

基于光纤交叉相位调制的归零到非归零码转换

孟小俊 闫连山 潘 炜 罗 斌 易安林 李立广

(西南交通大学信息科学与技术学院信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)

摘要 数值模拟了一种利用高非线性光纤(HNLF)中的交叉相位调制(XPM)效应实现归零(RZ)码到非归零(NRZ)码的转换方案,讨论了RZ信号的占空比对转换后NRZ码性能的影响。转换后NRZ码的性能受输入RZ信号占空比的影响,当RZ信号占空比在30%~50%范围内可实现较好地转换。同时,实验实现了码率为10 Gb/s、占空比为33%的RZ码到NRZ码的转换,对比了连续探测光的原始谱和展宽谱,给出了转换前后信号的典型眼图和误码率(BER)特性。结果显示,在误码率为 10^{-9} 时,由RZ码转换到NRZ码引入的功率代价不到1 dB。进一步的实验验证了这种方案在大于160 Gb/s或更高码率下的可行性。

关键词 光纤通信;码型转换;交叉相位调制;高非线性光纤;归零码;非归零码

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0406005

All-Optical RZ to NRZ Format Conversion Based on Fiber Cross-Phase Modulation

Meng Xiaojun Yan Lianshan Pan Wei Luo Bin Yi Anlin Li Liguang

(Center for Information Photonics and Communications, School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract All-optical RZ to NRZ format conversion based on cross-phase modulation in the high-nonlinearity fiber is numerically simulated. Performances of converted NRZ signals from RZ data streams with different duty cycles are analyzed and compared. Results indicate that the duty cycle of RZ data does affect the converted NRZ signal, with a rational value between 30% and 50%. Meanwhile, RZ to NRZ format conversion is experimentally demonstrated at 10 Gb/s data rate with 33% duty cycle. Signal spectrum before and after HNLF, typical eye diagrams and bit-error-rate (BER) are measured. Less than power penalty 1 dB is obtained in bit error rate 10^{-9} after the format conversion. Further experimental results confirm the feasibility in 160 Gb/s high-speed systems.

Key words optical fiber communication; format conversion; cross-phase modulation (XPM); highly nonlinear fiber; return-to-zero (RZ) code; non-return-to-zero (NRZ) code

OCIS codes 060.2330; 060.4370; 060.1155; 060.4080

1 引 言

随着各种宽带业务的迅猛增加,对通信系统容量的要求也日益增加,高速电子技术发展难以完全适应这一需求,因此全光通信将成为通信技术发展的必然趋势。另一方面,目前通信中广泛应用的码型包括归零码(RZ)和非归零码(NRZ)以及各种相

位键控码型,而在整个通信系统中多种码型的并存现状对相互之间能够“按需”转换提出挑战。因此,实现全光码型转换将成为未来大容量、高速全光网络^[1]的一种关键技术。RZ码因脉冲只占据整个比特周期的一部分,有较高的偏振模色散(PMD)容限和非线性抵抗能力而广泛应用于较高速率的骨干网

收稿日期: 2010-06-29; **收到修改稿日期**: 2010-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(60972003)、教育部新世纪优秀人才计划(NCET-08-0821)和区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 孟小俊(1985—),女,硕士研究生,主要从事光纤通信与光信息处理方面的研究。E-mail: vivimxj@163.com

导师简介: 闫连山(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事光子学与通信、光纤传感与检测等方面的研究。

E-mail: lianshanyan@gmail.com

或时分复用(OTDM)网络中,而在低速率的接入网或者波分复用网络(WDM)中普遍采用 NRZ 码^[2~4]。和 RZ 码相比, NRZ 具有频谱效率高、码型简单和对时间抖动容忍性大等优点。所以,在高速的 OTDM 网和低速的 WDM 网络节点处实现 RZ 和 NRZ 的全光码型转换成为一种需要。

