

利用两段 PMF 的 PMD 补偿法

毛兵成, 李朝阳, 赵荣华

(北京邮电大学 光通信中心 北京 100876)

摘 要: 提出了利用两段保偏光纤补偿偏振模色散的补偿方案, 该方案能够提供足够的带宽, 实现密集波分复用系统的多路同时补偿。该系统能够补偿差分群时延可变的光纤的一阶偏振模色散, 并且对高阶偏振模色散有一定的抑制作用。

关键词: 偏振模色散; 补偿; 密集波分复用

中图分类号: O436.3 **文献标识码:** A

PMD Compensation Using Two Segments of PMFs

MAO Bing-cheng, LI Zhao-yang, ZHAO Rong-hua

(Optical Communication Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A polarization mode dispersion compensation method using two segments of PMFs is proposed for the first time. This method can provide sufficient bandwidth to compensate simultaneously PMD in DWDM system of all wavelength on the first order. It is found that this method can suppress second-order PMD effectively.

Key words: PMD; compensation; DWDM

1 引言

偏振模色散(PMD)的补偿是目前国际上的重点研究课题。现在, 大部分研究工作集中在对偏振模色散的一阶补偿上^[1~3], 要补偿高阶偏振模色散, 理想的补偿器由很多短的保偏光纤(PMF)或者其他双折射体, 通过偏振控制器连接而成。通过调节偏振控制器, 使沿着补偿器传输的偏振变化过程与沿着传输光纤的偏振变化过程是镜像对称的。这种方案的优点是可以补偿所有阶次的偏振模色散, 但是其结构复杂, 造价昂贵, 缺乏实用价值^[4]。另一方面, 鉴于密集波分复用系统在当前及未来传输系统中的主导地位, 研究如何同时补偿多路的偏振模色散, 即利用一套补偿器补偿多个波长的偏振模色散, 无疑具有重要的意义。

利用一段保偏光纤补偿一阶 PMD, 可以工作在两种补偿机制下, 一种是调节偏振控制器(PC)使光脉冲经过光纤传输后, 沿着较快的出射主偏振态的光脉冲在保偏光纤中沿其慢轴传输, 而沿着较慢的出射主偏振态的光脉冲在保偏光纤中沿其快轴传输, 通过保偏光纤的快轴和慢轴的传输时延差来补偿传输光纤的差分群时延。这种补偿机制的缺点是只有在一定的频率和温度下, 传输光纤的差分群时延和保偏光纤的快慢轴的传输时延差相当时, 才能实现充分补偿, 若在传输光纤的差分群时延随频率或者温度的变化而变化后, 就会出现欠补偿或者过补偿的情况。如图 1 所示, 传输光纤的偏振模色散矢量为 Ω , 保偏光纤的等价偏振模色散矢量为 Ω_1 , 两矢量的幅度不总是相等, 有可能出现欠补偿或者过补偿的情况, 只有在特定频率下, 两矢量的幅度相等时, 才使一阶 PMD 得到完全补偿。

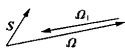


图 1 补偿机制一(欠补偿时的情况)

Fig.1 Compensation method I(under-compensation)

另一种补偿机制是调节偏振控制器使整段光纤(包括传输光纤和作为补偿光纤的保偏光纤)的入射 PSP(主偏振态)与入射光脉冲的 SOP(偏振态)重合^[5],只要补偿光纤的差分群时延大于传输光纤引入的差分群时延,就可以达到这个目的。这样也消除了一阶 PMD 的影响,而且因为工作在主偏振态,在主偏振态带宽范围内的频率范围可以同时得到一阶补偿。这种补偿机制下,整段光纤的总差分群时延是不为零的,而且有可能较大,光纤的主偏振态带宽是与其差分群时延成反比的,主偏振态带宽一般与差分群时延有如下关系^[6]

$$B_{\text{PSP}} = 0.8(E[\Delta\tau]) \tag{1}$$

式中, $\Delta\tau$ 为差分群时延。在这种机制下,主偏振态带宽是很有限的。如图 2 所示, Ω 和 Ω_1 两矢量的幅度不总是相等,调节偏振控制器,使得入射偏振态 S 与经过补偿的总的光纤的偏振模色散矢量 $\Omega - \Omega_1$ 重合,实现一阶补偿。但是由于此时总的光纤的差分群时延 $\Delta\tau = |\Omega - \Omega_1|$ 不为零,而且可能比较大,所以补偿后光纤的主偏振态带宽 B_{PSP} 很有限。

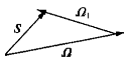


图 2 补偿机制二

Fig.2 Compensation method 2

在密集波分复用系统(DWDM)中,一般存在 8 路,16 路或者更多的光波长同时传输,每路的谱宽很窄,路与路之间的间距为 0.4 nm 或者 0.8 nm,如果要对这么多路同时补偿其一阶 PMD,就必须工作在主偏振态下,并且主偏振态带宽要足够宽,大于复用系统使用的总带宽,还要求补偿后的总的光纤的差分群时延非常小。采用一段 PMF 的补偿,在两种补偿机制下都难以实现充分的补偿,而采用大量保偏光纤和偏振片的全阶 PMD 补偿,也不是理想的可选方案。

