

能够补偿二阶偏振模色散的三阶段 偏振模色散补偿器^{*}

郑 远 于 丽 杨伯君[†] 张晓光

(北京邮电大学理学院物理部 123 信箱, 北京 100876)

(2002 年 3 月 7 日收到, 2002 年 4 月 10 日收到修改稿)

摘要分析了偏振相关色散对光通信系统性能的影响, 提出了一种三阶段高阶偏振模色散补偿方案, 从理论上分析了它同时补偿偏振相关色散和偏振主态旋转的可能性, 并提出了其可能存在的两种工作方式. 通过数值模拟与两阶段补偿方案进行了性能比较, 其偏振模色散容限比两阶段补偿提高约 17% 个比特周期.

关键词: 光通信, 光偏振, 光纤色散

PACC: 4230Q, 4225J, 4281D

1. 引 言

偏振模色散(PMD)是高速长距离光纤通信系统的主要限制因素之一. PMD 是随机变量, 它随时间和频率变化. 从频域看, PMD 矢量可以在中心频率处泰勒展开, 根据近似的阶数可以划分为一阶 PMD、二阶 PMD, ... 其中二阶以上的 PMD 统称为高阶 PMD. 从目前光通信系统所使用的频带宽度来看, 高阶 PMD 效应中对系统性能影响较大的主要是二阶 PMD 效应, 二阶 PMD 又可分为两个分量^[1]: 偏振相关色散(PCD)和主态旋转率(PSP rotation rate). PMD 补偿器可以划分为若干个由偏振控制器和差分群时延段构成的单元, 根据补偿器是否能够补偿高阶 PMD, 可以分为一阶补偿^[2,3]和高阶补偿^[4-6]. 一阶 PMD 补偿器的结构简单, 容易控制, 限制其补偿效果的主要因素是偏振主态的带宽^[7], 当 PMD 值增大时, 偏振主态的带宽减小, 一阶补偿器的效果变差. 如果在一阶补偿之前先对偏振主态的带宽进行补偿, 使其尽可能的加宽, 然后再进行一阶补偿, 补偿效果会比单纯的一阶补偿好很多, 这就是所谓的高阶补偿. 在高阶 PMD 补偿器中, 分布式补偿^[6]的效果最好, 但是需要的反馈信号多, 控制复杂, 补偿的速度不可能很快; 两阶段补偿^[5]能够解决控制速

度的问题, 但是只是针对二阶 PMD 中的主态旋转分量进行补偿, 对偏振相关色散分量没有处理, 当平均的差分群时延(DGD)较大时, 偏振相关色散对误码率的影响不能忽略.

在一阶补偿器中, 一阶可变补偿的效果最好, 基于此我们提出一种补偿高阶 PMD 的方案, 这种补偿器由三段补偿光纤级联而成, 前两段的 DGD 固定, 用于同时补偿二阶 PMD 中的 PSP 旋转率和 PCD 分量, 第三段采用 DGD 可变补偿, 用于补偿剩余的一阶 PMD. 针对于高阶补偿部分, 我们提出了这种补偿器可能存在的两种工作方式(这里的工作方式是指补偿器工作时所处的状态, 这种状态用 PMD 矢量的大小和方向来表征), 最后用数值模拟验证了这种补偿器在 $40\text{Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 non-return-to-zero(缩写为 NRZ)系统中的性能.

2. 三阶段补偿方案

2.1. 偏振相关色散对一阶 PMD 可变补偿系统性能的限制

首先看一下偏振相关色散对一阶可变补偿系统性能的影响. 建立一个 $40\text{Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 NRZ 码系统模型^[8]. 接收机中放大器的随机噪声将使误码随机变

^{*} 国家自然科学基金(批准号 60072042)、国家高技术研究发展计划(批准号 2001AA122041)、教育部博士点基金和北京邮电大学与世维通联合基金资助的课题.

