

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

侯云哲 王肇颖 秦旭伟 刘士圆 罗 莎 贾东方 葛春风*

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 提出了一种利用射频控制信号对多波长光纤激光器输出的多波长信号进行整体精密调谐的方法。通过在多波长光纤激光器腔外放置射频信号控制的单边带(SSB)调制器,实现了 65 个波长整体精密调谐。通过改变射频驱动信号频率,可以实现多波长整体在 150 MHz~12 GHz 范围内的任意调谐,最低对应 1.2 pm 的调谐量。且调谐步长由射频控制信号决定,可精确到 1 Hz。多波长整体调谐前后,多波长间隔始终保持 50 GHz 不变,各波长的边模抑制比(SMSR)均可达到 20 dB。

关键词 光纤光学; 高精度调谐; 多波长光纤激光器; 单边带调制器; 射频

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0805001

Precisely Tuning Technology of Multi-Wavelength Fiber Laser by Radio Frequency Signal Based on Single Side Band Modulator

Hou Yunzhe Wang Zhaoying Qin Xuwei Liu Shiyuan Luo Sha
Jia Dongfang Ge Chunfeng

(College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A method of using radio frequency (RF) control signal to achieve multi-wavelength fiber laser output precisely tuned is proposed. 65 wavelengths simultaneously tuned precisely is achieved by placing a RF controlling single side band (SSB) modulator outside the cavity of multi-wavelength fiber laser. The multi-wavelength output can be tuned simultaneously with a tuning step ranging from 150 MHz to 14 GHz when changing the frequency of RF signal, corresponding to 1.2 pm as a minimum tuning step. The tuning resolution is determined by the resolution of the RF wave generator, which can be as low as 1 Hz. The wavelength spacing remains 50 GHz before and after the multi-wavelength tuning. The sideband-mode suppression ratio (SMSR) of each wavelength output can reach 20 dB.

Key words fiber optics; precise tuning; multi-wavelength fiber laser; single side band modulator; radio frequency

OCIS codes 140.3600; 060.3510; 060.5625; 230.4110

1 引 言

目前,多波长激光器在光纤通信、光纤传感等领域有着重要的应用^[1-2]。这些应用不仅要求多波长光源能提供尽量多的信道,还要求多波长激光器输出的多波长信号可以灵活、精密、稳定地调谐。

目前实现多波长调谐的方法主要有机械控制、温度控制、损耗控制和非线性效应法等。机械控制一般是通过拉伸或压缩光纤光栅阵列(FBGs),实现对反射波长的调谐输出。Yang 等^[3]利用 FBGs 实现了对分布反馈(DFB)激光器阵列的 4 个多波长间

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(61275084,61377078)、天津市自然科学基金面上项目(12JCYBJC10800)

作者简介: 侯云哲(1990—),男,硕士研究生,主要从事非线性光纤技术和光纤通信等方面的研究。E-mail: lczs@qq.com

导师简介: 王肇颖(1977—),女,副教授,硕士生导师,主要从事非线性光纤技术和光纤通信等方面的研究。

E-mail: wangzy@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: tjgechunfeng@163.com

隔在 0.1~3 nm 范围内的自由均等调谐;也有 Yang 等^[4]利用自反射半导体光放大器(RSOA)和电脑控制的波长选择开关(WWS)进行波长调谐,实现了 4 个间隔为 100 GHz 的多波长信号在 34 nm 范围内的可调谐输出。温度控制是利用温度与某些滤波器透射特性相关的原理,实现多波长调谐。Moon 等^[5]利用椭圆芯的侧孔光纤搭建 Sagnac 环作梳状滤波器,通过改变光纤温度影响滤波器透射特性,分别实现了间隔为 0.8 nm 的 18 个波长和间隔为 1.4 nm 的 10 个波长在 π 相位以内的连续整体调谐,但是这种方法的调谐步长随温度非线性变化;杨秀峰等^[6]提出了一种基于相移光栅的多波长掺铒光纤激光器,得到了室温稳定的三个波长输出,并通过改变相移光栅温度,实现了 0.45 nm 范围内的近似线性连续调谐。损耗控制是通过改变激光腔内损耗来调节不同纵模起振实现多波长调谐。Dong 等^[7]在多波长激光腔内插入可变光学衰减器(VOA),实现间隔为 0.09 nm 的 11 个波长多波长输出 23 nm 范围内的整体调谐。Ummy 等^[8]研究了利用 VOA 和改变激光腔镜的反射率两种方法来改变激光腔损耗,实现了 9 个波长在 30 nm 范围内的整体调谐,调谐精度为 2.8 nm。非线性效应法是利用非线性效应对可调谐激光器的抽运种子光进行调谐,以获得可调谐多波长输出。孙兵等^[9]利用高非线性色散位移光纤内的四波混频效应,实现了多波长间隔在 1~11 nm 范围内的可调谐输出,调谐精度小于 2 nm;缪雪峰等^[10]利用受激布里渊散射效应,通过改变抽运光功率获得了超过 65 nm 范围的可调谐多波长输出,波长间隔为 0.08 nm;张诚等^[11]搭建的布里渊可调谐激光器,利用复合腔限制奇数阶斯托克斯信号,获得波长间隔双倍布里渊频移的多波长输出,实现了波长间隔为 0.176 nm 的 6 个波长在 1555~1565 nm 范围内的可调谐输出。

