

强色散管理抑制 160 Gb/s 光时分复用传输系统中的带内四波混频效应

吴 婷^{1,2} 李唐军^{1,2} 贾楠^{1,2} 孙剑^{1,2}

(¹北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

²北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044

摘要 在 160 Gb/s 光时分复用(OTDM)系统中,带内四波混频(IFWM)效应是影响系统性能的因素之一。分析了 IFWM 效应对 160 Gb/s 光时分复用传输系统性能的影响,对采用强色散管理的方法抑制 IFWM 效应进行了理论分析和实验验证。传输链路采用大色散斜率的标准单模光纤(SSMF)和色散、色散斜率补偿光纤混合的色散管理方式,能够很好地抑制“1”比特处的脉冲幅度变化和“0”比特处产生的寄生脉冲,提升系统的整体性能。在不需要前向纠错和功率代价小于 3.6 dB 的条件下,实现了较长时间(时间大于 2 h)的无误码(误码率小于 10^{-12})传输。

关键词 光通信;时分复用;带内四波混频;强色散管理;无误码传输

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201340.0105002

Suppression of Intra-Channel Four-Wave Mixing by Strong Dispersion Management in 160 Gb/s OTDM Transmission

Wu Ting^{1,2} Li Tangjun^{1,2} Jia Nan^{1,2} Sun Jian^{1,2}

¹Key Laboratory of All-Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

²Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Intra-channel four-wave mixing (IFWM) affects system performance in 160 Gb/s optical time division multiplexing (OTDM) communication systems. The effect of IFWM on the performance of a 160 Gb/s OTDM transmission system is analyzed. Strong dispersion management to suppress the detrimental effects of IFWM is theoretically presented and experimentally verified. The results show that amplitude fluctuation at "1" bit and ghost pulses at "0" bit are well suppressed by strong dispersion management in transmission link. The whole system performance is improved. Stable error-free (bit error rate less than 10^{-12}) transmission over 107.6 km after more than 2 h is achieved without forward-error correction, and the power penalty is about 3.6 dB.

Key words optical communications; optical time-division multiplexing; intra-channel four-wave mixing; strong dispersion management; error-free transmission

OCIS codes 060.2330; 060.2360; 060.2400; 060.4230; 060.4370

1 引 言

宽带网接入、高清网络电视、云计算和多媒体广播技术都要求通信系统向容量更大的方向发展。光

时分复用(OTDM)技术是提高传输系统容量的途径之一。在文献[1,2]中,分别通过偏振复用差分正交相移键控和单偏振开关键控的方法已经实现了

收稿日期: 2012-07-09; 收到修改稿日期: 2012-09-15

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z258)、国家自然科学基金(60807003,61177012)和中央高校基本科研业务费专项资金(2009YJS005)资助课题。

作者简介: 吴 婷(1988—),女,硕士研究生,主要从事高速光通信、光信号处理和光网络等方面的研究。

E-mail: tingwu560@163.com

导师简介: 李唐军(1956—),女,教授、博士生导师,主要从事高速光通信、全光网络、光纤传感、光信号处理和光电子器件等方面的研究。E-mail: tjli@bjtu.edu.cn

5.1 Tb/s光时分复用信号的无误码传输和1.28 Tb/s光时分复用信号的无误码传输。随着传输速率的提高,同一波长信道内码元间的非线性效应越来越明显,带内非线性效应成为高速长距离光传输系统的主要限制因素。带内非线性效应分为带内四波混频(IFWM)效应和带内交叉相位调制(IXPM)效应^[3,4]。前者在信号“1”比特处产生脉冲幅度变化,“0”比特处产生寄生脉冲,使眼开度变小,带宽利用率降低;后者导致脉冲的非线性相移,造成时间抖动^[5]。在强色散管理系统中,传输链路上脉冲被迅速展宽、脉冲幅度变小,IXPM对啁啾归零码(CRZ)脉冲的影响相对较小^[4,6]。因此对于功率更高的单信道系统,IFWM成为影响传输性能的主要因素。文献[7]中提到用低非线性和低色散斜率的特殊光纤降低IFWM效应产生的不利影响,但实现方式比较复杂、成本较高;文献[3~13]中研究了一些降低带内非线性效应的方法,但仅限于在40 Gb/s或80 Gb/s的光时分复用系统中。由于利用优化的色散混合补偿方法,具有实现简单、成本低且效果好的优点,因此研究在160 Gb/s光时分复用传输系统中,采用强色散管理的方法抑制IFWM效应是必要的。