目前全光 RZ 到 NRZ 码型转换技术常见的方案有基于半导体光放大器(SOA)的交叉增益调制(XGM)和交叉相位调制(XPM)效应^[5~7]、基于 SOA 的非线性光纤环镜^[8]、基于 SOA 的干涉仪结构^[9,10]等方案。然而基于 SOA 全光码型转换方案由于受到载流子恢复时间的影响,在一定程度上限制了其在高速光通信系统中的应用。基于光纤的全光码型转换,因其超快的响应速度(皮秒量级)及其在超高速光纤通信系统(不小于 160 Gb/s)中潜在的应用而受到学者们的重视^[11]。目前报道的基于光纤非线性的全光码型转换方案主要有:基于干涉结构实现 RZ 和 NRZ 之间的转换^[12,13]、利用双抽运光纤光参变放大实现^[14]、基于光纤光参量放大的多通道全光 NRZ 和 RZ 码转换器^[15]、利用色散位移光纤(DSF)的 XPM 效应实现 RZ 到 NRZ 的转换^[16]以及利用基于 DSF 或者光子晶体光纤(PCF)实现偏振不敏感的 NRZ 到 RZ 的转换^[17]。

本文介绍和分析了利用 HNLF 和光带通滤波器(OBPF)组合实现 RZ 到 NRZ 的码型转换,通过数值仿真分析 RZ 到 NRZ 的码型转换原理和参数优化模型,并且从实验上证实此方案的可行性,取得了比较理想的实验结果。

2 工作原理和数值仿真

RZ 到 NRZ 转换原理如图 1 所示,图中 PC 为偏振控制器,OBPF 为光学滤波器。RZ 信号和探测

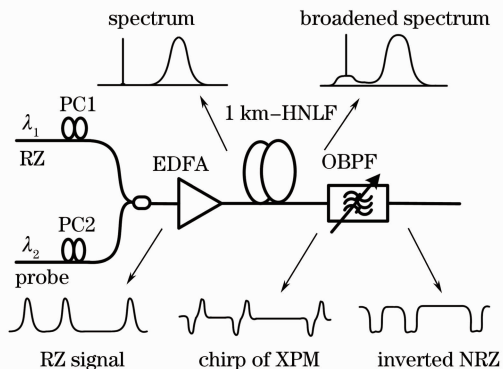


图 1 RZ 到 NRZ 转换基本原理

Fig. 1 Principle of RZ to NRZ format conversion

光同时注入到高非线性光纤(HNLF)中,由于 XPM 效应,探测光和信号光在 HNLF 中传输时均会获得一个与强度有关的非线性相移^[18]:

$$\varphi_j = \gamma L_{\text{eff}}(P_j + 2P_{3-j}), \quad j = 1, 2$$

式中 γ 是光纤非线性系数, L_{eff} 是 HNLF 的有效长度, P_j 是两路信号的光功率。

由于 XPM 效应,探测光对应于 RZ 信号的上升沿、中心和下降沿分别获得负啁啾、零啁啾和正啁啾,其在频域表现为探测光频谱的展宽。这种由 XPM 导致啁啾的现象在其他非线性介质中也广泛存在,并得到了一定的应用^[19]。需要指出的是:由于输入的探测光为连续光,其频谱的展宽主要由 XPM 产生,自相位调制(SPM)效应的贡献基本可以忽略。最后在 HNLF 的输出端用一个可调谐光滤波器滤出探测光光谱的中心分量,即零啁啾谱成分,就可以得到反向的 NRZ 码,同时数据转换到了探测光的波长上。

数值仿真中,RZ 信号光是码率为 10 Gb/s、码长为 $2^7 - 1$ 的高斯伪随机脉冲序列(PRBS),其峰值功率为 2.6 mW,探测光功率为 0.1 mW。HNLF 长为 1 km,非线性系数为 $30 / (\text{km} \cdot \text{W})$ 。图 2 分别给出了探测光信号的原始谱、展宽谱及滤波器滤出谱(转换后 NRZ 信号的谱),其中图 2(b)中虚线表示滤波器的形状与位置。

