

偏振模色散模拟器一阶及二阶偏振模色散统计特性的分析*

周赢武 郭凌伟 瞿荣辉 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 从光纤的琼斯矩阵模型出发, 利用蒙特-卡洛方法对偏振模色散模拟器的统计特性进行了研究. 研究表明: 随着组成模拟器的保偏光纤的段数增加, 一阶和二阶偏振模色散的统计分布越接近于理论拟合曲线. 比较了两种不同模拟器的组成方法, 得到的结果将对模拟器的设计具有实际的指导作用.

关键词 偏振模色散; 模拟器; 琼斯矩阵; 统计特性

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

0 引言

在高速光通信系统中, 偏振模色散 (PMD, Polarization Mode Dispersion) 是限制系统传输容量和距离的关键因素. 近年来, 偏振模色散已成为研究的热点. 由于偏振模色散的特殊性, 在研究工作中, 许多实验无法在实际的光传输系统上完成, 因此, 就要利用 PMD 模拟器代替实际的光传输系统进行实验研究. PMD 模拟器是由多段保偏光纤 (PMF) 或高双折射晶体通过随机连接组成. 由于 PMD 模拟器是用来模拟实际的光纤传输线路, 因此, 理想的模拟器就要具有与实际的光纤传输线路一样的 PMD 特性. 国外的研究者利用光纤的密勒矩阵模型, 对 PMD 模拟器的特性作了一些研究^[1,2]. 国内最近几年也开展了 PMD 的研究^[3-5], 但还未见有关 PMD 模拟器研究的文献报道. 本文从光纤的琼斯矩阵模型出发, 利用蒙特-卡洛方法对偏振模色散模拟器的统计特性进行了研究.

1 原理

图 1 是 PMD 模拟器结构的示意图.

图 1 (a) 所示的 PMD 模拟器是通过调偏振控制

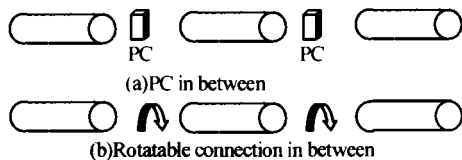


图 1 偏振模色散模拟器结构示意图

Fig. 1 A schematic diagram of PMD emulator composed by birefringent sections with polarization controllers or rotatable connection

器 (polarization controllers, PC) 使得进入各段保偏光纤的入射光的偏振态改变从而达到随机模拟 PMD 的目的; 而图 1 (b) 则是通过可旋转活动连接器使得相邻段保偏光纤双折射轴间的夹角发生随机变化来达到随机模拟的目的. 由于后者结构较前者简单, 使用起来方便, 因此实际应用时通常都是采用这一结构的模拟器. 本文所研究的对象也就是这种 PMD 模拟器.

我们知道, 组成 PMD 模拟器的每段光纤可以由如下式所示的一个复传输矩阵来表示, 即

$$M_i = R(-\theta_i) D_i(\omega) R(\theta_i) \quad (1)$$

式中 θ_i 为两段光纤快轴间的夹角.

$$R(\theta_i) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{pmatrix} \quad (2)$$

而 $D_i(\omega)$ 为一对角矩阵, 与第 i 段保偏光纤快慢轴的群时延有关.

$$D_i(\omega) = \begin{pmatrix} e^{i\omega\tau_i/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\omega\tau_i/2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, τ_i 为第 i 段保偏光纤快慢轴的群时延.

当 PMD 模拟器由 N 段保偏光纤组成时, 则总的琼斯矩阵为

$$M = \prod_{i=1}^N M_i \quad (4)$$

PMD 模拟器各段保偏光纤快轴间的夹角 θ_i 不相关地随机改变, 而每个 θ_i 在 $(0, 2\pi)$ 间满足均匀分布. 各段保偏光纤的群时延 τ_i 可以是相等的, 或者是按一定规律随机取的. 文献[1]是按下列式来取值的

$$\tau_i = \sqrt{3\pi/8N} \langle DGD \rangle (1 + \sigma x_n) \quad (5)$$

式中 N 为光纤的总段数, $\langle DGD \rangle$ 为模拟器偏振模色散的平均值; x_n 是个满足高斯分布的随机数, 它的平均值为零, 方差为 1. 当 σ 为零时意味着各段保

*上海市光科技专项重点基金资助项目

Tel: 021-59914167 Email: ywzhou1073@sina.com

收稿日期: 2003-04-28

偏光纤的群时延相等,当 σ 增大时意味着各段光纤群时延值的随机性就越大.本文在模拟中对 τ_i 采用各段相等和按式(5)随机选取二种方法进行研究和比较.

