

doi:10.3788/gzxb20174612.1206001

基于时分复用的多点式环形腔光纤电流传感器

蒋俊贞¹, 张昊², 何友武¹, 邱怡申¹

(1 福建师范大学 医学光电科学与技术教育部重点实验室; 福建省光子技术重点实验室, 福州 350007)

(2 福建江夏学院 电子信息科学学院, 福州 350007)

摘 要:为实现输电线路上的多点电流监测,利用通信用普通单模光纤,设计基于时分复用的多点式光纤环形腔结构电流传感器.多路传感系统共用一套光源、检测设备和数字信号处理系统,在节约成本的同时,提高了利用率.实验中选用双路全光纤电流传感器结构,在两个不同的点同时测量电流,其中一测量点对 0~600 A 范围内的电流进行测量,另一测量点对 0~1 500 A 范围内的电流进行测量.对实验数据进行线性拟合,结果表明:循环次数取 8 比较合适,此时系统具有比取 2 时高约 3~4 倍的灵敏度;两个测量点光信号的偏振态与电流之间有良好的线性关系,两个传感单元的灵敏度不同,而且相互之间没有串扰是各自独立的传感系统.

关键词: 导波光学; 光纤电流传感器; 时分复用; 多点式; 光纤环形腔

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)12-1206001-7

Multipoint All-fiber Current Sensor Using a Fiber Loop Based on Time-division Multiplexing

JIANG Jun-zhen¹, ZHANG Hao², HE You-wu¹, QIU Yi-shen¹

(1 Institute of Laser and Optoelectronics Technology, Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

(2 Department of Electronic Information Science, Fujian Jiangxia College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to realize multi-point current monitoring on power line, a multipoint all-fiber current sensor was described on the principle of time-division multiplexing using ordinary silica fibers and a fiber loop. The multi-channel sensor system was used to share a set of light source, detection equipment and digital signal processing system, which can improve the utilization rate while saving cost. In experiment, a dual-channel fiber current sensor structure was used to measure the current at the same time in the two different points. The direct current of a measurement point ranged from 0 A~600 A and the direct current of another survey points ranged from 0 A~1 500 A. The experimental data is fitted with linear fitting. The results show that the suitable cycle number K is 8 and the current sensitivity of $K=8$ was approximately 3 to 4 times as high as when $K=2$. The dual-channel fiber current sensor had good linear responses for both channels between the output signal ΔP and the current I . The channels are independently affected by the current, they require separate calibration.

Key words: Guidewave optics; Fiber optics current sensors; Time-division multiplexing; Multipoint; Fiber loop architecture

基金项目: 国家自然科学基金(No.51607040),福建省教育厅(No.JA15113),福建省基金(No.2016J01751)和大学长江学者和创新研究团队项目(No.IRT_15R10)资助

第一作者: 蒋俊贞(1979—),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为光纤电流传感. Email: jzjiang@fjnu.edu.cn

