

文章编号: 0253-2239(2007)04-0579-4

具有电色散补偿的 10Gb/s 脉冲转换器的研制*

李 亮 王 欣 刘 宇 黄亨沛 谢 亮 祝宁华

(中国科学院半导体研究所集成光电国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 设计并研制了带电色散补偿功能的 10 Gb/s 脉冲转换器。电色散补偿通过时域均衡的方法, 消除光纤色散带来的码间串扰; 将电色散补偿芯片纳入脉冲转换器设计中, 从而提高了其传输距离。所研制的样品光发射部分采用分布反馈激光器加电吸收调制器集成光源, 接收部分采用带互阻放大器的雪崩光电二极管光电探测器模块, 电色散补偿芯片对光电探测器输出的码流执行色散补偿算法。对样品进行的测试结果表明该脉冲转换器背对背接收灵敏度为 -24.6 dBm, 经过 100 km G. 652 光纤传输后接收灵敏度为 -20.8 dBm。未加电色散补偿功能时, 采用相同的光源传输距离仅为 50 km。

关键词: 光通信; 脉冲转换器; 电色散补偿; 10 Gb/s

中图分类号: TN919; TN702 文献标识码: A

Design and Fabrication of 10 Gb/s Transponder with Electronic Dispersion Compensation

Li Liang Wang Xin Liu Yu Huang Hengpei Xie Liang Zhu Ninghua

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract: 10 Gb/s transponder with electronic dispersion compensation (EDC) is designed and fabricated. Inter-symbol-interference brought about by chromatic dispersion and polarization mode dispersion is minimized by electronic dispersion compensation. So the transmission distance is greatly enhanced. Apart from electronic dispersion compensation, the transponder fabricated features DFB+EA integrated light source and avalanche photodiode (APD) module carrying transimpedance amplifier. Experiments and tests show that the sensitivity of back-to-back transmission is -24.6 dBm, and the transmission distance of the module is more than 100 km, the sensitivity is -20.8 dBm after transmission of 100 km G. 652 fiber. Compared with transponder without electronic dispersion compensation, which has a transmission distance of about 50 km, the transmission distance is doubled. Hence the requirement of dispersion management of the system is cut down greatly and cost reduced.

Key words: optical communications; transponder; electronic dispersion compensation; 10 Gb/s

1 引 言

在长距离光纤通信系统中, 由于色散导致光脉冲的展宽, 将引起严重的码间干扰, 降低光信号的信噪比, 增加系统误码率, 从而限制了传输距离。色散补偿光纤、啁啾光纤布拉格光栅能有效地进行色散补偿, 然而重新铺设光纤的成本很高, 色散补偿光纤传输损耗较高, 啁啾光纤布拉格光栅需要根据光纤

链路的特征进行补偿, 缺乏配置的灵活性。电色散补偿 (Electronic dispersion compensation, EDC)^[1~3] 利用时域均衡的方法消除色散引起的码间干扰。在电域进行色散补偿有光域色散补偿没有的优点, 如电色散补偿器件体积小便于和其他电路以及光模块集成, 可以随着工作环境的变化灵活配置, 动态调节, 并且成本低廉等等。

* 国家自然科学基金(60510173, 60536010, 60536006, 60606019)、国家 973 计划(2006CB604902, 2006CB302806)和科技部重大国际合作项目(2006DFA11880)资助课题。

作者简介: 李 亮(1982-), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事光电子器件的高频特性研究和光收发模块的设计。
E-mail: liliang@semi.ac.cn

导师简介: 祝宁华(1959-), 男, 河南商城人, 教授, 博士生导师, 主要从事光波导调制器及微波集成电路的理论与实验研究, 半导体激光器和调制器组件的封装设计。E-mail: nhzhu@semi.ac.cn

收稿日期: 2006-05-11; 收到修改稿日期: 2006-08-17

10 Gb/s 脉冲转换器是带复用解复用器的收发一体化模块^[4],是同步数字体系(Synchronous digital hierarchy, SDH)和密集波分复用系统中的核心器件之一。其光发射部分一般采用铌酸锂(LiNbO₃)外调制器或者分布反馈加电吸收调制器集成光源。LiNbO₃ 调制器消光比高,且可实现负啁啾,具有一定的色散补偿功能。虽然采用LiNbO₃ 调制器的脉冲转换器传输距离较长,但由于LiNbO₃ 调制器价格昂贵,使得成本居高不下。低成本分布反馈加电吸收调制器集成光源有较高的性价比,但由于其消光比相对于LiNbO₃ 调制器较低,并且受色散限制,因而采用分布反馈加电吸收调制器集成光源的脉冲转换器传输距离较短,在G. 652单模光纤上传输距离一般在50 km左右。为此,在采用分布反馈加电吸收调制器集成光源的脉冲转换器的接收端进行电色散补偿,所设计出的具有电色散补偿功能的脉冲转换器,传输距离得到了显著的提高。本文首先介绍了电色散补偿的原理,接着给出了所设计的电色散补偿脉冲转换器的结构,最后给出测试结果。