本文从理论上分析了IFWM效应的影响并在实验中采用了强色散管理方法来抑制IFWM效应。在160 Gb/s光时分复用背靠背(BIB)和107 km传输系统中,采用强色散管理的方法实现了稳定的无误码传输。

2 理论分析

在强色散管理系统中,光脉冲方程为^[10]

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{D(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + S(Z) |q|^2 q = 0, \quad (1)$$

式中 $D(Z)$ 为光纤色散系数, $S(Z)$ 为非线性系数,包括光纤损耗和放大增益, q 为脉冲包络振幅, Z 为传输距离, T 为传输时间。脉冲尾部的重叠引起了IFWM效应,假设光脉冲为高斯函数,则信号的第 j 个脉冲的表达式为

$$q_j = \sqrt{\frac{2E}{\sqrt{\pi}\tau}} \exp\left[-2(1-iC)\left(\frac{T-jT_s}{\tau}\right)^2 + i\theta_j\right], \quad (2)$$

式中 $j=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, T_s 为脉冲周期,第 j 个脉冲的中心位置为 $T=jT_s$, E 和 $\theta_j(Z)$ 分别为脉冲的能量和相位, C 为脉冲啁啾系数, τ 为脉宽。IFWM谐振发生在 $T=jT_s$ 位置,相邻脉冲 q_m, q_n 和 q_{m+n} 谐振引

起脉冲幅度变化和寄生脉冲的产生。当寄生脉冲较小时,得到IFWM效应的方程为^[11,14]

$$i \frac{\partial q_0}{\partial Z} + \frac{D(Z)}{2} \frac{\partial^2 q_0}{\partial T^2} = -S(Z) \sum_{m,n} q_m q_n q_{m+n}^*, \quad (3)$$

(3)式忽略自相位调制(SPM)效应产生的影响。令 $R(Z, T) = -S(Z) \sum_{m,n} q_m q_n q_{m+n}^*$, 将(2)式代入(3)式得到在频域上的寄生脉冲表达式为^[11,14]

$$\bar{q}_0(Z, \omega) = -i \int_0^Z \bar{R}(\zeta, \omega) \times \exp\left\{i \frac{\omega^2}{2} [D(\zeta) - D(Z)]\right\} d\zeta, \quad (4)$$

式中 $\bar{R}(Z, \omega)$ 是 $R(Z, T)$ 的傅里叶变换,即

$$\bar{R}(Z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(Z, T) \exp(i\omega T) dT.$$

$$\bar{R}(Z, \omega) = -S(Z) \sqrt{\frac{2E^3}{\pi \sqrt{\pi(3-iC)\tau}}} \exp(i\Theta_{m,n}), \quad (5)$$

式中

$$\Theta_{m,n} = i(\theta_m + \theta_n - \theta_{m+n}) - 4\left(\frac{T_s}{\tau}\right)^2 (m^2 + mn + n^2 + immC) + \frac{2}{3-iC} \left[(m+n) \frac{2T_s}{\tau} + i \frac{\omega}{4} \tau \right]^2. \quad (6)$$

由(4)式可以看出微扰 $\bar{R}(Z, \omega)$ 直接决定了寄生脉冲的产生。由(5)式可知, $\bar{R}(Z, \omega)$ 与 $\sqrt{C\tau}$ 成反比。啁啾越大,微扰越小,从而能够降低寄生脉冲的增长。采用窄的输入脉冲,光谱宽度大,在传输链路中越易受到色散影响,越易被展宽。因此在高速OTDM传输系统中,设计大的累积色散的强色散管理系统,可以有效地抑制IFWM效应^[11~14]。

3 实验装置

160 Gb/s OTDM信号传输107.6 km的实验系统由发射部分、传输链路、接收部分3部分组成,实验装置如图1所示。其中PRBS为伪随机位序列,PSL为皮秒光纤激光器,MZM为马赫-曾德尔调制器,PC为偏振控制器,EDFA为掺铒光纤放大器,PS为时延线,FHG为四倍频,D&DSCF为色散和色散斜率补偿光纤,SSMF为标准单模光纤,EAM为电吸收调制器,BERT为误码率测试仪,OSC为示波器。

