

文章编号: 0253-2239(2005)07-869-6

偏振模色散动态补偿中色度色散影响的研究*

张 璐¹ 许远忠² 胡强高² 赵圣之¹ 刘水华²

(¹ 山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100)
(² 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430074)

摘要: 分析了色度色散(CD)对偏振模色散(PMD)动态补偿中偏振度(DOP)反馈的影响,模拟和实验验证了2.5 Gb/s和10 Gb/s非归零调制系统中光信号偏振度特性和系统误码率特性。表明有色度色散作用时信号偏振度值比仅受偏振模色散作用时要大,但误码率随色度色散量增加先轻度好转后就逐渐变差,偏振度值将不能如实反映偏振模色散对系统性能的影响。且信号两正交偏振分量间能量差别越小或差分群延迟越大,上述两种情况下信号偏振度值偏离就越远。这种偏离还随系统速率和色度色散量的增加而加剧。进一步探讨了实际偏振模色散补偿中减轻色度色散影响的措施,表明当系统中同时存在偏振模色散和色度色散影响时,必须在基于偏振度反馈的偏振模色散补偿前完成色度色散补偿。

关键词: 导波与光纤光学; 色度色散; 偏振模色散; 偏振度; 误码率

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Effect of Chromatic Dispersion on the Feedback Signal in Polarization Mode Dispersion Compensation

Zhang Lu¹ Xu Yuanzhong² Hu Qianggao² Zhao Shengzhi¹ Liu Shuihua²

(¹ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100)
(² Accelink Technologies Co., Wuhan 430074)

Abstract: The effect of chromatic dispersion (CD) on the degree of polarization (DOP) feedback signal in polarization mode dispersion (PMD) compensation is analyzed. Signal suffering from PMD and CD shows a larger DOP than that in the only PMD case, and their DOP deviations relate not only to the polarization splitting ratio or relative delay between the signal's two polarization components, but to the bit error rate and the CD values; But the system performance collapses after a firstly slight improvement with the increasing of CD, as the experiments in 2.5 Gb/s NRZ modulated system and the simulations in 10 Gb/s system show. Therefore DOP can no longer reflect the effect of PMD on system performance in presence of CD. The less the energy difference between two cross-polarization components, or the larger the differential group delay, the greater the signal DOP deviates, and the deviations increase rapidly with the system ratio and CO increase. Modifications to the DOP distortion in PMD compensation are proposed finally, which indicate that CD must be compensated before PMD in actual systems when the effects of PMD and CD simultaneously exist.

Key words: guided wave and fiber optics; chromatic dispersion; polarization mode dispersion; degree of polarization; bit error rate

1 引 言

在高速、远程光纤通信系统中,偏振模色散(Polarization mode dispersion, PMD)是限制系统速率和传输距离的重要因素之一。能对偏振模色散进行有效补偿的相应方案及系统均有报道^[1,2]。实际系统中温度、应力等不确定因素导致光纤线路中每个通道的偏振模色散随时间随机变化。因此所有有效的偏

振模色散补偿方案都必须能实时检测线路中的偏振模色散,并进行动态的单通道反馈补偿。现行偏振模色散补偿方案中普遍采用调制光信号的偏振度(Degree of polarization, DOP)作为反馈信号^[3,4]。

当光信号不受色度色散(Chromatic dispersion, CD)等因素影响时,其偏振度值的确能如实反映系统中偏振模色散的实时变化情况。但众所周知,偏振模

* 国家 973 计划(2003CB314)、国家“十五”科技攻关计划(2002BA106B07)和武汉市科技攻关计划(20021005130-11)资助课题。

作者简介: 张 璐(1978~),女,山东潍坊人,山东大学信息学院光学工程专业博士研究生,主要从事偏振模色散方面的研究。E-mail: luzhang@wri.com.cn

收稿日期: 2004-06-07; 收到修改稿日期: 2005-01-04

色散和色度色散均能导致光信号的时域展宽。虽然色度色散不影响光信号两正交偏振分量的频谱分布,但与仅有偏振模色散影响的情况相比,色度色散会增加两偏振分量间的重叠,信号偏振度值也相应发生变化^[5]。因此,研究色度色散对偏振模色散动态补偿的影响并采取一定减轻措施,无疑具有重要意义。