上述多波长调谐方法通常需要在激光器腔内放置波长调谐的控制元件,一方面影响多波长产生的数量和质量,使激光器结构复杂;另一方面,这些方法中多波长的调谐精度较低,可重复性和稳定性受限于机械、温度、损耗、非线性等因素。因此,本文提出一种利用射频控制信号对多波长光纤激光器的输出信号进行整体精密调谐的方法。该方法利用在多波长光源激光腔外放置由射频信号控制的单边带(SSB)调制器,对多波长光源输出的多波长信号进行腔外整体调谐。一方面,这种腔外电控调谐方法使多波长的调谐在腔外独立进行,不影响激光腔的

固有结构和多波长输出的质量,适用于各类多波长光源的调谐;另一方面,利用射频信号可以精密控制波长调谐的精度和范围,调谐的精度、稳定性和可重复性高。本文实验实现了对间隔为 50 GHz 的 65 个波长的整体调谐,调谐步长在 150 MHz~12 GHz 范围内任意可控,最低对应 1.2 pm 的调谐量,且由射频控制信号决定,可精确到 1 Hz。

2 实验原理

利用射频信号控制 SSB 调制器实现多波长的调谐,其中 SSB 调制器的结构如图 1 所示。SSB 调制器是一个由铌酸锂波导制备的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构的光调制器,主 MZI 的两臂上分别有一个子 MZI,两个子 MZI 的相位差分别为 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$,由直流偏置电压 V_1 和 V_2 控制。主 MZI 的一臂上还有一个相位调制器(PM)用来调节主 MZI 两臂的相位差 $\Delta\varphi_p$,由直流偏压 V_3 控制。外加的射频驱动射频(RF)信号分成两路分别加载在 MZI1 和 MZI2 上,其中一路的 RF 信号通过一个移相器(PS),另外一路产生相位延时 $\Delta\varphi_{RF}$ 。

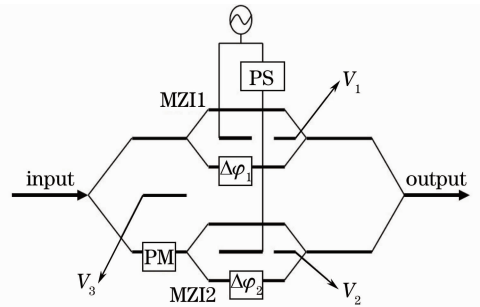


图 1 SSB 调制器结构图

Fig. 1 Structure of SSB modulator

如图 2(a)所示,当频率为 ω_c 的载波进入 SSB 调制器调制后,其输出频谱如图 2(b)所示,包含 $\pm 1, \pm 2$ 等各阶分量,分量之间的频率间隔是射频频率 ω_m 。调节 V_1 和 V_2 ,使 $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \pi$,其中的主频和偶数阶分量被抑制,如图 2(c)所示。进一步调节射频信号移相器和 V_3 ,使得 $\Delta\varphi_p = \Delta\varphi_{RF} = \frac{\pi}{2}$,+1 阶和 -3 阶边频被抑制,其输出为^[12]

$$E_{out}(t) = A_0 J_{-1}(Q) \sin(\omega_c - \omega_m)t + A_0 J_3(Q) \sin(\omega_c + 3\omega_m)t, \quad (1)$$

