

利用垂直腔表面发射激光器注入锁定实现上变频

李知峰 王红杰 王文睿* 王菊 安超 黑克非 吴穹 于晋龙 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要 提出了一种基于垂直腔表面发射激光器(VCSEL)的无本振光子微波上变频方案。该方案将相对低速的伪随机基带信号注入 VCSEL 中,利用注入信号的高次谐波注入锁定 VCSEL。被锁定激光器波长与原注入光信号在谐振腔中相干差拍,产生上变频调幅微波信号。实验中利用 2.5 Gb/s 非归零码强度调制信号注入锁定 VCSEL,无需本振,实现了载波频率为 14.3 GHz 的光子微波上变频,10 kHz 偏移处载波相位噪声达 -81 dBc/Hz。通过调节注入光信号的波长和功率,进一步实现载波频率在 7.5~23 GHz 之间的调谐,验证了该方案的可行性,并对系统性能进行了误码分析,系统代价为 1.4 dB。结果证明该方案无需微波本振,仅需采用价格低廉的 VCSEL 即可实现光子微波上变频,从而为无线-光混合接入网中光子微波信号产生技术提供了一种低成本解决思路。

关键词 光通信;全光上变频;注入锁定;垂直腔表面发射激光器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0206001

Upconversion by Vertical Cavity Surface Emitting Laser Injection Locking

Li Zhifeng Wang Hongjie Wang Wenrui Wang Ju An Chao Hei Kefei
Wu Qiong Yu Jinlong Yang Enze

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A microwave photon upconversion scheme based on a vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) without local oscillator is proposed. The relatively low pseudo-random baseband signal is injected into the VCSEL, and the higher harmonics of the injected signal is used to lock the VCSEL. The injection-locked laser wavelength beats coherently with the original optical signal in the cavity which generates the upconverting amplitude modulated microwave signal. In the experiment, 2.5 Gb/s nonreturn-to-zero code intensity modulated signal is used to inject-lock the VCSEL, which achieves a carrier frequency of 14.3 GHz microwave photon upconversion without local oscillator, and the carrier phase noise is -81 dBc/Hz at 10 kHz frequency deviation. Furthermore, modulation of 7.5~23 GHz carrier frequency can be achieved by adjusting the wavelength and power of injection signal, and the feasibility of the scheme is verified. The bit error rate performance of the system is analyzed, and system consideration is 1.4 dB. The result shows that the upconversion signal can be achieved by only using the inexpensive VCSEL without microwave local oscillator, which provides a low cost solution idea for the wireless-optical hybrid access network photon microwave signal generation technique.

Key words optical communications; all-optical frequency upconversion; injection locking; vertical cavity surface emitting laser

OCIS codes 060.2330; 060.4510; 060.4264; 140.3520

1 引言

随着通信产业的迅猛发展,接入技术越来越呈

现出大容量和无线化的特点:一方面,光纤通信宽带、大容量的特点可以满足视频和多媒体等新型数

收稿日期: 2013-07-18; 收到修改稿日期: 2013-09-04

基金项目: 国家 973 计划(2012CB315704)、国家自然科学基金(61205061)、博士点基金(20120032120029)

作者简介: 李知峰(1988—),男,硕士研究生,主要从事于高速光纤通信和光载微波方面的研究。

E-mail: ofclablzf@tju.edu.cn

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

* 通信联系人。E-mail: wangwenrui@tju.edu.cn

据业务对接入带宽的要求;另一方面,微波无线接入技术则可以为终端用户提供灵活、泛在的接入服务。结合两者的优点,构建高速宽带的无线-光混合接入网,为用户提供高速、宽带、灵活、无处不在的接入已经成为接入技术研究的热点之一。在无线-光混合接入网中,由于同时存在光、微波两种信号,不经过光-电转换的过程,在光域直接将基带信号上变频至微波载波信号的光子微波上变频技术无疑是一种低成本、高灵活性的解决方案。因此,光子微波上变频技术引起了研究人员的广泛关注^[1-5]。

