

高精度色散管理实现 160 Gb/s 光时分复用 信号 100 km 稳定无误码传输

池剑锋^{1,2} 李唐军^{1,2} 贾楠^{1,2} 钟康平^{1,2} 王目光^{1,2} 罗定嘉^{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 100 km 光时分复用(OTDM)通信系统中,色散是影响系统性能的主要因素。为减小由此带来的信号波形的失真,进行了理论分析与研究,并做了相应的实验加以验证。传输链路采用混合补偿方式,精确补偿色散与色散斜率,优化传输链路色散图谱及各点工作功率,有效抑制非线性效应,实现高精度色散管理,提升系统的整体性能。使用 500 GHz 高速示波器,调整传输链路光纤的长度精确到 10 m,并准确观测各环节实验结果。系统既没有使用前向纠错技术,也没有进行偏振模色散(PMD)补偿,仅仅通过高精度色散管理实现了 160 Gb/s 光时分复用信号 100.25 km 稳定无误码(误码率小于 10^{-12})传输。

关键词 光通信;光时分复用;高精度色散管理;色散;色散斜率

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0105003

High-Precision Chromatic Dispersion Management Completes 160 Gb/s OTDM Signal 100-km Stable Error-Free Transmission

Chi Jianfeng^{1,2} Li Tangjun^{1,2} Jia Nan^{1,2} Zhong Kangping^{1,2}

Wang Muguang^{1,2} Luo Dingjia^{1,2}

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

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

Abstract Chromatic dispersion is a major factor affecting system performance in 160 Gb/s 100 km optical time-division multiplexing (OTDM) communication systems. To reduce the resulting signal waveform distorted, theoretical analysis and research are done, which is verified by the corresponding experiments. Hybrid dispersion compensation is adopted in the transmission link. Chromatic dispersion and chromatic dispersion slope are compensated accurately. The optimized chromatic dispersion map of the transmission link and working power of the various points are optimized. So nonlinear effects are suppressed effectively. The whole system performance is improved by high precision dispersion management. The fiber length is adjusted to the order of 10 m with 500 GHz optical sampling oscilloscope, and the experimental results are observed accurately. Neither the forward error correction technology nor the compensation of polarization mode dispersion(PMD) is used. 100.25 km stable error-free (bit error rate is smaller than 10^{-12}) transmission of 160 Gb/s OTDM signal is achieved through high-precision chromatic dispersion management.

收稿日期: 2010-06-07; **收到修改稿日期**: 2010-07-25

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z258)、国家自然科学基金(60807003)、中央高校基本科研业务费专项资金(北京交通大学 2009YJS005)和北京市科技新星计划(2008A026)资助课题。

作者简介: 池剑锋(1982—),男,硕士研究生,主要从事高速光通信和光信号处理及光网络等方面的研究。

E-mail: hrcjf@126.com

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

Key words optical communications; optical time-division multiplexing; high-precision chromatic dispersion management; chromatic dispersion; chromatic dispersion slope

OCIS codes 060.2330; 060.2360; 060.4230; 060.4256; 060.2400

1 引 言

高速大容量通信是未来光通信发展的方向。近些年来,光时分复用(OTDM)技术以其自身的优越性成为提高光纤通信系统容量的有效途径。与波分复用(WDM)系统相比,OTDM系统只需要单一光源,成本较低,不需要复杂的波长管理,不存在WDM系统各路功率叠加而产生的四波混频串扰和拉曼散射,相同比特距离积的色散和色散斜率补偿难度较WDM系统低,易于实现大容量光纤通信网。然而色散是影响OTDM系统传输性能的主要因素^[1,2],它在传输中对数据比特流产生了有害的“时域展宽”效应。色散是个累积效应,不仅随传输距离线性增加,而且更为重要的是,它对系统的影响随着数据速率增加呈平方律增长。无色散补偿时,功率代价会随着传输距离增加呈幂指数增长^[3]。为了实现信号高速率、长距离传输^[4,5],必须对系统进行精确的色散管理。

2 高精度色散管理

在任何非空介质及波导结构中,不同频率的电磁波其传输速率不同。色散是材料的折射率和波导的传输参数都与频率相关这一特性产生的。信号的不同频率成分在光纤中以不同的速率传输,其色散将导致脉冲展宽,色散斜率将引起脉冲变形。为了便于分析,在零色散波长 λ_0 对应频率 ω_0 处,对传播常数 β 进行泰勒级数展开

