

一种简单实用低插损的 PMD 模拟器^①

李朝阳^② 郑 远 李春云 杨伯君 张晓光

(北京邮电大学理学院 北京 100876)

摘 要 采用偏振控制器级联保偏光纤的方案,数值模拟了偏振模色散模拟器的统计分布。通过一种优化算法,采用特定长度的 10 段高双折射率光纤,使级联而成 PMD 模拟器的偏振模色散统计分布接近于麦克斯韦分布。实验测量结果表明,这种模拟器插损低,可控性好,变化迅速,DGD 分布符合麦克斯韦分布。

关键词 偏振模色散 双折射 偏振态 光纤通信

0 引言

随着色度色散和光纤损耗的逐一克服,偏振模色散可能成为限制高速光纤通信系统容量和距离的最终因素^[1]。偏振模色散(PMD)定义为两正交偏振主态之间的群时延差(DGD)。对一定长度的光纤,DGD 平均值 $\Delta\tau$ 满足:

$$\Delta\tau^2 = \frac{1}{2} D^2 h^2 \left[\frac{2l}{h} - 1 + \exp\left(-\frac{2l}{h}\right) \right] \quad (1)$$

式中, l 为光纤长度, h 为耦合长度, D 为单位长度光纤中的群时延差。当光纤长度远大于耦合长度时,由上式可得: $\Delta\tau \cong D\sqrt{hl}$, DGD 的平均值与光纤长度的平方根成正比。但瞬时 DGD 满足麦克斯韦概率分布:

$$P(\Delta\tau, q) = \frac{2\Delta\tau^2}{\sqrt{2\pi}q^3} \exp\left[-\left(\frac{\Delta\tau}{\sqrt{2}q}\right)^2\right] \quad (2)$$

并且其平均值和方差分别满足:

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{8}{\pi}}q, \quad \sigma = \sqrt{\frac{3\pi-8}{\pi}}q \quad (3)$$

瞬时 DGD 随温度、应力、环境因素的变化而变化。由于此 PMD 的统计特性,对 PMD 的测量和补偿需要测试大量不同的光纤,而目前,能商用的偏振模色散(PMD)值较大的光纤还未出现,进口一个 PMD 模拟器需要几十万元,因此研制能替代这些光纤的具有同样统计分布而又经济的 PMD 模拟器有重要意义。本文采用偏振控制器级联保偏光纤的方

案,数值模拟了偏振模色散模拟器的统计分布。具体作法是通过一种优化算法,采用特定长度的 10 段高双折射率光纤,使级联而成 PMD 模拟器的偏振模色散值统计分布接近于麦克斯韦分布。实验测量结果表明,这种模拟器损耗低,可控性好,能迅速变化,DGD 分布接近于理论值,可满足一定的 PMD 理论和实验研究的需要。

1 理论模型与数值模拟

采用文献[2]中关于偏振模色散的琼斯矩阵表示法来求长光纤的一阶 PMD。若将输入偏振光

$$E_a, \text{输出偏振光 } E_b \text{ 表示为: } E_a, b = \begin{bmatrix} E_{a,b}^x \\ E_{a,b}^y \end{bmatrix} =$$

$\epsilon_{a,b} e^{i\Phi_{a,b}} \hat{\epsilon}_{a,b}$ 和 $\Phi_{a,b}$ 为光场的幅度和相角, $\hat{\epsilon}_{a,b}$ 为光场偏振态的单位向量,则在只考虑一阶 PMD 时, $E_b = T(\omega)E_a = e^{j\beta(\omega)}U(\omega)E_a$, $T(\omega) = e^{j\beta(\omega)}U(\omega)$ 即琼斯矩阵, ω 为光频, $\beta(\omega)$ 是复相位, $U(\omega)$ 是单位矩阵。经过简单求导易得:

$$\frac{dE_b}{d\omega} = \frac{dT}{d\omega}E_a = e^{j\beta}[\beta'U + U']E_a \quad (4)$$

$$\frac{dE_b}{d\omega} = \left[\frac{1}{\epsilon_b} \epsilon_b' + i\Phi_b' \right] E_b + \epsilon_b e^{i\Phi_b} \frac{d\hat{\epsilon}_b}{d\omega} \quad (5)$$

从而

① 863 计划(2001AA120204)、国家自然科学基金(60072042)及教育部博士点基金资助项目。

② 男,1967 生,博士生,研究方向:光纤通信,联系人。

(收稿日期:2002-08-12)

万方数据

$$\epsilon_{\beta} e^{i\Phi_b} \frac{d\hat{\epsilon}_b}{d\omega} = e^{\beta} [U' - ikU] E_a \tag{6}$$

