

文章编号: 0253-2239(2003)10-1204-6

基于光信号偏振度的偏振模色散补偿系统的研究

徐 坤 戴一堂 毛 晋 陈向飞 李翔辉 谢世钟

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 偏振模色散已成为当前发展高速长距离光纤传输系统的主要限制因素。理论上分析了光纤一阶偏振膜色散效应对高速伪随机非归零码/归零码光信号偏振度的影响,并利用数值模拟的方法分析了信号不同输入偏振态以及高阶偏振膜色散效应对非归零码光信号偏振度的影响。最后对利用信号偏振度作为反馈控制信号的自适应偏振膜色散补偿系统的补偿性能进行了分析,大量统计分析结果表明对于 10 Gbit/s 的非归零码光纤传输系统,当传输线路的平均偏振膜色散值小于 43 ps 时,利用极大化输出信号偏振度的偏振膜色散补偿系统对信号眼图的补偿概率可以达到 99.99%。

关键词: 光纤通信技术; 偏振模色散; 偏振度; 偏振膜色散补偿

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

1 引 言

光纤通信目前正朝着高码率、多信道、长距离和全光网络化方向发展。目前光纤通信系统实验室的传输容量已经达到了数 Tbit/s 的量级,而各大公司单信道传输速率为 40 Gb/s 的太比特传输系统也即将商用。随着单信道传输速率的不断提高(从 10 Gb/s 提高到 40 Gb/s 或更高),原来在光纤通信系统中不太被关注的偏振模色散(PMD)问题日显突出并引起广泛的关注。特别是偏振膜色散的补偿技术更是被许多研究机构和大的通信公司认为是 40 Gb/s 大容量光纤通信系统和下一代光传送网络中需解决的关键技术而被加以广泛研究^[1~3]。

光的偏振膜色散补偿器通常由电控偏振控制器、参量可变或固定的时延装置(如保偏光纤和高双折射的啁啾光纤光栅等)以及动态反馈控制系统三个部分所组成。反馈控制方法包括对光信号和电信号的检测。电信号处理最常用的方法是对接收电信号进行谱滤波,即利用一系列窄带通滤波器从接收的电基带信号中提取一些特定频率分量($f/2$, $f/4$ 。其中 f 为信号传输码率)并极大化这些频率分量的输出功率^[4]。这种方法需要高速射频检测电路,但是电信号的检测随着信号传输速率的提高而变得困难。光信号的处理通常是检测并极大化输出光信号的偏振度(DOP)。偏振膜色散导致不同偏

振方向脉冲(偏振主态: Principal states of polarization, PSP)的相对移动使得非归零码/归零码信号脉冲边缘和中间部分的偏振态发生变化,从而改变信号脉冲的偏振度,这种检测方法与信号传输速率和线路色散无关^[5,6]。

本文对利用信号偏振度为反馈控制信号的自适应偏振膜色散补偿系统进行了全面的研究。文章首先从理论上分析了光纤一阶偏振膜色散与非归零码/归零码光信号偏振度的关系,其次利用数值仿真的方法分析了信号不同输入偏振态(SOP)以及高阶偏振膜色散效应对非归零码光信号偏振度的影响。最后,利用蒙特卡罗(Monte-Carlo)的数学方法对上述补偿系统的补偿性能进行了统计的分析与评估。

2 偏振膜色散对高速光传输信号偏振度的影响

光信号的偏振度用来描述光信号的时间或频率分量沿同一偏振态偏振的情况,在频域定义为信号各频谱分量斯托克斯(Stokes)矢量(S_0, S_1, S_2, S_3)对信号功率谱密度的加权平均值:

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad (1)$$

上述定义反映了光信号各频谱分量的斯托克斯矢量在庞加莱球(Poincaré sphere)上的离散程度。而实际测量斯托克斯分量是按如下公式在时域测量,测量的斯托克斯分量为在一段时间内的平均值。斯托克斯矢量分量的平均值和电场分量的关系如下^[7]

