

单段式分布式反馈半导体激光器光学锁相环研究

王建¹, 陈迪俊², 蔡海文², 冯俊波¹, 郭进¹

¹中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088;

²中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息技术研究中心, 上海 201800

摘要 单段式分布式反馈(DFB)半导体激光器的频率调制相位响应曲线在 0.1~5 MHz 之间,且具有 180°的相位反转,其作为从激光器的光学锁相环(OPLL)结构难以实现锁相。为解决单段式 DFB 半导体激光器的锁相问题,在单环反馈回路中加入可调超前移相功能电路和可调增益功能单元,并优化相移参数,实现 MHz 量级线宽 DFB 激光器相位的锁定。改进后 OPLL 在锁相状态下的残余相位噪声为 0.012 rad²,激光器线宽从 2 MHz 压窄到 10 kHz。研究了反馈环路的环路增益对 OPLL 锁相性能的影响,并给出了最优的环路增益控制参数。

关键词 激光器; 半导体激光器; 单段式分布式反馈; 光学锁相环; 频率噪声功率谱密度

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401001

Optical Phase-Locked Loop of Single Section Distributed Feedback Semiconductor Laser

Wang Jian¹, Chen Dijun², Cai Haiwen², Feng Junbo¹, Guo Jin¹

¹No. 38 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei, Anhui 230088, China;

²Research Center of Space Laser Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The frequency modulation phase response of single section distributed feedback (DFB) semiconductor laser has a 180° phase reversal in 0.1-5 MHz, which makes it difficult for phase locking of optical phase-locked loop (OPLL) when single section DFB semiconductor lasers act as slave lasers. To solve the problem of phase locking in single section DFB semiconductor lasers, we add the adjustable lead phase shift functional circuit and adjustable gain function unit in the single feedback loop, and optimize parameters of phase shift to accomplish phase locking of DFB laser with MHz level linewidth. The residual phase noise of improved OPLL is 0.012 rad², and the linewidth of DFB laser is compressed from 2 MHz in free-running state to 10 kHz in phase-locked state. In addition, we research the influence of loop gain of the feedback loop on the phase locking performance of OPLL and give the optimized loop gain parameter.

Key words lasers; semiconductor laser; single section distributed feedback; optical phase-locked loop; power spectrum density of frequency noise

OCIS codes 140.3490; 060.2330; 250.5960

1 引言

随着光电子技术的发展,窄线宽光纤激光器和固体激光器广泛应用于光纤传感、激光探测和成像

等领域。与光纤激光器和固体激光器相比,半导体激光器具有体积更小、价格更低、输出光功率和量子效率更高的优势。然而,半导体激光器较低的波导端面反射率和较小的尺寸使其噪声性能相对较

收稿日期: 2017-08-01; 收到修改稿日期: 2017-10-11

基金项目: 安徽省科技攻关项目(1704a0902032)

作者简介: 王建(1985—),男,博士研究生,主要从事高速光通信、光学锁相电路方面的研究。

E-mail: wangjian200206@163.com

导师简介: 蔡海文(1975—),男,博士,博士生导师,主要从事分布式光纤传感技术及窄线宽单频激光技术应用方面的研究。E-mail: hwcai@siom.ac.cn

差^[1-2]。在电磁透明技术、精密光谱以及物质波干涉等研究领域,均需要两束频率偏差非常精准的激光。在很多情况下,如果要想实现特定的能级跃迁,需要对每一个激光器进行稳频操作,从而增加了技术复杂度和系统成本。为解决这些问题,采用光学锁相环(OPLL)电路实现数据信号和本振传输的载波相位同步技术引起人们的广泛关注^[3-5]。OPLL 技术能够将 2 个独立光源发出的激光变为相位相干,实现从激光器相位噪声的大幅度降低,即线宽的压窄^[1],并且两束激光的频率偏差可以灵活控制^[6]。该技术在光通信、精密光谱学测量、光与原子相互作用、微波光子学、光纤传感^[7-10]等领域正逐步得到广泛的应用。

