

提高 RZ 码偏振度椭球对偏振模色散响应范围的方法*

陈 林¹ 文双春¹ 周光涛² 郑 远² 张晓光² 于 丽² 张 茹² 杨伯君²

(1 湖南大学计算机与通信学院,长沙 410082)

(2 北京邮电大学 49 信箱,北京 100876)

摘 要 提出了使用适当带宽的光带通滤波器和选择合适的脉冲宽度两种方法来增加 RZ 码光纤通信系统中偏振度椭球对偏振模色散的响应范围,模拟计算得到了 40 Gb/s 的 RZ 码在不同脉冲宽度以及同一脉冲宽度下不同的滤波器带宽两种情况下偏振度椭球的短轴随偏振模色散的变化情况. 结果表明,采用这二种方法可以明显地提高偏振度椭球的短轴对偏振模色散的响应范围. 另外,数值模拟结果还表明对于 40 Gb/s 的系统滤波器带宽应大于 50 Hz,光源脉宽应在 4 ps ~ 10 ps 较为合适. 通过实验证明了这二种方案是可行的.

关键词 偏振模色散补偿;偏振度椭球;RZ 码

中图分类号 O436.3;TN929.11

文献标识码 A

0 引言

随着光纤通信系统速率的提高,光纤中的偏振模色散(PMD)对系统性能的影响越来越显著,人们对 PMD 的特性、测量和补偿等方面进行了广泛的研究,提出了多种自适应 PMD 补偿方法,因此需要一个能够实时反映 PMD 大小的反馈信号来控制补偿单元,反馈信号的质量将直接影响到补偿器性能的好坏. 目前 PMD 补偿系统中所使用的反馈信号可以是信号频谱中特定射频分量的强度^[1,2],也可以是偏振度^[3,4](DOP). 以偏振度作为反馈信号的系统中,由于偏振度随输入的偏振态变化,这样会影响到实际 PMD 补偿系统对 PMD 大小的正确估计,一种改进的方法是采用三维偏振度椭球作为反馈信号,然而无论是 DOP 还是偏振度椭球,在采用归零(RZ)码的光纤通信系统中,它们对 PMD 的响应范围很小^[5],这将影响到补偿系统的性能. 本文利用数值模拟方法讨论了 RZ 码光纤通信系统中三维偏振度椭球的三个轴的长度随偏振模色散变化的规律,提出了二种提高 RZ 码光纤通信系统三维偏振度椭球对偏振模色散响应范围的有效方法,并在实验中成功地提高了响应范围.

1 光信号 DOP 的理论模型

对于一束单频光,设它在斯托克斯空间的四个

分量分别为(s_0, s_1, s_2, s_3),则 DOP 的定义为: $DOP =$

$$\frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0}$$

这样,对于完全偏振光, DOP 为 1;对于部分偏振光, DOP < 1.

在光通信系统中,传输信号占用一定的频率范围,因此提取 PMD 补偿器的反馈信号时需要计算在这个范围内的 DOP.

从频域上看,不考虑群速度色散和偏振相关损耗时,一般光纤的琼斯矩阵可表示为^[6]

$$M(\omega) = \begin{pmatrix} u_1 & u_2 \\ -u_2^* & u_1^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, $|u_1|^2 + |u_2|^2 = 1$. 假设信号的频谱形状为 $f(\omega)$,并且满足归一化条件 $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(\omega)|^2 \frac{d\omega}{2\pi} = 1$. 入射

光的偏振态与频率无关,在两个偏振主态上的归一化投影分量为 $[a \ b]^T$, T 表示转置,所以经过光纤传输后两个偏振方向上的琼斯矢量可表示为 $[s_{ox} \ s_{oy}]^T = M(\omega)[a \ b]^T$. 将琼斯矢量转化为相应的 Stokes 参量 s ^[7],得到光信号输出平均偏振态在整个信号频谱范围内平均

$$r = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(\omega)|^2 s \quad (2)$$

则矢量 r 的模就是信号的 DOP,可以看出信号的 DOP 就是其频谱上各个频率分量的 DOP 对功率谱加权平均的结果. 由上述可知,信号的 DOP 与输入信号的偏振态、偏振模色散、以及信号的频谱有关.

