

全保偏光纤迈克尔逊干涉仪*

胡永明 陈 哲 孟 洲 张 旭 宋章启

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

提要 报道了全保偏光纤迈克尔逊干涉仪的研究结果。实验中采用熊猫保偏光纤、磨抛型保偏光纤偏振器(消光比为 35 dB, 损耗 < 0.5 dB)和熔锥型保偏耦合器(消光比为 20~25 dB, 损耗 < 1 dB), 用压电陶瓷相位调制器实现工作点控制, 在一些频段上, 相位检测灵敏度可达 10^{-3} rad。

关键词 保偏光纤, 迈克尔逊干涉仪, 相位检测, 传感器

1 引 言

光纤传感器的高灵敏度是各类应用中人们普遍感兴趣的特性, 而这些高灵敏度大都建立在以干涉仪为基础的相干检测上。由于受到元器件, 特别是高性能的保偏耦合器和偏振器的限制, 国内以往的工作大都建立在单模非保偏光纤及器件构成的干涉仪系统之上。在这些系统中, 由于相干光对偏振态的基本要求都得不到很好的满足, 系统存在较大的偏振起伏和噪声, 这些研究工作很难深入和推向实用。

为解决光纤相干光检测的关键技术问题, 我们成功地研制了高性能保偏光纤耦合器^[1]和保偏光纤偏振器^[2], 在这些工作基础上, 建立了全保偏光纤迈克尔逊干涉仪装置; 实现了全保偏光纤迈克尔逊干涉仪的低噪声、高灵敏度相干检测。

2 系统原理及构成

为保障相干光对偏振态的基本要求, 整个系统采用保偏光纤和相应的保偏光纤器件构成, 如图 1 所示。

从半导体激光器 LD 输出的光, 耦合到保偏光纤中, 经过保偏光纤偏振器 P_1 起偏, 通过保偏耦合器 C 分束进入干涉仪的两条光纤臂中, 在光纤臂的两端直接镀上反射膜以实现传统分立元件迈克尔逊干涉仪中两反射镜的功能, 由此反射回来的光再经耦合器 C 进入检偏器 P_2 , 最后由探测器 D 检测。为了调整

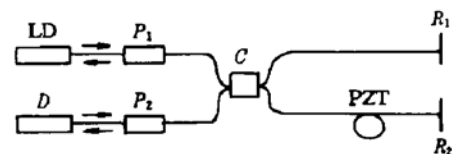


图 1 全保偏光纤迈克尔逊干涉仪

Fig. 1 Scheme of the all polarization-maintaining fiber Michelson interferometer

LD: laser diode; P_1 : polarizer; C : coupler; R_1 : reflector;

PZT: piezoelectric phase modulator, D : detector

* 国防科技试验技术研究基金资助项目。

干涉仪的臂长,将一光纤臂缠绕在压电陶瓷环上,这样可以方便地控制系统的工作点。两条光纤臂在不同的应用场合中都可以作为传感臂。该系统工作波长为 $1.3 \mu\text{m}$, 光纤为熊猫型保偏光纤, 光纤消光比为 30 dB, 偏振器采用磨抛型保偏偏振器, 耦合器为熔锥型保偏耦合器, 在光纤端头的反射镜由铝膜构成, 本征反射系数 $R \sim 92\%$ 。

该干涉仪最大的特点是光路全封闭, 结构灵活, 不象分立元件迈克尔逊干涉仪有极高的环境和调整要求, 因此, 它的应用可以延伸到许多传统干涉仪的禁区。当然, 作为高灵敏度的检测系统, 它的性能也将面临多种因素的影响, 这将在下面作进一步的讨论。

3 关键实验技术及性能分析

光纤迈克尔逊干涉仪多用于传感外界的微小变化量, 一般要求有 10^{-3} 或更高的相位检测精度^[3], 因此, 系统的控制和信号处理有许多独特的要求, 对许多因素必须认真地加以考虑。