本文详细分析了色度色散对偏振模色散动态补偿中偏振度反馈和系统误码率(BER)的影响,进行了相应模拟与实验验证,并进一步探讨了实际偏振模色散补偿中减轻色度色散影响的措施。

2 理论分析

在实际光纤通信系统中,由于单通道信号的谱宽与偏振模色散值相比可以忽略^[6],所以如图 1 所

示,在光纤输入端 A 可将光信号沿光纤的两正交偏振主轴 X、Y 分解为两个偏振分量。光信号传输一定距离后,如 B 处所示,两分量间就会产生一定的差分群延迟(Differential group delay, DGD),即一阶偏振模色散。同时,由于不同波长的光在光纤中传输速度不同,由此产生的色度色散可导致两分量各自的时域展宽(B、C 处),所以与仅有偏振模色散时相比,二者间重叠增加,表现为偏振度比仅受偏振模色散影响时增大。随着传输距离的增加,信号所经受的偏振模色散和色度色散量也不断增大,此时的偏振度与仅有偏振模色散影响时的偏振度间差值也相应增大。以下给出色度色散对偏振模色散补偿中偏振度反馈影响的详细分析。

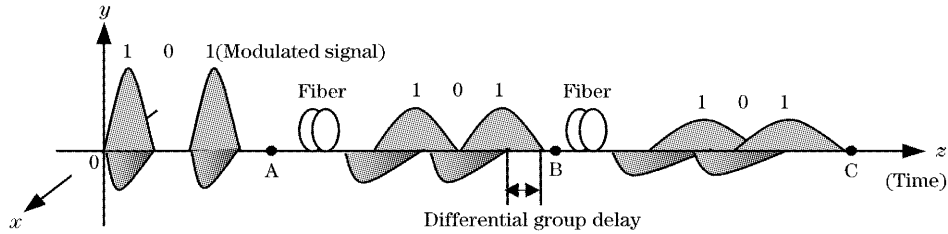


图 1 偏振模色散和色度色散对传输信号的影响

Fig. 1 Effect of polarization mode dispersion and chromatic dispersion on the transmitting signal

在光纤入射端,高斯波形的入射光信号为

$$I(t,0) = I_0 \cdot \exp[-t^2/(2T_0^2)], \quad (1)$$

其中 T_0 是入射高斯信号的时域展宽。当入射信号仅受色度色散影响时,经过长度为 L 的光纤后,光信号的峰值功率降低且时域更加展宽。这时表达式变为

$$I(t,L) = I_0 \left[1 + \left(\frac{L}{L_D} \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot \exp \left\{ - \frac{(t-\tau)^2}{2T_0^2 [1 + (L/L_D)^2]} \right\}, \quad (2)$$

其中, τ 是光信号在长度为 L 的光纤中的平均传输时间; L_D 是光纤的色度色散长度,且有 $L_D = cT_0^2/D\lambda^2$, 其中 c 为正的常数, D 和 λ 分别为光纤色度色散系数和光信号所在波长。由于偏振模色散和色度色散均不影响两偏振分量的频谱分布,所以,出射信号的两偏振分量可分别写为

$$E_{\text{fast}}(t,L) = E_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{L_D} \right)^2 \right]^{-1/4} \cdot \sqrt{1-\gamma} \cdot \exp \left\{ - \frac{(t-\tau-\Delta\tau/2)^2}{4T_0^2 [1 + (L/L_D)^2]} \right\}, \quad (3)$$

$$E_{\text{slow}}(t,L) = E_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{L_D} \right)^2 \right]^{-1/4} \cdot \sqrt{1+\gamma} \cdot \exp \left\{ - \frac{(t-\tau+\Delta\tau/2)^2}{4T_0^2 [1 + (L/L_D)^2]} \right\}, \quad (4)$$

