

# 基于直调激光器注入锁定的倍频信号产生

王帅帅, 王菊\*, 马闯, 李天宇, 谢田元, 于洋, 于晋龙

天津大学电气自动化与信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072

**摘要** 将调制频率为 1 GHz 的正弦波光信号的高阶谐波分量注入直调激光器, 信号的光场强度和载流子浓度相互作用形成光电流, 光电流经过直调激光器的射频(RF)端口形成微波倍频信号。实验通过检测 RF 端口的倍频信号功率变化, 反馈控制直调激光器的波长, 完成直调激光器的自动锁定, 产生无光电探测器的 10 GHz、12 GHz 微波倍频信号。对比无自动锁定回路的注入锁定方案, 自动锁定产生的微波倍频信号更稳定, 其功率波动在 10 min 内稳定在 2 dB, 10 kHz 处的相位噪声恶化程度控制在 2.2 dB。微波倍频信号的最高倍频数取决于直调激光器的最高调制速率。

**关键词** 光通信; 倍频; 注入锁定; 半导体激光器; 光电检测

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.040601

## Frequency Multiplication Signal Generation Based on Injection Locking of Directly Modulated Laser

Wang Shuaishuai, Wang Ju\*, Ma Chuang, Li Tianyu, Xie Tianyuan, Yu Yang, Yu Jinlong

Laboratory of Optical Fiber Communications, School of Electrical and Information Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** The high-order harmonic component of a 1 GHz modulated sinusoidal wave optical signal is injected into the directly modulated laser, and the interaction between the intensity of the light field and the carrier concentration forms the photocurrent. The photocurrent is then converted into a microwave frequency multiplication signal at the radio frequency (RF) port of this directly modulated laser. In the experiment, the feedback control the directly modulated laser wavelength and thus the automatic locking of the laser are realized by the power variance of the frequency multiplication signal detected at the RF port. The microwave frequency multiplication signals at 10 GHz and 12 GHz are generated without photodetectors. Compared with those by the injection locking scheme without an automatic locking loop, the microwave frequency multiplication signals by automatic locking are more stable. The power fluctuation is stable at 2 dB within 10 min, and the phase noise deterioration at 10 kHz is as little as 2.2 dB. The produced largest frequency doubling number of microwave frequency multiplication signals depends on the maximum modulation rate of the directly modulated laser.

**Key words** optical communications; frequency multiplication; injection-locking; semiconductor lasers; photoelectric detection

**OCIS codes** 060.2330; 140.3515; 140.3520

## 1 引言

如今的社会信息高速发展, 高速宽带的无线-光混合接入网技术<sup>[1-5]</sup>已成为下一代宽带移动系统设计中的关键技术。将光纤远距离的有线传输及基站无线发射相结合<sup>[6-7]</sup>, 不但具有传统光纤通信技术的

损耗低、带宽宽等优点, 还具有无线通信的灵活性<sup>[8-10]</sup>。目前, 光载微波系统中使用的高频率本振微波源、电光调制器件和光电探测器(PD)等成本较高, 因此, 如何用成本低且简单的方法从光域将低频信号倍频为高频微波信号成为了无线-光混合接入网技术中的研究热点<sup>[11]</sup>。

收稿日期: 2018-07-24; 修回日期: 2018-08-27; 录用日期: 2018-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(61427817, 61775162)

\* E-mail: wangju@tju.edu.cn

目前光载微波信号倍频的方案有很多,如基于载波抑制技术的倍频、双波长外差法倍频和注入锁定等<sup>[12-13]</sup>。对于基于载波抑制的倍频方案,2006年 Jia 等<sup>[14]</sup>采用光载波抑制调制方案产生了 40 GHz 毫米波;2007年 Xu 等<sup>[15]</sup>采用载波抑制方法实现了传输两个倍频微波信号的光子载波技术;2011年韩一石等<sup>[16]</sup>采用相位调制器产生两阶边带后进入 PD 拍频实现了四倍频微波信号。以上方法均可产生倍频信号,但由于调制的非线性较弱,被调制光信号无法产生高阶谐波分量,限制了高次倍频信号的产生。双波长外差法方案可以产生频率较高的微波信号,如 2011年洪蕾等<sup>[17]</sup>利用两束激光在 PD 中拍频得到了频率为 26.5 GHz 的微波信号,但由于实现外差法中的两台激光器之间没有固定的相位关系,产生的微波信号质量极差。利用锁相环技术可使两激光器相位相对稳定,但增加了系统的复杂性及成本,如 2005年 Ng' Oma<sup>[18]</sup>利用光外差法和锁相环,实现了 7~14 GHz 微波信号。相比于以上方案,注入锁定技术通过频率牵引效应<sup>[19]</sup>,可以获得稳定且高频的微波信号,如 2012年韩丙辰等<sup>[20]</sup>利用两台分布反馈式(DFB)激光器分别锁定被调制光信号的不同边带,并将锁定后两台 DFB 激光器的输出耦合,得到十二倍频微波信号;2014年 Wang 等<sup>[21]</sup>利用锁模激光器产生的短脉冲和连续光之间相位交叉调制作用产生弱相位调制光信号,注入到 DFB 激光器,实现了可调谐倍频系统;2017年 Zhu 等<sup>[22]</sup>提出利用载波抑制产生±2阶边带并注入到从激光器,