导师(通讯作者): 邱怡申(1954—),男,教授,硕士,主要研究方向为光纤通讯和传感. Email: ysqiu@fjnu.edu.cn

收稿日期: 2017-04-07; **录用日期:** 2017-08-23

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着科学技术发展和工程需求,尤其是智能电网的出现,对电流传感器提出更高的性能要求^[1-2].但传统电磁式互感器由于其绝缘性差、安全性低、检测信号易受电磁干扰、频率响应差、结构复杂、造价高、安装不便等缺点,无法满足电网检测要求,将逐步被电子式互感器所取代^[3].光学电流传感器作为电子式互感器的一种,由于没有电磁式互感器的缺点,成为近年来应用和研究的热点^[4-6].光学电流传感器是将光学技术和组件引入电流检测领域,利用光作为检测手段和信息载体的一种新型电流传感器.其优势主要表现在:光作为信号传输在对外界电磁干扰有很好的抵抗性的同时,还有带宽大、容量高、传输距离远的优点;光器件作为传感器件具有体积小,重量低,绝缘性好,安全性高的优点^[7-8].通常,光学电流传感器可分为混合型、光学玻璃型和全光纤型三个种类.混合型光学电流传感器主要是利用光作为信号的传输载体,而传感部分还是基于电磁、电热等其他效应,在抗电磁干扰、器件装配、维护、安全性以及相应制造成本方面还存在不足^[9-10].光学玻璃型和全光纤型则将光应用于检测和信号传输两个方面,利用线偏振光受到磁场影响后偏振面会发生旋转的法拉第旋光效应来检测电流^[11-13].块状晶体型电流传感器技术相对成熟,原理简单,目前已经有投入商业化的例子^[14].比起块状晶体型电流传感器,全光纤型电流传感器具有结构简单,装配容易,集成度高的优点,但也存在光纤材料对电流灵敏度低,光纤自身存在的双折射容易受外界振动和温度影响等缺点.这使得全光纤型电流传感器还不能达到真正实用化,依然是当前研究热点.由于电网覆盖范围大,如何降低电流传感器的成本也是急需解决的一个问题,而能够实现多点监测的电流传感器就是一个很好的解决方案.目前有光纤光栅型多点监测的电流传感器,有基于磁致伸缩材料作为传感单元的多点监测电流传感器^[15],而光纤光栅或磁致伸缩材料作为传感单元会增加电流传感器的难度和成本.但以通信用普通光纤作为传感单元的全光纤型电流传感器通常采用连续光源和串联结构,不利于结构扩展,无法实现多点监测.

在电网不同位置测量,或在三相电测量时,需对不同点的电流进行监测,如果每个点都需要一套传感设备,其成本将非常高昂.本文使用脉冲光源,以通信用普通光纤作为传感单元,利用时分复用实现多点监测的电流传感器具有结构简单,与现有的光通信器件兼容性好,系统整体损耗较低,同时有效的节约成本等特点.

1 原理

针对全光纤电流传感器的电流灵敏度问题,设计一种基于光纤环形腔结构的全光纤电流传感头,如图1.信号光在环形结构内循环,多次通过光纤传感头部分,因此得以加大法拉第效应,获得更高的电流灵敏度.由于要使得光在环形结构中多次重复以增大法拉第效应,为了避免光信号在循环过程中发生干涉影响偏振态,使用脉冲光作为信号源.光信号通过起偏器后成为线偏振光,进入由两个二合一的耦合器和光纤环构成的传感头.两个耦合器的两端中耦合比大的一端连接光纤环,在每一次循环中,大部分信号光被耦合器保留在光纤环形结构中循环,而小部分光作为检测信号耦合出去.整体结构实现了光在其中的多次循环,每一次都会经过由传感光纤绕制的环状部分,使每一次的法拉第效应都叠加在信号光上,直到光完全损耗为止.

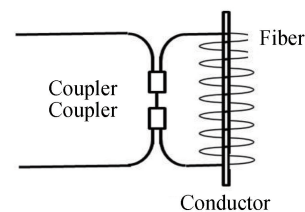


图1 光纤环形腔结构的全光纤电流传感头
Fig.1 Configuration of an all-fiber current sensor head

在不考虑传感光纤中可能存在的其他双折射效应的理想状态下,光纤环部分由法拉第效应产生的非互易圆双折射相差 2Ω ,因此,每一次光信号通过时都增加 2Ω 的相位差,第 K 次通过时的偏振度为

$$P = 2K\Omega \quad (1)$$

由于 $\Omega = VNI$,表示此时系统的电流灵敏度为 $2KNI$,是基本结构的 K 倍,并随循环次数 K 的增加而线性增加.

非理想状态下,传感光纤中除了法拉第效应的非互易圆双折射外,还存在线性双折射以及其他原因引起

的互易圆双折射,因此,需要使用琼斯矢量法进行分析.圆双折射相位差 2θ 包含法拉第效应和其他圆双折射效应,所以有: $\theta = \epsilon + \Omega$, Ω 对应电磁场引起的法拉第效应,该效应是非互易圆双折射, ϵ 对应扭转或其他原因引起的互易圆双折射.光纤环的琼斯矩阵,在不考虑温度、振动或其他因素可能产生的影响时,每一次循环的琼斯矩阵一样的.循环 K 次后的琼斯矩阵为