式中 $Q = \frac{V_A}{V_\pi} \pi$, 是 SSB 调制器的调制系数; $J_n(\cdot)$ 为 n 阶贝塞尔函数。由(1)式说明,经过 SSB 调制器调制,最终获得 -1 阶和 +3 阶边频,如图 2(d)所

示。由于 $J_{-1}(Q) > J_3(Q)$, +3 阶边频功率较低, 可以当作噪声处理, 经过以上过程, 频率为 ω_c 的载波经 SSB 调制器后被调谐为 $\omega_c - \omega_m$ 的光。如果改变两路射频信号的相位延迟, 将 $\Delta\varphi_{RF}$ 由 MZI2 加载到 MZI1 上时, 可以得到相反方向的调谐结果。

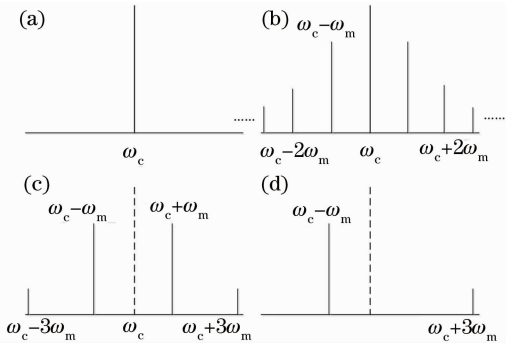


图 2 (a) 输入 SSB 调制器的载波; (b) 加载射频信号得到一系列边频; (c) $V_1 = V_2 = V_\pi$ 时的频谱输出; (d) $\Delta\varphi_p = \Delta\varphi_{RF} = \frac{\pi}{2}$ 时的频谱输出

Fig. 2 (a) Carrier wave to SSB modulator; (b) loading RF signal to obtain a series of side frequencies; (c) output spectrum when $V_1 = V_2 = V_\pi$; (d) output spectrum when $\Delta\varphi_p = \Delta\varphi_{RF} = \frac{\pi}{2}$

由以上分析可知, SSB 调制器对输入光的调谐量取决于所加载的射频驱动信号频率 ω_m , 与 ω_c 无关。因此, 将多波长信号同时输入 SSB 调制器时, 不同波长获得的调谐量相等, 均为 ω_m , 可以实现对多波长信号的整体调谐。

3 实验装置与结果

实验装置如图 3 所示, 包括多波长光纤光源^[13]和腔外电调谐装置两部分。多波长光纤光源产生

的多波长信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后送入 SSB 调制器(型号: COVEGA Mach-40-086)中进行电控调谐。SSB 调制器的工作带宽为 14 GHz。射频信号由 Agilent Technologies 公司的 E8257D 模拟信号发生仪提供, 可输出 250 kHz~20 GHz 范围的射频信号, 射频可调精度为 1 Hz。多波长调谐结果首先送入 Anritsu 公司的 MS9740A 光谱仪进行测量。

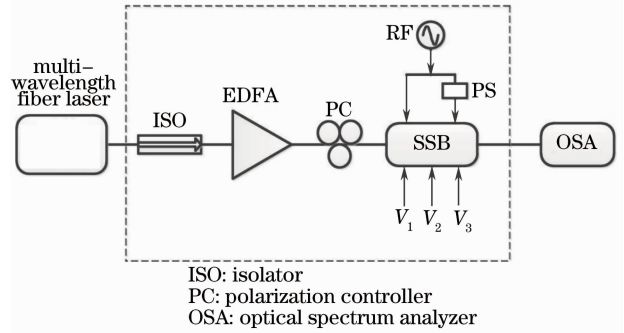


图 3 可调谐多波长光纤激光器示意图

Fig. 3 Tunable multi-wavelength fiber laser schematic

由多波长光纤光源输出的多波长如图 4(a) 所示, 多波长间隔为 50 GHz, ± 1.5 dB 功率平坦度范围内共有 65 个波长。

将图 4(a) 所示的多波长信号经过 EDFA 放大输入 SSB 调制器中, 首先在射频驱动信号 ω_m 为 10 GHz 的情况下观测多波长整体调谐结果, 如图 4(b) 所示。根据 SSB 调制器调谐的原理, 调谐后的各波长是原波长的 -1 阶边频, 因此调谐后各波长功率降低, 但功率的下降幅度与波长无关。图中多波长功率谱不平坦度的下降主要是由于 EDFA 增益谱不平坦度引起的, 对此可以在后面加入适当的放大机制补偿功率谱的损耗和不平坦度。

