

光纤电流传感器性能分析及环形衰荡结构设计

孙滨超¹, 沈涛^{1,2}

¹哈尔滨理工大学应用科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

²哈尔滨理工大学工程电介质及其应用教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 针对当前光纤电流传感器较难同时实现较高灵敏度和较好稳定性的问题,根据法拉第效应,从理论上建立了基于琼斯矩阵的直通式、反射式全光纤电流传感器的数学模型;利用 OptiSystem 软件进行仿真,得到直通式、反射式全光纤电流传感器的线性灵敏度分别为 0.24 和 0.37。提出了光纤环形衰荡结构,将强度调制转换为时间调制,从而消除了光源及外界环境对系统性能的影响,使系统同时实现较高的灵敏度和较好的稳定性。通过理论及实验证实了该方案的可行性。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 环形衰荡腔; 法拉第效应; 灵敏度; 稳定性

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.010602

Performance Analysis for Fiber Current Sensor and Design for Loop Ring-Down Structure

Sun Binchao¹, Shen Tao^{1,2}

¹School of Applied Sciences, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

²Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract In view of the difficulty of achieving high sensitivity and good stability at the same time for fiber current sensors, mathematical models of straight-through and reflective all-fiber current sensors based on Jones matrix are set up in theory according to Faraday effect. The simulation is conducted by the OptiSystem software, and the linear sensitivities of straight-through and reflective all-fiber current sensors are 0.24 and 0.37. A fiber loop ring-down structure is proposed, and the intensity modulation is converted into the time modulation. The effects of light source and external environment on the performance of system are eliminated, so the system can achieve high sensitivity and good stability at the same time. The scheme is verified in theory and experiment.

Key words fiber optics; fiber sensors; loop ring-down cavity; Faraday effect; sensitivity; stability

OCIS codes 060.2370; 060.4005; 060.2320

1 引言

高电压、大容量的输配电网是当今电力工业的主要发展方向。光学电流传感器(OCS)已成为电力系统的新需求,国内外相关研究机构为此提出了多种实现方案^[1-4]。Katsukawa 等^[5]研究了基于法拉第效应、YIG 光纤以及铅玻璃的光学电流互感器,并成功研制了集磁环型光学电流传感器样机。戴玉堂等^[6]利用飞秒激光微纳加工技术制作了高灵敏度光纤磁场传感头,其灵敏度为非微纳结构的 5 倍。王琦等^[7]提出了基于磁流体和环形衰荡技术的光纤电流传感器,该传感器实现了较高的测量灵敏度,为现代电磁测量技术提供

收稿日期: 2016-07-13; 收到修改稿日期: 2016-09-21; 网络出版日期: 2016-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(51307036, 51677044)、黑龙江省自然科学基金(E201303)

作者简介: 孙滨超(1991—),男,硕士研究生,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: binchaosun@126.com

导师简介: 沈涛(1978—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光电检测方面的研究。

E-mail: taoshenchina@163.com(通信联系人)

了一种新型方法。郑硕等^[8]从 Sagnac 结构出发,实现了光纤电流传感系统样机的制作。但是,受限于双折射效应、温度对测量灵敏度的影响、器件长期运行稳定性差等因素,光纤电流传感器仍未在电力系统中得到广泛应用。

针对上述问题,本文从法拉第效应出发,建立了基于琼斯矩阵的直通式、反射式全光纤电流传感器的数学模型,利用 OptiSystem 软件对这两种结构的全光纤电流传感系统进行仿真。通过分析,得到直通式光纤电流传感器稳定性好、反射式光纤电流传感器灵敏度高的结论。为同时实现较好的稳定性和较高的灵敏度,提出了光纤环形衰荡结构的光路改进方案,建立了相应的数学模型,证实了该方案的可行性。搭建了环形衰荡式结构的光路,通过实验验证了仿真结果的正确性,为高性能全光纤电流传感器的实用化提供了一种新的解决方案。

2 直通式全光纤电流传感器

2.1 直通式全光纤电流传感器原理

直通式全光纤电流传感器的光路结构示意图如图 1 所示。光源发出的光束经起偏器转化为线偏振光进入传感头,在被测电流产生的外磁场作用下,线偏振光的偏振面发生旋转,经检偏器检偏后由光探测器进行信号解调。为提高系统对偏转角度 θ 的检测灵敏度,对系统中起偏器和检偏器的角度进行调整。假设两个偏振器的夹角为 ϕ ,将输出光强对 θ 和 ϕ 求二阶偏导数,当 $\theta=0$ 且偏导数为 0 时,求解得到 $\phi=\pi/4$,即当两偏振器偏振方向的夹角为 $\pm\pi/4$ 时,传感头探测灵敏度最高,因此令起偏器和检偏器偏振方向的夹角为 $\pi/4$ 。直通式全光纤电流传感器的光路系统结构简单,具有抗干扰能力较强以及稳定性高等优点^[9-13]。

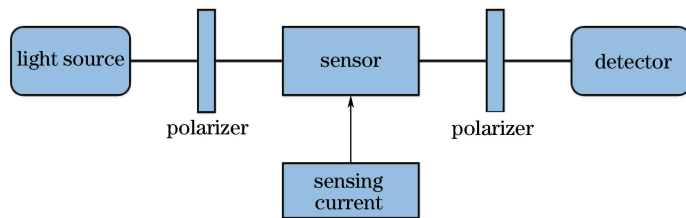


图 1 直通式全光纤电流传感器光路结构示意图

Fig. 1 Diagram of light path structure of straight-through all-fiber current sensor

