

文章编号: 0258-7025(2006)09-1230-04

1.6 Tbit/s(40×40 Gbit/s)光通信传输系统

张琦, 陈明华, 石颖, 陈宏伟, 邹明渊, 谢世钟

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 在国家自然科学基金网(NSFCNet)上已实现由400 km×10 Gbit/s传输链路直接升级的一路400 km×40 Gbit/s光传输实验的基础上,采用自行研制的40×40 Gbit/s载波抑制归零(CS-RZ)码多波长光发送源,进行了160 km的1.6 Tbit/s(40×40 Gbit/s)波分复用(WDM)光传输实验。实验结果表明,对于常规中短距离10 Gbit/s传输链路可以直接升级至40 Gbit/s。但是由于40 Gbit/s传输系统的色散容限小于60 ps/nm,而且传输光纤与色散补偿模块的色散斜率不匹配,要实现40通道40 Gbit/s的传输,必须对40个信道分别进行精细的色散补偿。这也说明,对于宽带的40 Gbit/s多波长系统,有必要优化设计或更新传输链路。

关键词 光通信;波分复用;色散补偿;非线性效应;载波抑制归零码

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Demonstration of 1.6 Tbit/s (40×40 Gbit/s) Wavelength Division Multiplexing 160 km Straight Line Transmission Experiments

ZHANG Qi, CHEN Ming-hua, SHI Ying,

CHEN Hong-wei, ZOU Ming-yuan, XIE Shi-zhong

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A 40×40 Gbit/s multi-wavelength carrier-suppressed return-to-zero (CS-RZ) format optical transmitter is designed. Based on this transmitter and the experiment of one channel 400 km×40 Gbit/s optical transmission which was upgraded from the National Natural Science Foundation of China Net (NSFCNet, 400 km×10 Gbit/s), a 40×40 Gbit/s wavelength division multiplexing (WDM) optical transmission is also realized. The results show that it is feasible to upgrade a middle and short haul 10 Gbit/s WDM optical transmission system to 40 Gbit/s. However, the chromatic dispersion must be compensated precisely in every channel, since the dispersion tolerance of 40 Gbit/s system is lower than 60 ps/nm and the dispersion slope of the transmission optical fiber does not match well the dispersion slope of the dispersion compensation module. The results also show that the system optimization or the links renewal is necessary for 40 Gbit/s WDM system.

Key words optical communication; wavelength division multiplexing; dispersion compensation; nonlinear effects; carrier-suppressed return-to-zero format

1 引言

随着核心路由器端口速率的提高和10 Gbit/s光传输设备的广泛应用,将原有10 Gbit/s波分复用(WDM)光传输系统升级到40 Gbit/s波分复用系统的需求逐渐显现。我们已经在国家自然科学基金网

(NSFCNet)的400 km×10 Gbit/s波分复用光传输链路上直接将10 Gbit/s系统升级实现了一路40 Gbit/s载波抑制归零(CS-RZ)信号格式的光传输^[1],实验中没有出现误码率平台。在此基础上,本文将进一步进行1.6 Tbit/s(40×40 Gbit/s)光传输

收稿日期:2005-11-02;收到修改稿日期:2006-04-18

基金项目:国家自然科学基金(60310174,90104003),国家863计划(2003AA103620)资助项目。

作者简介:张琦(1978—),女,河南郑州人,清华大学电子工程系信息光电子学研究所博士研究生,主要从事高速大容量光通信方面的研究。E-mail:zqi00@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介:谢世钟(1947—),男,广西人,清华大学电子工程系通信研究所所长,教授,博士生导师,主要从事光纤通信与宽带光纤网络方面的研究。E-mail:xsz-dee@mail.tsinghua.edu.cn