[†] E-mail: fjyung@bupt.edu.cn

化,为了清晰地反映 DGD,PCD 和 PSP 旋转率分量对误码率(BER)的影响,只作一个定性分析,忽略噪声的影响.利用文献[9]给出的琼斯矩阵的模型,研究 DGD,PCD 和 PSP 旋转率分量的大小对一阶 PMD 可变补偿器性能的影响,结果如图 1 所示,图 1 中的曲线表示误码率等于 10^{-12} 时三者的组合曲线,不同的曲线表示不同的 DGD 大小.对于同一个 DGD,曲线左面区域误码率小于 10^{-12} ,曲线右面区域表示误码率大于 10^{-12} ,如果考虑噪声,这些曲线将左移,受噪声随机性的影响变得不平滑,但大体的变化趋势与不考虑噪声时相同.由图 1 可见,DGD 越小,容许的 PCD 和 PSP 旋转率的组合越大.在一阶补偿之前先补偿 PCD 和 PSP 旋转率都可以达到减小误码的目的,仅补偿 PSP 旋转率,其补偿量要受到一阶 PMD 补偿器的限制,效果不会达到最佳.另外,图 1 还表明误码率一定情况下对 PCD 的最大值有限制,当其值约为 180ps^2 ,考虑噪声时小于这个值,这时即使 DGD 和 PSP 旋转率很小,误码率也将超过 10^{-12} ,这种情况下必须对 PCD 进行补偿.根据 PMD 的统计特性,PCD 值超过 180ps^2 的情况在平均 DGD 大于十几皮秒时就可以出现,随着平均 DGD 的增大,这种概率会更大.从以上两种情况看,要进一步提高系统的性能必须补偿 PCD.

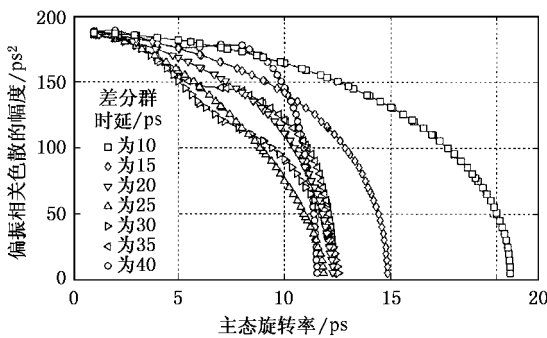


图 1 BER = 1×10^{-12} 时,DGD,PCD 和 PSP 旋转率的关系曲线

2.2. 三阶段补偿理论

PMD 向量表示^[10]为 $\tau = \tau \hat{q}$,其中 $\tau = |\tau|$, $\hat{q} = \tau/|\tau|$,二阶 PMD 可表示为 $\tau_\omega = \tau_\omega \hat{q}_\omega + \tau \hat{q}_\omega$, $\tau_\omega = \frac{d\tau}{d\omega} \Big|_{\omega=0}$, $\hat{q}_\omega = \frac{d\hat{q}}{d\omega} \Big|_{\omega=0}$, $\hat{q} \perp \hat{q}_\omega$.首先看两端光纤级联后的二阶 PMD,

$$\tau_{\text{tot}\omega} = R_2[\tau_{1\omega} \hat{q}_1 + \tau_1 \hat{q}_{1\omega} + (R_2^+ \tau_2) \times (\tau_1 \hat{q}_1)], \quad (1)$$

式中下标 1,2 表示两根光纤,光纤 1 看作被补偿光纤; R 表示厄米矩阵, R^+ 表示 R 的厄米共轭矩阵.由于叉乘的关系,使得(1)式中的 $\tau_{1\omega} \hat{q}_1$ 无法得到补偿,即单根补偿光纤无法补偿偏振相关色散.看三段光纤级联的情况,

$$\tau_{\text{tot}} = R_3 R_2[\tau_1 + R_2^+(\tau_2 + R_3^+ \tau_3)], \quad (2)$$

$$\tau_{\text{tot}\omega} = R_3 R_2\left\{ \tau_{1\omega} + [R_2^+(\tau_2 + R_3^+ \tau_3)] \times \tau_1 + R_2^+[(R_3^+ \tau_3) \times \tau_2] \right\}, \quad (3)$$