2.2 直通式光路结构的琼斯矩阵

根据图 1 中的光路结构,设入射光电场强度 \mathbf{E}_{in} 为

$$\mathbf{E}_{in} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 E_x 、 E_y 分别为 x 方向、 y 方向的电场强度。

理想情况下,各个器件的琼斯矩阵如下:

起偏器的琼斯矩阵为

$$\mathbf{L}_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

法拉第效应琼斯矩阵为

$$\mathbf{L}_F = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

通过检偏器的光场 \mathbf{E} 和光强 I^* 分别为

$$\mathbf{E} = \mathbf{L}_P \mathbf{L}_F \mathbf{L}_P \mathbf{E}_{in}, \quad (4)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$I^* = |\mathbf{E}|^2 = I_0 (1 + \cos \theta) / 2. \quad (6)$$

由(6)式可知,直通式结构的系统输出光强由法拉第旋转角的余弦项决定,因此系统的灵敏度取决于公式中的余弦项,即只与公式中的法拉第旋转角有关。

2.3 直通式光路结构的仿真

利用 OptiSystem 软件对直通式光路结构的光学电流传感器进行建模仿真, 仿真原理图^[14]如图 2 所示。从图 2 可以看出, 光源通过起偏器转换为线偏振光, 利用调制器与调制波模拟整个仿真系统受磁场作用的情况。在磁场的作用下, 线偏振光受到法拉第效应的作用, 偏振面发生偏转。当线偏振光经过检偏器与光电转换器的作用后, 对信号进行处理。

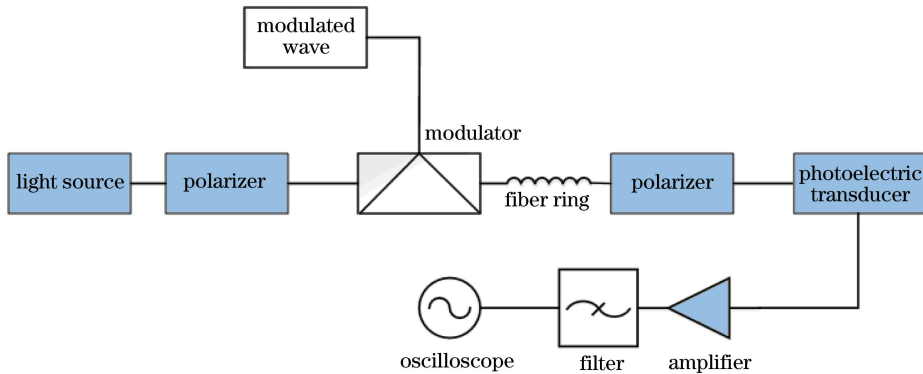


图 2 直通式光学电流传感器仿真结构原理图

Fig. 2 Simulation structure principle diagram of straight-through optical current sensor

利用 OptiSystem 软件搭建直通式光学电流传感器系统, 仿真中选用放大自发辐射 (ASE) 光源, 设定其波长为 1550 nm, 光能为 -3 dBm, 谱宽为 40 nm。使用 OptiSystem 软件模块中的位序列发生器、不归零法脉冲发生器、发光二极管光源代替 ASE 光源。由于电力系统理想模型中的电压和电流都是无畸变的正弦信号, 且正弦信号的功率理论相对完善, 因此仿真中利用调制器及正弦调制波模拟实验中的被测信号。调用 OptiSystem 软件中的线性起偏器, 设定起偏器相对检偏器的起偏角为 45°。ASE 光源与自然光的偏振态相似, 经过起偏器仿真后输入信号和输出信号的变化比较明显。利用 OptiSystem 软件建立的模拟结构如图 3 所示。

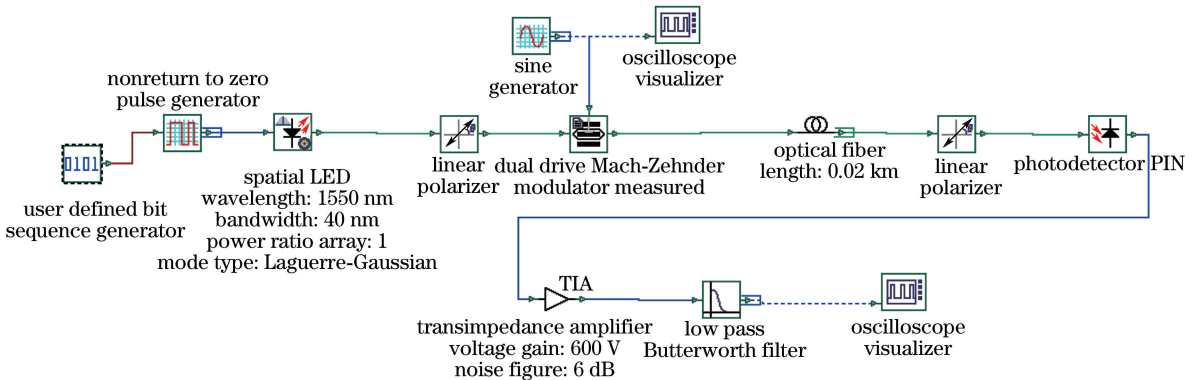


图 3 直通式光学电流传感器模拟结构

Fig. 3 Simulation structure of straight-through optical current sensor

2.4 直通式光路结构的仿真结果

对调制前后 1/16 周期 (即旋转角度范围小于 22.5°) 的正弦调制信号进行分析, 图 4 为在 ASE 光源下仿真得到的直通式 OCS 仿真系统中信号经调制前后的功率分布。可以看出, 仿真系统的输出信号和输入信号具有对应关系。