并利用激光器的非线性得到了十六倍频信号。上述基于注入锁定产生倍频信号的方案中均采用了高速光电探测器将光信号转换成电信号,一定程度上增加了系统的复杂性及成本。

本文提出了一种基于直调激光器注入锁定产生倍频信号的方案,利用注入锁定后直调激光器中光场强度和载流子浓度相互作用形成光电流,采用直调激光器的射频(RF)端口代替光电探测器,实现光电转换,得到微波倍频信号,该方案成本低且结构简单。与此同时,为了得到更稳定的微波倍频信号,本方案通过检测直调激光器 RF 端口产生的倍频信号功率变化,反馈控制直调激光器波长,从而实现直调激光器的自动锁定,消除了因手动调节波长误差对注入锁定带来的不确定误差,保证了直调激光器的稳定锁定及产生的微波倍频信号的稳定性。

## 2 基本原理

### 2.1 注入锁定原理

两台直调激光器注入锁定简化框图如图 1 所示,用频率为  $f$  的正弦信号对主激光器(ML)进行调制,调制后光谱中有多个波长分量,且分量间隔也为  $f$ ,如图 2(a)所示。调制后 ML 输出光通过环形器(OCIR)1口和 2口注入到从激光器(SL)中,为了简化分析,只考虑输出光谱的中心波长  $\lambda_0$  及相邻的左右边带  $\lambda_a, \lambda_b$ ,则注入 SL 的光场  $E_{ML}$  可表示为

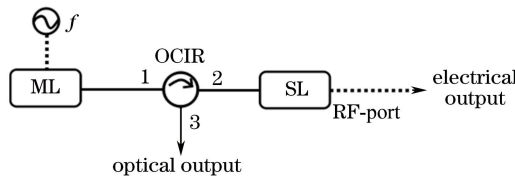


图 1 注入锁定简化框图

Fig. 1 Simplified block diagram of injection locking

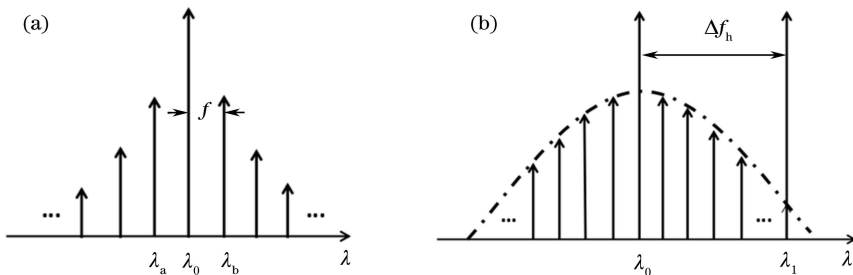


图 2 注入锁定过程中的光谱图。(a)调制后 ML 输出光谱;(b)注入锁定后 SL 输出光谱

Fig. 2 Spectra in injection locking. (a) Output spectrum of ML after modulation;

(b) output spectrum of SL after injection locking

$$E_{ML} = E_a \exp(j\omega_a t) + E_0 \exp(j\omega_0 t) + E_b \exp(j\omega_b t), \quad (1)$$

式中:  $E_0, E_a, E_b$  分别为  $\lambda_0, \lambda_a, \lambda_b$  对应的光场强度;  $\omega_0, \omega_a, \omega_b$  分别为  $\lambda_0, \lambda_a, \lambda_b$  对应的角频率;  $t$  为时间。由于激光器的非线性作用, 注入到 SL 中的 ML 光谱被展宽, 调整 SL 的波长, 使其处于被展宽光谱的一个高阶边带  $\lambda_1$  的可锁定带宽范围内, 高阶边带  $\lambda_1$  与 ML 的中心波长  $\lambda_0$  之间的谱线间隔为  $\Delta f_h$ , 如图 2(b) 所示。通过不断地模式竞争, ML 和 SL 最终处于注入锁定状态,  $\lambda_1$  处的光场  $E_2$  可表示为