E-mail: xukun@bupt.edu.cn

收稿日期: 2002-07-12; 收到修改稿日期: 2002-11-12

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_0 &= \overline{|E_{x0}|^2 + |E_{y0}|^2} = I_0, \\ \bar{S}_1 &= \overline{|E_{x0}|^2 - |E_{y0}|^2} = I_{x0} - I_{y0}, \\ \bar{S}_2 &= 2\text{Re}(\overline{E_{x0}E_{y0}^*}) = I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ}, \\ \bar{S}_3 &= 2\text{Im}(\overline{E_{x0}E_{y0}^*}) = I_r - I_l, \end{aligned} \right\} (2)$$

仿真计算中,如果选取的码长较长,则在时域中计算斯托克斯矢量需要较长的时间。而在频域内可以通过只计算占总能量 99% 以上一个很窄频带内斯托克斯矢量的加权平均来简化计算。

对于矩形方波近似、周期为 T 的伪随机 (PRBS) 非归零码,码长为 $2^n - 1$,信号峰值功率为 P_0 。在一阶偏振膜色散的影响下 [差分群延时 (DGD) 的大小为 $\Delta\tau$],信号在 x 和 y 方向上的偏振脉冲相对时延为 $\Delta\tau$,两个偏振脉冲之间的功率分配比为 γ ,如图 1 所示。信号中,单个 1 码的个数为 $2^{n-2}/2$,两个 1 码相连的个数为 $2^{n-2}/2^2$,三个 1 码相连的个数为 $2^{n-2}/2^3$ [8],依此类推。这样,在差分群延时值 $\Delta\tau$ 小于一个比特周期 T 的前提下,所有 1 码信号中, x 和 y 方向偏振脉冲重叠部分的码长为

$$2^{n-2} \sum_{k=1}^{n-\infty} \frac{1}{2^k} (kT - \Delta\tau) = 2^{n-2} T \left(2 - \frac{\Delta\tau}{T}\right), \quad (0 < \Delta\tau \leq T), \quad (3)$$

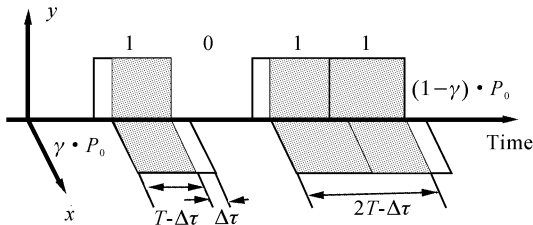


Fig. 1 1st order PMD in the NRZ signal

偏振脉冲重叠部分的码长占整个码长的概率为

$$\frac{2^{n-2} T (2 - \Delta\tau/T)}{(2^n - 1) T} = \frac{1}{2} - \frac{\Delta\tau}{4T}, \quad (4)$$

根据(2)式的定义,伪随机码信号的斯托克斯分量为

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_0 &= \frac{1}{2} \gamma P_0 + \frac{1}{2} (1 - \gamma) P_0 = \frac{1}{2} P_0, \\ \bar{S}_1 &= \frac{1}{2} \gamma P_0 - \frac{1}{2} (1 - \gamma) P_0 = \\ &= \frac{1}{2} (2\gamma - 1) P_0, \\ \bar{S}_2 &= 2P_0 \sqrt{\gamma(1 - \gamma)} \left(\frac{1}{2} - \frac{\Delta\tau}{4T}\right), \\ \bar{S}_3 &= 0, \end{aligned} \right\} (5)$$

所以[6]

$$P_{\text{NRZ}} = \sqrt{1 - 4\gamma(1 - \gamma) \frac{\Delta\tau}{T} \left(1 - \frac{\Delta\tau}{4T}\right)}, \quad (0 < \Delta\tau \leq T) \quad (6)$$