$$\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{M}^K = \begin{bmatrix} \cos\left(K \frac{\varphi}{2}\right) + i \frac{\delta}{\varphi} \sin\left(K \frac{\varphi}{2}\right) & \frac{2\theta}{\varphi} \sin\left(K \frac{\varphi}{2}\right) \\ -\frac{2\theta}{\varphi} \sin\left(K \frac{\varphi}{2}\right) & \cos\left(K \frac{\varphi}{2}\right) - i \frac{\delta}{\varphi} \sin\left(K \frac{\varphi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, K 为循环次数, $\varphi^2 = \delta^2 + \theta^2$, δ 为线双折射效应, θ 为圆双折射效应.输入光先接入起偏器,调节起偏器使输入光的琼斯矢量为 $\mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$,可得输出光对应偏振度为

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} \approx 2 \frac{\theta}{\varphi} \sin(K\varphi) \quad (3)$$

测量导线通电前的初始偏振态 P_0 ,则通电后的由电磁场造成的偏振度的变化 ΔP 可以表示为

$$\Delta P = P - P_0 = 2 \frac{\epsilon + \Omega}{\varphi} \sin(K\varphi) - 2 \frac{\epsilon}{\varphi} \sin(K\bar{\varphi}) \quad (4)$$

式中, $\bar{\varphi}^2 = \delta^2 + \epsilon^2$, $\varphi^2 = \delta^2 + (\epsilon + \Omega)^2$.考虑到光纤材料的费尔德常数非常小,因此式中 $\delta \gg \Omega$, $\epsilon \gg \Omega$,对式(4)简化并整理后得

$$\Delta P \approx \frac{2K\epsilon^2\Omega}{\bar{\varphi}^2} \cos(K\bar{\varphi}) + \gamma \quad (5)$$

式中, γ 为较小的修正系数

$$\gamma \approx (\Omega/\bar{\varphi}) \sin(K\bar{\varphi}) \quad (6)$$

式(5)偏振度的变化 ΔP 与电磁场引起的法拉第效应 Ω 成正比,同时 ΔP 中存在含 K 的余弦项,因此表现出随 K 的增加周期性增加.电流灵敏度相应为

$$S = (2K\epsilon^2VN_s/\bar{\varphi}^2) \cos(K\bar{\varphi}) \quad (7)$$

式中, N_s 表示光纤环的匝数, V 是光纤的材料费尔德常数,电流灵敏度随 K 的增加也波动增加.

为了实现多点检测,在该传感头的基础上,基于时分复用原理,设计出多点式全光纤环形腔结构的电流传感器,原理如图 2.利用脉冲光源可时分复用的特点,结合网络连接方式进行,光源部分使用脉冲光,利用耦合器的合理连接将多个传感头与一路光源并联,多路耦合器将光源输出的单个脉冲分为 N 个小脉冲,每个小脉冲通过一个传感头实现对一路电流的检测.通过插入延迟光纤实现不同小脉冲的时间间隔,合理安排脉冲间隔和延迟光纤的长度,让 N 路检测结果排列为脉冲序列由一路输出,最终结果由高速采集卡收集,通过软件分析处理并显示.在光源的一个周期内,信号将多次循环,每次循环都输出一串脉冲序列,其中每个脉冲都表示一路检测结果,根据脉冲输出的时间延迟和强度分布即可知道是第几次循环以及第几路传感头的检测结果.由于使用通信用的普通单模光纤作为敏感元件,与现有的光通信器件兼容性好,系统整体损耗较低,同时有效的节约成本.