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6}\beta_3(\omega - \omega_0)^3 + \dots, \quad (1)$$

式中 $\beta_m = \left(\frac{d^m\beta}{d\omega^m}\right)_{\omega=\omega_0}$ ($m = 0, 1, 2, \dots$)。在大多数实际情况下, β_2 对群速度色散(GVD)效应起主要作用,当入射波长在零色散波长 λ_0 附近时,即 $\beta_2 \approx 0$ 时,则 β_3 对GVD效应起主要作用。非线性薛定谔方程描述了 β_2, β_3 产生的群速度色散效应,忽略非线性效应,其归一化振幅 $U(z, T)$ 方程为^[6]

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{j}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 U}{\partial T^3}, \quad (2)$$

(2)式可用傅里叶方法求解。其通解为

$$U(z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}(0, \omega) \times \exp\left(\frac{1}{2}\beta_2 z \omega^2 + \frac{j}{6}\beta_3 z \omega^3 - j\omega T\right) d\omega, \quad (3)$$

式中 $\tilde{U}(0, \omega)$ 是入射光场在 $z = 0$ 处的傅里叶变换,可表示为

$$\tilde{U}(0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(0, T) \exp(j\omega T) d\omega, \quad (4)$$

系统采用皮秒脉冲光纤激光器产生双曲正割脉冲,此时的入射波场 $U(0, T)$ 为

$$U(0, T) = \operatorname{sech}\left(\frac{T}{T_0}\right) \exp\left(-\frac{jT^2}{2T_0^2}\right), \quad (5)$$

经过长度为 z 的光纤后,输出光场为

$$U(z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}(0, \omega) \exp\left(\frac{1}{2}\beta_2 z \omega^2 + \frac{j}{6}\beta_3 z \omega^3 - j\omega T\right) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{1}{2}\beta_2 z \omega^2 + \frac{j}{6}\beta_3 z \omega^3 - j\omega T\right) \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{sech}\left(\frac{T}{T_0}\right) \exp\left(-\frac{jT^2}{2T_0^2}\right) \exp(j\omega T) dT d\omega, \quad (6)$$

式中的积分很难得到解析解,通过数值积分,得到近似解^[7]。当光纤长度为1 km,入射脉冲半峰全宽(FWHM)从1 ps变化到10 ps时,色散致脉冲展宽如图1所示。脉冲展宽与脉冲宽度呈非线性关系,当脉冲宽度小于2 ps时,脉冲展宽急剧增加。色散与光纤长度呈线性关系,实验中160 Gb/s光时分复用系统采用脉宽1.5 ps的短脉冲,100 m的普通单模光纤(SMF)造成约3 ps脉冲展宽,这已远远超出

传输系统所允许的范围;而在脉冲宽度大于6 ps低速传输系统中,1 km的普通单模光纤产生小于2 ps的脉冲展宽量,对系统的性能几乎不产生任何影响。实验中对光纤长度进行10 m量级的调节,相当于0.3 ps的色散调节量,对传输链路进行高精度的色散补偿。

实验采用短脉冲源,对应在频域上带宽比较宽,即使脉冲中心波长处的 β_2 为零,由 β_3 决定的高阶色

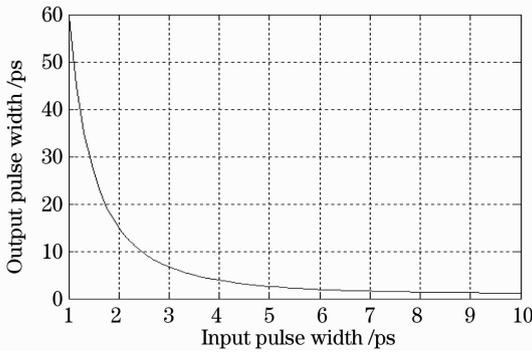


图1 色散致脉冲展宽与输入脉冲宽度的关系

Fig. 1 Relation between dispersion result in pulse broadening and input pulse width