其中 $\Delta\tau$ 代表系统中的差分群时延, γ 代表信号的脉冲分裂比,且有 $\gamma = |E_{\text{fast}}|^2 / (|E_{\text{slow}}|^2 + |E_{\text{fast}}|^2)$ 。出射偏振光信号的密度矩阵为^[6]

$$\rho = \int dt (E_{\text{fast}} | \text{fast} \rangle + E_{\text{slow}} | \text{slow} \rangle) (E_{\text{fast}} \langle \text{fast} | + E_{\text{slow}} \langle \text{slow} |) = \frac{1 + \mathbf{T} \cdot \boldsymbol{\sigma}}{2}. \quad (5)$$

其中 \mathbf{T} 代表入射光信号的斯托克斯表示形式; $\boldsymbol{\sigma}$ 代表泡利自旋向量的斯托克斯表示形式,且有

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3], \quad \boldsymbol{\sigma}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\sigma}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\sigma}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}.$$

据(3)式~(5)式,可导出相应的偏振度变化规则为

$$F_{\text{DOP}} = |\mathbf{T}| = \left((1-2\gamma)^2 + (4\gamma-4\gamma^2) \cdot \exp \left\{ \frac{-\Delta\tau^2}{4T_0^2 [1 + (L/L_D)^2]} \right\} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

由(6)式可知,由于色度色散造成的信号时域展宽,在同样的差分群时延和 γ 条件下,光信号表现出更大的偏振度。

实际应用中的一种色度色散补偿方式是通过在接收机前添加反向色度色散补偿器件来消除光纤色度色散对光信号的影响,即对色度色散进行后端补偿。并且,考虑系统对平均偏振模色散有 $T/10$ (T 为调制光信号的比特周期)的容限,通常偏振模色散补偿中都会选择一个小于 1 的最优偏振度反馈阈值。据此,如果系统中采用色度色散后端补偿,而偏振模色散补偿在色度色散补偿前进行时,一个较大的色度色散量就会导致偏振模色散补偿的偏振度反馈信号失真,从而无法快速补偿偏振模色散。

3 实验、模拟及讨论

3.1 2.5 Gb/s, 10 Gb/s 和 40 Gb/s 系统光信号的偏振度特性分析

为简化分析,假设系统中仅存在偏振模色散和色

度色散,标准单模光纤(Single-mode fiber, SMF)的传输长度为 40 km 或 60 km,信号中心波长为 1550 nm,光纤色度色散系数为 17 ps/(nm · km),系统的色度色散容限为 $3T/10$ 。以下分析不同色度色散情况下 2.5 Gb/s、10 Gb/s 和 40 Gb/s 非归零(NRZ)调制系统中偏振度随差分群时延和 γ 变化的特性。

图 2 模拟了当光信号的脉冲分裂比 $\gamma=0.5$ 时,不同色度色散情况下 2.5 Gb/s、10 Gb/s 和 40 Gb/s 系统中偏振度随差分群时延变化的特性。可见,由于色度色散会引起信号两偏振分量各自的展宽从而增加其重叠部分的能量,同时由于色度色散和偏振模色散对信号展宽的影响均与系统速率有关,所以,偏振模色散、色度色散共同作用与仅有偏振模色散作用时的偏振度曲线之间的偏离随系统速率及系统中色度色散和偏振模色散数量的增加而增大。而且,对 10 Gb/s 和 40 Gb/s 而言,即便是在色度色散量为 $3T/10$ 时,对应的偏振度曲线与无色度色散情况时的偏离仍然很大。

