

文章编号: 0258-7025(2005)04-0529-03

# 基于 10 Gb/s 传输链路的 40 Gb/s 光传输实验研究

陈明华, 马楠, 石颖, 邹明渊, 谢世钟

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 基于中国自然科学基金网(NSFCNet)的 400 km×10 Gb/s 光传输链路实现了 40 Gb/s 光传输,没有出现误码率(BER)平台,说明在常规的中短距离 10 Gb/s 系统可以直接升级至 40 Gb/s 系统,而不需要升级传输链路。但是,由于相对 10 Gb/s 系统而言 40 Gb/s 系统的色散容限非常小,在升级时必须精确补偿原有链路的色散,在接收机前一般需要加可调色散补偿单元。同时,还分析了光纤注入功率对系统性能的影响,结果表明在设计这种由 10 Gb/s 向 40 Gb/s 升级的系统时,不仅要考虑信号带宽增加带来信噪比要求的提高,而且必须充分考虑光纤非线性的影响。

**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** TN929.11 **文献标识码** A

## Experimental Investigation of 40 Gb/s Transmission Based on 10 Gb/s Transmission Links

CHEN Ming-hua, MA Nan, SHI Ying, ZOU Ming-yuan, XIE Shi-zhong

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

**Abstract** A 40 Gb/s optical transmission based on the NSFCNet 400 km×10 Gb/s system is realized without any bit error rate (BER) floor. It is shown that typical 10 Gb/s systems of middle or short distance can be upgraded to 40 Gb/s directly without change the transmission links. However, the chromatic dispersion must be compensated precisely when the system upgrades, because the dispersion tolerance of 40 Gb/s systems is much lower than that of 10 Gb/s system. Meanwhile, the influence of the optical power injected into the fiber links is also investigated. The results show that the effect of the fiber nonlinearity must be considered as well as the improvement of optical signal to noise ratio (OSNR) due to the enlarged signal bandwidth when the bit rate of transmission system is upgraded from 10 Gb/s to 40 Gb/s.

**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 Gb/s 光传输设备的广泛应用,将原有 10 Gb/s 光传输系统升级到 40 Gb/s 系统的需求逐渐显现。但是,40 Gb/s 光传输面临着低色散容限、低非线性容限和偏振模色散等多种限制<sup>[1~3]</sup>。传统传输实验中一般选用低色散和高有效截面的新型光纤,或者通过复杂的色散管理技术来抑制 40 Gb/s 光信号在传输过程中产生的信道内非线性效应<sup>[4~8]</sup>。然而,采用新型光纤和复杂的色散管理技术均可能由于成本原因而阻碍系统的升级。本文将采用已建的中国自然科学基金

网(NSFCNet)中长为 400 km 的 10 Gb/s 光传输链路,进行 40 Gb/s 光信号传输实验,研究实际线路上 10 Gb/s 系统升级到 40 Gb/s 面临的关键问题。

## 2 传输系统实验

采用 NSFCNet 中已建立的 400 km 的 10 Gb/s 光传输系统,并将它升级为 40 Gb/s,基于这个系统对其传输性能进行了深入的研究。图 1 是实验建立的 40 Gb/s 光传输系统的结构图,图中采用 10.7 Gb/s 伪随机码发生器(PPG),经过电复用单元(EMUX),产生 43 Gb/s 电信号,经过电光转换将电

收稿日期: 2004-03-04; 收到修改稿日期: 2004-07-01

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

作者简介: 陈明华(1971—),男,江苏武进人,清华大学电子工程系信息光电子学研究所副教授,主要从事高速大容量光通信方面的研究。E-mail: chenmh@tsinghua.edu.cn

信号转化为波长为1557.43 Gb/s载波抑制归零码(CS-RZ)。通过640 GHz带宽的 Ando 光取样示波器和分辨率达0.01 nm的光谱仪,测得其眼图与光谱图如图2所示。光信号进入5段光传输链路,这5段链路均是由80 km普通单模光纤(SMF)、色散补偿光纤(DCF)构成的色散补偿模块(DCM)和C波段掺铒光纤放大器单(EDFA)元构成,值得注意的是,考虑到未来40 Gb/s技术的实用性,这个传输链路是直接从10 Gb/s系统中升级而成,而未对链路中光纤、光放大器和色散模块等单元器件进行任何更新,也未对系统作复杂的优化配置。在这种传输链

路中,其残余色散达210 ps/nm。对于色散容限为近1000 ps/nm的10 Gb/s系统来说,它不会严重影响系统性能。但是由于40 Gb/s系统的色散容限小于60 ps/nm,因此在光接收机前放置了由光纤布拉格光栅(FBG)制成的可调色散补偿模块。考虑到可调谐色散的补偿范围为-300~-700 ps/nm,链路中还放置10 km单模光纤以平衡整个传输链路的残余色散量。在接收机端,43 Gb/s光信号经过光接收机光电转换后经电复用器解复用为10.7 Gb/s,输入误码测试单元,进行误码测试。