目前光子微波上变频方案主要包括利用半导体光放大器(SOA)中的交叉增益调制(XGM)、非线性偏振旋转效应(NPR)、电吸收调制器(EAM)中的交叉吸收调制效应(XAM),利用非线性光纤和非线性晶体的四波混频效应和交叉相位调制效应完成上变频,此外还有将数据注入到环形激光器利用其多纵模产生微波信号等^[2,6-9]。但在上述方案中,或是需要采用相对高频的微波本振,或是很难控制稳定性,上变频成本较高。

在天津大学光纤通信实验室的前期研究工作中,提出了基于注入锁定分布反馈(DFB)激光器的无本振光子微波上变频方案^[4-5],该方案无需微波本振,通过将低速信号注入锁定DFB激光器,直接得到上变频的微波信号输出。但是DFB激光器成本和能耗相对较高,而成本对于接入技术又有着至关重要的影响。鉴于此,本文采用价格低廉、能耗低的垂直腔表面发射激光器(VCSEL)代替DFB激光器,研究VCSEL在注入锁定条件下的光子微波上变频现象^[10]。实验中,在2.5 Gb/s低速信号注入下,实现了载波频率7.5~23 GHz可调谐的无本振上变频,验证了方案的可行性,为无线-光混合接入网中微波信号的产生提供了一种低成本的解决方案。

2 理论分析

基于注入锁定VCSEL的光子微波上变频的物理过程主要由非线性频谱展宽和高阶边带注入锁定两个过程构成。当幅度调制信号注入到VCSEL中时会产生自相位调制效应,光脉冲进入光半导体放大器时,由于光强随时间变化,导致半导体放大器内部的载流子数目发生响应变化(当光强弱时,消耗的载流子少,载流子数目相对较多,而光强强时则反之)。由于载流子密度的变化会导致半导体材料本身折射率的变化,意味着光强的不同部分(强度不同)在通过半导体放大器时对应着不同的折射率,相

当于信号被相位调制,此即为半导体的放大器的自相位调制效应(SPM)^[11]。在注入半导体激光器中也会产生自相位调制效应。

自相位调制效应直接导致了脉冲的频谱展宽,频谱展宽的大小与光脉冲的强度变化、半导体放大器自身的参数有关。具体来说,光脉冲的能量越大、脉冲宽度越窄(光强度变化率越大)则自相位展宽越大。半导体激光器参数中有影响的参数既有注入电流大小等外部参数的影响,也有半导体激光器波导尺寸(波导的横截面积和波导长度)等内部参数的影响,内部参数直接反映在线宽展宽因子 γ 上,它表述的是载流子密度和折射率之间的关系。需要指出的是载流子的恢复时间也是影响自相位展宽的一个主要参数,由于半导体放大器的载流子恢复呈现快消耗、慢恢复的特性,一个对称信号波形导致的频谱展宽是不对称的,而是向长波长处展宽得更多(就是经过半导体光放大器后,信号展宽出现了红移)。

在半导体放大器中,脉冲的频谱展宽主要由半导体光放大器的自相位展宽效应引起。另外一个导致展宽的是四波混频效应,在自相位展宽的基础上,信号的不同频谱分量之间会产生四波混频,产生新的频谱分量,进一步展宽了信号的频谱^[2]。在自相位调制和四波混频二者的共同作用下使得调制信号的频谱得以展宽,产生了高次谐波,原理示意图如图1所示。

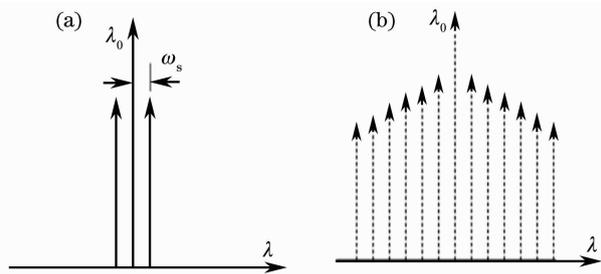


图1 调制信号频谱展宽过程图。(a)注入前调制信号谱;(b)VCSEL非线性展宽后频谱图

Fig. 1 Diagram of modulated signal spectrum broadening process. (a) Modulated signal spectrum before injection; (b) spectrum after VCSEL nonlinear broadening

高次谐波分量注入激光器后被谐振放大,与注入信号间产生拍频,将基带信号上变频至高频载波的微波信号,过程如图2所示。如果其中一个高阶边带分量落于VCSEL的自由运转波长范围且该边带分量的功率足够强,如图2(a)所示,则VCSEL的激发辐射波长就会被该高阶边带分量锁定,从而与