2 PMD 对 RZ 码偏振度椭球的影响

因为通常所用偏振度(DOP)只是三维偏振度

*国家自然科学基金:波分复用光纤通信系统中偏振模色散补偿的理论及实验研究(60377026)支持

Tel:0731-8822941 Email:lililiu@sina.com

收稿日期:2004-03-23

椭球的一维形式,所以只需研究三维偏振度椭球的三个轴的长度与 PMD 引起的差分群时延(DGD)的关系就可以知道偏振度椭球与偏振模色散的关系.

在 Stokes 空间中, PMD 矢量可表示为: $\Omega = \Delta\tau\hat{q}$, 其中 $\Delta\tau$ 为 DGD, 而 \hat{q} 表示偏振模色散矢量的方向. 二阶偏振模色散可以表示为: $\Omega_\omega = \Delta\tau_\omega\hat{q} + \Delta\tau\hat{q}_\omega$, 其中 $\Delta\tau_\omega = d(\Delta\tau)/d\omega$, 表示偏振相关色散(PCD); $\hat{q}_\omega = d\hat{q}/d\omega$, $|\hat{q}_\omega|$ 称为主态旋转率(PSP rotation rate).

首先建立 40Gb/s 数值模拟系统,如图 1,其中光源的输出为完全偏振光,偏振扰动器的作用是改变光源的输出偏振态,使其能够遍历整个邦加球.伪随机序列产生 40 Gb/s 的 RZ 码,序列长度为 2^6-1 ,经过调制器后输出 RZ 码型. PMD 模拟器的模型采用文献[8]所用的模型,它能模拟出一阶、二阶的统计特性^[9-11].

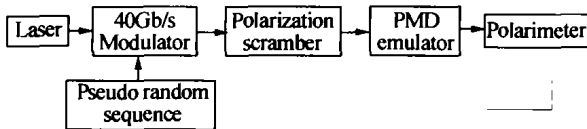


图 1 研究 DOP 椭球与 PMD 关系的数值模型
Fig. 1 The numerical model of studying the relation of DOP and PMD

利用式(1)、(2)通过数值模拟,采用图 1 所示的模型,我们计算了当 PMD 模拟器产生的差分群时延(DGD)为 17 ps,光源脉冲宽度为 7.5 ps,有二阶偏振模色散时,200 个不同偏振态的 DOP 值,在邦加球上表示为图 2 所示的偏振度椭球.对于偏振度椭球来讲,最有代表性的是它的三个轴,分别表示为 r_1, r_2, r_3 ,并且满足关系式.理论上讲,偏振度椭球的三个轴的大小和方向都携带了有关 PMD 的信息^[5],包括一阶及二阶 PMD 的信息,长轴 r_1 所指的方向代表光纤的偏振主态(PSP)的方向.

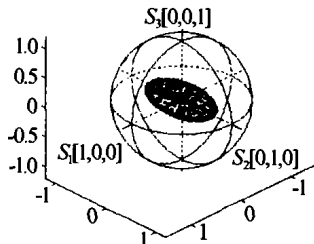


图 2 有二阶 PMD 时 RZ 码三维偏振度椭球
Fig. 2 3-D DOP ellipsoid for RZ code with second order PMD

为了得到偏振度椭球三个轴受 PMD 影响的变化规律,我们首先计算了只考虑一阶偏振模色散的情况如图 3 所示,可以看出,只有一阶情况下,二个短轴所表示的 DOP 随着 DGD 的变化曲线是重合的,且随着 PMD 增大下降很快,而且长轴的长度不发生变化.图 4 是考虑二阶偏振模色散时 RZ 码的三维椭球的三个轴所表示的 DOP 随 DGD 的变化情况,可以看出,随 DGD 的增加三个轴的长度都会发

生变化,变化最快的是二个短轴,而且此时二个短轴不再相等.当 DOP 下降到一定程度后又开始上升,随后就出现振荡.当第一次下降到第一个极小值后,此时的 DOP 不再与 DGD 呈线性关系.图 4 所示的振荡原因是由于二阶偏振模色散的影响.在 RZ 码系统中,长轴不宜作为偏振模色散的反馈信号,选最短轴为宜.