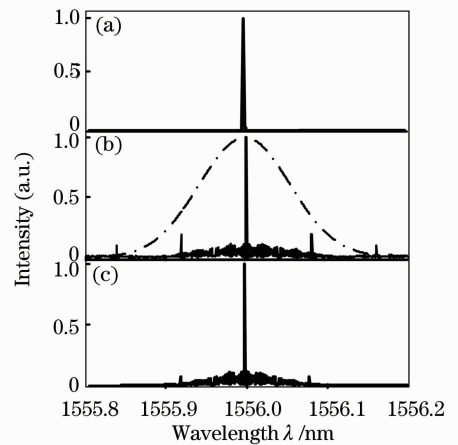


图 2 探测光归一化谱结构变化的仿真结果。(a)原始谱,(b)展宽谱,(c)滤波器滤出的光谱

Fig. 2 Simulation results of optical spectra of the probe light. (a) original spectrum, (b) broadened spectrum, (c) output spectrum after the OBPF

为了进一步了解 RZ 到 NRZ 全光码型转换器的性能,我们分析了不同占空比的 RZ 信号对转换器性能的影响。图 3 分别给出了输入峰值功率一定时,不同占空比的 RZ 码的 Q 值;占空比不同的 RZ 信号所对应转换后 NRZ 信号的 Q 值及其典型的眼

图；啾啾为 1、占空比不同 RZ 信号对应转换后 NRZ 信号的 Q 值。

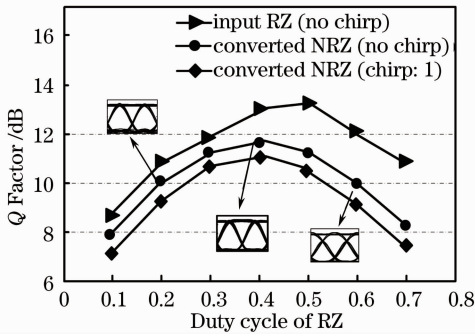


图 3 不同占空比的 RZ 转换成 NRZ 码的 Q 值
Fig. 3 Q factor (in dB) of converted RZ to NRZ signals with different duty cycles

从图中可以看到当占空比在 30%~50% 范围内时,可以实现较好的转换。RZ 的占空比过大或者过小都会影响转换结果。这主要是因为探测光谱的展宽由 RZ 信号光脉冲的功率和形状共同决定,尤其是脉冲上升和下降的时间。随着 RZ 信号光脉冲占空比的增加,脉冲上升和下降的时间反而减小,尤其是当出现连“1”信号时更为明显,这使得 HNLf 中由 XPM 效应引起的探测光谱的展宽有所减少。RZ 脉冲上升和下降时间的减小,使得脉冲中间的区域越来越平坦。由于脉冲中间的平坦区对连续的探测光光谱的展宽没有贡献,从整体效应上反而影响了探测光谱的展宽,从而使得转换后的 NRZ 码性能下降。从图 3 中可以看出信号的啾啾对转换后 NRZ 码型的 Q 值影响不大。

3 实验及其结果

图 4 给出了基于光纤 XPM 效应实现 RZ 码到 NRZ 码转换的实验结构图。

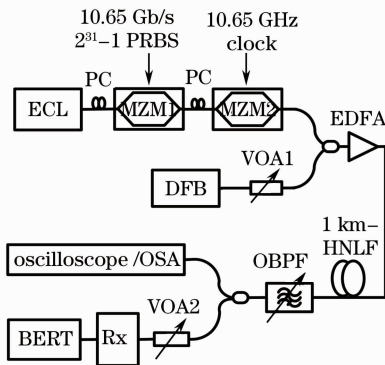


图 4 RZ 到 NRZ 码型转换实验装置图
Fig. 4 Experimental setup of all-optical format conversion from RZ to NRZ

