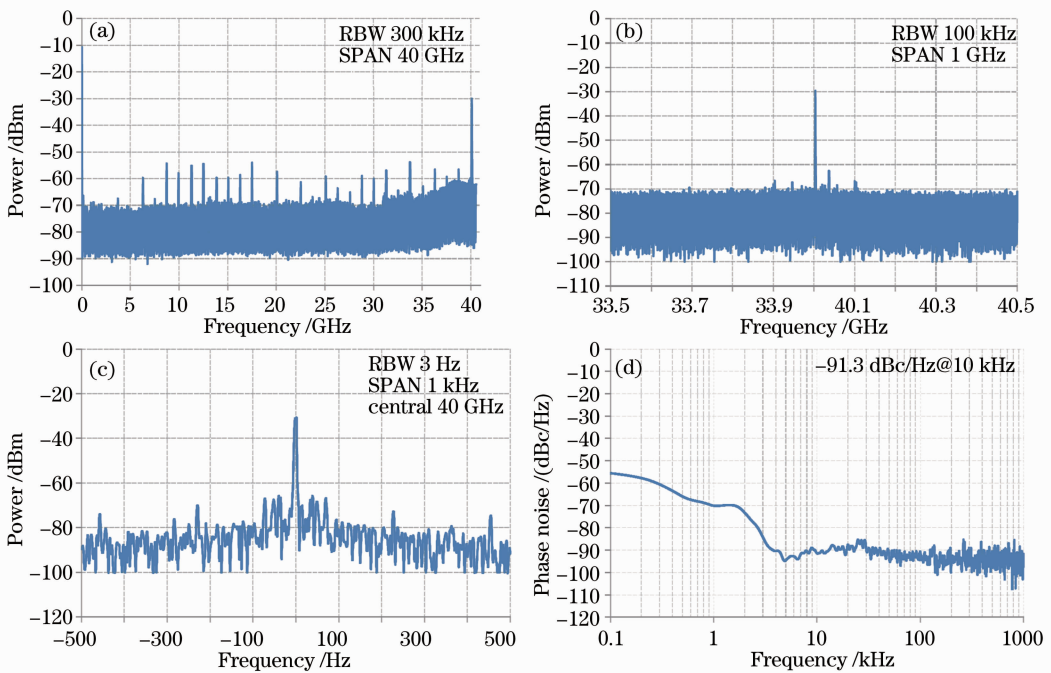


图 6 40 GHz 倍频信号频域图。(a) SPAN 为 40 GHz 的频谱;(b) SPAN 为 1 GHz 的频谱;
(c) SPAN 为 1 kHz 的频谱;(d)相噪

Fig. 6 40 GHz signal. (a) SPAN is 40 GHz; (b) SPAN is 1 GHz; (c) SPAN is 1 kHz; (d) phase noise

4 结 论

通过对 DFB 激光器进行注入锁定的机理实现了自然数倍频微波信号的产生。实验中注入的光信号为 1.25 GHz 正弦信号,通过 SOA 进行非线性展宽,再注入到 DFB 激光器进行锁定放大,产生了 20~40 GHz 可调的倍频信号。该方案的倍频数可以为 1.25 GHz 的任意自然数倍,在实验室条件下,其最高倍频数为 32,远高于一般的光倍频系统。

由于缺乏 40 GHz 以上测试设备,实验没有对 40 GHz 以上信号进行测试,但是从实验验证来看,只要具有足够宽的注入信号光谱,即可产生更高的倍频信号。相比较其他倍频方案,该方案可以实现有源滤波,对弱信号进行注入放大,理论上倍频倍数取决于谱展宽的效率。实验方案中采用了全光纤结构进行注入锁定,由于长光纤会引入相干噪声,影响注入锁定拍频信号的稳定性,进一步可以考虑采用光集成的方式,使用 III-V 族材料将外部注入光源、调制器、SOA、PIN、DFB1 和 DFB2 等进行集成,从而减小体积,增加稳定性。

参 考 文 献

1 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.毫米波副载波光纤通信技术研究进展[J].*中国激光*, 2006, **33**(4): 481~488

2 Zhang Dapeng, Yu Chongxiu, Xin Xiangjun *et al.*. Design of upconversion 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 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

4 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

5 Yang Xusheng, Huang Xuguang, Xie Jinling *et al.*. Investigation of generation and transmission performance of milli-meter wave based on single sideband modulation [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(5): 706~710

杨旭生,黄旭光,谢金玲等.基于单边带调制的光毫米波产生及其传输特性研究[J].*光电子·激光*, 2011, **22**(5): 706~710

6 C. Laperle, M. Svilans, M. Poirier *et al.*. Frequency multiplication of microwave signals by sideband optical injection locking using a monolithic dual-wavelength DFB laser device[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory & Techn.*, 1999, **47**(7): 1219~1224

7 G. Meloni, G. BerreUini, M. Scaffardi *et al.*. 10 GHz to 2.5 THz optical frequency multiplication [C]. Pisa: Optical Communication, 2005, **1**: 59~60

8 Wu Bo, Yu Jinlong, Wang Zheng *et al.*. Optical pulse trains with multiplied repetition frequency based on fractional talbot effect in fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1249~1254

吴波,于晋龙,王争等.应用光纤分数塔尔博特效应产生重

- 复频率倍频的光脉冲序列[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1249~1254
- 9 Hong Lei, Su Jue, Yang Li *et al.*. Frequency tunable microwave and millimeter wave sources with photonic generation [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(1): 64~66
- 洪 蕾, 苏 觉, 杨 利等. 一种频率可调的光学生成微波毫米波源[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(1): 64~66
- 10 Wu Bo, Yu Jinlong, Wang Wenrui *et al.*. Photonic up-conversion technique in millimeter wave band based on nonlinear effects of semiconductor optical amplifier in ROF system [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(11): 1638~1645
- 吴 波, 于晋龙, 王文睿等. ROF系统中基于SOA非线性效应的光子上变频技术研究[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(11): 1638~1645
- 11 Han Bingchen, Yu Jinlong, Wang Wenrui *et al.*. Research on subcarrier frequency signal generation based on FP-LD [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(2): 267~272
- 韩丙辰, 于晋龙, 王文睿等. 基于FP-LD实现副载波信号产生[J]. 光电子·激光, 2012, **23**(2): 267~272
- 12 Wu Bo, Yu Jinlong, Wang Wenrui *et al.*. Generation of microwave subcarrier phase modulation signal based on optical injection into a semiconductor laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(5): 054208
- 吴 波, 于晋龙, 王文睿等. 基于注入半导体激光器的微波副载波相位调制信号产生[J]. 物理学报, 2012, **61**(5): 054208
- 13 Guo Jingzhong, Yu Jinlong, Wang Wenrui *et al.*. Optical frequency up-conversion by injection locking semiconductor laser with directly modulated baseband signal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0205003
- 郭精忠, 于晋龙, 王文睿等. 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[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0205003
- 14 A. D'Ottavi, A. Iannone, A. Mecozzi *et al.*. Efficiency and noise performance of wavelength converters based on FWM in semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(4): 357~359
- 15 B. F. Kennedy, K. Bondarczuk, L. P. Barry. Pump-probe detuning dependence of four-wave mixing pulse in an SOA [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(24): 2033~2035
- 16 T. Berceci, S. Kudszus. Optical millimeter wave generation utilizing a double locking technique [C]. London: Microwave Conference, 2001. 1~4, 24~26

栏目编辑:何卓铭