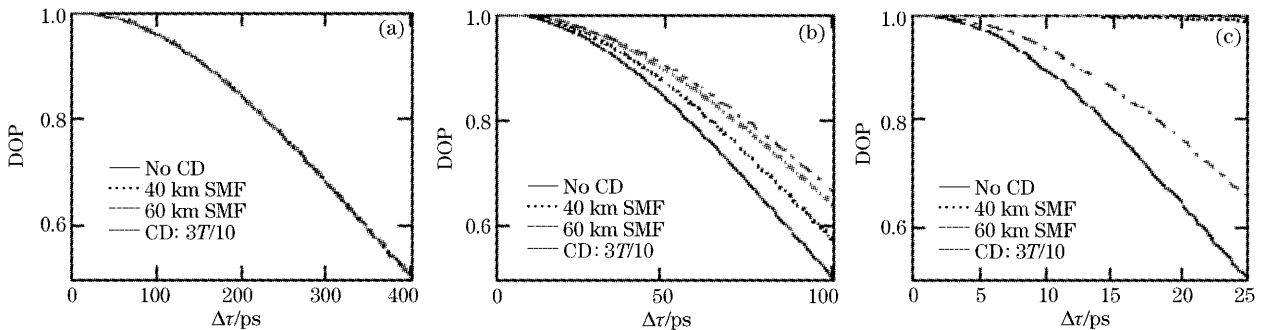


图 2 $\gamma=0.5$ 时,不同色度色散情况下偏振度随差分群时延变化的特性。

图(a)、(b)和(c)分别为 2.5 Gb/s、10 Gb/s 和 40 Gb/s 非归零系统中的情况

Fig. 2 DOP versus $\Delta\tau$ properties when $\gamma=0.5$ and the signal suffers from different CD conditions; and (a), (b) and (c) are the properties in 2.5 Gb/s, 10 Gb/s and 40 Gb/s NRZ systems, seperatively

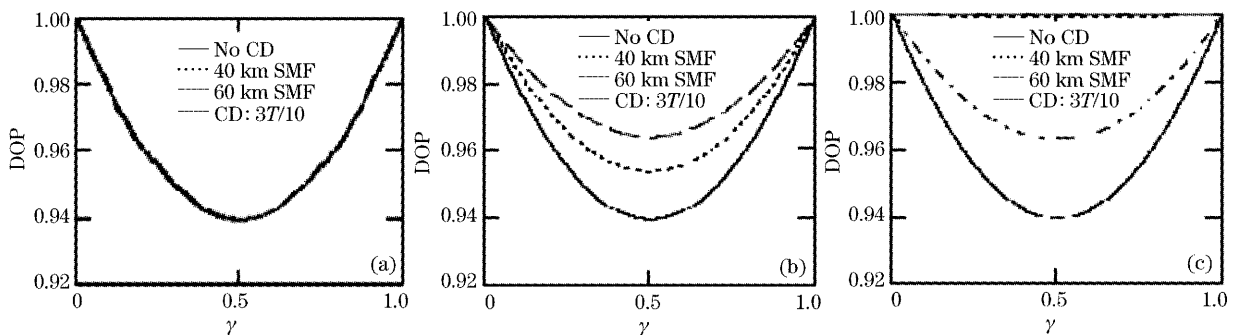


图 3 $\Delta\tau=3T/10$ 时,不同色度色散情况下偏振度随差分群时延变化的特性。

图(a)、(b)和(c)分别为 2.5 Gb/s、10 Gb/s 和 40 Gb/s 非归零系统中的情况

Fig. 3 DOP versus γ properties when $\Delta\tau=3T/10$ and the signal suffers from different CD conditions; and (a), (b) and (c) are the properties in 2.5 Gb/s, 10 Gb/s and 40 Gb/s NRZ systems, seperatively

图 3 模拟了当上述系统中偏振模色散值不变时,不同色度色散情况下偏振度随 γ 变化的特性。由于系统中偏振模色散值遵循麦克斯韦分布,分析中选取偏振模色散典型值为 $3T/10$ (该值为产生 1 dB 系统损耗的偏振模色散阈值)。由图 3 可知,偏振模色散和色度色散共同作用时偏振度随脉冲分裂比 γ 的变化趋势仍和仅有偏振模色散作用时一样,但由于色度色散引起的两偏振分量间的额外重叠能量会随两分量均分程度的增加而增大,所以脉冲分裂比 γ 越趋近于 0.5 (即两分量间能量越趋于均分),色度色散作用下的偏振度曲线与仅有偏振模色散作用时的偏振度曲线偏离也就越大。此外,与图 2 所示相同,此偏离也随系统传输速率和色度色散量的增加而增大。

