

# 光生频率大范围可调的相位编码微波信号

刘 双 钱祖平 王 荣 蒲 涛

(中国人民解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要** 提出并验证了一种光生相位编码微波信号的方法,其主要原理是对编码的相干光边带进行差拍,从而得到高频率、高编码数率、低噪声的相位编码微波信号。该方法简单易行,利于集成,能适应不同的编码速率,产生的微波信号频率大范围可调,能解决电子电路方法中遇到的“电子瓶颈”问题。介绍了所提方法的原理,并进行了理论推导,在系统分析中加入了对调制器驱动信号相位噪声的分析,使得系统建模更加科学完善;实验设计制作了所需的光纤光栅带阻滤波器,产生了 20 GHz 和 25 GHz 的相位编码微波信号,实验结果与理论值几乎吻合,证明了所提方法提高脉冲压缩比的能力。

**关键词** 光通信;微波光子学;光生微波;光纤布拉格光栅;脉冲压缩

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0406004

## Photonic Generation of Phase-Coded Microwave Signal with Large Frequency Tunability

Liu Shuang Qian Zuping Wang Rong Pu Tao

(*Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*)

**Abstract** A photonic approach to generating a phase-coded microwave signal is proposed and demonstrated. The main principle is to beat the encoded coherent optical sideband to obtain high-frequency, high-coding rate, low-noise encoded microwave signals. The proposed technique, which is simple and conducive to integration, can adapt to different coding rates, generate phase-coded microwave signals with tunable frequency, and solve the bottleneck problem of traditional electronic approaches. The principle is discussed in detail. Mathematical models are developed to consider perturbation on the generated coded signal caused by the phase fluctuations of the microwave driving signal and the optical carrier. The required fiber Bragg grating notch filter is fabricated, and 20 GHz and 25 GHz phase-coded microwave signals are experimentally generated, respectively. The experimental results agree well with theoretical values, and it is proved that the proposed method improves the pulse compression capability.

**Key words** optical communications; microwave photonics; optical microwave generation; fiber Bragg grating; pulse compression

**OCIS codes** 060.3735; 350.4010; 040.2840

## 1 引 言

具有大时间带宽积的微波脉冲信号在现代雷达系统中被广泛应用<sup>[1]</sup>。为了使脉冲具有大时间带宽积,通常让雷达发送端对微波脉冲进行相位编码或频

率啁啾,这样在雷达接收端通过匹配滤波器压缩脉冲便可以实现很高的压缩比,从而提高雷达精度<sup>[2]</sup>。

利用电子电路产生相位编码或频率啁啾脉冲的方法已经很成熟,但由于“电子瓶颈”的限制,这种

**收稿日期**: 2012-11-23; **收到修改稿日期**: 2012-12-19

**基金项目**: 国家自然科学基金重点项目(61032005)、国家自然科学基金(61177065)和国家 973 计划(2012CB315603)资助课题。

**作者简介**: 刘 双(1985—),男,博士研究生,主要从事光纤光栅与光生微波任意波形等方面的研究。

E-mail: youyou1985@xnmnsn.cn

**导师简介**: 蒲 涛(1974—),男,博士,教授,主要从事光纤通信系统和微波光子学等方面的研究。

E-mail: nj\_putao@163.com

方法产生的脉冲时间带宽积已经满足不了现代雷达系统对高精度、高灵敏度的需求。一种很好的解决办法就是利用光子学技术来产生具有大时间带宽积的微波脉冲信号<sup>[3~5]</sup>。

文献[6,7]利用基于空间光调制器的脉冲整形系统来产生啁啾或相位编码的微波脉冲,但是此方法利用了自由空间光系统,系统结构庞大而且损耗大。文献[8]把两个不同啁啾率的线性啁啾光脉冲通过光电检测器(PD)差拍而得到线性啁啾的微波脉冲。文献[9]利用微波光子时延滤波器来造成相移,但是此技术产生的脉冲带宽受限于滤波器的窄带宽。虽然文献[10]利用偏振调制器产生了大带宽的相位编码脉冲,但是此技术产生的微波频率不可调。文献[11]利用光谱整形和频时映射的原理来产生高频啁啾电脉冲。文献[12]基于 Sagnac 干涉环结构产生了相位编码的微波信号,但是结果的稳定性受到环长微小变化的影响。

