

文章编号: 1001-5078 (2006) 08-0703-04

输入光偏振态对光纤干涉仪条纹可见度的影响

李 东, 黄卫东, 曾文锋, 易志刚
(武汉军械士官学校, 湖北 武汉 430075)

摘 要: 文章分析了输入光偏振态对光纤 Mach-Zehnder 干涉仪条纹可见度和相位的影响, 并通过实验进行验证。实验中, 在干涉仪一干涉臂加入 PZT 相位调制器, 通过示波器直接观测输入光偏振态对干涉仪输出光强波形的影响, 并对输出波形变化进行了理论分析, 验证了输入光偏振态对干涉仪可见度、相位的影响。

关键词: 光纤光学; 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪; 光纤传感器; 偏振光; 邦加球

中图分类号: TH744. 3 **文献标识码:** A

The Influence of Input Polarization on Fringe Visibility of Fiber Interferometer

L I Dong, HUANG Wei-dong, ZENG Wen-feng, YI Zhi-gang
(Wuhan Ordnance N. C. O Academy of PLA, Wuhan 430075, China)

Abstract: In the letter the influence of input polarization on the fringe visibility and phase in fiber Mach-Zehnder interferometer is described, an verification experiment is carried on. In the experiment, a PZT acting as phase-modulation is joined in an arm of interferometer, the change of waveform is observed due to different input polarization by oscillograph. The change of waveform is in accordance with the theory analysis. The result of experiment verify the influence of input polarization on visibility and phase.

Key words: fiber optics; fiber Mach-Zehnder interferometer; fiber optical sensor; polarized light; poicare sphere

1 引 言

光纤 Mach-Zehnder 干涉仪无论作为传感元件或是光纤光栅传感系统的解调元件^[1]均存在信号的偏振衰落问题, 大量实验都清楚地显示了这种偏振衰落现象。在研究抗偏振衰落技术的过程中, 发现利用干涉仪的本征矢量的概念可以很好地分析偏振衰落和相位噪声现象, 并发现通过控制干涉仪输入光的偏振态可以实现可见度的优化, 避免偏振衰落现象。本文从实验现象和理论分析两个方面出发, 验证了输入光偏振态对干涉仪条纹可见度及相位的影响。

2 理论分析

光纤 Mach-Zehnder 干涉仪结构如图 1(a) 所示^[2], 它由两个 3dB 的 2 × 2 耦合器和普通低双折

射单模光纤构成。来自激光器的偏振光信号经引导光纤进入干涉仪, 在耦合器 1 处分成两束信号光。两束光分别在两干涉臂中独立传播至耦合器 2, 经耦合器 2 在干涉仪输出端发生干涉, 最终将光强信号送入探测器。

图 1(b) 表示了光在干涉仪中传输时, 干涉仪各部分的传输矩阵。 R_m 表示引导光纤的传输矩阵; R_1 、 R_2 分别为干涉臂 1、干涉臂 2 的传输矩阵; R_{out} 为干涉仪输出端光纤传输矩阵。图 1(b) 可等效地

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目 (No 51448040204JB1101)。

作者简介: 李 东 (1976 -), 男, 讲师, 硕士生。E-mail: blue_nigh486@hotmail.com

收稿日期: 2006-02-24

转化为图 1(c),将干涉臂 2 简化为理想单模光纤。设 L_2 为干涉臂 2 长度,则干涉臂 1 的传输矩阵为 $R_3^{-1}R_1$,其中: R_3^{-1} 为 $R_2 \cdot \exp(jL_2)$ 的逆矩阵,即 $R_2 = R_3 \cdot \exp(-jL_2)$; 为理想单模光纤的传输系数。传输矩阵 $R_3^{-1}R_1$ 表征了整个干涉仪对偏振光的传输特性,该矩阵称为干涉仪的传输矩阵,它在邦加球上所对应的矢量称为干涉仪的本征矢量。如图 2 中所示, R_{3-1} 为传输矩阵 $R_3^{-1}R_1$ 对应的矢量,即干涉仪的本征矢量。