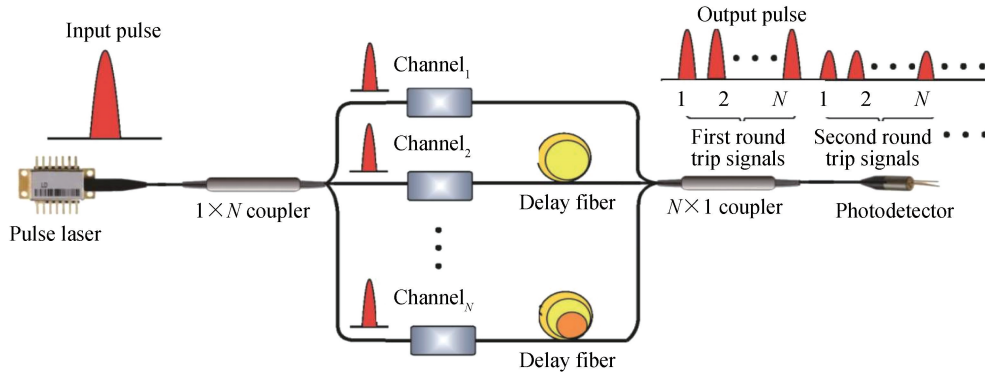


图 2 多点式环形腔型全光纤电流传感器原理
Fig.2 Multipoint all-fiber current sensor

时分复用的通道数量是有限制,其通道数量取决于激光脉冲的宽度、传感光纤环的长度.其通道最大路数为

$$N_{\max} = L_D / [(c/n) \cdot 2t_1] \quad (8)$$

式中, L_D 为传感光纤环的长度, c 为光速, n 为光纤折射率, t_1 为激光脉冲的宽度.

2 方法

实验中选取两个传感单元,分析双路多点式环形腔型光纤电流传感器,在两个不同的测量点同时测量电流,结构如图 3.实验中光源使用上海瀚宇公司制造的 LD 脉冲激光器(型号:MS3400-1550),输出波长 1 550 nm,设定峰值功率 10 W,平均功率 3.8m W,脉冲宽度 15 ns,脉冲频率 1 kHz,该频率的设定是为了保证一个脉冲周期内,信号光可以在环形结构内循环至完全消失,从而不会与下一个脉冲发生叠加.同时,脉冲频率也决定了整个光纤电流传感器系统的时间分辨率.脉冲宽度、脉冲频率也决定了多点式环形腔型光纤电流传感器的最大分布路数.两个传感光纤环均采用标准的通信用普通单模光纤,环直径为 10 cm,200 匝光纤环.实验结构还包括起偏器,不同耦合比的一分二以及二合一耦合器,还有偏振分束器.构成环形腔结构的是两个耦合比分别是 5% : 95% 和 1% : 99% 的耦合器,从脉冲激光器发出的信号光经过 50% : 50% 耦合器分束,分束后的脉冲光各自经过起偏器、延迟光纤(其中一路有)后,再进入 5% : 95% 耦合器的 5% 端,5% : 95% 耦合器的 95% 端和 1% : 99% 耦合器的 99% 端连接光纤环,这样在每一次循环中,大部分的脉冲信号光将被耦合器保留在光纤环形结构中循环,而小部分脉冲信号光作为检测信号从 1% : 99% 耦合器的 1% 端耦合出去.两束检测信号光通过 50% : 50% 耦合器二合一,由于使用的是脉冲光,基于时分复用的原理,只需要合理选择脉冲间隔以及在其中一路的输入端增加适当长度的延迟光纤即可使两路检测信号光不会重叠在一起.合路后的两路检测信号光再连接偏振分束器将信号光垂直正交分解,分解后的正交信号光在其中一支的输入端也增加适当长度的延迟光纤,然后使用一个 50% : 50% 的耦合器将相互垂直的正交信号光合并,由于延迟光纤的加入,可使合并后相互垂直的正交信号光不会重叠在一起.信号检测和显示部分分别采用 Thorlabs 公司的 DET01CFC InGaAs 高速光电探测器和 Tektronix 公司的 TDS3054B 500 高频示波器.整个实验只需要一个探测器即完成垂直正交信号光的检测以及两路信号的检测,节约了成本,同时也免去多个探测器间的校正问题.