式中下标 1,2,3 分别表示三根光纤,光纤 1 看作被补偿光纤; R_2^+ 的作用是旋转 Stokes 空间的矢量,但并不改变其大小,一般情况下这种旋转与频率有关,不同的频率处的矢量作不同的旋转.考虑每一个频率点处的情况, $R_2^+[(R_3^+ \tau_3) \times \tau_2]$ 表示两个矢量先叉乘,然后再旋转一个角度,效果等同于将这两个矢量先旋转同样的角度,然后再叉乘,即相当于 $(R_2^+ R_3^+ \tau_3) \times (R_2^+ \tau_2)$,为了表示简单起见,令 $a = R_2^+ R_3^+ \tau_3$, $b = R_2^+ \tau_2$,虽然 a 中含有 R_2^+ ,然而当 b 方向固定时, a 仍可以任意旋转,因为 $R_3^+ \tau_3$ 是可以任意旋转的,因此 a 和 b 是相互独立的.将 a 和 b 的表达式代入(2)(3)式得到

$$|\tau_{\text{tot}}| = |\tau_1 + a + b|, \quad (4)$$

$$|\tau_{\text{tot}\omega}| = |\tau_{1\omega} \hat{q}_1 + \tau_1 \hat{q}_{1\omega} + (a + b) \times (\tau_1 \hat{q}_1) + a \times b|. \quad (5)$$

从(5)式可以看出,如果 a 和 b 方向选择合适, $\tau_{1\omega} \hat{q}_1$ 可以由 $a \times b$ 来补偿,同时 $\tau_1 \hat{q}_{1\omega}$ 可由 $(a + b) \times (\tau_1 \hat{q}_1)$ 来补偿.可见要补偿偏振相关色散,补偿光纤段数最少应该为两段,由此在最后的一阶补偿之前,可用两段固定 DGD 的光纤补偿二阶 PMD 的两个分量,这样就构成一个前两段 DGD 固定,第三段 DGD 可变的三阶段补偿器,如图 2 所示,其中 pc 为偏振控制器.

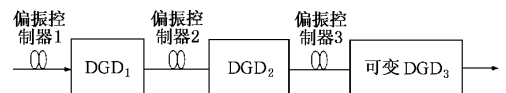


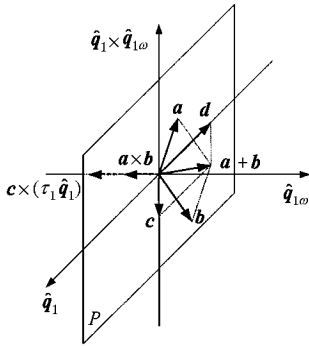
图 2 三阶段补偿器示意图

2.3. 三阶段补偿器两种可能的工作方式

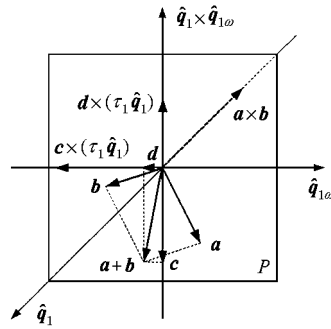
下面讨论与此补偿器相关的两种工作方式,这两种工作方式主要取决于前两阶段补偿光纤 PMD 矢量的方向,图 3 表示为了补偿二阶 PMD,前两段补

偿光纤 PMD 矢量的相对位置. 由于 $\hat{q}_1 \perp \hat{q}_{1\omega}$, 分别以被补偿光纤的 $\hat{q}_1, \hat{q}_{1\omega}$ 及 $\hat{q}_1 \times \hat{q}_{1\omega}$ 矢量所在方向为坐标轴, 构造如图 3 所示的笛卡儿坐标系, 其中平面 P 是由 \hat{q}_1 及 $\hat{q}_1 \times \hat{q}_{1\omega}$ 确定的平面, 考虑矢量 a 和 b 都

在平面 P 内的情况, 图 3(a) 中的 c, d 分别为 $a+b$ 在 $\hat{q}_1 \times \hat{q}_{1\omega}$ 和 \hat{q}_1 轴上的投影, 图 3(b) 中的 c, d 分别为 $a+b$ 在 $\hat{q}_1 \times \hat{q}_{1\omega}$ 和 $\hat{q}_{1\omega}$ 轴上的投影.