$$E_2 = GE_1 \exp(j\omega_1 t), \quad (2)$$

式中:  $E_1$  为注入锁定之前  $\lambda_1$  处的光场强度;  $G$  为  $E_1$  利用注入锁定获得的增益, 这是由于外部光的注入加快了 SL 中载流子的消耗, 等同于注入光  $\lambda_1$  处的光强被放大<sup>[23]</sup>;  $\omega_1$  为  $\lambda_1$  对应的角频率。注入锁定后 SL 中的总光场强度取决于  $E_{ML}$  和  $E_2$ 。假设  $E_a = E_b$ , 则 SL 输出的总光场强度  $I$  为

$$I = (E_{ML} + E_2)(E_{ML} + E_2)^* = (2E_a^2 + E_0^2 + GE_1^2) + 4E_1 E_a \cos(\omega t) + 2E_a^2 \cos(2\omega t) + 2GE_1 E_a \{\cos[(\Delta\omega_h + \omega)t] + \cos[(\Delta\omega_h - \omega)t]\} + 2GE_1 E_0 \cos(\Delta\omega_h t), \quad (3)$$

式中: 角频率  $\omega = 2\pi f$ ;  $\Delta\omega_h = 2\pi\Delta f_h$ 。从结果中可以看出, 从激光器输出信号中包括直流光、原始正弦调制信号  $f$  和倍频信号  $\Delta f_h$  等多个光场分量, 其中频率为  $\Delta f_h$  的倍频信号的光场强度可表示为

$$I_{\Delta f_h} = 2GE_1 E_0 \cos(\Delta\omega_h t). \quad (4)$$

直调激光器内部结构如图 3 所示, DC-端是直调半导体激光器的直流电流驱动端, RF-端是直调激光器的射频引脚用于提供交流电流。TEC 为激光器内部温度制冷控制器, TH 为热敏电阻。当直调激光器作为 SL 被注入时, 直调激光器有源区内会生成大量的电子-空穴对且分别向激光器内 N 区和 P 区移动<sup>[24-25]</sup>, 其有源区载流子速率方程为

$$\frac{dN}{dt} = \eta I - \frac{N}{\tau_{nr}} - \frac{N}{\tau_{nt}}, \quad (5)$$

$$\frac{dP}{dt} = \eta I - \frac{P}{\tau_{pr}} - \frac{P}{\tau_{pt}}, \quad (6)$$

式中:  $\eta$  为激光器内部的量子效率;  $N$  和  $P$  分别为有源区电子和空穴的数目;  $I$  为激光器内的光场强度;  $\tau_{nr}$  和  $\tau_{pr}$  分别为激光器内有源区电子和空穴复合寿命;  $\tau_{nt}$  和  $\tau_{pt}$  分别为电子和空穴的漂移时间。其光电流  $i$  与光场强度  $I$  的关系式可描述为<sup>[25]</sup>

$$i = \frac{q}{W}(Nv_n + Pv_p) =$$

$$q\eta \left( \frac{v_n}{W} \frac{1}{j\omega + \tau_1} + \frac{v_p}{W} \frac{1}{j\omega + \tau_2} \right) I, \quad (7)$$

式中:  $\tau_1 = \frac{\tau_{nt} + \tau_{nr}}{\tau_{nt}\tau_{nr}}$ ,  $\tau_2 = \frac{\tau_{pt} + \tau_{pr}}{\tau_{pt}\tau_{pr}}$ ;  $v_n$  和  $v_p$  分别为电子和空穴的漂移速率;  $q$  为电子电荷;  $W$  为激光器内有源区宽度。故当主激光器和从激光器处于锁定状态时, SL 中的光场强度和载流子浓度相互作用形成光电流, 光电流经过图 3 中  $20 \Omega$  电阻转化为电压信号。不考虑光电检测的效率, 频率为  $\Delta f_h$  的倍频信号的光电流为

$$i_{\Delta f_h} = \frac{q}{W}(Nv_n + Pv_p) = q\eta \left( \frac{v_n}{W} \frac{1}{j\omega + \tau_1} + \frac{v_p}{W} \frac{1}{j\omega + \tau_2} \right) I_{\Delta f_h}. \quad (8)$$

因此, 光电隔离器的直调半导体激光器作为 SL 时, 其 RF 端口可以代替光电探测器实现光电转换完成微波信号的产生, RF 端口连接微波放大器、滤波器等微波器件后, 可以对倍频信号进行放大并抑制其他分量得到无光电探测器的倍频信号。