3.2 不同色度色散情况下 2.5 Gb/s 和 10 Gb/s 系统中的偏振度特性和系统性能分析

3.2.1 不同色度色散情况下 2.5 Gb/s 系统中的偏振度特性和系统性能分析

在室温 20 °C、相对湿度 42% 的环境下,搭建

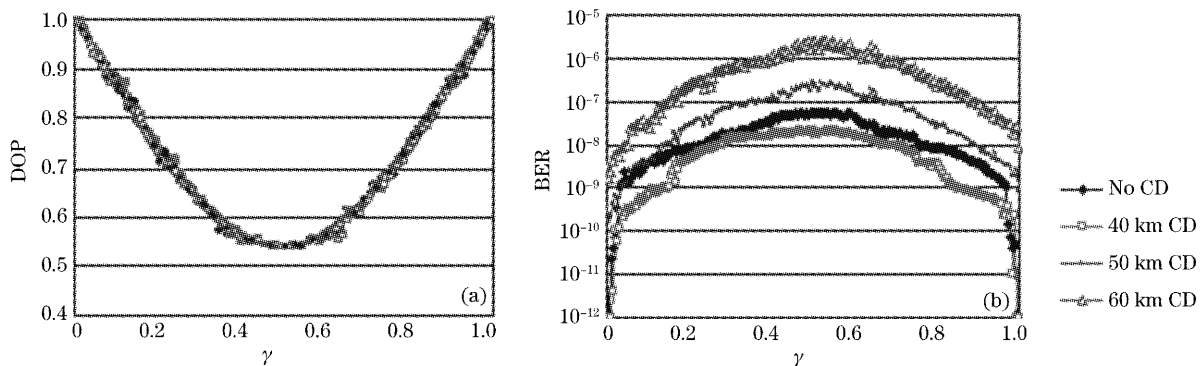


图 5 $\Delta\tau=3T/10$ 时,不同色度色散情况下 2.5 Gb/s 系统中信号偏振度(a)和系统误码率(b)随 γ 变化的实验结果

Fig. 5 Experimental properties of DOP versus γ and BER versus γ when $\Delta\tau = 3T/10$ and the signal suffers

from different CD conditions in a 2.5 Gb/s system

由图 5 可知,不同色度色散量时信号的偏振度并没有明显差别,但系统误码率的相应变化不但明显,而且非常特别。在系统中偏振模色散数量不变的情况下,随着色度色散量的增加,误码率先经历暂时的好转(40 km 色度色散的情况),然后才逐渐变差(50 km 和 60 km 色度色散的情况)。这是因为由少量色度色散引起的光信号轻度展宽虽然增加了两正交偏振分量间的重叠,但此时相邻“1”、“0”码的重叠却并未超出系统规定的码间干扰极限,所以误码率暂时好转。但随着色度色散量的增加,相邻“1”和“0”间的重叠越来越大,误码率也相应变差。

2.5 Gb/s、非归零调制时的偏振度与偏振模色散关系实验线路如图 4 所示。误码仪发出的非归零调制光信号经保偏光纤和单模光纤后产生一定的差分群时延和色度色散,经偏振度分析仪分析其偏振度后进入控制系统,控制系统通过调节偏振控制器改变传输光信号的脉冲分裂比 γ ,最后光信号重新进入误码仪接收端,据此分析系统性能。整个实验过程中光功率维持在 -29 dBm 左右,分别改变线路中的偏振模色散和色度色散量,即可得到信号偏振度和系统误码率随 γ 的变化情况,如图 5 所示。

