

基于法布里-珀罗滤波器的 40 GHz 全光 时钟提取实验*

汤广强,于晋龙,王耀天,张艳冬,朱利凯,吴海静,高卿

(天津大学 电信学院光纤通信实验室,光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300072)

摘 要:研究了在基于法布里-珀罗(F-P)滤波器的全光时钟提取实验中法布里-珀罗滤波器的精细度和信号码型对时钟提取的影响.根据理论分析,利用精细度为 1012 的 F-P 滤波器进行了时钟提取实验,并利用 SOA 进一步抑制时钟信号中的幅度抖动噪音,改善了时钟信号的质量.最终提取出低幅度起伏、低时间抖动的 40 GHz 时钟信号.

关键词:光纤通信;全光时钟提取;法布里-珀罗滤波器;精细度

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)10-1853-5

0 引言

全光时钟提取技术是 OTDM 通信系统、全光 3R 再生技术以及全光交换技术的核心技术.目前,主要有基于半导体锁模激光器(Mode-Locked Laser, MLL)的时钟提取,基于自脉动(Self-Pulsating)DFB 激光器等多种时钟提取技术^[1-6].但是这些时钟提取技术方案中,实验装置或者器件结构都比较复杂.

与这些方案相比,利用无源器件 F-P 滤波器进行时钟提取具有结构简单、捕获时间短等特点^[7-8].但是,普通的 F-P 滤波器精细度比较低,一般在几十到几百左右.采用这样的 F-P 滤波器进行时钟提取得到的时钟信号,信号幅度起伏和时间抖动都很大,时钟信号质量很差.为了提取低幅度起伏、低时间抖动的时钟信号,必须采用高精度的 F-P 滤波器进行时钟提取.但高精度 F-P 滤波器的透射峰带宽很窄,为了保证信号光载频与 F-P 滤波器的一个透射峰对准,一方面 F-P 滤波器透射峰要保持稳定,另一方面光载频一定要具有较高的频率稳定性.

本实验用 SOA 对信号光进行了波长变换,将稳定性较差的信号光波长转换为高稳定的探测光波长,同时采用温度控制电路对 F-P 滤波器进行温度控制以控制透射峰漂移,使 F-P 滤波器透射峰保持稳定,这样就可以使用高精度的 F-P 滤波器进行时钟提取.经过波长变换后输出为反极性码信号.理论分析和实验发现,由反极性信号提取的时钟信号质量要劣于由相同幅度的正极性信号提取的时钟信号质量,因此将反极性信号经过一窄带滤波器对

反极性码信号进行整形,可以得到接近于正极性码的信号^[9],从而改善提取出的时钟信号质量.因此,本文对精细度的高低以及信号光的码型对时钟提取的影响进行了理论分析,并根据分析得到的结论,采用精细度为 1 012 的 F-P 滤波器完成了 40 GHz 的全光时钟信号的提取实验,提取出低幅度起伏、低时间抖动的时钟信号.

1 理论分析

根据 F-P 滤波器的特性,其光场传输函数为

$$H(\omega) = \frac{(1-R)\exp(-j\omega/2FSR)}{1-R\exp(-j\omega/FSR)} \quad (1)$$

式中, R 为反射镜的反射率, FSR 为自由光谱区.

由 $H(\omega)$ 函数可得 F-P 滤波器的半峰全宽(FWHM)

$$FWHM = \frac{c(1-R)}{2nL\pi R} \quad (2)$$

式中, c 为光在真空中的速度, n 为 F-P 滤波器腔内介质的折射率, L 为两反射镜之间的距离.

F-P 滤波器的精细度(Finesse)定义为

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (3)$$

在 F-P 滤波器输入端输入由 m 序列调制产生的高斯脉冲伪随机序列 $F(t)$,此伪随机序列表示为

$$F(t) = \sum_{k=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} a_k \exp\left(-\frac{(t-kT_s)^2}{2t_0^2}\right) \cdot \exp(j\omega_0 t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t-nT) \quad (4)$$

式中: N 为 m 序列的长度, a_k 为 m 序列的单个码元, T_s 为码元长度,序列的重复周期为 $T=NT_s$, ω_0 为光载波的角频率, t_0 为脉冲半宽度(在光强度峰值的 $1/e$ 处).