系统实验,研究实际线路上宽带的40 Gbit/s波分复用系统面临的关键问题。

2 传输系统实验

图 1 为实验建立的 40×40 Gbit/s 光传输系统

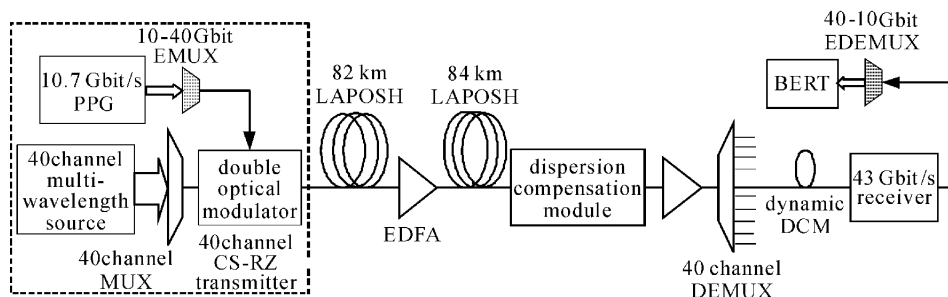


图 1 1.6 Tbit/s(40×40 Gbit/s)光纤传输系统实验图

Fig. 1 Experimental setup of 1.6 Tbit/s (40×40 Gbit/s) optical fiber transmission system

图中采用 10.7 Gbit/s 伪随机码发生器(PPG),经过电复用单元(EMUX),产生 43 Gbit/s 电信号,同时,40 个 C 波段波长的连续激光经波分复用器(MUX)复用后,输入双级光调制器,经过电光转换将电信号转化为 43 Gbit/s 载波抑制归零码,产生 40 信道密集波分复用的载波抑制归零码光传送信号。将它输入 82 km 武汉长飞公司的大保实光纤(LAPOSH)的传输,单信道入纤功率为 $-3 \sim -4$ dBm,入纤总光功率约为 12 dBm。在 C 波段,其光纤色散值约为 $6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,色散斜率约为 $0.08 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,偏振模色散(PMD)系数为 $0.04 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。输出光信号经 C 波段掺铒光纤放大器(EDFA)放大后再经过 84 km 大保实光纤传输。其后,光信号经色散补偿光纤(DCF)构成的色散补偿模块(DCM)进行初步色散补偿,并通过光解复用器(DEMUX)进行光波长信道的解复用,然后送入 40 Gbit/s 光接收机。其中色散补偿模块在 1545 nm 的色散值为 $-1314.61 \text{ ps}/\text{nm}$,损耗为 78 dB。

为了保证系统升级的可操作性,链路中的双级光调制器和掺铒光纤放大器都直接采用原来 10 Gbit/s 系统中的器件,并且实验中没有采用复杂的色散管理和配置,而是直接采用传统的 10 Gbit/s 系统的色散配置。由于 40 Gbit/s 系统色散容限非常小^[2~8],而且由于实验条件限制,采用的色散补偿模块与光纤的色散斜率并不匹配,因此,必须在 40 Gbit/s 光信号经过解复用后、注入光接收机前,对每一信道进行精细的色散补偿。在实验中,采用

的结构图。它是基于单信道比特率为 40 Gbit/s 的密集波分复用(DWDM)传输系统,采用自行研制的 40×40 Gbit/s 载波抑制归零码多波长光发送源,它的所有信道均集中于广泛商用的 C 波段(1529~1560 nm),工作波长符合国际电信联盟(ITU-T)标准,其通信间隔为 100 GHz。

不同长度普通单模光纤段组成的不同色散值的可调节色散匹配模块进行精细的色散补偿,可调节色散匹配模块的色散调节精度为 $1.7 \text{ ps}/\text{nm}$,可以较好地实现链路的色散匹配。

同时,由于 40 Gbit/s 系统有着低非线性容限的限制^[9],实验中采用了非线性容限较大的载波抑制归零码,并根据已进行的由国家自然科学基金网直接升级的 $400 \text{ km} \times 40 \text{ Gbit/s}$ 载波抑制归零光传输实验中的研究成果^[1],对整个光纤传输链路中的光功率配置进行了优化,以降低系统中信道内非线性的影响。考虑到大保实光纤的偏振模色散系数非常小,对于中短距离传输,偏振模色散效应不会对系统性能造成什么影响,因此在系统中没有进行偏振模色散补偿。在实验过程中也未见偏振模色散效应的影响。

