

偏振模色散后补偿器的工作方式分析*

郑 远, 刘玉敏, 李朝阳, 杨伯君, 张晓光

(北京邮电大学理学院物理部, 北京 100876)

摘要:从理论上研究了一阶和高阶偏振模色散(PMD)后补偿器工作时补偿光纤与被补偿光纤的 PMD 矢量在 Stokes 空间中的相对位置关系,由此提出了其在小 PMD 和大 PMD 情况下可能的工作方式。以故障概率为指标,数值结果表明补偿器在这些工作方式下的补偿性能与实际补偿器所能达到的最佳性能一致。

关键词:偏振模色散(PMD); 补偿器; 故障概率

中图分类号:TN929.11;TN253 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2002)09-0934-04

Analysis of the Operating Points of Post-transmission Polarization Mode Dispersion Compensators

ZHENG Yuan, LIU Yu-min, LI Chao-yang, YANG Bo-jun, ZHANG Xiao-guang

(Department of Physics, School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Possible operating points of first- and higher-order polarization mode dispersion(PMD) compensators were presented in both small and large PMD conditions according to the theoretical analysis of the relationship between the PMD vectors of compensating and compensated fibers in Stokes space. Outage probability was used to evaluate the performance of compensating systems. Numerical results show that the optimal performance obtained by the compensators running in these operating points is consistent with what can be acquired by the compensators used in practice.

Key words: Polarization Mode Dispersion(PMD); Compensator; Outage probability

1 引 言

随着光通信系统码速率的不断提高,偏振模色散(PMD)已成为发展高速率、长距离光纤通信系统的主要障碍之一。目前认为,40 Gb/s 以上系统和早期光网上建立的 10 Gb/s 系统都必须考虑 PMD 的影响并进行补偿。人们提出了各种各样的 PMD 补偿技术。纵观这些补偿技术,可以用前补偿^[1]和后补偿^[2,3]来概括。其中,前补偿技术指在控制光源的输出偏振态,使之沿着光纤的偏振主态(PSP)传输,但需要有专门的信道将接收机端的反馈信号传送到发射端。后补偿是指在接收机的前端采取一定的措施来减小 PMD 的不利影响,具体又可分为一阶补偿^[3]和高阶

补偿^[4,5]。后补偿方法是现今较流行的方法,然而国内尚未见有分析补偿器工作时状态的报道。本文从理论分析了 PMD 后补偿器正常工作时补偿光纤的 PMD 矢量与被补偿光纤的 PMD 矢量在 Stokes 空间中的相对位置关系,由此提出了它可能存在的工作方式;以系统的故障概率^[6]作为衡量补偿器性能的指标,对 2 种典型的 PMD 后补偿器的工作方式进行了分析,比较了不同工作方式下的性能。

2 数值模拟系统模型

2.1 系统整体模型及计算流程

为了分析各种 PMD 后补偿器的工作方式,评价其性能,需要建立一个用于数值模拟的测试系统。与

* 收稿日期:2002-03-06 修订日期:2002-06-28

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60072042);国家“863”计划资助项目(2001AA122041);教育部博士点基金资助项目;北京邮电大学与世维通基金资助项目

参考文献[7,8]所用的理论模型不同,我们建立了一个40 Gb/s的非归零(NRZ)码系统,不考虑色散及非线性效应,忽略与偏振有关的增益或损耗,本文的模拟结果都是针对这个系统而言,具体的系统框图1所示。

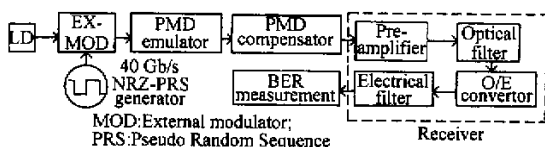


图1 测试系统框图

Fig. 1 Setup of test system

数值模拟的流程可简述为:光源发出的光经过外调制器后产生40 Gb/s的NRZ码,经过PMD模拟器,这里所用的模拟器由参考文献[9]中的模型给出,它既能正确反映一阶PMD的统计特性,也可以反映二阶甚至更高阶PMD的统计特性,这样便于研究高阶PMD补偿器的性能。经过PMD模拟器后的畸变信号经过PMD补偿器后进入光接收机,光接收机模型中包括光预放大器、光滤波器、光电转换器和电滤波器。从接收机输出的电信号送到误码仪中进行误码测量,计算出故障概率。

