

文章编号 1004-924X(2016)增-0197-06

用于 Mach-Zehnder 干涉仪的双向双阈值 条纹计数方案

崔洪亮,郎金鹏,常天英*,陈建冬,于 淼
(吉林大学 仪器科学与电气工程学院,吉林 长春 130012)

摘要:为了精确测量干涉信号中相位改变量,建立了基于马赫增德尔干涉的光路结构,提出了一种高精度的条纹计数解调方案。首先,对马赫增德尔干涉的结构进行了介绍,对基于 3×3 耦合器的马赫增德尔干涉结构的输出信号进行了分析,并利用输出干涉信号与输入光强信号的关系,提出了抗光源扰动影响的数据处理方案。接着分析了传统的条纹计数解调方案,提出了一种高精度的解调方法,该方法将传统的过零检测法与阈值判别法结合,并将传统的单向判向计数更改为双向判向计数。最后,搭建了一种 MZ 干涉系统,并以光纤拉伸实验对改进的解调方案进行验证。实验和分析表明,改进的条纹计数解调方案相比于传统的条纹计数方案判向次数提高 4 倍,可以实现 $\pi/4$ 相位改变量的测量,相位解调精度为传统计数方案的 4 倍得到了明显的提高。

关键词:相干光学;马赫增德尔干涉;相位解调方案;条纹计数; 3×3 耦合器

中图分类号:TN253;TN763 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0197

Fringe counting scheme with two directions and dual threshold for Mach-Zehnder interferometer

CUI Hong-liang, LANG Jin-peng, CHANG Tian-ying*, CHEN Jian-dong, YU Miao

(College of Instrumentation & Electrical Engineering,
Jilin University, Changchun, 130012, China)

* Corresponding author, E-mail: tchang@jlu.edu.cn

Abstract: To realize accurate measurement of phase shift of interference signals, an optical path structure based on Mach-Zehnder Interferometer was established. A fringe counting demodulation scheme with high accuracy was put forward. Firstly the structure of Mach-Zehnder Interferometer was introduced, and a data processing scheme for resisting light source interference was proposed base on the relationship between the input light intensity signal and output interference signal, which was from Mach-Zehnder Interferometer with 3×3 fiber coupler. Then due to the deficiency of conventional fringe counting demodulation, an improved demodulation with high accuracy was proposed by combining zero-cross detection with threshold method. This method changes the unidirectional counting single into bidirectional counting single. Finally, an interference system based on Mach-Zehnder Interferometer was established for the verification of the improved demodulation scheme through optical tensile experiment. The experiment result shows the direction judgment times of the improved demodulation

收稿日期:2016-06-04;修订日期:2016-06-21.

基金项目:中国海洋局资助项目(No. 201405026-01);十二五国家科技支撑计划资助项目(No. 2012BAK04B03);科技部国际部国际合作项目(No. 2013DFA11550)

tion scheme is 4 times as many as that of conventional scheme, and $\pi/4$ phase change quantity can be realized. The demodulation accuracy of the improved demodulation scheme increases dramatically, for the total phase demodulation accuracy is improved to 4 times of the traditional count scheme.

Key words: coherence optics; Mach-Zehnder interference; phase demodulation scheme; stripe count; 3×3 coupler

1 引言

Mach-Zehnder(MZ)干涉仪是一种典型的双光束干涉仪,由德国物理学家路德维希·马赫和路德维·增德的名字命名,增德尔首先于1891年提出这种构想^[1],马赫于1892年对该构想进行了改良^[2]。对于同一光源分成的两束光汇合后产生干涉,MZ干涉结构可以实现对光经过不同路径或介质所产生的相位变化的测量。随着光纤传感技术的发展和成熟,光纤传感器被广泛应用于工业医疗、海洋检测、国防科技等领域^[3-5]。光纤干涉型传感器的应用与研究也不断取得进步,基于MZ干涉的光纤传感器在振动检波、压力测量、应变检测等领域取得了巨大进步。