散效应也会引起脉冲形状畸变^[8,9],在其边沿一侧附近形成非对称的振荡,使得信号的质量急剧下降。实验采用色散与色散斜率补偿光纤(D&.DSCF),同时对 SMF 传输链路的 β_2, β_3 进行精确补偿^[10],需要满足关系

$$\begin{cases} \beta_{2\text{SMF}} \cdot L_{\text{SMF}} + \beta_{2\text{DCF}} \cdot L_{\text{DCF}} = 0 \\ \beta_{3\text{SMF}} \cdot L_{\text{SMF}} + \beta_{3\text{DCF}} \cdot L_{\text{DCF}} = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

式中 β_2, β_3 与色散系数 D 及色散斜率 S 之间的关系为

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = \frac{-2\pi c}{\lambda^2} \beta_2, \quad (8)$$

$$S = \frac{dD}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{-2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \right) = \frac{4\pi^2 c^2}{\lambda^4} \beta_3 + \frac{4\pi c}{\lambda^3} \beta_2, \quad (9)$$

此时(7)式即变为

$$\begin{cases} D_{\text{SMF}} \cdot L_{\text{SMF}} + D_{\text{DCF}} \cdot L_{\text{DCF}} = 0 \\ S_{\text{SMF}} \cdot L_{\text{SMF}} + S_{\text{DCF}} \cdot L_{\text{DCF}} = 0 \end{cases}. \quad (10)$$

传输链路终端总的色散、色散斜率都为零,脉冲形状不发生改变,有效地保证了传输系统的整体性能。

传输链路有预补偿、后补偿与混合补偿三种补偿方式^[11]。若色散与色散斜率补偿光纤放置在前面进行预补偿:色散与色散斜率补偿光纤有很高的损耗,为了避免接收部分过低的信号电平需要在色散与色散斜率补偿光纤前加入放大器。然而,色散与色散斜率补偿光纤的横截面比普通单模光纤的四分之一还小,功率过大时容易产生非线性效应[自相位调制(SPM)],限制了注入色散与色散斜率补偿光纤的最大功率^[3,6,12]。注入受限的功率,经过 100 km 的传输后,信号的功率会很低,容易产生误码;若色散与色散斜率补偿光纤放置在最后面进行后补偿:前面累积的色散未能得到补偿,影响系统的传输性能;若色散与色散斜率补偿光纤放置在中间进行混合补偿,既能够确保注入传输链路的功率最

佳,不至于产生严重的非线性效应^[13],又能使前面累积的色散及时得到补偿,防止信号产生畸变。在预补偿方式中,非线性效应会使相邻的脉冲靠近,而后补偿方式刚好与其相反。在混合补偿方式中,非线性效应在原脉冲上产生很小的时间抖动,而且寄生脉冲的幅度也最小^[14]。所以传输链路采用图 2 色散图谱所示的混合补偿方式。此外,普通单模光纤色散值相对较小,不调整色散与色散斜率补偿光纤的长度,而是调整末尾部分普通单模光纤的长度来实现系统总色散为零,提高了色散与色散斜率补偿精度。

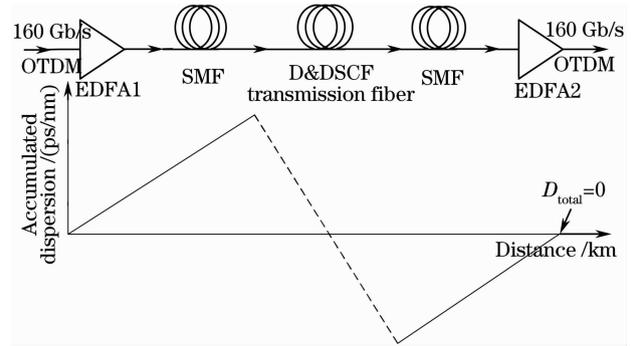


图2 色散图谱

Fig. 2 Dispersion map

综上所述,光纤长度 10 m 量级的调节、色散、色散斜率的精确补偿、色散图谱的优化,这些措施可共同实现高精度色散管理。

3 实验及其结果

使用普通单模光纤、色散与色散斜率补偿光纤组成 100 km 的传输链路。用 CD400 测量色散及色散斜率与中心波长的关系,其测量结果如图 3 所示。从图 3(a), (b) 可知,在中心波长 1554.35 nm 处,SMF 的色散、色散斜率分别为 16.71 ps/(nm·km) 和 0.0589 ps/(nm²·km);色散与色散斜率补偿光纤的色散、色散斜率分别为 -145.63 ps/(nm·km) 和 -0.4976 ps/(nm²·km)。代入色散、色散斜率补偿关系式(10)式进行计算得:普通单模光纤 89.93 km (两段分别为:46.42, 43.51 km),色散与色散斜率补偿光纤 10.32 km。调整光纤的长度精确到 10 m,组成 100.25 km 光纤传输链路。如图 3(c) 光纤传输链路(100.25 km)色散与色散斜率测量结果所示,传输链路的残余色散纹波非常小。

