

# 基于移频环路扩频的新型宽带扫频光源

李 露<sup>1</sup> 杜江兵<sup>1\*</sup> 徐长鑫<sup>2</sup> 孙 林<sup>1</sup> 李佳熊<sup>1</sup> 何祖源<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

<sup>2</sup>万马科技股份有限公司, 浙江 临安 311306

**摘要** 扫频光源(FSOS)在光通信、光传感和光成像等领域得到广泛应用,其扫频宽度和扫频速度直接影响了这些应用的性能。提出了一种明显改善扫频激光光源扫频范围和扫频速度的新方法,在移频环路中引入单边带调制,增强扫频电光调制,产生高阶稳定的光梳,从而在保证相同线性度和窄线宽条件下,利用窄带的扫频电信号获得宽的光扫频范围。利用 200 MHz 的射频扫频宽度得到约 11.44 GHz 的光扫频宽度,扩频约 57 倍,由于每次扫频时间相同,扫频速度也提高约 57 倍。

**关键词** 光纤光学;扫频范围;单边带调制;移频环路;光梳

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0505004

## A Novel Broadened Frequency Sweeping Optical Source with Wide Linewidth Based on Optical Recirculating Frequency Shifter

Li Lu<sup>1</sup> Du Jiangbing<sup>1</sup> Xu Changxin<sup>2</sup> Sun Lin<sup>1</sup> Li Jiexiong<sup>1</sup> He Zuyuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

<sup>2</sup>Wanma Technology Company, Lin'an, Zhejiang 311306, China

**Abstract** Frequency sweeping optical source (FSOS) is widely used in optical communications, optical sensing and optical imaging. Sweeping span and sweeping speed of the FSOS is critical to its performance. A new method to broaden the sweeping span and accelerate the sweeping speed of the FSOS is proposed. Single sideband modulation is adopted in a recirculating frequency shifter to enhance the frequency sweeping electric-optic modulation and generate stable high-order optical comb. So a wider optical frequency sweeping span is obtained with narrow-band electrical sweeping signal given the identical linearity and narrow linewidth. An optical frequency sweeping span of 11.44 GHz is obtained by radio frequency sweeping span of 200 MHz, the frequency is broadened approximately by 57 times. Meanwhile, the frequency sweeping speed is improved by 57 times as each sweeping period remains not changed.

**Key words** fiber optics; frequency sweeping span; single sideband modulation; recirculating frequency shifter; optical comb

**OCIS codes** 060.4080; 140.3460; 060.2310

## 1 引 言

扫频光源(FSOS)是一种广泛应用于光学相干断层扫描、光频域反射仪和光传感解调等领域的激光器<sup>[1-2]</sup>。扫频带宽、扫频速度、扫频线性度和扫频连续性等光扫频特性对扫频光源的应用具有重要影响<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期: 2015-11-25; 收到修改稿日期: 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(61307107, 61327812)、上海市科学技术委员会科学基金(13ZR1456200)

作者简介: 李 露(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤非线性信号处理与扫频光源等方面的研究。

E-mail: siliangxifeng@sjtu.edu.cn

导师简介: 何祖源(1962—),男,博士,教授,主要从事光纤传感等方面的研究。E-mail: zuyuanhe@sjtu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: dujiangbing@sjtu.edu.cn

其中,光频域反射仪作为光学分布式传感技术之一,具有高空间分辨率特性,受到广泛关注<sup>[5-7]</sup>。在光频域反射仪系统中,获得高空间分辨率需要宽扫频范围的扫频激光源<sup>[4,8]</sup>。同时,为了在基于光频域反射仪的分布式光传感中获得优质性能,需要高线性度和窄线宽<sup>[8]</sup>。

为了获取窄线宽、高线性度和宽扫频范围的扫频激光源,单边带调制是简单且常用的方法,单边带调制需要用到线性度极高的射频(RF)扫频信号<sup>[9-12]</sup>。然而,射频信号的扫频范围非常有限。通常,连续的射频扫频范围只有大约几吉赫兹。另一方面,在不同的调制频率下,单边带调制器的 I 支路和 Q 支路的相位差很难保持不变<sup>[13-15]</sup>。因此,当射频信号扫频范围较大时,单边带调制器的性能通常很难保持恒定。由此可知,扩大光扫频范围并且用窄带射频调制得到宽带扫频光源非常重要<sup>[4,16]</sup>。例如,可以用大功率的射频信号进行调制,进而在高阶边带获得展宽后的扫频范围<sup>[16-17]</sup>,也可以在四波混频过程中采用频率啁啾放大的方法扩大光扫频范围<sup>[7]</sup>。但是这些方法放大效率不高,扫频范围通常只能放大几倍<sup>[4,8,16-17]</sup>。

