

基于 PLC 的 PMD 补偿器中 PDL 效应的分析*

王磊 王斌 吴兴坤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

摘要 应用穆勒(Müller)矩阵对硅基平面光波导线路(Planar lightwave circuit PLC)补偿器中 PDL 对差分群时延(Differential group delay DGD)分布的影响进行了分析, 在不同的 PDL 值下对各种不同级次的 PLC 单元级联情况的 DGD 值分布进行了讨论, 并与 Maxwell 分布进行了比较, 得到了在特定 PDL 值情况下最为优化的 PLC 级次。

关键词 偏振模色散(PMD); 平面光波导线路(PLC); PMD 补偿器; 偏振相关损耗(PDL)

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

0 引言

在作为现代长途干线通讯主体的光纤通信中, 偏振模色散(Polarization-mode dispersion PMD)被认为是限制高速光通信系统传输容量和距离的最终因素^[1~4]。因此, 大容量长距离的光纤传输系统中必须要对 PMD 进行补偿。目前主要是以两种方式对 PMD 进行补偿: 在传输的光路上直接对光信号进行补偿或在光接收机内对电信号进行补偿^[5~7]。由于偏振相关损耗(Polarization-dependent loss PDL)对于器件的性能有着重大的影响, 所以在对于 PMD 补偿器进行测试和分析时, PDL 是需要考虑的重要因素^[8]。

本文着重介绍了 PDL 在一种新型的采用硅基平面光波导线路(Planar lightwave circuit PLC)^[9]的集成 PMD 补偿器中对补偿效应的影响。应用穆勒矩阵对在这类补偿器中 PDL 对差分群时延(Differential group delay DGD)分布的影响进行了分析, 并在不同的 PDL 值下对各种不同级次的 PLC 单元级联情况的 DGD 值分布进行了讨论, 得到了在特定 PDL 值的情况下最为优化的 PLC 级次。

1 基础理论模型

单模光纤的 PMD 分析标准模型可以认为是由若干段光纤级联而成, 其中每一段都传播两个相互独立的偏振模, 而两个偏振模的耦合仅仅在光纤各段的连接处发生^[10]。PDL 是由损耗系数 α_j 引入的, 定义为两个偏振模间的相关损耗

$$e^{2\alpha_j} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (1)$$

在琼斯矩阵算法中, 光纤传播的偏振态是由二维琼斯矩阵 Ψ 给出, 在 N 段光纤中, Ψ 的变迁递推公

式为

$$\Psi_{\text{out}}(\omega) \equiv T(\omega)\Psi_{\text{in}} = A_N T_N(\omega)\Psi_{\text{in}} \quad (2)$$

其中

$$A_N = \exp(-\alpha_0 - \sum_{j=1}^N \alpha_j / 2) \quad (3)$$

而 α_0 是与偏振无关的总损耗。这里假设 β_j 为第 j 段光纤的双折射率, 并且与波长无关, 那么 β_j 就等于两个偏振模之间的 DGD, 而变换矩阵 T 为

$$T_N(\omega) = \exp[-i\beta_N\omega + \alpha_N]\sigma/2 \cdot \exp[(-i\beta_2\omega + \alpha_2)\sigma/2] \quad (4)$$

α 为泡利矩阵

$$\alpha_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \alpha_y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}, \alpha_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{因}$$

此, $T_N(\omega)$ 描述的是偏振旋转以及强度的相对变化, 而 A_N 描述的是整体衰减(global attenuation), 该衰减对于偏振特性没有影响, 不再对其进行考虑。向量 β_j 和 α_j 的方向定义了第 j 段光纤中的偏振模, 通常可设向量 β_j 和 α_j 二者的方向是平行的。则对于第 j 段的偏振模方向, 可以用 \hat{e}_j 来表示。

$$-i\beta_j\omega + \alpha_j \equiv b_j \hat{e}_j \quad (5)$$

其中

$$b_j = -i\beta_j\omega + \alpha_j$$

由式(2)和式(4)可知, 即使 Ψ_{in} 与光波频率 ω 无关, 输出偏振态 $\Psi_{\text{out}}(\omega)$ 也同 ω 相关。主偏振态定义为在一阶情况下与光波频率无关的输出偏振态。在这种情况下, 琼斯向量 $\Psi_{\text{out}}(\omega)$ 满足式^[11]

$$\partial_\omega \Psi_{\text{out}}(\omega) = -i \frac{\chi}{2} \Psi_{\text{out}}(\omega) \quad (6)$$