由图 4 可知, 曲线的拟合方程为 $y = 0.24x + 0.37$, 因此得到系统的线性灵敏度为 0.24。最大拟合偏离率为 0.55%, 符合系统在小偏转角度下对测量灵敏度的要求。

3 反射式光纤电流传感器

3.1 反射式光纤电流传感器原理

反射式 Sagnac 干涉型光路示意图如图 5 所示, 该结构采用 Y 波导相位调制器, Y 波导相位调制器由光

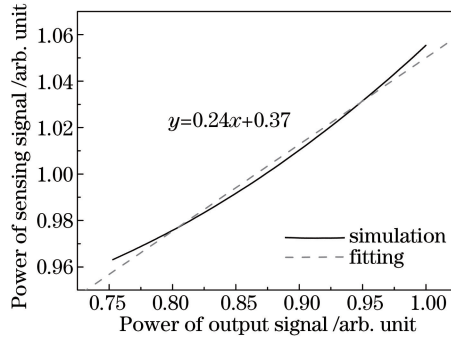


图4 直通式OCS仿真系统中信号经调制前后的功率分布

Fig. 4 Signal power distribution before and after signal modulation in straight-through OCS simulation system

纤分束器、相位调制器以及光纤偏振器构成。此外,该光路结构中的补偿线圈可以消除外界振动引起的Sagnac效应对测量结果的影响。

光源发出的光经Y波导起偏器起偏后变为线偏振光,再经Y波导偏振分束器分成两路平行的线偏振光。一路线偏振光经过 90° 熔接支路后偏振方向旋转 90° ,另一路线偏振光经过延迟支路,两路光在保偏光纤耦合器(PMC)处耦合为偏振模式正交的光波;经过 $1/4$ 波片后两路线偏振光分别转换为左旋、右旋的圆偏振光;经两次法拉第效应作用后两路线偏振光分别转换为右旋、左旋圆偏振光;再次经过 $1/4$ 波片后,两路偏振光的偏振模式相互转换,经过 90° 熔接支路的光经延迟支路返回,另一路经 90° 熔接支路返回,两束光在偏振器后发生干涉。

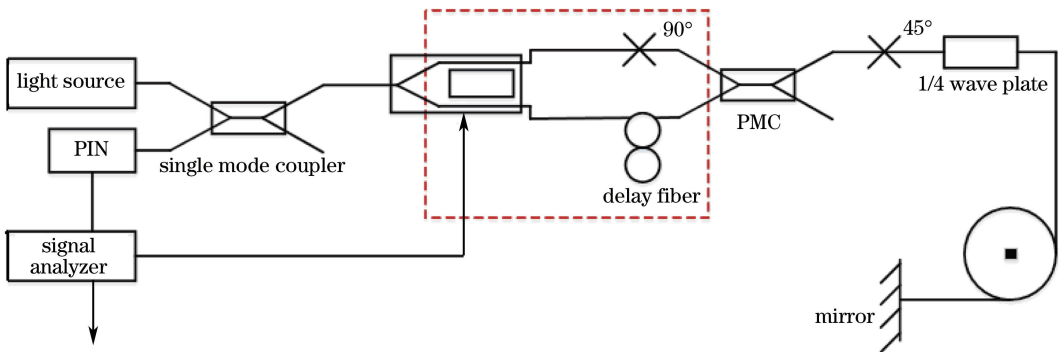


图5 反射式Sagnac干涉型光路示意图

Fig. 5 Diagram of reflective Sagnac interference light path

3.2 反射式Sagnac干涉型光路结构的琼斯矩阵

设入射光 $E_{in} = [E_x \ E_y]^T$, 理想情况下各个器件的琼斯矩阵如下:
起偏器的琼斯矩阵为

$$L_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

45° 熔接点的琼斯矩阵为

$$L_{45} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

90° 熔接点的琼斯矩阵为

$$L_{90} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$1/4$ 波片的琼斯矩阵为

$$L_{\lambda/4} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

法拉第效应的琼斯矩阵(光经过传感头前、后的琼斯矩阵 \mathbf{L}_{fin} 、 \mathbf{L}_{fout})分别为

$$\mathbf{L}_{\text{fin}} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{L}_{\text{fout}} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (12)$$

该系统中采用的 Y 波导为基于集成铌酸锂的相位调制器。系统采用推挽的工作方式,即在两路相反方向传播光波的时间差时刻同时设置两个波导的电压。设 \mathbf{L}_1 、 \mathbf{L}_2 分别为 $t-\tau$ 时刻和 t 时刻 Y 波导上调制臂的琼斯矩阵, \mathbf{L}_3 、 \mathbf{L}_4 分别为 $t-\tau$ 时刻和 t 时刻 Y 波导下调制臂的琼斯矩阵,上述矩阵可分别表示为

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} \exp[i\phi(t-\tau)] & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} \exp[i\phi(t)] & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{L}_3 = \begin{bmatrix} \exp[-i\phi(t-\tau)] & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{L}_4 = \begin{bmatrix} \exp[-i\phi(t)] & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