这里提出一种利用两段 PMF 来实现一阶 PMD 补偿的方案,它能够最大限度地减小整个系统的总的差分群时延,保证了足够大的主偏振态带宽,因而可以实现 DWDM 的一阶 PMD 的多路同时补偿。同时该补偿系统能够对差分群时延可变的传输光纤进

行动态补偿。理论分析还表明,系统总的差分群时延足够小,对高阶偏振模色散有一定的抑制作用。

2 原理

两段 PMF 的补偿,同样是调节偏振控制器使整段光纤(包括传输光纤和作为补偿光纤的保偏光纤)的入射 PSP 与入射光脉冲的 SOP 重合,但同时使整段光纤总的差分群时延很小,一阶近似的理想情况下为零,这样,主偏振态带宽 B_{PSP} 非常大,足以满足多路同时补偿其一阶 PMD。如图 3 所示,传输光纤的偏振模色散矢量为 Ω ,两段保偏光纤的等价偏振模色散矢量分别为 Ω_1 和 Ω_2 ,调节偏振控制器,使这三个矢量之和接近于零,因为偏振控制器可以任意调节偏振模色散矢量的方向,所以,只要满足 $|\Omega_1| + |\Omega_2| \geq |\Omega|$,就可以使三者的矢量和接近于零。这样,即使传输光纤在条件改变从而差分群时延也发生变化时,也能够很快调节偏振控制器从而达到新的完全补偿状态,使总的光纤的偏振模色散矢量接近于零,由于主偏振态带宽 $B_{\text{PSP}} = 0.8(E[\Delta\tau])$ 此时 B_{PSP} 非常大。可见,由于增加了一段保偏光纤,对于差分群时延小于 $|\Omega_1| + |\Omega_2|$ 的光纤都能补偿其一阶 PMD,即它能够补偿差分群时延从零到 $|\Omega_1| + |\Omega_2|$ 的任意大小的光纤的一阶 PMD。

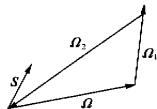


图 3 两段 PMF 补偿

Fig.3 Two segment PMFs compensation

其实现方案如图 4 所示。复用各路通过复用器(MUX)复用进一光纤,从接收机的反馈信号控制偏振控制器,从而达到补偿一阶偏振模色散的目的。

对于距离为 1 000 km 的传输光纤,若其平均偏振模色散系数为 0.2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$,则未补偿时线路的 PMD 约为 7 ps(不考虑高阶的影响),当实现了两段 PMF 补偿之后,线路的残余差分群时延仅仅取决于系统的精度,比如补偿后 PMD 约为 0.1 ps,与补偿前相比,主偏振态带宽增加了约 70 倍,在忽略高阶 PMD 影响的情况下,达到 8 000 GHz,因此可以对其一阶 PMD 实现多路同时补偿。而且系统具有一定的自适应性和灵活性,当外界条件导致传输光纤的差分群时延变化时,可以通过调节偏振控制器重新恢复到最佳补偿状态,即线路总差分群时延最小的

状态。

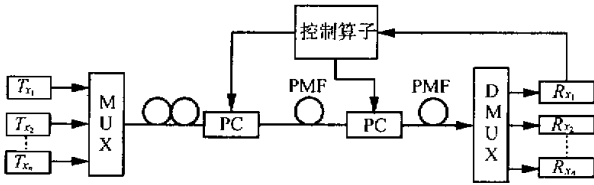


图 4 补偿实现方案

Fig.4 Implementation of compensation

3 高阶 PMD 的影响分析

本方案不能补偿高阶偏振模色散,而当复用的路数很多时,整个系统的谱宽很宽,这时,有必要考虑高阶偏振模色散的影响。在这里只考虑二阶偏振模色散的作用,而且忽略其去偏振效果。

经过一段光纤的输出脉冲可以描述为^[6]

$$E_b(t) = c_+ E_+(t) + c_- E_-(t) \tag{2}$$

式中 $c_{\pm} = \epsilon_a \cdot \epsilon_{a\pm}^*(\omega_0)$ 为光脉冲沿其两偏振方向的分量的单位强度, $E_{\pm}(t)$ 为光脉冲沿其偏振方向的分量, $E_b(t)$ 为输出光脉冲。

$$E_{\pm}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_a(\omega) e^{i\omega t} \epsilon_{b\pm}(\omega_0) \exp\left[i\phi_{b\pm}(\omega_0) + i\phi'_{b\pm}(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{i\phi''_{b\pm}(\omega_0)}{2}(\omega - \omega_0)^2\right] d\omega \tag{3}$$