当 $\alpha_j = 0$ 时, 即 PDL 不存在的情况下, χ 为实数并且等于 DGD。如果 PDL 存在: $\text{PDL} > 0$, 则 χ 为一复数, 实部等于 DGD, 虚部等于两主偏振态衰减之差的关于频率的导数。

从式(6)可知, $\Psi_{\text{out}}(\omega)$ 为矩阵 $(\partial_\omega T_N) T_N^{-1}$ 的特征向量。

$$\partial_\omega \Psi_{out}(\omega) = \partial_\omega T_N(\omega) \Psi_{in} = (\partial_\omega T_N) T_N^{-1} \Psi_{out}(\omega) \quad (7)$$

由式(4)可以得出 $(\partial_\omega T_N) T_N^{-1}$ 的递归式

$$(\partial_\omega T_N) T_N^{-1} = \frac{-i}{2} \beta_N \hat{e}_N \cdot \sigma + e^{b_N \hat{e}_N \cdot \sigma / 2} \cdot (\partial_\omega T_{N-1}) T_{N-1}^{-1} e^{-b_N \hat{e}_N \cdot \sigma / 2} \quad (8)$$

在起始状态下, 对于任意的 ω , $T_0 = I$ (单位阵), 因而有 $\partial_\omega T_0 = 0$; 进一步由于式(8)右边第一项的迹(Trace)为零, 所以 $\text{Tr}[(\partial_\omega T_N) T_N^{-1}] = 0$.

由于任何迹为零的 2×2 矩阵可用 Pauli 矩阵作为基来表示, 所以存在一个三个独立量的复数矩阵 Ω_N 将 $[(\partial_\omega T_N) T_N^{-1}]$ 用 Pauli 阵展开

$$(\partial_\omega T_N) T_N^{-1} = -\frac{i}{2} \Omega_N \cdot \sigma \quad (9)$$

当 $\alpha_j = 0$ 时, 即 PDL 不存在的纯 PMD 情况下, Ω_N 为实数, 称之为主偏振态方向(PSP), 而 Ω 的长度即 $|\Omega|$ 为 DGD. 如果传输线中存在 PDL, Ω 则为一复数. 在此情况下, Ω 与庞加莱球上的 PSP 和 GDG 有相当复杂的关系. 其中, 两个主偏振态方向 PSP 不相互垂直. 这可从式(9)看出: 当 Ω_N 为实数时, $\Omega_N \cdot \sigma$ 为厄密阵(因各 Pauli 阵为厄密)并有两个正交的本征矢. 当 Ω 为复数时, 这些特征不再存在.

通过式(8), (9)可以得到 Ω_N 的递推公式

$$\Omega_N = (\beta_N + \hat{e}_N \cdot \Omega_{N-1}) \hat{e}_N + \cosh b_N (\Omega_{N-1} - (\Omega_{N-1} \cdot \hat{e}_N) \hat{e}_N) - i \sinh b_N \Omega_{N-1} \times \hat{e}_N \quad (10)$$

2 PLC 补偿器构造模型

PLC 的 PMD 补偿器应用平面波导构成等效的四单元结构如图 1^[9]. 主要包括两个偏振分光器(PBS), 两个半波片(HWP), 两个电光移相器(PS1, PS2), 两个可调耦合器(TC1, TC2)和一个偏振相关延时线(PD). PBS 具有对称的马赫-泽德干涉计(MZI)结构, 其中一个通道具有应力无定形硅膜, 另一个通道有相位调节加热器. 可调耦合器也具有类似的使用加热器的对称式 MZI 结构^[12].

