

偏振模色散自适应补偿系统对调制码型的适应性分析

王少康 席丽霞 方光青 赵鑫媛 张晓光

(北京邮电大学理学院光通信与光波技术教育部重点实验室 北京 100876)

摘要 偏振模色散(PMD)的自适应补偿已经得到了比较深入的研究。在实验中采用偏振度作为取样反馈信号,粒子群优化算法(PSO)作为反馈控制算法,比较了偏振模色散自适应补偿系统对于不同码型的补偿效果。结果表明,传输信号质量严重恶化的情况下,补偿之后,对于不同的传输码型,接收信号的误码率都可以达到一般光纤通信系统的基本要求(10^{-9}),说明了 PMD 自适应补偿系统对于各种调制码型都具有良好的补偿效果,还可以看出, NRZ 码相对于其他码型有较高的功率代价,而 RZ50 码型在补偿系统中的接收性能最佳。

关键词 光纤通信;PMD 自适应补偿;调制码型;适应性;功率代价

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s2.0201

Analysis on the Adaptability of Polarization Mode Dispersion Adaptive Compensation System on Different Modulation Formats

Wang Shaokang Xi Lixia Fang Guangqing Zhao Xinyuan Zhang Xiaoguang

(Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education,
School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract The adaptive compensation method of polarization mode dispersion (PMD) has been studied in depth. Degree of polarization was sampled as the feedback signal and particle swarm optimization (PSO) algorithm was applied as the feedback control method in the adaptive compensation system. The effect of the compensation system upon signals of different modulation formats was examined and carried into comparison experimentally. The quality of the transmission signal being severely deteriorated, signals of different modulation formats were compensated productively with bit error ratio (BER) improved enough to satisfy the demand of optical communication systems (10^{-9}). Thus the insensibility of the productiveness of PMD adaptive compensation system towards signals of different modulation formats was experimentally proved. Besides, the NRZ possess a certain power penalty over each other modulation format, while the receiving performance of signal of RZ50 was the best.

Key words optical fiber communication; PMD adaptive compensation; modulation format; adaptability; power penalty

1 引 言

近年来,偏振模色散(PMD)对高速光纤通信系统传输的限制作用得到了人们的重视。高速光纤通信系统中的偏振模色散补偿问题的解决方案,在最近几年得到了较为深入的研究^[1,2]。PMD 补偿技术是在电域(电补偿)或者光域(光补偿)对由于 PMD 形变的信号进行补偿校正。其中电补偿技术一般用于小于 10 Gb/s 的系统中。对于 40 Gb/s 及以上码率的系统,一般应考虑 PMD 的光域自适应补偿方

案^[1]。以前的 PMD 补偿系统的实验研究一般以观察信号的眼图作为系统补偿效果的评判标准,较少关心能够直接反应系统性能的误码率测量结果;并且以前的补偿器多数只适用于补偿某一种调制码型,对于同一个补偿器用于多种调制码型传输系统较为少见;本实验以偏振度(DOP)作为监控链路的反馈信号取样,采用粒子群优化算法(PSO)作为补偿单元的反馈控制算法,对不同码型光信号的偏振模色散的效果进行了误码率评价。结果发现,对于

基金项目:北京市共建基金(XK100130737)资助项目。

作者简介:王少康(1984—),男,硕士研究生,主要从事光纤传输特性方面的研究。E-mail: smartrat@yahoo.com.cn

导师简介:席丽霞(1973—),女,博士,副教授,主要从事高速光纤通信系统方面的研究。E-mail: xilixia@263.net

不同的传输码型补偿效果存在一定差异。

2 理论分析及实验装置

2.1 理论基础

2.1.1 差分群时延(DGD)的概念

光线中的偏振模色散可用偏振模色散矢量 $\boldsymbol{\tau}$ 来表示,将其用泰勒级数展开为

$$\boldsymbol{\tau}(\omega_0 + \Delta\omega) = \boldsymbol{\tau}(\omega_0) + \boldsymbol{\tau}'_{\omega}(\omega_0)\Delta\omega + \dots, \quad (1)$$

在一阶近似下,即假定输出偏振态与频率无关的条件下,(1)式退化为

$$\boldsymbol{\tau}(\omega) = \boldsymbol{\tau}(\omega_0) = \Delta\boldsymbol{\tau}\boldsymbol{p}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\boldsymbol{\tau}$ 代表在光纤的两个双折射方向(快慢轴)上的差分群时延(DGD)。 \boldsymbol{p} 为光纤偏振主态的慢轴在 STOKES 空间的单位矢量^[3]。可以看出,在只考虑一阶偏振模色散的情况下,DGD 成为决定光纤偏振模色散大小的决定因素。