式中 ω 为光频, ω_0 为输入场的中心频率, $\epsilon_{a\pm}$ 与 $\epsilon_{b\pm}$ 分别为入射和出射 PSP, ϵ_a 为入射脉冲的偏振态, $E_a(\omega)$ 为入射脉冲波形的傅里叶变换, $\phi_{b\pm}$ 为出射场相位的变化。 $\phi'_{b\pm} = \phi'_{\pm} \pm \Delta\tau(\omega)/2$, $\phi''_{b\pm} = \phi''_{\pm} \pm \Delta\tau'(\omega)/2$ 。其中, $\phi_{\pm}(\omega)$ 为光纤的平均传输时延,当对色度色散和一阶偏振模色散补偿后, $\phi_{b\pm}(\omega_0) \approx \phi_{\pm}(\omega_0)$, $\phi'_{b\pm}(\omega_0) \approx \phi'_{\pm}(\omega_0)$, $\phi''_{b\pm}(\omega_0) = \pm \Delta\tau'(\omega_0)/2$ 。此时式(3)成为

$$E_{\pm}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_a e^{i\omega t} \epsilon_{b\pm}(\omega_0) \exp\left[i\phi_{\pm}(\omega_0) + i\phi'_{\pm}(\omega_0)\Delta\omega \pm \frac{i\Delta\tau'(\omega_0)}{4}(\Delta\omega)^2\right] d\omega$$

由此可见,影响两输出偏振态的时延差的项主要为 $\pm \frac{i\Delta\tau'}{4}(\Delta\omega)^2$, $\Delta\omega$ 越大,同时补偿的路数越多,二阶 PMD 的影响越大。 $\Delta\tau'(\omega)$ 反映了光纤的固有模式色散,从 $E[\Delta\tau'^2]/E[\Delta\tau^2] \approx 1/3$ 可知^[7] $\Delta\tau'(\omega)$ 随着 $\Delta\tau$ 的增大而增大,当 $\Delta\tau$ 被补偿得相当小时, $\Delta\tau'(\omega)$ 也较小,所以 $\pm \frac{i\Delta\tau'}{4}(\Delta\omega)^2$ 项带来的影响,即二阶偏振模色散的影响与 $\Delta\omega$ 的平方成正比,与 $\Delta\tau$

也成正比关系。所以在 $\Delta\omega$ 一定的情况下,减小 $\Delta\tau$,二阶偏振模色散的影响也相应地减小了。

以上分析表明,减小整个线路的差分群时延,不但增加了主偏振态带宽,而且抑制了二阶偏振模色散。因此充分减小线路的差分群时延具有重要意义。研究表明^[8],在 $\Delta\tau$ 很小的情况下,可利用的主偏振态带宽可达 8 000 GHz 以上,基本上满足了密集波分复用多路同时补偿偏振模色散的带宽要求。

4 结论

本文提出了一种利用两段保偏光纤补偿一阶偏振模色散的方案,该方案具有以下优点 (1)能够补偿差分群时延可变的光纤的一阶偏振模色散,具有一定的灵活性 (2)可以做最优化补偿,使得残余偏振模色散尽可能的小,高阶偏振模色散的影响也受到抑制 (3)补偿后主偏振态带宽足够宽,以满足密集波分复用系统中补偿偏振模色散的要求。

参考文献：

[1] Noe R, Sandel D. Polarization mode dispersion compensation at 20 Gbit/s with fiber-based distributed equalizer[J]. Electron. Lett., 1998, 34(25): 2 421 - 2 422.

[2] Ono T, Yamazaki S. Polarization control method for suppressing polarization mode dispersion influence in optic transmission system[J]. J. Lightwave Technol., 1994, 12(5): 891 - 898.

[3] Mahgerefteh D, Menyuk C R. Effect of first-order PMD compensation on the statistics of pulse broadening in a fiber with randomly varying birefringence[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1999, 11(3): 340 - 342.

[4] Noe R, Sandel D. Integrated optical LiNbO₃ distributed polarization mode dispersion compensation in 20 Gbit/s transmission system[J]. Electron. Lett., 1998, 34(8): 652 - 653.

(上接第 385 页)

- [5] Francia C , Bruyere F . Simple dynamic polarization mode dispersion compensator[J]. Electron. Lett. ,1999 ,35(5) :414 – 415 .
- [6] Poole C D , Giles C R . Polarization-dependent pulse compression and broadening due to polarization dispersion in dispersion-shift fibers[J]. Opt. Lett. ,1988 ,13(2) :155 – 157 .
- [7] Shtaif M , Mecozzi A . Mean-square magnitude of all orders of polarization mode dispersion and the relation with the bandwidth of the principal states[J]. IEEE Photon. Technol. Lett. ,2000 ,12(1) :53 – 55 .
- [8] Betti S , Curti F . Evolution of the bandwidths of the

principal states of polarization in singlemode fibers[J]. Opt. Lett. ,1991 ,16(7) :467 – 469 .

作者简介：

毛兵成(1975 –) ,男 ,湖北云梦人 现为硕士研究生 ,主要研究方向为偏振模色散及其补偿技术。

E-mail :facesunli@263 . net