

一种可编程 PMD 模拟器*

姚和军 姜彩云 曾丽 章恩耀 宋晓旻 高以智

(清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘要 为了研究光纤通信中的偏振模色散(PMD)及其对高速光通信系统的影响和补偿技术, 研制了一种可编程控制的 PMD 模拟器, 它由 6 组双折射晶体和磁光晶体组成, 群时延差(DGD)变化范围为 $\pm(0.3 \sim 35)$ ps, 可设为不同平均值的 Maxwell 统计分布随机变化, 也可以设为其它要求的数学分布. 实验证明, 该模拟器测量值与理论符合得很好, 且具有较高的重复性和稳定性, 响应时间小于 1 ms. 这种模拟器可用于 10 Gb/s 和 40 Gb/s 光传输系统 PMD 问题的研究.

关键词 光纤通信; 偏振模色散(PMD); PMD 模拟器; 可编程

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

在高速率光传输系统中, 偏振模色散(PMD)引起信号的严重恶化, 它已经成为 10 Gb/s 以上系统的主要技术障碍. 电信运营商现在一般都靠选用低 PMD 的光纤或减小传输距离的方法回避 PMD 的问题, 而在传输速率超过 40 Gb/s 的光通信系统中, 即使采用目前 PMD 值最小的光纤也只能传输几百公里, 而在 80 年代敷设的一些高 PMD 值的光纤中只能传输几十公里^[1], 所以只有补偿光纤中的 PMD, 才能提高光传输的速率和距离, 因而 PMD 测量和补偿技术的研究成为近几年光通信研究的热点^[2,3]. 由于实验室中通常采用的试验光纤较短, 其 PMD 值较小且变化缓慢, 不利于 PMD 补偿的研究, 所以一般倾向于采用 PMD 模拟器代替光纤作为研究对象. PMD 模拟器可以在较短的时间内产生较大的 PMD 值变化, 既缩短了研究时间, 也利于考察补偿系统的反馈速度和补偿能力. 常见的 PMD 模拟器有这样几类: 1) 将多段保偏光纤或双折射晶体以随机角度连接起来^[4], 其 PMD 平均值基本不变, 段数越多越接近真实光纤, 这种模拟器 PMD 值变化较小, 适用于 PMD 测量仪的校准. 2) 在多段保偏光纤或双折射晶体之间加偏振控制器^[5], 每个偏振控制器独立、随机地遍历整个邦加球, 这是一种最接近真实光纤的模拟器, 由于 LiNbO₃ 波导型偏振控制器变化速度快但成本高, 挤压光纤型控制量太多, 限制了这种技术的发展. 3) 多段保偏光纤或双折射晶体组合, 相互之间的偏振主轴随机转动^[6]. 这种模拟器接近

于第二种, 但这种其 DGD 值实际上符合 Reighley 统计分布^[7], 而不是一般要求的 Maxwell 分布. 这几种模拟器共同的缺点是变化速率慢, 无法模拟瞬时的 PMD 变化, 且多阶的 PMD 混在一起, 给补偿系统的研究带来困难.

本文研究了一种计算机控制的可编程 PMD 模拟器, 它由多组双折射晶体和磁光晶体组成, 随机控制磁光晶体的旋转可形成 DGD 值严格符合 Maxwell 分布的一阶 PMD 模拟器, 也可以由多个这样的模拟器与偏振控制器组合成为单纯的高阶 PMD 模拟器. 它的突出优点是响应快, 响应时间小于 1 ms, 变化速度可随意编程, 可用于研究不同变化速度的 PMD 现象; 也可以按要求产生多种 PMD 的统计分布, 以便全面研究 PMD 补偿问题.

1 结构和原理

PMD 模拟器的结构如图 1 所示, 它由 n 套偏振延迟器和偏振旋转器串联组成. 所有偏振延迟器的快轴相互平行, 偏振旋转器可工作于 0° 和 90° 两个状态, 由不同的电压控制.

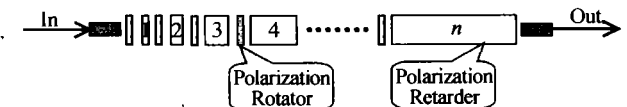


图 1 PMD 模拟器的结构

Fig. 1 The structure of the PMD emulator

设 n 个延迟器产生的群时延差(DGD)分别为 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$. 定义 k_m 为第 m 个偏振旋转器的开关系数, 旋转角度为 0° 时 $k_m = 1$, 旋转角度为 90° 时 $k_m = -1$. 则模拟器总的 DGD 值为

$$DGD_{\text{total}} = k_1(\tau_1 + k_2(\tau_2 + \dots + k_{n-1}(\tau_{n-1} + k_n \tau_n) \dots)) \quad (1)$$