2 模拟结果与分析

为了得到PMD模拟器偏振模式色散的统计特性,必须用到蒙特-卡洛方法.具体的过程:首先,根据式(4)得到模拟器的琼斯矩阵 M ,并求出它对频率导数 M_ω ,及其逆矩阵 M^{-1} .而后求出矩阵 $M_\omega * M^{-1}$ 的本征值及本征矢量.两个本征值的虚部之差即为PMD模拟器所具有的PMD值,虚部值为负的本征值所对应的本征矢量的方向就是偏振模式色散矢量的方向,然后再利用下式得到模拟器的二阶PMD^[6].

$$\Omega_\omega = \Delta\tau_\omega \mathbf{q} + \Delta\tau \mathbf{q}_\omega \quad (6)$$

式中, Ω_ω 为二阶偏振模式色散矢量, $\Delta\tau$ 为群时延差(DGD), $\Delta\tau_\omega$ 为偏振相关色散, \mathbf{q} 为偏振模式色散矢量的方向,而 \mathbf{q}_ω 为偏振模式色散矢量的方向对频率的导数.

在进行蒙特-卡洛方法模拟时,所取的光波中心波长为1550 nm,步长为0.02 nm.为确保能得到准确的统计计算结果,重复的计算次数为50000次.

图2和图3分别是模拟计算得到的两段和三段保偏光纤所组成的模拟器DGD的统计分布图.

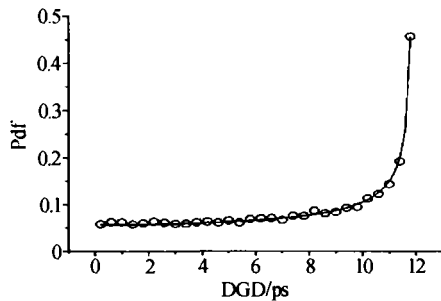


图2 由两段保偏光纤所组成的模拟器的DGD的统计分布图
Fig. 2 Monte Carlo simulation of DGD generated by a concatenated 2-segment PMF with rotatable connections. The DGD values of the PMF segments are 6 ps and 6 ps

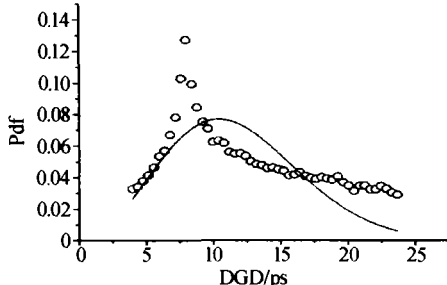


图3 由三段保偏光纤所组成的模拟器的DGD的统计分布图
Fig. 3 Monte Carlo simulation of DGD generated by a concatenated 3-segment PMF with rotatable connections. The DGD values of the PMF segments are 8.6 ps, 7.8 ps, and 8.1 ps

图中的圆圈为模拟的结果.图2的实线为如下解析式的拟合曲线^[7]

$$f(\Delta\tau) = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{4\Delta T^2 - \Delta\tau^2}}, \Delta\tau \in [0, 2\Delta T] \quad (7)$$

图3中的实线为麦克斯韦分布拟合曲线.由这两个图可以发现,当模拟器由两、三段保偏光纤通过可转动连接器连接而成时,它的DGD不满足麦克斯韦分布.这表明光纤段数太少的模拟器不能用来模拟实际的光通信系统.

对于由段数较多的PMF组成的模拟器,我们将它分成如下两种情形分别进行模拟研究.