(a) 为三阶段补偿器的工作方式 1



(b) 为三阶段补偿器的工作方式 2

图 3

对于工作方式 1, $a \times b$ 和 $c(\tau_1 \hat{q}_1)$ 都可以用来补偿 $\hat{q}_{1\omega}$ 方向上的分量, 而 d 可以补偿一阶 PMD, 二阶 PMD 的 $\tau_{1\omega}$ 分量得不到补偿. 特殊情况下, 如果 a 和 b 的方向在一条直线上, 这时的补偿器与两阶段补偿的情况类似. 与两阶段补偿器相比较, 虽然 a 和 b 的 DGD 都固定, 由于 $a+b$ 大小随 a 和 b 的相对角度变化, 相当于两阶段补偿器中的第一段补偿光纤的 DGD 可变, 这样就折中了控制速度和控制性能的矛盾. 另外, 工作方式 1 与两阶段补偿器相比还多了 $a \times b$ 这个分量, 它可以在一定程度上提高补偿器的极限性能. 可见工作方式 1 适于补偿 PSP 旋转率较大而 PCD 较小的情况.

图 3(b) 表示的是这种补偿器的工作方式 2, $c \times (\tau_1 \hat{q}_1)$ 仍旧用来补偿 $\hat{q}_{1\omega}$ 方向的分量, 与工作方式 1 有所不同, $a \times b$ 却用来补偿 $\tau_{1\omega}$ 分量, 即偏振相关色散分量, 这种情况下, 两个二阶 PMD 分量能够同时得到补偿. 从 PMD 的统计特性看^[1], 被补偿光纤的这两个二阶分量之间方向和大小都不相关, 要补偿这两个分量就要求 $c \times (\tau_1 \hat{q}_1)$ 和 $a \times b$ 的方向大小也要不相关, 即要求 $a \times b$ 与 c 不相关, 图 4 表示了工作方式 2 中这两个量的关系, 对补偿器前两段光纤的 DGD 优化, 使得补偿范围内的故障概率尽可能小, 优化值均取为 12ps.

P 内任意旋转时, $a \times b$ 与 c 所有可能的取值区域, 其中负值表示反向. 从图 4 可以看出, 用于补偿 PCD 的 $a \times b$ 范围在 -144 到 $+144 \text{ps}^2$ 之间, 用于补偿 PSP 旋转率的范围在 -22 到 $+22 \text{ps}$ 之间. 当 c 在 -17 到 $+17 \text{ps}$ 之间取值时, $a \times b$ 与 c 的大小和方向都不相关, 因此在这个区域内可以灵活的补偿. 这种工作方式对 PSP 旋转率的补偿量比第一种工作方式略小, 但却可以补偿 PCD 和 PSP 旋转率都比较大的情况, 因此可以进一步提高补偿器的性能. 这种工作方式不利的一面是当 $\tau_{1\omega}$ 比较大而 $\hat{q}_{1\omega}$ 方向的分量很小时, 会引入一个去偏振矢量 $d \times (\tau_1 \hat{q}_1)$, 因此对补偿器前两段光纤 DGD 的取值也有一定的限制.