入射信号光之间形成稳定的相位关系,如图 2(b)所示。基于 VCSEL 的注入锁定过程已开展了细致的研究,通常当该高阶边带分量与 VCSEL 的自由运转波长重合或波长略长时能够形成稳定的注入锁定^[10]。VCSEL 被注入锁定后,VCSEL 的激光波长与注入光信号波长间的稳定拍频就可以产生微波载波。而微波载波的频率则可以通过调节注入光信号

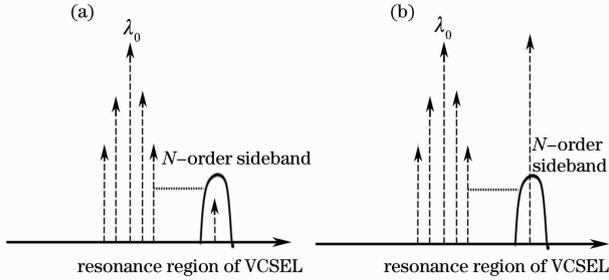


图 2 注入锁定过程频谱图。(a)落入 VCSEL 谐振区域的 N 阶边带;(b)在 VCSEL 谐振区被放大的 N 阶边带
Fig. 2 Frequency spectra of injection-lock process. (a) N -order sideband in VCSEL resonance region; (b) amplified N -order sideband in VCSEL resonance region

与 VCSEL 自由运转波长的频差实现。

3 系统实验与结果分析

基于注入锁定 VCSEL 的实验系统如图 3 所示。其中外腔可调谐激光器(ECTL, Agilent 8164A)为低速注入信号光源。2.5 Gb/s 伪随机码信号由误码仪(BERT)产生,经微波放大器放大后由马赫-曾德尔光调制器(MZM)调制至光信号上。偏振控制器 PC1 用来调整偏振态以达到最大的调制效率。产生的基带非归零码光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,由可调谐光衰减器(OTA)控制注入 VCSEL 的光信号强度。注入信号由环形器 2 口输出注入商用长波长 VCSEL(阈值电流为 3 mA)中,偏振控制器 PC2 用来调整注入 VCSEL 的光的偏振态。光子微波上变频后产生的光微波信号由环形器 3 口输出,经 EDFA 放大后由 3 dB 耦合器分为两路,一路用光电探测器(PD)转换为微波信号后由电频谱仪(ESA)进行频谱和相位噪声测量,另一路连接带宽为 40 GHz 的光电采样示波器(OSC, Agilent 86100A)观察时域信号波形。

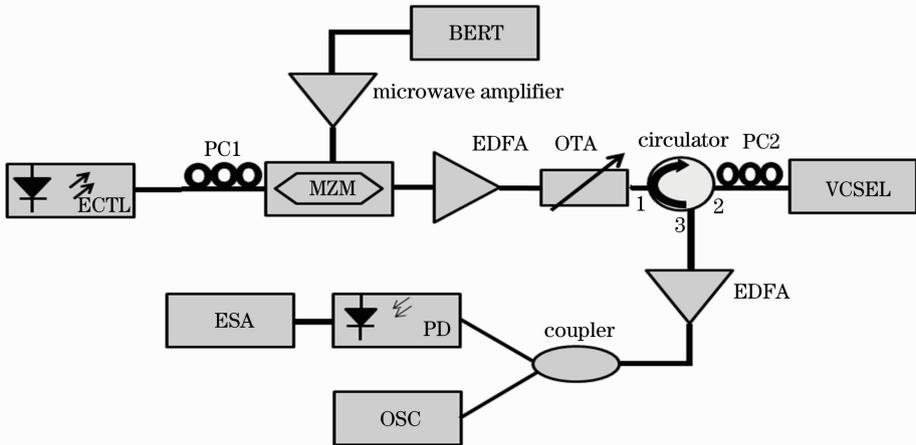


图 3 光调幅信号注入 VCSEL 激光器产生上变频微波系统示意图

Fig. 3 System schematic of the injection of VCSEL laser with the amplitude modulation signal to generate upconversion microwave signal