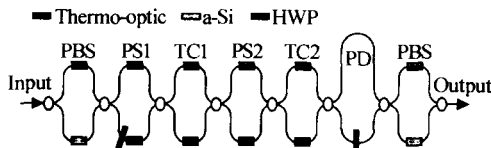


图 1 基于 PLC 的 PMD 补偿器结构
Fig. 1 Configuration of PLC-based PMD compensator

补偿器的等效图如图 2^[13]. PS1 与 PS2 分别相当于理论模型图 2 中的第一个和第三个压迫器(Squeezer), 与之对应, TC1 和 TC2 对应于第二和第四个压迫器. 通过 PS 与 TC 的组合使用能够在保证整个过程在无偏振失配的情况下, 使其中一个压迫器复位. 从而实现偏振控制系统的作用. PD

则相当于双折射光纤, 对于偏振时延进行补偿.

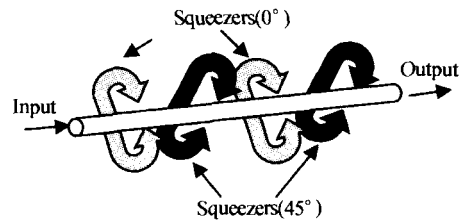


图 2 压力型偏振控制器示意图
Fig. 2 Schematic of a four fiber squeezer polarization controller

系统的工作过程如下: 信号进入补偿器后, 第一组 PBS 会将其分成横电波模(TE)和横磁波模(TM)两部分. 为了 TE 模和 TM 模两部分能够在后面的过程中发生干涉, TM 模经过第一片半波片后也被转换成 TE 模. 两部分通过移相器和可调耦合器之后, 其中一部分再通过偏振相关延时线产生一定的时延. 随后, 通过第二片半波片将前面被转化成 TE 模的那部分信号再还原成 TM 模. 最后, 通过第二片 PBS 把两部分再耦合成传输信号输出.

3 数值模拟

PMD 补偿器的补偿过程实际是 PMD 仿真器模拟过程的逆过程. 利用上述理论模型, 可通过蒙特-卡洛方法得到 PDL 影响的情况下, 多段 PLC 级联构成的 PMD 补偿器一阶偏振模色散的分布统计特性曲线. 在计算中, 所取的光波的波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 由电光移相器和可调耦合器对输入光波的相位改变值设在 0 到 π 间均匀分布, 偏振相关延时线的时延为 7.5 ps ^[9]. 由于此类器件目前耦合效率还不够高^[9], 每段 PLC 器件的 PDL 为 2 dB . 为了能够得到足够准确的统计结果, 独立采样计算次数为 $N = 50000$ 次.

图 3(a), (b), (c), (d) 分别是在每一段 PLC 的 PDL 为 2 dB 时, 三级、四级、五级和十五级 PLC 级联的差分群时延差(DGD)关于概率密度(PDF)的分布曲线. 其中空心圆是实际模拟计算的统计结果, 实线是麦克斯韦拟合曲线分布. 在实际光纤传输中, 一阶 PMD 的 DGD 值统计分布符合麦克斯韦分布函数^[14]

$$\text{pdf}(|\tau|) = \frac{32|\tau|^2}{\pi^2 \langle |\tau| \rangle^3} e^{-(2|\tau|/\langle |\tau| \rangle)^2/\pi} \quad (11)$$

式中, $\langle |\tau| \rangle$ 就是所有统计得到的 DGD 值的均方根值.

由图 3 可以看出, 三级 PLC 级联时, 模拟计算统计结果与理论曲线相比有较大的偏差. 四级 PLC 级联时, 偏差得到了一定的修正. 五级 PLC 级联时, 已经能够和理论曲线较好的吻合. 十五级 PLC 级联并没有使模拟计算数据同理论曲线的吻