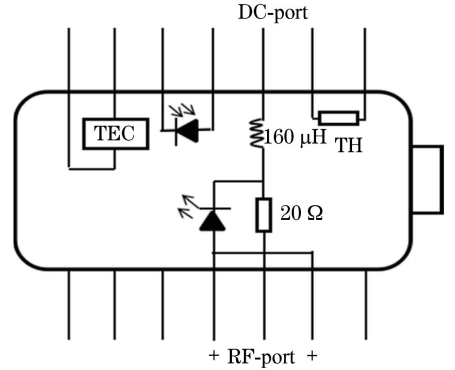


图 3 直调激光器结构图

Fig. 3 Structural diagram of directly modulated laser

## 2.2 直调激光器自动锁定原理分析

由 2.1 分析可知, 当 ML 处于锁定状态时, SL 输出信号中存在直流信号、原始正弦调制信号及倍频信号等多个分量。以倍频信号  $\Delta f_h$  为例, 当 SL 没有锁定时, ML 和 SL 没有固定的相位关系, 因此未锁定时, 频率为  $\Delta f_h$  的信号强度远小于注入锁定时的信号强度, 该信号表现为不稳定的小幅度数值。当 ML 和 SL 处于锁定状态时, SL 的自由运转模式被抑制, 此时频率为  $\Delta f_h$  的信号强度表现为稳定的大幅度数值, 因此可以将倍频信号  $\Delta f_h$  的信号强度作为 SL 是否被稳定锁定的判断依据。

直调激光器自动锁定原理如图 4 所示, 当 ML 通过 OCIR 对 SL 进行注入时, 微处理器单元 (MCU) 控制 SL 的电流驱动电路, 使 SL 的波长从小到大进行

扫描,且通过控制电流变化范围保证扫描波长范围内只有一个待锁定波长。在扫描过程中,ML 和 SL 将出现非锁定、锁定和失锁 3 种状态,在 SL 的 RF 端口可以得到倍频信号  $\Delta f_h$  的功率变化,包络检波器将此倍频信号经过微波放大器(AMP)后的功率变化转换为电平变化,MCU 通过检波器的输出电平记录倍频信号  $\Delta f_h$  的最大功率值及对应的驱动电流。当波长扫描过程结束时,MCU 通过控制 SL 的驱动电路将 SL 的驱动电流设为倍频信号功率最大值处的对应电流,完成 SL 注入锁定的自动控制,得到功率最大且稳定的微波倍频信号。

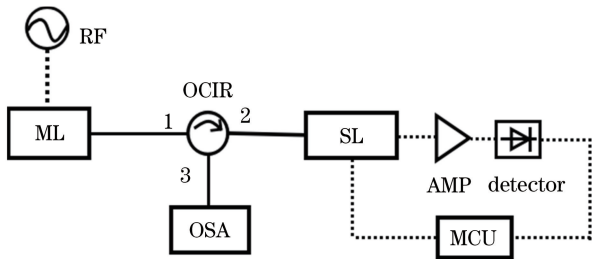


图 4 直调激光器自动锁定原理图

Fig. 4 Schematic of automatic locking of directly modulated laser

### 3 实验结果

基于直调激光器注入锁定产生倍频信号的实验装置如图 5 所示,DML1 和 DML2 激光器为商用直调半导体激光器,调制速率分别为 0~2.5 GHz 和 0~10 GHz。用频率为 1 GHz、功率为 3 dBm 的正弦信号对中心波长为 1553.302 nm 的 DML1 激光

器进行调制。调制后的光信号通过偏振控制器(PC)和 OCIR1 口和 2 口注入到 DML2 激光器,调整光衰减器(ATT)使注入功率为 -2.5 dBm。在注入过程中,MCU 控制 DML2 激光器的电流驱动电路使 DML2 激光器波长在 1553.376~1553.388 nm 范围内进行扫描(对应驱动电流范围为 77.0~80.0 mA,扫描步进为 5  $\mu$ A,激光器波长灵敏度为 600 MHz·mA<sup>-1</sup>),波长扫描过程中,DML2 激光器的温度为 20.6  $^{\circ}$ C。注入过程中产生的倍频信号在 DML2 激光器 RF 端口输出后通过增益为 15 dB 的微波放大器(AMP)进行放大。放大后的倍频信号经过功分器均分为两路,其中一路通过检波器将波长扫描过程中的倍频信号功率变化转变为直流电压,MCU 根据检波器的输出电平记录倍频信号功率最大值及对应的驱动电流,波长扫描过程结束后,MCU 将直调激光器的驱动电流设为记录值,完成直调激光器的自动锁定;另一路通过电谱仪(ESA, Agilent 8564EC)对自动锁定产生的倍频信号进行观测,结果如图 6(a)和 (b)所示。从图中可看出,该倍频信号的噪声抑制比为 35.5 dB,功率为 -44.5 dBm。相应地,由 Agilent 8564EC 测得的相位噪声如图 6(c)所示,该倍频信号在 10 kHz 处的相位噪声为 -87.5 dBc·Hz<sup>-1</sup>。自动锁定后,DML2 激光器的输出光经 OCIR 3 口由光谱仪(OSA, Anritsu MS9710)进行观测,结果如图 6(d)所示,光谱仪测量范围  $R_{SPAN}$  为 1 nm,分辨率为 0.05 nm。从图中可以看出,自动锁定后 DML2 激光器输出光谱在中心波长 1553.382 nm 两侧出现了两个较大的峰,与中心波长相差 0.08 nm(10 GHz)。