在接收机端,43 Gbit/s 光信号经过光接收机电转换后经电解复用器解复用为 10.7 Gbit/s,输入误码测试单元,进行误码测试。

3 实验结果与讨论

图 2(a)和(b)分别是输入和输出传输链路的光谱图。由图可知,波分复用的信道间隔为 100 GHz,谱效率为 $0.4 \text{ Bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。输入前,40 个通道的功率差小于 1.5 dB,由于实验中采用的掺铒光纤放大器的增益谱不平坦,其输出信号各通道差达 6 dB。这将导致各通路的光信噪比有一定差别,但是由于实

验中的传输链路不是很长,光信噪比不是限制该系统传输性能的主要因素。

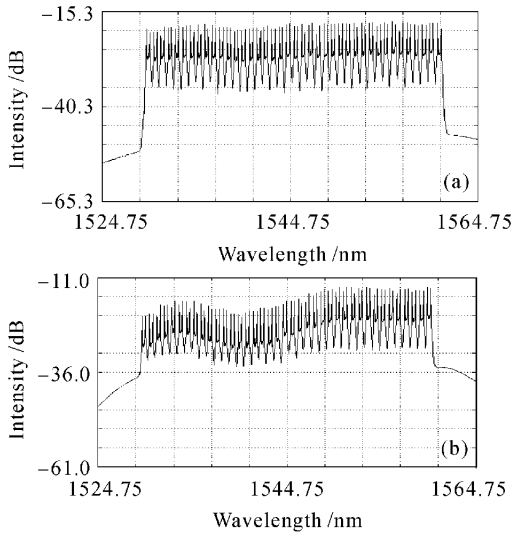


图2 传输前(a)和传输后(b)的40通道载波抑制归零码光谱图

Fig. 2 Spectra of 40 channel CS-RZ signal before (a) and after (b) 160 km transmission

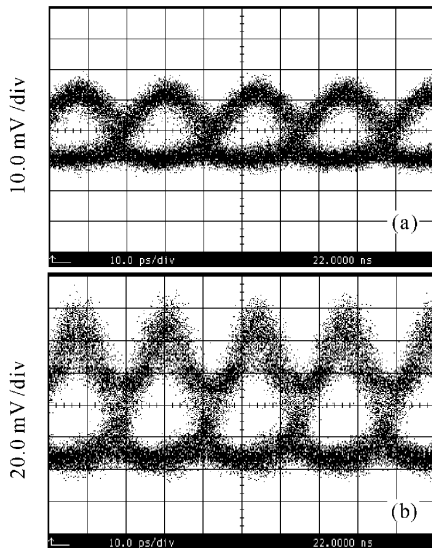


图3 传输前(a)和传输后(b)的光信号眼图

Fig. 3 Eye diagrams of the optical signals before (a) and after (b) 160 km transmission

图3(a)和(b)分别是其中一条通道输入和输出传输链路的光信号眼图。传输后的眼图较传输前张开是因为载波抑制归零码本身有一定的啁啾,传输后由于信道内采用可调节色散匹配模块进行精细的色散补偿,选取最佳匹配使得啁啾得到一定压缩。

图4是各波长信道信号传输后的误码率(BER)。由图4可知,各信道的误码率在 $1 \times 10^{-8} \sim$

1×10^{-9} 之间,远低于前向纠错(FEC)的纠错阈值 1×10^{-4} 。造成各信道误码率存在差异的根源在于掺铒光纤放大器的增益谱不平坦引起的光信噪比不同和色散匹配模块不能完全补偿系统的残余色散。图5是系统中各个信道的精确色散补偿值。