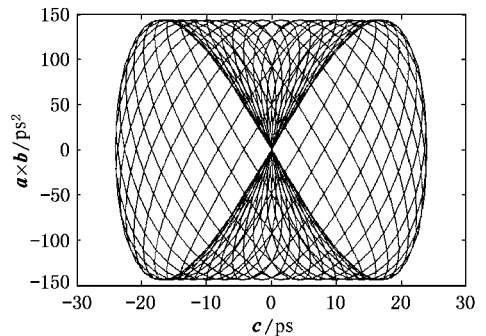


图 4 $a \times b$ 与 c 的关系

图 4 中网格区域表示的是当矢量 a 和 b 在平面

3. 三阶段补偿器的性能

三阶段补偿器主要是针对两阶段补偿器不能够补偿 PCD 的缺点提出来的,因此对两阶段补偿器和三阶段补偿器在系统中的性能进行比较,其中三阶段补偿器限制在上面所提的两种工作方式下工作.首先选平均 DGD 值比较大的情况,例如对 $40\text{Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 的系统选平均 DGD 等于 20ps 作比较,分别用两阶段补偿器和三阶段补偿器补偿,依据 2.3 节对工作方式 2 第一段补偿光纤的优化原则,对两阶段补偿器的第一段补偿光纤及三阶段补偿器的前两段补偿光纤的 DGD 进行优化,分别取为 $20, 12, 12\text{ps}$, 结果如图 5 所示,图 5 中每个符号表示一种模拟器的状态(包括 DGD, PCD 及 PSP 旋转率三个量),在这种状态下误码率超过 10^{-12} ,把这个状态记作一个误码样点.图 5 中没有颜色填充的符号是两阶段补偿的结果,有颜色填充的是三阶段的补偿结果,这其中尺寸较大的标记表示对于不同的输入偏振态,二分之一以上发生误码的样点.从图 5 中看出:1) 对两阶段补偿,误码可能发生在 DGD 大的情况,也可能发生在 DGD 小的情况.对 DGD 大的样点,其 PCD 和 PSP 旋转率比较小,主要集中在 PCD 在 $\pm 100\text{ps}^2$ 之间, PSP 旋转率在 $0-10\text{ps}$ 之间的区域;DGD 小的样点则相反,分散在 PCD 和 PSP 旋转率较大的区域.2) 与两阶段补偿器相比较,三阶段补偿器补偿后有误码的样点减少很多,表明其相对于两阶段补偿器的有效性.在三阶段补偿的结果中,误码主要发生在那些 DGD, PCD 及 PSP 旋转率三者组合值大的情况,其中就包括那些 DGD 小而 PCD 或者 PSP 旋转率非常大的样点,如图 5 中的“ \times ”标记.另外,经过三阶段补偿后,PCD 在 $\pm 100\text{ps}^2$ 之间, PSP 旋转率在 $0-10\text{ps}$ 之间的区域内几乎没有误码样点,表明三阶段补偿器对该区域的样点尤为有效.

上面分析了经过两阶段和三阶段补偿后误码样点的状态特性,比较了两种补偿器的性能,下面将以系统故障概率为指标,比较不同的 PMD 补偿器对系统性能的影响.

数值模拟模型采用 10^3 根统计独立的光纤样本,每根光纤 10 个输入偏振态,均匀分布在邦加球的赤道上,共 10^4 个样本点.图 6 表示在 2dB 功率余量条件下,一阶可变补偿,两阶段补偿和三阶段补偿三种不同补偿器故障概率的比较结果.其中 DGD_i (i

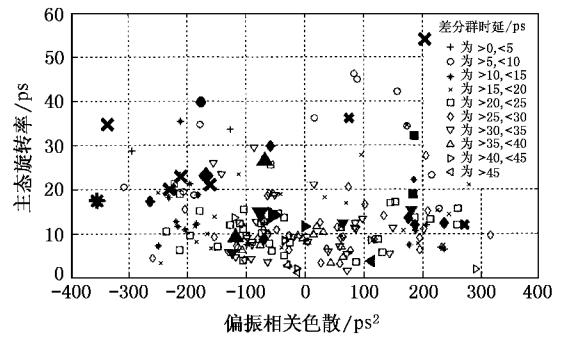


图 5 两阶段补偿和三阶段补偿后的误码样点

$= 1, 2$) 表示第 i 段补偿光纤的 DGD. 实线是以频率分量强度作为 PMD 补偿器反馈信号的结果,三阶段补偿器中的虚线表示限制在上面所提的两种工作方式下的故障概率.可以看出,如果以故障概率等于 10^{-3} 为最大 PMD 容限,两阶段补偿中可容忍的最大 PMD 值约为 14.5ps ,占比特时隙的 58% ,三阶段补偿中的最大值约为 18.8ps ,占比特时隙的 75% ,比两阶段补偿提高了 17% ,有效地提高了系统的 PMD 容限.另外,三阶段补偿的实线和虚线在平均 DGD 较小时几乎完全重合,随平均 DGD 值的增大稍有分开,表明补偿器主要以这两种工作方式工作.