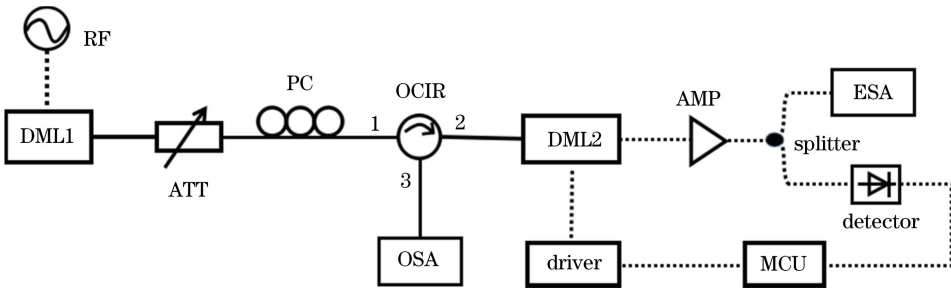


图 5 基于直调激光器注入锁定产生倍频信号的实验装置图

Fig. 5 Experimental setup for generation of frequency doubling signals based on injection locking of direct modulated laser

为了进一步验证直调激光器自动锁定产生倍频信号方案的优良性,本方案分别对直调激光器自动锁定和手动调节波长实现注入锁定(断开 MCU 控制的自动锁定回路)两种方案产生微波倍频信号的功率变化和相位噪声进行了 10 min 的对比测量,测

量结果如图 7 和图 8 所示。图 7 是 10 min 内两种方案产生的 10 GHz 微波倍频信号功率波动情况。图中蓝色实线表明手动锁定方案产生的微波信号功率在 10 min 内出现大幅度衰减,黑色实线表明自动锁定方案产生的微波信号功率波动在 10 min 内小

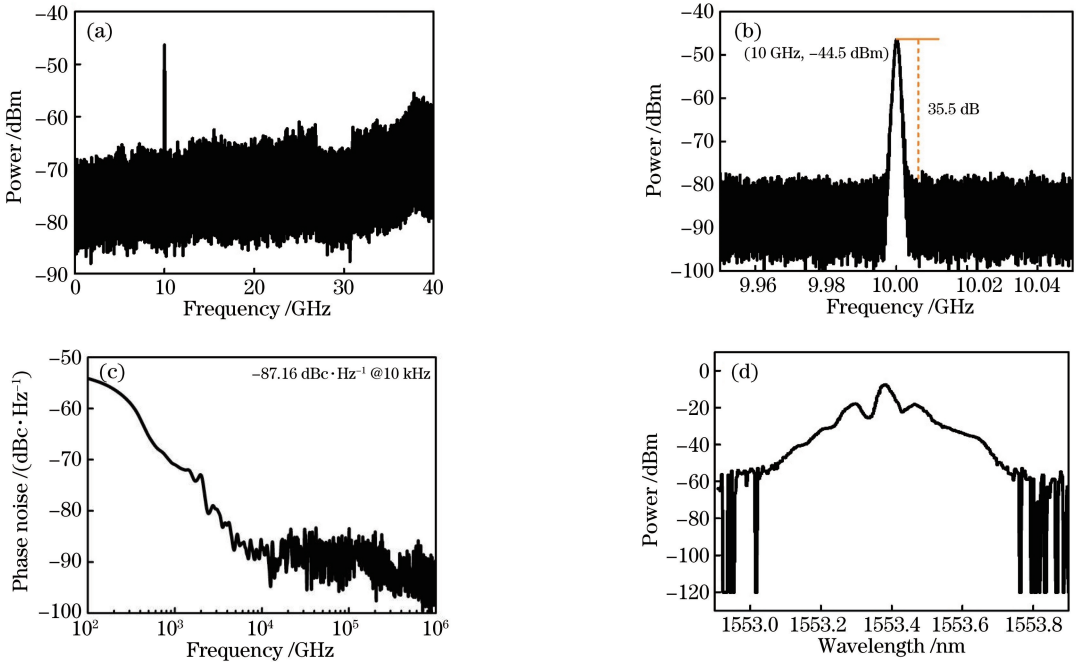


图 6 10 GHz 倍频信号结果图。(a)电谱图,  $R_{SPAN} = 40$  GHz;(b)电谱图,  $R_{SPAN} = 100$  MHz;  
(c)相位噪声;(d)自动锁定后光谱图