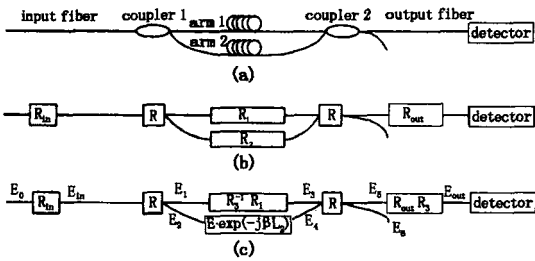


图 1 非平衡 Mach-Zehnder干涉仪解调器的结构图

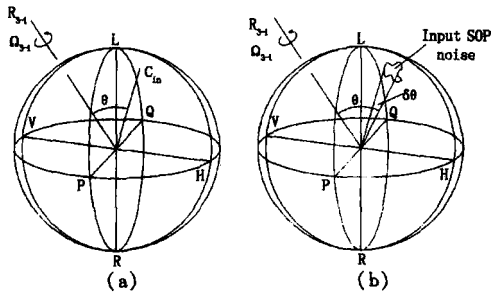


图 2 偏振态的邦加球分析

利用本征矢量概念,根据偏振光的传输原理,经理论推导可得干涉仪的输出为^[2-3]:

$$\begin{aligned}
 I_{out} &= \frac{1}{2} \cos^2\left(\frac{\alpha-3-1}{2}\right) I_0 \left[1 + \cos\left(\phi + \frac{\alpha-3-1}{2}\right) \right] \\
 &+ \frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\alpha-3-1}{2}\right) I_0 \left[1 + \cos\left(\phi - \frac{\alpha-3-1}{2}\right) \right] \\
 &= \frac{1}{2} I_0 \left\{ 1 + \left[\cos^2\left(\frac{\alpha-3-1}{2}\right) \right. \right. \\
 &\left. \left. + \cos^2(\alpha) \sin^2\left(\frac{\alpha-3-1}{2}\right) \right]^2 \cos(\phi - \alpha) \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\tan \alpha = \tan\left(\frac{\alpha-3-1}{2}\right) \cos \phi \quad (2)$$

其中, I_0 为干涉仪输入端光强度; α 为输入光琼斯矢量与干涉仪本征矢量的夹角; ϕ 为两束光在两干涉臂传输时产生的相位差; $\alpha-3-1$ 在邦加球上可表示为输入光琼斯矢量绕本征向量旋转角度,如图 2(a)。

从 (1) 式可知,干涉仪条纹可见度 K 和相移分别为:

$$\begin{aligned}
 K &= \left[\cos^2\left(\frac{\alpha-3-1}{2}\right) + \cos^2(\alpha) \sin^2\left(\frac{\alpha-3-1}{2}\right) \right]^2 \\
 &= \left[1 - \sin^2(\alpha) \sin^2\left(\frac{\alpha-3-1}{2}\right) \right]^2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\alpha = \arctan \left[\tan\left(\frac{\alpha-3-1}{2}\right) \cos(\phi) \right] \quad (4)$$

从 (3) 式可知,可见度 K 依赖于输入光场偏振态与干涉仪本征矢量相对位置。当 $\alpha-3-1=0$ 时,对于不同的 ϕ 角,可见度将在: $K_{max} = 1, K_{min} = \cos^2(\alpha-3-1/2)$ 之间变化。这意味着外界环境变化所导致的输入光场偏振态与干涉仪本征矢量相对位置发生变化(即 ϕ 角发生变化),将引起干涉仪输出端条纹可见度的变化,甚至产生偏振衰落。在光纤光栅传感系统中,由于探测器无法识别光强变化是由波长变化引起还是由偏振态变化引起,故解调信号中存在干扰。同样由 (4) 式可知,当 ϕ 角变化时,相移将随输入光偏振态的变化而变化,也对传感信号产生干扰。图 3、4 分别表示了 $\alpha-3-1$ 取不同值时,可见度 K 、相移 α 随 ϕ 的变化情况。理论分析表明:通过控制输入光的偏振态,可使输入光的偏振态与干涉仪本征矢量的夹角在 0 附近取值(即 ϕ 角在 0 附近取值),从而可抑制干涉仪的偏振衰落及相位噪声。