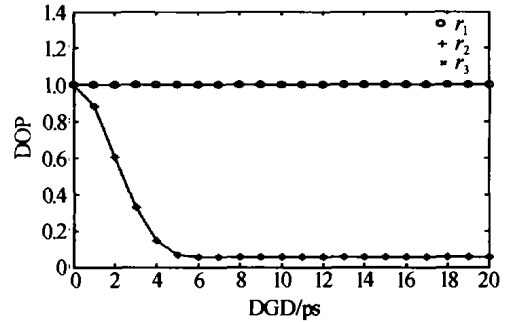


图 3 只考虑一阶 PMD 时椭球的三个轴随 DGD 的变化(脉宽为 2 ps)

Fig. 3 Three axis of DOP ellipsoid change with DGD only with first order PMD

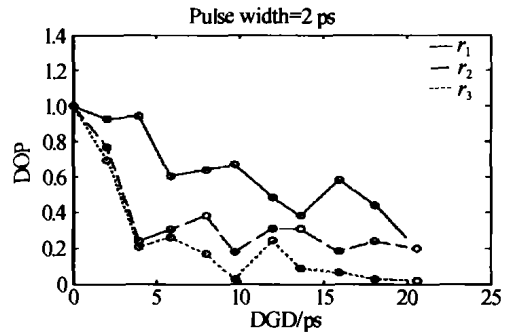


图 4 有二阶 PMD 时,椭球的三轴随 DGD 的变化(脉宽 2 ps, r_1 为长轴, r_2, r_3 为二个短轴)

Fig. 4 Three axis of ellipsoid change with DGD with second order PMD(PSP $r_1 = 20 \text{ ps}^2$, pulsewidth 2 ps)

综上所述,RZ 码系统中,偏振度随偏振模色散的变化下降太快,且受二阶 PMD 的影响出现振荡现象,使得 PMD 算法容易陷入局部最大值,这对开发 PMD 补偿算法带来一定的困难,影响 PMD 补偿效果.从 PMD 补偿效果来看要求在较大的范围内 DOP 对 DGD 具有明显的单调变化.

3 提高 RZ 系统中偏振度椭球对偏振模色散响应范围

首先寻找 RZ 系统中影响 DOP 随 PMD 变化的原因,从物理意义上讲,由于偏振度椭球上每个点代表的是整个频域上的斯托克斯矢量对频谱强度加权平均的结果,根据 PMD 的特性,频率间隔越大,不同频率分量斯托克斯矢量方向的差异就可能越明显,平均以后的值就越小,这样 DOP 对 PMD 的变化就快.而对于归零(RZ)码而言,频谱宽,而且频谱中心部分的强度也比 NRZ 码有所下降,所以当 PMD 发生变化时,离中心频谱较远分量的斯托克斯矢量

对整体的平均效果有较大的影响,所以下降就快.

从 DOP 表达式来看,一部分与光纤的传输矩阵和输入偏振态有关,另一部分与信号的功率谱有关,改变这两者都可以改变偏振度椭圆上的坐标值. 在实际的 PMD 补偿系统中,要改变光纤的传输矩阵必须更换光纤,而要改变输入偏振态必然要在输入端安装偏振旋转器,同时在输出端安装检偏振仪,因此采用改变第一部分来增加响应宽度的方法是不现实的,但是可以通过改变进入 DOP 测量设备的频谱形状的办法来提高响应宽度,压窄频谱最直接的实现方法一是增大脉冲的宽度,二是在偏振度检测前加上光滤波器.

为了验证这个想法,我们计算了不同的脉冲宽度条件下三维椭圆的最短轴(即最小 DOP)随 PMD 的变化情况,如图 5. 可以看到随脉冲宽度增加,偏振度(DOP)随 PMD 的变化变得缓慢,且二阶 PMD 对 DOP 的影响也变小. 从图 5 看出,当脉宽为 2 ps 时,在 DGD = 4 ps 时偏振度就达到极小值,随后开始出现振荡现象,当脉宽提高到 4ps 后,DGD 达到 10 ps 才出现振荡现象,因此在进行超高速 OTDM 光纤通信中选择合适宽度的超短脉冲源,有利于更好地实现 PMD 补偿. 从数值模拟来看,对 RZ 码而言,选择脉宽在 4 ps ~ 10 ps 的光源较为合适.