在典型的外差 OPLL 中,半导体激光器作为电流控制的振荡器,其频率和相位被锁定在频率和从激光器有一个射频(RF)频率偏差的主激光器上。为了实现稳定的锁相操作,环路带宽要大于主从激光器的线宽之和。在环路带宽内,通过环路反馈可以消除从激光器与主激光器之间的相位误差。利用外腔激光器和固体激光器等线宽较窄的激光器,很容易就能实现主从激光器之间稳定的锁相^[2,11],然而对于线宽相对较宽的半导体激光器,实现环路锁相则较为困难^[12]。

以单段式分布式反馈(DFB)半导体激光器为从

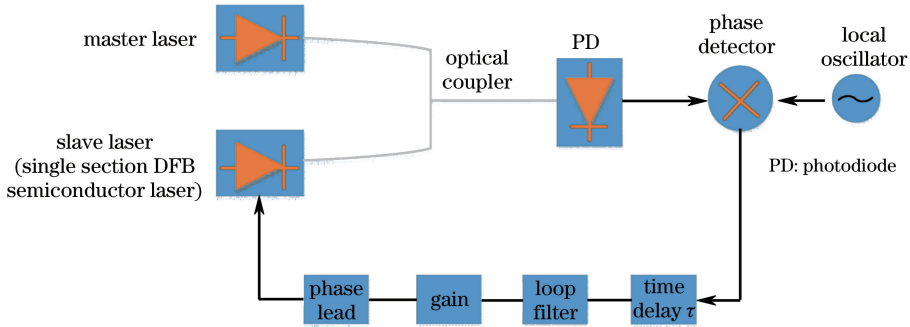


图 1 外差式 OPLL 原理图

Fig. 1 Principle diagram of heterodyne OPLL

主、从激光器输出光波的光场可以表示为

$$E_i(t) = E_{0i} \exp(j2\pi\Omega_i t + \phi_i), \quad (1)$$

式中 $i=1$ 代表主激光器, $i=2$ 代表从激光器; E_{0i} 、 ϕ_i 分别为两激光器输出光波光场的幅度和相位; t 为时间; Ω_i 为光波的角频率。光电探测器输出的光电流可以表示为

$$I_{mm}(t) = I_{DC} + R'E_{01}E_{02} \cos[\omega_{mm}t + (\phi_1 - \phi_2)], \quad (2)$$

式中 $\omega_{mm} = \Omega_2 - \Omega_1$, R' 为探测器的响应度。利用环

激光器的 OPLL,其环路带宽受限于从激光器的频率调制响应带宽。在低频区,热效应引起激光波长向长波方向变化,导致单段式半导体激光器的频率调制响应曲线出现红移;在高频区,载流子的注入引起材料折射率的变化,使得激光波长向短波方向变化,从而导致单段式半导体激光器的频率调制响应曲线出现蓝移。两者的综合作用使得在 0.1 ~ 5 MHz 的调制频段出现 180° 的相移,导致单段式 DFB 半导体激光器的锁相难以实现。为解决该问题,研究人员提出了双环或者边带锁定的方法,并获得了良好的锁相效果^[12-13]。本文采用在单环反馈回路中加入可调超前移相功能电路并优化相移参数的方法,实现 MHz 量级线宽半导体激光器相位与光纤激光器相位的锁定。采用超前移相功能电路实现反馈到从激光器电流驱动端电压信号相位的超前移相,抵消或降低 180° 相位反转对闭环锁相的影响,实现了稳定的锁相性能。此外,通过在反馈环路中增加可调增益功能单元,研究环路增益对 OPLL 锁相性能的影响,并给出最优的环路增益控制参数。