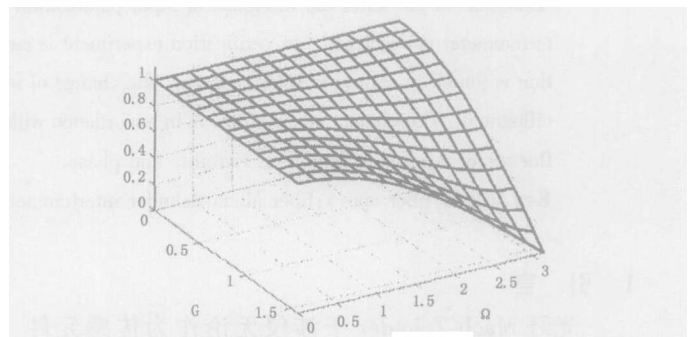


图 3 可见度变化网状图

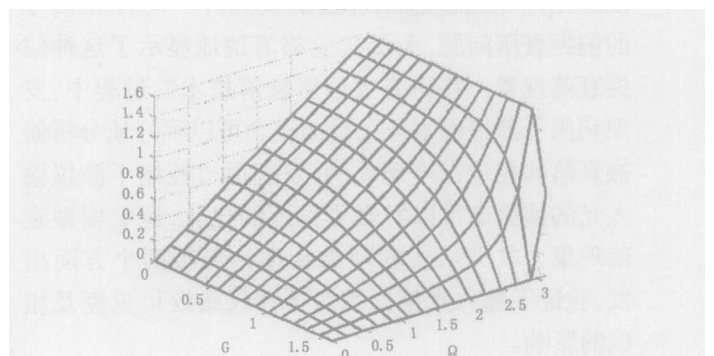


图 4 相移变化网状图

3 实验方案及实验结果

为验证输入光偏振态对非平衡光纤 Mach-Ze-

干涉仪条纹可见度及相位的影响,本文进行了实验研究,实验方案如图 5 所示。激光器发出的光经偏振片后成为线偏振光,并经偏振控制器进入光纤 Mach-Zehnder 干涉仪。输入干涉仪的偏振光分为两束,分别经两干涉臂传输后在输出端产生干涉。干涉仪的一干涉臂绕制在 PZT 上, PZT 上加有信号源,通过 PZT 实现对干涉仪的调相^[4],以便利用干涉仪输出端的探测器和示波器直接观测干涉仪输出光强信号的变化。干涉仪的另一干涉臂插入一偏振控制器,通过该偏振控制器可以改变干涉仪的传输特性(即干涉仪的状态)。

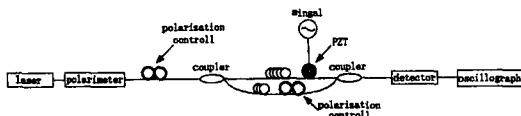


图 5 实验原理图

实验中,采用 1550nm 单纵模窄线谱光纤激光器作为光源,该光源具有单色性好、功率输出稳定、相干长度长的特点。采用该光源可以消除激光器频率抖动以及强度变化引入的噪声。光纤 Mach-Zehnder 干涉仪非平衡长度(OPD)为 2cm。

先将干涉仪中偏振控制器置于某一状态(即不同的干涉仪初始状态),再改变干涉仪输入光偏振态,观测示波器输出波形的变化。实验过程中所观测到的三种典型的波形变化,如图 6 所示。图中每横格对应 1ms,每竖格代表 20mV。

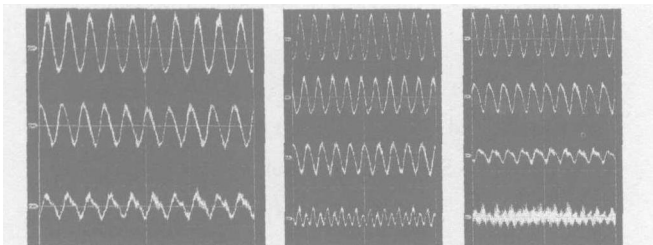


图 6 输入光偏振态对示波器输出波形的影响

现象一:干涉仪中偏振控制器在某一状态时,调整干涉仪输入端的偏振控制器,不断改变干涉仪输入光的偏振态,观测到示波器输出波形由大到小,但最小振幅不为零,实验结果如图 6(a)所示;

现象二:干涉仪中偏振控制器在某一状态时,调整干涉仪输入端的偏振控制器,不断改变干涉仪输入光的偏振态,将观测到示波器输出波形由大到小,并出现倍频现象,实验结果如图 6(b)所示;