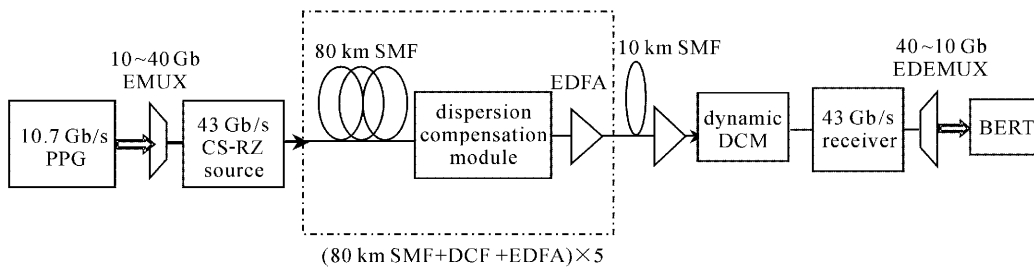


图1 传输系统实验图  
Fig. 1 Experimental setup

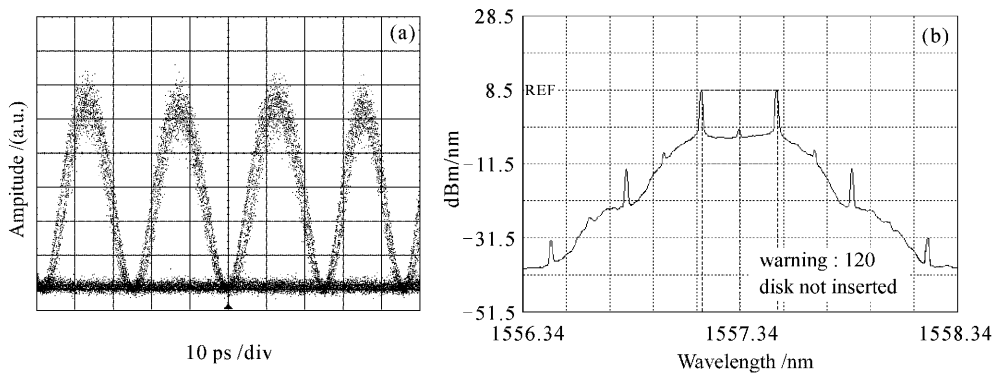


图2 43 Gb/s CS-RZ眼图(a)和光谱图(b)  
Fig. 2 Eye diagram (a) and spectrum (b) of 43 Gb/s CS-RZ signal

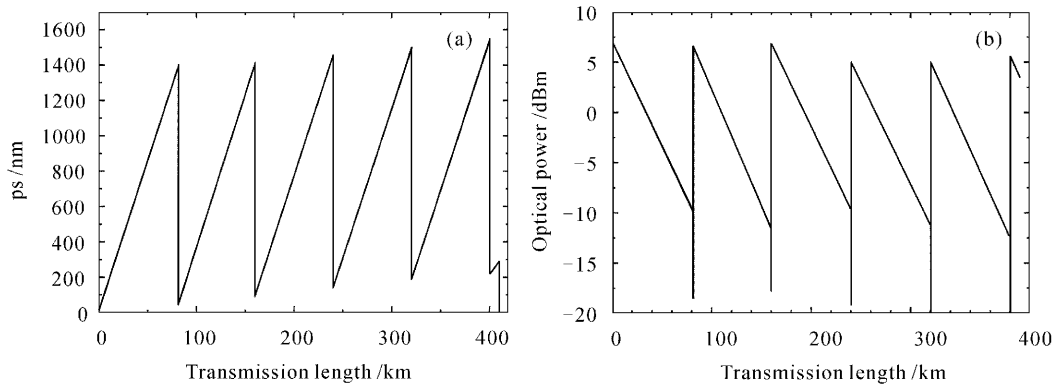


图3 实验系统的色散图(a)和功率分布图(b)  
Fig. 3 Schematic diagram of dispersion (a) and power distribution (b) in the experiment

实验系统的色散图和功率图如图 3 所示。为了保证系统升级的可操作性,实验直接采用传统的 10 Gb/s 系统的色散配置。同时,从功率分布图可以看出,在整个光纤传输链路中光功率配置的最大值均小于 7 dBm,与传统 10 Gb/s 系统相比,相对较低。这是为了降低系统中的信道内非线性的影响。