$F(t)$ 傅里叶变换为

* 国家 863 高技术研究发展计划(2001AA312220)资助

Tel: 022-27404143 Email: areyouhere_1981@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-06-19

$$F(\omega) = \sqrt{2\pi}t_0 \exp\left(-\frac{(\omega-\omega_0)^2 t_0^2}{2}\right) \sum_{k=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} a_k \cdot \exp(-jkT_s(\omega-\omega_0)) \Omega \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega-n\Omega) \quad (5)$$

式中： $\Omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{NT_s} = \frac{\omega_s}{N}$

当该信号输入到 F-P 滤波器时，输出信号 $Y(\omega)$

$$Y(\omega) = F(\omega)H(\omega) \quad (6)$$

对 $Y(\omega)$ 进行傅里叶逆变换并取其包络(其载波为角频率为 ω_0 的光载波)可得时域输出信号 $Y(t)$

$$Y(t) = \frac{\sqrt{2\pi}t_0}{2\pi} \Omega \left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{(n\Omega-\omega_0)^2 t_0^2}{2}\right) \cdot \sum_{k=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} a_k \exp(-jkT_s(n\Omega-\omega_0)) \right) \frac{(1-R)\exp(-jn\Omega/2FSR)}{1-R\exp(-jn\Omega/FSR)} \exp(n\Omega t) \quad (7)$$

同理,当在 F-P 滤波器输入 $F(t)$ 端输入的反极性码序列 $\overline{F(t)}$

$$\overline{F(t)} = \exp(j\omega_0 t) - \sum_{k=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} a_k \exp\left(-\frac{(t-kT_s)^2}{2t_0^2}\right) \cdot \exp(j\omega_0 t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t-nT) \quad (8)$$

可以推导得出,F-P 滤波器输出信号的包络为

$$\overline{Y(t)} = 1 - Y(t) \quad (9)$$

信号光载频与 F-P 滤波器的一个透射峰对准,且信号码率 f_s 与 F-P 滤波器的自由光谱区相等,即 $f_0 = qFSR$ (q 为整数), $f_s = FSR$, 在这种情况下,研究不同精细度和不同码型对时钟信号提取得影响.

在 matlab 计算中,采用 7 阶 m 序列,则 $N = 2^7 - 1 = 127$. 信号码率 f_s 为 40 Gbit/s. 经过 Matlab 的计算绘图,得到不同精细度下输入为正极性码时提取的时钟信号波形,如图 1(a)、(b)、(c) 以及精细度为 1000 输入为反极性码时提取到的时钟波形,如图 1(d).