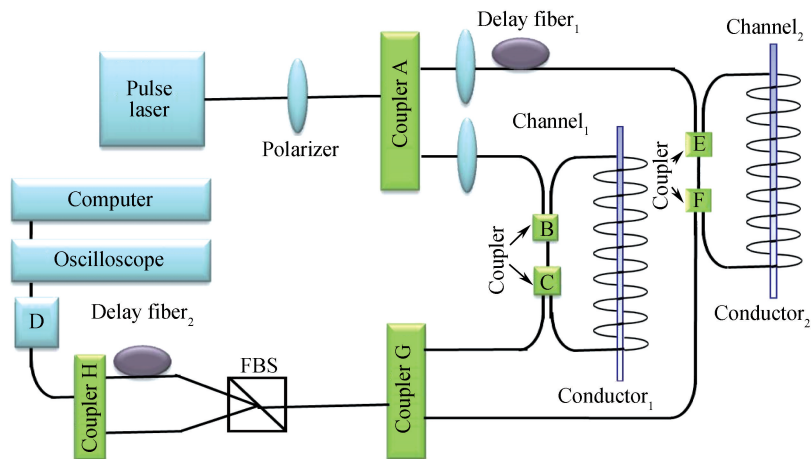


图 3 双路全光纤电流传感器实验装置

Fig.3 Configuration of the double-channel all-fiber current sensor

3 结果与讨论

实验中两路通电导线中的电流变化范围分别从 0 A 到 1 500 A 和 0 A 到 600 A,高频示波器采集到的数据如图 4.图中分别记录第一路传感单元 0 A、500 A 和 1 500 A 电流通过光纤环后和第二路传感单元 0 A、200 A 和 600 A 电流通过光纤环后,先通过二合一耦合器然后再经过偏振分束器得到的两路光强.图左边为循环次数 K 为 0 到 5,图右边为循环次数 K 为 6 到 11.实验中利用一个耦合比为 50% : 50% 的耦合器将偏

振分束器中得到的两路垂直光强合并到一路中进行探测,因此图中相邻的 2 个峰值即表示两个相互垂直的光强,如果只有一个峰表示该组光偏振面平行 x 轴或 y 轴.图中从左往右,每一组(2 个峰)表示一路信号的一个 K 值,即信号光循环一次.最左边的第一个峰是第一路信号激光器输出的信号光(未经过光纤环),第二个峰是第二路信号激光器输出的信号光(未经过光纤环),第三个峰是第一路信号 $K=1$ 的信号光(即信号光循环一次),第四个峰是第二路信号 $K=1$ 的信号光(即信号光循环一次),以此类推.可以看到信号光的每一组(2 个峰)光强随循环次数 K 的变化而变化,而且越往右边(即 K 越大)的光强随不同电流输入的变化越明显.每一组 2 个峰之间的时间间隔 τ 由偏正分束器后的延迟光纤长度决定,延迟光纤所能取的最短长度取决于光源的脉冲宽度.各路信号各自的一次光循环的时间间隔 τ 由环行结构的长度决定.不考虑耦合器的长度时,环行结构的长度也就是光纤环的长度.因此根据具体要求,减少光纤环长度,可以减少脉冲间隔,提高脉冲频率,同时提高系统的时间分辨率.第一路信号与第二路信号之间的时间间隔 τ 由第二路传感单元所连接的延迟光长度决定.光纤长度与时间间隔的关系为

