

光纤扭转对循环延迟线偏振 控制系统特性影响的研究

Theoretical Research on Characteristics of Polarization Controller Based on a Fiber Recirculating Delay Line with a Twisting-Fiber Device Introduced

潘英俊

Pan Yingjun

古渊

Gu Yuan

黄尚廉

Huang Shanglian

(重庆大学国家教委光电技术及系统开放实验室, 重庆, 630044)

摘要 借助模式耦合理论和矩阵光学的知识, 对引入光纤扭转机构后的延迟线偏振控制系统的偏振转换特性进行了分析, 推导出了描述该系统偏振特性的琼斯矩阵, 得到了光纤扭转对系统偏振特性影响的理论模型。

关键词 单模光纤; 扭转; 偏振分析; 循环延迟线

中国图书资料分类法分类号 TN929.11

ABSTRACT The transformation characteristics of the controller based on a fiber-recirculating delay line in which the twisting-fiber device is introduced are analyzed by the use of coupled-mode and matrix optics theory, the Jones matrix representing this controller is obtained, and the effect of twisting fiber on the polarization characteristics of this controller is analyzed theoretically.

KEYWORDS single-mode optical fibers; twist; polarization analysis; recirculating delay line

0 引言

在单模光纤相干通信中, 当接收机具有偏振选择特性时, 如果单模光纤中传输模式因光纤结构的缺陷或因外界环境(温度、压力等)的影响引起模式分散时, 会引起信号光与本振光偏振态的随机漂移, 从而造成接收信号幅值的变化, 大大降低接收灵敏度。此外, 在光纤陀螺以及利用光纤双折射特性进行的光纤传感测量中, 偏振态的失配或不稳定将引起测量误差。因此, 光纤偏振控制是光纤相干通讯系统和光纤相干测量系统中一个极其重要的问题, 引起人们的广泛重视, 提出了许多光纤偏振控制方案^[1]。

最近, 一种新型的、基于光纤循环延迟线的偏振控制方案被提了出来^[2,3]。这种方案无论

• 收文日期, 1994-07-19

本文的研究受国家教委归国留学生经费资助

在工作原理上,还是在设计上,都明显不同于已有的偏振控制器。它通过控制两个双折射延迟项和一个位相延迟项,改变系统的本征模和本征值,从而实现偏振态的控制。理论分析表明,为了实现任意的本征模,以实现任意的偏振态控制,要求循环延迟线上两段光纤之间的连接错位角 θ ,是可变的^[3],但为了减少插入损耗和外界干扰,又往往需要将两段光纤连为一体。为了克服这一矛盾,我们提出了一种改进方案,即用一段光纤取代这两段光纤,而在这段光纤中部加上扭转机构,通过扭转光纤来改变 θ 。由于扭转机构的引入,给整个光纤循环延迟线系统的偏振控制特性带来了变化。我们的目的就是通过分析改进后的系统的偏振转换特性,研究它作为偏振控制器的可行性。

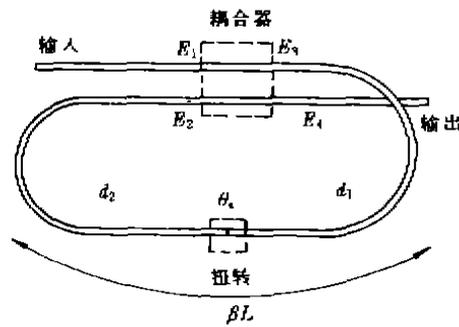


图1 改进后的系统原理图

1 系统的偏振特性

该系统由普通单模光纤通过定向耦合器引入光反馈而构成。两个双折射延迟项 d_1 、 d_2 的控制用挤压器实现,位相延迟项 βL 的控制用压电陶瓷构成的光纤伸展器实现, θ 的控制用光纤扭转机构实现。

作为一个偏振态变换系统,我们用琼斯矩阵描述它的变换作用。设输入为 E_1 ,输出为 E_4 ,琼斯矩阵为 H ,则有 $E_4 = H \cdot E_1$, (1)

$$\text{其中 } E = \begin{pmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{pmatrix}$$