2 电色散补偿原理

单模光纤的色散主要有色度色散(Chromatic dispersion, CD)和偏振模式色散(Polarization mode dispersion, PMD)两种,分别由不同波长或不同偏振模式的光在光纤中传播的速度不同而产生。10 Gb/s 光通信系统主要受到色度色散的影响,如G. 652 光纤的色散值为17 ps/(nm·km),则经过100 km 传输后总色散量达到1700 ps/nm,光学补偿方法有光纤光栅补偿法^[5,6],色散补偿光纤法,光子晶体光纤法^[7],偏振模式色散的补偿方法有利用偏振度作为反馈信号控制偏振控制器进行补偿的方法^[8]等。

电色散补偿(EDC)是一种后补偿手段,由于色散而展宽的光脉冲经过探测器转换为电脉冲,并由互阻放大器进行放大之后,在电域得到均衡,从而消除色散带来的码间干扰。由于色散引起的脉冲展宽,光纤的传输函数 $H(f)$ 的幅频特性不平坦,相频特性偏离线性,所以从时域上看,波形恶化,通过电色散补偿对系统的传输函数进行均衡,如果色散补偿的频率响应近似为 $H^{-1}(f)$,则经过均衡后系统的总的传输函数变得平坦,因而波形得到恢复。

电色散补偿主要有下面几种结构^[1,2]:前馈均衡器(FFE)、判决反馈均衡器(DFE)和最大似然系列估

计器(MLSE)。文中的脉冲转换器模块采用的色散补偿是基于前馈均衡器和判决反馈均衡器两者的组合。

图1所示为前馈均衡器的结构,基于横向滤波器,输入信号被多级延迟,各级延迟后的结果与原始输入信号加权求和,其结果作为滤波器的输出。前馈均衡器的传输函数可表示为

$$y(t) = \sum_{j=0}^n C_j x(t - jT), \quad (1)$$

式中 $x(t)$ 为输入信号, $y(t)$ 为输出, T 为每级延迟时间,是固定的,为码元长度,每阶的加权系数为 C_j ,根据光纤色散的特点调整 C_j ,可以得到最佳的均衡效果。

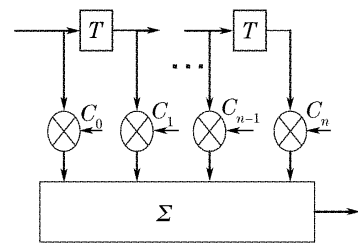


图1 前馈均衡器结构
Fig. 1 Structure of FFE

前馈均衡器是一种线性均衡器,对于失真程度较低,眼图未完全闭合的信号有较好均衡效果。与前馈均衡器不同,判决反馈均衡器是一种非线性均衡器,对眼图几乎完全闭合的信号也有很好的均衡作用。判决反馈均衡器的结构如图2所示,将已判决的比特加权后反馈,用于后续比特的判决。判决条件为

$$I_{k+1} = \begin{cases} 1, & x(t) - \sum_{j=0}^m C_j I_{k-j} > U_{th} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $x(t)$ 为输入信号, I_{k-j} 为已判决的比特, I_{k+1} 为待判决的比特, U_{th} 为判决门限每阶的加权系数为 C_j ,根据光纤色散的特点调整 C_j ,可以得到最佳的均衡效果。

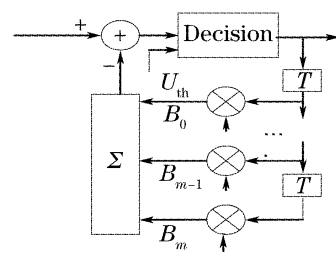


图2 判决反馈均衡器结构
Fig. 2 Structure of DFE

总色散量随着光纤长度、波长等改变,因此不同的线路有不同的色散量,这要求均衡器能够动态调

整加权系数。最小二乘法和迫零法^[1]常用于均衡器的自适应调节。

3 10 Gb/s 电色散补偿脉冲转换器的设计

采用分布反馈加电吸收调制光源的脉冲转换器,受色散的限制传输距离较短。带色散补偿功能脉冲转换器在接收端光电探测之后进行色散补偿,图 3 所示为长距离,带电色散补偿的脉冲转换器结构原理框图,光信号经过高速雪崩光电二极管探测器转换为光电流,光电流经过互阻放大器(TIA)放大为 10 Gb/s 的差分电压信号。色散补偿芯片对其进行时域均衡,消除码间干扰后送入限幅放大器 LA,限幅放大器对波形进行整形后送入时钟数据恢复单元 CDR,CDR 提取出时钟信号并且恢复出码流。解复用器 DeMUX 将 10 G 的码流分成 16 路低速的信号输出。