这里, $k = \Phi'_b + i[\beta' - \frac{1}{\epsilon_b}\epsilon'_b]$ 。当 $[U' - ikU] = 0$ 时, $\frac{d\hat{\epsilon}_b}{d\omega} = 0$ 输出偏振态不随频率变化, 这就是所谓输出偏振主态。在一定带宽内对固定输入偏振态, 它是不变的, 此时有:

$$k_{\pm} = \pm \sqrt{|u'_1|^2 + |u'_2|^2} \tag{7}$$

$$\hat{\epsilon}_{a\pm} = e^{i\rho} \begin{bmatrix} \frac{u'_2 - ik_{\pm}u_2}{D_{\pm}} \\ -\frac{u'_1 - ik_{\pm}u_1}{D_{\pm}} \end{bmatrix} \tag{8}$$

其中 ρ 为任意的相角,

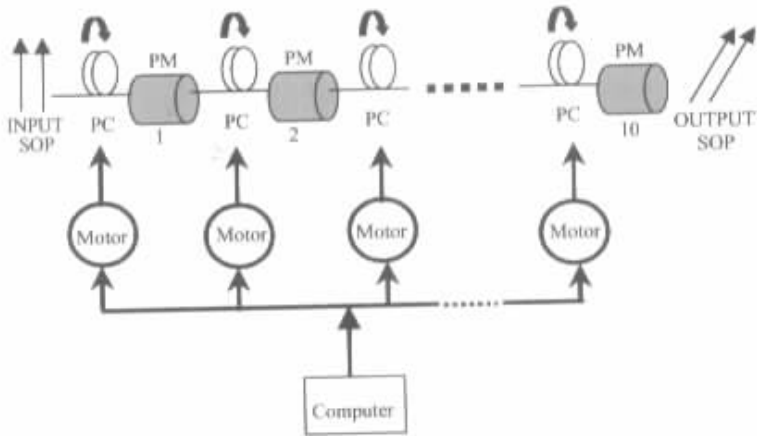
$$D_{\pm} = \sqrt{k_{\pm}(k_{\pm} - \ln[u_1^* u'_1] u_2^* u'_2)} \tag{9}$$

$$\phi'_{b\pm} = \tau_{\pm} = \ln[\beta'] \pm \sqrt{|u'_1|^2 + |u'_2|^2} \tag{10}$$

所求 DGD 即:

$$\Delta\tau = \tau_+ - \tau_- = 2\sqrt{|u'_1|^2 + |u'_2|^2} \tag{11}$$

长光纤偏振模色散模拟器可由多段保偏光纤 (PMF) 用偏振控制器 (PC) 级联而成^[3], 如图 1 所示。每段 PMF 的 DGD 时间为 $\Delta\tau_i$, 两两 PMF 之间用 PC 相连, PC 为 $\lambda/2$ 波片, 在计算机的控制下, 能使主态方向在 $[0, 2\pi]$ 随机转动, 且转动角 θ_i 服从均匀分布。我们采用 10 段 PMF, 利用上面的理论模型, 通过一种优化算法, 得到 DGD 时间从第 1 到 10 段分别为 2.7ps, 3.6ps, 4.6ps, 3.9ps, 3.6ps, 4.4ps, 2.9ps, 3.8ps, 3.9ps, 2.4ps, 用 PC 级联而成的 PMD 模拟器, 数值模拟得到的统计特性近似于麦克斯韦分布。



PMF:保偏光纤;PC:偏振控制器;INPUT SOP:输入偏振态;OUTPUT SOP:输出偏振态;
Motor:马达;Computer:计算机

图 1 PMD 模拟器实验原理图

每段 PMF 的琼斯矩阵可表示为:

$$M_{PMFi} = \begin{bmatrix} \exp\{i\omega\Delta\tau_i/2\} & 0 \\ 0 & \exp\{-i\omega\Delta\tau_i/2\} \end{bmatrix} \tag{12}$$

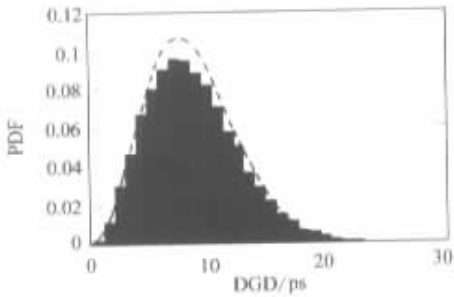
每个 PC 的琼斯矩阵可表示为:

$$M_{PCi} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp\{i\pi/2\} & 0 \\ 0 & \exp\{-i\pi/2\} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \tag{13}$$