3.1 工作点的控制

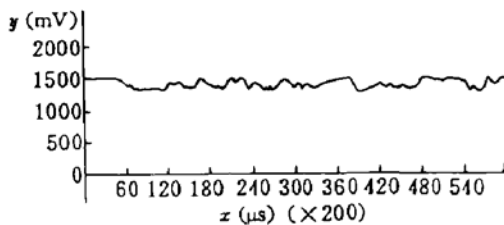


图 2 $\Delta\Phi$ 随多种因素作无规则变化
Fig. 2 Irregular change of $\Delta\Phi$ affected by several factors

对一个实际的系统, 两光纤臂间的相位差 $\varphi_{1r} - \varphi_{2r}$ 可以是 $0 \sim 2\pi$ 间的任何值, 而且还会因外界多种因素的影响作无规则的变化(图 2), 在这种情况下是无法用该系统进行传感检测的, 须对系统的工作点进行控制。

对系统输出的干涉信号 I , 令 $\varphi_{1r} - \varphi_{2r} = \Phi_s + \Phi_e$

$$I \sim \cos(\Phi_s + \Phi_e) \tag{1}$$

Φ_s 是待测信号, 一般情况 $\Phi_s \ll 1$, Φ_e 是系统两臂固有相差和各种干扰及噪声的总和。为保证对 Φ_s 的测量, 我们通过调节压电陶瓷上的电压, 改变一臂的光纤, 引入一相差 Φ_c , 并使 Φ_s, Φ_c 之和 Φ_0 为一常数, 即

$$\Phi_0 = \Phi_s + \Phi_c = \pi/2 + 2n\pi \tag{2}$$

这样可使

$$I \sim \sin\Phi_s \tag{3}$$

这一过程通过微机闭环控制实现。首先逐渐改变控制电压, 得到 I_{\max} 和 I_{\min} , 最后调节电压, 使系统稳定在 Φ_0 处, 实际控制过程如图 3。

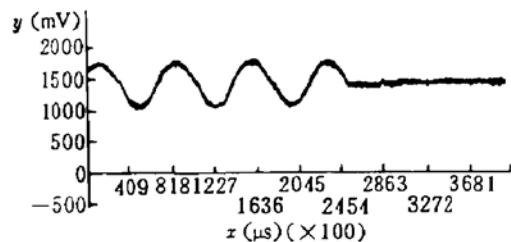


图 3 工作点搜寻过程和控制结果
Fig. 3 Shows the searching process for the operating point and the controlled result

需指出的是, 在工作点控制中, 系统的相差将受到不断的扰动, 为了减小这一影响, 一般适当扩大工作点的范围, 尽量减小对 Φ_0 的调整和对系统的扰动。实验结果表明 Φ_s 一般是缓变的, 所以可通过信号的频谱特征将 Φ_s 分离出来。 Φ_s, Φ_e 之间存在频谱的差异是对光纤迈克尔逊干涉仪应用的基本要求和限制, 它一般只适用于检测有一定频率或瞬态的信号, 在一些最重要的应用中, 如水声探测、地震波传感等都能很好满足这一要求。

3.2 偏振态控制及偏振噪声抑制

理想的干涉仪应该严格地工作在单偏振态。在本系统中, 采用了保偏光纤和相应的保偏器

件,以使系统工作在一个较确定的偏振态如 E_x , 但实际系统由于光源的非理想偏振、光纤及各器件中正交偏振态间的交叉耦合等因素,将导致系统的偏振噪声。

在系统中,LD 光源输出的是一个非理想的线偏振光 ($E_x \sim 10^{-2}E_z$),偏振器有限的消光比,光纤和耦合器中 E_x, E_z 的交叉耦合都将导致系统偏振噪声,计算可得该系统理论偏振相位噪声在 10^{-5} rad 以下。

顺便指出,对于普通单模光纤,由于几何结构的非完全对称、残余和外加应力的存在,两正交偏振模不能完全相同,而单模的光纤耦合器,能量在 E_x, E_z 间的分配也是不定的。虽然单模光纤系统在某些情况下也可达到较高的灵敏度,但这样的系统是不稳定和不可靠的,因此单模光纤系统很难达到较好的性能和实用化。