发射端采用Calmar公司的皮秒脉冲光纤激光器(PSL-10-1T, CALMAR OPTCOM Model),产

生重复频率为 10 GHz,中心波长为 1554.3 nm,半峰全宽为 1.5 ps,时间抖动小于 75 fs 的超短光脉冲序列,光脉冲经过马赫-曾德尔型铌酸锂光外调制器进行 10 Gb/s 的伪随机位序列数据调制后,用自制的光纤时延线在光链路的输入端对各支路信号经过

不同量的时延,对脉冲进行间插复用成 160 Gb/s OTDM 信号。160 Gb/s OTDM 信号经过 EDFA1 放大后送入 107.6 km 的传输链路上。经过 EDFA1 放大后信号的功率为 13 dBm,整个传输链路包括所有连接部分的插入损耗为 30 dB。

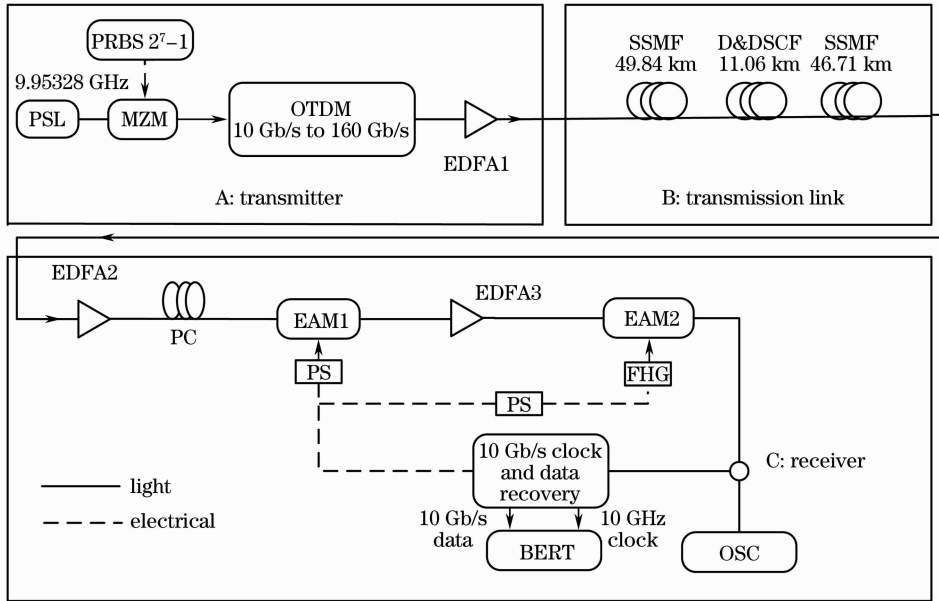


图 1 160 Gb/s OTDM 实验系统

Fig. 1 Experimental setup of 160 Gb/s OTDM

为了验证在传输链路上采用强色散管理方法对IFWM效应的抑制,实验中采用了两种不同的传输方案进行比较,如图 2 和图 3 所示。图 2 没有采用强色散管理方法,而图 3 采用了强色散管理方法。未采用强色散管理方法的 107.6 km 传输链路包括 4 个部分,长度为 7.5 km 的色散位移光纤(DSF),长度为 46.35 km 和 43.44 km 的 SSMF,以及长度为

10.32 km 的 D&DSCF。采用了强色散管理方法的整个 107.6 km 传输链路包括 3 个部分(如图 1 中 B 部分所示),长度为 49.84 km 和 46.71 km 的 SSMF,以及长度为 11.06 km 的 D&DSCF,D&DSCF 用来补偿两段 SSMF 产生的色散和部分的色散斜率。通过调整末尾部分普通单模光纤的长度来使系统总色散为 0,提高了色散与色散斜率补偿精度。用