1) 组成模拟器的各段PMF的DGD相等

这种情形相当于式(5)中的 $\sigma = 0$.在我们的模拟研究中,每种模拟器的 $\langle DGD \rangle = 23.6$ ps.图4(a)为六段DGD相等的PMF所构成的模拟器的一阶PMD的分布图.图中圆圈为模拟结果,实线为麦克斯韦分布拟合曲线.图4(b)为其二阶PMD的分布

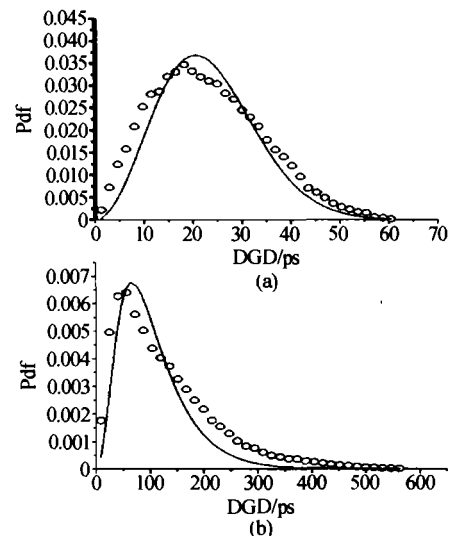


图4 六段DGD相等的PMF所构成的模拟器一阶PMD(a)及二阶PMD(b)的分布图

图.图中的实线为根据文献[8]给出的实际光纤二阶PMD的几率密度函数(如下式所示)的拟合曲线^[8].式中 $\alpha = \langle DGD \rangle (\pi/8)^{1/2}$.由该图可见,该模拟器还不能满意地模拟实际的光纤系统.

$$f(\Omega_\omega) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Omega_\omega^2}{\alpha^3} \exp\left(-\frac{\Omega_\omega^2}{2\alpha^2}\right) \quad (8)$$

图5(a)为十段DGD相等的PMF所构成的模拟器一阶PMD分布图.图5(b)为其二阶PMD分布图.图中圆圈及实线的含义与图4相同.与图4相比,图5中的模拟值与实际光纤的理论拟合曲线更加接近.图6(a)为十五段DGD相等的PMF所构成的模拟器一阶PMD分布图.图6(b)为其二阶

PMD 的分布图. 由该图可见,模拟值与实际光纤的
理论拟合曲线已较好地吻合.

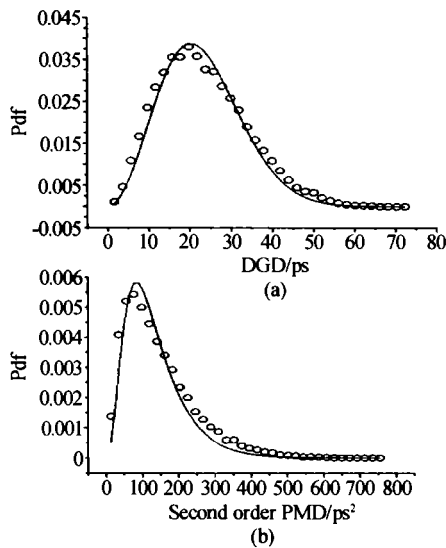


图 5 由十段 DGD 相等的 PMF 所构成的模拟器一阶 PMD (a) 及二阶 PMD (b) 的分布图

Fig. 5 Distribution function of the DGD (a) and the second-order PMD (b) for an emulator with 10-segments equal length PMF

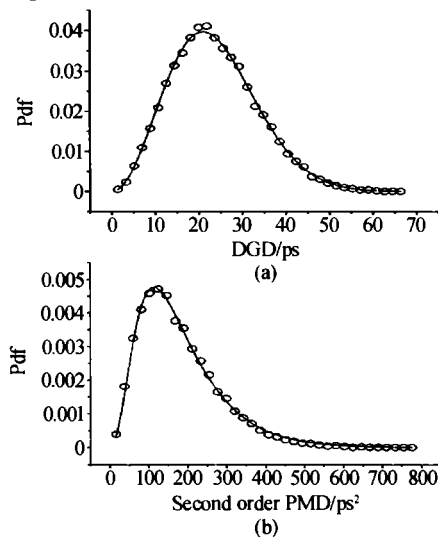


图 6 由十五段 DGD 相等的 PMF 所构成的模拟器一阶 PMD (a) 及二阶 PMD (b) 的分布图

Fig. 6 Distribution function of the DGD (a) and the second order PMD (b) for an emulator with 15-segments equal length PMF

2) 组成模拟器的各段 PMF 的 DGD 随机取值

这种情形相当于式(5)中的 $\sigma \neq 0$. 在我们的模拟中取 $\sigma = 0.1$, 每种模拟器的 $\langle \text{DGD} \rangle$ 与(1)相同, 为 23.6 ps. 而每段保偏光纤的 DGD 的值按式(5)随机取得.