同时,根据图 1 和计算所得的数据,对提取的时

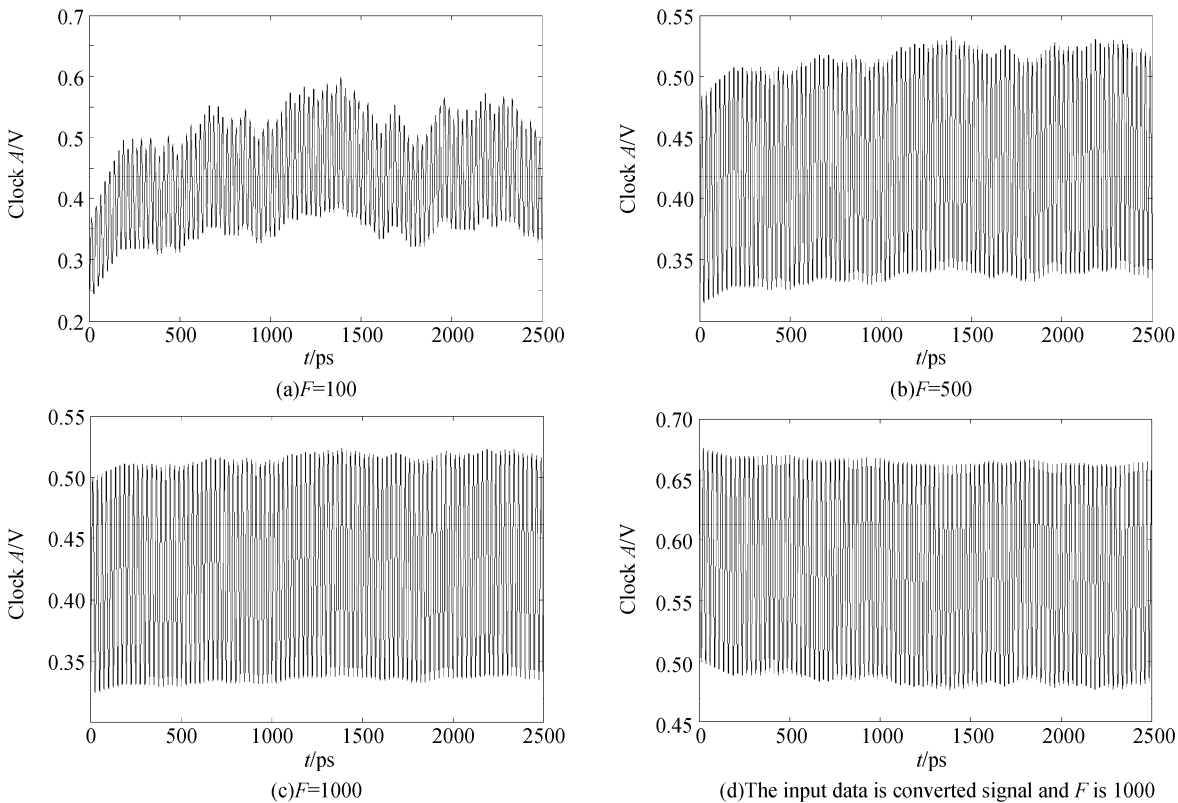


图 1 通过 F-P 滤波器提取出的时钟信号
Fig. 1 Clock extracted by Fabry-Perot filters

钟信号幅度的相对标准偏差 (Relative standard deviation, RSTD)^[10] 和时间抖动进行了计算.

其中,幅度的相对标准偏差定义为幅度的标准偏差 (Standard deviation of the amplitude, STD) 与平均信号幅度 (Mean value of the amplitude, MA) 的比值

$$RSTD = \frac{STD}{MA} \quad (10)$$

时间抖动(均方根抖动)^[11] 定义为

$$\sigma_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (11)$$

式中, T_i 为第 i 次测得周期值, \bar{T} 为 $T = T_i$ 的平均值, N 为测试得到的样本个数. 通过计算,得到当

精细度分别为 100, 500, 1 000 时, 输入信号为正极性伪随机信号以及精细度为 1 000 时输入信号为反极性码时提取的时钟信号幅度的相对标准偏差和时间抖动如表 1.

表 1 图 1 中时钟的相对标准偏差和时间抖动

精细度	100	500	1000*	1000**
相对标准偏差	8.72%	1.96%	0.99%	1.01%
时间抖动	230 fs	44 fs	29 fs	31 fs

* 输入为正极性码时提取的时钟信号

** 输入为反极性码时提取的式申信号

由表 1 和图 1(a)、(b)、(c) 比较可以看出, 输入码型相同, 精细度越高, 提取的时钟信号的幅度起伏越小, 时间抖动越小. 在图 1(c) 与图 1(d) 比较时, 通过 Matlab 计算可以发现 F-P 滤波器输入为正码时提取出的时钟信号消光比大于由反极性码时提取出的时钟信号的消光比(前者为 2.39, 后者为 1.87). 结合表 1 中的数据可以看出: 输入码型不同, 精细度同为 1 000 时, F-P 滤波器输入为正码时提取出的时钟信号质量优于由反极性码时提取出的时钟信号质量. 根据分析结论, 本文采用精细度为 1 012 的 F-P 滤波器进行时钟提取, 并对码型对 F-P 滤波器进行时钟提取的影响进行了实验验证.

2 实验及分析

具体的实验方案框图如图 2.

