

偏振控制器完成任意偏振态变化的最小自由度研究

张晓光^{1,2} 段高燕^{1,2} 席丽霞^{1,2}

(¹ 北京邮电大学光通信与光电子学研究院, 北京 100876
² 北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 偏振控制器(PC)是处理光纤中信号偏振态(SOP)的重要器件,它是偏振模色散(PMD)自适应补偿器的重要组成部分。以两种类型的商用偏振控制器为例,理论和实验证明了转变任意输入态到庞加莱(Poincaré)球上其他任何状态至少需要调整三个自由度而不是两个自由度。因此至少需要控制每一阶段的 PMD 补偿器中偏振控制器上的三个自由度而不是两个自由度,才能够实现完全的 PMD 补偿。

关键词 光通信; 偏振控制器; 偏振态; 自由度

中图分类号 TN929.11; O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1173

Research on Least Number of Degrees of Freedom for Transformation among Arbitrary State of Polarizations

Zhang Xiaoguang^{1,2} Duan Gaoyan^{1,2} Xi Lixia^{1,2}

¹ Institute of Optical Communications and Optoelectronics, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

² Key Laboratory of Optical Communications and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing 100876, China

Abstract Automatically controlled polarization controllers (PC) are important devices for treating states of polarization (SOP) of the optical signals in fibers, which are the essential integral parts in an automatic compensator for polarization mode dispersion (PMD). Two types of commercial available PCs are taken as examples to show theoretically and experimentally that except for the reset-free problem it is necessary to adjust at least three instead of two waveplates in order to transform any input state into any other state covering the entire Poincaré sphere. Therefore we can achieve complete PMD compensation at least using three degrees of freedom instead of two in each stage PMD compensator.

Key words optical communications; polarization controller; state of polarization (SOP); degree of freedom

1 引 言

偏振控制器(PC)是光纤通信系统中的重要器件,特别是电控偏振控制器是偏振模色散(PMD)补偿器中不可缺少的重要器件。M. Karsson 教授等^[1]提出对于 PMD 补偿器中的每一单元中的偏振控制器,只要控制其中的两个波片(即两个自由度控制),就可以完成 PMD 补偿,即利用偏振控制器做偏振态的变换,只要调整两个自由度,就可以使任意偏振状态变换到庞加莱球(Poincaré sphere)其他任意偏振状态。这一结论随后被人广泛引用^[2~4]。本

文以两类商用偏振控制器理论分析并实验验证,需要三个自由度而不是两个,才能完成覆盖整个庞加莱球的偏振态变换。因此对于 PMD 补偿器中每一单元中的偏振控制器,也需要三个自由度的控制,才能完成 PMD 的补偿。

2 偏振控制器理论

目前商用偏振控制器大致分为两类,如图 1 所示。一类偏振控制器由一组 $\lambda/4$ 波片, $\lambda/2$ 波片, $\lambda/4$ 波片级联而成,或等效的三个波片级联,如图 1(a)所

示,它们可以归为相位差固定,波片角度可调型的波片,其变换矩阵可以用 $\mathbf{R}(\theta_1, \pi/2)$, $\mathbf{R}(\theta_2, \pi)$ 和 $\mathbf{R}(\theta_3, \pi/2)$ 表示,其中 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别为可调谐的角度。另一类偏振控制器由一系列取向固定、相位差可调的波片级联而成。有些偏振控制器波片由电光晶体的电光效应外加电压调整相位差,有些由电压

控制挤压光纤,产生不同的双折射,从而改变相位差。它们可以归为取向固定、相位差可调的偏振控制器。以图 1(b) 所示的光纤挤压型偏振控制器为例,其变换矩阵可以用 $\mathbf{T}(0^\circ, \phi_1)$, $\mathbf{T}(45^\circ, \phi_2)$ 与 $\mathbf{T}(0^\circ, \phi_3)$ 与 $\mathbf{T}(0^\circ, \phi_4)$ 表示,其中 $2\phi_1, 2\phi_2, 2\phi_3, 2\phi_4$ 分别为可调谐的相位差。