图 7 给出了由六段 DGD 不相等的 PMF 所构成的模拟器一阶及二阶 PMD 的分布图. 由图 7 可知, 这种模拟器一阶及二阶 PMD 的统计分布与实际光纤情形还有较大的差别. 但要比图 4 所示的情形来

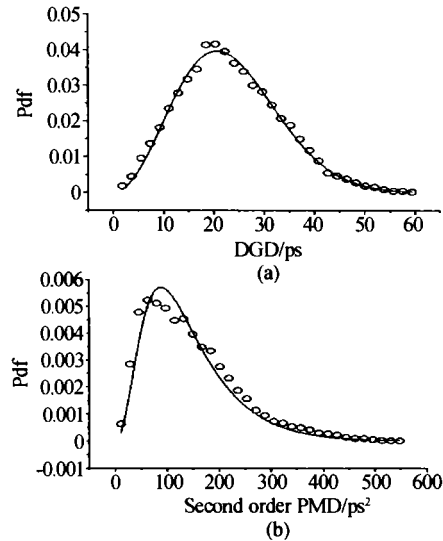


图 7 由六段 DGD 按高斯分布随机取值的 PMF 所构成的模拟器一阶 (a) 及二阶 (b) PMD 的分布图

Fig. 7 Distribution function of the DGD (a) and the second-order PMD (b) for an emulator with 6-segments unequal length PMF

图 8 给出了由十段 DGD 随机变化的 PMF 所构成的模拟器一阶及二阶 PMD 的分布图. 图 9 为十五段 DGD 随机变化的 PMF 所构成的模拟器一阶及二阶 PMD 的分布图. 由这两个图可见, 这两种模拟器一阶及二阶 PMD 的统计分布与实际光纤的理论拟合曲线已能很好地吻合了. 这表明当模拟器各段 PMF 的 DGD 值按式(5)随机取时, 当 PMF 的段数超过十段时, 就能很好地模拟实际的光纤系统了.

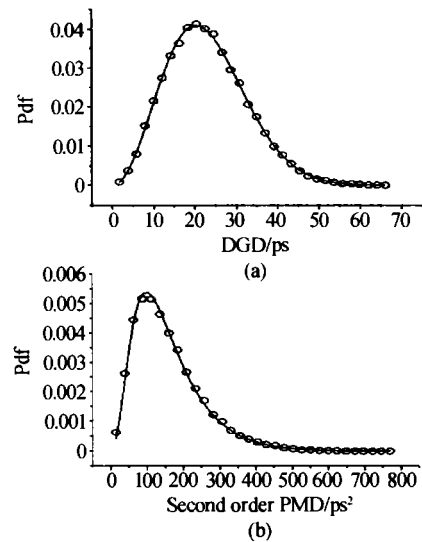


图 8 由十段 DGD 按高斯分布随机取值的 PMF 所构成的模拟器一阶 (a) 及二阶 (b) PMD 的分布图

Fig. 8 Distribution function of the DGD (a) and the second-order PMD (b) for an emulator with 10-segment unequal length PMF

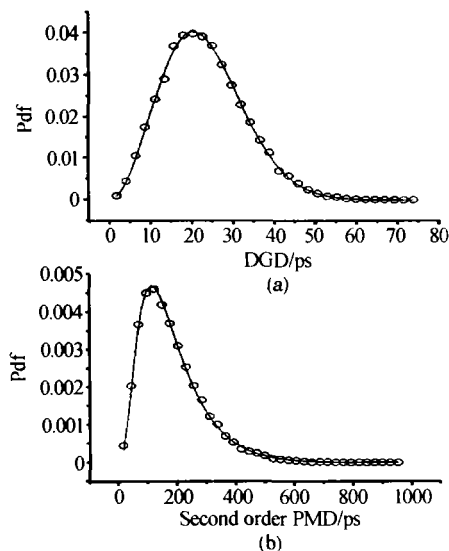


图9 由十五段 DGD 按高斯分布随机取值的 PMF 所构成的模拟器一阶(a)及二阶(b)PMD 的分布图

Fig. 9 Distribution function of the DGD (a) and the second-order PMD (b) for an emulator with 15-segment unequal length PMF

