

啁啾光栅对基于 F-P 腔全光时钟恢复性能的优化

殷宇 余震虹

江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要 解释了利用法布里-珀罗(F-P)腔实现全光时钟恢复的原理。根据啁啾光栅(CFBG)的反射特性,从理论上分析了先利用 CFBG 对信号进行滤波再利用 F-P 腔进行时钟恢复在波长选择方面的优点,即将不需要恢复时钟的波长处的信号事先通过 CFBG 过滤掉。由于 CFBG 反射谱的顶端不平坦使得进入 F-P 腔的信号也不平坦,进而导致时钟恢复的效果不理想,故需利用切趾技术消除 CFBG 的反射谱顶端的不平坦,以获得更好的恢复效果。

关键词 光通信; 时钟恢复; 法布里-珀罗腔; 啁啾光纤光栅; 滤波; 切趾

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.110602

Performance Optimization of All-Optical Clock Recovery Based on F-P Cavity by Using Chirped Grating Filter

Yin Yu Yu Zhenhong

College of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract The principle of using the Fabry-Perot (F-P) cavity to achieve the all-optical clock recovery is explained. Based on the reflection characteristics of the chirped fiber Bragg grating (CFBG), the wavelength selection advantage of using the chirped fiber Bragg grating to filter the signals, before using the F-P cavity to achieve the all-optical clock recovery, is analyzed theoretically. which is that the signals at the wavelength that don't require the clock recovery are filtered out by the CFBG in advance. Due to the side lobes of the CFBG reflection spectrum, the effect of the filter is not quite good, and the quality of the all-optical clock recovery is bad. So the CFBG should be apodized to get a good quality of the all-optical clock recovery.

Key words optical communications; clock recovery; Fabry-Perot cavity; chirped fiber Bragg grating; filter; apodization

OCIS codes 060.4510; 050.2230; 060.3735; 220.1230

1 引言

光时钟恢复技术是光时分复用(OTDM)通信系统中全光再放大、再整形、再定时(3R 再生)以及全光交换的核心技术^[1-2]。全光时钟恢复技术负责从恶化信号中提取出低抖动、高信噪比的时钟脉冲。光时钟恢复分为光电混合时钟恢复和全光时钟恢复。光电时钟恢复可以利用光电振荡器和光电锁相环路等方式实现;全光时钟恢复可以利用半导体锁模激光器、自脉动半导体激光器、光纤锁模激光器、法布里-珀罗(F-P)腔来实现。在众多全光时钟恢复的方案中利用 F-P 腔的时钟恢复系统因其结构简单、成本低廉而受到广泛关注^[3-5]。

啁啾光栅(CFBG)具有反射特性,只有波长在其反射带宽范围内的光信号可以通过,这使得利用 CFBG

收稿日期: 2016-06-30; **收到修改稿日期:** 2016-07-19; **网络出版日期:** 2016-09-29

基金项目: 江苏省气体传感器工程技术研究中心项目(BM2010645)

作者简介: 殷宇(1992—),男,硕士研究生,主要从事光通信和光信号处理方面的研究。

E-mail: yinyu19921129@163.com

导师简介: 余震虹(1962—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光纤通信和通信信号处理方面的研究。

E-mail: yuzhenhong1962@163.com

滤波再经过 F-P 腔比只利用 F-P 腔进行的时钟恢复具有更好的波长选择特性^[6-8]。由于 CFBG 反射谱顶端抖动的存在会影响滤波的效果,所以可以利用切趾技术消除 CFBG 的反射谱顶端的不平坦来获得更好的恢复效果。