本文用循环的单边带调制构建移频环路(RFS),扩大光扫频范围。单边带调制和循环装置能够产生级联的高阶调制边带,进而产生具有几十条载波的光梳。在高阶调制边带上可以得到加宽的光扫频范围。实验中,用 200 MHz 带宽的射频扫频信号得到了约为 11.44 GHz 的光扫频范围,扫频带宽扩大了约 57 倍。

## 2 移频环路和扫频扩频基本原理

移频环路的基本原理和实验装置如图 1 所示,移频环路由单边带(SSB)调制器和光纤环路组成,环路中的参铒光纤放大器(EDFA)用来补偿能量损失,偏振控制器(PC)用来调节光偏振态。单边带调制器将可调激光器(TL)发出的初始光载波的频率移动到第一阶载波频率。移动后的光载波再循环并且与初始光载波一起输入单边带调制器进行频率再移动。不断重复这个过程,产生大量的光载波<sup>[18]</sup>。

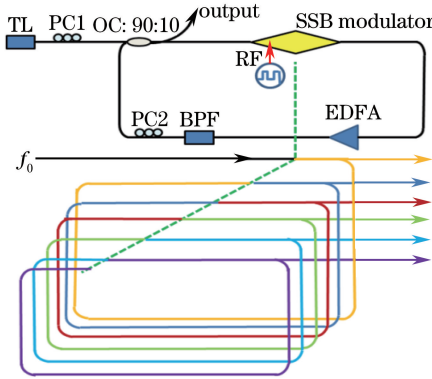


图 1 实验装置与原理图

Fig. 1 Experimental setup and principle

移频环路的不断循环造成扫频带宽的展宽。假设从调谐激光器发出的原始载波为  $E_0(t) = A \exp(j2\pi f_0 t)$ , RF 频率为  $f_m$ , 边带频率分别用  $f_1, f_2, \dots, f_N$  表示。如图 2 所示,调谐激光器发出的初始光频率为  $f_0$ , 经过调制频率为  $f_m$  的单边带调制器后,新产生的载波频率为  $f_1 = f_0 + f_m$ , 这一过程可以表示为

$$E_1(t) = GLE_0(t) \exp(j2\pi f_m t) \exp[j\varphi_1(t)] = GLA \exp[j2\pi(f_0 + f_m)t] \exp[j\varphi_1(t)], \quad (1)$$

式中  $G$  为 EDFA 的增益,  $L$  为单边带调制器、带通滤波器和耦合器的损耗,  $\varphi_1(t)$  为第一次循环后由于光纤机械扰动产生的相位噪声<sup>[19-20]</sup>。因此,  $f_m$  在频率范围  $\Delta f$  内进行扫频时,一阶边带载波  $f_1$  扫频范围也为  $\Delta f$ 。在第二次循环之后,  $f_1$  被移动到二阶边带载波  $f_2$ ,  $f_2$  的扫频带宽由于二次级联调制将会放大 2 倍<sup>[21]</sup>。因此,在  $N$  次循环之后,第  $N$  阶边带可表示为

$$E_N(t) = GLE_0(t) \exp(j2\pi N f_m t) \exp[j\sum_{n=1}^N \varphi_n(t)] = GLA \exp[j2\pi(f_0 + N f_m)t] \exp[j\sum_{n=1}^N \varphi_n(t)], \quad (2)$$

式中  $\varphi_n(t)$  为第  $N$  次循环后产生的相位噪声。相位噪声会在高阶边带积累。第  $N$  阶载波的频率为  $N f_m$ ,  $N$  阶边带载波的扫频宽度为  $N \Delta f$ 。同时,每次循环的扫频时间相同,因此  $N$  阶边带载波的扫频速度提高了  $N$  倍。但是单边带调制的原理限定了相邻载波的间隔为调制频率。因此经过扩频后最大带宽受到限制,超过