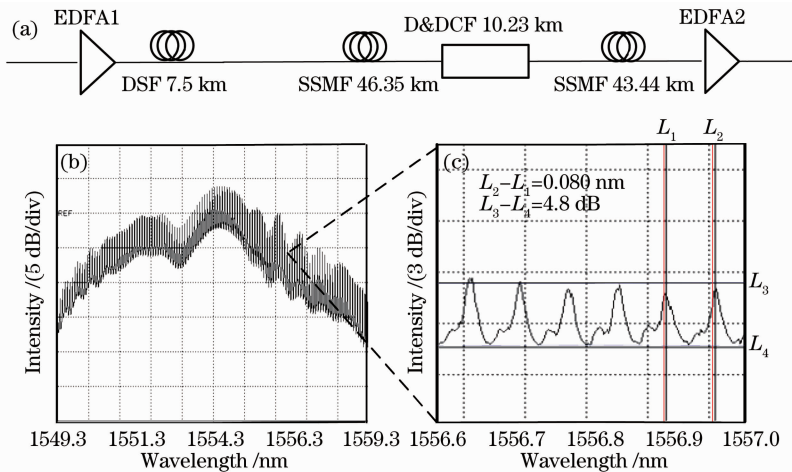


图 2 无强色散管理的 (a) 传输链路, (b) 光谱图和 (c) 光谱展开图

Fig. 2 (a) Transmission link, (b) spectrum and (c) stretching spectrum of pulses without strongly dispersion-managed transmission

CD400 测量色散及色散斜率,在中心波长 1554.3 nm 处,DSF 的色散和色散斜率几乎为 0,D&DSCF 的色散和色散斜率分别为 $-149.342 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 和 $-4.897 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,SSMF 的色散和色散斜率分别为 $16.382 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 和 $0.056 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。经过 107.6 km 传输链路和 EDFA2 放大后,信号的功率为 9 dBm。图 2(a)为无强色散管理的传输链路,(b)为 $16 \times 10 \text{ Gb/s}$ 的光时分复用信号经过了没有采用强色散管理传输链路后的光谱图,其在波长为 1556.6 ~ 1557.0 nm 之间的光谱展开图如图 2(b)所示,相邻信道的间隔为 10 GHz。IFWM 是脉冲之间的四波混频(FWM),对于经历非线性的“弥散”脉冲,由于交叠脉冲中不同频谱分量之间的 FWM,其中一部分场会产生离散频移,即产生了新

的频率分量,偏移后的场就会以一个幅度较小的脉冲身份出现^[15]。从图 2(b)可见,相邻信道之间产生了新的频率分量,且在此作用过程中,净能量和动量是守恒的,导致了原有频率分量的功率降低,信噪比严重下降。图 3(a)为强色散管理的传输链路,(b)为 SSMF 和 D&DSCF 混合色散图谱,(c)为 $16 \times 10 \text{ Gb/s}$ 的光时分复用信号经过了采用强色散管理传输链路后的光谱图,其在波长为 1556.6 ~ 1557.0 nm 之间的光谱展开图如图 3(d)所示,相邻信道的间隔为 10 GHz。从图 3(c)和(d)中可以看出,经过强色散管理后信号的光谱没有发生变化,相邻信道之间也没有产生新的频率分量,能够有效地抑制 IFWM 效应。

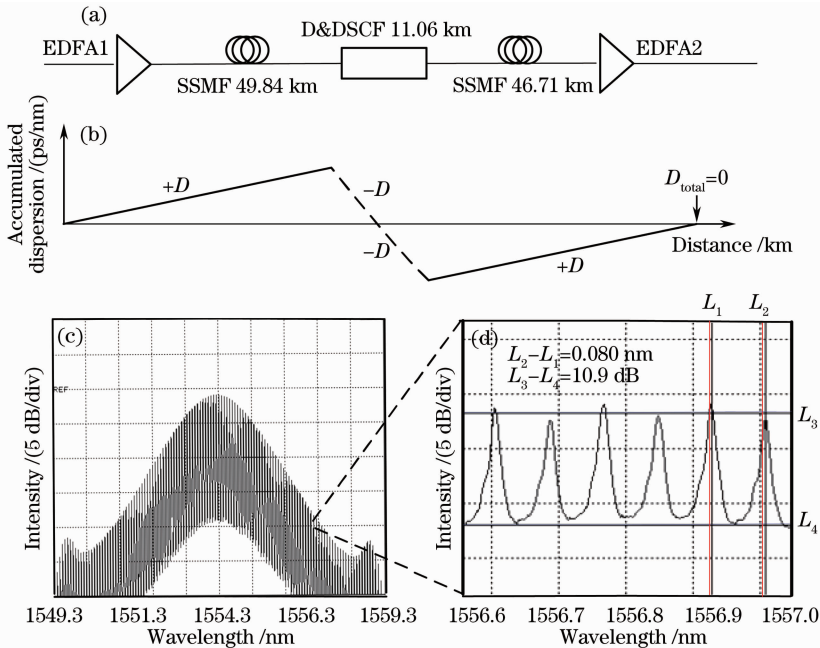


图 3 强色散管理的(a)传输链路,(b) SSMF 和 D&DSCF 混合色散图谱,(c)光谱图和(d)光谱展开图
Fig. 3 (a) Transmission link, (b) dispersion map for SSMF paired with D&DSCF, (c) spectrum and (d) stretching spectrum of pulses with strongly dispersion-managed transmission