由外腔调谐激光器(ECL)产生波长为 1553.42 nm 的连续光,先后经过长度为 $2^{31}-1$,速率为 10.65 Gb/s 的非归零伪随机码和 10.65 GHz 的时钟(clock)信号的调制,产生脉宽约为 33 ps 的 RZ 光信号。得到的 RZ 信号与波长为 1558.44 nm 的连续探测光一同注入大功率掺铒光纤放大器(EDFA),并放大至约 26.2 dBm。随后经放大的 RZ 信号和连续探测光同时注入到长度为 1 km,非线性系数为 $30 /(\text{km}\cdot\text{W})$ 的 HNLf 中^[20]。由于 XPM 效应,获得连续探测光频谱展宽的宽,图 5(a),(b)分别给出了连续探测光的原始谱和展宽谱。在 HNLf 的输出端,用带宽为 0.15 nm 的光滤波器滤出展宽探测光谱的中心频率分量,即得到转换后的 NRZ 信号。图 5(c)给出了转换后 NRZ 信号的频谱。在图 6 中分别给出了输入 RZ 信号和转换后 NRZ 信号的眼图。

从图 6(b)可以清晰的看到,本文方案较好地实

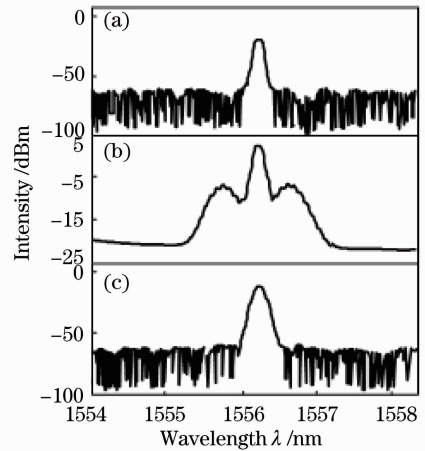


图 5 探测光光谱结构图的变化。(a)探测光原始谱,(b)经过 HNLf 后探测光展宽谱,(c)滤波器滤出探测光光谱

Fig. 5 Spectrum of probe obtained from the experiment. (a) original spectrum of probe, (b) broaden spectrum of probe after HNLf, (c) probe spectrum from the filter

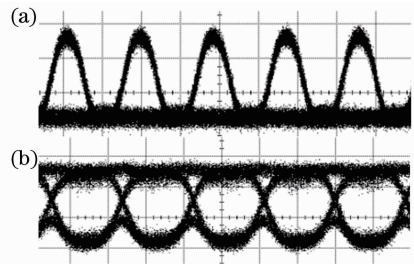


图 6 (a) RZ 眼图,(b)转换后 NRZ 眼图
Fig. 6 Measured eye diagrams of (a) original RZ signal, (b) converted NRZ signal

现了 RZ 码到 NRZ 码的转换。为了进一步分析转换器的性能,图 7 给出了输入 RZ 信号和转换后 NRZ 信号的误码率(BER) R_{BE} 特性。从图中可以看出,转换过程中引入的功率(数据反转)代价不到 1 dB。

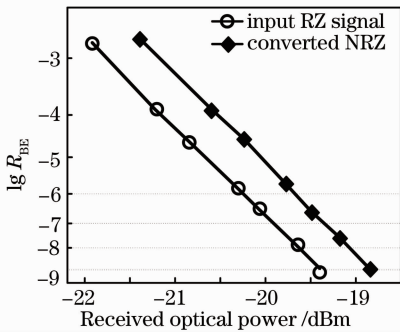


图 7 RZ 和 NRZ 的误码率特性

Fig. 7 BER characteristic of RZ and NRZ

另外,我们还间接地验证了本文方案在 160 Gb/s 系统中的可行性。实验装置如图 8 所示,由锁模激光器(MLLD)产生的重复频率为 10 GHz,脉冲宽度约为 2.5 ps 的短脉冲序列,经由一个马赫-曾德尔(MZ)干涉仪复用。通过调节 MZ 干涉仪中两路信号的延时(OVL),两相邻短脉冲信号部分可以看作码率约为 200 Gb/s 的信号。图 9 给出了转换前后的波形图。从图中可以看出,本文方案原理上基本能够实现 160 Gb/s 系统中 RZ 码到 NRZ 码的转换。需要指出的是,由于受示波器光学探测带宽的限制(65 GHz),实验结果中显现的输入脉冲的宽度不够准确,其实际脉冲宽度约为 2.5 ps(由自相关仪测得)。实验结果说明此方案可以实现更高速率的码型转换。