总的琼斯矩阵为这一系列 PMF、PC 琼斯矩阵之积, 即有:

$$T = \prod_{i=1}^{10} M_{PCi} M_{PMFi} \tag{14}$$

图 2 为数值模拟结果。由图 2 可见, 模拟器的统计特性和麦克斯韦统计分布的理论曲线相近。这说明我们所选的光纤长度值比较合适。

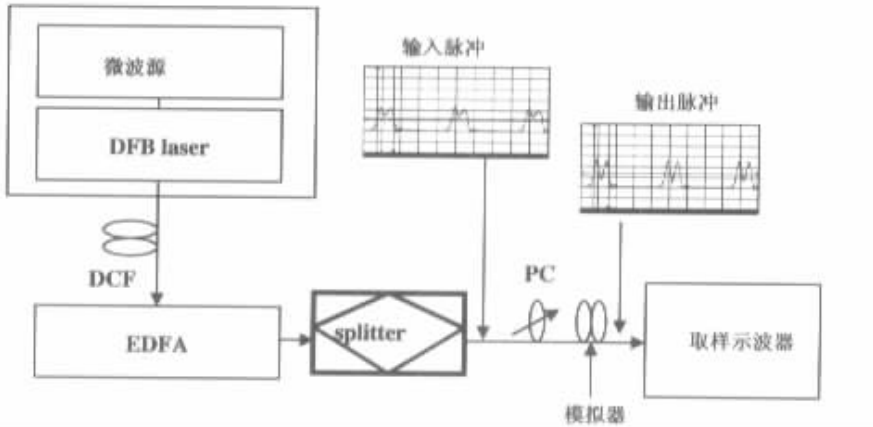


虚线为麦克斯韦统计分布的理论值, 直方图为模拟器的 DGD 时间与概率密度函数的关系曲线, 平均次数为 10 000 次。

图 2 模拟器的 DGD 时间与概率密度函数的关系

2 实验结果及讨论

对图 1 构成的模拟器,我们采用偏分孤子法 (PMS)^[4]测 PMD,测量精度为 0.3ps,如图 3 所示。偏分孤子法是利用孤子一个独一无二的性质:对偏振不敏感。即使是通过长距离传输,孤子脉宽变化也很小^[5]。当孤子通过偏振分束器后,分裂成两个偏振态相互正交的孤子,两者之间产生群时延差。



DCF:色散补偿光纤;EDFA:掺铒光纤放大器;DFB-LD:分布反馈式激光器;splitter:偏振分束器
图 3 模拟器的 DGD 时间测量实验装置图

测量过程中,每测一个 DGD 数据前都要随机调整一个偏振控制器的波片角度,共获得 1 000 组 DGD 数据,经处理,得到如图 4 所示。

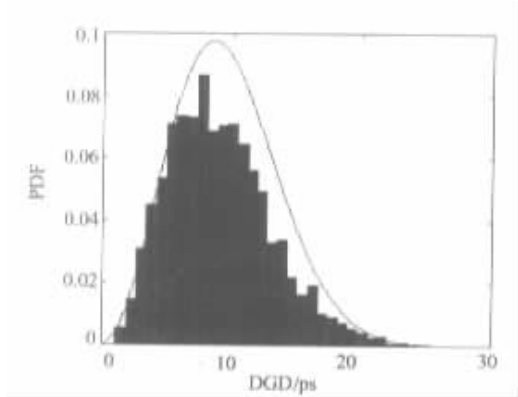


图 4 被测 PMD 模拟器的 DGD 与概率密度函数的关系曲线(测量样本数为 1 000 个)

从图 4 看来,实验中的分布曲线和理论值有一定差别。由于我们在实验中未考虑偏振相关损耗,而且测得的数据偏少,我们认为,这种差别是可以接受的。也就是说模拟器的 DGD 分布曲线基本上符合麦克斯韦统计分布。在我们焊接光纤时,每个熔接点能做到焊接损耗小于 0.05,模拟器总的损

进入待测光纤后,调整偏振控制器 PC,使光进入被测光纤的快慢轴与两个正交孤子相对的偏振方向平行。当前面的孤子与快轴平行,后面的孤子与慢轴平行,这时总的群时延差增加为 τ_{\max} ,当前面的孤子与慢轴平行,后面的孤子与快轴平行,总的群时延差减少为 τ_{\min} ,被测光纤的偏振模色散 $\Delta\tau = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}$ 。

耗实测为 3dB。因此我们的模拟器损耗是较低的。实际光纤的 PMD 通常变化较为缓慢,而我们的模拟器能在计算机的控制下,按所需的快慢程度而变化,能够大大节省实验所需的时间。值得注意的是,在分布曲线的尾部,DGD 值较大,对系统的损伤也较大,但从曲线上能清楚地看到,这种概率很小,在实际应用中能减少对系统的损伤。