2 锁相原理

图 1 为单段式 DFB 半导体激光器外差 OPLL 结构原理图,反馈环路中增加了超前移相功能电路和可调增益电路。

路滤波器滤除鉴相所得的相位误差信号中的高频成分,相位误差信号经增益单元和超前移相功能单元后的反馈信号可以表示为

$$I_{err} = K_m a_{LO} R' E_{01} E_{02} \sin[(\omega_{LO} - \omega_{mm})t + (\phi_2 - \phi_1) - \phi_{LO} + \phi_{PL}(\omega_{LO} - \omega_{mm})], \quad (3)$$

式中 K_m 为鉴相器的电流响应度; a_{LO} 、 ϕ_{LO} 分别为本地参考信号源的电流幅度和相位; ϕ_{PL} ($\omega_{LO} - \omega_{mm}$) 为超前移相功能电路产生的相移量。反馈电路的开环传输函数可以表示为

$$H_{op} = \frac{G_{dc} H_F(j\omega) H_{FM}(j\omega) \exp[j\omega\tau + \phi_{PL}(\omega)]}{j\omega}, \quad (4)$$

式中 G_{dc} 为环路增益, $H_F(j\omega)$ 为滤波器的频率响应函数, $H_{FM}(j\omega)$ 为从 DFB 激光器的频率响应函数, $(j\omega)^{-1}$ 为相位噪声随时间的积分。由(4)式可以看出,通过改变 $\phi_{PL}(\omega)$,即改变超前移相电路的移相参数,可从激光器相位始终跟随主激光器的相位,实现了主从激光器相位的锁定,减小了从激光器相位噪声。

3 OPLL 系统链路

单段式 DFB 半导体激光器 OPLL 系统结构如图 2 所示。在该系统结构中,主激光器采用线宽为 10 kHz 量级的光纤激光器,输出光功率约为 1 dBm;从激光器选择线宽为 MHz 量级的 DFB 半导体激光器 FRL15DCW,输出光功率约为 3 dBm。主从激光器拍频所得的光信号经过宽带光电探测器,再经光电转换后转变为高速电信号。经高通滤波器滤掉直流成分的高速电信号被送入 OPLL 鉴相控制系统,通过现场可编程逻辑门阵列(FPGA)控制大带宽鉴相器件(ADF4118,ADI 公司,美国)的分频系数,对拍频信号经光电转换后的 RF 信号

和基准参考信号分别进行分频。利用 ADF4118 对分频后的信号进行鉴相,所得的误差信号经低通环路滤波器滤波后被送入比例-积分-微分(PID)伺服控制系统,经过可调增益电路和超前移相功能电路反馈后被送入从激光器驱动电路中,实现 OPLL 的闭环回路反馈功能。PID 反馈带宽要小于低通滤波器的截止频率;相位鉴频器(PFD)采用 ADF4118 芯片,该芯片具有极低的相位噪声,在 1 Hz 带宽内的相位噪声基底为 -213 dBc/Hz,所选用的 PFD 芯片鉴相频率高达 104 MHz,能在大宽带的链路中工作,调谐频率的最小步进为 100 kHz,环路滤波器的带宽为 23 kHz。ADF4107 对主从激光器拍频所得的信号和鉴相参考信号进行不同分频系数的分频,得到鉴相器鉴相工作频率之内的频率值,对主从激光器的拍频信号经光电转换所得的电 RF 信号和基准参考信号进行鉴相,所得的误差信号经低通环路滤波器滤波后被送入 PID 反馈回路,PID 反馈回路的输出信号经可调增益电路和超前移相功能电路后被反馈到从激光器的驱动控制端。通过调节和优化超前移相功能电路和可调增益电路参数,实现从激光器对主激光器频率和相位的跟随。