本文提出了一种用光子学技术来产生相位编码微波信号的方法,采用抑制载波的外调制技术产生相干光边带,对编码的相干光边带进行差拍,从而得到高频率、高编码数率、低噪声的相位编码微波信号。从公式上进行了理论推导,在系统分析中考虑了调制器驱动信号相位噪声的影响,系统建模更加

科学完善。利用实验室的光纤布拉格光栅(FBG)制作平台,设计制作了用来分离相干光边带的 FBG 带阻滤波器,实验产生了 20 GHz 和 25 GHz 的相位编码微波信号,用相干检测法恢复实验数据的相位信息,与理论值几乎吻合。最后对实验结果进行了分析,证明了所提方法提高脉冲压缩比的能力,讨论了系统进一步优化的方向。

## 2 原 理

所提方法的实验原理图如图 1 所示。可调激光器(TLS)输出的光经过一个偏振控制器(PC)后被马赫-曾德尔干涉调制器(MZM)调制。加载到 MZM 上的是一个正弦微波驱动信号,通过调节直流(DC)偏置电压的大小使得 MZM 工作在最小传输点,同时控制驱动信号的功率大小,可以使得调制器输出边带中只含有 $\pm 1$ 阶两个边带。这两个边带由环形器 1 端口输入环形器 2 端口,而后被 FBG 带阻滤波器分离,其中的一个边带被反射回去从环形器 3 端口输入到光相位调制器(PM)中进行相位编码,另一个边带直接透射,最后通过一个 3 dB 耦合器合路,并通过 PD 差拍两个边带而得到具有大时间带宽积的相位编码微波信号。

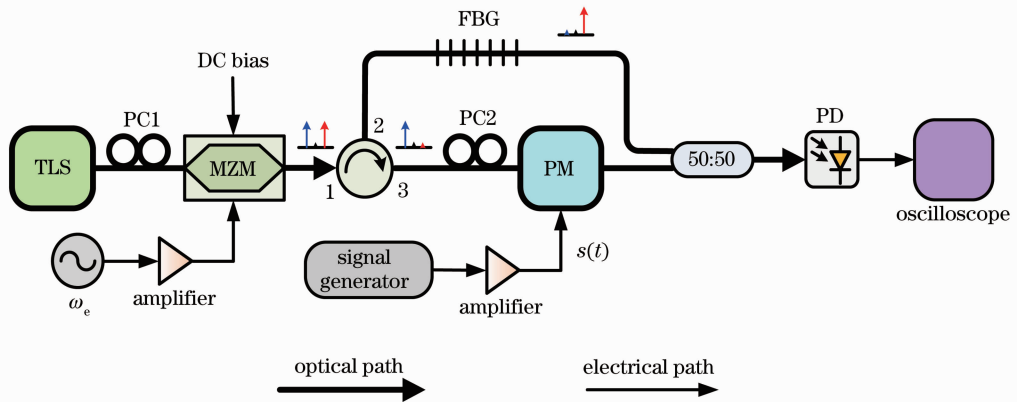


图 1 光子相位编码微波信号的实验原理图

Fig. 1 Schematic of proposed system for photonic generation of phase-coded microwave signal

需要指出的是,在环形器之前的分系统的作用是提供两个相干的光波长,这两个波长之间的波长间隔决定了最后产生的微波信号的频率大小。实验采用的是简单而常用的二倍频方案,如果采用四倍频、六倍频、八倍频或十二倍频方案,用到的是相同

的实验原理,只是由于要产生的微波频率升高,对实验器件(例如 PD)的要求也随之提高<sup>[13]</sup>。

运用数学公式推导,在 MZM 输出端的光信号可表示为

$$E(t) = E_0 J_1(\beta) \exp\{j[(\omega_0 + \omega_c)t + \phi_0(t) + \phi_c(t)]\} + E_0 J_1(\beta) \exp\{j[(\omega_0 - \omega_c)t + \phi_0(t) - \phi_c(t)]\}, \quad (1)$$

式中  $\omega_o$  和  $\omega_e$  分别为光载波和加载到 MZM 上的微波驱动信号的角频率。  $E_o J_1(\beta)$  是  $\pm 1$  阶光边带的幅度,  $E_o$  为光载波的电场幅度,  $J_n$  是  $n$  阶第一类贝