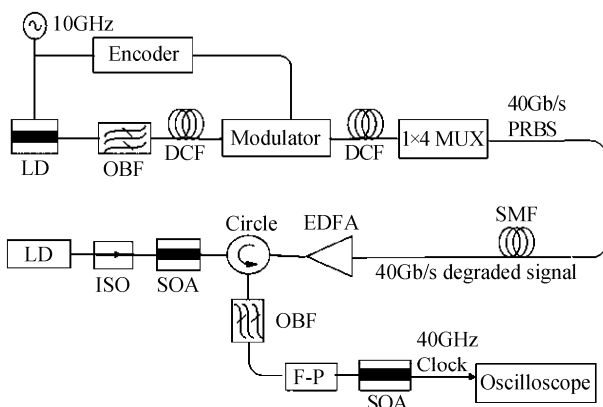


图 2 全光时钟提取方案

Fig. 2 Scheme of all-optical clock recovery

2.1 实验方案

在实验室为了模拟实际的信号, 对随机码信号进行恶化. 伪随机码经过 883 m 的单模光纤后并加入一个无输入的 EDFA 产生的 ASE 噪音后, 波形展宽, 噪音和时间抖动明显变大, 信噪比下降, 这样就得到了用来提取时钟的恶化信号, 其信号幅度偏差为 33%, 时间抖动为 3.925 ps, 如图 3. 为了保证伪随机信号波长稳定, 对恶化信号进行波长变换. 用一高稳定的激光器输出连续光. 这束光波与恶化的伪随机码信号一同进入 SOA, 得到具有稳定波长

的反极性伪随机信号; 同时, 通过温度控制电路对 F-P 滤波器进行温度控制, 之后图 3(a) 反极性码直接输入到精细度为 1 012, 自由光谱区为 40 GHz 的 F-P 滤波器进行时钟提取; 图 3(b) 反极性码经过带宽为 0.2 nm 的窄带可调滤波器滤波整形之后, 输入到精细度为 1 012, 自由光谱区为 40 GHz 的 F-P 滤波器进行时钟提取. 提取到的时钟信号在经过一个 SOA 进行非线性放大, 进一步降低时间抖动以及和幅度噪音^[7].

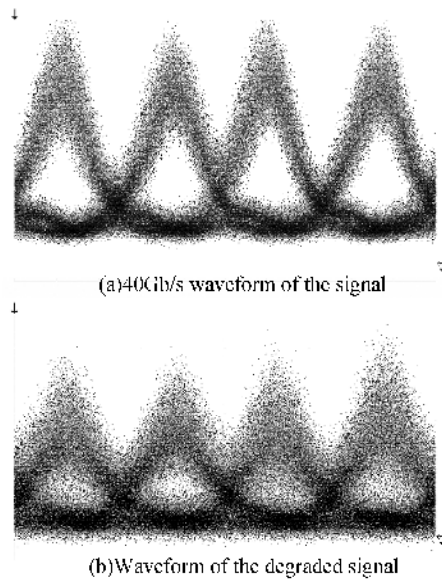


图 3 40Gb/s 信号波形和恶化后的信号波形

Fig. 3 Waveforms of the signal and degraded signal

2.2 实验结果及分析

为提取出波形清晰的时钟信号, 实验中: 1) 采用了精细度为 1 012 的 F-P 滤波器. 由于 F-P 滤波器透射峰很窄, 漂移将会导致的提取时钟信号质量很差, 所以实验中采用温控电路对 F-P 滤波器进行温度控制以保证 F-P 滤波器透射峰的稳定; 2) 由于本试验中采用的光源为增益开关半导体激光器, 其波长稳定性难以达到高精度 F-P 滤波器的要求, 所以在实验中首先对利用一个 SOA 将信号光进行波长变换. 采用一高稳定的激光器(波长可以稳定到 10 MHz 量级)作为探测光光源, 此时 SOA 的输出为波长稳定的反极性码信号, 如图 4(a), 这样就保证了输入光信号载频的稳定. 方案(1): 将此反极性码信号直接输入到 F-P 滤波器进行时钟提取, 得到时钟信号如图 4(b). 方案(2): 在 SOA 的输出端的窄带滤波器, 滤波器的中心波长相对于变换后的时钟信号波长向短波长偏移一个合适的量, 此时滤波器起到了波形整形的效果. 根据相关文献报导^[9], 通过窄带滤波器整形可以得到正极性码, 在本实验中由于受到采用的滤波器特性的限制, 无法得到理想的正极性码, 只能得到近于正极性码的码型, 如图