当 $\gamma = 0.5$ 时,输出光信号的偏振度 P 最小,为

$$P_{\text{NRZ}} = 1 - \Delta\tau/2T, \quad (7)$$

根据(7)式信号偏振度随偏振膜色散的增加而线性减小,并且信号的传输速率越快,信号偏振度随偏振膜色散也减小得越快。从另外一个角度来看,偏振膜色散值越大,信号各频率分量的斯托克斯矢量在庞加莱球上散开的程度也越厉害,从而偏振度也越小。当偏振膜色散的大小 $\Delta\tau$ 大于比特周期 T 后, x 和 y 方向的偏振脉冲完全不相干,这时信号偏振度与偏振膜色散大小无关,为一常数。由于信号的伪随机特性(即码的‘01’结构序列),使得 \bar{S}_2 中的交叉重叠部分的积分不可能为零,所以信号偏振度受偏振膜色散的影响不可能降为零。当 $\gamma = 0.5$ 时,信号偏振度保持最小值 0.5 不变。

对于归零码,由于信号的归零特性使得信号偏振度与偏振膜色散的关系与非归零码相比有很大的不同。设伪随机归零码的脉宽为 τ_0 ,矩形方波近似,周期为 T 。同样根据定义式(2)有

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_0 &= \frac{\tau_0}{2T} \gamma P_0 + \frac{\tau_0}{2T} (1 - \gamma) P_0 = \frac{\tau_0}{2T} P_0, \\ \bar{S}_1 &= \frac{\tau_0}{2T} \gamma P_0 - \frac{\tau_0}{2T} (1 - \gamma) P_0 = \\ &= \frac{\tau_0}{2T} (2\gamma - 1) P_0, \\ \bar{S}_2 &= 2P_0 \sqrt{\gamma(1 - \gamma)} \frac{\tau_0 - \Delta\tau}{2T}, \\ \bar{S}_3 &= 0, \end{aligned} \right\} (8)$$

$$\text{所以 } P_{\text{RZ}} = \sqrt{1 - 4\gamma(1 - \gamma) \frac{\Delta\tau}{\tau_0} \left(2 - \frac{\Delta\tau}{\tau_0}\right)}, \quad (0 < \Delta\tau \leq T), \quad (9)$$

当 $\gamma = 0.5$ 时,输出光信号的偏振度最小为

$$P_{\text{RZ}} = 1 - \Delta\tau/\tau_0. \quad (10)$$

这时,信号偏振度随偏振膜色散的增加而线性减小到零。这时信号偏振度与信号码率无关而仅与脉冲宽度有关,脉宽相同而码率不同的归零码的偏振度随差分群延时变化的规律相同,这一点已为实验所证实[9]。当差分群延时值 $\Delta\tau$ 大于脉宽 τ_0 后, x 和 y 方向的偏振脉冲完全不相干,这时信号偏振度与偏振膜色散大小无关。由于信号的归零特性,使得 \bar{S}_2 中交叉重叠部分的积分为零,这时信号偏振度大小受偏振膜色散的影响降为零。所以相比非归零码而言,偏振膜色散对归零码信号偏振度的影响更大。在归零码的偏振膜色散补偿系统中,其反馈控制信号的检测灵敏度也更高。

3 输出信号偏振度和输入信号偏振方向的关系

输出信号偏振度除与光纤偏振膜色散有关外,还与光纤输入信号的偏振态有关。下面我们对输入非归零码光信号的偏振态进行扫描,并分别研究一阶和高阶偏振膜色散对输出信号偏振度的影响。

图 2 为在仅考虑一阶偏振膜色散效应即传输光纤模拟为 1 段保偏光纤的情况下,非归零码输出光信号偏振度随输入偏振态的变化。图 2(a)中的偏振度椭球长轴为 1,长轴的两个方向给出了快慢偏振主态方向。偏振椭球的两个短轴相等,即在短轴截面上的任何输入偏振态都可以使两个偏振主态功率均分,从