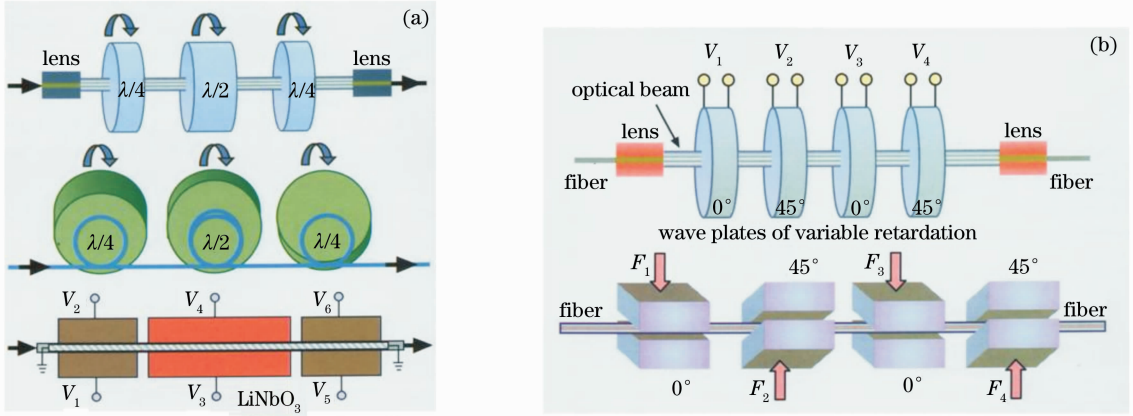


图 1 两类不同的偏振控制器。(a) 相位固定-角度可调偏振控制器;(b) 方位固定-相位可调偏振控制器

Fig. 1 Two types of polarization controllers (PC). (a) waveplate-fixed and angle-adjustable PC;

(b) angle-fixed and retardation-adjustable PC

2.1 利用相位固定-角度可调的偏振控制器进行偏振态变换的理论

以 $\lambda/4$ 波片, $\lambda/2$ 波片, $\lambda/4$ 波片级联的相位固定-角度可调的偏振控制器为例,在实验坐标系中, $\lambda/2$ 波片与 $\lambda/4$ 波片对应的琼斯矩阵分别为^[5]

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_h & \sin \theta_h \\ -\sin \theta_h & \cos \theta_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j \frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(-j \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_h & -\sin \theta_h \\ \sin \theta_h & \cos \theta_h \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_q & \sin \theta_q \\ -\sin \theta_q & \cos \theta_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j \frac{\pi}{4}) & 0 \\ 0 & \exp(-j \frac{\pi}{4}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_q & -\sin \theta_q \\ \sin \theta_q & \cos \theta_q \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 θ_h 与 θ_q 分别为 $\lambda/2$ 波片与 $\lambda/4$ 波片的方位角。

如果只使用两个自由度,即只有 $\lambda/4$ 波片, $\lambda/2$ 波片级联,则总的变换矩阵为

$$\mathbf{T}(\theta_1, \theta_2) = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} -\cos(2\theta_1 - 2\theta_2) + j\cos 2\theta_2 & \sin(2\theta_1 - 2\theta_2) - j\sin 2\theta_2 \\ -\sin(2\theta_1 - 2\theta_2) - j\sin 2\theta_2 & -\cos(2\theta_1 - 2\theta_2) - j\cos 2\theta_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

斯托克斯空间里相应的米勒矩阵为^[6]

$$\mathbf{M}(\theta_1, \theta_2) = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_1 \cos(2\theta_1 - 4\theta_2) & -\sin 2\theta_1 \cos(2\theta_1 - 4\theta_2) & \sin(2\theta_1 - 4\theta_2) \\ \cos 2\theta_1 \sin(2\theta_1 - 4\theta_2) & -\sin 2\theta_1 \sin(2\theta_1 - 4\theta_2) & -\cos(2\theta_1 - 4\theta_2) \\ \sin 2\theta_1 & \cos 2\theta_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