4(c). 然后, 稳定波长的伪随机码信号经过 EDFA 放大后进入 F-P 滤波器. 当信号光载频与 F-P 滤波器的一个透射峰对准, 且信号码率与 F-P 滤波器的自由光谱区 FSR 相等时, 提取出时钟信号如图 4(d). 比较图 4(a) 和图 4(c), 经过窄带滤波器对反极性码信号滤波后, 码型更接近于正极性码型, 按前面的分析可知, 这样更加有利于时钟提取. 比较图 4(b) 和图 4(d), 未经滤波整形后提取出的时钟信号幅度相对标准偏差为 9.92%, 均方根抖动为 2.112 ps; 经滤波整形后提取出的时钟信号幅度相对标准偏差为 4.30%, 均方根抖动为 1.397 ps, 幅度起伏和时

间抖动均小于方案(1)的结果. 实验最终采用方案(2)进行时钟提取并从幅度相对标准偏差为 33%, 时间抖动为 3.925 ps 的恶化信号中提取出幅度相对标准偏差为 4.30%, 时间抖动为 1.397 ps 的时钟信号. 可见, 尽管试验中没有得到理想的正极性码, 但是提取到的时钟信号有了一定的改善. 如果采用具有理想特性的窄带滤波器, 那么提取到的时钟信号将会进一步改善. 这与理论分析是一致的. 另外, 由于测试仪器的限制——示波器自身有 1 ps 的固有时间抖动, 所以提取到的时钟信号的时间抖动应小于 1.397 ps.

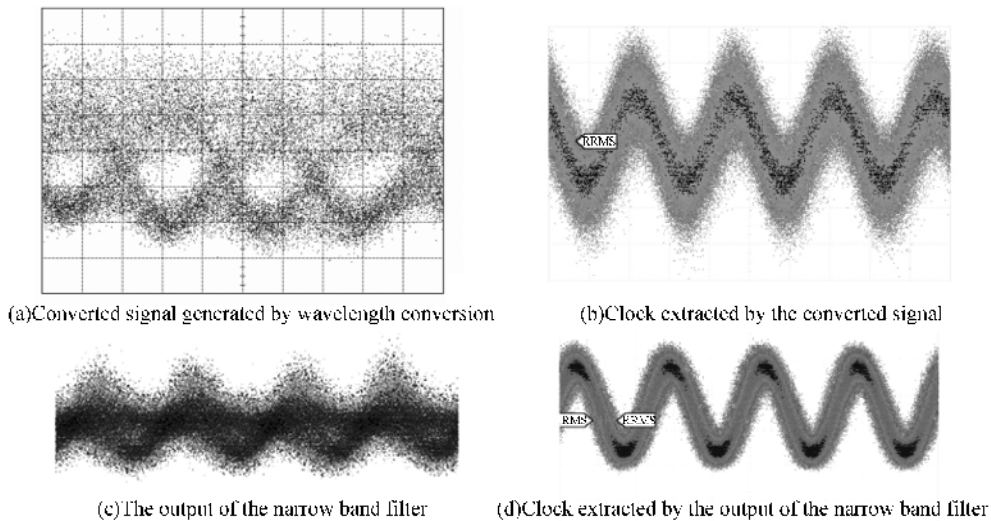


图 4 输入信号码型对时钟提取影响实验

Fig. 4 The influence of the input data's code pattern on the clock extraction

3 结论

本文根据 F-P 滤波器的传输函数, 通过理论分析得到精细度和 F-P 滤波器输入码型对时钟信号提取的影响. 应用得出的结论, 通过窄带滤波器对波长变换得到的反极性码信号进行整形, 采用精细度为 1 012 的 F-P 滤波器, 对幅度相对标准偏差为 33%, 均方根抖动为 3.925 ps 的恶化信号进行时钟提取, 得到了幅度相对标准偏差为 4.30%, 均方根抖动小于 1.397 ps 的 40 GHz 时钟信号.