最大带宽时光谱会发生混叠。

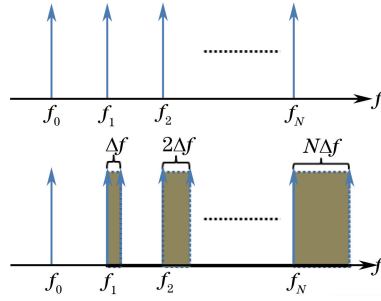


图 2 高阶边带扫频示意图

Fig. 2 Schematic for high-order sideband frequency sweeping

如果输入信号为(1)式中的  $E_0(t)$ , 单边带调制器的射频输入 I 路和 Q 路的射频信号分别为  $f_1(t) = V_{PP} \sin(2\pi f_s t)$ ,  $f_Q(t) = V_{PP} \cos(2\pi f_s t)$ , 其中  $V_{PP}$  和  $f_s$  分别为射频信号的幅度和频率。此时单边带调制器的输出可以表示为<sup>[22]</sup>

$$E_{out}(t) = \frac{E_0(t)}{2} \left\{ j \sin \left[ \frac{\pi}{2} \frac{f_1(t)}{V_\pi} \right] + \sin \left[ \frac{\pi}{2} \frac{f_Q(t)}{V_\pi} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中  $V_\pi$  为单边带调制器的半波电压。用 Jacobi 三角公式展开, 并且忽略超过三次的谐波, 第一次循环后单边带调制器的输出可表示为

$$E_1(t) = E_0(t) + E_0(t) \cdot J_1(\delta_m) [\exp(j2\pi f_s t) + b \exp(-j6\pi f_s t)] \exp(j\varphi_{RT}), \quad (4)$$

式中  $\delta_m = \pi V_{PP} / 2V_\pi$  表示相位调制深度,  $J_1(\delta_m)$  为一阶贝塞尔函数,  $\varphi_{RT}$  为每一次循环的相位延迟,  $b = -J_3(\delta_m) / J_1(\delta_m)$  表示串扰系数,  $\delta_m$  与调制驱动电压  $V_{PP}$  有关。因此, 为了减少串扰, 必须选取合适的  $V_{PP}$ , 使得  $|b| \ll 1$ 。

### 3 扫频光源实验结果

实验中可调激光器产生连续光, 波长约为 1550 nm, 线宽为 100 Hz。连续光通过光耦合器 10% 的端口进入单边带调制器, 单边带调制器的损耗约为 8 dB。没有环路时, 单边带调制器的输出光谱如图 3 所示, 其中一阶蓝移的边带和初始载波之间的边带抑制比为 30 dB。由于转化效率低且单边带调制器插入损耗较高, 输出功率约为 -23.2 dBm。

循环建立后, 移频后的边带载波经过 EDFA 放大之后通过带通滤波器(BPF), 其中滤波器的损耗约为 4 dB。在带通滤波器范围以外没有循环和频率移动形成的载波。当射频调制频率为 17.3 GHz, 功率为 12.6 dBm 时, 移频环路产生的光梳具有几十个载波, 光梳光谱如图 4 所示。

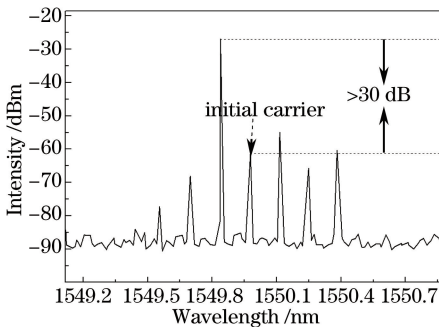


图 3 单边带调制器的直接输出光谱

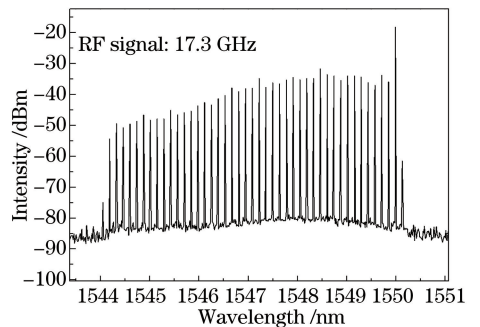


图 4 光梳光谱

Fig. 3 Direct output spectrum of SSB modulator

Fig. 4 Spectrum of optical comb

当线性改变射频调制信号频率时, 光载波的频率移动, 而且光梳的高阶边带频率移动更大。当射频扫频范围分别为 100 MHz 和 400 MHz 时, 产生的扩频扫频光谱如图 5 所示, 图中可以看到高阶载波扫频范围展宽后的光谱。如果高阶边带扫频范围过大, 并且超过最小频率, 那么频谱将会互相混叠。当射频调制频率在