将图 3 中虚线部分看作一个器件,其正反向琼斯矩阵分别为

$$\mathbf{L}_{\text{out}} = \mathbf{L}_4 \mathbf{L}_D + \mathbf{L}_2 \mathbf{L}_{90} = \begin{bmatrix} \exp[-i\phi(t)] & -\exp[i\phi(t)] \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{L}_{\text{in}} = \mathbf{L}_{90} \mathbf{L}_1 + \mathbf{L}_D \mathbf{L}_3 = \begin{bmatrix} \exp[-i\phi(t-\tau)] & -1 \\ \exp[i\phi(t-\tau)] & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中 \mathbf{L}_D 为延迟光纤的琼斯矩阵。返回偏振器的光场和光强分别为

$$\mathbf{E} = \mathbf{L}_P \mathbf{L}_{\text{out}} \mathbf{L}_{\text{MC}} \mathbf{L}_{45} \mathbf{L}_{\lambda/4} \mathbf{L}_{\text{fout}} \mathbf{L}_m \mathbf{L}_{\text{fin}} \mathbf{L}_{\lambda/4} \mathbf{L}_{\text{MC}} \mathbf{L}_{\text{in}} \mathbf{L}_P \mathbf{E}_{\text{in}}, \quad (19)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{E}_x}{8} \{ \exp\{-i[2\theta + i\phi(t) - i\phi(t-T)]\} + \exp\{i[2\theta + i\phi(t) - i\phi(t-T)]\} \} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$I^* = |\mathbf{E}|^2 = \frac{I_0}{16} \{1 + \cos\{4\theta + 2[\phi(t) - \phi(t-\tau)]\}\}, \quad (21)$$

式中 \mathbf{L}_{MC} 为保偏光纤耦合器的琼斯矩阵, \mathbf{L}_m 为反射镜的琼斯矩阵,由(21)式可知,反射式系统的灵敏度仍取决于公式中的余弦项。与直通式相比,当时间 t 固定时,反射式系统输出光强的法拉第偏转角为直通式的 4 倍;当直通式与反射式法拉第偏转角变化量相同时,反射式系统光强的变化大于直通式系统光强的变化。因此,反射式系统的灵敏度高于直通式系统的灵敏度。由于公式的余弦项中含有 $2[\phi(t) - \phi(t-\tau)]$,当时间变化时,对公式中的余弦项产生影响,因此反射式系统的稳定性低于直通式系统的稳定性。

3.3 反射式 Sagnac 干涉型光路结构的仿真

反射式 Sagnac 干涉型光路结构的仿真原理^[15]如图 6 所示。光经过起偏器后变为线偏振光,在耦合器中分成了两束光;两束光分别经过了 $\lambda/4$ 波片作用后,变成了旋向相同的圆偏振光;两束旋向相同的圆偏振光经过调制器的调制后,分别以顺时针和逆时针的方向通过传感线圈,再经过圆偏振器后返回到检偏器中,发生干涉;最终利用光电转换器完成对信号的处理。两束光偏振面的旋转角度相同,但方向相反,因此在其他条件相同时,反射式系统的相位差为直通式的两倍,且灵敏度得到提高。

利用 OptiSystem 软件搭建反射式 Sagnac 干涉型光学电流传感器模型,仿真系统如图 7 所示。为了简明显示,省略一些辅助的附件和测量仪器。Sagnac 系统中的元件参数设置与上一节仿真设置相同。

3.4 反射式光路结构的仿真结果

对调制前后 $1/16$ 周期(即旋转角度范围小于 22.5°)的正弦调制信号进行分析,图 8 为在 ASE 光源下仿真得到的反射式 Sagnac 干涉型光学电流传感器仿真系统中信号经调制前后的功率分布。可以看出,仿真系

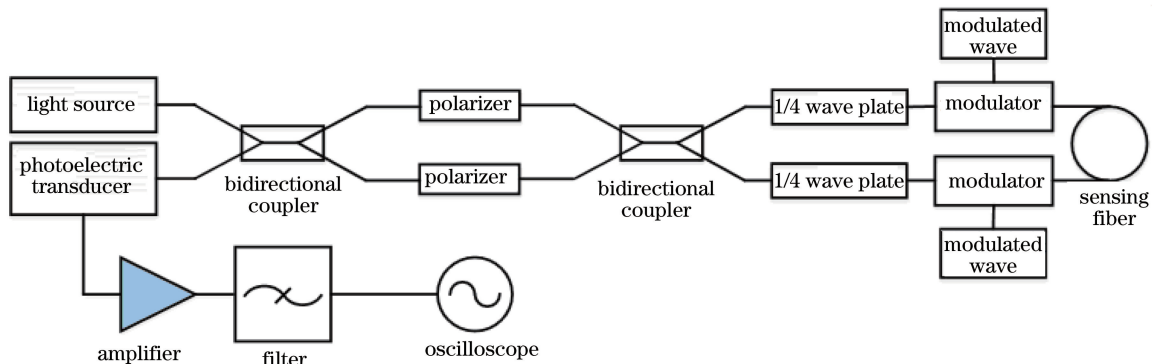


图 6 反射式 Sagnac 干涉型光学电流传感器的仿真结构原理图

Fig. 6 Simulation structure principle diagram of reflective Sagnac interference optical current sensor