如果相邻延迟器之间 DGD 值成倍数关系, 即有

$$\tau_n = 2\tau_{n-1} = 4\tau_{n-2} = \dots = 2^{n-2}\tau_2 = 2^{n-1}\tau_1 \quad (2)$$

则

*国家自然科学基金(60177019)和“863”(2001AA122042)资助项目
Tel: 010-62781369 Email: yaohj@nim.ac.cn
收稿日期: 2003-04-16

$$DGD_{total} = k_1(1 + k_2(2 + k_3(4 + \dots + k_{n-1}(2^{n-2} + k_n 2^{n-1}) \dots))) \tau_1 \quad (3)$$

设置 $k_1 \sim k_n$ 的不同组合, 就可以得到 $\tau_1 \sim (2^n - 1)\tau_1$ 、梯度为 τ_1 的所有 DGD 值. 通过计算机编程控制 $k_1 \sim k_n$ 的值, 可以实现符合统计分布的 DGD 随机数. 计算机产生平均值为 μ 的符合 Maxwell 分布的随机数的过程如下:

首先由计算机产生两个在区间 $(0, 1]$ 内的均匀分布随机数 r_1 和 r_2 , 然后由下式可以得到一个正态分布的随机数 N_1

$$N_1 = \sqrt{-2 \log(r_1) \cos^2(2\pi r_2)} \quad (4)$$

用同样的方法得到符合正态分布的随机数 N_2 和 N_3 , 则

$$M = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \mu \sqrt{(N_1^2 + N_2^2 + N_3^2)} \quad (5)$$

就是平均值为 μ 的符合 Maxwell 分布的随机数.

虽然 Maxwell 分布与实际光纤 DGD 值的统计分布符合得最好, 但是这种分布产生较大 DGD 值的几率很小, 在实际应用中, 为了研究补偿系统能够承受的最大 DGD 容限, 常常希望增加模拟器大 DGD 值出现的几率, 称为“重点采样法”^[8]. 这对于一般的双折射晶体或保偏光纤旋转的模拟器很难实现, 而对于这种可编程模拟器就很容易, 只要对计算机程序作相应的修改就可以产生我们希望得到的随机数, 然后发送给模拟器就可以了, 所以这种模拟器具有很大的灵活性.

2 实验

实验中采用双折射晶体作为偏振延迟器, 磁光晶体作为偏振旋转器. 6 个偏振延迟器的 DGD 关系符合式(2)要求, τ_1 的设计值为 1 ps, 因而模拟器 DGD 值的变化范围为 $\pm(1 \sim 31)$ ps, 步长为 1 ps. 由于晶体实际加工中存在误差, 由每一段双折射晶体实测尺寸计算出模拟器的 DGD 值变化范围为 $\pm(0.3 \sim 35)$ ps. 图 2 为用琼斯矩阵法^[9]实测的模拟器 DGD 值与计算值的对应关系, 从图中测量结果

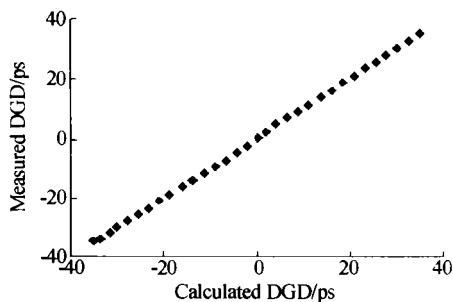


图 2 模拟器 DGD 计算值与测量值比较
Fig. 2 The comparison of the emulator's calculated and measured DGD values

看, 测量值与计算值成很好的线性关系. 经过多次测量, 证明该模拟器的 DGD 值有非常好的稳定性和重复性. 图 3 为当模拟器工作于符合 Maxwell 统计分布的随机状态时, 用固定分析法^[11]连续测量 600 个 DGD 值的统计结果, 与理想的 Maxwell 曲线较好地符合.

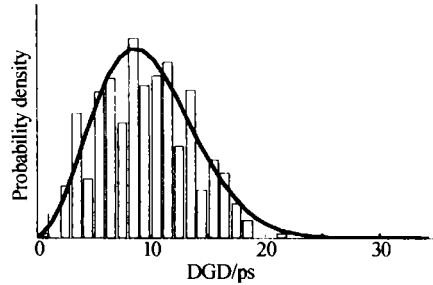


图 3 模拟器 DGD 测量值的统计结果
Fig. 3 The statistical result of the emulator's measured DGD values

将模拟器连接在光脉冲信号源后面, 可作为 PMD 恶化信号发生器用于补偿系统研究. 图 4 为该模拟器与 10 Gb/s 的 RZ 码光信号源连接, 在模拟器输入端和输出端的脉冲信号眼图. 从图中可以看到, 入射光信号眼皮很薄, 眼睛睁得很开. 经过 PMD 模拟器以后, 眼皮变厚, 眼睛也大部分瞎上了, 而且脉冲出现了明显的分叉现象, PMD 造成光传输信号恶化的效果很明显.