接收端由 40 GHz 的 EAM, 10 GHz 的电吸收调制器和基于锁相环(PLL)的 10 GHz 时钟恢复模块组成。采用图 1 中 C 部分的结构可以同时实现 160 Gb/s 信号的解复用和时钟恢复。在 10 GHz EAM1 前放置偏振控制器,控制接收部分输入信号的偏振态。信号经过 EAM1 产生较大的插入损耗,EDFA3 用来补偿 EAM1 产生的插入损耗并将信号放大到最佳工作功率。放大后的信号再经过 40 GHz EAM2 解复用出 10 Gb/s 信号,解复用后的信号分成两路:一路用于示波器观测,实验采用 500 GHz 采样示波器(PSO-100, EXFO)进行观测,

另一路进入时钟恢复模块提取基频时钟。

4 实验结果分析

图 4 为 160 Gb/s 复用信号的眼图,从图中可以看出,经过强色散管理后的 160 Gb/s 复用信号眼图仍比较清晰,眼开度较大。而未经过强色散管理后的复用信号,由于受到 IFWM 效应引起的幅度抖动和影子脉冲的影响,眼图严重恶化,根本无法提取基频时钟信号,更无法进行解复用。图 5 为 160 Gb/s 信号背靠背传输和传输 107.6 km 这两种情况下的 16 个信道的比特误码率(BER)的平均值。

在传输 107.6 km 的链路上采用了强色散管理的方法抑制 IFWM 效应。从图中可以看出,在误码率为 10^{-12} 的情况下,160 Gb/s OTDM 信号背靠背传输的接收灵敏度为 -16.65 dBm,在传输 107.6 km 后,接收灵敏度为 -13.05 dBm,由 EDFA 中的放大自发辐射(ASE)和两个 EAM 解复用所引起的功率代价为 3.6 dB。在整个测量过程中,系统稳定后不再

需要对其做任何调整,可以保证系统较长时间无误码传输。实验室自制复用器有很好的温度稳定性与偏振不敏感性、传输链路采用强色散管理的方法、各个工作点功率的优化以及基于锁相环原理的时钟提取,这些共同改进了系统的性能,实现了 160 Gb/s 光时分复用信号 107.6 km 传输系统稳定的无误码传输。

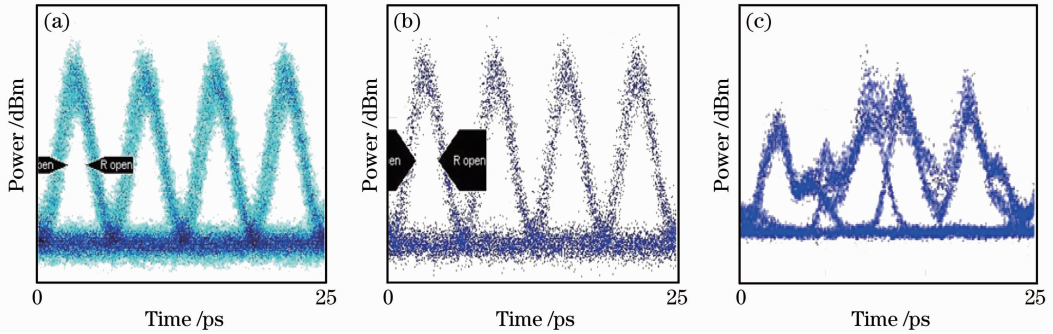


图 4 160 Gb/s 复用信号(a)经过 107.6 km 链路前、(b)经过和(c)未经过的强色散管理后的眼图

Fig. 4 Eye diagrams of multiplexed 160 Gbit/s signal (a) before lanching into the 107.6 km fiber; after 107.6 km (b) with and (c) without strongly dispersion-managed transmission