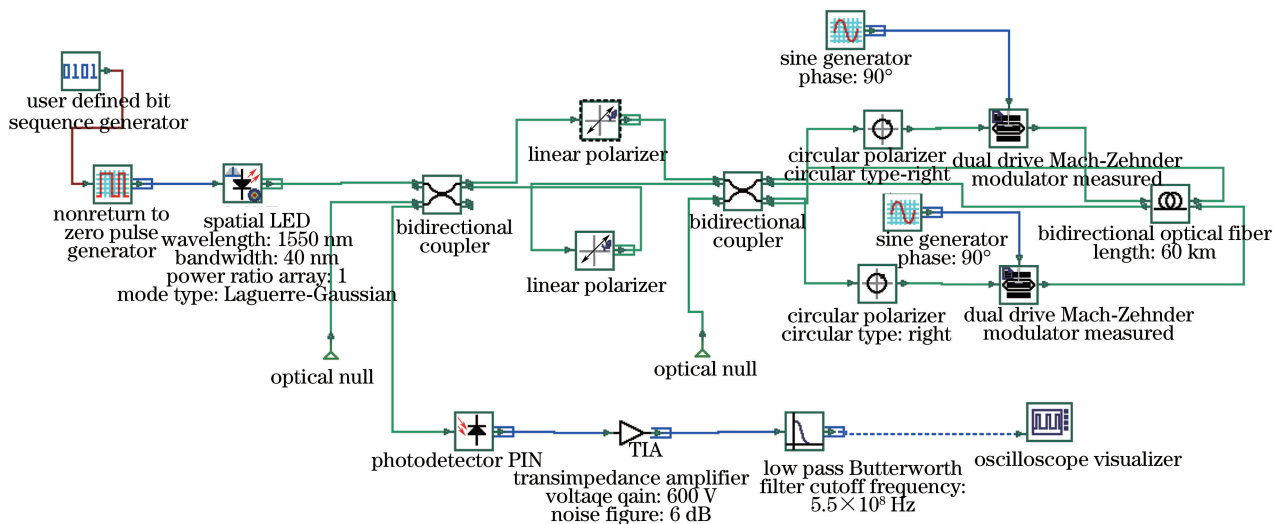


图 7 反射式 Sagnac 干涉型 OCS 的仿真系统

Fig. 7 Simulation system of reflective Sagnac interference OCS

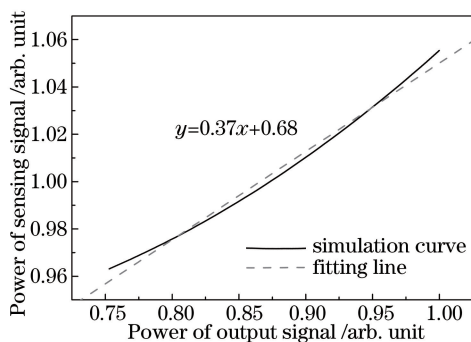


图 8 反射式 Sagnac 干涉型 OCS 仿真系统中信号经调制前后的功率分布

Fig. 8 Signal power distribution before and after signal modulation in reflective Sagnac interference OCS simulation system

统的输出信号和输入信号具有对应关系。

由图 8 可知,曲线的拟合方程为 $y = 0.37x + 0.68$,因此得到系统的线性灵敏度为 0.37,最大拟合偏离率为 0.63%,符合系统在小偏转角度下对测量灵敏度的要求。相比直通式 OCS 系统,反射式系统具有更高的测量灵敏度。

4 环形衰荡式光纤电流传感器

由(6)、(21)式可知,直通式 OCS 系统的灵敏度取决于法拉第旋转角 θ ,反射式 OCS 系统的灵敏度取决于 4θ 。由 OptiSystem 软件的仿真结果可得,直通式和反射式光路系统的线性灵敏度分别为 0.24 和 0.37,因此反射式结构测量灵敏度高于直通式。但是,已有大量研究证明,直通式 OCS 系统的长期运行稳定性优于反射式 OCS 系统^[9-10]。为了实现较高灵敏度与较好稳定性的统一,提出了光纤环形衰荡结构的光路改进方案,将基于强度探测的方法转变为基于时间探测的方法,从而消除了光源波动对探测结果的影响。利用琼斯矩阵对该结构进行建模仿真,并搭建了相应的实验光路,从而验证了该方案的可行性。

4.1 环形衰荡式全光纤电流传感器原理

光纤环型衰荡腔由两个耦合器和一段光纤连接而成。光信号经耦合器进入光纤环形腔,在环形腔内每传输一圈,由其中一个耦合器输出一小部分光用于探测,剩余的光通过另一个耦合器继续在腔内循环传输。当脉冲宽度小于光信号在环形腔内运行一周所用时间时,利用输出端的示波器可观察到一系列衰荡信号^[16]。

图 9 为光纤环形衰荡系统示意图,光源发出的光通过光纤耦合器进入光纤环路,并在环路中不断传输,光在光纤环路中每传输一周便经过一次传感单元,一小部分光通过光纤耦合器被光电探测器接收,剩下的大部分光仍然在光路中传输并不断被传感单元吸收。通过分析环路中光强或相位的变化,得到待测样品信息。环路中光强的衰减严格遵循郎伯-比尔定律^[17]。

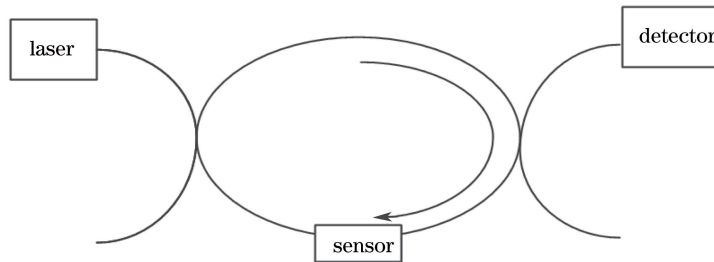


图 9 光纤环形衰荡系统示意图

Fig. 9 Diagram of fiber loop ring-down system

由光纤环形衰荡系统的基本结构出发,设计环形衰荡式全光纤电流传感器,其光路示意图如图 10 所示。利用环形衰荡结构,光信号可以多次通过传感头,使法拉第效应得到增强,进而提高系统灵敏度。若光信号经过环形衰荡腔 K 次,则灵敏度增加 K 倍。