研究PMD补偿器的性能,需要排除损耗等因素的影响。考虑没有PMD模拟器和补偿器(背靠背)的情况,认为此时影响误码率的主要因素是接收机中光预放大器的自发辐射(ASE)噪声。根据预放大器的增益 G 和自发辐射因子 N_{sp} 的大小来优化光滤波器和电滤波器的带宽,确定最小的接收光功率 P_{min} ,使得误码率大于 1×10^{-12} 的概率为 10^{-6} (主要由ASE的随机变化引起)。进而将PMD模拟器和补偿器加入系统中,同时让接收的光功率比 P_{min} 增加2 dB,考虑2 dB输入光功率余量情况下PMD补偿器的性能。在数值模拟中,光预放大器的小信号增益取30 dB, N_{sp} 取2;光滤波器采用F-P腔滤波器,电滤波器采用三阶Bessel滤波器。

由于PMD的统计特性,评价系统性能的指标也是随机变化的,一般采用系统的故障概率^[6]来评价系统性能。故障概率指的是评价系统性能的某个指标,例如误码率、 Q 值或功率代价等超过某一门限值的概率。本文计算的是误码率超过 1×10^{-12} 的故障概率。在计算误码率时,抽样判决时刻可以在1个比特周期时间内平移,以取得最佳的误码率。在模拟中,取1000根统计意义上独立的光纤,每根光纤有10个输入线偏振态,均匀分布在邦加球的赤道上,这样共可

获得10000个样本点,可计算的最小故障概率为 1×10^{-4} 。

2.2 补偿器模型

比较一阶后补偿,根据差分群时延(DGD)是否可变,又分为固定补偿,可变补偿及2阶段补偿^[5]3种PMD补偿器。偏振控制器采用1/4波片加1/2波片级联的形式。反馈控制所用的误差信号(error signal)由接受信号中20 GHz、10 GHz和5 GHz频谱分量强度的线性叠加给出,分别控制偏振控制器和可变时延线。控制的目标是使误差信号最大。

3 结果及讨论

3.1 1阶PMD后补偿器的工作方式和性能比较

考虑2段光纤级联的情况,级联后的一、二阶PMD矢量公式为

$$\Omega = R_c(\Omega_f + R_c^+ \Omega_c) \quad (1)$$

$$\Omega_\omega = R_c[\Omega_{f\omega} + (R_c^+ \Omega_c) \times \Omega_f] \quad (2)$$

其中,下标 f 表示被补偿光纤;下标 c 表示补偿光纤;下标 ω 表示对角频率求导数; Ω 表示总的PMD矢量; R_c 表示补偿光纤的Mueller矩阵; R_c^+ 表示 R_c 的厄米共轭矩阵。根据(1),一阶固定后补偿可以有2种工作方式:第1种工作方式是让 Ω_f 与 $R_c^+ \Omega_c$ 反向,即将补偿光纤的双折射快轴对准被补光纤的慢主态,以减小补偿光纤和被补偿光纤总的DGD,如图2(a)所示;第2种工作方式是让 Ω 与输入光的偏振态一致,即补偿光纤和被补偿光纤级联后总的输入PSP(以后称为复合输入PSP)与输入光的偏振态一致,类似于主态传输补偿法,如图2(b)和(c)所示,图中 s_{in} 表示输入光的偏振态。一般情况下,如果补偿光纤DGD大于被补偿光纤DGD,符合要求的复合PSP有2个,如图2(b), Ω_{tot1} 与输入光的偏振态同方向, Ω_{tot2} 则与其反向,而且正、反向复合主态的幅度不等,这是与主态传输补偿法不同的地方。还有一种情况,由于PMD的随机性,被补偿光纤的DGD可能比补偿光纤的DGD大,使得复合输入主态无法与输入光信号的偏振态同向或反向,而是有一定的角度,如图2(c)