光纤干涉型传感器通常采用光电探测器对干涉信号进行探测,干涉信号转化为电信号,最后对电信号进行数据处理,从而实现待测物理量的测量。在以MZ干涉结构实现压力应变等测量的传感器中,条纹计数解调方法因简单高效而广泛应用于生产实践当中。1998年,南京航空航天大学毛良明教授对判向光纤干涉型传感器进行了研究,该传感器主要依据MZ结构和 3×3 耦合器的性质实现了条纹的判向和计数。受限于当时的实验条件,解调只能依赖于基本电路,解调结果的稳定性和精度都不是特别理想^[6]。随着数据采集技术和计算机处理技术的发展,信号处理技术不断进步。暨南大学的高应俊教授带领的团队在建立的F-P干涉解调系统中,提出了改进的条纹计数法,通过设置产生脉冲信号的阈值提高了计数的可靠性,同时提出了一种动态取阈值的方法,提高了干涉条纹计数法的精度^[7]。集美大学赵伟和长沙理工宾峰等人提出的干涉条纹计数方法也在一定程度上提高了条纹计数的精度和效率^[8-9]。马来西亚工艺大学 ISMAIL 等人提出了一种改进的计数方案,通过时域与频域信号的结合来提高计数分辨率^[10]。日本科学家 ribun onodera 等也对条纹计数法进行了深入研究^[11-13]。部分条纹

计数法的应用虽然并不是依据MZ干涉设计的,但对以MZ干涉结构为基础的传感系统同样适用。

本文对MZ干涉系统的组成及输出信号的形式进行了说明,基于常用的条纹计数法提出了一种双向双阈值条纹计数解调方案,搭建了基于MZ干涉的光路系统进行方案验证。结果表明,改进的技术方案在光强的改变周期内进行了多次细分与计数,相位变化的计数精度得到了明显的提高。

2 Mach-Zehnder 干涉结构及解调原理

2.1 MZ 干涉结构及信号输出

图1为一种基于MZ干涉的光纤干涉结构。半导体激光器发出的光经过 2×2 耦合器分成两束,两束光是频率相同、振动方向形同、相位差恒定的相干光,满足干涉的基本条件。从 2×2 耦合器输出的两束光分别经过信号臂和参考臂后进入 3×3 耦合器,在 3×3 耦合器中产生干涉。光纤长度、纤芯折射率以及纤芯直径的变化都会引起光纤中传输光的相位变化,即光纤具有应变效应、光弹效应和泊松效应,其中光纤的应变效应起主要作用。当作用在信号臂上的外界物理量发生变化时会引起信号臂长度的变化,从而使得信号臂与参考臂之间的相位差发生变化,进而使干涉信号发生改变。 3×3 耦合器中发生干涉的两路信号由 3×3 耦合器分成3束,分别通过光电转换将干涉信号转化为光强信号。光强信号随着相位变

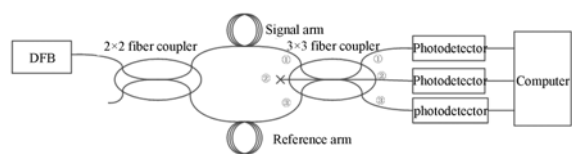


图1 基于马赫-增德尔的干涉传感结构

Fig. 1 Optical path based on Mach-Zehnder interferometer

化而产生周期性的变化,经上位机采集系统采集后可以进行分析处理,通过解调相位信号的变化可以实现对外界物理变化量的测量。

假设输入 2×2 耦合器的激光光强为 I_0 , 则根据直线型 3×3 耦合器的耦合特性及输入输出特性,分光比为 $1:1:1$ 的 3×3 耦合器的输出光强为:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{1}{3} \left[1 + \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \right] I_0 \\ I_2 = \frac{1}{3} [1 - \sin \theta] I_0 \\ I_3 = \frac{1}{3} \left[1 + \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right] I_0 \end{cases}, \quad (1)$$

