

40Gb/s 光通信系统中光域偏振模色散补偿的实验研究

李唐军¹, 王目光¹, 简水生¹, 娄采云², 霍力², 姚和军²

(1. 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044; 2. 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 在 40Gb/s 归零码(RZ)大 Polarization Mode Dispersion(PMD)光通信系统中, 采用两级四自由度光域 PMD (偏振模色散) 补偿器, 以信号的 DOP(偏振度)为反馈信号, 利用自适应优化算法, 实现了一阶及高阶 PMD 动态自适应补偿. 最大一阶 PMD 补偿能力为 35 ps, 二阶 PMD 补偿能力为 200ps², PMD 动态自适应补偿器的优化补偿时间小于 10ms.

关键词: 偏振模色散; 自适应补偿; 优化算法; 光纤通信

中图分类号: TN929. 11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 12A-074-04

Optical Domain PMD Compensation in 40Gb/s Optical Communication System

LI Tang-jun¹, WANG Mu-guang¹, JIAN Shui-sheng¹, LOU Cai-yun², HUO Li², YAO He-jun²

(1. Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An experiment of two stages four degrees high order PMD compensation in 40Gb/s RZ optical communication system with a large PMD is achieved. The former stage adopts polarization controller and fixed time delayed line of PMF. The second stage consists of a polarization rotator and a magnetooptical crystal of tunable DGDs that are used to compensate remnant first order PMD. The PMD monitoring technique is based on DOP as error signal. A novel practical adaptive optimization algorithm was introduced in dynamic adaptive PMD compensation. The experimental results show the improvement in PMD. With this compensator, a significant improvement of system performance can be achieved in the eye pattern of a received signal. Most first order compensating ability of the compensator is 35 ps. Second order compensating ability of the compensator is 200ps². The optimum compensating time is within several milliseconds.

Key words: polarization mode dispersion(PMD) compensation; adaptive optimization algorithm; optical communication

1 引言

随着 ADSL(非对称数字用户环路)、FTTH(光纤到户)等宽带业务的普及,人类社会已经步入了一个信息社会时代. 用户对 IP 电话、IP 音乐、图像信息等互联网业务的需求持续增长, 带动了光通信系统传输速率和容量的增长, 目前我国干线光缆的单信道传输最高速率已经达到 10Gb/s, 正向着 40Gb/s 速率发展. 但是, 当光通信系统的传输速率达到 40Gb/s 以上时, PMD 就成为限制高速光纤通信系统容量和距离的主要因素^[1]. 实验和理论结果表明: PMD 造成的脉冲畸变为比特周期 1/10 时, 系统功率代价约为 1dB. 对全球已铺设光缆的 PMD 系数测试结果表明, 20 世纪 80 年代中期前生产和铺设的光纤光缆的 PMD 系数较大, 甚至存在 2ps/√km 的光纤^[1], 这对于 10Gb/s 光通信系统的传输距离也仅为 50 公里, 这使得北美洲地区约 37% 已铺光缆不能实现 2.5Gb/s 至 10Gb/s 的系统升级. 尽管目前光纤 PMD 值已大大降低, ITU(国际电信联盟)也

对光纤的 PMD 系数提出了小于 0.5ps/√km 的出厂要求, 但对于几千公里以上的超长距离传输而言, 即使是单信道速率为 10Gb/s, 由 PMD 造成的脉冲畸变也不能忽略.

PMD 不仅随敷设光缆温度、应力等外界环境因素变化, 而且与波长色散、非线性效应复杂的交织在一起, 加大了系统设计难度. 因此, 对于 10Gb/s 尤其是 40Gb/s 长距离传输信号, 必须进行 PMD 补偿.

本文在深入研究光纤 PMD 对信号 DOP(偏振度)的影响、PMD 补偿器工作原理和自适应优化算法的基础上, 实现了 40Gb/s 光通信系统的 PMD 动态自适应补偿, 得到了满意的结果; 并讨论了今后的研究课题.