实验中,VCSEL 激光器的工作电流为 7 mA,输出光谱如图 4(a)所示,输出功率为 -8 dBm,波长 $\lambda_m = 1536.57$ nm。调节可调光源波长至 1536.68 nm,与 VCSEL 自由运转波长相距 0.11 nm,调节衰减器衰减量使得注入 VCSEL 的光功率为 7.3 dBm,注入锁定时的光谱如图 4(b)所示。

2.5 Gb/s 的 3 阶伪随机码注入信号由安立 MP1800a 误码仪产生,图 5(a)、(b)分别给出了注入信号的波形图和对应的频谱图。从图 5(b)中可以

看出,注入信号的 5 倍频分量(10~12.5 GHz)功率与基带分量功率(0~2.5 Gb/s)之比约为 -30 dB,更高倍频的分量则已无法从频谱仪的基底噪声中分辨出来。微调可调激光器的波长,同时调整偏振控制器改变偏振态,使得调制后信号的高次谐波落于 VCSEL 注入锁定波长范围内,在 VCSEL 腔体内高阶边带被放大且 VCSEL 输出波长锁定在注入光高阶边带上,并与主激光器原波长信号形成相干差拍,从而实现信号上变频,如图 6(a)所示,与图 5(a)对

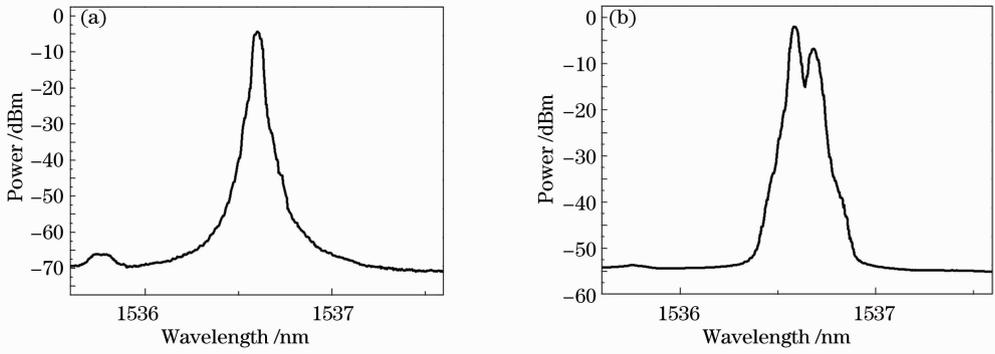


图 4 (a) VCSEL 光谱; (b) 锁定信号为 14.3 GHz 时 VCSEL 与注入信号的合光谱

Fig. 4 (a) VCSEL spectrum; (b) combined spectrum of VCSEL and injected signals when the frequency of locked signal is 14.3 GHz

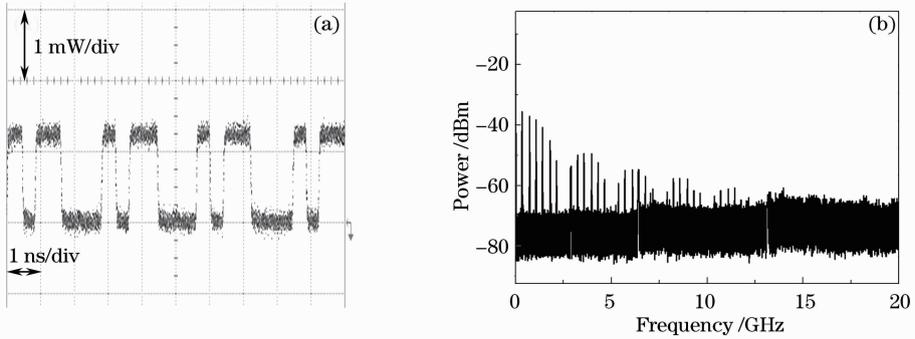


图 5 调制信号和信号频谱。(a) 2.5 GHz 调制信号; (b) 调制信号注入前电谱

Fig. 5 Modulated signal and signal spectrum. (a) 2.5 GHz modulated signal; (b) power spectrum of the modulated signal before injection