其中: θ 为信号臂和参考臂光程差引起的相位差, I_1, I_2, I_3 为 3×3 耦合器的输出光强。分解式(1)分解得到:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{1}{2} \sin \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta \right] I_0 \\ I_2 = \frac{1}{3} [1 - \sin \theta] I_0 \\ I_3 = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{1}{2} \sin \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta \right] I_0 \end{cases}. \quad (2)$$

若取 $I_+ = I_1 + I_3$, $I_- = I_1 - I_3$, 则有:

$$\begin{cases} I_+ = \frac{1}{3} [2 + \sin \theta] I_0 \\ I_- = \frac{\sqrt{3}}{3} \cos \theta I_0 \end{cases}. \quad (3)$$

由式(2)可知,当将 3×3 耦合器的 3 个输出光强相加后可得输出总光强为 I_0 , 将式(3)中加减处理后的信号同时除以 3 路输出的总和,则:

$$\begin{cases} I'_+ = \frac{1}{3} [2 + \sin \theta] \\ I'_- = \frac{\sqrt{3}}{3} \cos \theta \end{cases}. \quad (4)$$

由式(4)可知,经过对光电探测器探测得到的两路光强信号进行简单的加减处理并将信号除以 3 路输出的光强总和。则可以得到理论不受光源扰动影响的两个正交信号,这两个正交信号构成了信号解调的基础。干涉条纹计数法在这种具有恒定相位差的干涉信号的解调上具有典型的应用。

2.2 常用的条纹计数解调方案

如图 2 所示,设图中所示的正弦信号为计数信号,余弦信号为判向信号,分别代表基于 MZ 干涉输出的经过简单处理的两路信号。在过零检测方案中,首先将计数信号转化为如图 2 所示的矩形方波,然后将矩形方波信号的上升沿和下降沿

转化为脉冲触发信号,每遇到一次触发信号进行一次计数,从而实现相位改变量的判断,但凭此不能进行相位改变方向的判断,因此需要参考判向信号进行计数。设条纹向左移动为反,向右移动为正,则当脉冲触发信号为正,判向信号为正时,条纹计数累积值加 1,判向信号为负时,条纹计数累积值减 1;当脉冲触发信号为负时,若判向信号为负,则条纹计数累积值加 1,若判向信号为正时,条纹计数累积值减 1^[14]。受噪声干扰的影响,干涉波形的波动会对条纹计数的稳定度产生影响,因此在过零检测的基础上,参考文献[14]提出了一种阈值计数法。该方法虽然可以实现相位的判向和计数,但一个周期内仅进行两次计数,精度相对较低,无法满足高精度的解调要求。

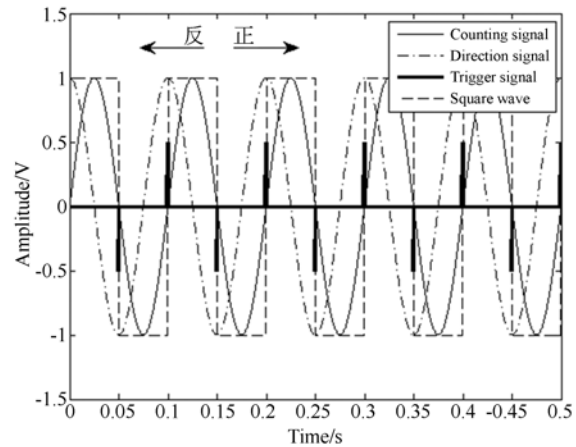


图 2 条纹计数基本信号组成

Fig. 2 Signal composition in counting algorithm

3 一种改进的条纹计数方案

无论是过零检测方案还是阈值判别方案,本质上都是在光强变化一个周期内对计数信号进行两次判向和计数,解调精度没有显著的提高,在本文提出了一种双向双阈值条纹计数方案,即在光强变化的一个周期内进行多次判向和计数。采用两组阈值,且计数信号和判向信号不固定地作为判向或计数,即计数信号可以作为判向信号,判向信号也可作为计数信号。