Fig. 6 Results of 10 GHz frequency doubling signal. (a) Electrical spectrum,  $R_{SPAN} = 40$  GHz;  
(b) electrical spectrum,  $R_{SPAN} = 100$  MHz; (c) phase noise; (d) spectrum after automatic locking

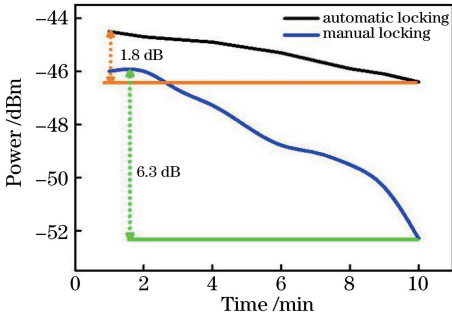


图 7 自动锁定与手动锁定产生的微波信号功率变化对比  
Fig. 7 Comparison of microwave signal power changes by automatic locking and manual locking

于 2 dB。10 min 后自动锁定方案产生的倍频信号功率高于手动锁定方案信号功率 6 dB,故相比于手动锁定波长方案,自动锁定方案产生的倍频信号具有较好的功率稳定性。

图 8(a)是两种方案对应微波倍频信号的相位噪声对比图。从图中可以看出,在 10 kHz 处相位噪声自动锁定方案优于手动锁定方案 2 dB。图 8(b)是 10 min 后两种方案的相位噪声对比结果,从图中可以看出,10 min 后自动锁定方案产生的倍频信号在 10 kHz 处的相位噪声优于手动锁定方案 6.6 dB。尽管 10 min 后两种方案产生的微波倍频

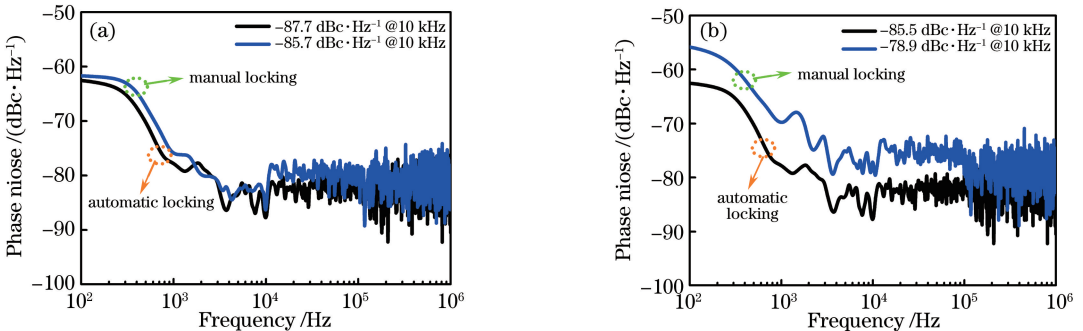


图 8 相位噪声结果对比图。(a)自动锁定与手动锁定产生的微波信号;(b)10 min 后自动锁定与手动锁定产生的微波信号  
Fig. 8 Comparison of phase noise results. (a) Microwave signals by automatic locking and manual locking;  
(b) microwave signals by automatic locking and manual locking after 10 min

信号的相位噪声相对自身都有恶化,但自动锁定方案在 10 kHz 处的相位噪声仅恶化了 2.2 dB,而手动锁定方案却恶化了 6.8 dB,并且从图 8(b)可以看出,手动锁定方案产生的倍频信号在 10 min 后相位噪声出现整体恶化,而自动锁定方案产生的倍频信号的稳定性较好。

通过以上对比可以看出,相比手动锁定方案,自动锁定方案排除了仪器分辨率等限制对波长手动调整的不确定性,使激光器间的注入锁定更精确,直调激光器 RF 端口产生的微波倍频信号更稳定。

为了验证系统的可调谐性,通过 MCU 将 DML2 激光器波长的扫描范围设置为 1553.392~1553.404 nm。自动锁定后直调激光器 RF 端口产

生的 12 GHz 倍频信号结果如图 9(a)所示。从图中可以看出,该倍频信号的噪声抑制比为 32.5 dB。图 9(b)是相应的相位噪声,在 10 kHz 处的相位噪声为  $-80.2 \text{ dBc} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。自动锁定后 DML2 激光器输出的光谱如图 9(c)所示,中心波长 1553.398 nm 和左右两个边带相差 0.096 nm (12 GHz)。从以上实验结果可以看出,频率为 12 GHz 的倍频信号的噪声抑制比和相位噪声均略差于 10 GHz 倍频信号,这是由于本方案中采用的直调激光器调制速率最高为 10 GHz,直调激光器中载流子对频率为 10 GHz 信号的响应度高于 12 GHz。因此,该方案中产生较稳定微波信号的最高频率取决于直调激光器的最高调制速率。