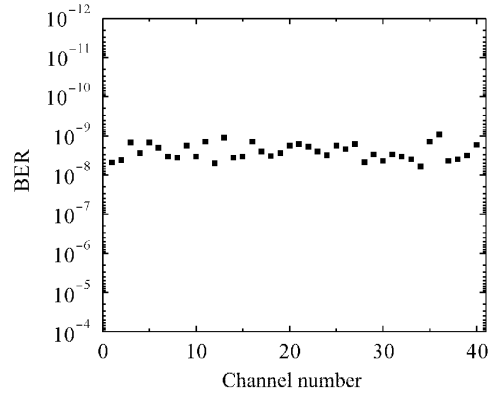


图4 各波长信道信号传输后的误码率

Fig. 4 BER of 40 channel signals

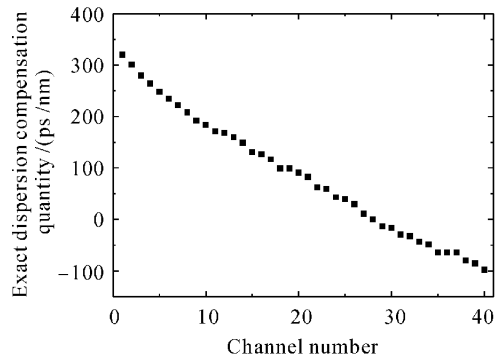


图5 各波长信道的精细色散匹配值

Fig. 5 Exact dispersion compensation quantities for 40 channels

4 结论

基于自行研制的 40×40 Gbit/s多波长载波抑制归零码光发送源进行了160 km的1.6 Tbit/s光传输初步实验。该多波长发送源波长范围为C波段(1529~1560 nm),波长间隔为100 GHz,谱效率达0.4 Bit/(s·Hz)。研究表明,40 Gbit/s多波长系统的传输成本要高于10 Gbit/s多波长系统,对于宽带的40 Gbit/s波分复用系统,有必要优化设计或更新传输链路。

参考文献

1 Chen Minghua, Ma Nan, Shi Ying *et al.*. Experimental investigation of 40 Gb/s transmission based on 10 Gb/s transmission links [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, 32(4): 529~

- 531
陈明华,马楠,石颖等. 基于 10 Gb/s 传输链路的 40 Gb/s 光传输实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(4):529~531
- 2 Zhongwei Tan, Yan Liu, Yong Chen *et al.*. 8 × 10 Gb/s transmission system over 1500 km on G. 652 fiber dispersion compensated by chirped fiber gratings [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(8):441~443
- 3 M. Serbay, C. Wree, W. Rosenkranz. Comparison of six different RZ-DQPSK transmitter set-ups regarding their tolerance towards fibre impairments in 8 × 40 Gb/s WDM-systems [C]. 2004 LEOS Workshop on 1~2 July, 2004, 9~10
- 4 T. Hirooka, M. J. Ablowitz. Analysis of timing and amplitude jitter due to intrachannel dispersion-managed pulse interactions [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(5):633~635
- 5 A. Mecozzi, C. B. Clausen, M. Shtaif. Analysis of intrachannel nonlinear effects in highly dispersed optical pulse transmission [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(4):392~394
- 6 R. I. Killey, H. J. Thiele, V. Mikhailov *et al.*. Reduction of intrachannel nonlinear distortion in 40-Gb/s-based WDM transmission over standard fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12):1624~1626
- 7 Y. Miyamoto, A. Hirano, K. Yonenaga *et al.*. 320 Gbit/s (8 × 40 Gbit/s) WDM transmission over 367 km with 120 km repeater spacing using carrier-suppressed return-to-zero format [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(23):2041~2042
- 8 B. Dany, O. Leclerc, F. Neddard *et al.*. Optimization of 40 Gbit/s dispersion maps for long-haul WDM transmissions with up to 0.4 bit/s/Hz spectral efficiency [C]. OFC 2001, 2001. TuN5-1~TuN5-3
- 9 Sun Xueming, Zhang Huijian, Zuo Meng *et al.*. Impacts of polarization mode dispersion and nonlinear effect on 40 Gbit/s dense wavelength division multiplexing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10):1363~1369
孙学明,张慧剑,左萌等. 偏振模色散及非线性效应对 40 Gbit/s 密集波分复用系统的影响[J]. 光学学报, 2004, **24**(10):1363~1369