17.1~17.5 GHz 范围内扫频时,在波长约为 1545 nm 处,37 阶边带载波扫频范围从射频信号的 400 MHz 放大到 14.8 GHz,与 38 阶载波的扫频结果发生混叠,其中 38 阶载波的扫频范围为 15.2 GHz。

如果射频调制频率扫频范围较大,则重叠发生较早。图 6 所示为射频调制频率扫频范围为 1 GHz 时的频谱。图中 14 阶边带载波的扫频范围为 14 GHz,它最先与 15 阶边带载波发生混叠。对于比 15 阶更高阶的载波,边带载波的扫频频谱完全重叠,并形成 1544~1548 nm 的连续谱。

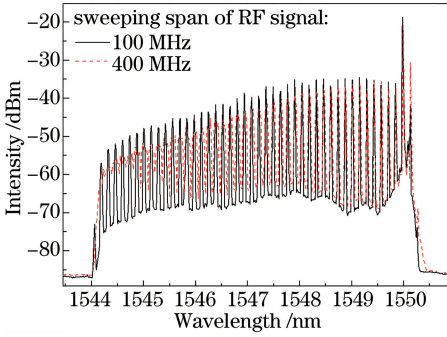


图 5 调制扫频范围分别为 100 MHz 和 400 MHz 时移频环路的输出光谱  
Fig. 5 Spectra of RFS output for modulation frequency sweeping span of 100 MHz and 400 MHz

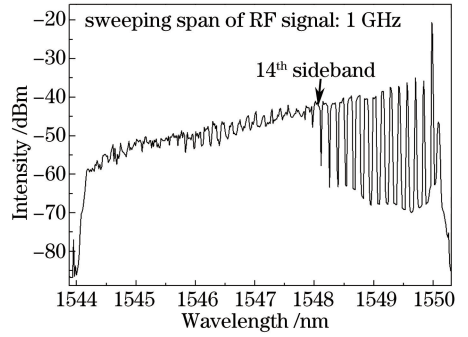


图 6 调制扫频带宽为 1 GHz 时移频环路的输出光谱  
Fig. 6 Spectrum of RFS output for modulation frequency sweeping span of 1 GHz

扩大扫频范围既可以通过蓝移的移频环路实现,也可以通过红移的移频环路实现。图 7 所示为红移时移频环路产生的光梳。图中光谱由光复谱仪测量。带通滤波器的带宽为 1.1 THz(约 8.8 nm),射频调制信

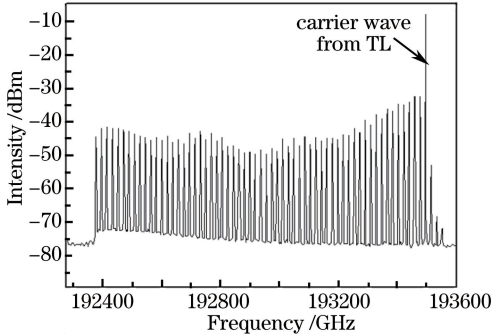


图 7 具有 60 个边带载波的光梳光谱  
Fig. 7 Spectrum of optical comb with 60 sideband carriers

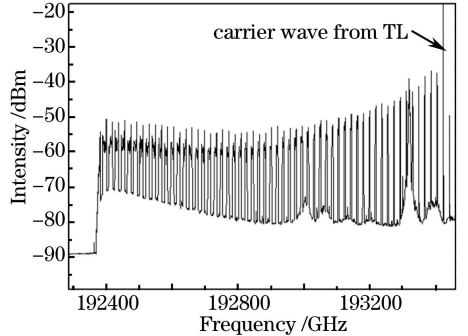


图 8 调制扫频信号带宽为 200 MHz 时移频环路的输出光谱  
Fig. 8 Spectrum of RFS output for modulation frequency sweeping span of 200 MHz

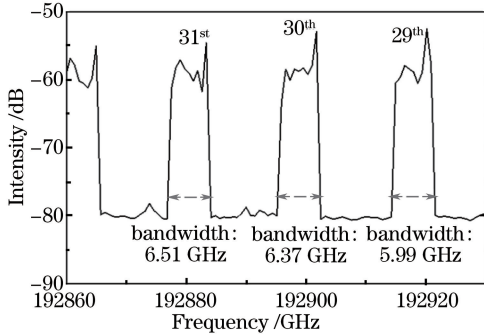


图 9 边带载波为 29 阶、30 阶和 31 阶时移频环路的输出光谱  
Fig. 9 Spectra of RFS output for 29<sup>th</sup>, 30<sup>th</sup> and 31<sup>st</sup> order sideband carriers