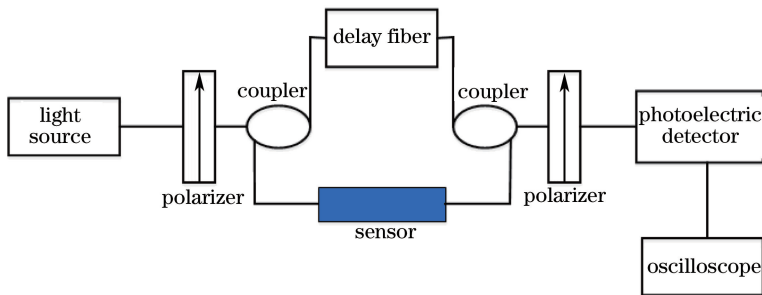


图 10 环形衰荡式全光纤电流传感器光路示意图

Fig. 10 Light path diagram of loop ring-down all-fiber current sensor

为测量衰荡时间,将一系列相同时间间隔的光脉冲输入光纤环路,光脉冲在光纤环路中不断传输,光脉冲每绕光纤环路一周便经过一次传感头,且传感器输出的少部分光可用于强度测量。由于传感器头对光具有一定的吸收,耦合器对光具有一定的插入损耗,光强随着时间不断衰减,将光衰减到初始光 $1/e$ 的时间设为环路的衰荡时间^[17]。光强的衰减与时间呈指数关系,腔内损耗越大,衰减时间常数越大,如图 11 所示。利用衰减时间常数便可计算腔内损耗,从而实现光信号传感。

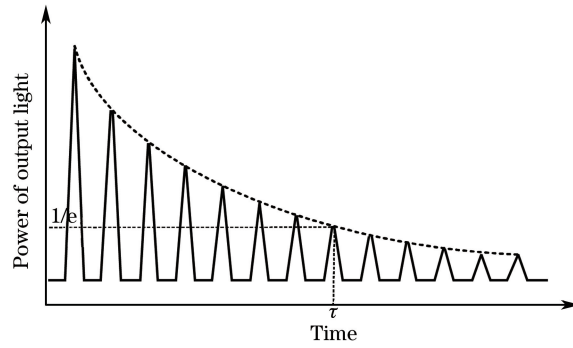


图 11 光纤环型腔衰荡光谱示意图

Fig. 11 Diagram of fiber loop ring-down spectrum

4.2 环形衰荡式光路结构的琼斯矩阵

设入射光的电场强度为

$$\mathbf{E}_{in} = [E_x \quad E_y]^T. \quad (22)$$

理想情况下各个器件的琼斯矩阵如下：

起偏器的琼斯矩阵为

$$\mathbf{L}_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (23)$$

法拉第效应琼斯矩阵为

$$\mathbf{L}_F = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (24)$$

通过偏振器的光场和光强分别为

$$\mathbf{E} = \mathbf{L}_P \mathbf{L}_{FK} \cdots \mathbf{L}_{F2} \mathbf{L}_{F1} \mathbf{L}_P \mathbf{E}_{in} = \mathbf{L}_P \mathbf{L}_F^K \mathbf{L}_P \mathbf{E}_{in}, \quad (25)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \cos(K\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$I^* = |\mathbf{E}|^2 = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(K\theta)], \quad (27)$$

式中 \mathbf{L}_P 为耦合器的琼斯矩阵, \mathbf{L}_{F1} 为光第一次经过两耦合器中间的衰荡结构的琼斯矩阵, \mathbf{L}_{FK} 为光第 K 次经过衰荡结构的琼斯矩阵。(27)式为检测光强与入射光强的余弦相关式,形式上与(6)式相同,表明环形衰荡结构与直通结构具有相同的稳定性,这是由于环形衰荡结构是在直通式结构基础上改进的,环形衰荡结构保持着直通式结构稳定性较好的优点。此外,由(21)、(27)式可知,环形衰荡式余弦项内的偏转角比反射式大。反射式结构的法拉第偏转角为直通式结构的 5 倍,环形衰荡结构的法拉第偏转角为直通式结构的 $K+1$ ($K>1$)倍,因此理论上表明环形衰荡结构与反射式结构的测量灵敏度都高于直通式结构。由于衰荡结构在直通式结构的基础上引入光纤环,通过光纤环实现了与反射式相类似的传输规律,因此所设计的衰荡结构兼具了较高灵敏度和较好稳定性的优点。

4.3 环形衰荡式光路结构的实验验证

环形衰荡式全光纤电流传感器结构的实验系统如图 12 所示。该实验系统包括 ASE 宽带光源 (CONQUER KG-ASE)、强度调制器 (KG-AM-15)、信号发生器 (33250A)、环形光纤衰荡腔、光电探测器 (KG-PR-200M) 和示波器 (MSO-X-4154A)。环形光纤衰荡腔由两个分光比为 99.5:0.5 的光纤耦合器、光纤电流传感头、掺铒光纤放大器 (EDFA)、可调衰减器、一根长度约为 2000 m 的光纤跳线和若干光纤法兰盘组成。环形衰荡式光路实验系统的实物图如图 13 所示。