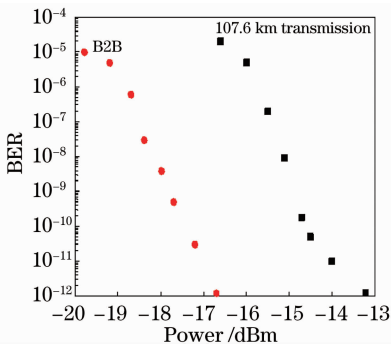


图 5 接收功率与误码率之间的关系曲线

Fig. 5 Relation curve of received power and BER

5 结 论

对采用强色散管理的方法抑制 IFWM 效应进行了理论分析和实验验证。理论分析表明,在超高速光时分复用系统中,采用大累积色散的色散管理方法可以有效地抑制 IFWM 效应,从而能够实现更高速率、更远距离的传输。实验结果表明,在超短脉冲序列的传输链路中,采用大色散斜率的 SSMF 和色散、色散斜率补偿光纤混合色散管理方式,可以简单、成本低且有效地抑制了 IFWM 效应,在不需要前向纠错和功率代价小于 3.6 dB 条件下,实现了 160 Gb/s 107.6 km 稳定的无误码传输。

参 考 文 献

1 M. H. C. Hansen, G. Michael, K. O. Leif *et al.*

Demonstration of 5.1 Tbit/s data capacity on a single wavelength channel[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 1438~1443
 2 M. H. C. Hansen, L. K. Oxenlowe, M. Galili *et al.*. 1.28 Tbit/s single-polarisation OTDM-OOK data generation and demux[J]. *IEEE Electron. Lett.*, 2009, **45**(5): 280~281
 3 T. Yu, E. A. Golovchenko, A. N. Pillipetskii *et al.*. Dispersion-managed soliton interactions in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11): 793~795
 4 M. Matsumoto. Analysis of interaction between stretched pulses propagating in dispersion-managed fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(3): 373~375
 5 Chen Xin, Ma Xiaohong, Zhang Hanyi *et al.*. Intra-channel nonlinear effects in high speed optical transmission system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 929~934
 陈 新, 马晓红, 张汉一等. 超高速光传输系统的带内非线性作用[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 929~934
 6 P. V. Mamyashev, N. A. Mamyasheva. Pulse-overlapped dispersion-managed data transmission and intrachannel four-wave mixing[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1454~1456
 7 S. N. Knudsen, M. O. Pedersen, N. L. Grüner. Optimization of dispersion compensating fibers for cabled long-haul applications [J]. *IEEE Electron. Lett.*, 2000, **36**(25): 2067~2068
 8 B. Zhu, X. L. Yang. The influence of higher-order effects on the transmission performances of the ultra-short soliton pulses and its suppression method[J]. *Sci. China Ser. F-Inf. Sci.*, 2010, **53**(1): 182~190
 9 B. Zhu, X. L. Yang. Fiber soliton-form 3R regenerator and its performance analysis[J]. *Sci. China. Ser. F-Inf. Sci.*, 2007, **50**(2): 241~250
 10 H. Sugahara, H. Kato, T. Inoue *et al.*. Optimal dispersion management for a wavelength division multiplexed optical soliton transmission system[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(9): 1547~1559
 11 S. G. Park, A. H. Gnauck, J. M. Wiesenfeld *et al.*. 40 Gbit/s transmission over multiple 120 km spans of conventional single-mode fiber using highly dispersed pulse [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(8): 1085~1087
 12 T. Inoue, A. Maruta. Suppression of nonlinear intrachannel

- interactions between return-to-zero pulses in dispersion-managed optical transmission systems[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(3): 440~447
- 13 Cai Ju, Mao Yu, Lü Hui *et al.*. Intrachannel nonlinear effects in strongly dispersion compensated high speed optical communication system[J]. *Chines Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(5): 584~589
蔡 炬, 毛 宇, 吕 辉 等. 强色散控制光传输系统中的信道内非线性效应[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(5): 584~589
- 14 T. Inoue, A. Maruta. Reduction of intra-channel fourwave mixing in strongly dispersion-managed line for high speed OTDM system in nonlinear guided waves and their applications[J]. *Opt. Soc. Am. Trends in Optics and Photonics Series*, 2001, **55**(59): 211~ 213
- 15 I. P. Kaminow, T. Li. *Optical Fiber Telecommunications IV* [M]. Yu Li Transl. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications press, 2006. 210~217
甘民乐, 厉鼎毅. *光纤通信*[M]. 余 力 译. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006. 210~217
- 14 T. Inoue, A. Maruta. Reduction of intra-channel fourwave

栏目编辑: 王晓玻