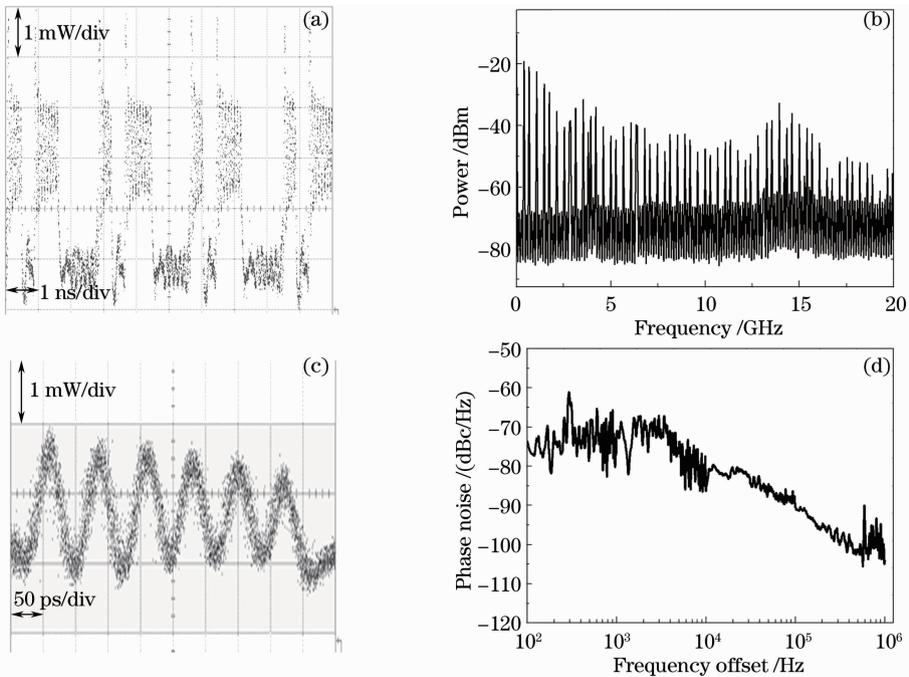


图 6 14.3 GHz 上变频信号。(a) 注入锁定信号; (b) 14.3 GHz 注入锁定后信号电谱; (c) 14.3 GHz 微波信号; (d) 14.3 GHz 微波信号相位噪声

Fig. 6 14.3 GHz upconverted signal. (a) Injection-locked signal; (b) 14.3 GHz injection-locked signal spectrum; (c) 14.3 GHz microwave signal; (d) phase-noise of the 14.3 GHz microwave signal

比可以看出注入锁定后输出信号的码字与原注入信号完全相同。图 6(c)给出了上变频后载波信号的波形图。为了更好地检测上变频信号的性能,利用光谱仪对上变频信号的频谱和相位噪声性能进行了测量。测量得到上变频后信号的频谱如图 6(b)所示,微波载波频率为 14.3 GHz。图 6(b)和图 5(b)对比可以看出,在激光器谐振腔非线性效应作用和注入锁定过程中,信号的频率谱明显展宽,高次倍频频率分量得到明显增强。从上变频信号频谱中还可以看出,除了

微波信号外,上变频信号还存在基带分量,这主要是由于注入信号功率远高于 VCSEL 激光功率造成的。在实际应用中,由于微波发射天线单元具有带通特性,因此不影响实际应用,在对带宽要求比较严格的场合,可以通过加入窄带微波滤波器滤除带外频率分量。上变频信号的相位噪声特性则如图 6(d)所示,10 kHz 频偏处相位噪声为 -81 dBc/Hz。