本文利用 F-P 腔提取出了 40 GHz 的时钟信号,并在此基础上添加 CFBG 对提取出的时钟信号进行优化。

2 原理与仿真分析

2.1 基于 F-P 腔的时钟恢复原理

F-P 腔的结构如图 1(a)所示。F-P 腔有两个平行的反射面,当光注入 F-P 腔之后,注入的光脉冲会在两个反射面之间来回反射,由于每当腔内的光到达反射面时,仅有一小部分的光被释放到 F-P 腔的外面,大部分光可以存储在 F-P 腔内,因此,当一个光脉冲输入 F-P 腔之后,输出一串光脉冲,脉冲间的时间间隔等于光脉冲在 F-P 腔中往返一周的时间。由此可以看出,F-P 腔是一个线性系统,频域上看其透射峰是等间距的,这个间距称为 F-P 腔的自由光谱区(FSR),在频域其可以表示为

$$f_{\text{FSR}} = \frac{c}{2nx}, \quad (1)$$

式中 c 为真空中的光速, n 为 F-P 腔内介质折射率, x 为腔长。并且有 $T=1/f_{\text{FSR}}$, T 为光脉冲在 F-P 腔中往返一周的时间。如果输入的伪随机码的周期恰好为 T ,那么 F-P 腔中存储的光会在信号的 0 码处填补一个脉冲,从而将 0-1 随机信号转化为脉冲序列,由此可以恢复出时钟信号。

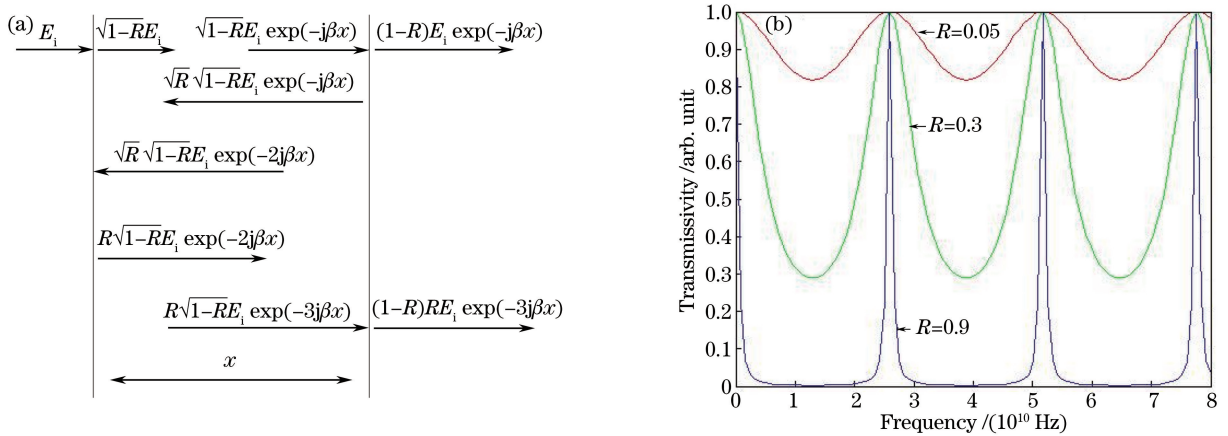


图 1 (a) F-P 腔结构以及光信号在 F-P 腔中的传输;(b)不同 R 的情况下 F-P 腔的透射率随 f 变化的曲线

Fig. 1 (a) F-P cavity structure and transmission of the light signals in the F-P cavity;
(b) transmissivity of the F-P cavity versus f under different R

图 1(a)中,表示了光信号在 F-P 腔中的传输示意图, R 为反射面的反射率, E_i 为输入的场强, f 为光信号的频率。综合所有的输出场强,可以得到传输函数为

$$H(f) = \frac{E_o(f)}{E_i(f)} = (1-R) \exp(-j\beta x) \left[\sum_{m=0}^{\infty} R^m \exp(-2jm\beta x) \right], \quad (2)$$

式中方括号内的项是 $R \exp(-j\beta x)$ 的几何级数, E_o 为输出的场强。(2)式可以简化为

$$H(f) = \frac{(1-R) \exp(-j\beta x)}{1 - R \exp(-2j\beta x)}, \quad (3)$$

式中传输常数 $\beta = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$, 且有 F-P 腔的传输函数 $T(f) = |H(f)|^2$, 所以有

$$T(f) = \frac{1}{1 + f \sin^2 \left(\frac{2\pi f n x}{c} \right)}, \quad (4)$$

可以得到 F-P 腔的半峰全宽(FWHM)为

$$f_{\text{FWHM}} = \frac{1-R}{T\pi\sqrt{R}} \quad (5)$$

定义 F-P 腔的精细度为

$$F = \frac{f_{\text{FSR}}}{f_{\text{FWHM}}} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (6)$$