而使输出信号偏振度最小。当输入偏振态与偏振主态重合时输出信号偏振度为 1,对应于图 2(b)中两个网格曲线的包络峰。对于归零码,仿真结果表明其偏振度椭球短轴变短,趋近于零,长轴为 1 并且长轴的两个方向给出了快慢偏振主态方向。

模拟为多段保偏光纤级联后的传输光纤线路呈现出高阶偏振膜色散特性,表现为光纤差分群延时间和偏振主态方向的频率相关性。图 3 仿真计算中用到的传输线路为 100 段保偏光纤的随机级联,光纤段偏振膜色散大小为平均值为 10 ps 的正态分布,归一化标差为 0.3。

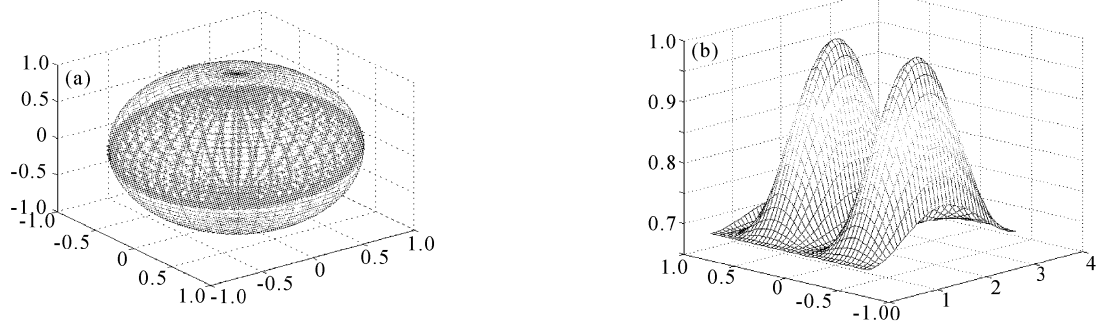


Fig. 2 DOPs of 10 Gbit/s NRZ as a function of input SOPs. (a) Stokes vector distribution of NRZ output signal on the Poincare sphere (link DGD:75 ps); (b) Output signal DOPs' dependence of input signal SOPs (azimuth and ellipticity)

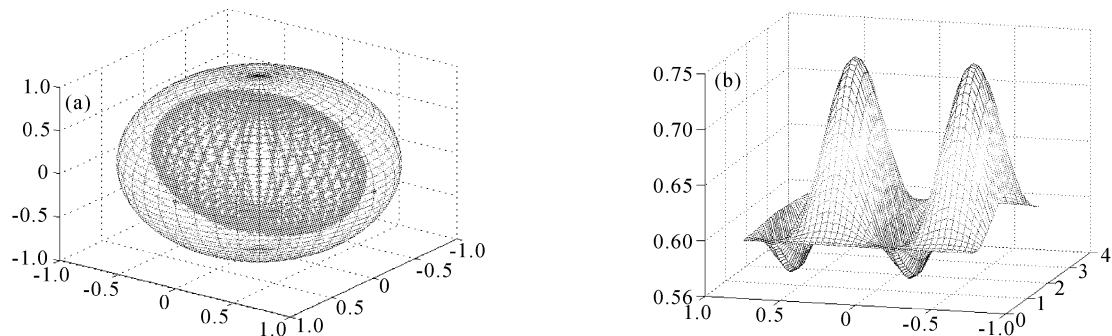


Fig. 3 DOPs of 10 Gbit/s NRZ as a function of input SOPs. (a) Stokes vector distribution of NRZ output signal on the Poincare sphere; (b) Output signal DOPs' dependence of input signal SOPs (azimuth and ellipticity)

从图 3 中可以看出,在高阶偏振膜色散的影响下,输出信号偏振度的最大值小于 1。这时,偏振度椭球的三个轴一般不相等,并且长轴变短。当高阶偏振膜色散效应很大时,偏振主态模型失效,将不存在两个方向明显占优势的偏振主态,这时输出信号偏振度有可能出现多个峰值,从而不利于自适应反馈控制信号极值的搜寻。