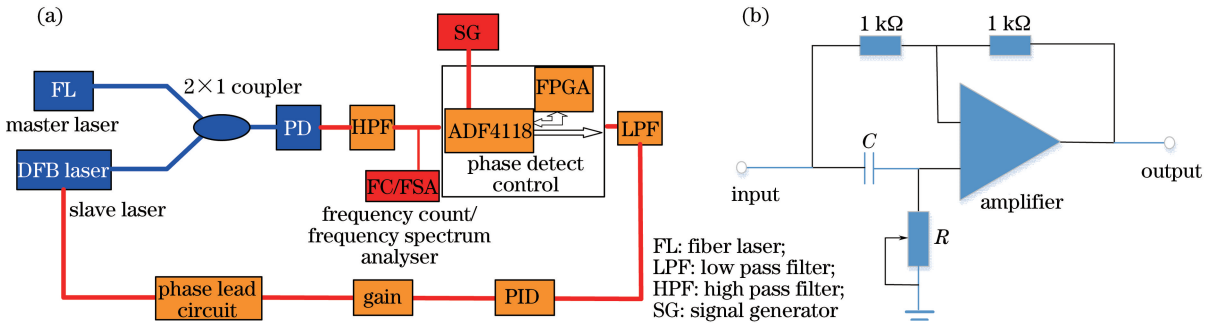


图 2 (a)单段式 DFB 半导体激光器 OPLL 结构;(b)超前移相功能电路

Fig. 2 (a) OPLL structure of single section DFB semiconductor laser; (b) function circuit of lead phase shift

合适的增益选择对实现锁相至关重要,较大和较小的增益都无法实现锁相。超前移相电路是 DFB 半导体激光器能否实现锁相的关键所在。本装置中 PID 伺服反馈控制部分的比例系数 $P < 1$, 设置为 0.2;积分常数 I 要大于 DFB 从激光器的频率响应带宽,设置为 $0.5 \mu s$ 。

4 锁相实验

实验采用 FITEL 公司的 DFB 半导体激光器,其频率调制幅度/相位响应曲线如图 3 所示。由图 3 可知,该单段式 DFB 半导体激光器的调制频率

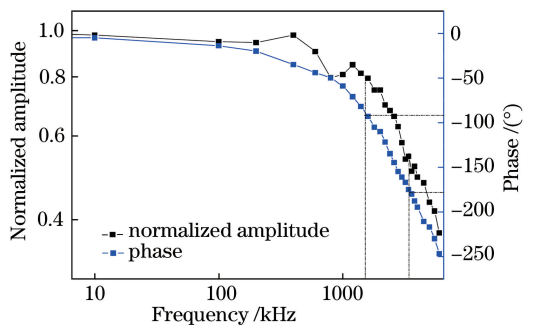


图 3 单段式 DFB 半导体激光器频率调制幅度/相位响应曲线
Fig. 3 Frequency modulation amplitude/phase response curve of single section DFB semiconductor laser

在0.1~3 MHz范围内时,其相位响应出现 180°的相位反转。在调制频率为 1.5 MHz 时,其相位响应出现 90°的相移,该调制频率小于 DFB 半导体激光器 2 MHz 的线宽,因此使用常规 OPLL 技术无法实现此类单段式 DFB 半导体激光器相位的锁定。

为解决相位反转导致的 OPLL 相位难以锁定的问题,在反馈环路中加入了超前移相功能电路,对鉴相误差反馈信号进行超前移相,并合理优化相移参数,成功实现了单段式 DFB 半导体激光器的锁相。图 4 为主从激光器实现锁相后的拍频信号线宽与从激光器自由运转时的线宽测量比较图,由图 4(a)可知,从 DFB 半导体激光器在自由运转时的线宽约为 2 MHz,环路带宽为 2 MHz。锁定后的从 DFB 半导体激光器线宽在环路带宽内被有效地压窄至主光纤激光器的线宽。图 4(b)为在主峰中心频率±50 kHz范围内的频谱细节,图中锁相后主从激光器拍频信号旁边的 2 个小峰是由光纤激光器的弛豫振荡峰与从激光器的拍频信号所产生的。在 OPLL 中,残余相位噪声是衡量 OPLL 锁相性能优劣的重要表征量,可以由拍频信号的载波功率频谱计算获得,其计算公式为^[9]

$$\exp[-(\Delta\phi^2)] = \frac{P(0)}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\nu) d\nu}, \quad (5)$$