根据光纤环形腔衰荡原理,基于腔衰荡理论,实验系统输出的用于探测的信号为一系列强度呈指数形式衰减的脉冲信号,传感中需要的信息为所测得的脉冲信号的衰荡时间。利用寻峰、峰值拟合和衰荡时间估算等方法处理实验数据。

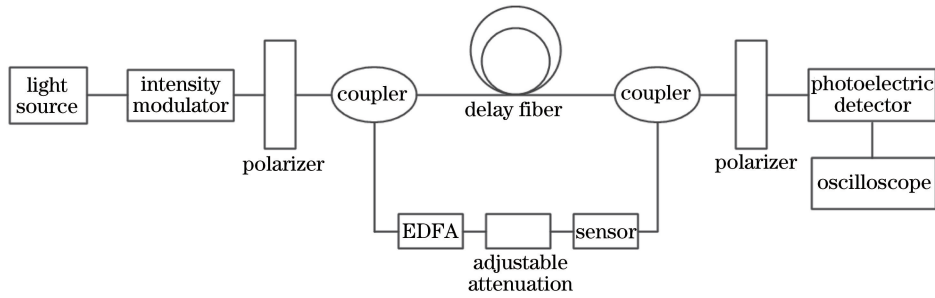


图 12 环形衰荡式全光纤电流传感器的实验系统示意图

Fig. 12 Experimental system diagram of loop ring-down all-fiber current sensor

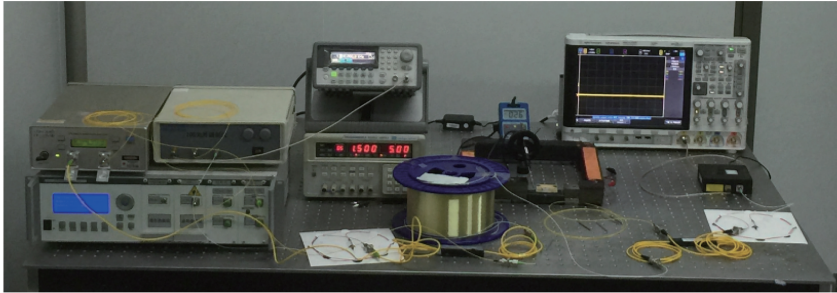


图 13 环形衰荡式全光纤电流传感器实验系统实物图

Fig. 13 Physical map of experimental system of loop ring-down all-fiber current sensor

为了方便处理数据,实验过程中将脉冲宽度设为 100 nm,所获得的衰荡信号可以直接采用 Origin 软件中自带的寻峰程序进行寻峰。寻峰过程中,将第一个信号峰值的 10% 作为寻峰起点,得到不同电流下系统输出的衰荡信号,并对实验结果进行寻峰处理。采用双指数模型($y = ae^{bx} + ce^{dx}$, a, b, c, d 为系数)进行曲线拟合,模型中第一项表征光脉冲信号在纤芯中的衰减,第二项表征光脉冲信号在包层中的衰减。拟合结果如图 14 所示,拟合得到的系数 b 通常比系数 d 高 1~2 个数量级,因此在估算衰荡时间时只将拟合方程中的第一项作为研究对象。

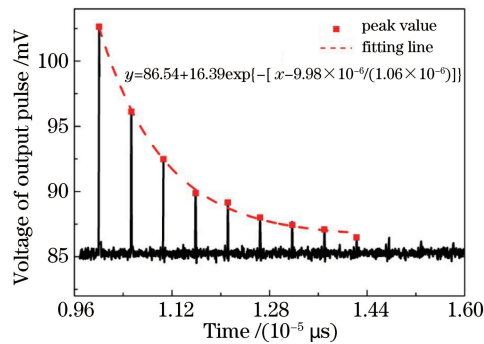


图 14 拟合结果

Fig. 14 Fitting result

在 0~500 A 电流范围内,实验随机选取 8 个不同的电流值进行了测量,存储相应的实验数据。按照上述寻峰拟合方法,对实验数据进行处理。对不同电流强度下测得的衰荡信号进行拟合,拟合结果如图 15 所示。可以看出,电流越大,光信号衰减越快。根据衰荡时间估算方法,计算得到衰荡时间随电流大小的变化曲线,即接收信号改变量和待测直流电流的关系,如图 16 所示。从图 16 可以看出,输出信号与待测直流电流基本呈线性关系。通过线性拟合,得到的拟合方程为 $y = -0.0067x + 14.4647$,系统的灵敏度(平均斜率)为 6.7 ps/A,拟合结果与测量值之间的相对误差小于 0.2%,满足国家规定的仪表准确度等级要求。