4 以信号偏振度的反馈补偿偏振膜色散

为了评价以输出信号偏振度为反馈控制信号的

自适应偏振膜色散补偿器的补偿性能,我们将补偿器用在如图 4 所示的光纤传输系统中。400 km 的光纤传输系统分为 5 级,每级包括 80 km 的单模光纤(SMF)和 15 km 的色散补偿光纤(DCF)以及用于补偿单模光纤和色散补偿光纤损耗的掺饵光纤放大器(EDFA)。每级单模光纤的输入光功率设定为 0 dBm 以减小非线性效应的影响。偏振膜色散补偿器中的差分群延时可调谐装置采用了基于双折射光纤(PMF)的非线性啁啾取样光纤光栅^[10,11]。反馈控制通过调节偏振控制器(PC)和拉伸光纤光栅来极

大化补偿后输出光信号的偏振度。反馈控制有三个自由度,包括光纤光栅的拉伸量和偏振控制器的两个相位角。图 4 中 PC1 用于调整输入光的发射偏振态

以利于偏振膜色散补偿器的工作,PC2 位于补偿器内部用于线路偏振主态与补偿器偏振主态的匹配。

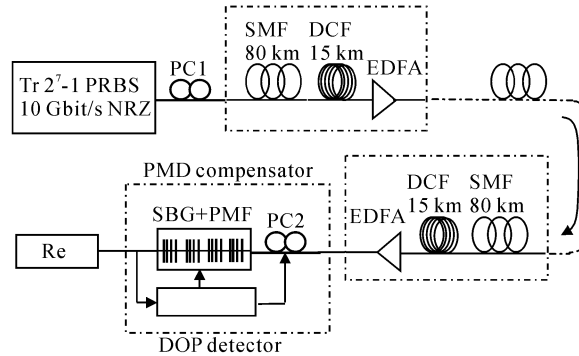


Fig. 4 Dynamic PMD compensation system with the signal DOP as the feedback control signal in the 10 Gbit/s NRZ optical transmission system. Parameters of SMF, dispersion: 17 ps/(nm · km), dispersion slope: 0.08 ps/(km · nm²), loss: 0.25 dB/km, effective area: 80 μm²; parameters of DCF, dispersion: -85 ps/(nm · km), dispersion slope: -0.23 ps/(km · nm²), loss: 0.5 dB/km, effective area: 30 μm²

光信号两个正交偏振分量在双折射光纤中的传播通过一对耦合的非线性薛定谔方程^[12]来描述,方程中考虑了一阶和高阶色散以及非线性效应的影响。而传输线路则看成是许多短的、具有随机双折射方向的光纤段(设定为 1 km)级联,用于模拟具有统计特性的偏振膜色散效应。每一小段光纤内双折射参量恒定,没有偏振模之间的耦合,所有的模式耦合都发生在段与段之间的连接处。随机双折射效应通过每次分步计算后在庞加莱球上随机“散射”电场来模拟。

图 5 表明利用上述反馈控制机制,信号质量得到了明显改善。信号偏振度由补偿前的 0.78 提高到了补偿后的 0.97。图 6 反映了偏振膜色散补偿器对信号各频谱分量的会聚或收敛作用。从图 6(a)中可以看出,在载波附近一个较窄的频带范围内,偏振膜色散以一阶效应为主,各频谱分量的输出斯托克斯矢量轨迹在庞加莱球上可用一圆弧来描述。随着频带范围的加大,信号频谱分量的输出偏振态偏离一阶偏振膜色散拟合圆弧曲线,高阶偏振膜色散效应逐步明显。