图 3 中,设 a 图中的正弦信号为计数信号, b 图中的余弦信号为判向信号。以计数信号为例,先通过过零检测法,使得当计数信号大于零时为正,小于零时为负,这样计数信号转化为图 3(a)中由虚线所示的方波 1。接着通过阈值判别法,

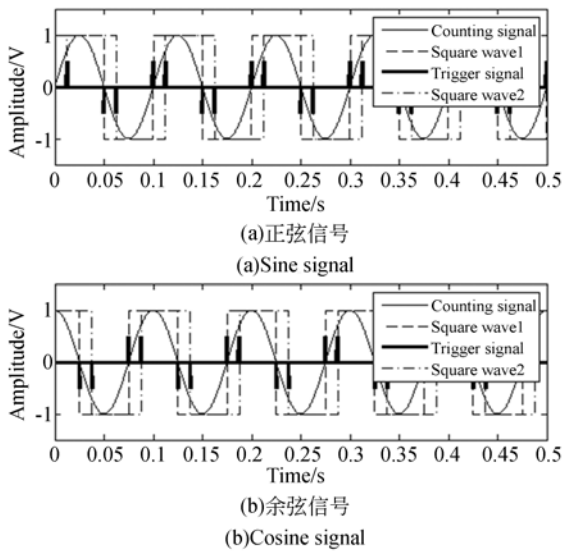


图 3 双向计数信号

Fig. 3 Signal composition in two-way counting method

即设定上阈值与阈值值,当计数信号大于上阈值时使得信号输出为 1,直到计数信号的值小于下阈值,输出信号转换为-1,这样计数信号转化为图 3(a)中点画线所示的方波 2。分别将两路方波信号在上升沿和下降沿处转化为脉冲触发信号,两种触发信号合在一起即可得到如图 3(a)所示的脉冲触发信号。此时对于计数信号,在相位变化的一个周期内总共设有两组阈值,每个周期内可进行 4 次判向和计数,计数次数相对于过零检测解调方案提高了两倍。对于 MZ 干涉结构,输出的两路信号中判向信号和计数信号并不固定。另一路的判向信号同样可以按照上文所述的数据处理方式进行处理,进而可以得到图 3(b)所示的方波信号和脉冲触发信号,在此将两路信号数据处理后得到的脉冲触发信号汇合在一起即可得到图 4 所示的触发信号。

对比图 4 中触发信号与计数信号可以发现,在计数信号光强变化的一个周期内共有 8 个计数触发脉冲。若取阈值判别法时的上阈值与下阈值分别为:

$$\text{upper} = (\max - (\max + \min)/2) \cdot \sqrt{2}/2, \quad (5)$$

$$\text{lower} = (\max + (\max + \min)/2) \cdot \sqrt{2}/2. \quad (6)$$

则光强变化一个周期内共均匀产生 8 个脉冲触发信号,即相位每变化 $\pi/4$ 进行一次计数,这样整个解调的计数精度相对于过零检测方案提高了 4 倍。对于判向,则需先判断脉冲信号由谁产生,若脉冲信号由计数信号产生,则通过判向信号进行