160 Gb/s OTDM 信号 100 km 传输实验系统由发射部分、传输链路、接收部分 3 部分组成,其系统结构如图 4 所示。

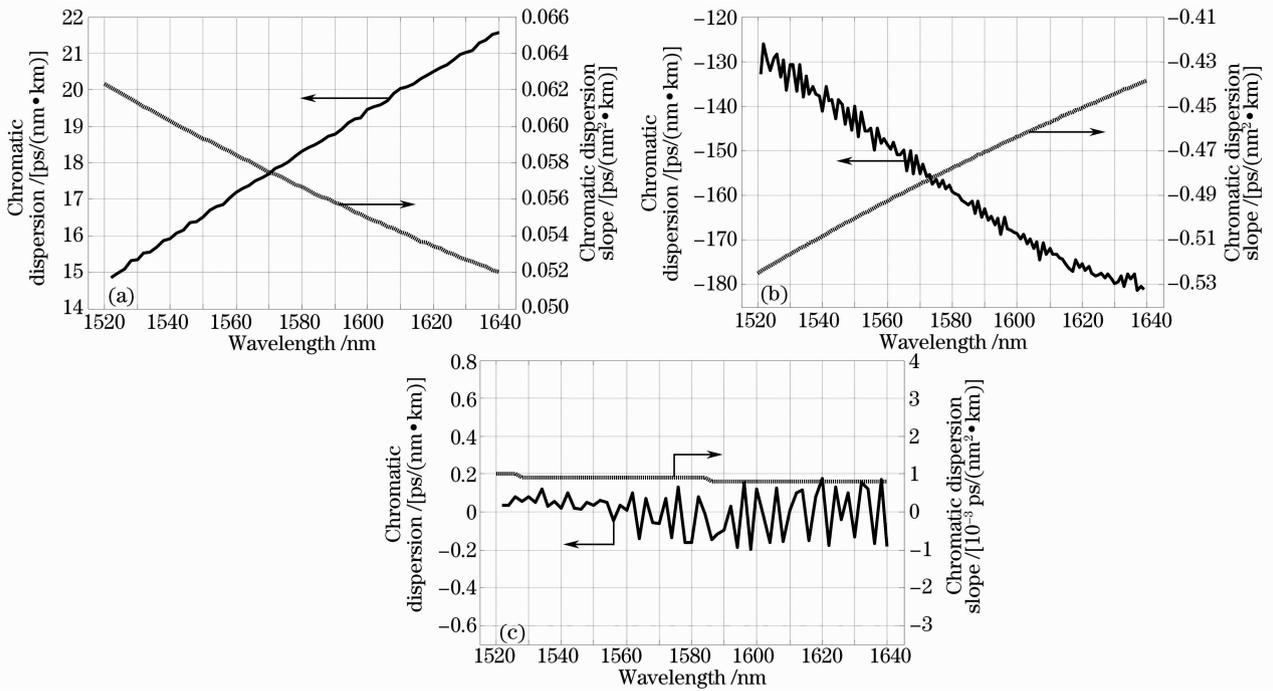


图3 色散、色散斜率与中心波长的关系。(a)普通单模光纤,(b)色散与色散斜率补偿光纤,(c)光纤传输链路(100.25 km)
 Fig. 3 Relation of dispersion and dispersion slope with center wavelength. (a) single-mode fiber, (b) dispersion and dispersion slope compensating fiber, (c) fiber transmission link (100.25 km)