2 PMD 动态自适应补偿的设计与实现

在单模光纤中, 实际上也传输着两个相互正交的线性偏振模式, 若光纤是在下地想的圆的情况下和理想的使用性情况下, 这两个模式是相互简并的; 但在实际情况下, 由于生产中

造成的光纤的圆不对称、内应力等, 成缆过程中形成的边应力、光纤扭曲等, 以及使用过程中的压力、弯曲等因素造成单模光纤中这两个模式之间有轻微的传输群速度差, 从而形成(线性)偏振模色散。这两个偏振模分量沿光纤长度方向随机耦合, 耦合强度随光缆温度等外界环境变化, 具有统计特性。对于整个光纤通信系统, PMD 不仅存在于光缆中, 线路中的光隔离器、掺铒光纤、色散补偿光纤等也存在 PMD。PMD 造成 RMS(均方根)脉冲展宽, 码间干扰和光通信系统功率代价^[2]。

一阶 PMD 定义为两个偏振主态间的 DGD(微分群时延差), 二阶 PMD 与偏振态旋转、去极化和偏振依赖色散有关。一阶、二阶 PMD 效应是导致系统传输损伤的主要原因^[3], 所以大多数 PMD 补偿方案主要针对一阶、二阶 PMD 效应, 这些补偿方案归纳起来有两类: ①光域补偿方式, ②电域补偿方式。电域补偿相对光域补偿来说, 虽然具有性能稳定, 技术相对比较成熟等优点, 但由于电子瓶颈的约束, 其应用范围受到限制。目前光域偏振模色散补偿领域研究比较活跃, 也是有望解决 40Gbit/s 以上高速光通信系统的偏振模色散补偿方案之一。本文正是在这样的研究背景下开展了对光域 PMD 动态自适应补偿器的研究。

一个完善的光域 PMD 动态自适应补偿器主要由三单元组成^[4,5]: I, 补偿单元, 亦即光路结构部分, 主要包括偏振控制器以及固定或可变时延线等; II, 控制单元, 主要控制算法处理电路及反馈信号提取部分; III, 控制算法。下面分别进行讨论。

2.1 PMD 动态自适应补偿器的结构

根据 PMD 补偿能力、响应速度的要求, 我们设计并实现了两级四自由度光域 PMD 补偿器, 其中第一级由偏振控制器和一段保偏光纤形成的固定时延线组成, 用于首先补偿二阶 PMD; 第二级由偏振旋转器和基于磁光晶体的微分群延时器组成, 用于完成残留一阶 PMD 的补偿。两级四自由度光域 PMD 补偿器的具体结构如图 1 所示。

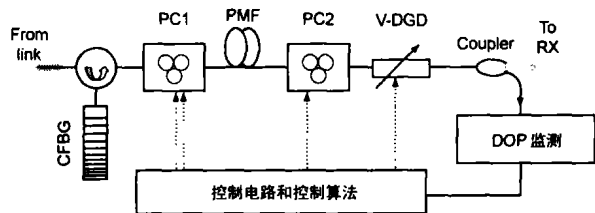


图 1 二级四自由度高阶 PMD 补偿器

其中 PC1 和 PC2 分别为偏振控制器和偏振旋转器; OC1 为光纤环行器; CFBG 为线性啁啾光纤光栅, 用于补偿线路中的波长色散, PMF 为 15 米保偏光纤, V-DGD 为基于磁光晶体的微分群延时器。

首先, 大 PMD 光信号到达两级四自由度 PMD 补偿器, 根据线路光纤长度和色散系数, 首先由 CFBG 进行固定色散补偿后, 进入第一级 PMD 补偿器, 第一级由偏振控制器和一段保偏光纤形成的固定时延线组成, 偏振控制器有两个自由度, 用于补偿二阶 PMD; 第二级由一偏振旋转器(一个自由度)和 DGD 可调的微分群延时器(一个自由度)组成, 用于残留一阶

PMD 的补偿。

- ⑤ 补偿器的插入损耗主要由以下几部分决定:
偏振控制器: 损耗 3dB(测量时包含连接器);
保偏光纤 15m: 0.7dB;
可变时延线: 1.5dB.
- ⑥ 偏振依赖损耗: 小于 0.4dB.