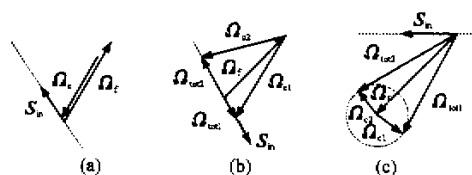


图2 一阶后补偿器2种工作方式

Fig. 2 Two operating points of first-order post compensator

所示, $\Omega_{\text{tot}1}$ 和 $\Omega_{\text{tot}2}$ 分别表示与输入偏振态 s_{in} 夹角最小和最大 2 种极限情况。我们把图 2(b) 和 (c) 的 2 种情况都归入第 2 种工作方式。

那么这两种工作方式究竟哪一种的补偿效果更好? 一方面, 由于 PMD 的随机性, 用第 1 种方式补偿后, 有一部分瞬时 DGD 不能被完全补偿掉, 而且此时输入光的偏振态与复合输入主态的方向是随机的, 因而补偿后系统的性能要受到剩余 DGD 的影响; 在第 2 种工作方式中, 一般情况下 Ω_i 与 $R_c^+ \Omega_c$ 不在一条直线上, 式(2)中的叉乘项不为零, 因此这种工作方式对高阶的 PMD 效应可能会有一定的作用, 既可能减弱也可能增强。例如当高阶 PMD 很小时, 这种工作方式反而会增加高阶 PMD 效应, 可以推断在 PMD 值比较小的时候, 第 2 种工作方式的效果会比较差。在实际的补偿系统中, 这两种工作方式都会存在。为了准确的比较两种工作方式的性能, 在数值模拟中人为的将两种工作方式分开, 分别讨论以利于比较, 结果如图 3 所示。图中, f 表示第 1 种工作方式; s 表示第 2 种工作方式; t 表示不区分两种工作方式, 通过控制使反馈信号最大的模拟结果; 9 ps 和 17 ps 表示补偿光纤 DGD 的大小。由图可见, 在补偿光纤 DGD 较小时; f : 9 ps 曲线与 t : 9 ps 曲线非常接近, 补偿器几乎完全以第 1 种工作方式来工作; 当补偿光纤 DGD 较大时, s : 17 ps 曲线与 t : 17 ps 曲线保持一定距离, 补偿器基本上以第 2 种工作方式工作, 第 1 种补偿方式基本不起作用。另外, 当被补偿光纤的平均 DGD 较小时, 第 1 种工作方式的故障概率小, 随着平均 DGD 的增加, 两种工作方式的故障概率逐渐增大, 性能接近。