参考文献

- [1] REN Xiao-min, HUANG Yong-qing, LUN Xiu-jun. Study on self-pulsation of DFB laser devices[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 290-293.
任晓敏, 黄永清, 伦秀君. DFB 激光器件自脉动的研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(3): 290-293.
- [2] WU Tong, QIU Kun. Investigation on all-optical clock recovery from RZ-format data at 64 Gbit/s by using a two-section index-coupled DFB laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1393-1396.
武同, 邱昆. 基于双区折射率耦合 DFB 激光器实现 64 Gbit/s 归零编码数据全光时钟恢复研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9):

- 1393-1396.
- [3] WANG Tong, LI Zhi-hong, LOU Cai-yun, *et al.* A novel technology to reduce the pattern effect in all-optical clock recovery using injection mode-locked laser based on SOA[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 173-177.
王桐, 李智红, 娄采云, 等. 一种减少基于 SOA 的全光时钟提取码型效应的新方法[J]. *光子学报*, 2002, **31**(2): 173-177.
- [4] BORNHOLDT C, SARTORIUS B, SCHELBASE S, *et al.* Self-pulsating DFB laser for all-optical clock recovery at 40 Gbit/s[J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(4): 327-328.
- [5] MAO W, LI Y, Al-Mumin M, *et al.* 40 Gbit/s all-optical clock recovery using two-section gain-coupled DFB laser and semiconductor optical amplifier[J]. *Electronics Letters*, 2001, **37**(21): 1302-1303.
- [6] LI Ya-nan, YU Jin-long, DAI Ju-feng, *et al.* Experimental investigation of stabilizing all-optical clock recovery in 4×10 Gbps OTDM system based on the injection mode-locked fiber ring laser[C]. *Asia-Pacific Optical Communications Conference and Exhibition, APOC'2004*, Nov. 2004.
- [7] CONTESTABILE G, D'ERRICO A, PRESI M, *et al.* 40 GHz all-optical clock extraction using a semiconductor-assisted Fabry - Pérot filter[J]. *Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(11): 2523-2525.
- [8] 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.
- [9] CHO P S, MAHGEREFTEH D, GOLDHAR J, *et al.* RZ wavelength conversion with reduced power penalty using a semiconductor-optical-amplifier-fiber-grating hybrid device[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(1): 66-68.
- [10] WANG Tong, LOU Caiyun, LI Huo, *et al.* Combination of comb-like filter and SOA for preprocessing to reduce the pattern effect in the clock recovery[J]. 2004, **16**(2): 614-616.
- [11] PLA General Armament Department military training textbooks editing committee. *Time Standardizing Techniques* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2004: 382-383. 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会. 时间统一技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 382-383.

40 GHz All-Optical Clock Extraction Using a Fabry-Pérot Filter

TANG Guang-qiang, YU Jin-long, WANG Yao-tian, ZHANG Yan-dong,
ZHU Li-kai, WU Hai-jing, GAO Qing

(*Lab of Optical Fiber Communication, School of Electronics and Information Engineering, Tianjin University, Laboratory of Optical-electronics Information and Technical Science (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China*)

Received date: 2006-06-19

Abstract The influence of the finesse and the code pattern on the clock extraction in the 40 GHz all-optical clock extraction is analyzed using a F-P filter; According the analyses, experiment is performed using a F - P filter with high finesse, and the low-frequency amplitude fluctuating noise in the clock signal is suppressed by using SOA. The clock signal shows low jitter and low amplitude fluctuation.

Key words Optical fiber communication; Clock extraction; F-P filter; Finesse



TANG Guang-qiang was born in 1981, is a postgraduate student in school of Electronic Information Engineering, Tianjin University. His research mainly focuses on the fiber-optic communication techniques.