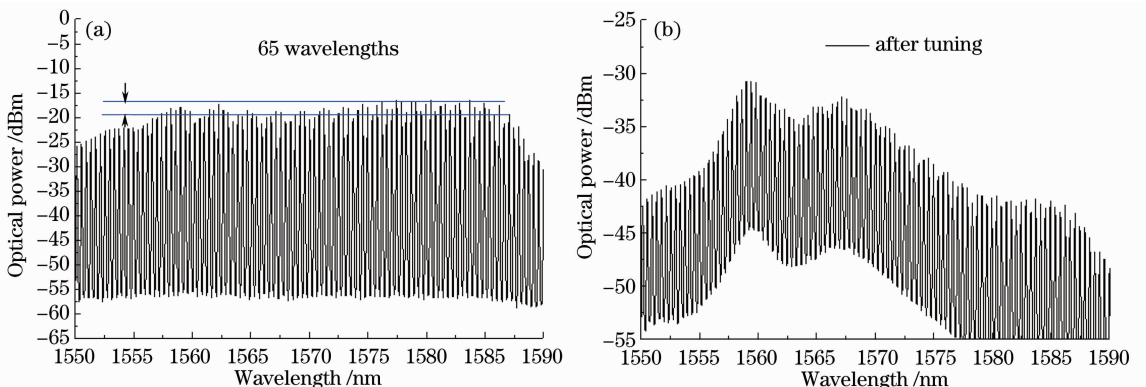


图 4 (a) 多波长光纤光源输出光谱图, (b) 调谐后的光谱图

Fig. 4 (a) Output spectrum of multi-wavelength fiber laser, (b) output spectrum after tuning

为了便于分析,在光谱仪上截取了多波长调谐后的一段带宽,如图 5(a)所示。从图中可以看出,当直流偏置电压 V_1 、 V_2 设置为 2.8 V 时,可以看到各波长均被调制出 -1 阶和 +1 阶边频。进一步调节直流偏置电压 V_3 为 1.8 V,并调节移相器,可以看到 +1 阶边频被抑制,只留下一 -1 阶边频作为波长调谐输出结果,如图 5(b)所示。可以测得调谐前后

两组多波长的频率间隔为 10 GHz,与驱动 SSB 调制的射频信号频率一致。调谐后的多波长间隔仍然保持 50 GHz 不变,即实现了多波长的整体调谐。由于实验所用射频源精度高,采用同轴电缆传输射频信号,电磁场封闭在内外导体之间,故辐射损耗小,几乎不受外界干扰影响,实验室条件下可以达到 1 Hz 精度。

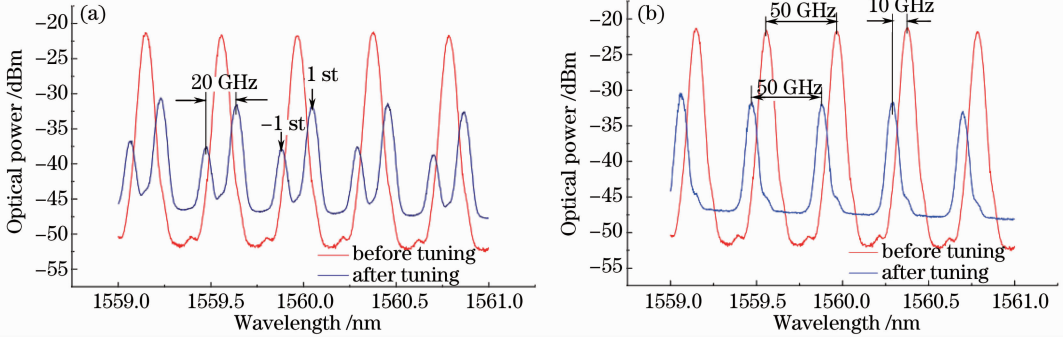


图 5 (a)射频驱动信号为 10 GHz 且 $V_1 = V_2 = 2.8$ V 时光谱图; (b) $V_3 = 1.8$ V 并且调节移相器为 $\frac{\pi}{2}$ 时得到 -1 阶调谐结果