塞尔函数。  $\phi_o(t)$  和  $\phi_e(t)$  是两个独立的随机变量, 分别表示光载波和微波驱动信号的相位噪声。

这样, 在光耦合器输出端的光信号可表示为

$$E(t) = (\sqrt{2}/2)E_o J_1(\beta) \exp\{j[(\omega_o + \omega_e)t + \phi_o(t) + \phi_e(t)]\} + (\sqrt{2}/2)E_o J_1(\beta) \times \exp\{j[(\omega_o - \omega_e)t + \phi_o(t) - \phi_e(t) + \pi(V/V_\pi) \cdot s(t)]\}, \quad (2)$$

式中  $V_\pi$  为 PM 的半波电压。 最后经过 PD 差拍得到的相位编码微波信号为

$$i(t) = A \exp\{j[2\omega_e t + 2\phi_e(t) - \pi(V/V_\pi) \cdot s(t)]\}, \quad (3)$$

式中幅度参数  $A$  包含了  $E_o J_1(\beta)$  和 PD 响应度的综合影响。 从(3)式可以看出, 通过光子学技术产生了一个二倍频的相位编码微波信号; 并且所产生的微波信号的相位噪声不受光载波相位噪声的影响, 但受微波驱动信号相位噪声的影响, 所以利用越纯的微波驱动信号, 能得到质量越好的相位编码微波信号。

### 3 实验结果与讨论

实验系统装置如图 1 所示。 利用倍频氩离子激光器在载氢光纤上制作了一个 FBG 带阻滤波器<sup>[14~17]</sup>, 其传输频谱如图 2 所示, 带宽约 0.05 nm。 因此, 如果光载波的波长固定不变, 微波驱动信号的频率至多只能在 6.25 GHz 的范围内调节。 所以, 提出的系统方案利用可调激光器增大了频率可调范围, 通过调节光载波波长大小而使  $-1$  阶和  $+1$  阶光边带总是分别位于滤波器的阻带和通带。 这样, 微波驱动信号的最小频率由滤波器的滚降系数决定, 斜边越陡的滤波器允许的微波驱动信号频率越小, 图 2 的滤波器允许的最小微波驱动信号频率大约为 2.5 GHz; 而微波驱动信号的最大频率由 PD 的带宽决定, 市场上销售的 PD 能达到 100 GHz, 故此方法产生的相位编码微波信号频率可调范围为 5~100 GHz。

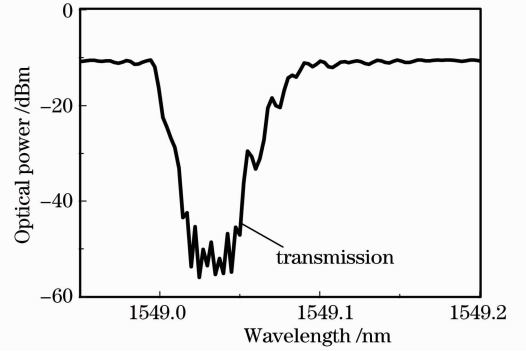


图 2 FBG 的透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of FBG

实验用到的可调激光器是一台 Agilent 81989A。 当光载波波长为 1549.102 nm, 由 Anritsu MP1763C 信号产生器输出的微波驱动信号频率为 10 GHz 时, 通过 Anritsu MS9710C 光谱分析仪测到的  $\pm 1$  阶边带的光谱图如图 3 所示。 其中 MZM 输出端载波被抑制而只剩  $\pm 1$  阶边带的光谱如图 3(a)所示, 被 FBG 透射的  $+1$  阶边带的光谱如图 3(b)所示, 被 FBG 反射的  $-1$  阶边带的光谱如图 3(c)所示。 可以看出, 光载波的功率比  $\pm 1$  阶边带的功率低 25 dB, 而通过 FBG 对两边带的隔离达到了 26.8 dB, 这样的结果充分地满足了实验的需求。

由误码率测试仪作为信号发生器产生的 10 Gb/s 伪随机比特序列经过放大器后, 加载到 PM(EOSPACE AZ-AV5-40-PFU-SFU)上, 实现对被 FBG 反射的  $-1$