3 结 论

采用偏振控制器级联保偏光纤的方案,数值模拟了 PMD 模拟器偏振模色散值的统计分布,通过一种优化算法,使其分布接近于麦克斯韦分布。实验结果表明,这种模拟器插损低,可控性好,变化迅速,DGD 分布较为理想,有一定的实用价值。

参考文献

[1] Heffner B L. PMD measurement techniques—a constant comparison. In: Optical Fiber Conference'96 Technical Digest, 1996. 292
[2] Poole C D, Giles C R. Optics Letters, 1988, 13(2):155
[3] Karlsson M, Bretel J. Optics Letters, 1999, 24(14):939
[4] 李朝阳,刘秀敏,李荣华. 光电子·激光, 2001, 12(9):303
[5] Evangelides S G, Mollenauer Jr L F, Gordon J P, et al. J Lightwave Technol, 1992, 10:28

A Simple , Practical and Low-loss PMD Emulator

Li Chaoyang , Zheng Yuan , Li Chunyun , Yang Bojun , Zhang Xiaoguang
(School of Science , Beijing University of posts and telecommunications , Beijing 100876)

Abstract

Using a scheme of PMF catenated with PC , simulation is performed to investigate the statistical characteristics of a PMD emulator which results in 10 optimized lengths of PMF through a special algorithm. Simulating and experimental results show that the PMD statistical characteristics accords with Maxwell distribution , and the PMD emulator has merits of low loss , controllability , being able to change rapidly.

Key words : Polarization mode dispersion , Birefringence , States of polarization , Optical communication

《电动汽车及燃气汽车产业化和商业运行扶持政策研究》课题启动

由国家科技部与国家发改委共同组织的国家 863 电动汽车重大科技专项《电动汽车及燃气汽车产业化和商业运行扶持政策研究》课题启动会于 2003 年 7 月 23 日上午在中国科技会堂召开。来自国家发改委、科技部、财政部、国务院税则办、商务部、公安部、建设部、海关总署、交通部、国家环保总局、国家标准化管理委员会有关司局 ,中科院电工所、清华大学、北京理工大学、北方交大以及中国汽车技术研究中心等单位的 37 名代表和专家参加了会议。

会上 ,国家发改委工业司陈斌副司长介绍了《汽车产业发展政策》研究制定的有关情况 ,科技部高新司许惊副司长介绍了国家清洁汽车行动、电动汽车重大专项总体部署和政策研究课题的背景。中国汽车技术研究中心张进华副主任和清华大学欧阳明高教授分别代表清洁汽车行动总体专家组和电动汽车重大专项总体专家组做了工作情况介绍 ,汽研中心情报所黄永和总工代表政策研究课题组就课题研究的目的意义、研究内容、组织方式及国外相关情况向与会代表和专家做了汇报。在本次会议上 ,正式成立了由国务院有关部门和专家组成的政策研究课题领导小组。

与会领导和专家对本课题的研究思路和研究内容等进行了充分讨论。一致认为 ,随着我国汽车产业、汽车市场以及清洁汽车、电动汽车产业化技术的不断发展 ,研究制定电动汽车及燃气汽车产业化和商业运行扶持政策已成为当前汽车产业政策工作的重要内容和紧迫任务。该课题的启动将对中国电动汽车及燃气汽车的发展应用起到进一步的推动作用 ,课题组应抓紧研究 ,相关部门共同支持 ,以使课题达到预定目标。

与会代表和专家还对课题下一步研究工作提出了具体指导意见。一是课题研究应注意对国内外情况进行深入细致的研究 ,充分考虑电动汽车产业化运行所面临的问题 ,对技术进展、产业化的时间以及市场占有率做相关的分析预测 ,以保证课题成果适合我国国情 ,便于各部门在决策时作为测算的基础并结合本部门的规划确定给予支持的力度 ,从而成为政府制订相关政策的直接依据 ;二是政策制定要以实用为主 ,要遵守并合理运用 WTO 规则 ,要用足现有的政策 ;三是扶持政策既要涉及价格、财政和税收等资金措施 ,又要广开思路、多种措施并举、多方面参与 ,共同营造我国电动汽车、燃气汽车发展的良好空间 ;四是在研究过程中课题组应及时吸取各有关部委的意见 ,并将各阶段的成果及时反馈。

最后 ,陈司长和许司长作了总结发言 ,强调本次研究要在深入调查、分析的基础上 ,制定出科学合理、适合国情、可操作性强的扶持政策。

(电动汽车重大科技专项办公室 甄子健)