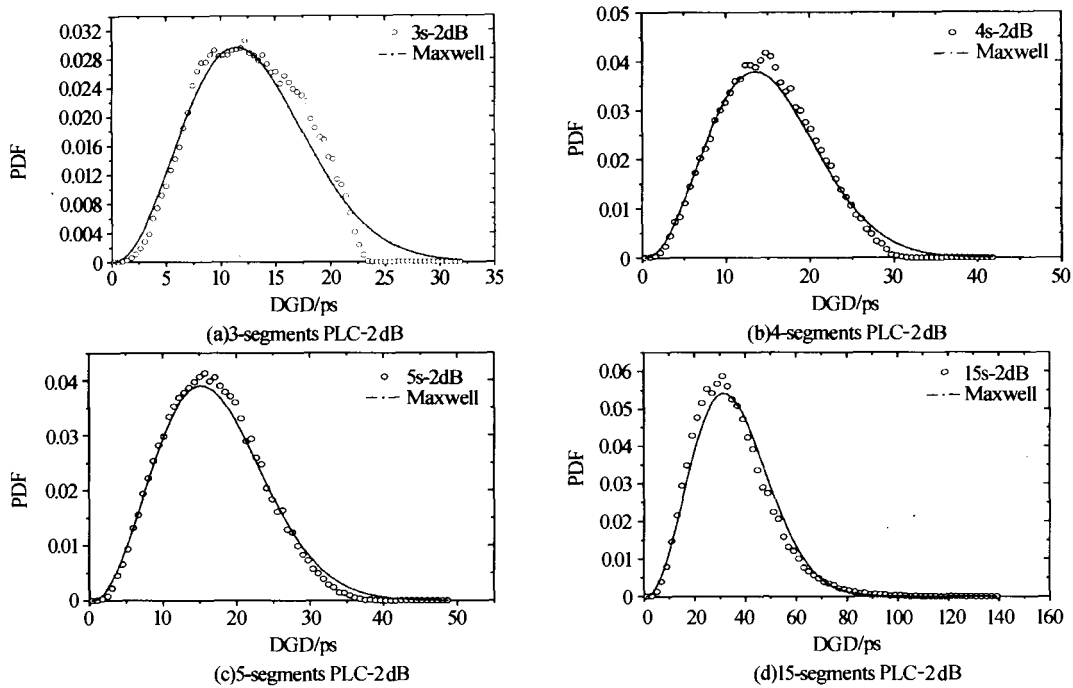


图 3 不同级次相同 PDL 的 PLC 级联时 DGD 的 PDF 分布图

Fig. 3 The density functions of the DGD of different compensators which have a PDL of 2 dB

