

基于叠印啁啾光纤布拉格光栅的宽谱微波光子信道化接收方法

孙帼丹¹ 王荣² 蒲涛¹ 郑吉林¹ 熊锦添¹ 方涛¹ 甄飞¹

(¹解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

(²解放军理工大学第 63 研究所, 江苏 南京 210007)

摘要 提出了利用叠印啁啾光纤布拉格光栅(S-CFBG)实现宽谱微波信号光子信道化接收的方法。利用一个 S-CFBG 产生光频梳(OFC),接收的微波信号被强度调制器调制到 OFC 的各个载波上。第二个 S-CFBG 对不同的边带进行滤波,利用波分复用(WDM)解复用器进行信道分离,实现对宽谱微波信号频率的实时测量。该方法还可以同时检测不同射频(RF)载波上所携带的数据信息,无需传统的电本振源阵列,简化了系统结构。建立了测量范围为 0~20 GHz,测量精度为 0.5 GHz 的宽谱微波信号信道化接收仿真系统。实现了不同 RF 频率上携带信息的实时同步检测,并对接收误码性能进行了分析。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;叠印;信道化接收

中图分类号 TN929. 11 **文献标识码** A **doi**: 10. 3788/CJL201239. 1205002

Broadband Microwave Photonic Channelized Receiver Based on Superimposed Chirped Fiber Bragg Grating

Sun Guodan¹ Wang Rong² Pu Tao¹ Zheng Jilin¹ Xiong Jintian¹ Fang Tao¹ Zhen Fei¹

¹Institute of Communication Engineering, PLA University of Science & Technology,
Nanjing, Jiangsu 210007, China

²63rd Research Institute, PLA University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China

Abstract A photonic approach to implement a microwave channelized receiver based on superimposed chirped fiber Bragg grating (S-CFBG) is proposed. An optical frequency comb (OFC) is generated using the first S-CFBG. Broadband microwave signal is multicast by the OFC, spectrally sliced by the second S-CFBG and channelized by optical wavelength division multiplexer (WDM) de-mux. Broadband microwave signal with frequency measurement range from 0 to 20 GHz and accuracy of 0.5 GHz is achieved by simulation. 156.25 Mbit/s non-return-to-zero (NRZ) signals, which are located at different radio frequency (RF) carrier waves, can be detected simultaneously and instantaneously without local RF source array. The bite error rate (BER) performance of receiver is researched.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; superimposed; channelized receiver

OCIS codes 060.3735; 060.2380; 060.2300; 350.4010

1 引言

在电子战场上,面临着日益严峻的电磁环境,如频段宽、待处理的信号种类多。理想的电子战接收

机除了具有大瞬时带宽、大动态范围、多信号并行处理能力外,还必须能对接收到的大量信息进行实时或准实时处理。但是传统的电子微波频率测量速度

收稿日期: 2012-06-26; 收到修改稿日期: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61032005)和国家 973 计划(2012CB315603)与江苏省自然科学基金(BK2012058)资助课题。