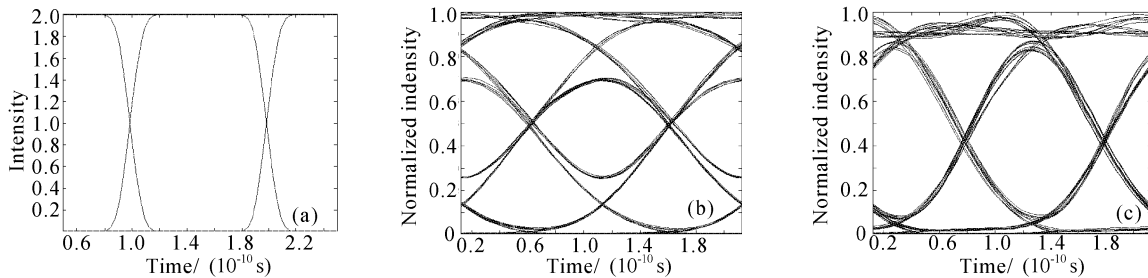


Fig. 5 Eye diagrams for a 10Gb/s NRZ system: (a) transmitter output; (b) 400 km PMD optical link output; (c) after 75 ps PMD compensation with the tunable SBG PMD compensator. Linewidth of laser: 10 MHz, extinction ratio of the input signal is 30 dB and chirp of the modulator: 0

为了全面评价自适应偏振膜色散补偿系统的补偿性能,以及高阶偏振膜色散效应对补偿性能的影响,我们采用蒙特卡罗的数学方法对补偿器的补偿性能进行统计仿真(10⁵ ~ 10⁶ 次)并从统计的观点对系统补偿性能予以评价。系统仿真时,输入光信号的偏振态和光纤传输线路偏振膜色散大小随机产生并且线路偏振膜色散大小符合麦克斯韦函数统计分布^[14]。

补偿器反馈控制时,我们对差分群延时值以及 PC2 的两个相位角依次扫描并极大化输出信号偏振度。对于信号质量的评价,我们采用归一化眼图开启度(EOP)来描述,其中信号归一化眼图开启度定义为眼图上眼皮最小值与下眼皮最大值差值与 2 倍信号平均功率的比值。

图 7 为对一偏振膜色散平均值为 70 ps 的光纤传输线路进行统计仿真计算(10⁵ ~ 10⁶ 次)的结果,

从图 7(b)和图 7(c)可以看出,利用上述补偿装置和控制算法信号质量得到了明显的提高,信号平均偏振度值从 0.83 提高到了 0.98,而信号归一化眼图开启度也由平均的 0.56 提高到了 0.80。下面,我们用信号丢失率(Outage)来描述系统补偿性能随传输线路平均差分群延时值的变化。信号丢失率设定为归一化眼图开启度小于 0.4 的仿真次数与总的仿真次数的比值。图 8(a)表明补偿器的信号丢失率随线路平均差分群延时值的增大而增加,其主要

原因在于线路高阶偏振膜色散的影响。线路的二阶偏振膜色散大小随一阶偏振膜色散(差分群延时)的增大而增大,如图 8(b)所示。这表明基于一阶偏振膜色散补偿设计的补偿器性能将随光纤传输线路差分群延时值的增大而下降。另外从图 8(a)可以看出,当传输线路平均差分群延时值小于 43 ps 时,可以获得小于 10^{-4} 的信号丢失率,即对归一化眼图开启度的补偿概率可以达到 99.99%。

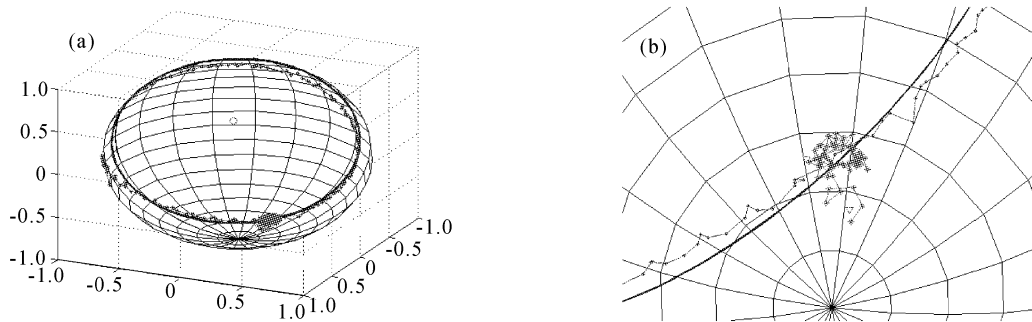


Fig. 6 (a) SOPs of signal spectrum components after the link output (solid-dot line), SOPs of signal spectrum components after the PMD compensator output (solid-star line), fitting curve (solid line) of SOPs of signal spectrum components after the link output by using first order PMD model; (b) is the enlarged drawing of (a)