合度得到明显的改变。

除了 PLC 的段数会对图形产生影响之外, PDL 的值也会对统计的分布曲线产生明显的影响。图 4

(a)、(b)、(c)、(d) 分别是五级 PLC 级联时 PDL 分别取 0 dB、4 dB、8 dB 和 10 dB 时 DGD 关于 PDF 的分布曲线。

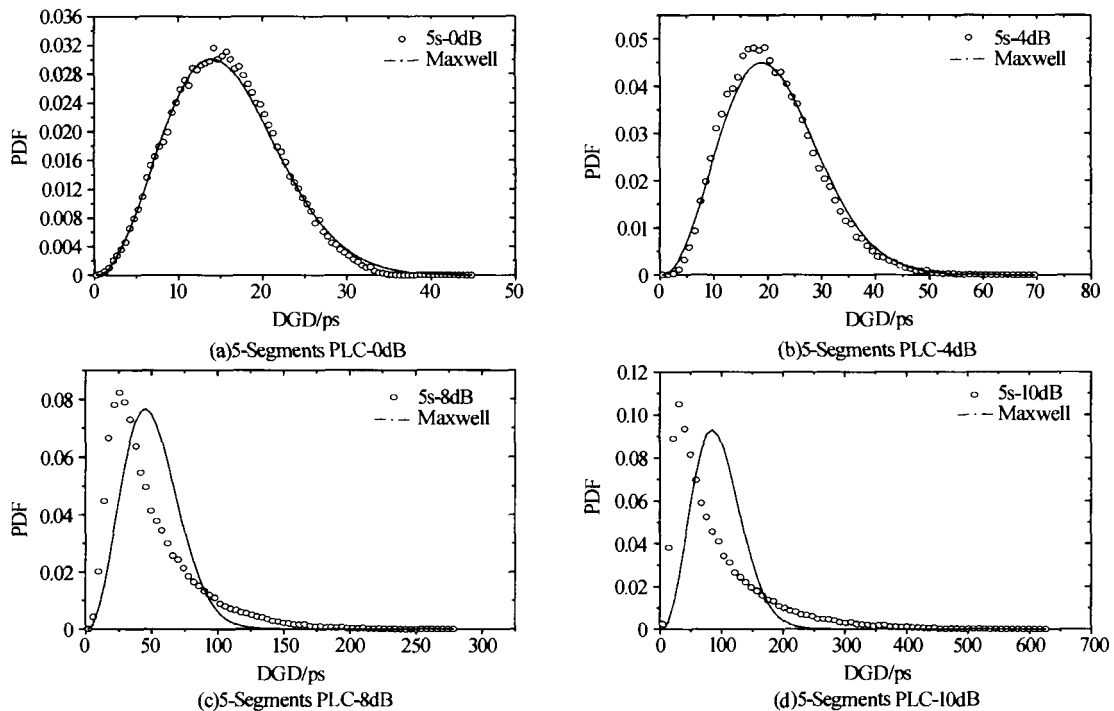


图 4 不同 PDL 下五级 PLC 级联时 DGD 的 PDF 分布图

Fig. 4 The DGD density functions of the compensators with different PDL which are composed of 5-segments PLC

比较图 3(c)和图 4(a)、(b)、(c)、(d)可以看出, 随着 PDL 的增加, 相同级数 PLC 级联时的 PMD 分布有着明显的差别。0 dB 时模拟统计结果与理论曲线吻合的最好, 几乎所有的统计点都分布在理论曲线的附近。2 dB 时模拟统计结果开始出现一定的偏

差, 4 dB 时偏差进一步增大。8 dB 时统计点已经十分明显的偏离了理论曲线, 当 PDL 增大到 10 dB 时, 统计点的偏离更加明显。

在对 PMD 进行补偿时, 补偿器的偏振模色散统计分布与麦克斯韦曲线吻合得越好, 则越容易快

速调整到补偿状态,可以实现更加迅速实时补偿功能.从理论上来说,在不考虑 PDL 时,级联段数越多,得到的 DGD 统计分布曲线与麦克斯韦曲线拟合得越好.但是由于每一个级联单元中都不可避免的存在 PDL,段数越多,系统中总的 PDL 的影响也会越明显.图 5 是十五段 PLC 在 PDL 为 0 dB 的情况下级联得到的 DGD 统计分布结果.与图 3(d)相比较可以看出,PDL 为 2 dB 时对于统计点分布的影响是较为明显的.而对比图 3(c)和图 4(a)可以看出,同为 PDL 从 0 dB 变为 2 dB,五段 PLC 级联时 PDL 对于统计分布曲线与理论曲线的吻合程度的影响要小于十五段 PLC 级联.

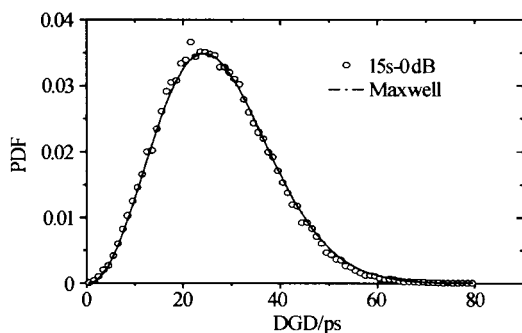


图 5 十五段 PLC-0dB 模型 DGD 的 PDF 分布图
Fig. 5 The DGD density functions of a compensator composed of 15-segments PLC with a PDL of 0 dB

另外,从易于对补偿器进行控制和降低成本的角度出发,应该选取尽可能少的段数.考虑到加快补偿器的调控速度,四段或者五段 PLC 级联来组成偏振模色散补偿器是最优化的选择.耦合效率也需要进一步的提高,以减小 PDL,提高补偿器的性能.