作者简介: 孙帼丹(1984—),女,博士研究生,主要从事光纤光栅与光任意波发生方面的研究。

E-mail: chinacard4@163.com

导师简介: 王荣(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光电子学和光网络等方面的研究。

E-mail: wr_njice@163.com

慢、体积庞大、带宽小。微波信号的光学处理能够克服电信号处理电路中信号取样和控制速度的局限,提供更高的频率测量范围,实现实时宽带信号的接收处理^[1]。

文献[2,3]提出的信道化接收机采用并行模式,利用一系列的啁啾相移光栅分别对信号源进行分离,虽然能够实时检测,但是其系统结构复杂,实际应用性不高。文献[4~8]提出的方法避免了复杂的光栅阵列结构。利用光频梳(OFC)、电光调制器、光梳状滤波器与波分复用(WDM)解复用器实现信道化接收。这些方法的难点在于 OFC 和梳状滤波器的实现。OFC 的产生有多种方法,利用激光器阵列虽然线宽窄^[4],但是随着待测信道数的增加,光源也随之增加,复杂度与代价高。对单光源进行非线性调制产生 OFC 需要多个调制器级联^[5,6],且自由光谱区(FSR)受限于调制器带宽与微波源频率,产生的 OFC 个数有限。宽谱滤波产生的 OFC 具有较宽的线宽^[7],其幅度与相位噪声较大,只能用作微波频率估测。梳状滤波可以利用法布里-珀罗(F-P)滤波器实现,F-P 滤波器可以分成光纤型、液晶型、微型电动机机械型和固体型^[8]。其中美国 MicroOptics 公司生产的 FFP-TF2 滤波器最具有代表性,它具有性能稳定、精细度高的优点,但是该光纤滤波器价格高,且较为脆弱。光纤布拉格光栅(FBG)具有全光纤结构、低插入损耗、潜在的低成本等诸多优点,其

在光纤通信中有广阔的应用前景。基于 FBG 的 F-P 腔具有优良的滤波特性,可用作光纤激光器^[9~12]和高精细度的选频器^[13~15]。

本文提出了利用叠印啁啾光纤布拉格光栅(S-CFBG)实现宽谱微波信号光子信道化接收的方法。叠印啁啾光栅分别用于 OFC 产生与边带滤波。仿真实现了测量范围为 0~20 GHz,测量精度为 0.5 GHz 的宽谱微波光子信道化接收系统。实现了不同射频(RF)载波携带数据信息的实时检测,对不同接收功率情况下的误码性能进行分析。

2 原理与系统结构

微波光子信道化接收机结构如图 1 所示。图中 PC 为偏振控制器,PD 为光电检测器。S-CFBG 具有极窄透射峰,可以对光纤激光器中的纵模进行选频。设计振荡腔长、反射滤波器带宽与非抽运掺铒光纤长度,可以实现 OFC 的产生,且其输出波长与 S-CFBG I 透射峰相同,线宽可小于 10 MHz^[11]。接收的微波信号被马赫-曾德尔调制器(MZM)调制到每个 OFC 的边带上。MZM 偏置在最小传输点(MITP)来抑制光载波,在小信号情况下,接收的信号经过调制后只有±1 阶边带产生。图 1(a)有多个频谱,实线、虚线、点划线分别表示 3 个待探测信号的频率。图 1(b)为载波抑制调制后光谱,表示电信号到被调制到每个 OFC 的±1 阶边带上。

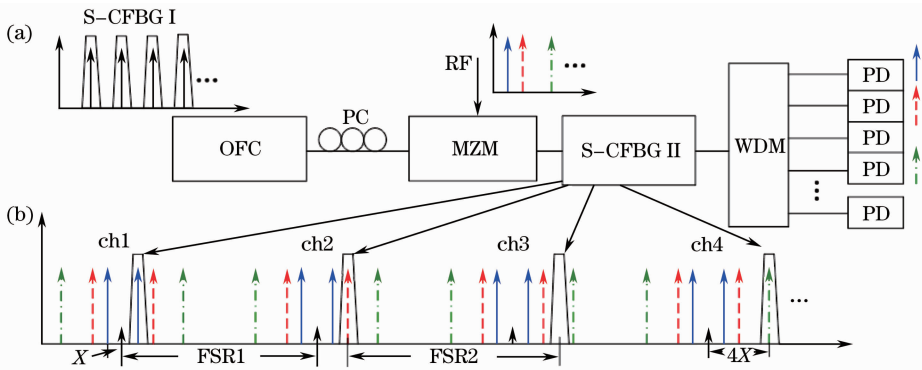


图 1 微波光子信道化接收机结构示意图

Fig. 1 Schematic of the proposed photonic microwave channelizer

一个具有梳状传输特性的 S-CFBG II 用来滤出特定的边带信号。OFC(S-CFBG I)的 FSR1 和滤波器(S-CFBG II)的 FSR2 有一定的频差,这样二者会有递增的频率间隔,可以滤出不同频率差的边带。最后利用一个 WDM 分离滤波后产生多信道,并利用 PD 阵列进行探测。如图 1 所示,信道 1 中载波与滤波器的频差为 X,信道 2 中为 2X…。当信