2.1.2 偏振度(DOP)

光的偏振度可以用来表示整个强度中的完全偏振光的比例。单频率下的 DOP 的定义式为

$$\text{DOP} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0}, \quad (3)$$

(3)式中, (s_0, s_1, s_2, s_3) 分别是 STOKES 空间的四个分量。由于 STOKES 矢量都是光强信号,光强是能量的时间平均量,因此偏振度与光信号码速率无关。信号脉冲的 DOP 可以通过信号频谱上各个频率分量的 DOP 对功率谱加权平均得到^[4]。

信道中,信号由于偏振模色散的积累,信号质量被严重恶化,表现为 DGD 的增大和 DOP 的减小,以致接收信号误码率达到 0.5;加补偿后,通过一定的反馈控制算法,使补偿器在光域自动产生一个补偿变换矩阵,即可消除之前的偏振模色散积累,从而达到对 PMD 进行补偿,还原信号质量的目的。

2.2 实验装置

实验系统的结构示意图如图 1 所示。

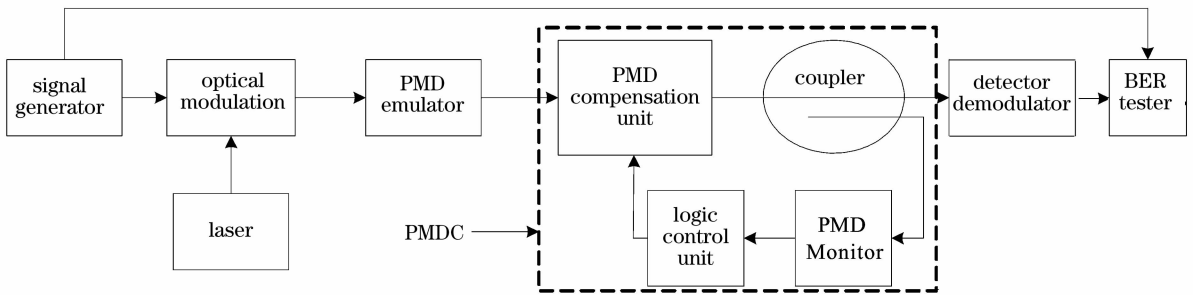


图 1 实验装置框图

Fig. 1 Block diagram of experiment setup

对于信号的码型调制部分^[5],在光源上采用了 1552.122 nm 的连续波(CW)激光光源,并使用 10 Gb/s 的电信号对光信号进行 OOK 码型和 DPSK 码型调制^[6]。通过在光强度调制器上加载不同的偏置电压以及不同频率的时钟信号,可以得到不同占空比的码型^[6]。

实验所采用的 PMD 自适应补偿器(PMDC)由三部分组成:其中 PMD 补偿单元用来补偿光纤链路中的偏振模色散;PMD 监控信号提取单元用来监控和提取光纤链路中偏振模色散的变化,并将 DOP 作为反馈信号提供给逻辑控制单元;逻辑控制单元根据提取的 PMD 反馈信号,通过搜索跟踪算法来计算补偿量,通过 D/A 电路将相应的控制电压输出给补偿单元,达到自适应补偿的目的。

PMD 的一阶段补偿单元示意图如图 2 所示:

PC 为偏振控制器,本实验中采用的 PC 可由外部三路输入电压控制传输光的偏振状态。 $\Delta\tau$ 为时延

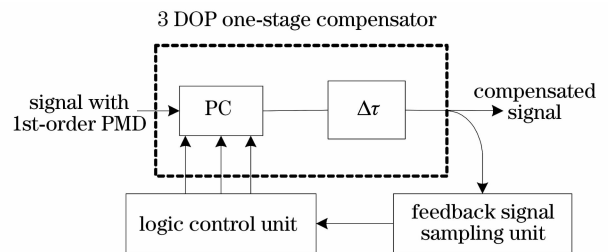


图 2 一阶段补偿器

Fig. 2 One-stage PMD compensator

线,目的是为了补偿内部光信号的 DGD 大小。本实验中采用的时延线是固定时延线。

在反馈信号的选取方面,一般要服从以下原则:1)结构简单;2)费用低廉;3)响应时间短。4)监测到的信号与链路中的 PMD 高度相关;5)较高的灵敏度;6)较宽的 PMD 监测范围,其差分群时延的监测范围至少达到一个周期。本实验采用链路中的 DOP 作为 PMD 反馈信号,能够基本符合以上原则^[7]。

在逻辑控制单元中采用的自适应补偿算法是PMD补偿能够顺利完成的核​​心。在本实验中,采用的算法是粒子群优化算法(PSO)。进行适当的参数设定后,这种算法能够有效地搜索到最大的DOP值,具有良好的全局搜索和抗噪声能力^[4,7]。