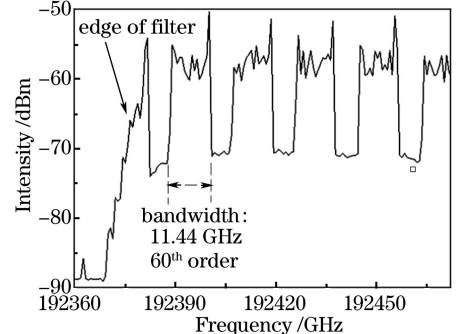


图 10 带通滤波器边缘移频环路产生的边带载波光谱  
Fig. 10 Sideband carrier spectrum of RFS at the edge of BPF

号频率为 18.64 GHz,移频环路产生具有 60 阶边带载波的光梳,光梳第 60 阶边带的信噪比为 27.58 dB。

当射频调制信号扫频范围为 200 MHz 时,29 阶、30 阶和 31 阶边带载波的光扫频范围分别为 5.99、6.37、6.51 GHz。输出光谱分别如图 8~10 所示。边带载波的带宽随着载波阶数的增加而线性增加。在带通滤波器的边缘,最大的带宽为 60 阶边带载波的 11.44 GHz,由此可知扫频范围放大了 57 倍。同时,一个周期的扫频时间是 10 ms,因此 60 阶边带载波扫频速度放大至 1.144 THz/s。

但是,理论上在 60 阶边带载波上,扫频范围应该放大 60 倍,误差主要由于光谱仪的分辨率有限(约为 800 MHz)所致。

## 4 分析与讨论

传统产生光梳的方法中,采用双驱动单个马赫-曾德尔调制器,可产生 20 多阶平坦光梳<sup>[23]</sup>;采用级联的相位调制器,虽然产生的载波较多,但是很难对准,产生的光梳间隔不完全相同,并且光梳不够平坦。文中实验产生光梳的方法采用单边带调制,转换效率较高,产生的边带载波阶数较高,最主要的是大大提高了扫频范围和扫频速度,其缺点在于高阶光梳不够平坦。

带宽为 1.1 THz 的带通滤波器阻止了移频继续进行,因此只产生了 60 条边带载波。如果移频能够继续,可以得到更多的边带载波,则扩频扫频效率会更高。另一方面,由(2)式可知,由于噪声信号(特别是附加相位噪声)积累,高阶边带产生的噪声更大,如果将移频环路封装在防振绝缘盒里,或者在保偏的环境中搭建实验系统,则可以减少这些噪声。

此外,除了附加相位噪声,射频信号的幅度也会影响实验结果。实验过程中,由(4)式可知,如果射频信号的幅度  $V_{pp}$  较大,则会引入较大的串扰,使得输出光梳不稳定;如果  $V_{pp}$  较小,则很难提供足够的能量产生更高阶边带。因此要适当调整  $V_{pp}$  以优化输出结果。

宽带扫频光源的实现方法是多样的,可以采用窄带射频扫频信号的高阶边带载波,保证调制性能,降低对电信号的要求,也可以采用宽带射频扫频信号的低阶边带载波,减少噪声信号积累。

## 5 结 论

基于移频环路,采用扫频带宽相对较窄的射频信号,提出了一种显著增大扫频光源扫频范围的简单方法。实验证明该方法使扫频范围显著增大,在 200 MHz 的射频扫频范围条件下,得到 11.44 GHz 的光扫频范围,扫频范围放大了 57 倍。利用扩频后的扫频光源,理想情况下可以保持载波线宽在 100 Hz 不变,但是由于附加相位噪声影响线宽,因此需要不断进行调整优化,减少因振动引起的偏振态改变。该方法可以显著提高光频域反射仪等应用的空间分辨率。

## 参 考 文 献

- Wang Ling, Tu Pei, Shi Ran, *et al.*. Quantitative evaluation of three-dimensional bio-printed hydrogel scaffolds by optical coherence tomography[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0804003.  
王 玲, 涂 沛, 石 然, 等. 光学相干层析成像技术用于三维生物打印水凝胶支架结构的定量评价研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0804003.
- Zhou Lin, Ding Zihua, Yu Xiaofeng. Axial superresolution in optical coherence tomography through the combination of apodization and coherence gating[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(9): 1181-1185.  
周 琳, 丁志华, 俞晓峰. 利用变迹术和相干门相结合实现光学相干层析成像术轴向超分辨[J]. 光学学报, 2005, 25(9): 1181-1185.
- Loayssa A, Hernández R, Benito D, *et al.*. Characterization of stimulated Brillouin scattering spectra by use of optical single-sideband modulation[J]. Optics Letters, 2004, 29(6): 638-640.
- Xu D, Du J, Fan X, *et al.*. 10-times broadened fast optical frequency sweeping for high spatial resolution OFDR[C]. Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2014: W3D.2.
- Zheng Xiangliang, Sun Quanshe, Zhu Xingbang. Method of measuring fiber length based on optical pulse delaying[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s206003.