道 N 中有与载波频差 NX 的边带信号(频率由 NX 的射频信号电光调制产生),其会被 S-CFBG II 滤出,将滤波后的信号通过 WDM 分离后分别进入 PD,设置一个功率检测门限,即可实现宽谱信号频率的实时探测。

测量的精确度为

$$\Delta = \pm \frac{|f_{FSR1} - f_{FSR2}|}{2}, \quad (1)$$

式中 f_{FSR1} 表示 S-CFBG I 的 FSR1, f_{FSR2} 表示 S-CFBG II 的 FSR2。

测量的范围为

$$f_{\text{R}} = f_{\text{FSR1}}/2. \quad (2)$$

图 2(a) 为计算得到的 S-CFBG I 与 S-CFBG II 透射谱, 其精细度约为 500。光栅长度 L 为 8 cm, 采用四阶高斯切趾, 啁啾量 C 为 1.2 nm/cm, 折射率调制强度为 6×10^{-4} , 两次叠印的距离差为

1.02 mm(S-CFBG I) 与 1.03 mm(S-CFBG II), 其对应的 FSR 如图 2(b) 所示, 虽然 FSR 发生些许变化, 但是相邻反射峰的间隔保持在 1 GHz。根据 (1) 与 (2) 式可知, 其可以用于频率范围为 0~50 GHz, 分辨率为 0.5 GHz 的信号检测。图 2(c), (d) 为图 2(a) 中信道 1 与信道 18 的放大图。可见二者透射峰的频率差分别为 1 GHz 与 18 GHz。

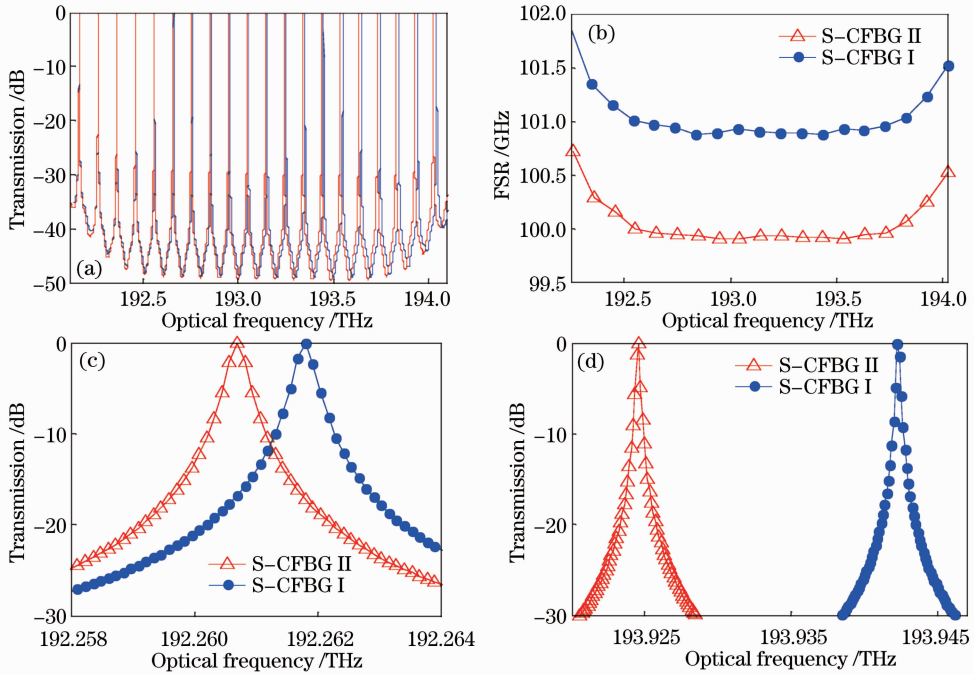


图 2 S-CFBG I 与 S-CFBG II 的 (a) 透射谱和 (b) 对应的 FSR; (c)、(d) 分别为图 2(a) 中信道 1 和信道 18 的放大图