现象三:干涉仪中偏振控制器在某一状态时,调整干涉仪输入端的偏振控制器,不断改变干涉仪输入光的偏振态,将观测到示波器输出波形由大到小,最终发生信号衰落,实验结果如图 6(c)所示。

4 实验结果分析

将(3)式带入(1)式进行化简,得:

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_0 K \cos(\phi - \mu \sin(\omega t)) \quad (5)$$

由于 PZT 调相作用,干涉仪输出相位会发生变化,干涉仪输出为:

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_0 K \cos[\phi + \mu \sin(\omega t) - \mu \sin(\omega t)] \\ = \frac{1}{2} I_0 K \cos(\phi + \phi - \mu \sin(\omega t)) \quad (6)$$

其中: $\phi = \mu \sin(\omega t)$: 为 PZT 上加载正弦信号的角频率; μ 为 PZT 调相作用的最大幅值。

令 $\phi = \phi - \mu \sin(\omega t)$, 将 I_{out} 用贝塞尔函数展开^[5]:

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_0 K \cos(\phi + \phi) \\ = \frac{1}{2} I_0 K \cos(\phi + \mu \cos(\omega t)) \\ = \frac{1}{2} I_0 K \{ J_0(\mu) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(\mu) \cos(2k\omega t) \} \cos(\phi) \\ + \{ 2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\mu) \cos[(2k+1)\omega t] \sin(\phi) \} \quad (7)$$

实验中取 μ 值较小 ($\mu < 1$)。由贝塞尔函数的性质^[6], (7) 式中高频分量振幅衰减很快, 可仅保留前几项:

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_0 K \{ [J_0(\mu) - 2J_2(\mu) \cos(2\omega t)] \cos(\phi) \\ + 2J_1(\mu) \cos(\omega t) \sin(\phi) \} \quad (8)$$

干涉仪输出经探测器转化为电压信号后送入示波器。由于实验中示波器耦合方式为交流, 即仅显示交流成分, 则示波器显示输出为:

$$V = H I_0 K [J_1(\mu) \cos(\omega t) \sin(\phi) \\ - J_2(\mu) \cos(2\omega t) \cos(\phi)] \quad (9)$$

其中, L 为光电探测器的放大倍数。

由(9)、(3)、(4)式可知, 在干涉仪传输特性处于不同情况下, 通过偏振控制器控制输入光的偏振态, 波形会发生下列不同的变化。

(a) 干涉仪初始条件满足: $\phi = k \pm \pi/2$ ($k = 1, 2, \dots, n$), 且干涉仪本征矢量的 β_{3-1} 在 0 附近取值。

当在 0 到 $\pi/2$ 之间发生变化时,由于相移 ϕ 随 θ 角发生变化, ϕ 从 $k + \pi/2 + \arctan(\tan(\theta_{3-1}/2))$ 减小至 $k + \pi/2 - \arctan(\tan(\theta_{3-1}/2))$ ($k = 1, 2, \dots, n$)。在初始条件下,由贝塞尔函数及三角函数的性质可知:

$$J_1(\mu) \sin(\phi) \gg J_2(\mu) \cos(\phi) \quad (10)$$

此时 (9) 式可简化为:

$$V = L_0 K J_1(\mu) \cos(\theta) \sin(\phi) \quad (11)$$

输入光与干涉仪本征矢量夹角 θ 从 0 到 $\pi/2$ 发生变化时,可见度从 1 减小到 $\cos(\theta_{3-1}/2)$ 后,再次增大到 1 。示波器显示的波形不变,波形振幅发生大小变化。由于 θ_{3-1} 在 0 附近取值,最小可见度不为零,不会出现波形振幅减小为 0 的现象。理论分析与实验现象一一对应。

(b) 干涉仪初始条件满足: $\phi = k\pi$ ($k = 1, 2, \dots, n$), 且干涉仪本征矢量的 θ_{3-1} 在 $\pi/2$ 的去心邻域内取值。当 θ 从 0 到 $\pi/2$ 之间发生变化时,由于相移 ϕ 随 θ 角发生变化, ϕ 从 $k + \arctan(\tan(\theta_{3-1}/2))$ 减小到 $k - \arctan(\tan(\theta_{3-1}/2))$ ($k = 1, 2, \dots, n$)。