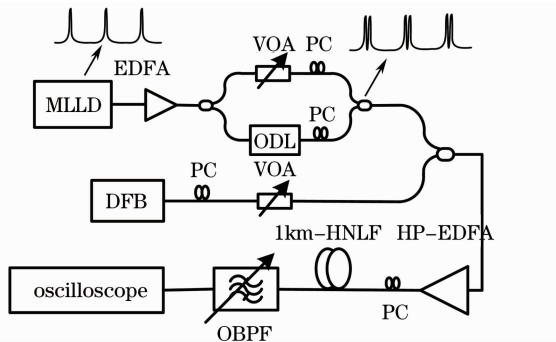


图 8 高速 RZ 到 NRZ 转换实验图

Fig. 8 Conversion of RZ to NRZ of high speed

4 结 论

从数值计算角度模拟了基于光纤 XPM 效应实现 RZ 到 NRZ 转换的方案,分析了不同占空比 RZ

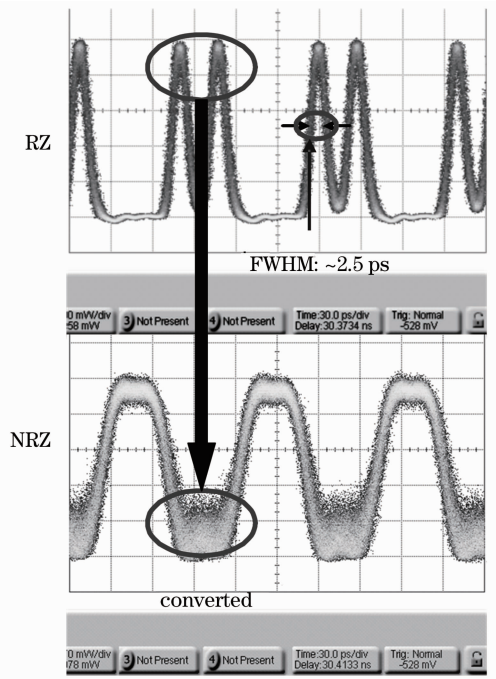


图 9 高速码型转换波形图

Fig. 9 Waveform of high-speed format conversion

输入信号对转换后 NRZ 信号的性能影响,最后从实验上验证了方案的有效性。相比其他方案,本文方案具有结构相对简单,功率代价较低、响应速度快、与现有光纤通信系统兼容性好等特点。实际上本文方案中转换的码率主要受光纤非线性响应时间的限制。由于光纤的非线性响应时间为皮秒级,因此从理论上来说,本文方案完全可以扩展到 10Gb/s 以上的系统^[11,16]。采用锁模激光器作为光源的实验结果也验证了这一点。

参 考 文 献

- Zhang Chengyun, He Zhanjiang, Xu Huiliang. Present status and development trends of optical communication technologies [J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2004, **41**(3): 26~29
- 张成云, 何振江, 徐慧梁等. 光通信技术的发展现状和趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(3): 26~29
- K. Enser, K. Petermann. Performance of RZ versus NRZ transmission on standard single-mode fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(3): 443~445
- M. I. Hayee, A. E. Willner. NRZ versus RZ in 10~40 Gb/s dispersion-managed WDM transmission systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8): 991~993
- Fabrizio Forghieri, Prucnal, R. W. Tkach *et al.*. RZ versus NRZ in nonlinear WDM systems[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 1035~1037
- Dong Jianji, Zhang Xinliang, Xu Jing *et al.*. 40 Gb/s all-optical NRZ to RZ format conversion using single SOA assisted by optical bandpass filter [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 2907~2914
- Wang Weiqiang, Zhang Jianguo, Yao Baoli *et al.*. A novel scheme of all-optical RZ to NRZ format converter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1837~1841
- 王伟强, 张建国, 姚保利等. 一种全光归零码到非归零码变换的

