

基于 3×3 耦合器的非平衡光纤 Mach-Zehnder 干涉仪传输特性研究

李 东¹, 王志怀¹, 曾文锋¹, 黄卫东¹, 张 玺¹, 钱 超²

(1. 武汉军械士官学校, 湖北 武汉 430075; 2. 中国人民解放军 91287 部队, 上海 200087)

摘 要: 研究了一般条件下基于 3×3 耦合器的非平衡光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的传输特性。运用波导耦合理论和光纤偏振光传输理论, 通过推导, 得到干涉仪输出光强、可见度以及相位噪声的表达式, 分析了干涉仪三路输出光强之间的相互关系, 以及可见度、相位噪声与干涉仪输入光偏振态之间的关系。

关键词: 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪; 3×3 耦合器; 光纤传感器; 偏振光

中图分类号: TH744.3

文献标识码: A

Research on delivering characteristic of unbalanced fiber Mach-Zehnder interferometer based 3×3 coupler

LI Dong¹, WANG Zhi-huai¹, ZENG Wen-feng¹, HUANG Wei-dong¹, ZHANG Xi¹, QIAN Chao²

(1. Wuhan Ordnance N. C. O Academy of PLA, Wuhan 430075, China; 2. Army 91287, Shanghai 200087, China)

Abstract: The transmission characteristic of unbalanced fiber Mach-Zehnder interferometer based on 3×3 coupler is investigated in this paper. With the coupling theory and the optical wave-guide theory, the interferometer output expression, fringe visibility expression and phase noise expression are obtained. The correlation in the three output of interferometer is theoretically proved. At the same time, the relationship between the fringe visibility of interferometer, phase noise and polarization of the input light are also analysed.

Key words: fiber Mach-Zehnder interferometer; 3×3 coupler; fiber optical sensor; polarized light

1 引言

在光纤光栅传感系统中, 外界物理量的变化被转化为光纤光栅布拉格中心波长的变化, 即传感信号是波长调制的光信号。由于目前还没有直接探测波长变化的解调装置, 因此, 如何将波长的变化转化为可探测物理量的变化成为实现传感信号解调的一项关键技术。现有光纤光栅传感信号解调方案包括: 扫描光纤 Fabry-Perot 干涉仪解调、非平衡光纤 Mach-Zehnder 干涉仪解调、斜边滤波器解调、成像 CCD 解调、双光栅匹配解调等^[1]。非平衡光纤 Mach-Zehnder 干涉仪是一种基于干涉原理的双光束干涉仪, 利用其进行解调可实现波长变化向光强变化的转换, 同时由于其具有解调分辨率高、适合动态解调的特点, 成为光纤光栅传感系统解调技术的一个主要研究方向。

光产生干涉的必要条件之一就是参与干涉的光的振动方向必须一致。由于干涉仪的引导光纤和干涉仪的两干涉臂一般均采用普通低双折射单模光纤, 干涉仪的传输特性容易受外界环境的影响。本文运用波导耦合理论和光纤偏振光传输理论, 在考虑外界因素对干涉仪产生影响的前提下, 对基于 3×3 耦合器的非平衡光纤 Mach-Zehnder 干涉仪传输特性进行研究, 得出一般性结论, 克服了以往理想状态下研究结论的局限性^[2-3]。

2 干涉仪传输模型的建立

基于 3×3 耦合器的非平衡光纤 Mach-Zehnder 干涉仪结构如图 1(a)所示, 它由一个 2×2 耦合器、

作者简介: 李 东(1976-), 男, 副教授, 硕士生, 主要从事光纤通信和光纤传输方面的研究。E-mail: blue_night486@hotmail.com

收稿日期: 2010-04-08

一个3×3耦合器和普通低双折射单模光纤构成。来自光纤光栅的偏振光信号通过引导光纤进入干涉仪,首先经2×2耦合器分成两束信号光。两束光分别在两干涉臂中独立传播至3×3耦合器。经耦合器再次耦合后,在干涉仪输出端发生干涉,最终将波长调制信号解调为相位调制的光强信号送入探测器。