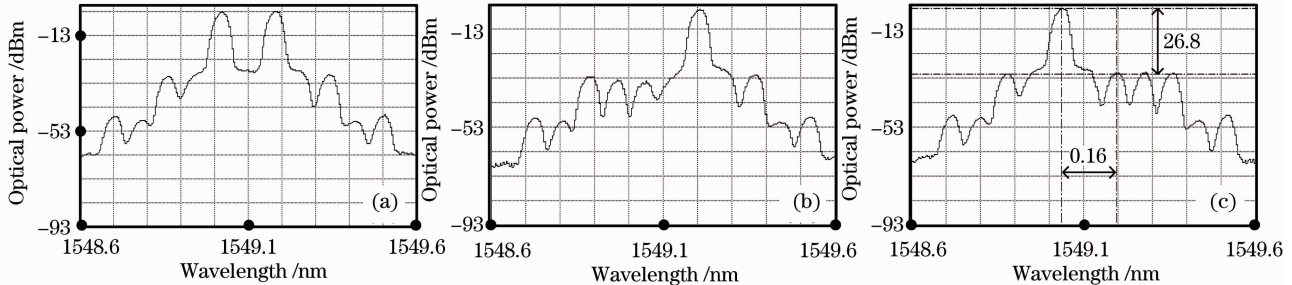


图 3  $\pm 1$  阶边带的光谱图。 (a) MZM 输出端的两个边带; (b) 被 FBG 透射的  $+1$  阶边带; (c) 被 FBG 反射的  $-1$  阶边带  
Fig. 3 Optical spectra of the  $\pm 1$ -order sidebands. (a) Two sidebands at the output of the MZM; (b) transmitted  $+1$ -order sideband; (c) reflected  $-1$ -order sideband

阶边带的光相位编码。图 4(a)是长度为 8 bit 的二进制相位编码信号。图 4(b)是经过 PD 差拍后得到的与图 4(a)相对应的 20 GHz 相位编码的微波信号,它是由 LeCroy NRO9000 采样示波器观测得到的,其时间长度为 0.8 ns。实验中,加载到 PM 上的二进制编码信号的功率  $P$  大约是 15 dBm,即 31.25 mW,故此方波电压幅度  $V$  能根据公式  $V = \sqrt{P \cdot R}$  计算,约为 1.25 V,其中 PM 的输入阻抗  $R$  为  $50 \Omega$ <sup>[10]</sup>。由于实验中 PM 的半波电压大约为 4.0 V,根据(3)式可以计算出对应于二进制编码信号“1”和“-1”的相位为  $56.25^\circ$  和  $-56.25^\circ$ ,所以“1”和“-1”之间的相位差理论值为  $112.5^\circ$ 。为了恢复出产生的相位编码微波信号的相位信息,实验采用了相干检测法。系统产生的相位编码微波信号被耦合器分成两路分别提取同相和正交分量,两路分别乘以同频的余弦和正弦信号后,再经过低通滤波,最后通过计算机计算而得到图 4(c)所示的从图 4(b)信号中恢复的相位信息,从中可以看出,最大的相位差为  $116.5^\circ$ ,这与理论值几乎吻合。

为了验证所提方法产生的相位编码微波信号的频率可调,微波驱动信号的频率调节到 12.5 GHz,实验又成功地产生了频率为 25 GHz 的相位编码微波信号。图 5(a)是产生的没有编码的 25 GHz 微波

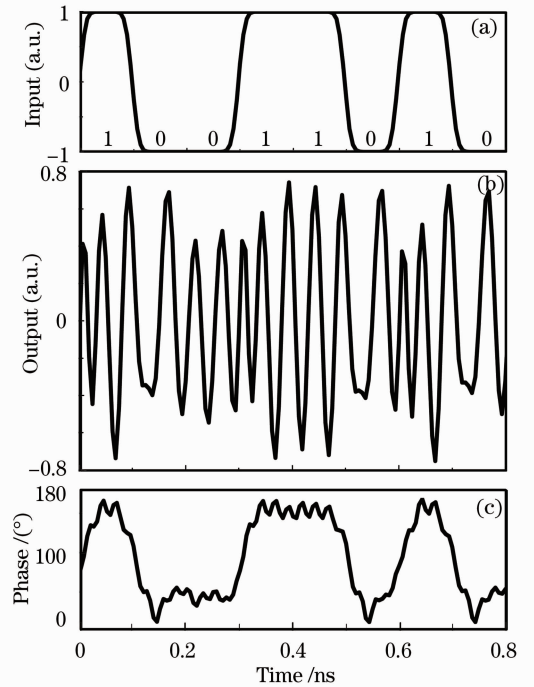


图 4 实验一。(a) 二进制相位编码信号  $s(t)$ ; (b) 产生的相位编码的 20 GHz 微波信号; (c) 从(b)信号中恢复的相位信息

Fig. 4 Results of the first experiment. (a) Binary phase-coded signal  $s(t)$ ; (b) generated 20 GHz phase-coded microwave signal; (c) recovered phase information from the signal in (b)