由以上的模拟分析可知,当模拟器是由 PMF 通过可旋转活动连接器连接而成时,随着组成模拟器的保偏光纤的段数增加,一阶和二阶偏振模色散的统计分布越接近于理论拟合曲线.组成模拟器的各段 PMF 的 DGD 值应不相等,而要按式(5)所示的高斯分布随机取值.当组成模拟器的保偏光纤段数较少时,该模拟器一阶及二阶 PMD 的统计分布与实际光纤情形还有较大的差别.当各段 PMF 的 DGD 按高斯分布随机取值时,则只要用十段 PMF 构成模拟器,其一阶及二阶 PMD 的统计分布与实际光纤的理论拟合曲线已能很好地吻合了.当然,在实际设计 PMD 模拟器时,可以根据所要模拟的线路的实际情形确定所要的 PMF 段数及模拟器的平均 DGD 的大小.

3 结论

本文从光纤的琼斯矩阵模型研究出发,用蒙特-卡洛方法对偏振模色散模拟器的统计特性进行了模

拟计算.由少数几段 PMF 组成的模拟器不能模拟实际的光纤系统.而当组成模拟器的各段 PMF 的 DGD 按高斯分布随机取值时,由十段以上的 PMF 组成模拟器一阶及二阶 PMD 的统计分布与实际光纤的理论拟合曲线已能很好地吻合了.在实际设计 PMD 模拟器时,可以根据所要模拟的线路的实际情形确定所要的 PMF 的段数及模拟器的平均 DGD 的大小.在设计多信道传输系统的 PMD 模拟器时,还要兼顾到 PMD 的自相关问题^[1].

参考文献

- 1 Marks B S, Lima I T, Menyuk C R. Autocorrelation function for polarization mode dispersion emulators with rotator. *Opt Lett*, 2002, **27**(13): 1150 ~ 1152
- 2 Lima I T, Khosravani R, Ebrahimi P, et al. Comparison of polarization mode dispersion emulators. *J Lightwave Technol*, 2001, **19**(12): 1872 ~ 1881
- 3 郑远,李朝阳,刘秀敏,等. 偏振模色散对线性系统脉宽的影响. *中国激光*, 2002, **29**(10): 900 ~ 904
Zhen Y, Li C Y, Liu X M, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(10): 900 ~ 904
- 4 蔡炬,徐铭,杨祥林. 单模光纤偏振模色散统计特性的研究. *光学学报*, 2003, **23**(2): 170 ~ 175
Cai J, Xu M, Yang X L. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 170 ~ 175
- 5 王岚,赵文玉,王宏祥,等. 高速传输系统中高阶 PMD 的影响. *光子学报*, 2002, **31**(8): 941 ~ 945
Wang L, Zhao W Y, Wang H X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8): 941 ~ 945
- 6 Nelson L E, Jopson R M, Kogelnik H, et al. Measurement of depolarization and scaling associated with second-order polarization mode dispersion in optical fibers. *Photon Tech Letter*, 1999, **11**(12): 1614 ~ 1616
- 7 Djupsjobacka A. On different group-delay statistics for polarization-mode dispersion emulators. *J Lightwave Technol*, 2001, **19**(2): 285 ~ 290
- 8 Ciplippe P, Gisin B, Gisin N, et al. Second-order polarization mode dispersion impact on analog and digital transmissions. *J Lightwave Technol*, 1998, **16**(5): 757 ~ 771

Analysis of Statistical Characteristics of the First and Second Order Polarization Mode Dispersion of PMD Emulator

Zhou Yingwu, Guo Lingwei, Qu Ronghui, Fang Zujie

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date: 2003-04-28

Abstract The statistical characteristics of the first and second order PMD of a PMD emulator were studied based on the Jones matrix of optical fiber and Monte-Carlo method. The simulation results show that the statistical characteristics of the first and second order PMD of PMD emulator are getting close to the real fiber as the number of PM fiber composing the simulator increasing. Two kinds of PMD emulator were studied by comparison. The results will be helpful for PMD emulator design.

Keywords Polarization mode dispersion; Emulator; Jones matrix; Statistical characteristics



Zhou Yingwu was born in Fujian, China. He graduated from National Huaqiao University, and received M. S. degree in 1999. Now he is pursuing his Ph. D. degree in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS. His current research interests are mainly polarization effects in fiber-optic communication systems and fiber Bragg gratings.