如果输入偏振态为圆偏振态,其斯托克斯矢量为 $[0, 0, \pm 1]^t$ 。经过两自由度偏振控制器变换,得到输出偏振态为 $[\sin(2\theta_1 - 4\theta_2), \mp \cos(2\theta_1 - 4\theta_2), 0]^t$,它们位于庞加莱球的赤道上,形成一个环。图 2 为这一变换过程示意图:右圆偏振光位于北极 A 点,经过方位角 θ_1 的 $\lambda/4$ 波片,绕着位于 $S_1 - S_2$ 平面的 $\overline{2\theta_1}$ 轴沿球面旋转 $1/4$ 圆弧 ($\pi/2$) 到赤道上的 B 点,然后经过方位角 θ_2 的 $\lambda/2$ 波片,绕着位于 $S_1 - S_2$ 平面的 $\overline{2\theta_2}$ 轴沿球面旋转 $1/2$ 圆弧 (π) 到赤道上的 C 点。因此无论如何调整 θ_1 与 θ_2 角,输出偏振态只能始终在赤道上,形成一个环,而不能覆盖整个庞加莱球。

然而,如果采用三自由度 $\lambda/4$ 波片, $\lambda/2$ 波片, $\lambda/4$ 波片级联的偏振控制器,其总的变换矩阵为

$$\mathbf{T}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \cos \beta - j \sin \beta \sin \gamma & \sin \alpha \cos \beta - j \sin \beta \cos \gamma \\ -\sin \alpha \cos \beta - j \sin \beta \cos \gamma & -\cos \alpha \cos \beta + j \sin \beta \sin \gamma \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\alpha = \theta_1 - \theta_3$, $\beta = 2\theta_2 - (\theta_1 + \theta_3)$, $\gamma = \theta_1 + \theta_3$ 。(5) 式对应的米勒矩阵为

$$\mathbf{M}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha \cos^2 \beta - \cos 2\gamma \sin^2 \beta & -\sin 2\alpha \cos^2 \beta + \sin 2\gamma \sin^2 \beta & -\sin 2\beta \cos(\alpha - \gamma) \\ \sin 2\alpha \cos^2 \beta + \sin 2\gamma \sin^2 \beta & \cos 2\alpha \cos^2 \beta + \cos 2\gamma \sin^2 \beta & -\sin 2\beta \sin(\alpha - \gamma) \\ \sin 2\beta \cos(\alpha + \gamma) & -\sin 2\beta \sin(\alpha + \gamma) & \cos 2\beta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

如果输入任意偏振态 $[\cos \chi \cos \epsilon, \cos \chi \sin \epsilon, \sin \epsilon]^t$, 其中 χ 与 ϵ 分别表示方位角与椭圆率, 则输出偏振态为

$$\begin{bmatrix} (\cos 2\alpha \cos^2 \beta - \cos 2\gamma \sin^2 \beta) \cos \chi \cos \epsilon - (\sin 2\alpha \cos^2 \beta - \sin 2\gamma \sin^2 \beta) \cos \chi \sin \epsilon - \sin 2\beta \cos(\alpha - \gamma) \sin \epsilon \\ (\sin 2\alpha \cos^2 \beta + \sin 2\gamma \sin^2 \beta) \cos \chi \cos \epsilon + (\cos 2\alpha \cos^2 \beta + \cos 2\gamma \sin^2 \beta) \cos \chi \sin \epsilon - \sin 2\beta \sin(\alpha - \gamma) \sin \epsilon \\ \sin 2\beta \cos(\alpha + \gamma) \cos \chi \cos \epsilon - \sin 2\beta \sin(\alpha + \gamma) \cos \chi \sin \epsilon + \cos 2\beta \sin \epsilon \end{bmatrix}. \quad (7)$$

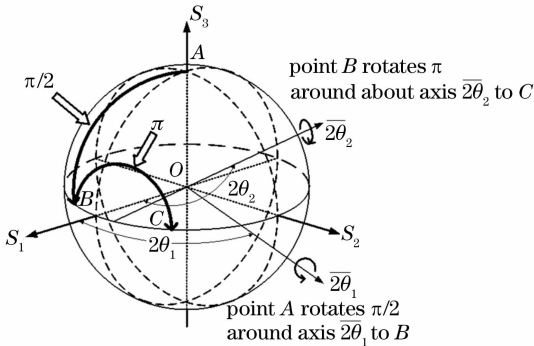


图 2 圆偏振光经过 $\lambda/4$ 波片, $\lambda/2$ 波片级联的偏振控制器的变化情况

Fig. 2 SOP transformations of circularly polarized light by two cascaded $\lambda/4$ and $\lambda/2$ plates