由(6)式可以看出, F-P 腔的精细度只与组成 F-P 腔的反射镜的反射率有关。图 1(b)所示是不同 R 的情况下 F-P 腔的透射率随 f 变化的曲线,可以看出,不同的反射率 R 对应不同的透射窗口的宽度,反射率越大,透射窗口的宽度就越窄,对频率的选择性就越好^[7]。

2.2 光纤布拉格光栅的理论仿真

图 2(a)为光纤布拉格光栅用作滤波器的原理。为了提取所需的波长,通过一个环形器来连接光栅,例如当有 4 个波长进入环形器的端口 1 并从端口 2 进入光栅, $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_4$ 通过光栅,而 λ_2 满足光栅布拉格条件被反射过来,再进入环形器的端口 2,从端口 3 发送出去,从而使得光栅具有波长选择特性^[8-9]。

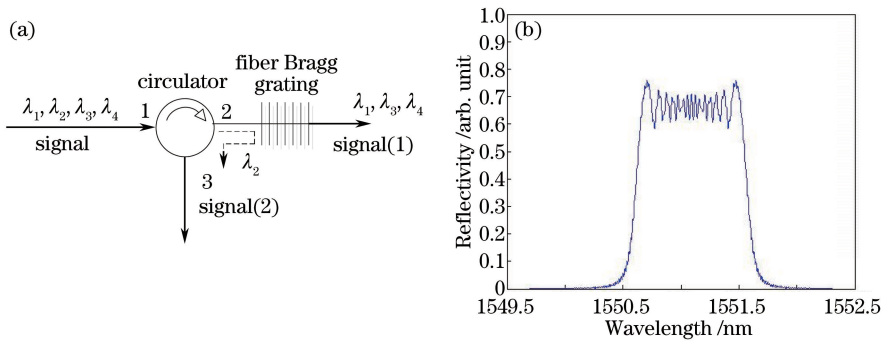


图 2 (a) 光纤布拉格光栅用作滤波器的原理; (b) CFBG 的反射谱

Fig. 2 (a) Principle of the fiber Bragg grating as a filter; (b) reflection spectrum of the CFBG

光栅的长度为 L , 利用传输矩阵法分析光栅的反射特性,即将光栅分为 N 段,光栅的矩阵是每一小段的连乘。其中,矩阵中各元素值为

$$\begin{cases} F_{11} = \cosh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L) - j \left(\frac{\sigma}{\sqrt{k^2 - \sigma^2}} \right) \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L) \\ F_{12} = -j \left(\frac{k}{\sqrt{k^2 - \sigma^2}} \right) \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L) \\ F_{21} = j \left(\frac{k}{\sqrt{k^2 - \sigma^2}} \right) \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L) \\ F_{22} = \cosh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L) + j \left(\frac{\sigma}{\sqrt{k^2 - \sigma^2}} \right) \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L) \end{cases} \quad (7)$$

式中 k 为交流耦合系数, $k = (\pi\nu\Delta n)/\lambda_B$, 其中 ν 为光栅的条纹可见度, $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 为光栅布拉格波长, Λ 为光栅的周期, 有效折射率 $n_{\text{eff}} = n_0 + \Delta n$, 其中 n_0 为纤芯曝光前的有效折射率, Δn 为光栅的折射率调制深度 σ 为直流耦合系数, $\sigma = 2\pi n_{\text{eff}}[(1/\lambda) - (1/\lambda_B)]$ 。由 $r = F_{21}/F_{11}$, $t = 1/F_{11}$ 可以得到反射系数和透射系数为^[10-11]

$$\begin{cases} r = \frac{-k \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L)}{j\sqrt{k^2 - \sigma^2} \cosh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L) + \sigma \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L)} \\ t = \frac{\sqrt{k^2 - \sigma^2}}{\sqrt{k^2 - \sigma^2} \cosh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L) - j\sigma \sinh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L)} \end{cases} \quad (8)$$