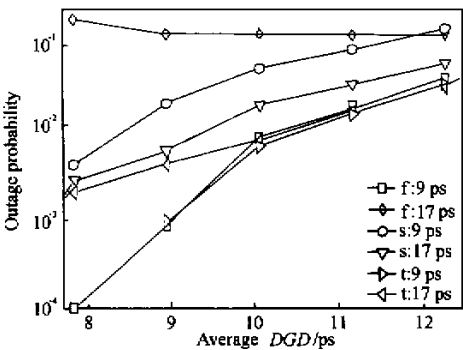


图 3 2 种工作方式的故障概率

Fig. 3 Outage probability of two operating points

3.2 两阶段 PMD 后补偿器的工作方式

我们知道限制一阶 PMD 补偿器性能的因素是 PSP 的带宽^[10], 或者说是 PMD 矢量的频率相关

性^[1]。以后向一阶固定补偿的第 1 种工作方式为例, 主态带宽的存在意味着超过这个带宽, 不同频率处 PMD 的相关性大大降低, 这样即使补偿光纤的 PMD 矢量与中心频率处的 PMD 矢量反向, 也并不能保证周围频率的 PMD 矢量与补偿光纤的 PMD 矢量反向, 频率间隔超过主态带宽时, 这两个矢量甚至有可能同向, 这样不但起不到补偿的作用, 反而使补偿后的效果比未补偿时还坏。所以为了突破这个限制, 可以设想先对 PMD 的频率相关性进行补偿, 使补偿后信号频率范围内(或者信号绝大部分能量范围内)的 PMD 矢量的相关性变大(或者 PSP 的带宽增大), 然后再进行一阶补偿, 这样可以增强一阶补偿的效果。频率相关性的补偿从另一种观点来说, 就是所谓的高阶补偿。

两阶段补偿器第 1 段主要用于补偿 PSP 方向随频率变化的分量(PSP rotation rate), 对高阶 PMD 补偿的性能主要取决于第 1 阶段补偿光纤 PMD 矢量的大小和方向如何随被补偿光纤变化。在参考文献[5]提出的两阶段补偿方案中, 没有对其工作方式的详细描述。我们提出这种补偿器的工作方式, 图 4 所示的是这种工作方式下第 1 阶段补偿光纤 PMD 矢量 Ω_{c1} 的变化示意图。其中, 矢量 a 定义为 $a = R_{c1}^+ \Omega_{c1} |_{\omega=0}$; b 和 c 分别是其在 \hat{q} 及 $\hat{q} \times \hat{q}_\omega$ 轴上的投影; R_{c1}^+ 与式(1)中的 R_c^+ 类似。被补偿光纤的 PMD 矢量可以表示为 $\Omega = \Omega \hat{q}$, Ω 为 DGD, \hat{q} 表示 PMD 矢量的方向, 图 4 中的 $\hat{q} = \hat{q}(\omega=0)$, $\hat{q}_\omega = d\hat{q}(\omega)/d\omega |_{\omega=0}$ 。由于 $\hat{q} \perp \hat{q}_\omega$, 以及 \hat{q} , \hat{q}_ω 和 $\hat{q} \times \hat{q}_\omega$ 所在的方向可以构成图 4 所示的

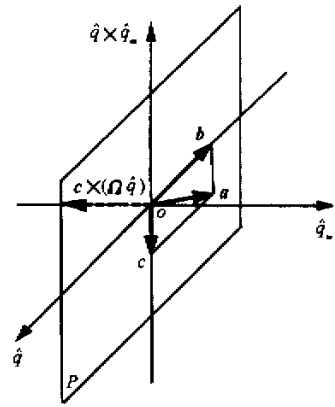


图 4 两阶段补偿器的工作方式

Fig. 4 One of operating points of the two-stage compensator

坐标系, \hat{q} 及 $\hat{q} \times \hat{q}_\omega$ 所确定的平面记为 P 。我们所提的工作方式指矢量 a 位于平面 P 内, 它在 \hat{q} 及 $\hat{q} \times \hat{q}_\omega$ 轴上的投影分别是 c 和 b 。由式(1)、(2)可见, 对补偿高阶 PMD 有作用的是 c , 因为它与 \hat{q} 方向上矢量的叉乘不为 0; b 对补偿高阶 PMD 没有作用, 但对补偿一阶 PMD 有贡献。当 PSP rotation 比较大的时候, c 分量大一些, 一阶 PMD 留作第 2 阶段可变补偿器补偿; 反之, b 分量大一些, 可以和第 2 阶段结合起来补偿一阶 PMD。