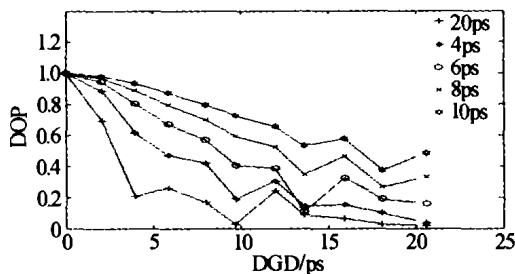


图 5 有二阶 PMD 时不同的脉冲宽度,最小 DOP 随 DGD 的变化

Fig. 5 DOP change with DGD with second order PMD

另外一种办法是在系统中安装光带通滤波器进行滤波. 在图 1 所示的 DOP 测量前加一个光带通滤波器,将其中高频分量滤掉. 在不改变脉冲宽度的情况下(2 ps),我们采用了不同带宽的滤波器重新进行了计算,得到了在考虑一阶 PMD 和二阶 PMD 的情况下输出的信号偏振度椭圆的最短轴(即最小 DOP)随 DGD 的变化如图 6 和图 7 所示. 与图 3、4 比较,我们从图 6 和图 7 可以看出,采用适当带宽的滤波器后,响应范围明显增大,同时二阶 PMD 对偏振度的影响也相对变弱. 但滤波器带宽太窄,灵敏度也下降,因此综合考虑灵敏度和响应范围,滤波器的带宽应选取大于 50 GHz 为宜.

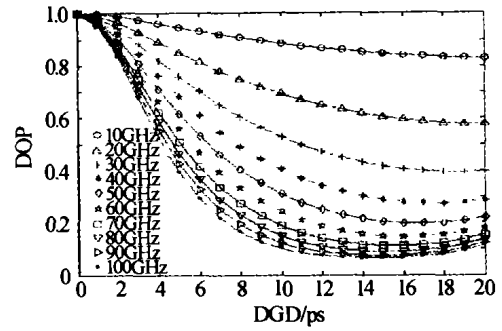


图 6 只考虑一阶 PMD 时采用不同的带宽滤波器最小 DOP 随 DGD 的变化(脉宽为 2 ps)

Fig. 6 The mini DOP change with DGD under various filters only for first order PMD (pulse width 2 ps)

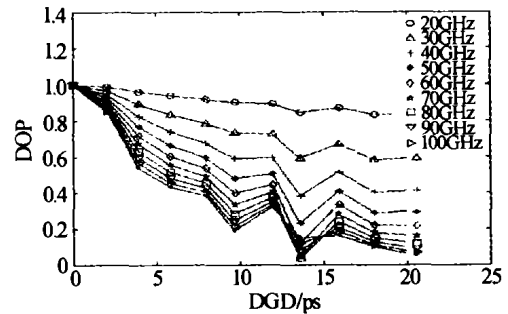


图 7 考虑二阶偏振模色散(PSP $r_1 + 20 \text{ ps}^2$),最少 DOP 在不同的滤波器下随 DGD 的变化(脉宽为 2 ps)

Fig. 7 The mini DOP changes with DGD under various filter considering second order PMD (pulse width is 2 ps)

4 实验

为了验证以上理论模拟,我们还进行了实验研究. 我们选用清华大学研制的 SOA + EAM 光纤环形激光器,经过调制后产生的脉冲宽度为 7 ps,中心波长为 1560.5 nm 的 40 Gb/s 的 RZ 码,滤波器为 Santec 公司的 OTF-300-008-s2,选用滤波器带宽为 80 GHz;用偏振计测量偏振度大小,用可变时延线产生一阶 PMD. 我们对有滤波器 and 没有滤波器的情况下偏振度随着差分群时延(DGD)的变化情况进行了实验研究,得到的结果如图 8 所示. 图 8 中,没有滤波器时的所测得的数据点用方点表示,有滤波器时实验数据点用圆点表示. 从图 8 可以看出,没有滤波器时,当 DGD 为 7.5 ps 时,DOP 下降到最小值. 加滤波器后,可以使得响应的 DGD 达到 15 ps,

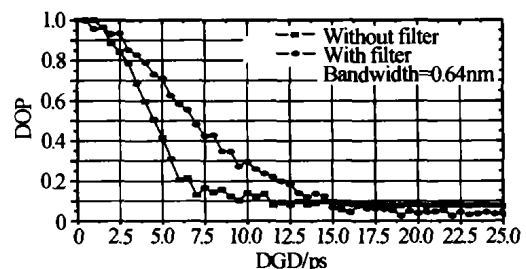


图 8 采用带宽为 80 GHz 滤波器,DOP 随 DGD 的变化情况 Fig. 8 DOP changes with DGD with filter of 80GHz bandwidth