由此可得,光栅的反射率 $R = |r|^2$,透射率 $T = 1 - R$ 。

图 2(b)为利用矩阵分析法仿真的 CFBG 的反射谱,计算参数分别为:中心波长 $\lambda_B = 1551$ nm,光栅长度 $L = 5$ mm,纤芯曝光前的有效折射率 $n_0 = 1.452$,折射率调制深度 $\Delta n = 0.00008$ 。可以看出,光波受到的反射率在光栅的带宽内较大,在带宽外较小,远离中心波长处甚至为 0。

3 仿真结果与讨论

图 3(a)为 40 GHz 的伪随机码的光谱图,可以看到,信号的光谱拥有众多的边频成分^[12]。图 3(b)为 F-P 腔 $f_{\text{FSR}} = 40$ GHz 的透射谱,图 3(c)为利用此 F-P 腔恢复出来的中心波长 $\lambda = 1551$ nm 的时钟信号光谱图,可以看出通过 F-P 腔后,成功恢复出了时钟信号,边频成分得到了一定的抑制。由图 3(b)、(c)可以看出, F-P 腔在所有波长范围内都有透射峰,导致了恢复出的时钟信号的波长选择性较差^[3,13-14]。

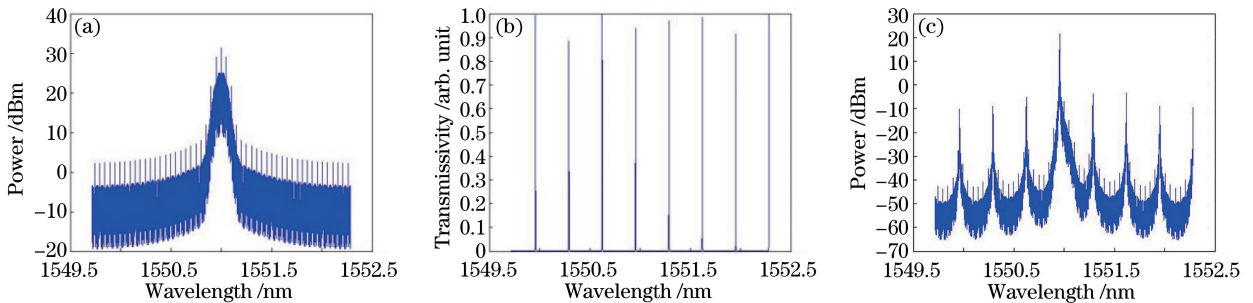


图 3 (a) 40 GHz 的伪随机码的光谱图;(b) F-P 腔 $f_{\text{FSR}} = 40$ GHz 的透射谱;(c)恢复的时钟信号光谱图

Fig. 3 (a) Spectrum of the pseudo-random code with 40 GHz; (b) transmission spectrum of the F-P cavity at $f_{\text{FSR}} = 40$ GHz; (c) spectrum of the recovered clock

对于中心波长 $\lambda = 1551$ nm、频率为 40 GHz 的伪随机码,其时钟信号离散谱分量间隔约为 0.32 nm,总的有效时钟谱宽度约为 0.96 nm,只需要 $f_{\text{FSR}} = 40$ GHz 的三个透射峰(即 0.96 nm 带宽)就能完成一个波长处的信号时钟恢复。图 2(b)为符合带宽标准的 CFBG 的反射谱。

图 4(a)和(b)为先用 CFBG 对信号进行滤波,再经过 F-P 腔进行时钟恢复的装置图和时钟信号光谱图。由图可以看出,由于先经过 CFBG 滤波,在 CFBG 反射带宽外的信号受到了比较大的抑制,功率变小,所以恢复出来的时钟信号光谱在 CFBG 反射带宽外的边频得到了抑制,具有较好的波长选择性^[14]。但是 CFBG 的反射谱并不是理想的滤波器,在反射谱的顶部存在抖动,这使得经过滤波器的信号也存在抖动。如果恢复出来的时钟信号周围刚好处于抖动的峰值处,就会导致时钟信号不够突出,如图 4(b)中的第一个时钟信号左边出现的情况。