实验中采用Anritsu公司的MP1763C/MP1764C脉冲发生器/误码检测仪来测试补偿系统的性能。脉冲发生器产生10 Gb/s的电信号对连续光载波进行调制,经由链路传输的光信号返回误码仪进行误码测量,对补偿效果做出评估。

3 实验结果分析

对几种不同码型的DOP-DGD曲线进行了实验测定,并对所测得的数据进行滤波处理。所得的曲线如图3所示。

在理论上,输出光信号的DOP随着偏振模色散的增加而减小,图3的实验结果可以基本证实这一点。随着DGD偏离0点,DOP的值逐渐降低。比较这几组曲线,可以看出,对于强度调制OOK信号,RZ67的DOP-DGD的变化最为显著,NRZ码型的DOP对于DGD的变化不如其他码型敏感,这就使其在补偿搜索算法中,寻找到DOP最优值,速度

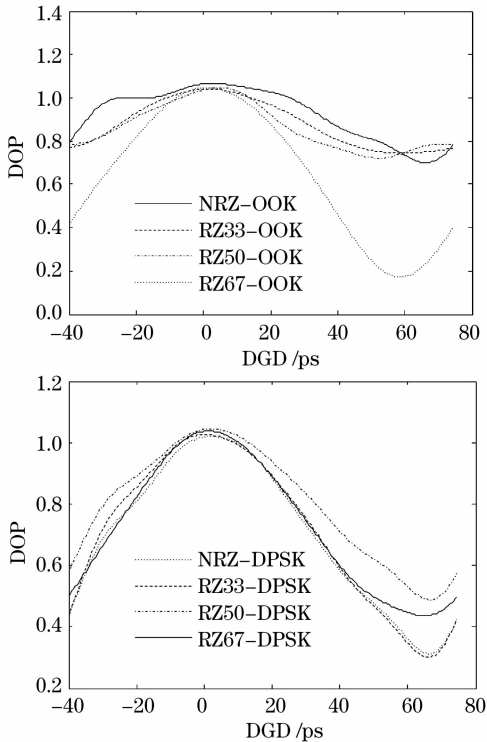


图3 不同码型信号的DOP-DGD图

Fig. 3 Variation of DOP by DGD of signal with different modulation formats

和准确性上没有任何优势。而DPSK信号中,几种码型的变化灵敏度差别不大,但可以明显看出,DOP-DGD变化关系与信号码型有关。

从实验结果,还注意到DOP的值在DGD增加到一定大小后会出现增大的情况(如曲线的末端),这是因为码元长度远小于激光器的相干长度,DGD增大到一定程度,造成了相邻码元两个偏振态的叠加。可以证明,只有当DGD=0的时候,反馈信号的DOP=1,在大DGD情况下不会有第二点DOP=1,因此这个凸起是DOP局部极值,PSO搜索算法可以避免陷入局部极值。

光通信技术中,误码率(BER-bit error rate)能够直接反应传输系统的好坏。在本实验中,采用系统的误码率来对最终的补偿效果进行比较。由于考虑到相位调制器的偏振敏感特性和光接收机的灵敏度等因素,系统的相应位置会加上偏振旋转器、EDFA、滤波器和功率衰减器等器件,以对输入到光接收机的光强进行调节。