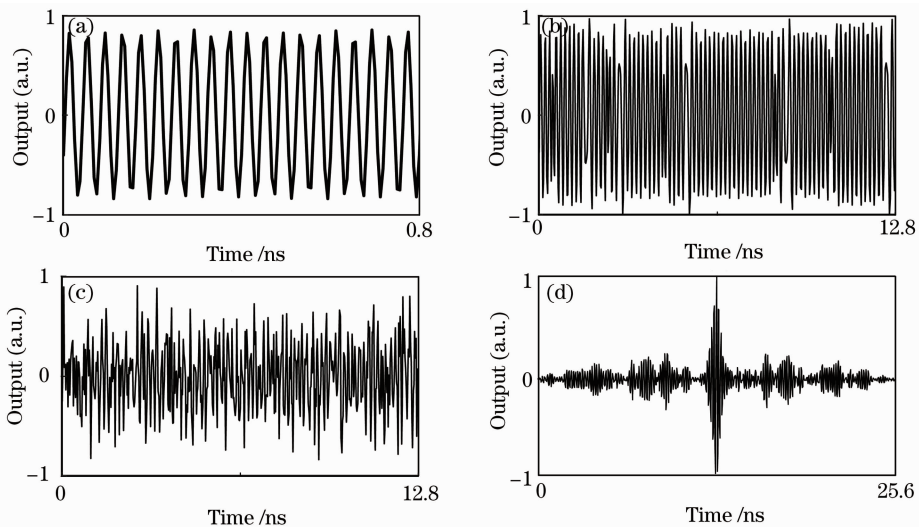


图 5 实验二。(a) 产生的没有编码的 25 GHz 微波信号; (b) 产生的相位编码的 25 GHz 微波信号; (c) 加上高斯白噪声的相位编码信号; (d) 原始的相位编码微波信号与加上高斯白噪声的相位编码信号的相关计算

Fig. 5 Results of the second experiment. (a) 25 GHz microwave signal without phase coding; (b) 25 GHz phase-coded microwave signal; (c) phase-coded signal with a white Gaussian noise; (d) calculated autocorrelation between original phase-coded microwave signal and phase-coded signal with a white Gaussian noise

信号;图 5(b)是产生的时间长度为 12.8 ns 的 25 GHz 相位编码微波信号,其中二进制编码信号的数率为 10 Gb/s,长度为 128 bit;图 5(c)是加上加性高斯白噪声的相位编码信号,其中信噪比低至 0;图 5(d)是相位编码微波信号与加上高斯白噪声的相位编码信号的相关计算图。可以计算出时间带宽积为 128,相关计算的自相关峰的半峰全宽大约为 0.17,则相应的脉冲压缩比为 75.3,高于文献[10,12]。需要指出的是,因为利用的二进制编码信号的功率放大受限,实验中并没有能够实现光生相位编码信号相位实现  $\pi$  相移。如果增加二进制编码信号的功率,或者使用半波电压更小的 PM,使得最终产生的相位编码信号实现  $\pi$  相移,那么就能够提高压缩脉冲的峰值边带比,从而使得脉冲压缩比继续增大。

## 4 结 论

本文提出了一种光生相位编码微波信号的方法,利用 FBG 来分离相干光边带,对编码的光边带进行差拍得到高频率、高编码数率、低噪声的相位编码微波信号。该方法简单易行,利于集成,能适应不同的编码速率,产生的微波信号频率大范围可调。进行了理论推导,在系统分析中加入了调制器驱动信号相位噪声的分析,使系统建模更加科学完善。实验设计制作了所需的 FBG 带阻滤波器,利用二倍频产生了 20 GHz 和 25 GHz 的相位编码微波信号,用相干检测法恢复实验数据的相位信息,与理论值几乎吻合。对实验结果进行了分析,证明了所提方法的确能提高脉冲压缩比。如果采用更高的倍频技术,能更好地体现该方法同电子电路方法相比的优势,其实验原理是一样的,只是对像光电检测器这样的器件的频率带宽要求提高了。并且,如果光子集成技术能运用到实验方法中,系统的稳定性将大大提高。幸运的是,随着光子集成技术的发展,系统稳定性的问题得到了很好的解决。

