

一种新型高灵敏度光纤干涉仪

陈晓光

(浙江大学信息与电子工程系, 浙江大学分部 140 信箱, 杭州 310008)

提 要

本文提出并分析了一种新型的光纤干涉仪, 该仪器对 Mach-Zehnder 干涉仪作了适当的改进, 使灵敏度提高近 6 倍。通过对干涉仪臂长的适当调节, 还可以实现对“共模”噪声的抑制, 减小光源波长波动及环境干扰对系统的影响。

关键词: 干涉仪、光纤传感器、灵敏度。

一、引 言

光纤干涉型传感器在许多应用中都获得了极高的灵敏度^[1]。通过增加传感光纤的长度或干涉仪本身的灵敏度可以获得极高灵敏度的光纤传感器。

对于目前最常用的 Mach-Zehnder 光纤干涉仪, 如果要完全消除干涉仪对光源波长扰动及环境变动(如随机压力和温度变化的影响)等“共模”扰动的影响, 必须使得光纤干涉仪的传感臂与参考臂长度精确相等。但这样的测量系统的灵敏度也同时变为零。

本文提出并分析了一种新型的光纤干涉仪结构, 该系统光学回路更复杂, 灵敏度更高, 并且对“共模”扰动进行补偿, 还可用于常规的光学干涉计量(空间光路干涉)。

二、系统结构与分析

如图 1(a) 所示, 新的干涉结构可以看作是采用光纤环路延迟线作为传感臂的 Mach-Zehnder 光纤干涉仪。为简化分析, 假定系统光源的相干长度 $L_c \gg \text{Max}(L_s, L_r, L_f)$ 。其中 L_i 为图 1 中各相应路径光纤的长度。此外, 还假定光在光纤中单一极化单模传播, 这一点可以通过采用单模保偏光纤或采用偏振控制器实现。

在相干光激励下, 这些光学回路的传播系数具有 2π 的周期。激光在光纤中传播的相位延迟可表示为:

$$\begin{aligned} U_f &= n_e k_0 L_f = p + 2 N_f \pi, & U_s &= n_e k_0 L_s = p_s + 2 N_s \pi, \\ U_r &= n_e k_0 L_r = p_r + 2 N_r \pi, \end{aligned}$$

其中: $0 < p, p_r, p_s < 2\pi$, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$, λ_0 为光波波长, N_i 为正整数。

图 1(a) 中光纤环路延迟线各端口场值关系为:

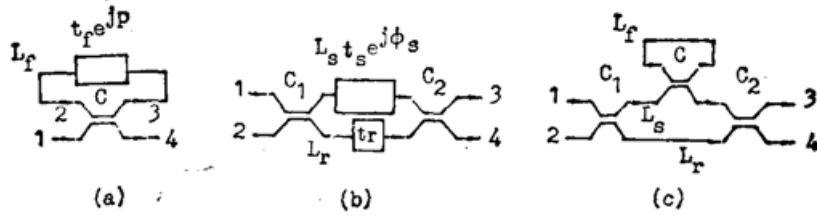


Fig. 1 Schematic diagrams of fiber-optic sensors employing
(a) recirculating delay line; (b) Mach-Zehnder interferometer; (c) new circuit

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ E_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$E_2 = E_3 \cdot t_f \cdot e^{j\phi}, \quad (2)$$

E_i 为各端口的光场幅度, 且^[2]

$$\left. \begin{aligned} A &= (t_+ e^{j\beta} + t_- e^{-j\beta})/2 = [ae^{j\theta}] \cos \beta \\ B &= (t_+ e^{j\beta} - t_- e^{-j\beta})/2 = j[be^{j\theta}] \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 t_+ 、 t_- 分别为光纤耦合器 C 的对称模与不对称模的传输系数, β 为耦合角^[3]。

将(2)式代入(1)式, 可以推出:

$$E_4 = \frac{B^2 t_f^2 e^{j\phi} + A - A^2 t_f e^{j\phi}}{1 - A t_f e^{j\phi}} E_1. \quad (4)$$

对于理想无损耗 3 dB 光纤定向耦合器, $t_+ = t_- = 1$, $\beta = \frac{\pi}{4}$, 代入(3)、(4)式可以得到:

$$E_4 = t' E_1 e^{j\phi_1}, \quad (5)$$

其中:

$$t' = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} + t_f^2 - \sqrt{2} t_f \cos p}{1 + \frac{1}{2} t_f^2 - \sqrt{2} t_f \cos p}}, \quad (6)$$

$$\phi_1 = \arctg \frac{-t_f \sin p}{\frac{\sqrt{2}}{2} - t_f \cos p} - \arctg \frac{-\frac{\sqrt{2}}{2} t_f \sin p}{1 - \frac{\sqrt{2}}{2} t_f \cos p}. \quad (7)$$

这样可以直接推导图 1(c) 中的光纤干涉仪 C_2 输出端的场值。各场值关系如下:

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ B_2 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_s t' e^{j\phi_s} & 0 \\ 0 & t_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ B_1 & A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中:

$$\phi_4 = \phi_1 + n_e k_0 (L_s - L_r) = \phi_1 + \phi_s + 2N\pi. \quad (9)$$

同样, 假定光纤耦合器 C_1 、 C_2 为理想无损耗 3 dB 定向耦合器。由(8)式可以推出 C_2 输出端口的场值:

$$E_3 = \frac{1}{2} (t_s t' e^{j\phi_4} - t_r) E_1, \quad (10)$$

$$E_4 = \frac{1}{2} j (t_s t' e^{j\phi_4} + t_r) E_1. \quad (11)$$

全系统的传输系数可表示为:

$$T_1 = \left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2 = \frac{1}{4} t_r^2 + \frac{1}{4} t_s^2 t'^2 - \frac{1}{2} t_r t_s t' \cos \phi_\Delta, \quad (12)$$

$$T_2 = \left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = \frac{1}{4} t_r^2 + \frac{1}{4} t_s^2 t'^2 + \frac{1}{2} t_r t_s t' \cos \phi_\Delta. \quad (13)$$

同样,对于图 1(b)的 Mach-Zehnder 干涉仪,由其场值关系:

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ B_2 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_s e^{j\phi_s} & 0 \\ 0 & t_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ B_1 & A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

其系统传输系数 T :

$$T_{MZ} = \left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = \frac{1}{4} t_r^2 + \frac{1}{4} t_s^2 + \frac{1}{2} t_r t_s \cos \phi_s. \quad (15)$$

三、灵敏度分析

在理想情况下(无耗时),干涉仪的传输系数 T 的变化仅与 $\cos \phi_\Delta$ 有关,这里给出归一化的 T

$$\varphi_1 = \arctg \frac{-\sin p}{\frac{\sqrt{2}}{2} - \cos p} - \arctg \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} \sin p}{1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos p}, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} T &= \cos(\phi_s + \phi_1) = \cos \phi_s \cos \phi_1 - \sin \phi_s \sin \phi_1 \\ &= \frac{\sqrt{2} - \frac{3}{2} \cos p}{\frac{3}{2} - \sqrt{2} \cos p} \cos \phi_s - \frac{\frac{1}{2} \sin p}{\frac{3}{2} - \sqrt{2} \cos p} \sin \phi_s. \end{aligned} \quad (17)$$

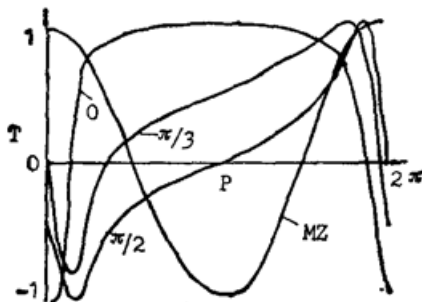


Fig. 2 Transmittance versus new interferometer's phase bias p for different Mach-Zehnder phase difference

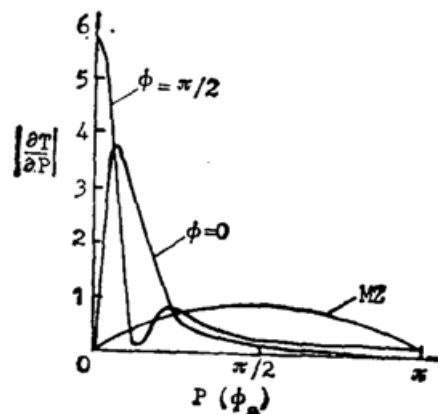


Fig. 3 Sensitivity versus new circuit's phase bias p ($|\frac{\partial T}{\partial p}|$) and MZ's phase difference ϕ_s ($|\frac{\partial T}{\partial \phi_s}|$)

图 2 中给出了在不同的 ϕ_s 相位偏置下 ($\phi_s = 0, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{2}$) 干涉仪的传输比随环路相位偏置 P 的变化曲线。同时给出了 Mach-Zehnder 干涉仪对应的函数关系。

图 3 给出系统对微弱传感量的灵敏度 $\left(\left| \frac{\partial T}{\partial p} \right|, \left| \frac{\partial T}{\partial \phi_s} \right| \right)$ 。显然, 新的干涉仪的灵敏度有很大改善, 当 $\phi_s = \frac{\pi}{2} + 2N\pi$ 时, $p = 2M\pi$ 可达到比 Mach-Zehnder 干涉仪高 5.8 倍的灵敏度 (Mach-Zehnder 光纤干涉仪锁定于 $\frac{\pi}{2}$), 在相位偏置 $\phi_s = 0$ 时也可达到较 MZ 最大灵敏度高 3.8 倍的结果。