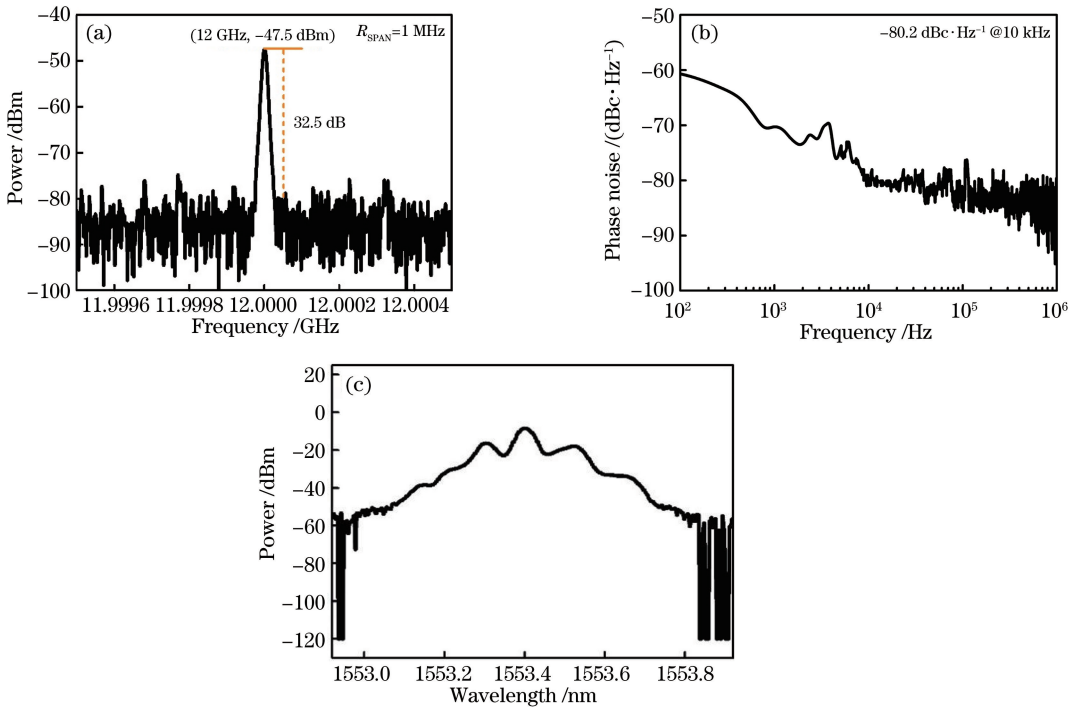


图 9 12 GHz 倍频信号结果图。(a)电谱图, $R_{\text{SPAN}}=1 \text{ MHz}$ ;(b)相位噪声;(c)注入锁定后光谱图

Fig. 9 Results of 12 GHz frequency doubling signal. (a) Electrical spectrum,  $R_{\text{SPAN}}=1 \text{ MHz}$ ;  
(b) phase noise; (c) spectrum after injection locking

## 4 结 论

提出了一种基于直调激光器注入锁定产生倍频信号的方案,对该方案的原理进行了分析与实验验证。利用注入后直调激光器中的光场强度与载流子浓度相互作用产生光电流的特点,在直调激光器 RF 端口得到无光电探测器的微波倍频信号。通过检测注入过程中直调激光器 RF 端口产生的微波倍频信号的功率变化,反馈控制直调激光器波长,实现了直调激光器的自动锁定,自动锁定产生倍频信号

的功率波动在 10 min 内稳定在 2 dB,相位噪声恶化程度控制在 2.2 dB。限于实验室直调激光器的调制速率,所提方案只验证了 10 GHz 和 12 GHz 微波倍频信号产生的实验。方案成本低且结构简单,对光-无线混合接入技术的发展有较高的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] Li H O, Li S M, Chen M, *et al.* Research progresses on microwave photonics technologies[J]. Optical Communication Technology, 2011(8): 24-28.