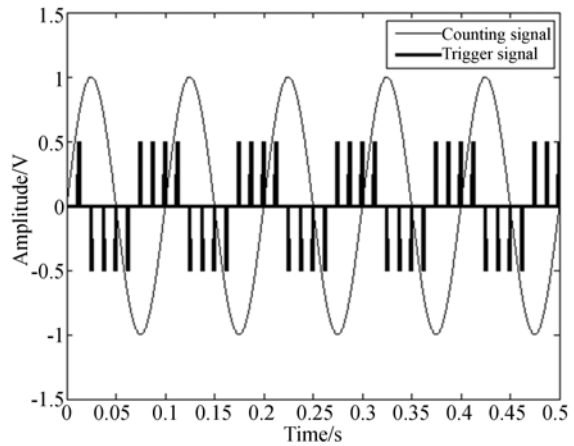


图 4 触发信号

Fig. 4 Trigger signal

判向;若脉冲信号由判向信号产生,则计数信号充当判向信号进行判向。判向与计数的流程图如图 5 所示,图中 a 和 b 分别代表由计数信号 cs 和判向信号 ds 经过数据处理而生成的触发信号, c 代表由 a 和 b 共同组合的触发信号,由于计数与判

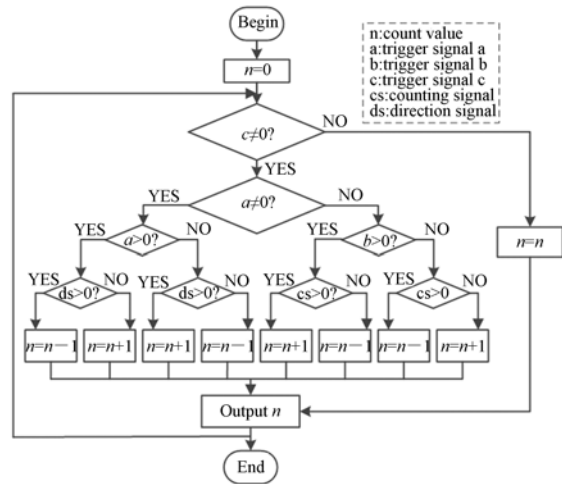


图 5 解调与判向流程图

Fig. 5 Flow chart of demodulation and directions determination

向信号具有恒定的相位差 $\pi/2$,故 a 和 b 是相互不重合的两组信号。在判向与计数中,首先判断是否有触发信号产生,即判断 c 的值是否不等于 0。若等于零即相位信号未发生变化,相反,则相位发生改变。当相位发生改变时,接着判断触发信号由谁产生,若触发信号由计数信号产生,则以判向信号为判向依据,参照过零检测方案中的判向法则进行判向和计数。若触发信号由判向信号

产生,则以计数信号为判向依据,参照过零检测方案中的判向法则进行判向和计数。对比图 2 与图 4 可知,当光强信号变化 5 个周期,即相位变化 10π 时,对于传统的计数方案会产生 10 个计数点;而对于改进的计数方法则会产生 40 个计数点,随着计数点的增多,计数精度也明显的提高。

4 系统搭建与解调测试

实验中以图 3 所示的光学系统结构图搭建了基于 MZ 干涉的光学系统,将图 3 所示的信号臂部分更改为一段可拉伸光纤,实验结构如图 6 所示。将两端套有热缩管,长约 20 cm 的光纤裸纤安装在光学平台的调整架上,通过调整架两端的

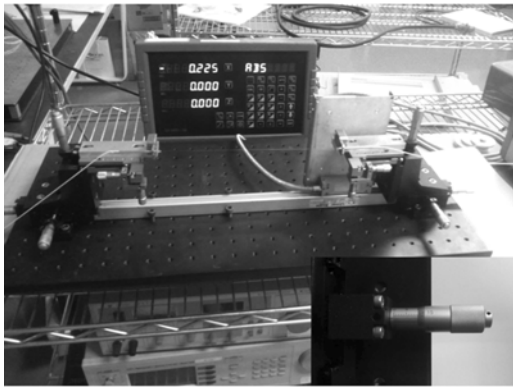


图 6 光纤拉伸实验装置

Fig. 6 Devices of optical fiber tensile test

千分尺对光纤进行拉伸实验,以改进的计数方案对相位变化进行计数。通过调节千分尺,以图中所示的光栅尺的读数为基准,光纤每拉伸 $25\ \mu\text{m}$ 进行一次计数,总共拉伸 1.25 mm。由图 7 可以看出,随着拉伸长度的增加,计数值不断增加,通过线性拟合可以得到:

$$y = 2\ 968x + 56.65, \quad (7)$$

其中: y 为计数值, x 为伸长量。经计算线性拟合的标准差为 27.92,相关系数为 0.999 4,拟合曲线与原曲线基本一致。但由于测量误差,光纤在初始状态未严格处于应力应变的线性区间内等因素的影响,拟合直线没有过零点,存在相对较小的

参考文献:

- [1] ZEHNDER L. Ein Neuer Interferenz-refraktor [M]. Springer, 1891.
[2] MACH L. Ueber einen interferenz-refraktor [J].

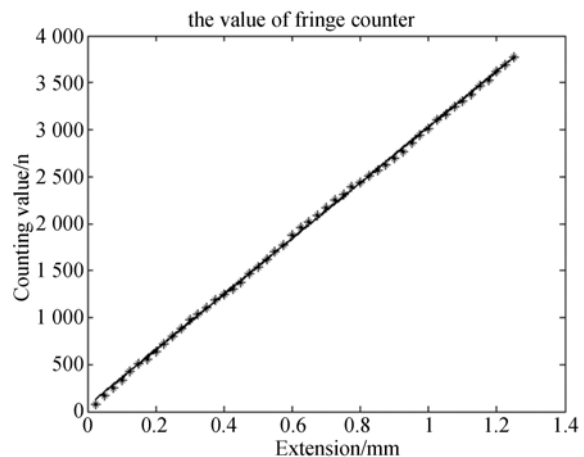


图 7 光纤拉伸实验测试结果

Fig. 7 Experimental results of optical fiber tensile test

截距。不过,总的来说光纤的伸长量与条纹计数值具有较好的线性关系,实验结果基本可靠。由于计数值每更改 8 个数,所对应的相位变化为 2π ,故伸长量 x 与相位 ϕ 之间的变化关系为:

$$\phi = 742\pi x + 14.16\pi. \quad (8)$$

由于相位变化与伸长量之间基本成正比,符合光纤的应力应变效应,故解调方案可以达到实验要求。

5 结 论

本文根据现代光纤传感器对测量精度越来越高的特点,提出了一种高精度的干涉条纹计数解调方案。首先介绍了基于 3×3 耦合器的马赫增德尔干涉的干涉原理及信号输出形式。然后在传统的条纹计数解调方案的基础上对改进的解调方案进行了说明。最后搭建了基于 MZ 干涉结构的光路系统,通过拉伸传感光纤对解调方案的可行性进行了验证。实验与理论分析表明,该方案在光强变化的一个周期内进行 8 次计数,即干涉信号中的相位每变化 $\pi/4$ 进行一次计数,相对于传统的解调方法精度提高了 4 倍。该条纹计数方案对基于 MZ 干涉的应力应变测量的实际应用具有重要意义。

Zeitschrift für Instrumentenkunde, 1892, 12: 89-93.

- [3] 赵江海,章小建. 双 Fabry-Perot 干涉腔型光纤声发射传感器[J]. 光学精密工程, 2015, 23 (11): 3069-3076.