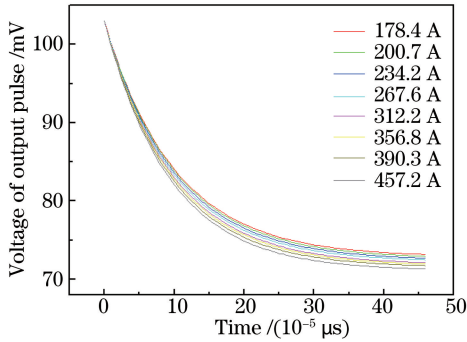


图 15 不同电流强度下衰荡信号的拟合曲线

Fig. 15 Fitting curves of ring-down signals under different current intensity

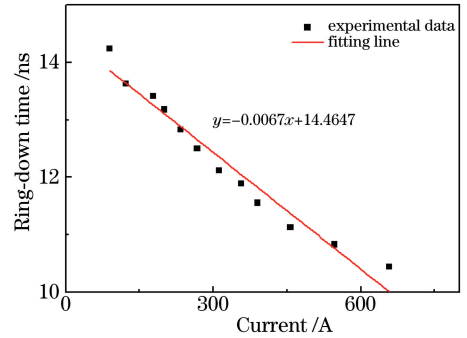


图 16 衰荡时间随电流强度的变化

Fig. 16 Relationship between ring-down time and current intensity

5 结 论

针对全光纤电流传感器测量灵敏度低和系统长期运行稳定性差的问题,基于琼斯矩阵的方法系统分析了直通式、反射式光路结构,利用 OptiSystem 软件搭建了全光纤电流传感器的系统模型,得到如下结论。

- 1) 直通式系统的灵敏度取决于法拉第旋转角 θ ,反射式系统的灵敏度取决于 4θ 。
- 2) 仿真得到直通式和反射式光路系统的线性灵敏度分别为 0.24 和 0.37。
- 3) 直通式结构长期运行稳定性较好,但测量灵敏度低;反射式结构的测量灵敏度较高,但长期运行稳定性较低。
- 4) 分析光纤环形衰荡结构的光路改进方案,发现光纤环形衰荡结构与直通式结构具有相同的稳定性,并且灵敏度为法拉第旋转角的 K 倍($K > 1$),高于直通式结构的灵敏度。
- 5) 光纤环形衰荡结构具有较高的灵敏度和较好的稳定性,将基于强度探测的方法转变为基于时间探测的方法,从而消除了光源波动对探测结果的影响。搭建了光纤环衰荡的直流电流互感实验系统,实验输出信号与待测直流电流呈线性关系,系统的灵敏度为 6.7 ps/A,拟合结果与测量值之间的相对误差小于 0.2%。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y, Ma Y, Xing F H. A prototype optical fibre direct current sensor for HVDC system[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2016, 38(1): 55-61.
- [2] Geng Jianping, Yang Jian, Yang Hualei. Secondary-side signal processing of fiber-optic current transducer based on LTC1068[J]. Electronic Science and Technology, 2012, 25(3): 69-71.
耿建平, 杨 键, 杨华蕾. 基于 LTC1068 光纤电流互感器的二次测信号处理[J]. 电子科技, 2012, 25(3): 69-71.
- [3] Ricardo M S, Hugo M, Ivo N, *et al.* Current sensing techniques: a review[J]. Applied Science, 2012, 2: 602-628.
- [4] Li B J, Li L J. An overview of the optical current sensor[C]. IEEE International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, 2012, 161: 202-206.
- [5] Katsukawa H, Ishikawa H, Okajima H, *et al.* Development of an optical current transducer with a bulk type Faraday sensor for metering[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 702-707.
- [6] Dai Yutang, Zhou Guangfu, Li Tao, *et al.* Fiber optic magnetic field sensor based on femtosecond laser micromachining[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1206001.
戴玉堂, 周广福, 李 涛, 等. 基于飞秒激光加工的光纤磁场传感器[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1206001.
- [7] Wang Q, Xia J, Liu X. A novel current sensor based on magnetic fluid and fiber loop cavity ring-down technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11): 6192-6198.
- [8] Liu Shuo, Yang Yuanhong, Chen Yuxuan. Phase interrogation algorithm with high resolution for hybrid Sagnac interferometers[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1005006.
刘 硕, 杨远洪, 陈宇轩. 混合 Sagnac 干涉仪高分辨率相位解调算法[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1005006.
- [9] Sasaki K, Takahashi M, Hirata Y. Temperature-insensitive Sagnac-type optical current transformer[J]. Journal of

Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2463-2467.

- [10] Yuan D L, He Z, Wang H Y, *et al.* Theoretical modeling and error analysis for reflection structure fiber optical current transformer[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 511(512): 178-184.
- [11] Wang Jiejun, Yang Jie, Li Shuang, *et al.* Measurement error analysis of bidirectional reflectance distribution functions [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0312004.
王杰军, 杨 杰, 李 双, 等. 偏振二向反射分布函数测量误差分析[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0312004.
- [12] Xu Shiqing, Dai Shixun, Zhang Junjie, *et al.* Recent progress of all-fiber current sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(1): 41-44.
徐时清, 戴世勋, 张军杰, 等. 全光纤电流传感器研究新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(1): 41-44.
- [13] Shen T, Tang M, Wei X L, *et al.* Performance of all fiber optical current transducer in optical transmission based on OptiSystem[C]. International Conference on Optoelectronics and Microelectronics, 2013: 13829590.
- [14] Shen T, Feng Y, Liu Y P, *et al.* Simulation of polarization errors for all-fiber optical current sensors [C]. 8th International Conference on Future Generation Communication and Networking, 2014: 100-103.
- [15] Wang C J, Scherrer S T. Fiber loop ringdown for physical sensor development: pressure sensor[J]. Applied Optics, 2004, 43(35): 6458-6464.
- [16] Wang C J. Fiber loop ringdown - a time-domain sensing technique for multi-function fiber optic sensor platforms: current status and design perspectives[J]. Sensors, 2009, 9: 7595-7621.
- [17] Weather H, Litman J, Cheung A H, *et al.* Chemical sensing using fiber cavity ring-down spectroscopy[J]. Sensors, 2010, 10: 1716-1742.