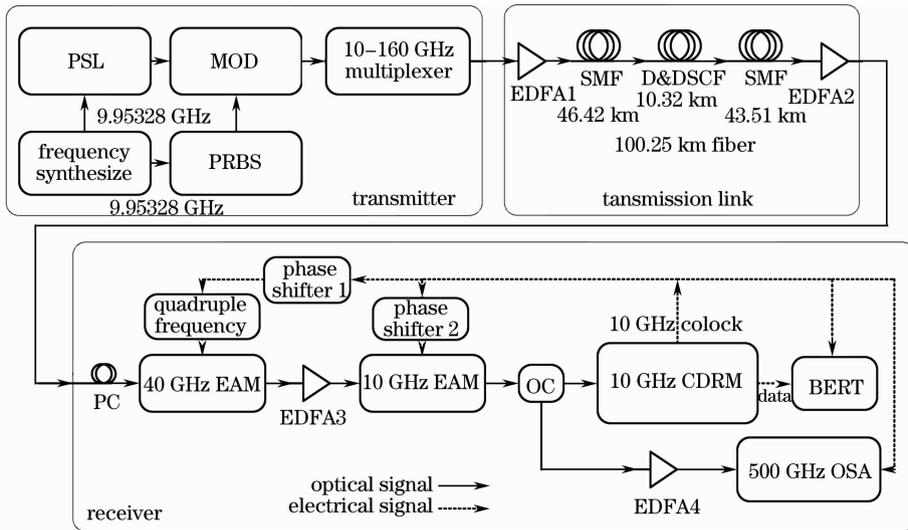


图4 160 Gb/s OTDM 信号 100 km 传输实验系统结构图

Fig. 4 Experimental system structure of 160 Gb/s OTDM signal 100 km transmission

发射部分使用 Calmar 公司的皮秒脉冲光纤激光器(型号:PSL-10-1T),该激光器产生中心波长为 1554.35 nm,半峰全宽为 1.5 ps,抖动小于 75 fs,重复频率为 10 GHz 的超短脉冲,其相应的波形图如图 5(a)所示。在 马赫-曾德尔型 铌酸锂 光外调制器 (MOD)中,码型发生器 (PRBS)产生的长度为 $2^7 - 1$ 伪随机序列对 10 GHz 的光脉冲进行调制,调制后信号的波形如图 5(b)所示。频率合成器同时为皮秒脉冲光纤激光器与码型发生器提供 9.95328 GHz

的射频信号,使光外调制器输出的信号符合通信 OC-192/STM-64 标准。实验室自制的 10-160GHz 复用器有很好的温度稳定性与偏振不敏感性,调制后的数据信号经过复用后,输出稳定的 160 Gb/s OTDM 信号,其眼图如图 5(c)所示。

在传输链路中,掺铒光纤放大器 (EDFA)1 把复用器输出的 160 Gb/s 的 OTDM 信号放大到最佳工作功率 12.35 dBm,然后注入到总长度为 100.25 km 的光纤传输链路进行传输。受发射部分

跳线、法兰盘及 10-160 GHz 复用器的影响,复用后脉冲半峰全宽为 2 ps,比皮秒光纤激光器输出半峰全宽为 1.5 ps 的脉冲宽了 0.5 ps。整个 100.25 km 传输链路的损耗为 28 dB,包括所有的融接点、连接线及法兰盘。图 5(d)为经过 EDFA2 放大的 160 Gb/s 的数据信号眼图,此时脉冲半峰全宽为 2.3 ps,比注入 100.25 km 传输链路前的脉冲展宽了 0.3 ps,与高精度色散管理的理论分析相一致。实验完全实现了色散、色散斜率的精确补偿。虽然脉冲底部稍微有些重叠,但这些恰好都在系统色散容忍范围之内,对系统的误码率几乎没有任何影响。测量点与 500 GHz 高速示波器的连线也会引起一定程度的脉冲展宽,对测量结果有一定的影响,因此脉冲的实际宽度比测量值要小。

接收部分由 40 GHz 电吸收调制器(EAM)^[15], 10 GHz 电吸收调制器与 10 GHz 的时钟提取与数据恢复模块(CDRM)级联构成。在 40 GHz EAM 前放置偏振控制器(PC),控制接收部分输入信号的偏振态。信号经过 40 GHz EAM 产生较大的插入