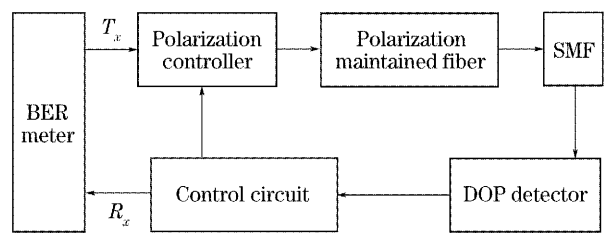


图 4 系统实验及模拟原理图

Fig. 4 Setup for the experiments and the simulations

3.2.2 不同色度色散情况下 10 Gb/s 系统中偏振度特性和系统性能分析

10 Gb/s 非归零系统中偏振度反馈实验的模拟原理仍如图 4 所示。图 6 为当偏振模色散大小为 $3T/10$,不同色度色散情况下 10 Gb/s 系统中信号偏振度和系统误码率随 γ 的变化规律。可见,与同等条件下 2.5 Gb/s 系统的情况相比,不同色度色散情况下偏振度差别明显增大,而且,尽管偏振模色散和色度色散共同作用时光信号表现出比仅受偏振模色散作用时更大的偏振度,但误码率仍不断增加,偏振度将不能如实反映偏振模色散对系统性能的影响。

此外,由于40 km色度色散量对10 Gb/s系统来说影响较大,所以无法看到误码率的轻度改善情况。这

与理论分析均符合。

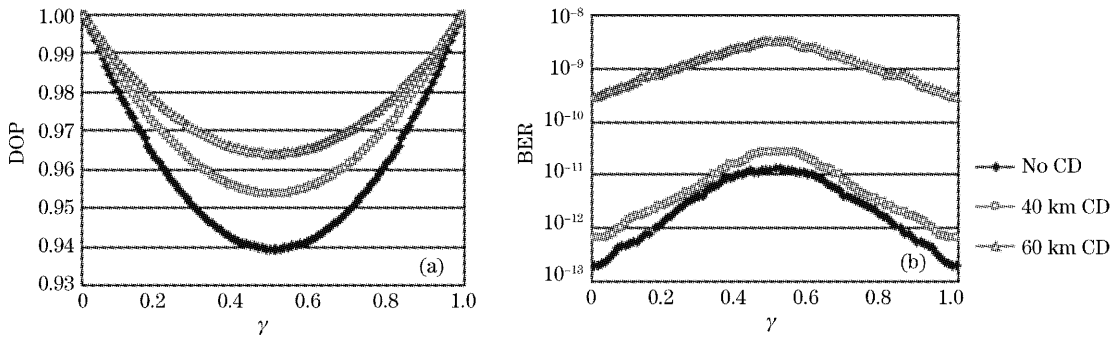


图 6 $\Delta\tau=3T/10$ 时,不同色度色散情况下 10 Gb/s 系统中信号偏振度(a)和系统误码率(b)随 γ 变化的模拟结果
Fig. 6 Simulated properties of DOP (a) versus γ and BER (b) versus γ when $\Delta\tau = 3T/10$ and the signal suffers from different CD conditions in a 10 Gb/s system

3.3 讨论

首先,偏振模色散和色度色散共同作用时光信号的偏振度值比仅有偏振模色散作用时增大,且光信号两正交偏振分量间能量差别越小或差分群时延越大,即脉冲分裂比 γ 越接近 0.5 或差分群时延越大,两种情况下偏振度值偏离就越远。这种偏振度畸变还随系统传输速率和色度色散量的增加而加剧。且这种偏振度畸变随系统速率和色度色散量的增加而加剧。

其次,由上述实验和模拟可知,对一确定偏振模色散矢量而言,尽管偏振模色散和色度色散共同作用下光信号的偏振度值比仅受偏振模色散作用时要大,但误码率却只是先轻度好转,随即就因色度色散量增加而逐渐变差(如图 7),偏振度将不能如实反映偏振模色散对系统性能的影响。这是因为起初由少量色度色散引起的信号轻度展宽虽然增加了两偏振分量的重叠,但相邻“1”、“0”码的重叠却并未超出系统规定的码间干扰极限,所以误码率在经历从无到有的一定增加后逐渐变小,并进入一个局部最优值。此后,随着偏振模色散和色度色散的增加,由色度色散引起的两偏振分量间额外重叠能量的变化一直增大,相邻“1”、“0”码的重叠也逐渐超出码间干扰