Fig. 2 (a) Transmission spectra and (b) FSR of S-CFBG I and S-CFBG II; (c) detail of channel 1 and (d) detail of channel 18 in Fig. 2(a)

3 实验结果与讨论

3.1 宽谱频率测量

为了评价该系统的性能, 利用光纤通信系统商业仿真软件搭建了光子信道化接收系统。图 3(a) 为光

纤激光器输出的光谱, OFC 的波长与 S-CFBG I 的透射峰波长相同, 光纤激光器输出的光谱有 19 个频梳, 其线宽为 10 MHz, 功率波动小于 3 dB。图 3(b) 为微波信号调制后信道 2 与信道 3 的光谱,

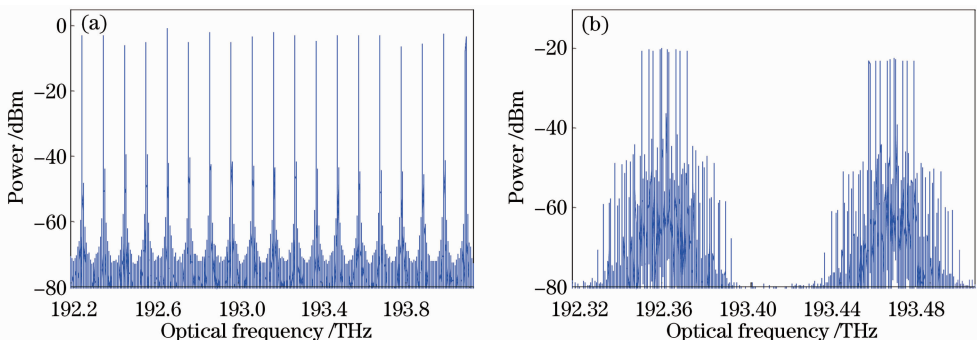


图 3 输出光谱图。(a) 多波长光纤激光器; (b) 调制后信道 2 与信道 3

Fig. 3 Output spectra. (a) Multiwavelength fiber laser; (b) channel 2 and channel 3 after modulation

其中 RF 信号频率分别为 1,2,5,7,10 GHz。MZM 偏置在载波抑制模式,工作的小信号模式下,±1 阶边带的功率较其他边带的功率大 20 dB 左右。

图 4 为 S-CFBG II 透射谱与其滤波后输出的光谱示意图。其中 RF 信号频率分别为 1,2,5,7,10 GHz。信道 2 中,2 GHz 对应的边带与 S-CFBG II 透射谱重叠,其功率大于其他边带。信道 3 中,射频信号对应的边带(3 GHz 无信号)与 S-CFBG II

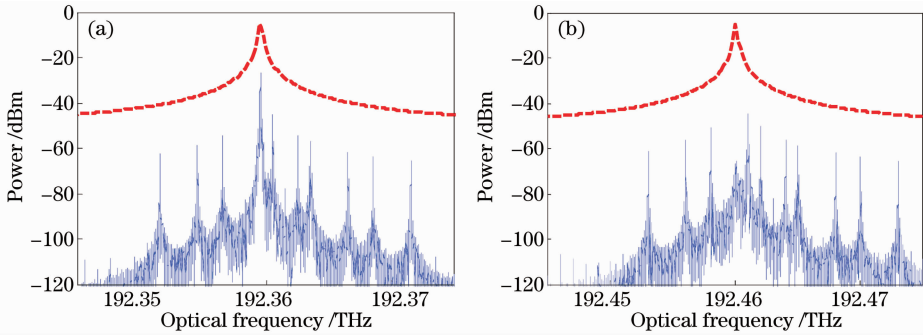


图 4 S-CFBG II 透射谱与其滤波后输出谱示意图。(a)信道 2;(b)信道 3

Fig. 4 Spectra of S-CFBG II and after S-CFBG II filtering. (a) Channel 2; (b) channel 3