- 郑祥亮, 孙权社, 朱兴邦. 基于光脉冲延迟法的光纤长度测量方法[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s206003.
- 6 Barfuss H, Brinkmeyer E. Modified optical frequency domain reflectometry with high spatial resolution for components of integrated optic systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(1): 3-10.
- 7 Soller B J, Kreger S T, Gifford D K, *et al.*. Optical frequency domain reflectometry for single and multi-mode avionics fiber-optics applications[C]. IEEE Conference on Avionics Fiber-Optics and Photonics, 2006: 38-39.
- 8 Xu D, Du J, Fan X, *et al.*. High spatial resolution OFDR based on broadened optical frequency sweeping by four-wave-mixing[C]. SPIE, 2014, 9157: 91576J.
- 9 Geng J, Spiegelberg C, Jiang S. Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry[J]. Photonics Technology Letters, 2005, 17(9): 1827-1829.
- 10 Huang W, Zhang W, Li F. Swept optical SS-SC modulation technique for high-resolution large-dynamic-range static strain measurement using FBG-FP sensors[J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1406-1409.
- 11 Koshikiya Y, Fan X, Ito F. Long range and cm-level spatial resolution measurement using coherent optical frequency domain reflectometry with SSB-SC modulator and narrow linewidth fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(18): 3287-3294.
- 12 Hou Yunzhe, Wang Zhaoying, Qin Xuwei, *et al.*. Precisely tuning technology of multi-wavelength fiber laser by radio frequency signal based on single side band modulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805001.  
侯云哲, 王肇颖, 秦旭伟, 等. 利用单边带调制器实现对多波长光纤激光器的高精度射频控制调谐技术[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805001.
- 13 Shimotsu S, Oikawa S, Saitou T, *et al.*. LiNbO<sub>3</sub> optical single-sideband modulator[C]. Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2000: PD16.
- 14 Higuma K, Oikawa S, Hashimoto Y, *et al.*. X-cut lithium niobate optical single-sideband modulator[J]. Electronics Letters, 2001, 37(8): 515-516.
- 15 Shimotsu S, Oikawa S, Saitou T, *et al.*. Single side-band modulation performance of a LiNbO<sub>3</sub> integrated modulator consisting of four-phase modulator waveguides[J]. Photonics Technology Letters, 2001, 13(4): 364-366.
- 16 Wei F, Lu B, Wang J, *et al.*. Precision and broadband frequency swept laser source based on high-order modulation sideband injection locking[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4970-4980.
- 17 Wang J, Chen D, Cai H, *et al.*. Fast optical frequency sweeping using voltage controlled oscillator driven single sideband modulation combined with injection locking[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7038-7043.
- 18 Kawanishi T, Sakamoto T, Shinada S, *et al.*. Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation[J]. IEICE Electronics Express, 2004, 1(8): 217-221.
- 19 Ma Y, Yang Q, Tang Y, *et al.*. 1-Tb/s single-channel coherent optical OFDM transmission with orthogonal-band multiplexing and subwavelength bandwidth access[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 308-315.
- 20 Li J, Li X, Zhang X, *et al.*. Analysis of the stability and optimizing operation of the single-sideband modulator based on re-circulating frequency shifter used for the T-bit/s optical communication transmission[J]. Optics Express, 2010, 18(17): 17597-17609.
- 21 Tian F, Zhang X, Li J, *et al.*. Generation of 50 stable frequency-locked optical carriers for Tb/s multicarrier optical transmission using a recirculating frequency shifter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(8): 1085-1091.
- 22 McGhan D, O'Sullivan M, Bontu C, *et al.*. Electronic dispersion compensation[C]. Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2006: OWK1.
- 23 Sakamoto T, Kawanishi T, Izutsu M. Asymptotic formalism for ultraflat optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator[J]. Optics Letters, 2007, 32(11): 1515-1517.