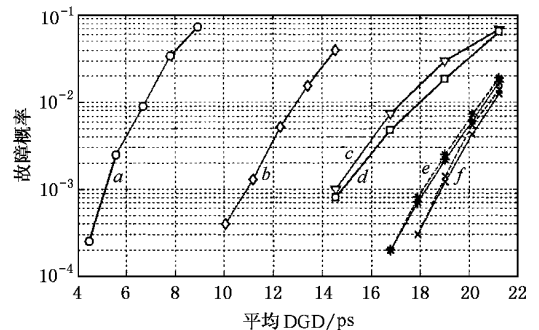


图 6 不同补偿器的故障概率. 曲线 a 为无补偿; b 为一阶补偿; c 为两阶段补偿 $\text{DGD}_1 = 24\text{ps}$; d 为两阶段补偿 $\text{DGD}_1 = 20\text{ps}$; e 为三阶段补偿 $\text{DGD}_{1,2} = 10\text{ps}$; f 为三阶段补偿 $\text{DGD}_{1,2} = 12\text{ps}$

4. 结 论

本文分析了 PCD 对系统性能影响,指出当 PCD 大于某一个值时必须对 PCD 进行补偿,针对这个问题提出了两段固定 DGD 加一段可变 DGD 的 PMD 补偿方案,从理论上分析了这种补偿器既能够补偿二阶 PMD 中的 PSP 旋转率分量,同时也能补偿 PCD 分量,并且给出了能够同时补偿的范围,提出了这种

PMD 补偿器可能存在的两种工作方式 , 数值结果表明补偿器主要按照这两种方式工作 . 数值比较了一阶可变补偿器、两阶段补偿器和三阶段补偿器的性

能 . 结果表明三阶段补偿器在不明显增加系统复杂性的基础上有效的提高了系统的 PMD 容限 .

- [1] Foschini G J , Nelson L E , Jopson R M *et al* 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 293
- [2] Ono T , Yamazaki S , Shimizu H *et al* 1994 *J. Lightwave Technol.* **12** 891
- [3] Pua H Y , Peddanarappagari K , Zhu B Y *et al* 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 832
- [4] Karlsson M , Xie C , Sunnerud H and Andrekson P A 2001 *Optical Fiber Communication Conference MO1-1*
- [5] Yu Q , Yan L S , Xie Y , *et al* 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 863
- [6] Noe R , Sandel D , Dierolf M Y *et al* 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 1602
- [7] Poole C D 1988 *Opt. Lett.* **13** 687
- [8] Zheng Y , Liu Y M , Yang B J and Zhang X G 2002 *Chin. J. Lasers A* , to be published (in Chinese)
- [9] Forestieri E and Vincetti L 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 1898
- [10] Gordon J P and Kogelnik H 2000 *Proc. Nat. Acad. Sci.* **97** 4541
- [11] Penninckx D and Bruyère F 1998 *Optical Fiber Communication Conference* p340

Three-stage polarization mode dispersion compensator capable of compensating second-order polarization mode dispersion *

Zheng Yuan Yu Li Yang Bo-Jun Zhang Xiao-Guang

(Department of Physics , School of Science , Beijing University of Posts and Telecommunications , 123 # , Beijing 100876 , China)

(Received 7 March 2002 ; revised manuscript received 10 April 2002)

Abstract

The impacts of polarization-dependent dispersion on systems are investigated briefly , based on which we propose a three-stage higher-order polarization mode dispersion(PMD) compensation scheme. Theoretical analysis shows that it is capable of compensating polarization-dependent dispersion and principal states of polarization rotation rate at the same time. The two possible operating points of this compensator are proposed. Numerical results show that the maximum tolerable PMD value after three-stage compensation has been improved by 17% per bit-slot than that using two-stage compensator.

Keywords : optical communications , optical polarization , optical dispersion in fibers

PACC : 4230Q , 4225J , 4281D

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60072042) and by the National High Technology Development Program of China(Grant No. 2001AA122041) and by the Doctorale Foundation of the State Education Ministry of China , and by the Beijing University of Posts and Telecommunications-Shi Wei Tong Joint Laboratory of Optical communication Devices.