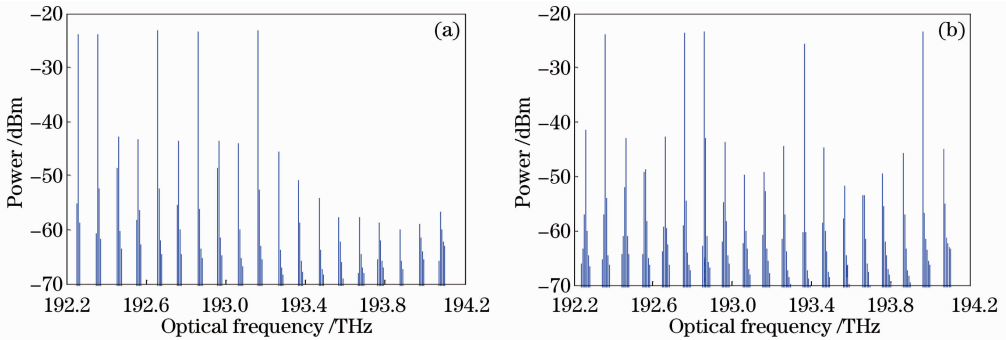


图 5 S-CFBG II 滤波后输出光谱。(a) 1,2,5,7,10 GHz;(b) 2,6,7,12,18 GHz

Fig. 5 Spectra after S-CFBG II filtering. (a) 1,2,5,7,10 GHz; (b) 2,6,7,12,18 GHz

3.2 宽谱信息接收

实际应用中,基带的数据信息可以上变频到不同的 RF 频率上进行传输。在这种情况下,不同的 RF 频率作为载波携带信息。本文提出的信道化接收系统,还可以直接对不同 RF 频率上携带的信息同时进行截取,无需传统的电本振源阵列,其原理如图 6 所示。假设 S-CFBG I 与 S-CFBG II 的 FSR 差为 X ,频率为 NX 的射频信号作为载波携带数据信息,被调制到光载波的边带上。经过 S-CFBG II 滤波,在信道 N 中,光射频载波与数据信息通过 PD 拍频,可以直接得到基带的数据信息。接收的电信号通过一个低通滤波器可以减小其他频率信号的串扰,改善接收数据信息的误码性能。

图 7 为 RF 信号频率为 1,2,5,7,10 GHz 时,调制与滤波后信道 2 的频谱放大图,其中 2 GHz 频率

透射谱不重叠,所有边带均被抑制。

图 5 为调制频率为 1,2,5,7,10 GHz 与 2,6,7,12,18 GHz 时 S-CFBG II 滤波后输出的光谱。可见,当 RF 信号对应的边带与 S-CFBG II 透射谱重叠时,其功率大于其他信道 15 dB。将滤波后信号通过信道间隔为 100 GHz 的 WDM 分离后分别进入 PD,设置一个功率检测门限,即可实现宽谱信号频率的实时探测。

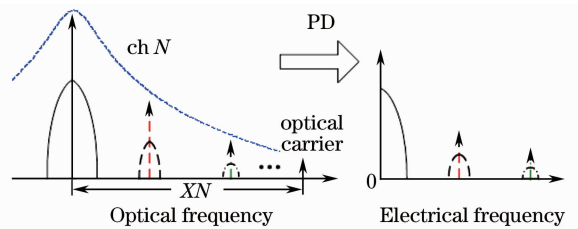


图 6 信道化接收机对数据信息的截取示意图

Fig. 6 Schematic of the proposed photonic microwave channelizer for data detection

上加载了速率为 156.25 Mbit/s 的非归零码(NRZ)数据信息。信道 2 中 2 GHz 对应的频率具有一定的谱宽,这主要是加载信息所致。

图 8 为经过 WDM 分离、PD 探测、带宽为 0.4 GHz 的低通滤波器滤波后接收光功率为 -22, -20, -18 dBm 时,信道 2 的眼图。信号的劣化一