Fig. 5 (a) Output spectra when RF drive signal of 10 GHz and $V_1 = V_2 = 2.8$ V; (b) -1 order tuning results when $V_3 = 1.8$ V and the phase shifter is adjusted

改变射频驱动信号的频率 ω_m ,可以得到多波长整体调谐的不同调谐量结果。分别选取了射频驱动信号频率 ω_m 为 4、6、8、12 GHz 时进行调谐,在光谱仪上选取局部光谱图观察分析,如图 6 所示。从图

中可以看到,经过 SSB 调制器的整体调谐,多波长信号的波长间隔仍然保持 50 GHz 不变,多波长整体分别移动了 0.032、0.048、0.064、0.096 nm,与射频驱动信号频率一一对应。可以判断,在 SSB 调制

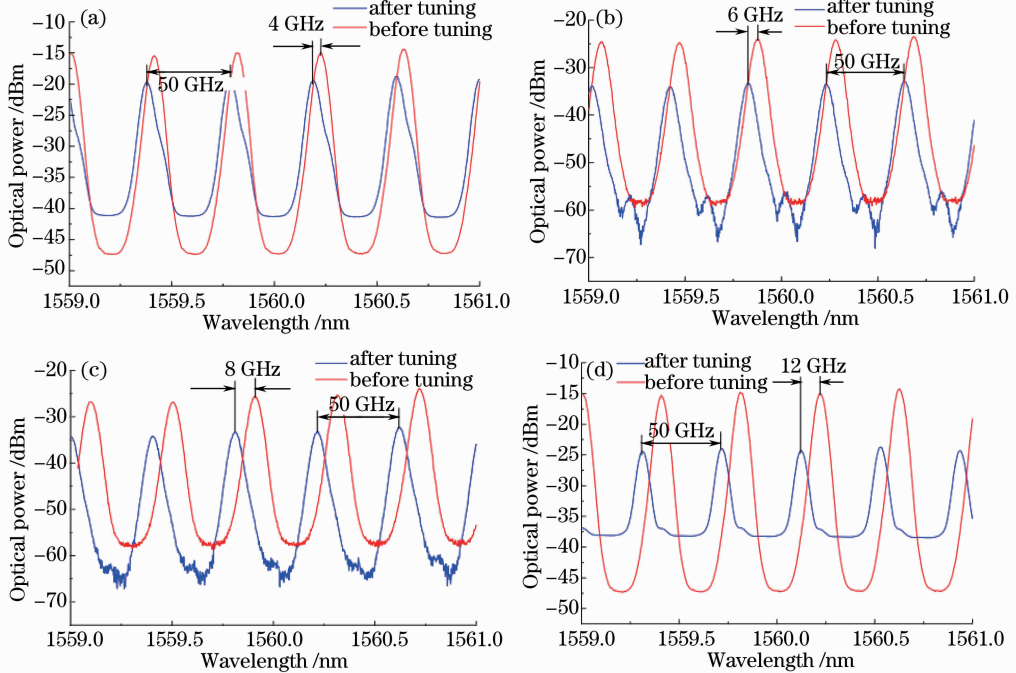


图 6 射频驱动信号为 (a) 4 GHz、(b) 6 GHz、(c) 8 GHz、(d) 12 GHz 时的多波长调谐结果

Fig. 6 Multi-wavelength tuning results when RF drive signals are (a) 4 GHz、(b) 6 GHz、(c) 8 GHz、(d) 12 GHz, respectively

器工作频率范围内,该多波长调谐装置均可实现对多波长的整体调谐,并且调谐步长精确等于SSB调制器所加载射频驱动信号频率。并且各波长的边模抑制比均可达到20 dB。

由于光谱仪最小分辨率只有0.03 nm,低于4 GHz的调谐结果无法用光谱仪观察,为此采用延时自外差法^[14]对低于4 GHz的多波长精密调谐结果进行测量,如图7所示。多波长光源出来的多波长信号被分路器分成两路,一路经过SSB调制器进行多波长调谐,另一路通过单模光纤(SMF)进行延时,两路光耦合后通入光电探测器(PD)进行拍频,用电谱仪(Agilent Technologies N9010A EXA