我们再来分析反馈回路的偏振变换特性。

$$E_2 = M \cdot E_3 \quad (2)$$

M 为反馈回路的琼斯矩阵。而反馈回路是由两个双折射延迟项、一个位相延迟项和光纤扭转机构组成,它们各自都可以看成是一个偏振态变换元件,都有自己的琼斯矩阵。

双折射延迟项 d_1 的琼斯矩阵为^[2],

$$J_1 = \begin{bmatrix} \exp(-j \frac{d_1}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(j \frac{d_1}{2}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

表示通过挤压器在 z 与 y 方向上的两正交分量之间引入了 d_1 的位相差。

双折射延迟项 d_2 的琼斯矩阵为^[2],

$$J_2 = \begin{bmatrix} \exp(-j \frac{d_2}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(j \frac{d_2}{2}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

表示通过挤压器在 z 与 y 方向上的两正交分量之间引入了 d_2 的位相差。位相延迟项的琼斯矩阵^[2]为:

$$J_1 = \begin{bmatrix} \exp(j\beta L) & 0 \\ 0 & \exp(j\beta L) \end{bmatrix} \quad (5)$$

表示整个反馈回路所有元件引入的位相延迟因子,其中 L 为反馈回路长度, β 为单模光纤的平均传播常数。

光纤扭转机构的琼斯矩阵为^[4]:

$$J_2 = \begin{bmatrix} \cos(\gamma z) - j(\Delta\beta/2\gamma)\sin(\gamma z) & \alpha\gamma^{-1}\sin(\gamma z) \\ -\alpha\gamma^{-1}\sin(\gamma z) & \cos(\gamma z) + j(\Delta\beta/2\gamma)\sin(\gamma z) \end{bmatrix} \quad (6)$$

取 y 轴为快轴, $\Delta\beta = \beta_x - \beta_y$, β_x 、 β_y 分别代表光纤两正交分量(x 与 y 方向)的传播常数。对于普通单模光纤 $\Delta\beta$ 很小(约为 $100^\circ/\text{m}$)。

$$\gamma = \frac{1}{2} \sqrt{4\alpha^2 + \Delta\beta^2} \quad (7)$$

$$\alpha = (1 - 0.5g)\xi \quad (8)$$

α 代表扭转所致圆双折射, γ 是固有线双折射 $\Delta\beta$ 与 α 合成的总双折射; z 为扭转区长度; ξ 为扭转率,即单位长度上所扭转的角度。 g 是光弹耦合系数,对于石英光纤 $g = 0.15$,如图 2 所示。

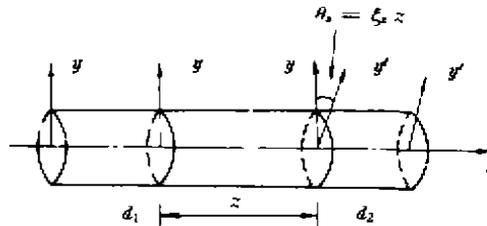


图 2 扭转示意图

公式(6) 首先反映了扭转所致的坐标系旋转,其次反映了扭转所致的总双折射对偏振态的影响以及扭转所引起的两正交分量之间的模式耦合。

由矩阵光学的知识可知,反馈回路的琼斯矩阵为

$$\begin{aligned} M &= J_1 \cdot J_3 \cdot J_2 \cdot J_1 \\ &= \begin{bmatrix} \exp(j\beta L) & 0 \\ 0 & \exp(j\beta L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-j\frac{d_2}{d}) & 0 \\ 0 & \exp(j\frac{d_2}{d}) \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} \cos(\gamma z) - j(\Delta\beta/2\gamma)\sin(\gamma z) & \alpha\gamma^{-1}\sin(\gamma z) \\ -\alpha\gamma^{-1}\sin(\gamma z) & \cos(\gamma z) + j(\Delta\beta/2\gamma)\sin(\gamma z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-j\frac{d_1}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(j\frac{d_1}{2}) \end{bmatrix} \\ &= \exp(j\beta L) \begin{bmatrix} d_{11}\exp(-j\Delta^+) & d_{12}\exp(j\Delta^-) \\ d_{21}\exp(-j\Delta^-) & d_{22}\exp(j\Delta^+) \end{bmatrix} \quad (9) \end{aligned}$$