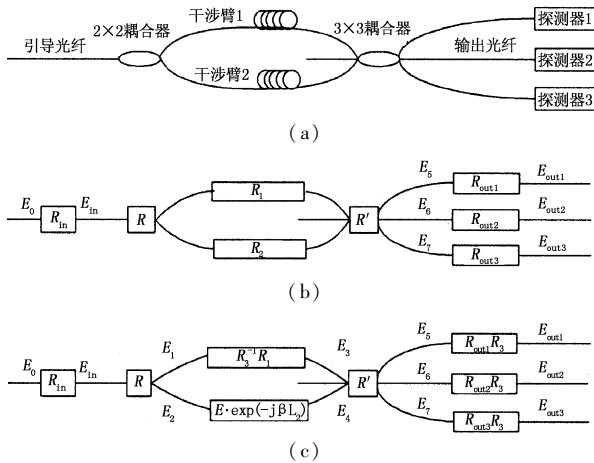


图1 基于3×3耦合器的非平衡光纤 Mach-Zehnder 干涉仪

将干涉仪中的2×2耦合器近似看作理想元件,分光比为1:1,并且不改变光的偏振态;低双折射单模光纤符合弱导近似条件,光在其中传播时可近似为TEM波^[4]。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_{in} 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。 $R_{outi} (i=1,2,3)$ 为干涉仪输出端引导光纤传输矩阵。图1(b)可等效转化图1(c),在图1(c)中干涉臂1的传输矩阵转化为 $R_3^{-1}R_1, R_3^{-1}$ 为 $R_2 \cdot \exp(j\beta L_2)$ 的逆矩阵,即 $R_2 = R_3 \cdot \exp(-j\beta L_2)$,其中 β 为理想单模光纤的传播系数, L_2 为干涉臂2长度。

3 干涉仪输出端光强信号计算

为便于讨论,在本文中,以 $E_{in}, E_1, \dots, E_{outi} (i=1,2,3)$ 分别代表各处光场的琼斯矢量, $A_{in}, A_1, \dots, A_5$ 表示各处光场的复振幅, C_{in}, C_1, C_2 表示单位琼斯矢量。光信号 E_0 经引导光纤传输至2×2耦合器后,转化为 E_{in} ,再经耦合器分束,转化为两路光场 E_1, E_2 。光场 E_1, E_2 分别在干涉臂中传播后,到达3×3耦合器输入端,转化为光场 E_3, E_4 ,并可分解为两正交光场之和^[5-6]:

$$E_3 = E_3^{(1)} + E_3^{(2)} = A_3^{(1)} C_1 + A_3^{(2)} C_2 \quad (1)$$

$$E_4 = E_4^{(1)} + E_4^{(2)} = A_4^{(1)} C_1 + A_4^{(2)} C_2 \quad (2)$$

其中, $E_3^{(1)}, E_3^{(2)}$ 和 $E_4^{(1)}, E_4^{(2)}$ 分别表示两对正交光场。

$$E_3^{(1)} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \frac{\theta}{2} A_{in} \exp(-j\beta_1 L_1) C_1 \quad (3)$$

$$E_3^{(2)} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \frac{\theta}{2} A_{in} \exp[-j(\beta_2 L_1 - \delta)] C_2 \quad (4)$$

$$E_4^{(1)} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \frac{\theta}{2} A_{in} C_1 \exp[-j(\beta L_2 - \frac{\pi}{2})] \quad (5)$$

$$E_4^{(2)} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \frac{\theta}{2} A_2 C_2 \exp[-j(\beta L_2 - \frac{\pi}{2} - \delta)] \quad (6)$$

其中, θ 为光场偏振态与干涉仪本征矢量之间的夹角; δ 为两正交偏振态的相差^[6]。

同理,干涉仪输出端光场 E_5, E_6, E_7 可表示为:

$$E_5 = E_5^{(1)} + E_5^{(2)} = A_5^{(1)} C_1 + A_5^{(2)} C_2 \quad (7)$$

$$E_6 = E_6^{(1)} + E_6^{(2)} = A_6^{(1)} C_1 + A_6^{(2)} C_2 \quad (8)$$

$$E_7 = E_7^{(1)} + E_7^{(2)} = A_7^{(1)} C_1 + A_7^{(2)} C_2 \quad (9)$$

已知3×3耦合器的传输矩阵为^[7-8]:

$$R' = \begin{bmatrix} f & c & c \\ c & f & c \\ c & c & f \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中:

$$f = \frac{1}{3} [\exp(-2jk_c l_c) + 2\exp(jk_c l_c)]$$

$$c = \frac{1}{3} [\exp(-2jk_c l_c) - \exp(jk_c l_c)]$$

式中, k_c, l_c 分别是3×3耦合器的耦合系数和耦合长度。

利用3×3耦合器传输矩阵可得:

$$\begin{bmatrix} A_5^{(1)} \\ A_6^{(1)} \\ A_7^{(1)} \end{bmatrix} = R' \begin{bmatrix} A_3^{(1)} \\ 0 \\ A_4^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fA_3^{(1)} + cA_4^{(1)} \\ cA_3^{(1)} + cA_4^{(1)} \\ cA_3^{(1)} + fA_4^{(1)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} A_5^{(2)} \\ A_6^{(2)} \\ A_7^{(2)} \end{bmatrix} = R' \begin{bmatrix} A_3^{(2)} \\ 0 \\ A_4^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fA_3^{(2)} + cA_4^{(2)} \\ cA_3^{(2)} + cA_4^{(2)} \\ cA_3^{(2)} + fA_4^{(2)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(11)、式(12)带入式(7)得:

$$E_5 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \frac{\theta}{2} A_{in} [f \exp(-j\beta_1 L_1) + j \exp(-j\beta L_2)] C_1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \frac{\theta}{2} A_{in} [f \exp(-j\beta_2 L_1 + j\delta) + j \exp(-j\beta L_2 + j\delta)] C_2 \quad (13)$$

对于分光比为1:1:1的3×3耦合器, $\cos 3k_c l_c = -\frac{1}{2}, |f|^2 = |c|^2 = \frac{1}{3}$,因此可得输出光强 I_5 为:

$$I_5 = E_5^H \cdot E_5 = \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2} I_0 \{ |f|^2 + |c|^2 + 2 \operatorname{Re}[-jfc^* \exp(j\beta L_2 - j\beta_1 L_1)] \} + \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\theta}{2} I_0 \{ |f|^2 +$$

$$|c|^2 + 2\text{Re}[-jfc^* \exp(j\beta L_2 - j\beta_2 L_1)] \} \\ = \frac{1}{3} \cos^2 \frac{\theta}{2} \cdot I_0 \cos(\beta L_2 - \beta_1 L_1 - \frac{\pi}{2} + 3k_c l_c) + \\ \frac{1}{3} \sin^2 \frac{\theta}{2} I_0 \cos(\beta L_2 - \beta_2 L_2 - \frac{\pi}{2} + 3k_c l_c) \quad (14)$$

其中, I_0 为干涉仪输入光光强。

由于传输矩阵 $R_{\text{out}1} R_3$ 只改变光的偏振态, 不改变输出光强, 所以 $I_{\text{out}1} = I_5$ 。

$$\text{令 } \Delta\beta = \beta_2 - \beta_1, \bar{\beta} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}, \Omega_{3-1} = \Delta\beta L_1, \phi = \\ \beta L_2 - \bar{\beta} L_1 - \frac{\pi}{2}, \text{ 即 } \beta_1 = \bar{\beta} - \frac{\Delta\beta}{2}, \beta_2 = \bar{\beta} + \frac{\Delta\beta}{2}, \text{ 由} \\ \cos 3k_c l_c = -\frac{1}{2} \text{ 可得:}$$

$$I_{\text{out}1} = \frac{1}{3} \cos^2 \frac{\theta}{2} I_0 \left[1 + \cos \left(\phi + \frac{\Omega_{3-1}}{2} + \frac{2\pi}{3} \right) \right] + \\ \frac{1}{3} \sin^2 \frac{\theta}{2} I_0 \left[1 + \cos \left(\phi - \frac{\Omega_{3-1}}{2} + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (15)$$

同理可得:

$$I_{\text{out}2} = \frac{1}{3} \cos^2 \frac{\theta}{2} I_0 \left[1 + \cos \left(\phi + \frac{\Omega_{3-1}}{2} \right) \right] + \\ \frac{1}{3} \sin^2 \frac{\theta}{2} I_0 \left[1 + \cos \left(\phi - \frac{\Omega_{3-1}}{2} \right) \right] \quad (16)$$

$$I_{\text{out}3} = \frac{1}{3} \cos^2 \frac{\theta}{2} I_0 \left[1 + \cos \left(\phi + \frac{\Omega_{3-1}}{2} - \frac{2\pi}{3} \right) \right] + \\ \frac{1}{3} \sin^2 \frac{\theta}{2} I_0 \left[1 + \cos \left(\phi - \frac{\Omega_{3-1}}{2} - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (17)$$