2.2 反馈控制信号的提取

反馈信号是指在当前光纤偏振模色散情况下光纤传输系统的信号劣化程度, 描述一个系统的传输性能有很多种, 用于提供偏振模色散补偿反馈信号的参数一般有以下四种: a. 电 Q 值或眼图张启度; b. 偏振度(DOP); c. 基带射频(RF)信号谱; d. 固定偏振方向的输出功率。第一种虽然能较好的反映系统工作情况, 但由于其价格不菲, 让人望而却步; 偏振度是一个描述传输信号极化程度的物理量。偏振模色散导致光脉冲分裂, 降低了信号的偏振度, 它部分的反映了光信号的劣化情况和偏振模色散的大小, 其大小可由偏振器件和四个光电二极管测得。这种方法的缺点是偏振度并不与系统误码率等价, 因此其提供的信息可能导致补偿器矫枉过正, 在某些情况下, 反而导致误码率上升; 第三种是检测射频信号功率谱, 然而大范围(在基带和第一谐振频率间)的测量电功率非常不易, 如果传输速率大于 40Gbit/s 时, 这种方法将失去作用, 因为微波检测器在 160GHz 时难以正常工作。反馈信号一般应具有高灵敏度、良好的误码率相关特性及快速的响应时间等特点。对比了以上几种方案, 从实验室条件和经济实用方面考虑, 我们选择了以 Stokes 参数和 DOP 为反馈信号的设计方案。它相对以基带射频(RF)信号谱为反馈信号的方案的主要优点是具有速率无关性, 从而设计时不必考虑系统的传输速率, 即可同时适用于 10Gbit/s, 40Gbit/s 光传输偏振模色散补偿系统。

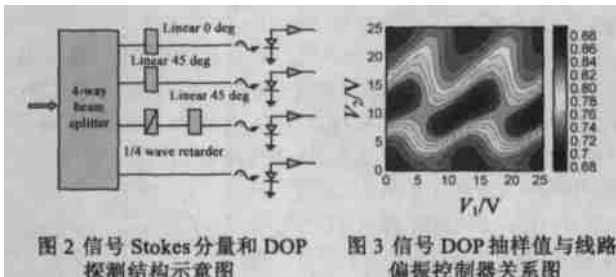


图 2 信号 Stokes 分量和 DOP 探测器结构示意图 图 3 信号 DOP 抽样值与线路偏振控制器关系图

该反馈信号监测部分采用 1:4 偏振分束器, 分成四路不同偏振光信号, 然后利用起偏器和四分之一波片将信号光分别转化四个不同的偏振态: 水平线性偏振态, 垂直方向线性偏振态, 45° 方向线性偏振态和圆偏振态。最后利用探测器件将四路光信号光电转换为相应四个电压并输出。输出四个模拟电压范围(0~10)V, 其最大带宽为 700kHz。我们实验中是以 200kHz 的速率进行采样的。图 2 为信号 Stokes 分量和 DOP 探测器结构示意图, 图 3 为实际系统中的反馈信号 DOP 抽样值与线路中偏振器状态的一个关系图^[6]。关系图是随线路中信号偏振态的变化而改变的, V_1 , V_2 为施加在偏振片上的两个电压。

2.3 基于自适应方法的优化算法

对偏振模色散自适应补偿系统进行深入研究的基础上,

结合传统的自适应闭环控制系统的控制优化算法,我们提出了基于斯托克斯参数及信号 DOP 为反馈信号的偏振模色散自适应补偿算法。

自适应优化算法的数学模型如下:

用 F_i 表示 i 阶 PMD 的目标值,用 f_i 代表 i 阶 PMD 函数,用 x_j 代表第 j 个 PMD 补偿器控制变量,要得到的 PMD 目标值用 $\vec{F} (F_1, \dots, F_m)$ 表示, PMD 函数用 $\vec{f} (f_1, \dots, f_m)$ 表示,控制变量用 $\vec{x} (x_1, \dots, x_n)$ 描述,则 PMD 补偿问题变成求解一个非线性方程组:

$$\begin{aligned} F_1 &= f_1(x_1, \dots, x_n) \\ &\dots\dots\dots \\ F_m &= f_m(x_1, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (1)$$

或者用向量形式表示为:

$$\vec{F} = \vec{f}(\vec{x}) \quad (2)$$

动态控制过程按以下步骤进行:

首先初始化系统控制自变量 \vec{x}_0 ,由偏振计读取光纤链路的 PMD 值,计算出 PMD 值 \vec{F}_0 ,依次给每一个控制自变量增加一个小量 Δx_i ,重新测量和计算 \vec{F} ,求出差商,构成线性方程组的系数矩阵 A 。