- ZHAO J H, ZHANG X J. Fabry-optic acoustic emission sensors with dual Fabry-Perot interferometric cavities [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23 (11):3069-3076. (in chinese)
- [4] 王花平, 周智, 王倩, 等. 光纤传感器埋入沥青路面基体的应变传递误差[J]. *光学精密工程*, 2015, 23 (6): 1499-1507.
WANG H P, ZHOU ZH, WANG Q, *et al.*. Strain transfer errors of optical fiber sensors embedded in asphalt pavement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1499-1507. (in Chinese)
- [5] 傅海威, 闫旭, 邵敏, 等. 纤芯失配的光纤 Mach-Zehnder 折射率传感器[J]. *光学精密工程*, 2014, 22 (9): 2285-2291.
FU H W, YAN X, SHAO M, *et al.*. Optical fiber core-mismatched Mach-Zehnder refractive sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2285-2291. (in Chinese)
- [6] 毛良明, 孟爱东. 基于 3×3 耦合器的可判向光纤干涉型传感器研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 1998, 30 (6): 652-657.
MAO L M, MENG A D. Study on direction-judgeable fiber optical interferometer with 3×3 directional coupler [J]. *Journal of Nanjing University Aeronautics & Astronautics*, 1998, 30 (6): 652-657. (in Chinese)
- [7] 赵中华, 高应俊, 骆宇锋, 等. 干涉条纹计数法光纤 Fabry-Perot 腔液位传感器 [J]. *光子学报*, 2008, 37 (7): 1369-1373.
ZHAO ZH H, GAO Y J, LUO Y F, *et al.*. An optical fiber Fabry-Perot cavity liquid level sensor using interference fringe counting technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37 (7): 1369-1373. (in Chinese)
- [8] 赵伟, 陈伟杰, 陈仁安, 等. 一种基于 PASCO 和 Matlab 的干涉条纹计数方法[J]. *实验室研究与探索*, 2014, 33 (7): 53-55.
ZHAO W, CHEN W J, CHEN R A, *et al.*. A method for counting interference fringe based on PASCO and Matlab[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2014, 33(7):53-55. (in Chinese)
- [9] 宾峰, 邓敏, 唐付桥, 等. 迈克尔逊干涉条纹自动测量方法[J]. *光学与光电技术*, 2015, 13 (4): 36-40.
BIN F, DENG M, TANG F Q, *et al.*. Automatic measurement method of Michelson interference fringe [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(4):36-40. (in Chinese)
- [10] ISMAIL N I, NGAJIKIN N H, ZAMAN N F M, *et al.*. Resolution improvement in Fabry-Perot displacement sensor based on fringe counting method[J]. *Telkomnika*, 2014, 12 (4): 811-818.
- [11] PULLTEAP S, SEAT H C, BOSCH T, *et al.*. Modified fringe-counting technique applied to a dual-cavity fiber Fabry-Perot vibrometer [J]. *Opt. Eng.*, 2007, 46 (11): 115603-115603-8.
- [12] ONODERA R, SAKUYAMA M, ISHII Y. Fringe counting method for synthetic phase with frequency-modulated laser diodes[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78 (9): 093104-093104-6.
- [13] TILFORD C R. A fringe counting laser interferometer manometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1973, 44 (2): 180-182.
- [14] 张志律, 高应俊. 干涉条纹计数法光纤液位传感器应用研究[J]. *传感技术学报*, 2008, 21 (5): 781-784.
ZHANG ZH L, GAO Y J. The application study on fiber Fabry-Perot liquid level sensor[J]. *Chinese Journal of Sensor Actuators*, 2008, 21 (5): 781-784. (in Chinese)

作者简介:



崔洪亮(1956—), 男, 美籍华人, 博士, 教授, 1984年, 1987年于美国史蒂文斯理工学院分别获得硕士、博士学位, 国家“千人计划”特聘教授, 主要从事光纤传感器、太赫兹科学技术及应用、纳米光学和纳米电子学等方面的研究。E-mail: hcui@jlu.edu.cn



郎金鹏(1991—), 男, 吉林人, 硕士研究生, 主要从事光纤传感及应用方面的研究。E-mail: langjinpeng@126.com

通讯作者:



常天英(1981—), 女, 山东人, 博士, 美国纽约大学博士后, 主要研究方向为光纤传感技术与应用、光纤分布式传感(拉曼、布里渊技术、BOTDR)。E-mail: tchang@jlu.edu.cn