4 干涉仪传输特性分析

将干涉仪输出端光强关系式进行三角变换, 得:

$$I_{\text{out}1} = \frac{1}{3} I_0 \\ \left\{ 1 + \left[\cos^2 \frac{\Omega_{3-1}}{2} + \cos^2(\theta) \sin^2 \frac{\Omega_{3-1}}{2} \right]^{1/2} \cos(\phi - \gamma) \right\} \\ = \frac{1}{3} I_0 \left\{ 1 + K \cos \left(\phi - \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right\} \quad (18)$$

其中, K 为干涉仪干涉条纹可见度。

$$K = \left[\cos^2 \frac{\Omega_{3-1}}{2} + \cos^2 \theta \sin^2 \frac{\Omega_{3-1}}{2} \right]^{1/2} \\ = \left[1 - \sin^2 \theta \sin^2 \frac{\Omega_{3-1}}{2} \right]^{1/2} \quad (19)$$

$$\tan \gamma = \tan \left(\frac{\Omega_{3-1}}{2} \right) \cos \theta \quad (20)$$

同理可得:

$$I_{\text{out}2} = \frac{1}{3} I_0 \{ 1 + K \cos(\phi - \gamma) \} \quad (21)$$

$$I_{\text{out}3} = \frac{1}{3} I_0 \left\{ 1 + K \cos \left(\phi - \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \right\} \quad (22)$$

由式(18)、式(21)、式(22)可知, 基于 3×3 耦合器的非平衡光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的三路输出光强彼此之间存在 120° 相位差, 且同时受到可见度 K 和相移 γ 的影响。由式(19)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 $|\Omega_{3-1}| \neq \pi$ 时, 对于不同的 θ 角, 可见度将在: $V_{\text{max}} = 1, V_{\text{min}} = \cos(\Omega_{3-1}/2)$ 之间变化。由式(20)可知, 当 θ 角变化时, 引入的相移 γ 将发生变化。当外界环境发生变化, 输入光场偏振态与干涉仪本征矢量相对位置发生变化, 即 θ 角发生变化, 必将引起干涉仪输出端可见度 K 和相移 γ 的变化, 对于干涉三路输出光强的可见度和相位产生相同的影响。

4 结 论

本文运用波导耦合理论和光纤偏振光传输理论, 在考虑外界因素对干涉仪产生影响的前提下, 对基于 3×3 耦合器的非平衡光纤 Mach-Zehnder 干涉仪传输特性进行研究, 通过理论推导, 得出干涉仪三路输出光强的表达式。经分析得出一般性结论, 即干涉仪三路输出光强相互之间存在 120° 的稳定相位差, 且三路输出光强的可见度和相位噪声同时会受到入光场偏振态与干涉仪本征矢量之间的夹角 θ 的影响。

参考文献:

- [1] 贾宝华, 盛秋琴, 施可彬, 等. 光纤光栅振动传感解调方法的研究[J]. 光电子·激光, 2001, 12(7): 758 - 761.
- [2] Sheem S K. Optic fiber interferometers with 3×3 directional couplers; analysis[J]. J Appl Phys, 1982, 52(6): 1267 - 1277.
- [3] 沈梁, 叶险峰, 李志能. 干涉型光纤水听器调制解调方案研究[J]. 半导体光电, 2001, 22(2): 105 - 108.
- [4] 范崇澄, 彭吉虎. 导波光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [5] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] 李东, 张晓晖, 黄俊斌, 等. 非平衡光纤 Mach-Zehnder 干涉仪偏振衰落及相位噪声分析[J]. 激光与红外, 2005, 35(3): 217 - 220.
- [7] Ja Y H. Analysis of four-port optical fiber ring and loop resonators using a 3×3 fiber coupler and degenerate two-wave mixing[J]. Quantum Electronics, 1992, 28(12): 2749 - 2757.
- [8] Ja Y H. A vernier fiber double-ring resonator with a 3×3 fiber coupler and degenerate two-wave mixing[J]. Photonics Technology Letters, 1992, 4(7): 743 - 745.