**致谢** 感谢南京航空航天大学微波光子研究室潘时龙教授的讨论。

## 参 考 文 献

- 1 M. I. Skolnik. Introduction to Radar [M]. New York: McGraw-Hill, 1962. 8~12
- 2 Z. Li, M. Li, H. Chi *et al.*. Photonic generation of phase-coded millimeter-wave signal with large frequency tunability using a polarization-maintaining fiber Bragg grating [J]. *IEEE Microwave & Wireless Compon. Lett.*, 2011, **21**(12): 694~696
- 3 J. Zhang, H. W. Chen, M. H. Chen *et al.*. Photonic generation of a millimeter-wave signal based on sextuple-frequency multiplication [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(9): 1020~1022
- 4 S. L. Pan, J. P. Yao. A wavelength-switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for tunable microwave generation [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5414~5419
- 5 Wang Yong, Li Ming'an, Zhao Qiang *et al.*. Vector signal modulation technique based on a novel frequency quadrupling scheme in millimeter-wave band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0906001  
王 勇,李明安,赵 强等. 新型四倍频光生毫米波矢量信号调制技术[J]. 光学学报, 2012, **32**(9): 0906001
- 6 J. D. McKinney, D. E. Leaird, A. M. Weiner. Millimeter-wave arbitrary waveform generation with a direct space-to-time pulse shaper [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(5): 1345~1347
- 7 J. Chou, Y. Han, B. Jalali. Adaptive RF-photonics arbitrary waveform generator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(4): 581~583
- 8 A. Zeitouny, S. Stepanov, O. Levinson *et al.*. Optical generation of linearly chirped microwave pulses using fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 660~662
- 9 Y. Dai, J. P. Yao. Microwave pulse phase encoding using a photonic microwave delay-line filter [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(24): 3486~3488
- 10 H. Chi, J. P. Yao. Photonic generation of phase-coded millimeter-wave signal using a polarization modulator [J]. *IEEE Microwave & Wireless Compon. Lett.*, 2008, **18**(5): 371~373
- 11 C. Wang, J. P. Yao. Chirped microwave pulse compression using a photonic microwave filter with a nonlinear phase response [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2009, **57**(2): 496~504
- 12 Z. Li, W. Li, H. Chi *et al.*. Photonic generation of phase-coded microwave signal with large frequency tunability [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(11): 712~714
- 13 Zhu Zihang, Zhao Shanghong, Yao Zhoushi *et al.*. Generation of frequency quadruple optical millimeter-wave signal to overcome chromatic dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0405004  
朱子行,赵尚弘,么周石等. 一种克服色度色散影响的四倍频光毫米波信号产生方法[J]. 中国激光, 2012, **39**(4): 0405004
- 14 Pu Tao, Wang Rong, Li Yuquan. Non-Gaussian approximation method for phase encoding optical code division multi-access system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 10~14  
蒲 涛,王 荣,李玉权. 相位编码光码分多址系统中的非高斯分析方法[J]. 光学学报, 2007, **27**(1): 10~14
- 15 S. L. Pan, J. P. Yao. Tunable subterahertz wave generation based on photonic frequency sextupling using a polarization modulator and a wavelength-fixed notch filter [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2010, **58**(7): 1967~1975
- 16 Pei Li, Ning Tigang, Qi Chunhui *et al.*. Research on PMD compensation of CFBG in high speed optical communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 142~146  
裴 丽,宁提纲,祁春慧等. 高速光通信系统光纤光栅色散补偿的偏振模色散研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 142~146
- 17 Zheng Jilin, Wang Rong, Pu Tao *et al.*. Multi-user 10 Gb/s optical code division multiple access experiment [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s105007  
郑吉林,王 荣,蒲 涛等. 光码分多址系统 10 Gb/s 多用户系统实验[J]. 中国激光, 2011, **38**(s1): s105007