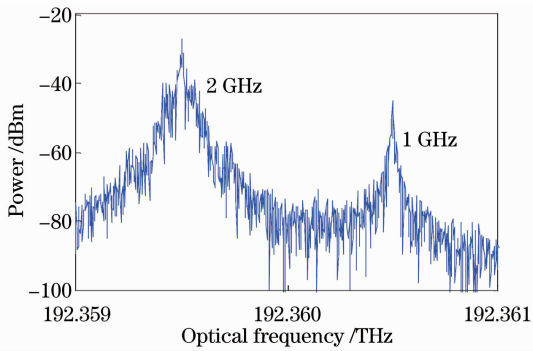


图7 RF频率1,2,5,7,10 GHz,2 GHz频率上加载速率为156.25 Mbit/s的NRZ数据信息,滤波后信道2的频谱放大图

Fig. 7 Detail spectrum of channel 2 after S-CFBG II filtering with RF frequency 1, 2, 5, 7, 10 GHz and 156.25 Mbit/s NRZ signal located at 2 GHz

方面是由于光窄带滤波器对数据信息的滤波作用,另一方面是由于光窄带滤波不能完全抑制其他边带产生。该接收系统理想的S-CFBG II应具有窄而平坦的高抑制比透射峰,其形状近似为矩形。

下面讨论不同频率的RF同时加载信息的情况下其误码率(BER)的差别。图9为1,10,19 GHz的频率同时加载速率为156.25 Mbit/s、数据信息不同的NRZ信号,信道化接收后在不同接收光功率时的误码率。不同频率加载数据信息接收时误码率相差很小,偏差主要是由于OFC的功率波动、OFC与滤波器的小频偏所致。

相同情况下,接收的误码率与S-CFBG的反射峰带宽和数据速率相关,与具体数据信息无关。加载信号的速率增加,其谱宽增加,经过S-CFBG窄带滤波就会失去更多谱信息,其误码率会有所增加。

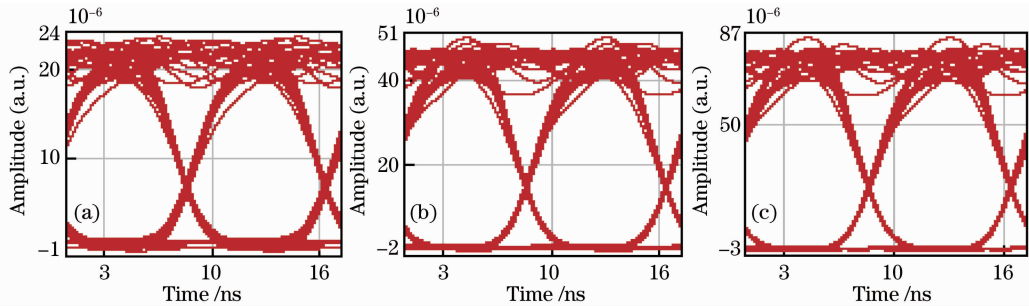


图8 不同接收光功率时信道2的眼图。(a) -22 dBm;(b) -20 dBm;(c) -18 dBm

Fig. 8 Eye diagrams of channel 2 with different received powers. (a) -22 dBm; (b) -20 dBm; (c) -18 dBm

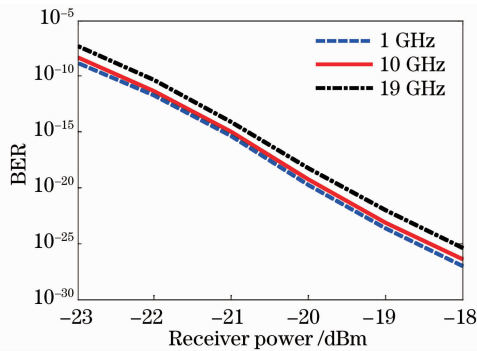


图9 1,10,19 GHz的频率同时加载速率为156.25 Mbit/s的NRZ数据信息,信道化接收后在不同接收光功率时的误码率

Fig. 9 BER results of different receive powers when 156.25 Mbit/s NRZ signals located at 1 GHz, 10 GHz and 19 GHz RF frequencies, simultaneously