$$\tau = L/c \tag{9}$$

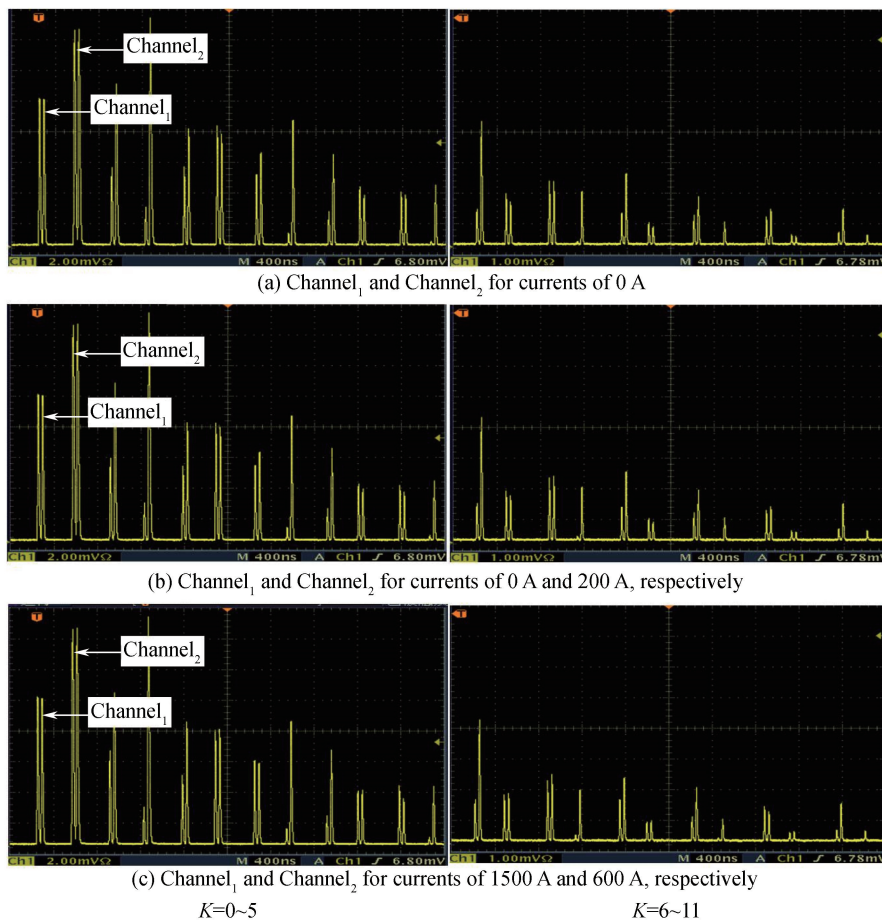


图 4 不同电流引起的两路传感单元输出光强变化

Fig.4 Intensity variations of light-pulses for currents passing through the sensor head for dual channels

图 5 描述两路传感单元输出信号光偏振度变化量 ΔP 与 K 的关系,图 5(a)是第一路传感单元的结果,图 5(b)是第二路传感单元的结果.第一路传感单元其电流变化为 $0\text{ A}\sim 1\ 500\text{ A}$,每隔 250 A 取一个电流测量点.第二路传感单元其电流变化为 $0\text{ A}\sim 600\text{ A}$,每隔 100 A 取一个电流测量点.从图中可以看到 ΔP 随 K 出现波动的上升,这和式(5)的分析是一致的.虽然偏振态的变化是波动的,但信号总光强是按指数衰减的,尽管 K 的增加可以提高系统的电流灵敏度,但也增加了信号的衰减,因此在信号强度和电流灵敏度之间平衡的选择 K 便显得十分重要.两个传感单元 ΔP 随 K 的变化趋势一致,其差异性是由于两个单元其各自对应扭转或其他原因引起的互易圆双折射 ϵ 和线双折射 δ 的不同所引起.

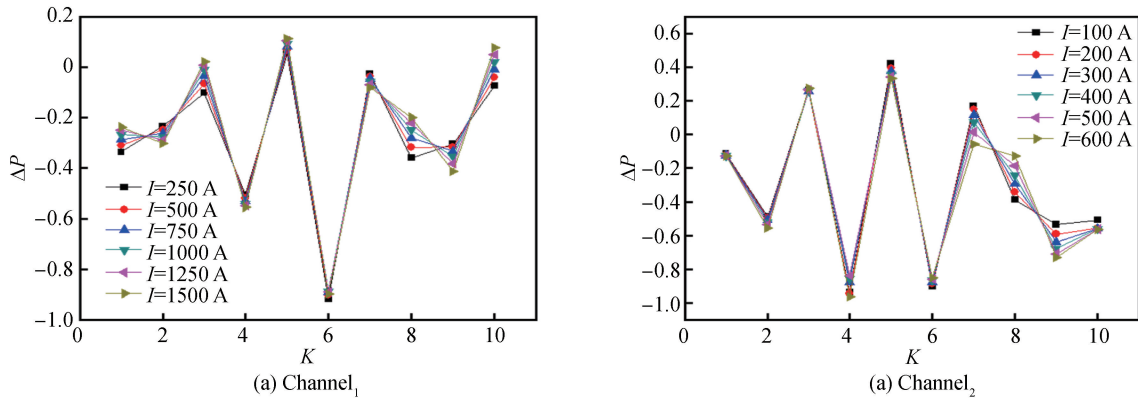
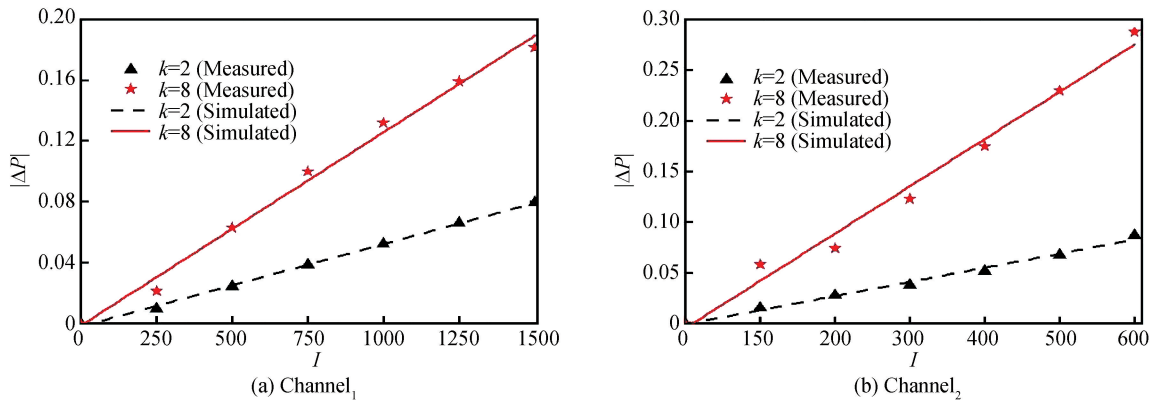
图5 偏振度变化量 ΔP 与绕行圈数 K 的关系Fig.5 Variation in degree of polarization change ΔP with number of round trips K