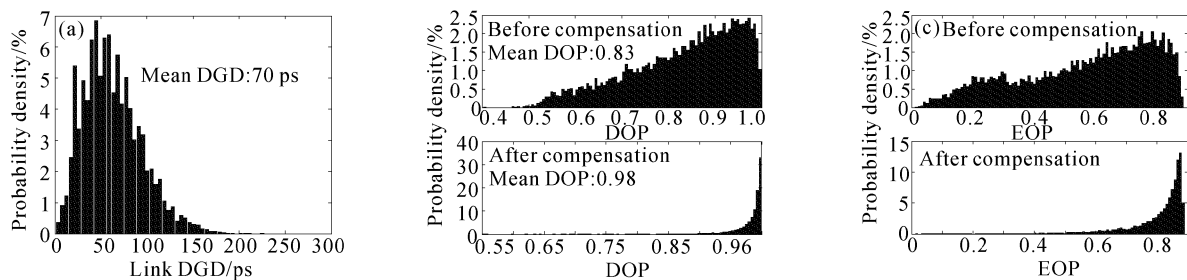


Fig. 7 Performance evaluation of PMD compensator used in the 10 Gbit/s NRZ transmission system. (a) DGD setting value distribution of the PMD Compensator; (b) DOP statistical distribution before/after signal compensation; (c) EOP statistical distribution before/after signal compensation

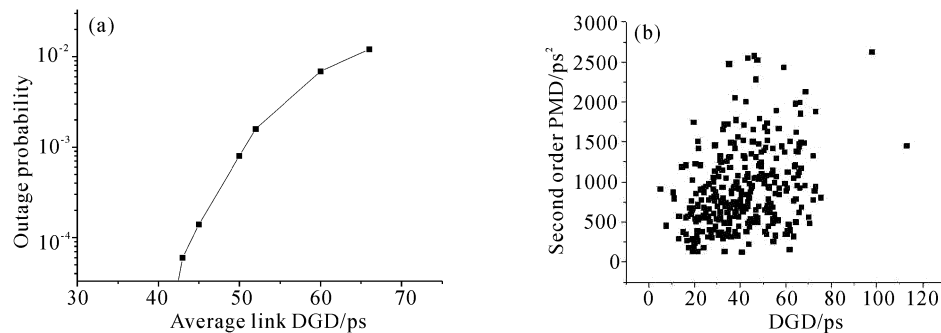


Fig. 8 EOP (<0.4) outage probability (a) and 2order PMD (b) dependence of link DGD

偏振度只是反映了信号各频谱分量偏振态的分散和收敛特性,而未考虑诸如色散以及偏振相关色散(PCD)^[15]等因素对信号各频谱分量之间相位的影响,所以信号偏振度只是反映了信号某一方面的

特性而不能完全描述信号的质量。显然用偏振度作反馈控制信号也不能对信号质量进行完全的补偿。而采用多级保偏光纤级联的高阶偏振膜色散补偿结构,反馈控制自由度将大大增加,并且反馈控制信号