其中 $d_{11} = \cos(\gamma z) - j(\Delta\beta/2\gamma)\sin(\gamma z)$,

$d_{22} = \cos(\gamma z) + j(\Delta\beta/2\gamma)\sin(\gamma z)$,

$d_{12} = \alpha\gamma^{-1}\sin(\gamma z)$,

$d_{21} = -\alpha\gamma^{-1}\sin(\gamma z)$,

$\Delta^+ = (d_1 + d_2)/2$, $\Delta^- = (d_1 - d_2)/2$,

由模式耦合理论,对于普通的 2×2 单模光纤定向耦合器,其输入与输出之间有如下关

系^[2]:

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & Q \\ -Q^* & P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{其中, } P = \begin{bmatrix} [(1-\gamma_x)(1-k_x^2)]^{\frac{1}{2}} & 0 \\ 0 & [(1-\gamma_y)(1-k_y^2)]^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} jk_x \sqrt{1-\gamma_x} & 0 \\ 0 & jk_y \sqrt{1-\gamma_y} \end{bmatrix}$$

其中,“*”表示共轭复数; $\gamma_i, k_i (i=x, y)$ 分别为耦合器中偏振态*i*的损耗系数和耦合系数.由式(2)和式(10)可得:

$$E_4 = [Q + PM(I - QM)^{-1}P]E_1 = HE_1 \quad (11)$$

其中 I 为单位矩阵,且 $Q^* = -Q$.将 P, Q 及 M 代入式(11),并设该系统无损耗 $\gamma_i = 0$, 偏振态均匀耦合 $k_x = k_y = k$, 经过复杂运算,得

$$H = \frac{1-k^2}{\delta} \exp(j\beta L) \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{其中, } h_{11} = j \frac{k}{1-k^2} \delta \exp(-j\beta L) + d_{11} \exp(-jA^+) - jk \exp(j\beta L)$$

$$h_{12} = d_{12} \exp(jA^-), \quad h_{21} = d_{21} \exp(-jA^+),$$

$$h_{22} = j \frac{k}{1-k^2} \delta \exp(-j\beta L) + d_{22} \exp(jA^+) - jk \exp(j\beta L),$$

$$\delta = 1 - 2jk \exp(j\beta L) \cdot [\cos(\gamma z) \cos A^+ - (\Delta\beta/2\gamma) \sin(\gamma z) \sin A^+] - k^2 \exp(2j\beta L)$$

根据系统的琼斯矩阵 H , 可以求得它的本征模和本征值.

$$\text{本征值 } \lambda_{1,2} = \frac{1}{2}(h_{11} + h_{22}) \pm \frac{1}{2}[(h_{11} - h_{22})^2 + 4h_{12}h_{21}]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \Omega + \Gamma \pm [\Omega^2 - 1]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\Omega = \cos(\gamma z) \cos A^+ - (\Delta\beta/2\gamma) \sin(\gamma z) \sin A^+$$

$$\Gamma = \frac{2k}{1-k^2} (\sin\beta L + k\Omega)$$

本征模为

$$e_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \lambda_1 - h_{11} \\ h_{12} \end{bmatrix}, \quad e_2 = \begin{bmatrix} \lambda_2 - h_{22} \\ h_{21} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\frac{\lambda_1 - h_{11}}{h_{12}} = j \frac{\cos(\gamma z) \sin A^+ + (\Delta\beta/2\gamma) \sin(\gamma z) \cos A^+ + (\Omega^2 - 1)^{\frac{1}{2}}}{\alpha\gamma^{-1} \sin(\gamma z) \exp(jA^-)}$$

$$\frac{\lambda_2 - h_{22}}{h_{21}} = j \frac{\cos(\gamma z) \sin A^+ + (\Delta\beta/2\gamma) \sin(\gamma z) \cos A^+ + (\Omega^2 - 1)^{\frac{1}{2}}}{\alpha\gamma^{-1} \sin(\gamma z) \exp(-jA^-)}$$

2 偏振控制原理

得到该系统的本征模和本征值后,根据输入偏振态 E_{in} 和要得到的输出偏振态 E_{out} ,便可控制系统参数 $A^+, A^-, \beta L$ 及 γz 和 k 等,以实现偏振转换.