据此,在得到不同信号功率下,各种码型信号的误码率随光接收机的输入功率变化曲线,如图4所示。

在补偿前,系统处于最坏误码率情况(BER=0.5)。从图4看出,进行偏振模色散补偿后,系统的误码率均能够在一定接收功率条件下达到一般通信

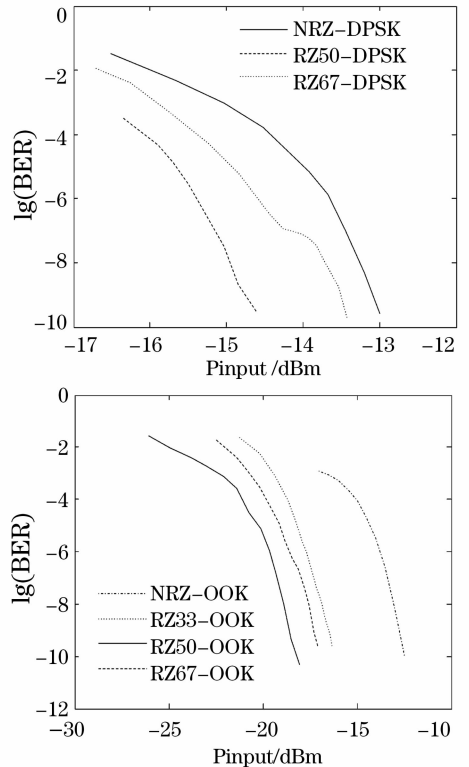


图4 不同码型信号的误码率曲线

Fig. 4 BER of signal with different modulation formats

系统的要求(10^{-9}),这说明了实验在一定程度上佐证了本补偿系统的性能。

不论是 OOK 还是 DPSK 格式,在系统误码率相同的条件下,NRZ 码所需的输入功率较 RZ 各种码型较大,并且通过比较,发现在 NRZ-OOK 格式

下,NRZ 的所需输入功率最大。这就表明 NRZ-OOK 码在对补偿系统性能的适应性上要差于其他码型。而 RZ50 码型信号的补偿性能是最好的。在 BER= 10^{-9} 情况下,相对于 NRZ 码,其他各种码型的功率代价如表 1 所示(单位 dBm):

表 1 各种码型的功率代价比较

Table 1 Comparison of the power penalty of each modulation format

	NRZ-DPSK	RZ33-DPSK	RZ50-DPSK	NRZ-OOK	RZ33-OOK	RZ50-OOK	RZ67-OOK
Received power	-13.0740	-13.4685	-14.7698	-12.8225	-16.4868	-18.6155	-17.3196
Power penalty	0	-0.3945	-1.6958	0	-4.0455	-5.7930	-4.4971

通过本实验中 DOP-DGD 测量结果和补偿效果的比较可以发现,NRZ 码型与其它码型相比,对 PMD 的自适应补偿系统的适应效果也劣于其他码型。在相同的误码率要求下,不管是 OOK 还是 DPSK 码型,NRZ 码型信号所需的接收机输入光功率要明显高于其他调制码型的输入光功率。而 RZ50 码型所需的输入光功率最小,因此对 PMD 补偿系统的适应性是比较好的。另外,由于本系统的补偿方案对码速率无关,所以实验结果对于更高速率的系统仍然适用。

4 结 论

当前的商用光纤通信系统正面临着从 10Gb/s 向 40Gb/s 及更高的速率升级。如果在已铺设光纤链路中对系统进行速率升级,那么偏振模色散的补偿问题将必须加以考虑。选择对 PMD 抵抗性能更强,以及系统补偿效果更好的码型是缓解 PMD 的重要因素。本实验证明了在 10Gb/s 系统中广泛适用的 NRZ 码型,对 PMD 的容忍性能较差,也证明了 RZ50-DPSK 码型对于 PMD 良好的抵抗性能,这为解决 PMD 补偿中的码型选择提供了重要依据。

参 考 文 献

- 1 Axel Klekamp, Bernd Franz, Henning Bülow. Benefit by combination of optical PMD compensation and adaptive receiver on PMD tolerance for 43 Gb/s DPSK [J]. *Proceedings of OFC* 2008, paper OWT6
- 2 Xiaoguang Zhang, Li Yu *et al.*. Adaptive PMD compensation using PSO algorithm [J]. *Proceedings of OFC* 2004, paper Thf 1
- 3 Ivan P. Kaminow, Tingye Li. Optical Fiber Telecommunications IV - B: Systems and Impairments [M]. Lu Yang, Li Hanguo, etc. Transl. Beijing: Bupt Press, 2006, 557~581
甘民乐,厉鼎毅. 光纤通信. 卷 B. 系统和损伤篇[M]. 陆洋,李汉国等译. 北京:北京邮电大学出版社,2006, 557~581
- 4 Wei Xu. The Study of Modulation Techniques and Polarization Mode Dispersion Compensation Techniques in High-speed Optical Fiber Communications [D]. Beijing: Beijing Univ. of Posts and Telecommunications, 2008; 52~55
许 玮. 高速光纤通信系统中码型调制技术与偏振模色散补偿技术的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2008; 52~55
- 5 Chris Xu, Xiang Liu. Differential phase-shift keying for high spectral efficiency optical transmissions[J]. *Quan. Electron.*, 2004, **10**(1): 281-293
- 6 Kun Xu, Guangtao Zhou, Jian Wu *et al.*. Comparison of high speed optical modulation formats using optical waveguide modulators [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2004, **27**(4): 50~54
徐 坤,周光涛,伍 剑待等. 基于光波导调制器高速光码型调制技术的比较[J]. 北京邮电大学学报, 2004, **27**(4): 50~54
- 7 Xiaoguang Zhang. Research on Adaptive Compensation System for Polarization Mode Dispersion[D]. Beijing: Beijing Univ. of Posts and Telecommunications, 2004, 51~55
张晓光. 光纤偏振模色散自适应补偿系统的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2004. 51~55