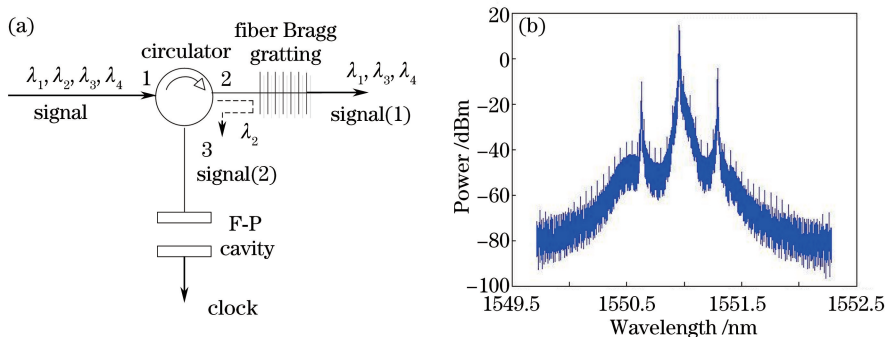


图 4 先用 CFBG 对信号进行滤波,再经过 F-P 腔进行时钟信号恢复的(a)装置图和(b)时钟信号光谱图

Fig. 4 (a) Schematic setup and (b) spectrum of the recovered clock signals after the CFBG filter and F-G cavity

为了抑制 CFBG 反射谱顶端的抖动,引入光栅的切趾技术,利用常用的高斯切趾函数进行切趾,高斯切趾函数表示为^[15-16]

$$\Delta n(z) = \Delta n \exp\left\{-5 \left[\left(z - \frac{L}{2}\right)/L\right]^2\right\}, \quad (9)$$

式中 z 为变量表示沿轴向的分布,并无实际物理意义, z 取值范围为 $[0, L]$ 。

图 5 为经过高斯切趾函数切趾后的 CFBG 的反射谱,对比图 4,可以看出 CFBG 反射谱顶端的抖动得到了很好的抑制。图 6 为利用切趾后的 CFBG 进行滤波再利用 F-P 腔进行时钟恢复后的时钟信号光谱图,对比图 4(b),可以看出,由于 CFBG 反射谱顶端的抖动受到了一定的抑制,提取出来的时钟信号以及边频抖动变小,从而使得恢复出来的时钟信号更突出,效果更好。

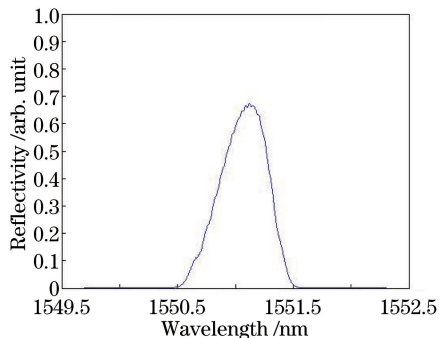


图 5 高斯切趾后的 CFBG 反射谱

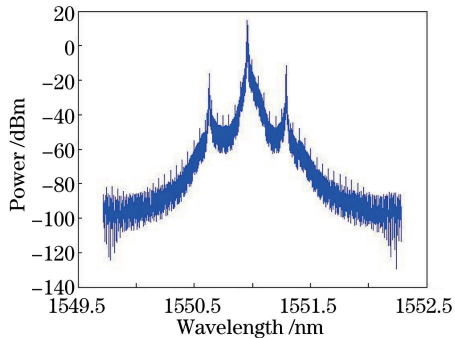


图 6 光栅切趾后恢复出来的时钟信号

Fig. 5 Reflection spectrum of the Gaussian-apodized CFBG

Fig. 6 Spectrum of the recovered clock signals after apodization

4 结 论

在信号进入 F-P 腔之前,先通过一个光纤布拉格光栅进行滤波,将远离要恢复时钟中心波长的信号先进行滤除,再经过 F-P 腔进行时钟恢复。对比增加滤波和未增加滤波时的结果可以看出,增加了光纤光栅滤波器后,恢复的时钟信号边频抑制更好。但是 CFBG 反射谱顶部存在抖动,需要通过切趾技术优化光栅的反射谱恢复出更好的时钟信号。由于通过切趾后光栅的反射率峰值有所减小,因此时钟信号的进一步优化可以通过寻找更好的切趾函数以及将恢复出的时钟信号经过半导体光放大器等器件的进一步处理来实现。