令: $\Delta \vec{F} = \vec{F} - \vec{F}_0, \Delta \vec{x} = \vec{x} - \vec{x}_0$,优化问题变成了: $\min \Phi(\vec{x})$ 这样一个最优化问题。

$$\text{其中: } \Phi(\vec{x}) = A \Delta \vec{x} - \Delta \vec{F}$$

而控制变量步长的选择作为约束条件,即: $|\Delta x_i| = r_i$

利用反馈信号的大小来判断对 PC 和可变时延线的调节方向和调节步长,最终使反馈信号 DOP 值达到最大。

对于 m 小于 n 的情形, (7) 为亚定方程组,存在无穷多组解,这就产生了一个解的选择问题。因此对控制变量步长 r_i 的选择非常关键,对 PC 的方位角或者可变时延线 DGD 调节过大,则容易导致信号在最优值附近振荡,太小则 DOP 的变化容易被线路非线性、放大器噪声和光源不稳定性等因素淹没,从而无法对下一步调节方向作出正确判断。因此在该算法中根据不同的 DOP 门限设定不同的调节层次和步长,有效的解决这一问题。并且考虑实际中 PC 和可变时延线不同的响应时间(PC 响应时间小于 100ns,而可变时延线较慢为 200~1200μs),算法亦对此进行了优化,采用首先重点调节 PC,然后再调节 DGD 的策略。注意:算法中的具体参数需要根据实际情况具体选择最优值,有必要经由试验确定。

通过对选用器件响应时间、DSP 芯片处理速度和算法的复杂性的分析可知,调节一步 PC 所用时间主要限制在 DOP 采样速率上(PC 响应时间小于 100ns),为一个有效反馈信号采样周期 100μs;而调节一步 DGD 所用时间主要

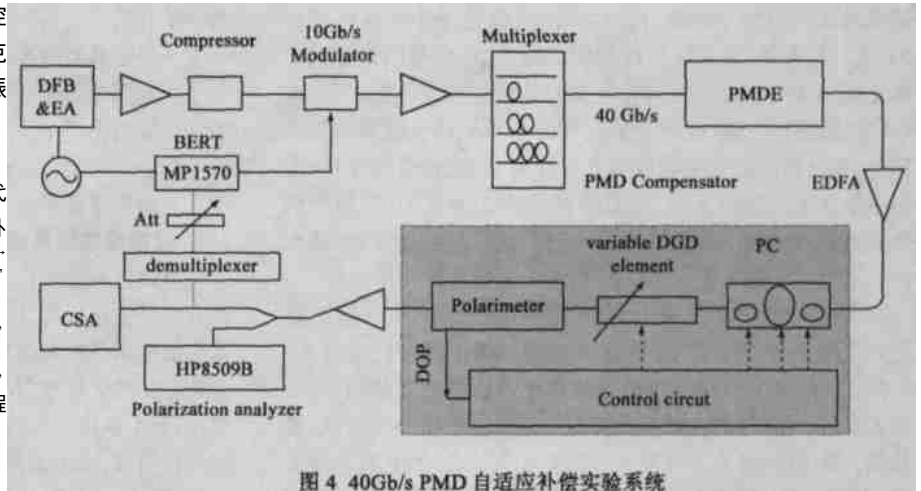


图 4 40Gb/s PMD 自适应补偿实验系统

限制在可变时延器的响应时间上,为 500μs。多次的实验结果表明,从程序开始初始化到系统达到最优化整个过程最多调节 PC50 步,调节 DGD10 步,因此其最大 PMD 补偿响应时间约为 $50 \times 100\text{s} + 10 \times 500\mu\text{s} = 10\text{ms}$,在这个过程完成以后,算法将处于实时跟踪补偿状态,可及时根据线路 PMD 变化情况做出调整。可以看出该 PMD 补偿速度主要受限在 DGD 调节响应时间上。

3 40Gb/s 光通信系统中偏振模色散补偿实验

我们通过大量的 PMD 补偿实验结果表明:该补偿器不仅可以有效的补偿一阶 PMD,同时可以补偿二阶 PMD 的失偏项,并成功用于 40Gb/s 归零码(RZ) OTDM 光通信系统的 PMD 补偿。40Gb/s 光纤偏振模色散自适应补偿实验系统实验装置如图 4 所示。

在图 4 所示的 40Gb/s PMD 补偿系统中,采用 DFB+ EAM 作光源、4×10Gb/s 复用、利用光电振荡器提取 10GHz 的帧时钟、(电吸收调制器) EAM 解复用的 40Gb/s 系统;光路中分别插入 PMD 仿真器、光放大器等器件;PMD 补偿器位于解复用器之前,PMD 动态自适应补偿过程的实现是在输出端提