极限,整个过程中信号偏振度与仅有偏振模色散影响时的偏振度之间的差值一直增大,而误码率却不断增加,所以偏振度将不能如实反映偏振模色散对系统性能的影响。

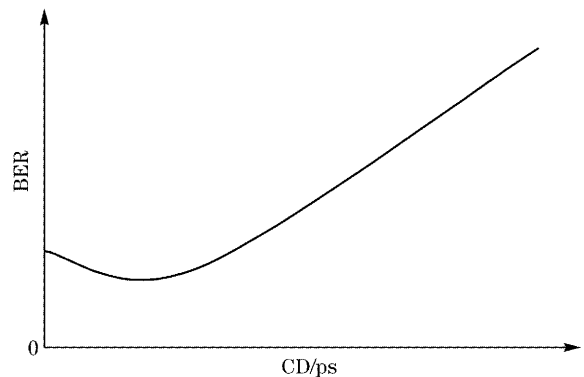


图 7 偏振模色散矢量确定时误码率随色度色散变化的特性
Fig. 7 Property of BER versus CD when the PMD vector is fixed

再次,实际系统中色度色散必须在偏振模色散之前补偿;否则就必须在偏振模色散补偿中加一个色度色散补偿器件,以减轻色度色散对偏振度反馈的影响(图 8)。如前所述,因系统中采用色度色散后端补偿,且偏振模色散在色度色散之前补偿时,一个较大色度色散量会导致偏振模色散补偿的偏振度

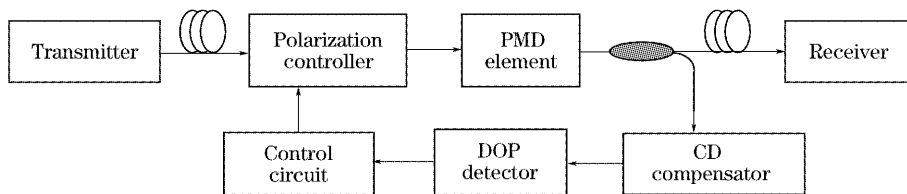


图 8 减轻色度色散对偏振模色散补偿影响的一种措施
Fig. 8 Modification to the effect of CD on the PMD compensation

反馈失真,从而无法快速补偿偏振模色散,所以研究色度色散对偏振模色散动态补偿的影响并采取一定措施,具有重要意义。

4 结 论

分析了色度色散对偏振模色散动态补偿中偏振度反馈的影响,相应实验或模拟表明,在偏振模色散和色度色散共同作用下偏振度将不能如实反映偏振模色散对系统性能的影响。并进一步探讨了实际偏振模色散补偿中减轻色度色散影响的措施。

参 考 文 献

- 1 D. Pennincks, S. Lanne. Reducing PMD impairments[C]. OFC, 2001. TuP1
- 2 Li Tangjun, Wang Muguang, Shi Yulei *et al.*. PMD compensation of FBGs in a 40 Gb/s OTDM system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **23**(2): 188~192 (in Chinese)
李唐军,王目光,石玉磊等. 对40Gb/s OTDM系统中光纤光栅色散补偿器进行偏振模色散补偿的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6): 518~520
- 3 Zhang Lu, Hu Qianggao, Lu Zenghai *et al.*. Relationship between the degree of polarization and polarization mode dispersion in different modulations[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **24**(6): 767~771 (in Chinese)
张 璐,胡强高,吕增海等. 不同调制方式下偏振度与偏振模色散的关系[J]. *光学学报*, 2003, **24**(6): 767~771
- 4 C. Francia, F. Bruyere, J. P. Thiery *et al.*. Simple dynamic polarization mode dispersion compensator[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(5): 414~415
- 5 Aiyang Yang, Xiaoxu Li, Anshi Xu *et al.*. Combined impacts of group velocity dispersion, Kerr effect and polarization mode dispersion in optical fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **214**: 133~139
- 6 N. Gisin. Coherent quantum measurement for the direct determination of the degree of polarization and polarization mode dispersion compensation[J]. *arXiv: quant-ph/0010036*, 2000, V1, 9 Oct 2000