图6描述在 $K=2$ 和 8 时两路传感单元信号光偏振度变化量 ΔP 随电流强度 I 变化的情况,以及连续测量六组实验误差情况.图6(a)是第一路传感单元其电流变化为 $0\text{ A}\sim 1\,500\text{ A}$,图6(b)是第二路传感单元其电流变化为 $0\text{ A}\sim 600\text{ A}$.图中点为实验值,实线为线性拟合值.实验值和拟合值十分接近,并且具有一定的线性度. $K=2$ 时连续测量实验误差小于 $K=8$ 时连续测量实验误差,每次的实验结果有误差,一方面是由于外界存在一定振动影响,另一个方面是由于每次实验输入的初始偏振态存在一定差别,这是由于实验中采用的挤压偏振控制器控制初始偏振态存在误差,而信号在多次循环过程中将误差逐步放大,偏差可以通过器件选择来减少,如选择稳定性更高的激光器和光纤连接器件;也可以对光纤环增加保护措施,如在光纤环外包裹玻璃纤维和防震措施;此外还可以通过后端的信号处理单元进行减少,如可以对多次循环采集的结果求平均等.

图6 信号光偏振度变化量 ΔP 随电流强度 I 变化情况Fig.6 Relationship between the variation in degree of polarization and the current intensity I

系统的电流灵敏度和循环次数 K 的关系是灵敏度 S 随 K 波动上升.由实验数据分析可知,当循环次数 K 较小时,检测结果的线性关系较好;当 K 增加后,两者之间的非线性也开始增加.输出信号的非线性原因,部分是由于全光纤电流传感器对外界的温度和振动变化敏感.由于信号光在环形结构中多次循环,受到外界影响也被放大,因此非线性增加.所以尽管高的循环次数 K 可以带来高的电流灵敏度,但过大的 K 值也增加了信号检测的难度和误差.实验发现,循环次数 K 选取 8 比较合适,在 $K=8$ 时系统具有比 $K=2$ 时高约 3 到 4 倍的灵敏度.两个传感单元的灵敏度不同,是各自独立的传感系统.从图6可以看出,第二路传感单元的灵敏度高于一路传感单元,因为两个单元是独立单元,有不同的对应扭转或其他原因引起的互易圆双折射 ϵ 和线双折射 δ .不同的传感单元要有独立的定标系统.