图 4 是 43 Gb/s 载波抑制归零码光信号经过 410 km 单模光纤传输链路后测得的误码率曲线,其功率代价约为 2.3 dB,而没有明显的误码率(BER)平台。由此可见,原有的中短距 10 Gb/s 光传输系统完全有可能直接升级到 40 Gb/s 系统。

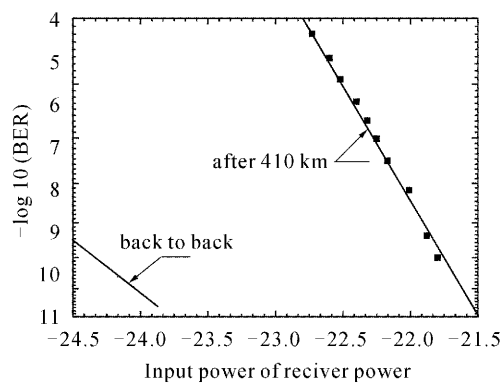


图 4 43 Gb/s CS-RZ 光信号经过 400 km 光纤链路传输后的误码率

Fig. 4 Bit error rate of 43 Gb/s CS-RZ optical signal after the transmission of 400 km links

### 3 光纤非线性的影响

对建立的 40 Gb/s 传输系统的非线性特性进行了实验研究。通过改变注入光纤链路的功率,测得 40 Gb/s 传输系统的误码率与注入信号的光功率之间的关系,如图 5 所示。由图中可以看出,系统传输误码率并非随着注入光纤链路的光功率单调变化。随着注入光功率的增加,系统误码率逐渐减小达到最小值后又逐渐增加。以系统误码率最低点为界,图左部为光信噪比主导区,在此区域,影响系统误码率性能的主要参数是光信噪比,随着注入光纤链路中的光功率增加,接收机端的光信噪比也将逐渐增加,从而系统误码率也逐渐下降。而图右部为非线性主导区,随着注入光纤链路的光功率进一步增加,虽然接收机端的光信噪比还将继续增加,但系统中非线性效应也将增加,从而引起系统误码率的增加。由此可见,该系统最佳的光纤注入功率为 7~8 dBm,远小于常用的 10 Gb/s 系统,在 10 Gb/s 系统向 40 Gb/s 系统升级过程中,必须充分考虑光纤

非线性的影响。

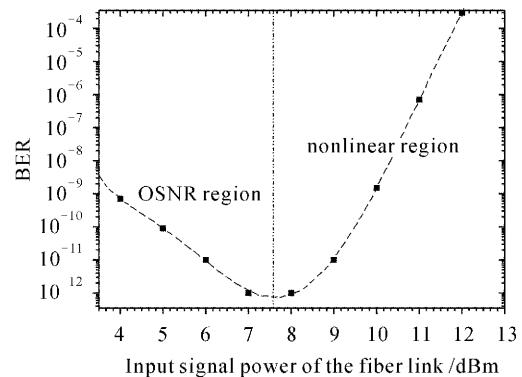


图 5 误码率与注入光链路的光功率之间的关系

Fig. 5 Relationship between BER and input optical power

## 4 结 论

在 NSFCNet 的 400 km × 10 Gb/s 波分复用(WDM)光传输链路上实现了一路 40 Gb/s 载波抑制归零信号格式的光传输,且实验中没有出现误码率平台。这一实验表明,在设计由 10 Gb/s 升级而成的 40 Gb/s 系统时,在考虑信号带宽增加带来的信噪比要求的提高,精确补偿原有链路的色散,以及充分考虑光纤非线性影响的情况下,常规中短距离 10 Gb/s 系统的传输链路就可以直接应用于 40 Gb/s 系统。

### 参 考 文 献

- 1 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
- 2 R. I. Killely, H. J. Thiele, V. Mikhailov. 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
- 3 A. Mecozzi, C. B. Clausen, M. Shtaf. Analysis of intrachannel nonlinear effects in highly dispersed optical pulse transmission [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(4): 392~394
- 4 Y. Su, G. Raybon, L. K. Wickham *et al.*. 40-Gb/s transmission over 2000 km of nonzero-dispersion fiber using 100-km amplifier spacing [C]. *OFC 2002*, 2002. 609~611
- 5 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
- 6 J-X. Cai, M. Nissov, C. R. Davidson *et al.*. Ultra long-haul high-speed transmission [C]. *ECOC 2002*, 2002. 10. 1. 1
- 7 B. Bakhshi, M. Vaa, E. A. Golvchenko *et al.*. Comparison of CRZ, RZ and NRZ modulation formats in a 64 × 12.3 Gb/s WDM transmission experiment over 9000 km [C]. *OFC 2001*, 2001. WF4-1
- 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