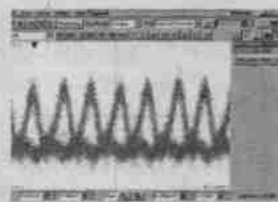


图 5 (a) 40Gb/s OTDM 系统靠背输出信号眼图



图 5 (b) 40Gb/s OTDM 系统未补偿时模拟器的恶化信号眼图

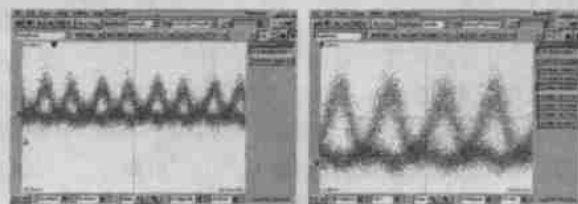


图 5 (c) 40Gb/s OTDM 系统 PMD 补偿后的信号眼图

取部分光信号测量其与 PMD 相关的 DOP 信息, 反馈控制 PMD 补偿器, 最终使得光信号的 DOP 达到最大或 PMD 达到最小, 这个反馈控制过程采用加速自适应的优化过程来完成; 利用美国安捷伦公司的光通信信号分析仪(Agilent 86100B/86116A)对 PMD 动态自适应补偿器的补偿性能进行测试, 依据脉冲的形状判断补偿性能, 获得了满意的结果, 请参看图 5(a)、图 5(b)、图 5(c). 补偿后经日本安立公司 MP1570A 误码仪测试, 获得了无误码的结果.

上述一系列实验结果表明, 40G/s OTDM 实验系统中加入的 PMD 被补偿系统较好地补偿.

4 结论

研制成功了两级四自由度光域 PMD(偏振模色散)补偿器, 并将其成功用于 40G/s 归零码(RZ)OTDM 光通信系统的 PMD 补偿, 以信号的 DOP(偏振度)为反馈信号, 利用自适应优化算法, 实现了 PMD 的动态自适应补偿. PMD 补偿系统的最大一阶 PMD 补偿能力为 35 ps, 二阶 PMD 补偿能力为 2000ps², PMD 动态自适应优化补偿时间小于 10ms.

参考文献:

- [1] M U Ajaonkar, T Wuth, C Wree, C Xia, W Rosenkranz. Experimental and numerical investigation of the effect of second order PMD on the differential PSK[A]. OFC' 2004, WE3[C]. USA, 2004.
- [2] M Schmidt, M Witte, F Buchali, E Lach, E Le Rouzic, S Salatin, S Vorbeck, R Leppla. 8x170 Gbit/s DWDM field transmission experiment

over 430 km SSMF using adaptive PMD compensation[A]. ECOC' 2004, Postdeadline paper, PDP31[C]. 2004.

- [3] S J Savory, F P Payne, A Hadjifotiou. Estimating outages due to PMD using extreme value statistics[A]. ECOC' 2004, We1. 4. 3[C]. 2004.
- [4] Wang Muguang, Tangjun Li, et al. Tunable PMD compensator based on high birefringence linearly chirped FBG with cantilever beam[J]. OPTICS EXPRESS, 2003, 11(19): 2354-2363.
- [5] Jens C Rasmussen, Akihiko Isomura, George Ishikawa. Automatic compensation of polarization mode dispersion for 40G/s transmission systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(12): 2101-2109.
- [6] Wang Muguang, Tangjun Li, et al. Impact on the signal degree of polarization due to polarization mode dispersion in optical fibres[J]. ACTA PHYSICA SINICA, 2003, 52(11): 2818-2823.

作者简介:



李唐军 女, 1956 年出生于河北唐山, 在读博士, 教授, 主要从事高速光纤通信网和高速光纤通信网关键器件的研究. 特别是光纤偏振模色散补偿研究, 主持并完成国家 863 重大项目(No. 2001 AA12042)“光纤偏振模色散自适应补偿技术”, 主持 2 项国家自然科学基金项目, 已发表论文 80 多篇. E-mail: tjli@center.njtu.edu.cn.

王目光 男, 1978 年出生于山东鄄城, 在读博士研究生, 主要从事高速光通信系统中的关键技术, 如光纤激光器、PMD 补偿等研究. E-mail: mgwang@center.njtu.edu.cn.