也就是说,响应范围从 0 ~ 7.5 ps 提高到从 0 ~ 15 ps, 从而证明本文提出的方案是可行的。

5 结论

通过分析 RZ 码光纤通信系统中影响 DOP 随 PMD 变化的各种因素,数值模拟得到了不同脉冲宽度和同一脉冲宽度不同的滤波器带宽条件下 RZ 码系统的偏振度椭圆随 PMD 的变化情况,我们发现随着脉冲宽度增大以及滤波器带宽变窄,偏振度椭圆对 PMD 的响应范围增大,因此在我们实验中可通过选择合适的脉宽的 RZ 码光源和使用光带通滤波器压窄 RZ 码的频谱来提高响应范围。通过实验证明,兼顾采用这种方法提高了 PMD 补偿的效果,特别是能够有效地对大的 PMD 进行有效地补偿^[12]。

参考文献

- 1 Jens C R, Akihiko I, George I. Automatic compensation of polarization-mode dispersion for 40 Gb/s transmission systems. *J Light Technology*, 2002, **20**(12): 2101 ~ 2107
- 2 Takahashi T, Imai T, Aiki M. Automatic compensation technique for time wise fluctuating polarization mode dispersion in in-line amplifier systems. *Electronics Letters*, 1994, **30**(4): 348 ~ 349
- 3 Nobuhiko K. Analysis of signal degree of polarization degradation used as control signal for optical polarization mode dispersion compensation. *J Light Technology*, 2001, **19**(4): 480 ~ 485
- 4 Sylla P M, Richardson J K, Vanleeuwen M, et al. Dopellipsoids for systems with frequency-dependent principal states. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(12): 1310 ~ 1312
- 5 Rosenfeldt H, Konthe C H, Ulrich R, et al. Automatic PMD compensation at 40Gbi/s and 80 Gbit/s using a 3-dimensional DOP evaluation for feedback, OFC2001. Anaheim: OSA, 2002, PD27: 1 ~ 3
- 6 Poole C D, Wagner R E. Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibers. *Electron Lett*, 1986, **22**(19): 1029 ~ 1030
- 7 Gordon J P, Kogelnik H. PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers. in Proc. Nat. Acad. Sci. 2000, **97**(9): 4541 ~ 4550
- 8 郑远, 刘玉敏, 杨伯君, 等. 利用琼斯传输矩阵法研究二阶 PMD 统计特性. *中国激光*, 2003, **30**(1): 45 ~ 48
Zhen Y, Liu B M, Yang B J, et al. *Chinese Journal of Lasers A*, 2003, **30**(1): 45 ~ 48
- 9 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
- 10 赵文玉, 王岚, 王宏祥, 等. 高阶 PMD 统计特性研究. *光子学报*, 2002, **31**(11): 1369 ~ 1371
Zhao W Y, Wang L, Wang H X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11): 1369 ~ 1371
- 11 姚和军, 娄采云, 曾丽, 等. 一种可编程 PMD 模拟器. *光子学报*, 2004, **33**(3): 326 ~ 328
Yao H J, Lou C Y, Zeng L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 326 ~ 328
- 12 周光涛, 张晓光, 沈昱, 等. 10 Gb/s 光通信传输系统中一阶 PMD 自适应补偿实验. *光子学报*, 2004, **33**(4): 448 ~ 451
Zhou G T, Zhang X G, Yu L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 448 ~ 451

The Method of Increasing the Response Range of DOP Ellipsoid to Polarization Mode Dispersion in 40Gb/s RZ System

Chen Lin¹, Wen Shuangchun¹, Zhou Guangtao², Zheng Yuan², Zhang Xiaoguang², Yu Li², Zhan Ru², Yang Bojun²

¹ School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082

² Beijing University of Post and Telecommunication, box#49, Beijing 100876

Received date: 2004-03-23

Abstract The method is proposed to improve the response range of DOP Ellipsoid to PMD. A conclusion is given that response range of DOP ellipsoid shortest axes to PMD can be greatly increased by using the proper bandwidth filter and selecting proper pulse width laser in RZ code optical fiber communication system. The results also show that the bandwidth of the filter should be limited above 50 GHz, while pulse width should be limited in 4 ~ 10 ps for 40 Gb/s system. Finally, the experiment result shows that the above proposed method are very effective to increase the response range of DOP ellipsoid on PMD in 40 Gb/s system.

Keywords Polarization mode dispersion (PMD); Degree of polarization (DOP); RZ code



Chen Lin was born in 1968, senior engineer, has been working on the semiconductor device, and now is a Ph. D student in Beijing University of Post and Telecommunication, majored in optical communication and photoelectron device. Now he is working on the subject "polarization mode dispersion and its adaptive compensation" with professor Yang Bojun, Zhang Xiaoguang.