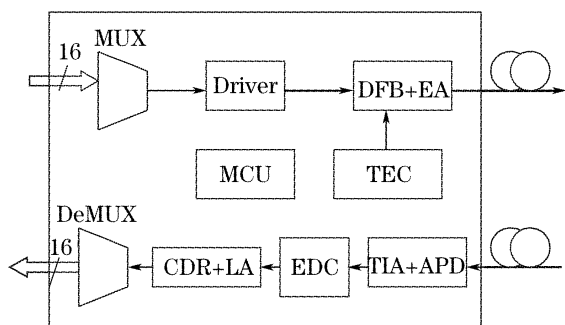


图 3 带色散补偿功能的脉冲转换器的结构

Fig. 3 Frame of transponder with electronic dispersion compensation

发送部分所用的激光器为 $1.55 \mu\text{m}$ 分布反馈加电吸收调制器集成光源,激光器通过温控电路 TEC 将温度稳定在 25°C ,以保持激光器输出波长的稳定,激光器工作在恒功率状态。复用器 MUX 将 16 路低速电信号合成一路 10 Gb/s 的电信号,电吸收调制器将其调制为 10 Gb/s 光信号,送入传输光纤。

设计的长距离 10 G 脉冲转换器遵从 MSA 规范^[6],带有 I²C 接口,具有远程监控功能,有一定的自我诊断和智能功能。该模块几乎包括了 MSA 规定的所有告警信号和控制信号以及模拟监测信号。可以支持模块远程配置和调试功能。该模块有三种工作模式:硬件模式、软件模式和混合模式。在硬件模式下,该模块的配置和告警信号由引脚的状态决定,在软件模式下,所有的状态和控制信号由软件控制,即内部寄存器决定,并且上位机可以通过 I²C 接口远程

获取模块的各种状态参量如偏置电流、发射光功率、接收光功率、模块温度等关键指标,而且可以远程改变模块的一些参量,如发射光功率,调制幅度等。在混合模式下,则只能读取一些状态数据,而不能写入数据,一些状态的改变通过引脚(硬件)来实现。图 4 为所设计的电色散补偿脉冲转换器的实物图。

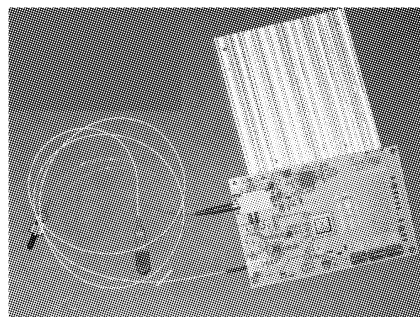


图 4 脉冲转换器实物图

Fig. 4 Picture of the transponder

4 测试结果

对所设计的电色散补偿 10 Gb/s 进行了眼图、误码率、接收灵敏度和通道代价等测试。误码测试所用仪器有:10 Gb/s 伪随机码发生器 Advantest D3186,高速调制光源分布反馈加集成光源,误码仪 Advantest D3286。眼图测量采用 Tektronix CAS8000 通信分析仪。为了更快的准确得到模块

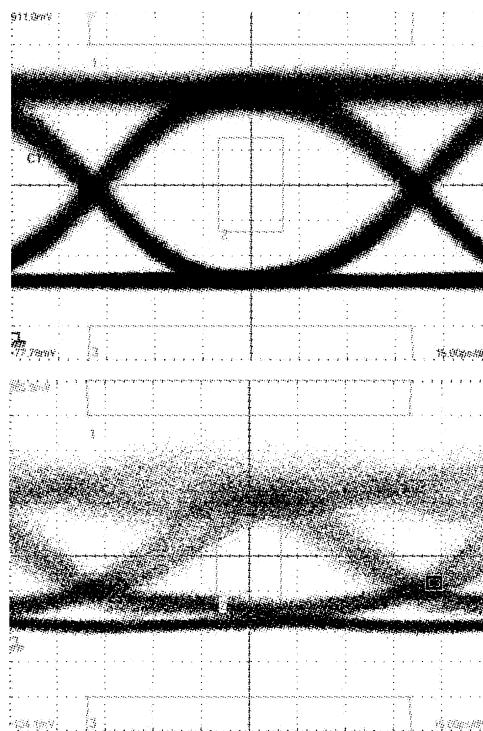


图 5 光源的传输眼图。(a) 0 km 单模光纤传输眼图, (b) 100 km 单模光纤传输眼图

Fig. 5 Eye diagram of the light source. (a) Back to back, (b) after 100 km transmission