3.3 影响系统的其它因素

对理想的干涉仪,两相干光的强度应相等,对实际的光纤系统,要做到这一点非常困难,它主要受到以下因素的影响:1) 耦合器分束比偏差,2) 两端熔接点的损耗不一致,3) 光纤两臂端面不垂直,这些因素影响的直接结果是相干功率下降,或等效于系统总损耗增加。在实验中,耦合器分束比偏差 $< 5\%$,但由于熔接头和端面的影响,实际有效相干功率只达到理想情况的 $1/2$ 。

与传统分立元件迈克尔逊干涉仪相比,光纤干涉仪还须认真考虑相干长度的问题。由于光纤相干系统多采用半导体激光器作光源,其相干长度一般只有 $0.01 \sim 0.1$ m 量级,在实验中应尽量保证两光纤臂长度一致,一般长度差应尽量小于 0.01 m。

在高精度的系统中,还须考虑光纤中瑞利散射的影响,这一影响与光纤的散射系数和光源的相干长度有关,相干长度越长,这一影响越大,对一般的保偏光纤和半导体光源,散射相位噪声在 10^{-3} 量级。实验中须对光纤和光源进行必要的筛选。

此外,必须对光电探测电子系统噪声及干扰进行有效的抑制。

4 相位检测灵敏度

相位检测灵敏度是系统综合性能的最终反映,采用全保偏光纤和高性能的元器件后,该系统的固有相位噪声在 10^{-5} 以下,但对于外界因素的影响则很难彻底消除。在光纤陀螺中,由于两相干光路是互易的,外界干扰可通过光路互易和信号处理来有效抑制,系统综合相位检测灵敏度可在 10^{-6} 以上,但在光纤迈克尔逊干涉仪中,相干光路是非互易的,外界干扰完全靠信号处理来抑制,相位检测不可能达到光纤陀螺那样高的精度。

在本实验系统中,相干信号幅度可达 1 V 左右,在 $10^2 \sim 10^4$ Hz 频段噪声电压约为 $0.1 \sim 1$ mV/(Hz) $^{0.5}$,相位检测灵敏度为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ rad 量级,图 4 给出 $f_0 = 10^3$ Hz, $\Delta f = 1$ Hz 时数字互相关器输出的噪声信号,虽然这一相位检测灵敏度距系统理论极限还差 2 个量级,但这已能很好满足许多应用的要求。

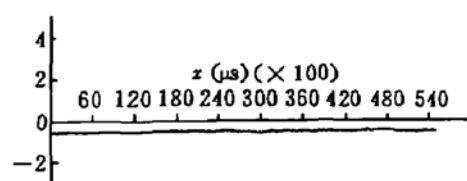


图 4 数字互相关器输出的噪声信号
Fig. 4 Noise output of the numerical correlator

参 考 文 献

- 1 陈 哲,胡永明,曾 淳等. 用于保偏光纤耦合器的熊猫光纤研究. 光子学报,95 集成光学、纤维光学、光通信专集,1996,25(Z1): 401~403
- 2 廖延彪,胡永明,吴庚生等. 光纤偏振器实验研究. 第六届全国光通讯会议文集,1993,北京,797~799
- 3 张志鹏,W. A. Gambling. 光纤传感器原理. 北京:中国计量出版社,1991,163~172

An All Polarization-maintaining Fiber Michelson Interferometer

Hu Yongming Chen Zhe Meng Zhou Zhang Xu Song Zhangqi

(*Department of Applied Physics, National University of Defence Technology, Changsha 410073*)

Abstract This paper describes the experimental results of an all polarization-maintaining (PM) fiber Michelson interferometer system. In experiment, we used a Panda PM fiber, PM polarizers fabricated through lapping and polishing (extinction ratio 3 dB, loss < 0.5 dB), and a tapered fusion PM coupler (extinction ratio 20~25 dB, loss < 1 dB). The operating point is maintained through the use of a piezoelectric phase modulator. The phase detection sensitivity has been found to be better than 10^{-3} rad over a certain frequency range.

Key words polarization-maintaining fiber, Michelson interferometer, phase detection, sensor