4 结论

为了提高全光纤电流传感器的灵敏度,设计光纤环形腔结构的全光纤电流传感单元,其电流灵敏度随循

环次数的增加波动增加。在光纤环形腔结构的基础上,基于时分复用原理,设计多点式全光纤电流传感器。利用脉冲光源可时分复用的特点,结合网络连接方式进行,实现多点电流同时检测,较单路检测的光纤传感器而言具有更高的效率而且降低成本。在实验中选用双路全光纤电流传感器,研究其偏振度的变化随电流强度的变化情况,证明了双路电流传感器的可行性并且实验结果与理论相符。实验表明两路光信号的偏振态随着电流线性变化,而且相互之间没有串扰,是各自独立的传感系统。每个传感单元的结果都表明与电流之间有较好的线性关系,两个传感单元都可同时监测不同点的电流幅值。

参考文献

- [1] BOHNERT K, GABUS P, KOSTOVIC J, *et al.* Optical fiber sensors for the electric power industry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(3-5): 511-526.
- [2] WANG Zheng-ping, LI Qing-bo, WU Qiang, *et al.* Effects of the temperature features of linear birefringence upon the sensitivity of a bulk glass current sensor[J]. *Optics and Laser Technology*, 2007, **39**(1): 8-12.
- [3] ZU P, CHAN C C, LEW W S, *et al.* Magneto optical fiber sensor based on magnetic fluid[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(3): 398-400.
- [4] WATEKAR P R, JU S, KIM S, *et al.* Development of a highly sensitive compact sized optical fiber current sensor[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(16): 17096-17105.
- [5] SUN L, JIANG S, MARVIANTE J R, *et al.* All-fiber optical magnetic-field sensor based on Faraday rotation in highly terbium-doped fiber[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(6): 5407-5412.
- [6] AERSSSENS M, DESCAMPS F, GUSAROV A, *et al.* Influence of the optical fiber type on the performances of fiber-optics current sensor dedicated to plasma current measurement in ITER[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(19): 5983-5991.
- [7] YANG Yu-qiang, YANG Qun, GE Wei, *et al.* Temperature compensated GMM-FBG current sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(10): 2377-2383.
杨玉强,杨群,葛伟,等. 温度自动补偿超磁致伸缩材料布拉格光栅光纤电流传感器[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(10): 2377-2383.
- [8] YAN Yu, PAN Ding, ZHANG Xu-le, *et al.* Study of electromagnetic compatibility based on reflective fiber optical current transformer[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, **52**(1): 0148-0153.
颜语,潘丁,张旭乐,等. 反射式全光纤电流互感器电磁兼容性能研究[J]. 高压电器, 2016, **52**(1): 0148-0153.
- [9] ZHANG Chao-yang, ZHANG Chun-xi, WANG Xia-xiao, *et al.* Influence of SLD's power attenuation on scale factor of closed-loop fiber optic current transformer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2458-2461.
张朝阳,张春熹,王夏霄. 等光源功率衰减对闭环光纤电流互感器变比影响研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(12): 2458-2461.
- [10] LI Gao-ming, QIU Yi-shen, CHEN Shu-qiang, *et al.* Multichannel-fiber ring down sensor based on time division multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(24): 3022-3024.
- [11] WANG Li-hui, CAO Min, LIU Qing-chan, *et al.* Modeling and experimental verification of polarization errors in Sagnac fiber optic current sensor[J]. *Optik*, 2015, **126**(20): 2743-2746.
- [12] WANG Qi, XIA Ji, LIU Xia, *et al.* A novel current sensor based on magnetic fluid and fiber Loop cavity ring-down technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(11): 6192-6198.
- [13] DU Jiang-bing, TAO Ye-meng, LIU Yin-ping, *et al.* Highly sensitive and reconfigurable fiber optic current sensor by optical recirculating in a fiber loop[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(16): 17980-17988.
- [14] WATEKAR P R, YANG H, JU S, *et al.* Enhanced current sensitivity in the optical fiber doped with CdSe quantum dots[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(5): 3157-3164.
- [15] DING Zhen-yang, DU Yang, LIU Tie-gen, *et al.* Distributed optical fiber current sensor based on magnetostriction in OFDR[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(19): 2055-2058.

Foundation item: The Educational Research Foundation for Middle-aged and Young Teacher of Fujian Province (No. JA15113), the Natural Science Foundation of Fujian Province of China (No. 2016J01751), the Natural Science Foundation of China (No. 51607040), the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (No. IRT_15R10)