式中 $P(0)$ 为窄拍频信号中心功率, $P(\nu)$ 为频率为 ν 的功率。由图 4 中的数据 and (5) 式计算得到 OPLL 实验中单段式 DFB 半导体激光器残余相位噪声为 0.012 rad², 实现了性能优异的锁相效果。图 5 为采用 160 MHz 移频的声光调制器延时自外差法测量

所得的锁相前和锁相后从 DFB 半导体激光器输出光波的线宽测量结果图。由图 4 可知,在没有锁定前,从 DFB 激光器处于自由运转状态,其输出激光的线宽为 2 MHz。通过闭环环路并调节 PID、超前移相各参数,实现环路的相位锁定,此时主从激光器具有相同的线宽输出,通过操控从激光器的频率可以实现对主激光器频率的操控。主从激光器以固定的频率差牢牢地锁定在一起。相位锁定后,从激光器的输出线宽具有与主激光器相同的输出线宽,为 10 kHz。主激光器、自由运转状态下从激光器及相位锁定后的从激光器输出光波的频率噪声功率谱密度如图 6 所示。由图可知,主激光器的相位噪声最低,环路闭合并实现锁相后,从激光器在 35 kHz 带宽内具有与主激光器几乎完全相同的低噪声特性,因而从激光器线宽被有效地压窄。在 10² Hz 量级带宽内,从激光器频率噪声相对于其自由运转时的频率噪声降低了 10 dB 以上。第④、⑤条线是调整不同相移参数后得到的从激光器输出光波频率噪声功率谱密度曲线。第③条线是超前移相电路相移参数最优的情况下从激光器输出光波频率噪声谱曲线,此时超前移相功能电路的电阻为 300 Ω, 电容为 100 pF。由图可知,超前移相电路对环路相位锁定有至关重要的影响,这在实现单段式 DFB 半导体激光器 OPLL 实验中也得到了印证。在没有加入超前移相电路时,无论怎样调节 PID 参数,始终无法实现锁相,只能实现锁频效果^[14]。锁频只能使主从激光器的频率锁定在相同的频率差,无法实现主从激光器的锁相,即无法实现对从激光器线宽的压窄。

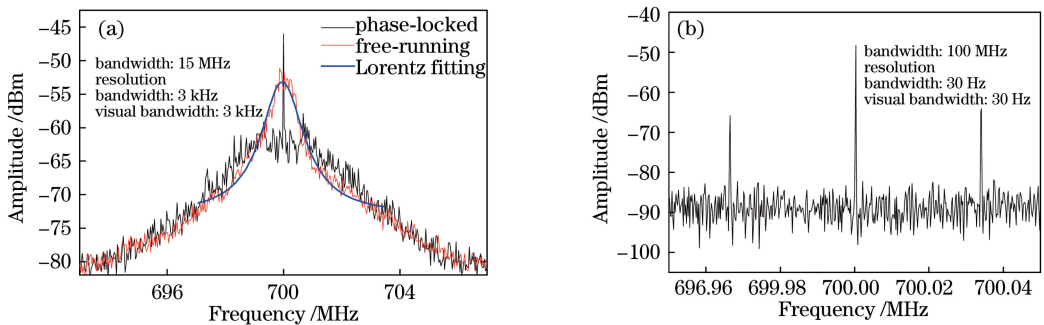


图 4 (a)自由运转与相位锁定情况下主从激光器的拍频信号;(b)相位锁定情况下在 100 kHz 视频带宽内的主从激光器拍频信号
Fig. 4 (a) Beating signals of master and slave lasers under free-running and phase-locked states;
(b) beating signal of master and slave lasers under phase-locked state in 100 kHz view bandwidth span

实验中还验证了不同环路增益系数对锁相性能的影响,如图 7 所示。由图 7 可知,不同环路增益系数对锁相性能具有不同的影响。当环路增益系数大于 4 且继续增大时,环路无法维持锁相;当环路增益