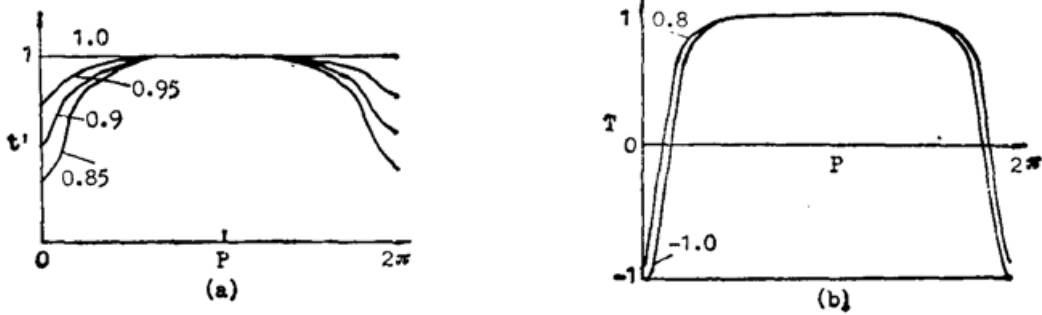


Fig. 4

(a) t' versus phase bias p for different loop transmission;

(b) Transmittance ($\cos \phi_1$) versus phase bias p for diff loop transmission

图 4 给出了光纤环路的传输系数 t_f 对 t' 及 T 的影响 (T 限于 $\cos \phi_1$)。当 t_f 逐渐减小时, 系统的传输系数函数关系变得越来越复杂, 因为实际光纤的损耗非常小, 也就不难做到使 $t_f \rightarrow 1$ 。使系统的传输关系简明化。

再考虑“共模”补偿问题。各干涉系统对信号的灵敏度 (S_p, S_s)、光源波长变动 (S_λ) 以及环境扰动 (S_ν) 的灵敏度分别为:

(1) Mach-Zehnder 光纤干涉仪^[4]

$$\left. \begin{aligned} S_s &= \frac{dT}{dS} = 2\pi \frac{\partial T}{\partial \phi_s} \frac{L_s}{\lambda_0} \frac{dn_e}{dS}, \\ S_\lambda &= \frac{dT}{d\lambda} = 2\pi \frac{\partial T}{\partial \phi_s} \frac{(L_s - L_r)}{\lambda_0} \frac{n_e}{\lambda_0}, \\ S_\nu &= \frac{dT}{d\nu} = 2\pi \frac{\partial T}{\partial \phi_s} \frac{(L_s - L_r)}{\lambda_0} \frac{dn_e}{d\nu}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

(2) 图 1(c) 光纤干涉仪

$$\left. \begin{aligned} S_p &= \frac{dT}{dp} = 2\pi \frac{\partial T}{\partial P} \frac{L_f}{\lambda_0} \frac{dn_e}{dP}, \\ S_\lambda &= \frac{dT}{d\lambda} = 2\pi \frac{\partial T}{\partial \phi_s} \frac{(L_s - L_r)}{\lambda_0} \frac{n_e}{\lambda_0} + 2\pi \frac{\partial T}{\partial p} \frac{L_f}{\lambda_0} \frac{n_e}{\lambda_0}, \\ S_\nu &= \frac{dT}{d\nu} = 2\pi \frac{\partial T}{\partial \phi_s} \frac{(L_s - L_r)}{\lambda_0} \frac{dn_e}{d\nu} + 2\pi \frac{\partial T}{\partial p} \frac{L_f}{\lambda_0} \frac{dn_e}{d\nu}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

如果 Mach-Zehnder 干涉仪调节到对“共模”扰动的灵敏度为零, 即 $L_s - L_r = 0$, 则测量灵敏度 S_s 也变为零。而本文可以通过调节新干涉结构的相位偏置, 使 S_λ 及 S_ν 减小, 实现共模噪声抑制, 减小光源波长变动及环境干扰对系统的影响。

四、结 语

研究表明, 通过适当的调节干涉仪的相位偏置, 本文提出的新的干涉结构可以得到

比 Mach-Zehnder 光纤干涉仪更高的灵敏度, 且具有“共模”补偿能力。作为一种高灵敏度的光纤干涉型传感器, 该系统与常规的 Mach-Zehnder 干涉型传感器在结构和原理上都很相近, Mach-Zehnder 光纤传感器中的很多技术都可以得到应用, 和 Mach-Zehnder 干涉仪一样也可用于空间光路的干涉计量。

参 考 文 献

- [1] T. G. Giallorenzi *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1982, **QE-18**, No. 4 (Apr), 626.
- [2] R. O. Youngquist *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1983, **QE-19**, No. 8 (Aug), 1888.
- [3] A. Yariv; *IEEE J. Q. E.*, 1973, **QE-9**, No. 6 (Jun), 919.
- [4] B. B. Buckman; *J. LT.*, 1989, **LT-7**, No. 1 (Jan), 151.

A new type of fiber-optic interferometer with high sensitivity and common mode compensation

CHEN XIAOGUANG

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 22 November 1990; revised 21 March 1991)

Abstract

A new type of fiber-optic interferometer is proposed and analysed. Based on Mach-Zehnder interferometer, this novel fiber-optic interferometer offers higher sensitivity, together with the unique capability of compensation for optic source's wavelength and environmental fluctuations by appropriate adjustment of its two phase biases.

Key words: optic interferometer; optical fiber sensors; sensitivity.