可以证明,通过调整偏振控制器的 θ_1 , θ_2 与 θ_3 角,输出偏振态可以覆盖整个庞加莱球。

2.2 利用方位固定-相位可调的偏振控制器进行偏振态变换的理论

以图 1(b) 中方位角分别为 $0^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ 四个波片级联的偏振控制器为例。只讨论使用前三个波片,第四个波片的只是为了避免重置偏振控制器所设。设三个波片的相位延迟分别为 $2\phi_1, 2\phi_2$ 与 $2\phi_3$, 正比于控制电压。三个波片的变换矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} \exp(j\phi_1) & 0 \\ 0 & \exp(-j\phi_1) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \cos \phi_2 & -j \sin \phi_2 \\ -j \sin \phi_2 & \cos \phi_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \exp(j\phi_3) & 0 \\ 0 & \exp(-j\phi_3) \end{bmatrix}.$$

利用两个自由度,使用 $0^\circ, 45^\circ$ 级联波片,其总的琼斯变换矩阵为

$$\mathbf{T}(\phi_1, \phi_2) = \begin{bmatrix} \cos \phi_2 \exp(j\phi_1) & -j \sin \phi_2 \exp(-j\phi_1) \\ -j \sin \phi_2 \exp(j\phi_1) & \cos \phi_2 \exp(-j\phi_1) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

其相应的米勒矩阵为

$$\mathbf{M}(\phi_1, \phi_2) = \begin{bmatrix} \cos 2\phi_2 & -\sin 2\phi_1 \sin 2\phi_2 & \cos 2\phi_1 \sin 2\phi_2 \\ 0 & \cos 2\phi_1 & \sin 2\phi_2 \\ -\sin 2\phi_2 & -\sin 2\phi_1 \cos 2\phi_2 & \cos 2\phi_1 \cos 2\phi_2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

如果输入偏振态为水平偏振的线偏振光,其斯托克斯矢量为 $[1, 0, 0]^t$, 则输出偏振态为 $[\cos 2\phi_2, 0, -\sin 2\phi_2]^t$, 调整相位角 $2\phi_1$ 与 $2\phi_2$, 在庞加莱球上构成一个 $S_1 - S_3$ 平面内的环。图 3 为这一变换过程示意图。水平偏振光位于 S_1 轴的 A 点, 0° 方位角的波片, 不论怎样调整 ϕ_1 都不会改变 A 的位置。而经过 45° 方位角波片后, 调整 ϕ_2 会使输出态绕 S_2 轴画出竖直的圆环到 B 点, 也不能覆盖整个庞加莱球。

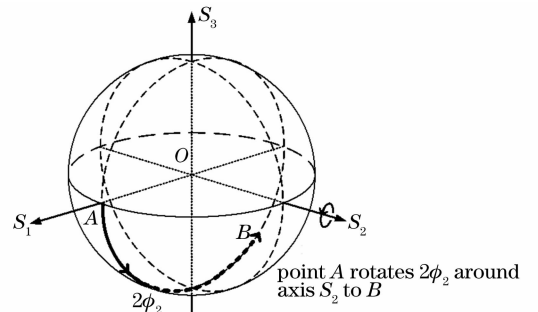


图 3 水平线偏振光经过 $0^\circ, 45^\circ$ 级联波片变换后输出偏振态的变化

Fig. 3 SOP transformation of horizontally polarized light by the cascade of $0^\circ, 45^\circ$ angle-fixed and retardation-adjustable waveplates

理论分析证明,使用 $0^\circ, 45^\circ, 0^\circ$ 三个波片级联后,对于庞加莱球上任意一个输入偏振态,经过偏振控制器变换,可以在庞加莱球上任意一点得到输出偏振态,覆盖整个庞加莱球。

以上分析可知,通过偏振控制器的两个自由度

的调整,输出偏振态在庞加莱球上会出现达不到的盲区,而通过三个自由度的调整,可以得到任意输出偏振态覆盖整个庞加莱球。

3 实验验证

图 4 为实验装置图,光源用波长为 1563.8 nm 的增益开关分布反馈(GS-DFB)半导体激光器,调制成 2.5 Gb/s 的脉宽约为 20 ps 的脉冲串,经过一个光纤型起偏器,使脉冲串保持线偏振,利用光纤挤压型电控偏振控制器(属于 $0^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ 四个波片级联的偏振控制器)进行偏振态变换,变换后的偏振态用在线检偏仪监测,通过模/数(A/D)卡转换成数字信号输入计算机画出庞加莱球上的相应输出点。用随机电压组合(V_1, V_2)或(V_1, V_2, V_3)实现两自由度或三自由度的偏振控制器的控制。