- 李海鸥, 李思敏, 陈明, 等. 微波光子技术的研究进展[J]. 光通信技术, 2011(8): 24-28.
- [2] Yu J J, Jia Z S, Yi L, *et al.* Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 265-267.
- [3] Naderi N A, Pochet M, Grillot F, *et al.* Modeling the injection-locked behavior of a quantum dash semiconductor laser [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(3): 563-571.
- [4] Seo Y K, Choi C S, Choi W Y. All-optical signal up-conversion for radio-on-fiber applications using cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(10): 1448-1450.
- [5] Mogensen F, Olesen H, Jacobsen G. Locking conditions and stability properties for a semiconductor laser with external light injection[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1985, 21(7): 784-793.
- [6] Liu A L, Yin H X, Wu B, *et al.* Phase-shift characteristics of radio frequency signals for radio over fiber transmission systems [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0506003.  
刘安良, 殷洪玺, 吴宾, 等. 光载无线通信系统射频信号相移特性研究[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0506003.
- [7] Ye J, Yan L S, Pan W, *et al.* Generation of hybrid frequency and phase shift keying signal for radio over fiber system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0206002.  
叶佳, 闫连山, 潘炜, 等. 面向光载无线系统的混合频相调制信号产生[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0206002.
- [8] Hui R, D' Ottavi A, Mecozzi A, *et al.* Injection locking in distributed feedback semiconductor lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(6): 1688-1695.
- [9] Wu B, Yu J L, Zhang Z, *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 Photonics Technology Letters, 2010, 22(14): 1027-1029.
- [10] Hong C, Zhang C, Li M J, *et al.* Single-sideband modulation based on an injection-locked DFB laser in radio-over-fiber systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(7): 462-464.
- [11] Fu S N, Zhong W D, Shum P, *et al.* Simultaneous multichannel photonic up-conversion based on nonlinear polarization rotation of an SOA for radio-over-fiber systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(9): 563-565.
- [12] Wiberg A, Perez-Millan P, Andres M V, *et al.* Microwave-photonic frequency multiplication utilizing optical four-wave mixing and fiber Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 329-334.
- [13] Gan L Q, Li F, Wai P K A, *et al.* Microwave signal generation using sideband injection locking in an Fabry-Pérot laser diode [C] // Opto-Electronics and Communications Conference, 28 June-2 July, 2015, Shanghai, China. New York: IEEE, 2015: 1-3.
- [14] Jia Z S, Yu J J, Chang G K. A full-duplex radio-over-fiber system based on optical carrier suppression and reuse[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(16): 1726-1728.
- [15] Xu Z B, Zhang X P, Yu J J. Frequency upconversion of multiple RF signals using optical carrier suppression for radio over fiber downlinks[J]. Optics Express, 2007, 15(25): 16737-16747.
- [16] Han Y S, Zhang L, Wang J H. Radio over fiber system for optical millimeter-wave generation by PM modulation[J]. Optical Communication Technology, 2011(8): 62-64.  
韩一石, 张厉, 王建华. 采用 PM 调制实现光生毫米波的 RoF 系统[J]. 光通信技术, 2011(8): 62-64.
- [17] Hong L, Su J, Yang L, *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.
- [18] Ng'Oma A. Radio-over-fibre technology for broadband wireless communication systems [D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2005: 18-27.
- [19] Gao Y, Wang J, Wang W R, *et al.* Tunable laser based on Fabry-Perot laser self injection locking[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061401.  
高毅, 王菊, 王文睿, 等. 基于法布里-珀罗激光器自注入锁定的波长可调谐激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061401.
- [20] Han B C, Yu J L, Wang W R, *et al.* Experimental study of continuously tunable photonic microwave

- frequency multiplication based on distributed feedback injection locking [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 1205004.
- 韩丙辰, 于晋龙, 王文睿, 等. 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[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1205004.
- [21] Wang W R, Yu J L, Han B C, *et al.* Tunable microwave frequency multiplication by injection locking of DFB laser with a weakly phase modulated signal[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(2): 1-8.
- [22] Zhu H T, Wang R, Xiang P, *et al.* A novel approach to photonic generate microwave signals based on optical injection locking and four-wave mixing[J]. Optics Communications, 2017, 400: 101-105.
- [23] He Y T, Jiang Y, Zi Y J, *et al.* Frequency doubled triangular waveform generation based on injection locking and time-domain synthesis [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101005.
- 何禹彤, 江阳, 訾月姣, 等. 基于注入锁定和时域综合的倍频三角波产生技术[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101005.
- [24] Weiß M, Huchard M, Stohr A, *et al.* 60-GHz photonic millimeter-wave link for short- to medium-range wireless transmission up to 12.5 Gb/s [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(15): 2424-2429.
- [25] Gao J J, Gao B X, Liang C G. The equivalent circuit model of PIN photodiode[J]. Journal of Microwaves, 1998, 14(1): 29-34.
- 高建军, 高葆新, 梁春广. PIN 光电探测器等效电路模型研究[J]. 微波学报, 1998, 14(1): 29-34.