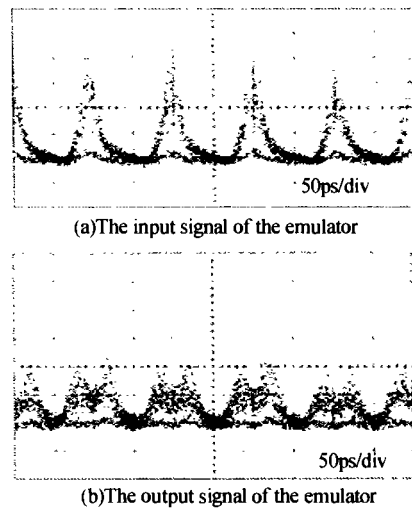


图 4 10 Gb/s RZ 光信号通过模拟器前后的眼图
Fig. 4 The eye-diagram of 10 Gb/s optical signal before and after passing the emulator

3 结论

研制了一种可编程控制的 PMD 模拟器, 它的 DGD 变化范围为 $\pm(0.3 \sim 35)$ ps, 可设为不同平均值的 Maxwell 统计分布随机变化, 也可以设为其它要求的数学分布. 经实验证明, 该模拟器 DGD 值的重复性和稳定性很好, 响应时间小于 1 ms, 可用于 10 Gb/s 和 40 Gb/s 光传输系统 PMD 问题的研究.

参考文献

- 1 Lanne S, Penninckx D, Thiery J, *et al.* Extension of polarization-mode dispersion limit using optical mitigation and phase-shaped binary transmission. Optical Fiber Communication Conference, 2000, Baltimore, USA, 2000. ThH1
- 2 Carter G. Polarization mode dispersion mitigation performance of various approaches. Optical Fiber Communication Conference, 2002, Anaheim, CA, USA, 2002, WI1:231 ~ 232
- 3 Yu Q, Yan L, Xie Y, *et al.* Higher order polarization mode dispersion compensation using a fixed time delay followed by a variable time delay. *IEEE Photonics Tech Lett*, 2001, 13(8): 863 ~ 865
- 4 Porla C, Pereira J, Dal A, *et al.* PMD emulators and signal distortion in 2.48 Gb/s IM-DD lightwave systems. *IEEE Photonics Tech Lett*, 1997, 9(6): 842 ~ 844
- 5 Djupsjobacka A. On differential group-delay statistics for polarization-mode dispersion emulators. *IEEE J Lightwave Tech*, 2001, 19(2): 285 ~ 290
- 6 Lima I, Khosravani R, Ebrahimi P, *et al.* Polarization mode dispersion emulator. Optical Fiber Communication Conference, 2000, Baltimore, USA, 2000. ThB3
- 7 Elbers J, Glingener C, Duser M, *et al.* Modelling of polarization mode dispersion in singlemode fiber. *IEEE Electronics Lett*, 1997, 33(22): 1894 ~ 1895
- 8 Lima I, Biondini G, Marks B, *et al.* Analysis of polarization mode dispersion compensators using importance sampling. Optical Fiber Communication Conference, 2001, Anaheim, CA, USA, 2001. MO4
- 9 Heffner B. Automated measurement of polarization mode dispersion using Jones matrix eigenanalysis. *IEEE Photonics Tech Lett*, 1992, 4(9): 1066 ~ 1069
- 10 Poole C, Favin D. Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer. *IEEE J of Lightwave Tech*, 1994, 12(6): 917 ~ 929

A Kind of Programmable PMD Emulator

Yao Hejun, Lou Caiyun, Zeng Li, Zhang Enyao, Song Xiaomin, Gao Yizhi

Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Received date: 2003-04-16

Abstract In order to research the impairment of polarization mode dispersion (PMD) to high speed fiber communication systems and the mitigation methods, a kind of programmable PMD emulator is developed. It is composed of six birefringent crystals and opto-magnetic crystals. Its differential group delay (DGD) can be varied in $\pm(0.3 \sim 35)$ ps and can be set in Maxwell distribution with different average value, also it can be set in other math distributions. It is proved experimentally that the measurement value of the emulator fit the theory very well and with good repeatability and stability, and the response time is less than 1 ms. The emulator is suit to be used in the research of PMD problems in 10 Gb/s and 40 Gb/s optical transmission system.

Keywords Optical fiber communication; PMD; PMD emulator; Programmable



Yao Hejun was born in 1969, Hebei. He received Ph. D. degree in Tsinghua University in 2002, and now researches on PMD and high speed fiber communication.