现宽谱频率测量,还可以实现宽谱多信道信息接收,实现了实时的电信号处理。建立了测量范围为0~20 GHz,测量精度为0.5 GHz的宽谱微波信号信道化接收系统,实现了多频点的实时测量,实现了不同RF频率上加载的156.25 Mbit/s NRZ数据信息的截取,对不同接收功率情况下的误码性能进行了分析。不同频率加载数据信息接收时误码率相差很小。利用该方法来实现电谱分析与信道化接收可以实现宽谱实时检测,简化接收机结构,具有很好的应用前景。

参考文献

- 1 J. Capmany, D. Novak. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photon.*, 2007, 1(6): 319~330
- 2 D. B. Hunter, L. G. Edvell, M. A. Englund. Wideband microwave photonic channelised receiver [C]. International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2005. 249~252
- 3 M. S. Rogge, V. J. URick, F. Bucholtz. Analysis of an optical channelization technique for microwave applications [R]. Washington DC: Naval Research Laboratory, 2007. 1~14
- 4 F. A. Volkening. Photonic Channelized RF Receiver Employing Dense Wavelength Division Multiplexing[P]. US Patent 724 583 3B1, 2007

4 结 论

提出了利用S-CFBG实现微波光子信道化接收技术。利用FSR差为1 GHz的两个S-CFBGs分别实现了OFC产生与边带滤波。该方法不仅可以实

- 5 Ze Li, Xianmin Zhang, Hao Chi *et al.*. A reconfigurable microwave photonic channelized receiver based on dense wavelength division multiplexing using an optical comb[J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(9): 2311~2315
- 6 Xiaojun Xie, Yitang Dai, Yu Ji *et al.*. Broadband photonic radio-frequency channelization based on a 39-GHz optical frequency comb[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2012, **24**(8): 661~663
- 7 X. Zou, W. Pan, B. Luo *et al.*. Photonic approach for multiple-frequency-component measurement using spectrally sliced incoherent source[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(3): 438~440
- 8 Su Liqin, Shen Yonghang. Investigation on a novel Fabry-Perot filter for high power tunable fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2351~2354
苏立钦, 沈永行. 适用于高功率可调谐光纤激光器的法布里-珀罗滤波器研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2351~2354
- 9 Yang Xiufeng, Peng Lei, Tong Zhengrong *et al.*. Design of tunable bandpass photonic microwave filter based on multi-wavelength fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0206005
杨秀峰, 彭磊, 童峥嵘等. 基于多波长激光器的带通微波光子滤波器设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0206005
- 10 Y. G. Han, J. H. Lee, S. B. Lee *et al.*. Novel multiwavelength erbium-doped fiber and Raman fiber ring lasers with continuous wavelength spacing tunability at room temperature [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(8): 2219~2225
- 11 X. He, D. N. Wang, C. R. Liao. Tunable and switchable dual-wavelength single longitudinal mode erbium-doped fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(6): 842~849
- 12 Y. Kim, S. Doucet, S. LaRochelle. 50-channel 100-GHz-spaced multiwavelength fiber lasers with single-frequency and single-polarization operation [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(20): 1718~1720
- 13 Tang Caijie, Jiang Yi. High-finesse micro-lens optical fiber Fabry-Perot interferometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1062~1065
唐才杰, 江毅. 高精度微透镜光纤法布里-珀罗干涉仪[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1062~1065
- 14 Niu Siliang, Rao Wei, Jiang Nuan *et al.*. Investigation on phase spectra of fiber Bragg gratings and the constructed Fabry-Pérot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806007
牛嗣亮, 饶伟, 姜暖等. 光纤布拉格光栅及其构成的法布里-珀罗腔的相位谱特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806007
- 15 Liufeng Li, Yan Li, Lisheng Chen. Loss measurement of high-finesse Fabry-Perot cavities [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3075~3079

栏目编辑: 王晓球