图 5 比较了 3 种后补偿器的性能。其中, 一阶补偿器后的数字表示补偿光纤的 DGD, 分别计算了 DGD 为 9 ps 和 17 ps 时的故障概率; 高阶补偿器后的数字表示第 1 段补偿光纤的 DGD, 第 2 段采用可变补偿的方式, 让其故障概率最小, 将第 1 段的 DGD 大小进行优化, 分别取为 20 ps 和 24 ps。与参考文献[5,12]相比较, 从 3 种补偿器故障概率的相对关系来看, 2 阶段高阶 PMD 补偿器在上面所提工作方式下的故障概率与以控制反馈信号最大得到的故障概率基本一致, 表明这种补偿器基本上以上面所提的方式工作。

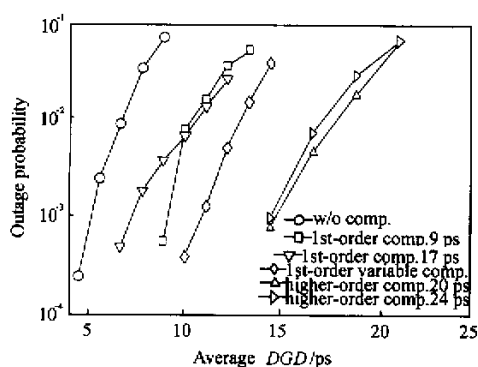


图 5 3 种补偿器的故障概率

Fig. 5 Outage probability of three compensators

4 结 论

本文分析了一阶 PMD 后补偿器的两种工作方式。以故障概率为指标, 将两种工作方式进行了比较。结果表明, 在补偿光纤 DGD 较小时, 补偿器主要以第 1 种工作方式工作; 而当 DGD 较大时, 基本以第 2 种方式工作。对于两阶段高阶 PMD 补偿器, 我们提出了它可能的工作方式并进行了数值验证, 结果表明实际的补偿器基本上以这种方式工作。

参 考 文 献:

- [1] T Ono, S Yamazaki, H Shimizu, *et al.* Polarization control method for suppressing polarization mode dispersion influence in optical transmission systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**:891-898.
- [2] R Noe, D Sandel, M Y Dierolf, *et al.* Polarization mode dispersion compensation at 10, 20 and 40 Gb/s with various optical equalizers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**:1602-1616.
- [3] Hok Yong Pua, Kumar Peddanarappagari, Benyuan Zhu, *et al.* An adaptive first-order polarization-mode dispersion compensation system aided by polarization scrambling: theory and demonstration[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**:832-841.
- [4] M Karlsson, C Xie, H Sunnerud, *et al.* Higher order polarization mode dispersion compensator with three degrees of freedom[A]. OFC' 2001[C].
- [5] Q Yu, L S Yan, Y Xie, *et al.* Higher order polarization mode dispersion compensation using a fixed time delay followed by a variable time delay[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8):863-865.
- [6] H Bulow. System outage probability due to first- and second-order PMD[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(5):696-698.
- [7] WANG Jing, LIU Xiu-min, LIN Ning, *et al.* Influence of polarization mode dispersion on the transmission of pulse at 40 Gbit/s[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*(光电子 • 激光), 2001, **12**(5):517-520.
- [8] LIN Ning, YANG Bo-jun, ZHANG Xiao-guang, *et al.* Effects of initial pulse chirps on dispersion-managed soliton transmissions[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*(光电子 • 激光), 2001, **12**(2):185-187.
- [9] 郑远, 刘玉敏, 杨伯君, 等. 利用琼斯传输矩阵法研究二阶偏振模色散的统计特性[J]. 中国激光(待发表).
- [10] C D Poole. Statistical treatment of polarization dispersion in single-mode fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(8):687-689.
- [11] M Karlsson, J Brentel. Autocorrelation function of the polarization-mode dispersion vector[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(14):939-941.
- [12] H Sunnerud, C Xie, M Karlsson, *et al.* Outage probabilities in PMD compensated transmission systems [A]. ECOC' 2001[C]. 273.

作者简介:

郑远 (1976—), 男, 北京邮电大学理学院物理部博士生, 硕士期间从事全光波长变换器和声光耦合器件的研究, 现从事高速光通信系统中偏振模色散的研究。