为描述直观,我们用邦加球来说明偏振态转换.如图3所示,输入偏振态 $E_{in} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$ 由点

$A(x_1, y_1, z_1)$ 表示, 输出偏振态 $E_{out} = \begin{pmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \end{pmatrix}$ 由点 $B(x_2, y_2, z_2)$ 表示, 斯托克斯参数反映了 $\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$ 与 (x, y, z) 之间的换算关系^[6]; 系统本征模 ϵ 由点 $M(x_m, y_m, z_m)$ 表示。由矩阵光学的知识可知, 偏振变换作用在邦加球上表示为点 A 绕 OM 轴 (O 点为邦加球球心) 顺时针转到 B 点, 所转的角度 φ 为系统本征值 λ_1 与 λ_2 的位相差。

那么, 要实现偏振控制就归结为:

- 1) 确定输入与输出坐标值 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) ;
- 2) 选择合适的本征快模 $M(x_m, y_m, z_m)$ ^[3];
- 3) 根据 M 的坐标 (x_m, y_m, z_m) 与琼斯矩阵本征快模 x, y 分量的换算关系^[3], 反演计算出 Δ^+, Δ^- (保持 $\gamma z, k$ 为常数), 由挤压器实现;
- 4) 根据要转的角度 φ 计算出 βL 值由伸展器实现。

3 总 结

以上推导了引入扭转机构后, 光纤循环延迟线偏振控制系统的琼斯矩阵及其本征模和本征值, 并简要叙述了该系统实现偏振控制的原理。可以看到, 在实现可变的 θ ($\theta = z \cdot \xi$) 的同时, 扭转对系统偏振特性的影响主要取决于 $\Delta\beta/2\gamma$ 。对于普通单模光纤来说 $\Delta\beta$ 很小, 而通常扭转率 $\xi \gg \Delta\beta$, 所以 $\Delta\beta \ll 2\gamma$ 。因此, 与没有引入扭转机构的情况相比^[2,3], 扭转对系统主要起坐标旋转的作用, 而设计扭转机构并非易事, 因此下一步的实验工作还十分艰巨。另外, 针对这一困难, 我们又提出了让挤压器旋转, 使其作用力方向不断变化来实现可变的 θ 的新方案。这方面的理论和实验分析也是我们即将进行的工作。

参 考 文 献

- 1 潘英俊, 古渊, 黄尚廉, 光纤偏振控制器的原理、结构及特点分析, 半导体光电, 1994, 15(3), 237 ~ 244
- 2 Bruce A. Ferguson, Chen Lin, Polarization-effect controllability in recirculating delay-line systems. Applied Optics, 1992, 31(30), 6427 ~ 6436
- 3 Bruce A. Ferguson, Chen-Lin. Polarization controller based on a fiber-recirculating delay line. Applied Optics, 1992, 31(36), 7597 ~ 7604
- 4 Jen-I, Shun-Chang. Fiber full-polarization-state controller. Applied Optics, 1993. 32(3), 298 ~ 301
- 5 卢亚雄, 吕百达. 矩阵光学. 在连: 大连理工大学出版社, 1989. 351 ~ 363

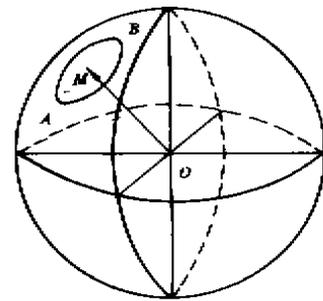


图3 邦加球上的偏振态变换