Signal Analyzer)对光电探测器产生的电信号频谱进行测量分析。电谱仪的测量精度可以达到赫兹量级,因此该方法可以测量赫兹量级的调谐步长。

经过SSB调制器的多波长信号会被整体调谐,在光电探测器处拍频时得到的频谱分量包含各波长信号自身不同纵模产生的一系列等间隔拍频信号谱,频率间隔为16 MHz,如图7中a所示;不同波长信号之间产生的拍频谱(50 GHz),如图7中b所示,其频率超出了电谱仪测量范围;调谐前后多波长信号产生的差频,其值等于驱动SSB调制器的射频信号频率 ω_m ,为单一谱线,如图7中c所示。

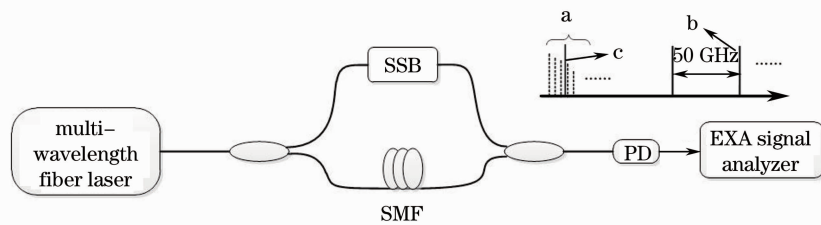


图7 延时自外差法测量多波长调谐精度示意图

Fig. 7 Multi-wavelength tuning resolution measured by means of delayed self-heterodyne interferometer schematic

通过电谱仪分别对4、6、8 GHz的调谐结果进行测量,结果如图8(a)、(b)、(c)所示,图中左侧梳状频谱为多波长光源自身纵模的拍频信号,右侧单

一谱线即为调谐前后多波长产生的差频信号。可以看出,多波长调谐步长精确等于SSB调制器所加载的射频信号驱动频率 ω_m ,与光谱仪测量结果一致。

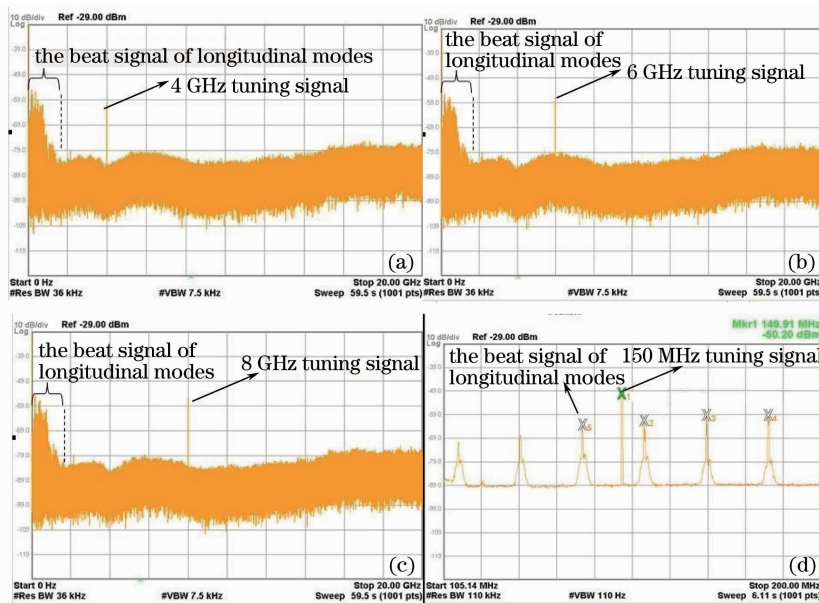


图8 调谐步长分别为(a) 4 GHz、(b) 6 GHz、(c) 8 GHz和(d) 150 MHz时的频谱图

Fig. 8 Spectra when tuning steps are (a) 4 GHz, (b) 6 GHz, (c) 8 GHz and (d) 150 MHz, respectively

由于使用的SSB调制器最低响应频率在100 MHz左右,通过减小调谐步长,获得了最低约150 MHz的调谐结果,如图8(d)所示,在149.91 MHz处测得了调谐前后多波长产生的差频