参 考 文 献

- Wu Yue, Huo Li, Lou Caiyun. 100 GHz and 200 GHz all-optical clock recovery based on F-P cavity and SOA[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806004.
武岳, 霍力, 娄彩云. 基于 F-P 腔和 SOA 100 GHz 及 200 GHz 全光时钟恢复[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0806004.
- Ma Chuang, Jiang Yang, Jia Shi, *et al.* All-optical clock extraction based on injection-locked semiconductor laser[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0306001.
马闯, 江阳, 贾石, 等. 基于半导体激光器注入锁定的全光时钟提取[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0306001.
- Damani R, Salehi J A. Theoretical considerations in designing ultra-high speed all-optical clock recovery using fiber optical parametric amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(15): 2678-2689.
- Wang F, Yu Y, Zhang Y, *et al.* All-optical clock recovery using a single Fabry-Perot semiconductor optical amplifier[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(11): 1632-1637.
- Wang Shunyan, Jiang Yang, Wu Cinan, *et al.* Experimental study on all-optical clock recovery of all-fiber mode-locking cavity configuration[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0505005.
王顺艳, 江阳, 吴次南, 等. 全光纤锁模腔结构的全光时钟提取实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0505005.
- Zhou X, Lu C, Shum P, *et al.* A performance analysis of an all-optical clock extraction circuit based on Fabry-Perot filter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(5): 603-613.
- Sun Guodan, Wang Rong, Pu Tao, *et al.* Design and implementation of comb filter with arbitrary channel spacing based on fiber Bragg gratings[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305007.
孙帼丹, 王荣, 蒲涛, 等. 任意波长间隔的光纤光栅梳状滤波器设计与实现[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305007.
- Wang Tingyu. Investigation of all-optical clock extraction based on F-P filter[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010: 11-15.
王廷宇. 基于 F-P 滤波器的全光时钟提取技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010: 11-15.
- Liu Guodong, Wu Chongqing, Wang Fu, *et al.* All-optical clock recovery of variable bit-rate non-return-to-zero differential phase shift keying signal[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105010.
刘国栋, 吴重庆, 王甫, 等. 速率可变差分相移键控非归零码信号的全光时钟提取[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105010.

- 10 Hwang G S, Huang D W, Ma C C. Numerical study on reflection spectra of an apodized fiber Bragg grating subjected to strain gradients[C]. 37th National Conference on Theoretical and Applied Mechanics (37th NCTAM 2013) & the 1st International Conference on Mechanics (1st ICM), 2014, 79: 631-639.
- 11 Yan L, Hu G J, Xiao J, *et al.* Characteristic analysis of two-mode fiber Bragg grating[J]. Applied Physics B, 2014, 117(4): 1221-1228.
- 12 Dong Xiaowei, Xie Yuan, Liu Wenkai. All-optical RZ-to-NRZ format conversion based on micro-ring resonator and narrow bandpass filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 020603.
董小伟, 谢媛, 刘文楷. 基于微环谐振器和窄带滤波器的全光归零到非归零码型转换[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 020603.
- 13 Gopakumar V T, Madhusoodhanan K N, Srinivasan B. Simulation and experimental validation of fiber Fabry-Perot filters for optical clock recovery[J]. Journal of Optics, 2015, 44(2): 178-181.
- 14 Huo L, Wang D, Wang Q, *et al.* 100-GHz all-optical clock recovery with Fabry-Perot cavity and semiconductor optical amplifier[C]. Asia Communications and Photonics Conference, 2012, AS2G: AS2G.5.
- 15 Luo Jun, Yu Jinlong, Wang Ju, *et al.* 40 Gb/s all-optical clock recovery using high finesse Fabry-Perot filter[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(9): 1324-1327.
罗俊, 于晋龙, 王菊, 等. 基于高精度 F-P 滤波器的 40 Gb/s 全光时钟提取[J]. 光电子 • 激光, 2010, 21(9): 1324-1327.
- 16 Harish A V, Varghese B, Rao B, *et al.* Dynamic interrogator for elastic wave sensing using Fabry Perot filters based on fiber Bragg gratings[J]. Ultrasonics, 2015, 60: 103-108.