损耗,其输出信号的眼图如图 5(e)所示,脉冲半峰全宽为 3 ps。EDFA3 把损耗后的信号放大到最佳工作功率 8 dBm,然后送入 10 GHz EAM,最后经过耦合器分成两部分,其中一部分注入示波器进行观测,另一部分注入 CDRM 进行时钟提取与数据恢复。CDRM 主要是基于锁相环基本原理,它与两个 EAM 级联并反馈形成一个环路,用提取出的时钟脉冲控制级联的 EAM 产生光时域采样窗口,精确调节 40 GHz EAM 与 10 GHz EAM 的偏置电压分别为 -1.2 V 与 -2.18 V,同时细微地调节反馈环路的相移器,级联的 EAM 从 160 Gb/s 的 OTDM 信号中无误码地解调出 10 Gb/s 的复用信号,也可以采用非线性光纤环镜进行解复用^[16],CDRM 进行时钟提取同时又恢复了原始数据。用 500 GHz 高速示波器进行观测,经过耦合器解复用后的 10Gb/s 的信号的眼图如图 5(f)所示,从图中可以看到,解复用后的 10 Gb/s 的信号眼图很清晰,眼开度很大,这表明其他信道已经被充分地抑制。而且这种环状反馈解复用结构具有稳定、易操作、可再生消光比的优点。

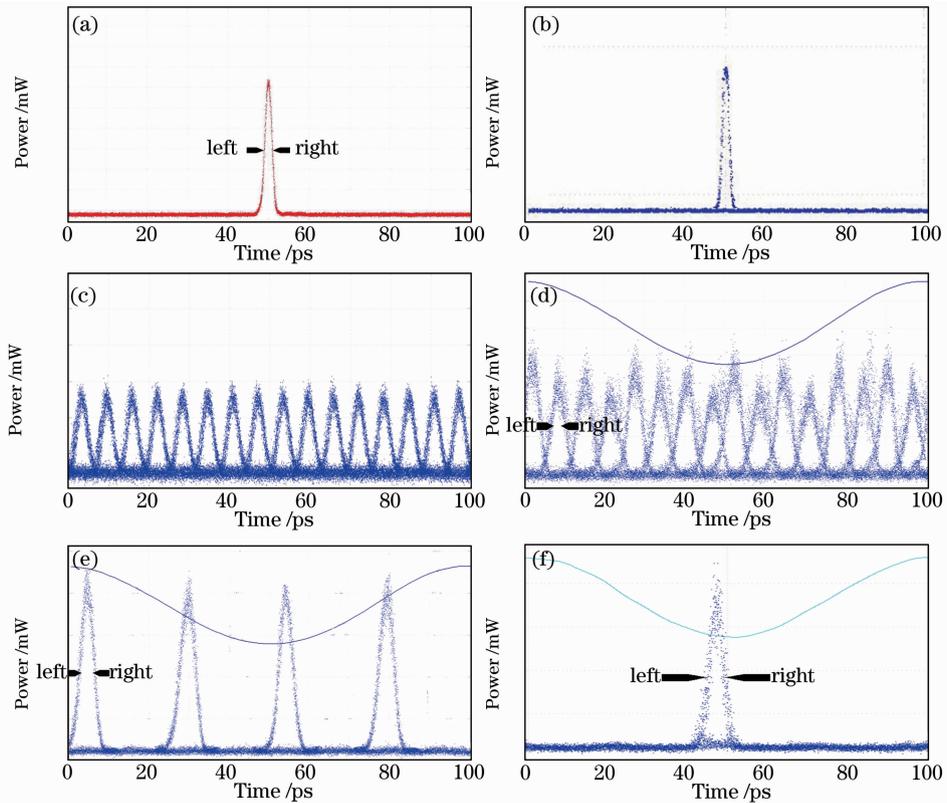


图 5 实验测试结果。(a)光源超短脉冲,(b)调制后的信号波形,(c)复用后 160 Gb/s OTDM 信号眼图,(d)传输 100.25 km 后 160 Gb/s OTDM 信号眼图,(e)40 GHz EAM 解复用后的信号眼图,(f)10 GHz EAM 解复用后的信号眼图
Fig. 5 Experimental results. (a) ultra-short pulse of PSL, (b) modulated waveform, (c) eye diagram of multiplexed 160Gb/s OTDM signal, (d) eye diagram of 160 Gb/s OTDM signal after 100.25 km transmission, (e) eye diagram of de-multiplexed signal after 40 GHz EAM, (f) eye diagram of de-multiplexed signal after 10 GHz EAM