系数为 7 时,环路仅能维持锁频状态,此时相位已经失锁;当环路增益系数为 5 时,相位处于最佳的锁定状态,此时从激光器的输出光波在±40 kHz 频率范围内具有与主激光器相同的频率噪声谱。环路增益

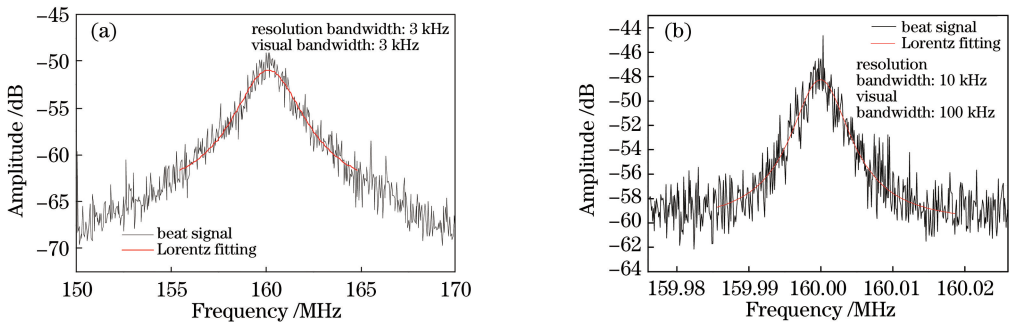


图 5 锁相前后从激光器线宽测量图。(a)自由运转状态;(b)相位锁定状态

Fig. 5 Line width measurement results of slave laser before and after phase locking.

(a) Free-running state; (b) phase-locked state

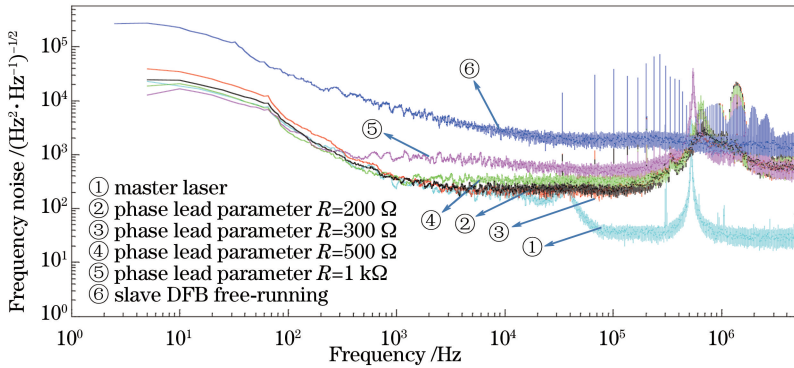


图 6 主激光器、自由运转状态及不同相移参数下锁频及锁相状态从激光器的频率噪声功率谱密度曲线

Fig. 6 Frequency noise power spectrum density curves of master laser and slave laser in free-running and frequency/phase-locked state with different phase shift parameters

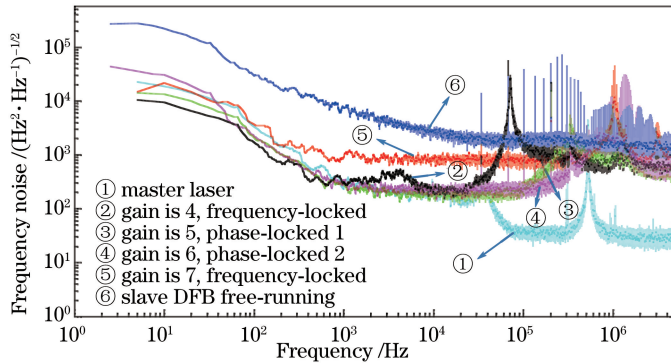


图 7 OPLL 中反馈环路不同增益系数对从激光器输出频率噪声功率谱密度的影响

Fig. 7 Influence of different gain coefficients on frequency noise power spectrum density of slave laser in feedback loop of OPLL