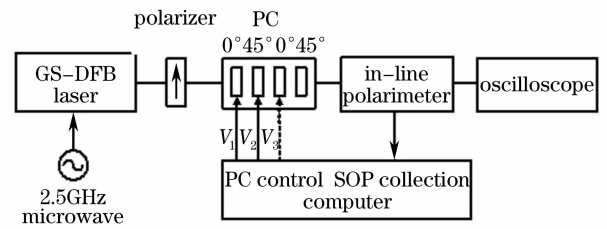


图 4 实验装置

Fig. 4 Experiment setup

当随机调整偏振控制器的三个自由度时,输出的偏振态覆盖了整个庞加莱球;反之,只随机调整两个自由度时,输出偏振态形成一个绕 S_2 旋转的轮胎状环,留下大片盲区,使这块区域的输出偏振态无法形成,如图 5 所示。至于实验形成的是轮胎环,而不是一个线环,原因是实验中输入的偏振态有一些起伏。

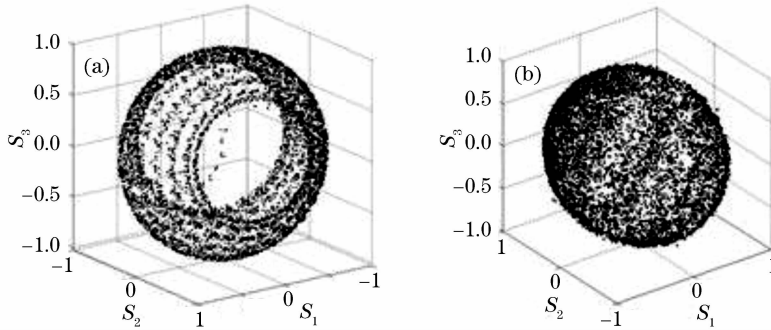


图 5 通过两自由度(a)和三自由度(b)偏振控制器实验得到的庞加莱球上输出偏振态

Fig. 5 Experimental output SOPs on the Poincaré sphere obtained by controlling (a) two waveplates and (b) three waveplates

在 40 Gb/s OTDM 传输系统中实现的偏振模色散补偿实验中,发现只有控制补偿器中偏振控制器的三个自由度(而不是两个),才能获得 PMD 的完全补偿^[7]。

4 结 论

理论和实验证明,对于偏振控制器控制其三个自由度,而不是两个自由度,才能完成将任意输入偏振态变换到需要的其他任意输出偏振态。从而纠正了一个广泛被误解的结论“对于 PMD 补偿器,每一阶段的偏振控制器,只要控制两个自由度,就足够完成 PMD 的完全补偿。”

参 考 文 献

1 M. Karsson, C. Xie, H. Sunnerud *et al.*. Higher order

- polarization mode dispersion compensator with three degrees of freedom[C]. Paper MO1 in OFC 2001, Anaheim, CA, USA, March, 2001. 17~22
- 2 H. Sunnerud, C. Xie, M. Karsson *et al.*. A comparison between different PMD compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(3): 368~378
- 3 H. Y. Pua, P. K. Eddanarappagari, B. Zhu *et al.*. An adaptive first-order polarization-mode dispersion compensation system aided by polarization scrambling: theory and demonstration[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(6): 832~84
- 4 S. Kim. Schemes for complete compensation for polarization mode dispersion up to second order[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(8): 577~579
- 5 E. Collett. Polarized Light-Fundamentals and Applications[M]. Marcel Dekker, 1993
- 6 R. Simon. The connection between Mueller and Jones Matrices of polarization optics[J]. *Opt. Commun.*, 1982, **42**: 293~297
- 7 X. Zhang, L. Xi, L. Yu *et al.*. Two-stage adaptive PMD compensation in 40 Gb/s OTDM optical communication system using PSO algorithm [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2004, **36**(12): 1089~1104