采用注入锁定 VCSEL 的光子微波上变频方案的另一个优势在于载波频率具有灵活的可调谐性。

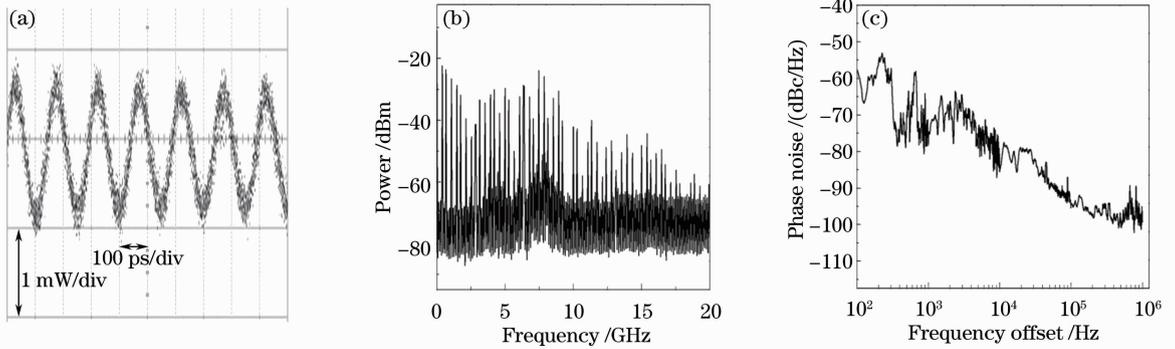


图 7 具有更高稳定性的 7.5 GHz 上变频信号。(a) 7.5 GHz 微波信号;(b) 7.5 GHz 微波信号频谱;(c) 7.5 GHz 微波信号相位噪声

Fig. 7 7.5 GHz upconverted signal with higher stability. (a) 7.5 GHz microwave signal; (b) 7.5 GHz microwave signal spectrum; (c) phase noise of the 7.5 GHz microwave signal

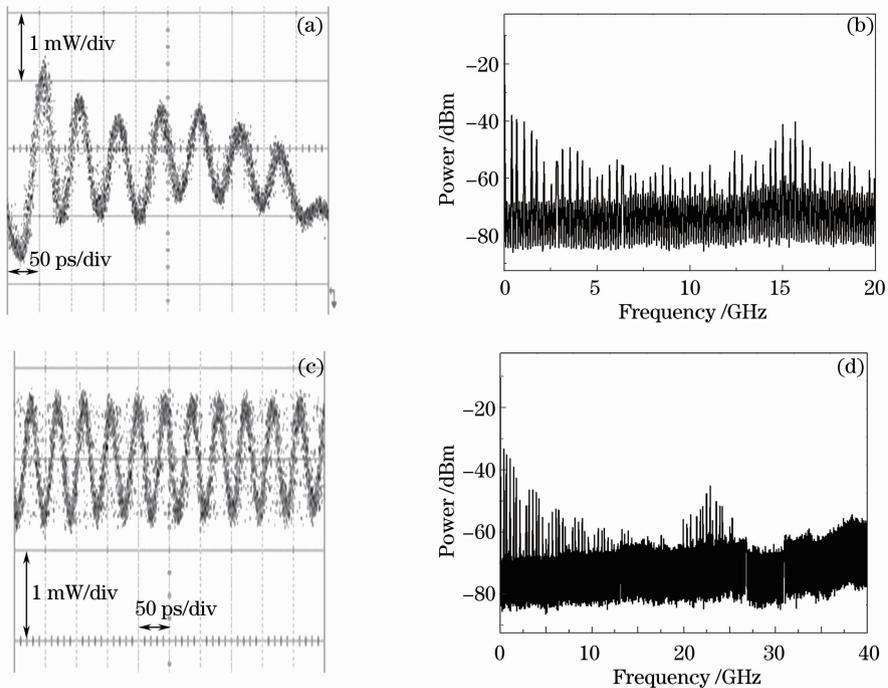


图 8 具有更高载波频率的上变频信号。(a) 15.7 GHz 微波信号;(b) 15.7 GHz 微波信号频谱;(c) 22.9 GHz 微波信号;(d) 22.9 GHz 微波信号频率谱

Fig. 8 Upconverted signals with higher carrier frequencies. (a) 15.7 GHz microwave signal; (b) 15.7 GHz microwave signal spectrum; (c) 22.9 GHz microwave signal; (d) 22.9 GHz microwave signal spectrum

通过改变注入信号光的波长和功率可以完成不同载波频率的上变频。调节注入波长为 1536.63 nm, 注入功率为 5.3 dBm, 可以得到载波频率为 7.5 GHz 的上变频微波信号, 此时得到的上变频信号载波的波形如图 7(a) 所示, 上变频信号的电谱和相位噪声特性分别如图 7(b)、(c) 所示, 可以测得此时上变频信号在 10 kHz 的相位噪声为 -85 dBc/Hz。