的灵敏度,采用外推测试法^[9]。

图 5 为调制光源背对背(0 km)和经 G. 652 光纤传输 100 km 后的眼图,从图 5 可看出,经过 100 km 传输后,由于色散的影响,信号恶化很严重,已经不能满足 OC-192/STM-64 模板要求。将传输 100 km 后的光信号送入样机接收端,测试结果表明系统无误码。将光纤长度延长至 110 km 时,系统误码率急剧增加。可见所研制的样机传输距离在 100 km 到 110 km 之间,按照 G. 652 光纤色散 17 ps/(km·nm) 计算,其色散容限达到了 1700 ps/nm。

图 6 所示为脉冲转换器灵敏度和通道代价测试结果。测试条件为 9.952 Gb/s $2^{23}-1$ 的伪随机码 (PRBS), G652 光纤。从图中可以看出,背对背接收灵敏度为 -24.6 dBm; 经过 50 km G. 652 光纤传输后接收灵敏度为 -23.8 dBm, 通道代价为 0.8 dB; 经过 100 km G. 652 光纤传输后接收灵敏度为 -20.8 dBm, 通道代价为 3.8 dB。

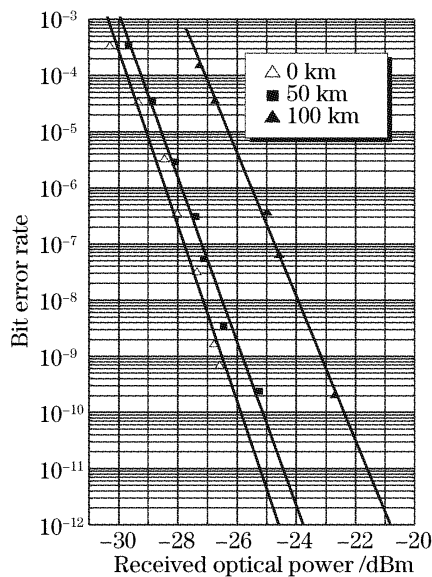


图 6 脉冲转换器灵敏度和通道代价测试结果

Fig. 6 Sensitivity of transponder and path penalty

5 结 论

成功研制的带色散补偿功能的 10 Gb/s 脉冲转

换器,能根据光纤链路自动调节色散补偿量,具有简单灵活的特点。所设计的电色散补偿脉冲转换器色散容限达到了 1700 ps/nm,其背对背接收灵敏度为 -24.6 dBm,经 100 km G. 652 光纤传输后接收灵敏度为 -20.8 dBm,100 km 通道代价为 3.8 dBm,达到了实用化水平。

参 考 文 献

- 1 Fred Buchali, Henning Bülow. Adaptive PMD compensation by electrical and optical techniques[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(4): 1116~1126
- 2 Herbert F. Haunstein, Wolfgang Sauer-Greff, Andreas Dittrich *et al.*. Principles for electronic equalization of polarization-mode dispersion[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(4): 1169~1182
- 3 Hui Wu, Jose A. Tierno, Petar Pepeljugoshi *et al.*. Integrated transversal equalizers in high-speed fiber-optic systems[J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2003, **38**(12): 2131~2138
- 4 <http://www.300pinmsa.org/html/documents.html>
- 5 Pei Li, Jian Shuisheng, Yan Fengping *et al.*. The dispersion compensation of optical fiber Bragg grating on the long-distance G. 652 fiber transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 220~224 (in Chinese)
- 6 裴 丽,简水生,延风平等. 普通单模光纤传输系统的光纤光栅色散补偿研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 220~224
- 7 Qing Ye, Feng Liu, Haiwen Cai *et al.*. Analysis of dispersion compensation for position-dependence in externally modulated CATV lightwave systems by using chirped fiber grating[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(10): 566~569
- 8 Yang Guangqiang, Zhang Xia, Ren Xiaomin *et al.*. Experimental research on dispersion compensation of 10 Gb/s clock signal using photonic crystal fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1221~1224 (in Chinese)
- 9 杨广强,张 霞,任晓敏等. 利用光子晶体光纤实现 10 Gb/s 光传输系统的色散补偿[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1221~1224
- 10 Chen Lin, Zhang Xiaoguang, Zhou Guangtao *et al.*. Study polarization mode dispersion compensation with degree of polarization as feedback signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 443~448 (in Chinese)
- 11 陈 林,张晓光,周光涛等. 偏振度作为反馈信号进行偏振模式色散补偿的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 443~448
- 12 Lucent Technologies, Optical Transimission. *System and Technology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotaong University Press, 2003. 432~434 (in Chinese)
- 13 朗讯科技光网络部. 光传输技术[M]. 北京:清华大学出版社,北方交通大学出版社,2003. 432~434