系数会对 OPLL 闭环环路的环路传递函数产生影响,进而影响拍频信号的相位噪声谱密度^[15],最终影响 OPLL 链路的锁相性能。

5 结 论

对单段式 DFB 半导体激光器作为从激光器的 OPLL 进行了研究。单段式 DFB 半导体激光器在 MHz 量级带宽附近具有 180° 的相位反转,使得其锁

相难以直接实现。通过使鉴相误差反馈信号经超前移相功能电路及环路增益电路反馈到从激光器的驱动端,并优化相移及环路增益参数,实现了优异的锁相性能,所实现的 OPLL 锁相残余相位噪声低至 0.012 rad²,DFB 从激光器线宽也从 2 MHz 被压窄至与主激光器线宽相同的输出线宽,为 10 kHz,实现了从 DFB 激光器在 ±40 kHz 的频带内具有与主激光器相同的超低频率噪声性能。

参 考 文 献

- [1] Poulin M, Ayotte S, Costin F, *et al.* Optically phase-locked lasers for RF photonics applications[C]. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2015: Tu3F.1.
- [2] Camatel S, Ferrero V. Narrow linewidth CW laser phase noise characterization methods for coherent transmission system applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(17): 3048-3055.
- [3] Chang S, Tong S F, Jiang H L, *et al.* Optical phase-locked loop technology in inter-satellite high-speed coherent laser communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206004.
常帅, 佟首峰, 姜会林, 等. 星间高速相干激光通信系统中的光学锁相环技术[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206004.
- [4] Zhang Z, Sun J F, Lu B, *et al.* Costas optical phase lock loop system design in inter-orbit coherent laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0805006.
张震, 孙建锋, 卢斌, 等. 星间相干激光通信中科斯塔斯锁相系统设计[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805006.
- [5] Zhao Y, Tong S F, Song Y S, *et al.* Research progress of optical phase locked loop in space laser communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080002.
赵毅, 佟首峰, 宋延嵩, 等. 空间激光通信中光学锁相环的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080002.
- [6] Lu M Z, Park H C, Bloch E, *et al.* An integrated heterodyne optical phase-locked loop with record offset locking frequency [C]. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2014: Tu2H.4.
- [7] Xu N, Liu L R, Liu D A, *et al.* Optical phase locked loops in inter-satellites coherent optical communications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(4): 25-33.
许楠, 刘立人, 刘德安, 等. 星间相干光通信中的光学锁相环[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(4): 25-33.
- [8] Li Y, Bao X Y, Ravet F, *et al.* Distributed Brillouin sensor system based on offset locking of two distributed feedback lasers[J]. Applied Optics, 2008, 47(2): 99-102.
- [9] Marino A M, Stroud C R. Phase-locked laser system for use in atomic coherence experiments[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(1): 013104.
- [10] Ohtsu M. Highly coherent semiconductor lasers [M]. Boston: Artech House Publishers, 1991.
- [11] Hyodo M, Saito S, Kasai Y. Optical phase-locked loop with fibre lasers for low phase noise millimetre-wave signal generation[J]. Electronics Letters, 2009, 45(17): 878-880.
- [12] Naresh S, Arseny V, Wei L, *et al.* Sideband locking of a single-section semiconductor distributed-feedback laser in an optical phase-lock loop[J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3256-3258.
- [13] Qin J, Zhou Q, Xie W L, *et al.* Coherence enhancement of a chirped DFB laser for frequency-modulated continuous-wave reflectometry using a composite feedback loop[J]. Optics Letters, 2015, 40(19): 4500-4503.
- [14] Peng J B, Bian Z L, Hao Y Q, *et al.* Frequency locking of two DFB lasers for distributed optical fiber sensing applications [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(7): 0705001.
彭交波, 卞正兰, 郝蕴琦, 等. 用于布里渊分布式光纤传感的光学锁频系统[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0705001.
- [15] Bordonalli A C, Walton C, Seeds A J. High-performance phase locking of wide linewidth semiconductor lasers by combined use of optical injection locking and optical phase-lock loop[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(2): 328-342.