将出现明显的局部极值分布从而使得反馈控制甚为复杂,这在目前实际的补偿系统中较少采用。

结论 本文从理论上分析了光纤一阶偏振膜色散与伪随机非归零码/归零码光信号偏振度的关系,并利用数值仿真的方法分析了高阶偏振膜色散效应以及不同输入偏振态对非归零码信号偏振度的影响,最后利用统计的方法对自适应偏振膜色散补偿系统的补偿性能进行了分析。研究结果表明该补偿系统对一阶偏振膜色散有很好的补偿能力。对于 10 Gbit/s 的非归零码光纤传输系统,当线路平均偏振膜色散值小于 43 ps 时,该偏振膜色散补偿系统对信号眼图的补偿概率可以达到 99.99%。但这种基于一阶偏振膜色散模型设计的补偿系统的补偿能力最终还是受到高阶偏振膜色散的限制而不能对偏振膜色散进行完全的补偿。

参 考 文 献

- 1 Poole C D, Wagner R E. Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibers. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(19):1029~1030
- 2 Heismann F. Polarization mode dispersion: Fundamentals and impact on optical communication systems. *ECOC '1998*, 53~79
- 3 Pei Li, Jian Shuisheng, Ning Tigang *et al.*. PMD measurement and compensation of optical fiber grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4):462~464 (in Chinese)
- 4 Ooi H, Akiyama Y, Ishikawa G. Automatic Polarization-mode dispersion compensation in 40-Gbit/s transmission. *OFC '1999*, We5-1
- 5 Francia C, Bruyere F, Thiery J P. Simple dynamic polarization mode dispersion compensator. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(5):414~415
- 6 Kikuchi N. Analysis of signal degree of polarization degradation used as control signal for optical polarization mode dispersion compensation. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4):480~486
- 7 Wei Guanghui. *Matrix Optics* (矩阵光学). Weapon Industries Publishing House, 1995. 183~186 (in Chinese)
- 8 Cao Zhigang, Qian Yasheng. *Modern Communication Principles* (现代通信原理). Beijing: Tsinghua University Publishing House, 1992. 234~241 (in Chinese)
- 9 Rosenfeldt H, Knothe C, Ulrich R *et al.*. Automatic PMD compensation at 40 Gbit/s and 80 Gbit/s using a 3 dimensional DOP evaluation for feedback. *OFC'2001*, PD27
- 10 Yan Juanjuan, Xu Kun, Feng Jia *et al.*. Performance evaluation of systems using a novel adjustable first-order PMD compensator and forward error correction. *Opt. Commun.*, 2003, **218**(1~3):49~54
- 11 Xu Kun, Feng Jia, Mao Jin *et al.*. A novel adjustable PMD compensation using sampled Bragg gratings with uniform grating period. *Opt. Commun.*, 2002, **202**(4~6):297~302
- 12 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. Third Edition, Academic Press, 2001, 203~258
- 13 Marcuse D, Menyuk C R, Wai P K A. Application of the manakov-PMD equation to studies of signal propagation in optical fibers with randomly varying birefringence. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(9):1735~1746
- 14 Foschini G J, Poole C D. Statistical theory of polarization dispersion in single mode fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(11):1439~1455
- 15 Foschini G J, Jopson R M, Nelson L E *et al.*. The statistics of PMD-induced chromatic fiber dispersion. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(9):1560~1565

Study of Dynamic PMD Compensation System Using Signal DOP as the Feedback Control Signal

Xu Kun Dai Yitang Mao Jin Chen Xiangfei Li Xuhui Xie Shizhong
(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 12 July 2002; revised 12 November 2002)

Abstract: PMD has been the major limiting factor for long haul high bitrate optical fiber transmission. The relationship between 1st order PMD and optical signal DOP (degree of polarization) of PRBS NRZ/RZ is discussed in theory, and the impacts of different input states of polarization and higher-order PMD on signal DOP of NRZ/RZ are analyzed by numerical simulations. Then, Monte-Carlo simulations are performed with all order PMD model on the statistics of PMD compensator, which uses signal DOP as the feedback control signal in the 10 Gbit/s NRZ optical transmission system. The statistical simulation results indicate that the compensation probability for the signal eye-diagrams can reach 99.99% when the average DGD of the link is below 43 ps.

Key words: optical fiber communication technology; polarization mode dispersion; degree of polarization; polarization mode dispersion compensation