信号,与射频驱动信号基本一致。因而可以证明,提出的利用SSB调制器进行多波长调谐的方法能够达到150 MHz的调谐步长,对应1.2 pm的调谐精度,远远高于其他的波长调谐方法。

4 结 论

利用射频控制信号驱动 SSB 调制器能够对多波长光纤激光器输出的多波长信号进行整体精密的调谐,通过光谱仪和延时自外差两种方法观察了对 65 个多波长的整体调谐,证明可以通过改变射频信号驱动频率,实现多波长整体在 150 MHz~12 GHz 范围内的任意可控精确调谐,且调谐步长由射频控制信号决定可精确到 1 Hz,调谐过程中和调谐后多波长间隔始终保持 50 GHz 不变,各波长的边模抑制比均可达到 20 dB。故基于 SSB 调制器的多波长调谐技术可以凭借它精度高、调谐灵活稳定、可重复性高等优势,广泛应用于波分复用通信系统和光纤传感网络中去。

参 考 文 献

- 1 Li Zhengying, Zhou Zude, Tong Xinglin, *et al.*. Research of high-speed large-capacity fiber Bragg grating demodulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306007.
李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306007.
- 2 Liu Yange, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(7): 883-894.
刘艳格, 冯新焕, 董孝义. 室温稳定多波长光纤激光器技术的研究新进展[J]. *中国激光*, 2007, 34(7): 883-894.
- 3 J Yang. Tunable multi-wavelength combined linear-cavity fiber laser source with equally changed wavelength spacing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(8): 599-604.
- 4 Pei Yang, Shilin Xiao, Hanlin Feng, *et al.*. Wavelength-tunable light sources based on a self-seeding RSOA[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(4): 040602.
- 5 D S Moon, B H Kim, A Lin, *et al.*. Tunable multi-wavelength SOA fiber laser based on a Sagnac loop mirror using an elliptical core side-hole fiber [J]. *Opt Express*, 2007, 15 (13): 8371-8376.
- 6 Yang Xiufeng, Fang Xiuli, Tong Zhengrong, *et al.*. Experimental study of multi-wavelength fiber laser based on phase-shifted fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0602012.
杨秀峰, 方秀丽, 童峥嵘, 等. 基于相移光栅的多波长掺铒光纤激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602012.
- 7 B Dong, D P Zhou, L Wei. Tunable multi-wavelength Brillouin-erbium fiber laser by controlling self-lasing cavity modes/oscillation[J]. *Optical Fiber Technology*, 2010, 16(1): 17-19.
- 8 M A Umyy, N Madamopoulos, R Dorsinville. Tunable multi-wavelength SOA based linear cavity fiber laser source for optical communications applications[J]. 2011 International Conference on Communications and Information Technology (ICCIIT), 2011, 87-91.
- 9 Sun Bing, Chen Daru, Gao Shiming. Multi-wavelength fiber optical parametric oscillator with a tunable wavelength spacing [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0202006.
孙 兵, 陈达如, 高士明. 波长间隔可调谐多波长光纤光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0202006.
- 10 Miu Xuefeng, Wang Tianshu, Zhou Xuefang, *et al.*. A tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0602010.
缪雪峰, 王天枢, 周雪芳, 等. 一种可调谐的多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602010.
- 11 Zhang Cheng, Miao Changyun, Zhao Junfa, *et al.*. Tunable multiwavelength Brillouin/Erbium fiber laser with double-Brillouin-shift spacing [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39 (11): 1102005.
张 诚, 苗长云, 赵军发, 等. 间隔双倍频移的可调谐多波长布里渊/铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1102005.
- 12 Zhaoying Wang, Xuwei Qin, Cuiqin Gao, *et al.*. Precise simultaneous multiwavelength tuning by electrical RF signals[J]. *Photonic Technol Lett*, 2013, 25(10): 914-916.
- 13 Z Wang, M Hu, D Jia, *et al.*. Power-equalized C+L band multi-wavelength fiber laser based on cascaded semiconductor optical amplifier[C]. *SPIE*, 2010. 7847: 784725.
- 14 T Okoshi, K Kikuchi, A Nakayama. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. *Electron Lett*, 1980, 16(16): 630-631.

栏目编辑:王晓琰