当 θ 在 0 附近取值时, ϕ 在 $k + \arctan(\tan(\theta_{3-1}/2))$ 的左邻域取值。在初始条件下,由贝塞尔函数及三角函数的性质可知:

$$J_1(\mu) \sin(\phi) \gg J_2(\mu) \cos(\phi) \quad (12)$$

则 (9) 式可简化为:

$$V = L_0 K J_1(\mu) \cos(\theta) \sin(\phi) \quad (13)$$

当 θ 在 $\pi/2$ 附近取值时, ϕ 在 k 的邻域内取值。在初始条件下,由贝塞尔函数及三角函数的性质可知:

$$J_1(\mu) \sin(\phi) \ll J_2(\mu) \cos(\phi) \quad (14)$$

则 (9) 式可简化为:

$$V = L_0 K J_2(\mu) \cos(2\theta) \cos(\phi) \quad (15)$$

当 θ 在 $\pi/2$ 附近取值时, ϕ 在 $k - \arctan(\tan(\theta_{3-1}/2))$ 的右邻域取值。在初始条件下,由贝塞尔函数及三角函数的性质可知:

$$J_1(\mu) \sin(\phi) \gg J_2(\mu) \cos(\phi) \quad (16)$$

则 (9) 式可简化为:

$$V = L_0 K J_1(\mu) \cos(\theta) \sin(\phi) \quad (17)$$

因此,当 θ 从 0 逐渐增大到 $\pi/2$, 可见度 K 减小, 示波器输出波形, 先出现振幅减小现象, 随着振幅的继续减小, 后出现二倍频现象; 当 θ 继续从 $\pi/2$ 逐渐增大到 π , 二倍频现象逐渐消失, 示波器输出波

形振幅逐渐增大。理论分析与实验现象二对应。实验现象二中之所以出现倍频现象, 归根结底是由于干涉仪输入光偏振态变化时, 可见度减小并引入了较大的相移。该波形变化将验证输入光对相移的影响。

(c) 干涉仪初始条件满足: $\phi = k\pi$ ($k = 1, 2, \dots, n$), 且干涉仪本征矢量的 θ_{3-1} 取值 $\pi/2$ 。当 θ 从 0 到 $\pi/2$ 之间发生变化时, 由于相移 ϕ 随 θ 角发生变化, ϕ 从 $k + \arctan(\tan(\theta_{3-1}/2))$ 减小到 $k - \arctan(\tan(\theta_{3-1}/2))$ ($k = 1, 2, \dots, n$)。

分析过程同上。当 θ 增大到 $\pi/2$ 时, 可见度为 0 , 示波器输出波形消失, 理论分析与实验现象三相对应。

5 结 论

在不同的干涉仪初始条件下, 利用示波器直接观测输入光偏振态对干涉仪输出光强波形的影响, 并对实验结果进行了理论分析, 得到合理的解释。理论分析表明, 输入光偏振态对干涉仪输出光强波形的影响, 是由于输入光偏振态对干涉仪可见度及相位的影响。验证了运用本征矢量分析干涉仪偏振衰落及相位噪声的正确性, 及干涉仪可见度和相移对输入光偏振态的依赖性。

参考文献:

- [1] LI Dong, ZHANG Xiao-hui, HUANG Jun-bin Demodulation for phase shifted grating sensor by interferometer based on 3×3 coupler[J]. Sensors and Actuators, 2004, 17(3), 460 - 462
- [2] A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. Dandridge et al Optimization and Stabilization of Visibility in Interferometric Fiber-Optic Sensors Using Input-Polarization Control[J]. J. Lightwave Technology, 1988, 6(10): 1599 - 1609.
- [3] LI Dong, ZHANG Xiao-hui, HUANG Jun-bin, et al Analysis of Polarization Fading and Phase Noise in Unbalanced Fiber Mach-Zehnder Interferometer[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(3): 215 - 220
- [4] Wang Ting-yun Fiber-optic phase modulation theory and experiment analysis with PZT cylinder[J]. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(2): 134 - 137.
- [5] Yao Duan-zheng Mathematics physical method[M]. Beijing: Science Press, 2003, 512 - 513
- [6] Liang Quan-ting Physical optics[M]. Beijing: Machine Press, 1980, 338 - 340