通过加大注入信号与 VCSEL 激光波长的波长间隔可以得到更高载波频率的上变频信号, 调整注入波长为 1536.70 nm, 注入功率为 7.3 dBm, 可以得到载波频率为 15.7 GHz 的上变频微波信号, 信号的波形图和对应的谱图分别如图 8(a)、(b) 所示。进一步调整注入信号波长为 1536.77 nm, 保持注入信号功率不变, 可以得到载波频率为 22.9 GHz 的上变频微波信号, 信号的波形图和对应的谱图分别如图 8(c)、(d) 所示。

此外, 为了分析上变频系统的性能, 对该系统进行了误码分析, 如图 9 所示。对比原始信号误码率 (BER) 和 7.5 GHz 上变频信号时解调信号的误码率可以看出: 经过注入锁定上变频系统后, 在相同误码率条件下, 上变频信号的功率较原始信号功率高出 1.4 dB, 即该上变频系统付出了 1.4 dB 的代价; 对比 7.5 GHz 上变频信号与 15.7 GHz 上变频信号时解调信号的误码率可以看出后者较前者又多付出了 0.2 dB 的代价。从误码率的分析可以看出该注入锁定上变频系统仅付出 1.4 dB 的功率代价即可完成上变频, 且不同频率之间的代价差在 0.5 dB 以下。从实验结果可以看出系统误码性能良好、功耗代价低, 具有良好的系统性能。

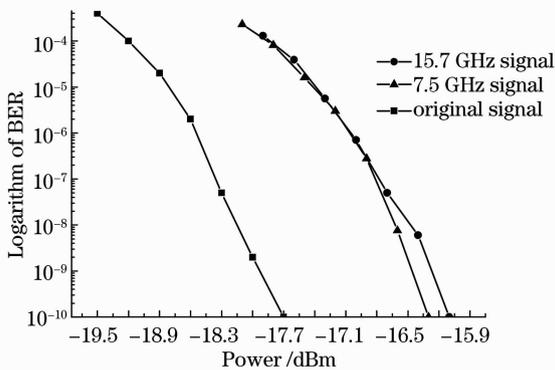


图 9 误码率分析

Fig. 9 BER analysis

4 结 论

提出了一种基于注入锁定技术的低成本、低阈值

电流的 VCSEL 激光器无本振光子微波上变频方案。只要适当的调整注入波长和注入功率使可实现载波频率的调谐。实验中, 实现了载波频率在 7.5 ~ 23 GHz 的可调谐光子微波上变频, 并对系统进行了误码率测试, 证明了系统的良好性能及方案的可行性。该方案具有低成本、低功耗、载波频率可调谐的优点, 为光-无线混合接入网中微波信号的产生提供了一种可行的低成本解决方案。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 M Galili, H C H Mulvad, L Gruner-Nielsen, *et al.*. 640 Gb/s optical wavelength conversion using FWM in a polarization maintaining HNLF [C]. *ECOC*, 2008, 2: 110-112.
- 3 Guo Jingzhong, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Research on all-optical wavelength conversion based on FP-LD mode competition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1006004. 郭精忠, 于晋龙, 王文睿, 等. 基于 FP-LD 中模式竞争机理的全光波长变换研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1006004.
- 4 Guo Jingzhong, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Optical frequency up-conversion by injection locking semiconductor laser with 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 M I Memon, G Mezosi, Bei Li, *et al.*. Generation and modulation of tunable mm-wave optical signals using semiconductor ring laser [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21(11): 733-735.
- 10 Yang Bingxing, Xia Guangqiong, Lin Xiaodong, *et al.*. Polarization switching performance of VCSEL subjected to optical pulse injection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(3): 1480-1483. 杨炳星, 夏光琼, 林晓东, 等. 光脉冲注入下 VCSEL 的偏振开关特性[J]. *物理学报*, 2009, 58(3): 1480-1483.
- 11 Lin Hongrong, Li Lijun, Chi Xiaoling, *et al.*. Self-phase modulation in gain saturated semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 2002, 19(4): 295-300. 林洪榕, 李利军, 迟晓玲, 等. 增益饱和和半导体激光放大器中的自相位调制效应[J]. *量子电子学报*, 2002, 19(4): 295-300.

栏目编辑: 史 敏