- 新技术方案[J]. 光子学报, 2008, **37**(9): 1837~1841
- 7 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Ding Yuan *et al.*. High speed wavelength conversion and format conversion based on semiconductor optical amplifier and optical filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 940~944
董建绩, 张新亮, 丁园等. 利用半导体光放大器和滤波器组合实现高速波长转换和码型转换[J]. 中国激光, 2007, **34**(7): 940~944
- 8 Chung Ghiu Lee, Yun Jong Kim, Chul Soo Park. Experimental demonstration of 10 Gb/s data format conversions between nRZ and RZ using SOA-loop-mirror [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(5): 834~841
- 9 Zhen Xueyan, Guan Kejian, Ye Peida *et al.*. Dynamic characteristics of a Mach-Zehnder wavelength converter [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1): 93~99
郑学彦, 管克俭, 叶培大, 马赫-曾德尔型全光波长变换器的动态特性分析[J]. 光学学报, 1999, **19**(1): 93~99
- 10 Lei Xu, Bing C. Wang, Varghese Baby *et al.*. All-optical data format conversion between RZ and NRZ based on a Mach-Zehnder interferometric wavelength converter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(2): 308~310
- 11 Pantelis Velanas, Adonis Bogris, Apostolos Argyris *et al.*. High speed all optical first-and second-order differentiators based on cross-phase modulation in fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **18**(15): 3269~3276
- 12 Jianjun Yu, Gee Kung Chang, John Barry *et al.*. 40 Gb/s signal format conversion from NRZ to RZ using a Mach-Zehnder delay interferometer [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**(4-6): 419~422
- 13 Yu Yu, Xinliang Zhang, Dexiu Huang *et al.*. 20 Gb/s all-optical format conversions from RZ signals with different duty cycles to NRZ signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(14): 1027~1029
- 14 Jiang Yang, Yu Jinlong, Zhang Aixu *et al.*. All-optical multi-wavelength conversion and data format conversion based on dual-pumped fiber optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1051~1056
江阳, 于晋龙, 张爱旭等. 双抽运光纤光参变放大的全光多波长变换与码型转换[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1051~1056
- 15 Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Multi-channel all-optical non-return-to-zero to return-to-zero format converter based on fiber optical parametric amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2962~2965
韩丙辰, 于晋龙, 罗俊等. 基于光纤光参量放大的多通道全光非归零和归零码转换器 [J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2962~2965
- 16 S. H. Lee, K. K. Chow, C. Shu. Spectral filtering from a cross-phase modulated signal for RZ to NRZ format and wavelength conversion [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(5): 1710~1715
- 17 C. H. Kwok, Chinlon Lin. Polarization-insensitive all-optical NRZ-to-RZ format conversion by spectral filtering of a cross phase modulation broadened signal spectrum [J]. *IEEE J. Sel. Top. In Quant. Electron.*, 2006, **12**(3): 451~458
- 18 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang *et al.* Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 166~168
Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及其应用[M]. 贾东方等. 译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 166~168
- 19 Ye Yabin, Zhen Xiaoping, Zhang Hanyi *et al.*. Chirp performance of converted signal in wavelength conversion based on cross-gain modulation in SOA [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 436~440
叶亚斌, 郑小平, 张汉一等. 基于半导体光放大器中交叉增益调制效应的波长转换啁啾特性的分析 [J]. 光学学报, 2002, **22**(4): 436~440
- 20 A. L. Yi, L. S. Yan, B. Luo *et al.*. Self-phase-modulation based all-optical regeneration of PDM signals using a single section of highly nonlinear fiber [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(7): 7150~7156