4 结论

本文利用空间斯托克斯向量和蒙特-卡洛方法,对基于 PLC 的 PMD 补偿器在不同 PDL 值情况下各种级联模型对于一阶偏振模色散的补偿效率进行了分析.分析结果表明,级联的 PLC 的段数和每段 PLC 的 PDL 值是影响统计分布曲线的两个关键因素.当 PDL 为 2 dB 时,四级或五级 PLC 模型具有较好的补偿结果,以较少的控制变量可实现快速实时补偿.

参考文献

1 Gisin N, Huttner B. Combined effects of polarization mode dispersion and polarization dependent losses in optical fibers. *Optics Communications*, 1997, **142**: 119~125

2 徐坤,谢世钟. 高速光纤通信中的偏振模色散及其补偿技术. *半导体光电*, 2000, **21**(1): 1~5
Xu K, Xie S Z. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, **21**(1): 1~5

3 周赢武,郭凌伟,瞿荣辉,等. 偏振模色散模拟器一阶及二阶偏振模色散统计特性的分析. *光子学报*, 2004, **33**(3): 333~337
Zhou Y W, Guo L W, Qu R H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 333~337

4 陈烈辉,高锦岳. 用于高阶偏振模色散补偿的高效动态补偿器. *光子学报*, 2003, **32**(6): 702~705
Chen L H, Gao J Y. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 702~705

5 Enrico Forestieri, Giulio Colavolpe, Giancarlo Prati. Novel MSE adaptive control of optical PMD compensators. *JLT*, 2002, **20**(12): 1997~2003

6 Magnus Karlsson. Polarization mode dispersion mitigation - performance of various approaches. *OFC*, 2002. 231~233

7 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

8 Huttner B, Gisin N. Anomalous pulse spreading in birefringent optical fibers with polarization-dependent losses. *Opt Lett*, 1997, **22**(8): 504~506

9 Takashi Saida, Koichi Takiguchi, Shoichiro Kuwahara, et al. Planar lightwave circuit polarization mode dispersion compensator. *IEEE Phot Tech Lett*, 2002, **14**(4): 507~509

10 Lima I T, Khosravani Jr R, et al. Comparison of polarization mode dispersion emulators. *JLT*, 2001, **19**(12): 1872~1881

11 Huttner B, Geiser C, Gisin N. Polarization -induced distortions in optical fiber networks with polarization-mode dispersion and polarization-dependent losses. *IEEE Journal of Selected Topic in Quantum Electronics*, 2000, **6**(2): 317~329

12 Okuno M, Sugita A, Jinguji K, et al. Birefringence control of silica waveguides on Si and its application to a polarization-beam splitter /switch. *JLT*, 1994, **12**(4): 625~633

13 Walker N G, Walker G R. Polarization control for coherent communications. *JLT*, 1990, **8**(3): 438~458

14 Phua P B, Haus H A. A deterministically control -led four-segment polarization-mode dispersion emulator. *JLT*, 2002, **20**(7): 1132~1140

Statistical analysis of Cascaded PLC-based PMD Compensator with PDL

Wang Lei, Wang Bin, Wu Xingkun

*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering
Zhejiang University, Hangzhou 310027*

Received date: 2004-07-09

Abstract By utilizing Müller matrix approach, a detailed statistical analysis on the PDL (polarization dependent loss) dependence of differential group delay (DGD) in cascaded planar lightwave circuit (PLC) based PMD compensator is presented. For PDL values ranging from 0 to 10 dB, the DGD distributions were calculated with Monte Carlo simulation for cascaded PLC circuits of 3, 4, 5 and 15 segments. Based on comparison with Maxwell distribution, it was found that an optimized segment number for cascaded PLC circuit with PDL is around 4, and that DGD distribution exhibits a severe deviation away from the Maxwellian as PDL is above 8 dB.

Keywords PMD compensator; Planar lightwave circuit (PLC); Optical fiber communications; PDL



Wang Lei was born in 1980 and received his B. S. in optical engineering from Zhejiang University in 2003. Currently he is conducting his M. S. research with an emphasis on fiber optic communications.