4 结 论

研究了 160 Gb/s 光时分复用系统,在高精度色散管理下,实现了 160 Gb/s 光时分复用信号 100.25 km 稳定无误码(误码率小于 10^{-12}) 传输。自制的复用器具有很好的温度稳定性及偏振不敏感性,光纤长度 10 m 量级的调整精度,色散与色散斜率补偿光纤混合补偿方式的选择、色散与色散斜率的精确补偿、各个工作点功率的优化、级联两个 EAM 产生最佳采样窗口、基于锁相环原理的时钟提取,这些共同改进了系统的性能,提高了系统的比特率和传输距离。使用 500 GHz 高速示波器对各个环节进行精确观测,得到了高质量的实验数据,便于以后的理论分析与实验。在整个实验过程中,系统稳定后就不再需要对其做任何调整。实验结果表明,如果系统增加自动反馈、调节与抑制,采用前向纠错技术,并进行偏振模色散补偿,系统的传输性能将有很大的提升,高精度色散管理将能够实现更高速率 OTDM 信号远距离、长时间稳定、无误码传输。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 A. Bogoni, L. Poti, P. Ghelfi *et al.*. OTDM-based optical communications networks at 160 Gbit/s and beyond[J]. *Opt. Fiber. Technol.*, 2007, **13**(1): 1~12
- 3 Ivan P. Kaminow, Tingye Li. *Optical Fiber Telecommunications (Volume B Systems)*[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006
甘民乐, 厉鼎毅. *光纤通信(卷 B 系统篇)*[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006
- 4 Taorong Gong, Fengping Yan, Dan Lu *et al.*. Demonstration of single channel 160-Gb/s OTDM 100-km transmission system[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(17): 3460~3463
- 5 Chen Ming, Lu Dan, Gong Taorong *et al.*. A simple loop for simultaneous OTDM demultiplexing and clock recovery[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(7): 074211
- 6 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Third Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
- 7 Govind P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 第三版, 北京: 电子工业出版社, 2002
- 7 Li Tangjun. *Studies on Key Technology in 160 Gb/s OTDM System*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. 82~84
李唐军. 160 Gb/s 光时分复用通信系统关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008. 82~84
- 8 Cai Tuo, Sang Tian, Zhang Xiaowei. Theoretical analysis on dispersion and non-linearity affecting Gauss pulse propagation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 829~833
蔡 托, 桑 田, 张小伟. 色散和非线性效应对高斯脉冲综合影响的理论分析[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 829~833
- 9 Hansgeorg Weber, Reinhold Ludwig, Sebastian Ferber *et al.*. Ultrahigh-speed OTDM-transmission technology [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4616~4627
- 10 Liu Yan, Li Kang, Kong Fanmin. The higher-order dispersion management methods used in WDM transmission systems[J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(6): 54~55
刘 艳, 李 康, 孔繁敏. WDM 传输系统中的高阶色散管理方法[J]. *激光杂志*, 2003, **24**(6): 54~55
- 11 Shao Qunfeng, Zhang Xiaoping. Study on intra-channel nonlinear effects in dispersion compensation transmission systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(sup1): 46~48
邵群峰, 张晓萍. 色散补偿系统中的带内非线性效应研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(sup1): 46~48
- 12 Wang Chao. The factors of dispersion limitation for the optic telecommunication system [J]. *Study on Optical Communications*, 2001, (5): 44~47
王 超. 光通信系统的色散限制的若干因素分析[J]. *光通信研究*, 2001, (5): 44~47
- 13 Qu Kenan, Zhang Weigang, Liu Zhoulin *et al.*. Dispersion compensation in ultra-short optical pulse compressing system and transmitting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 449~453
屈柯楠, 张伟刚, 刘卓琳等. 超短光脉冲压缩系统和传输系统的色散补偿[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 449~453
- 14 Prince M. Anandarajah, Aisling M. Clarke, Celine Guignard *et al.*. System-performance analysis of optimized gain-switched pulse source employed in 40- and 80-Gb/s OTDM systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(6): 1495~1502
- 15 Eugen Lach, Karsten Schuh, Michael Schmidt. Application of electroabsorption modulators for high-speed transmission systems [J]. *Opt. Fiber. Commun.*, 2005, **2**(2): 347~377
- 16 Yang Yanfu, Lou Caiyun, Zhao Xiaofan *et al.*. Demultiplexing from 160 Gb/s to 10 Gb/s using nonlinear optical loop mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 611~616
杨彦甫, 娄彩云, 赵晓凡等. 利用非线性光纤环镜 160 Gb/s 到 10 Gb/s 解时分复用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 611~616